

И. О. УПАШЕВ

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

‘IQTISOD-MOLIYA’

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

Навонийский государственный горный институт

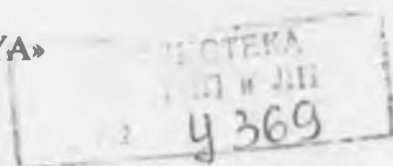
65.9(2)23
У-44

И.О. УЛАШЕВ

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Рекомендовано Министерством высшего и среднего
специального образования Республики Узбекистан
в качестве учебного пособия по направлению бакалавриата
5340200 – «Менеджмент (по отраслям)»

Ташкент
«**IQTISOD-MOLIYA**»
2007



Рецензенты: д-р экон.наук, проф. ТГЭУ Н. Хужаев;
д-р экон.наук, проф. БухДУ Б.Н. Навруз-Зода;
канд. экон.наук У.Н. Эльбеков

И.О. Улашев

Разработка управленческих решений: Учебное пособие по направлению бакалавриата «Менеджмент (по отраслям)» / И.О. Улашев; Министерство высшего и среднего специального образования РУз. – Т.: Iqtisod-moliya, 2007. – 112 с.

В учебном пособии рассмотрены основные теоретико-методологические вопросы научно обоснованного принятия управленческих решений в современных условиях, большое место отведено изучению содержания управленческих решений, методов и моделей принятия оптимальных решений в условиях определенности, неопределенности и риску, процесса принятия оперативных и стратегических решений, стадий разработки и реализации решений, организации деловых игр, методики обсуждения проблемных ситуаций, современных информационных систем поддержки принятия управленческих решений.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Менеджмент (по отраслям)» и «Менеджмент (педагог)».

ББК 65.9 (2) 23

ISBN 978-9943-13-034-0

© «IQTISOD-MOLIYA», 2007

© И.О. Улашев, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие науки управления требует использования новых подходов к разработке управленческих решений, базирующихся на использовании современного математического аппарата и средств новой компьютерной техники. При этом появляется возможность использования в полной мере системного подхода при выборе и обосновании управленческого решения.

Овладение богатым арсеналом разработки и принятия управленческих решений является целью этой дисциплины, и послужит формированию знаний и навыков в использовании теоретического и практического материала. В течение обучения дисциплины будут рассмотрены природа и роль решений в системе менеджмента, организация и технология процесса принятия решений, возможности обоснования, оптимизации и прогнозирования их последствий с помощью современных методов моделирования, экспертных оценок и компьютера.

Обучение дисциплины состоит из лекционных, практических (семинаров, лабораторных работ), индивидуальных занятий, самостоятельной работы студентов, и завершается итоговым рейтинговым контролем с выполнением конкретных индивидуальных заданий по данной дисциплине.

Лекционные занятия предназначены для теоретического осмысления и обобщения сложных разделов дисциплины, а практические - для закрепления и более глубокого изучения определенных аспектов лекционного материала на практике.

Индивидуальные занятия предполагают работу каждого студента по индивидуальному (групповому) заданию и личный устный или письменный отчет по нему перед педагогом. Самостоятельная работа является внеаудиторной и предназначена для самостоятельного ознакомления студента с определенными разделами курса по рекомендованным педагогом материалам и подготовки к выполнению индивидуальных заданий по курсу.

1. ФУНКЦИИ РЕШЕНИЯ В МЕТОДОЛОГИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Содержание процесса управления экономикой

Под организационной структурой менеджмента понимается количество и состав звеньев и ступеней управления, их соподчиненность и взаимная связь. Простота и ясность организационной структуры менеджмента является гарантией ее работоспособности, т.е. чем меньше звеньев и ступеней управления в организационной структуре, тем эффективнее само управление.

Звенья управления - это самостоятельные структурные элементы, выполняющие отдельную функцию или несколько функций. Элементы структуры - это органы управления их подразделения и отдельные работники аппарата управления.

Ступени управления - это совокупность определенных звеньев управления на определенном уровне иерархии управления. По этим признакам организационные структуры управления бывают многоступенчатыми, трех- и двухступенчатыми. Связи между звеньями и ступенями структуры могут быть вертикальные и горизонтальные. Вертикальные связи характеризуют связи руководства и подчиненных, горизонтальные - равноправных звеньев и элементов управления.

Органы управления экономикой подразделяются на вышестоящие, нижестоящие и равноправные. Вышестоящие органы управления делятся на республиканские и отраслевые.

Органы общегосударственного управления связывают в единое целое многочисленные отрасли производства и действуют на основе Конституции республики. Органы общегосударственного управления народным хозяйством подразделяются на законодательные, исполнительные и судебные. Высшим законодательным органом является Олий Мажлис Республики Узбекистан. Он утверждает законы, законодательные акты, регулирующие хозяйственную деятельность, рассматривает и утверждает Государственный бюджет и отчеты о его выполнении, организует исполнительные органы управления экономикой.

Исполнительные органы управления экономикой страны включают органы общей, отраслевой и специальной компетенции. К исполнитель-

ным органам общей компетенции относятся Кабинеты Министров Узбекистана и Республики Каракалпакстан, а также местные (областные, районные и городские) хокимияты. Органы специальной компетенции осуществляют функции межотраслевого характера. Например, к ним относятся Министерство экономики, Министерство финансов, Министерство труда и т.п.

В процессе управления экономикой как на макроуровне, так и на микроуровне важное место отводится процедуре (теории) принятия решений.

1.2. Основные понятия теории и схема процесса принятия решений

Одним из основных понятий теории принятия решений (ТПР) является понятие о п е р а ц и и. Под словом «операция» следует понимать организованную деятельность в любой области жизни, объединенную единым замыслом, направленную к достижению определенной цели и имеющую характер повторяемости, т.е. многократности.

Теперь перейдем ко второму важному понятию ТПР — о п е р и р у ю щ а я с т о р о н а. Совокупность лиц и технических устройств, которые стремятся в данной операции к достижению некоторой цели, называется оперирующей стороной. Так, в первом приведенном выше примере оперирующей стороной являются лица, ответственные за принятие решений относительно деятельности предприятий, входящих в состав отрасли, т.е. руководство министерства, в ведении которого находится данная отрасль. Операция является управляемым мероприятием. Оперирующая сторона управляет операцией, выбирая те или иные способы использования ресурсов - способы действий.

Рассмотрим следующее понятие ТПР — и с с л е д о в а т е л ь о п е р а ц и и. В составе оперирующей стороны специально выделяется и занимает особое место исследователь операции или о п е р а ц и о н и с т. Он принадлежит к оперирующей стороне и должен преследовать ту же цель, что и оперирующая сторона. Однако он не принимает окончательных решений по выбору способов действий, а лишь помогает в этом оперирующей стороне, предоставляя ей количественные основания для принятия решений. Иными словами, исследователь операции имеет право не решающего, а лишь совещательного голоса. Естественно, что поэтому он не должен нести ответственности за принятые решения и последствия от реализации предпринятых действий. Такая постановка дела является принципиальной, так как помогает исследователю операции сохранять научную объективность и принципиальность.

В настоящее время еще не выработана единая «технология» ТПР, однако определенная тенденция в этом направлении имеется. На основании анализа и обобщения можно предложить следующий состав «типового» процесса принятия решения:

- 1) предварительное формулирование проблемы;
- 2) определение целей операции и выбор соответствующих критериев оптимальности;
- 3) выявление и формулирование дисциплинирующих условий;
- 4) составление возможно более полного списка альтернатив и предварительный их анализ с целью отбрасывания явно неэффективных;
- 5) сбор необходимой информации и прогнозирование изменений параметров операции в будущем;
- 6) точное формулирование постановки задачи;
- 7) разработка математической модели операции, позволяющей оценивать эффективность каждой альтернативы;
- 8) анализ и выбор метода решения задачи и разработка алгоритма решения;
- 9) оценка альтернатив и определение наиболее эффективных;
- 10) принятие решения ответственным руководителем;
- 11) выполнение решения и оценка результатов.

Процесс принятия решений является сложной итеративной циклической процедурой. В частности, даже практическое опробование принятого решения, если оно дает нежелательный результат, также является стимулом к пересмотру постановки задачи и поиску новых решений.

1.3. Классификация задач принятия управленческих решений

В настоящее время не существует общепринятой универсальной классификационной схемы задач принятия решений (ЗПР). Можно выделить лишь отдельные важные классификационные признаки, а именно:

1. Количество целей операций, преследуемых одной оперирующей стороной, и соответствующих целям критериев оптимальности.
2. Наличие или отсутствие зависимости критерия оптимальности и дисциплинирующих условий от времени.
3. Наличие случайных и неопределенных факторов, влияющих на исход операции.

По первому классификационному признаку ЗПР делятся на два больших класса: одноцелевые или однокритериальные (скалярные) и многоцелевые или многокритериальные (векторные).

По второму — делятся на два больших класса: статические и динамические ЗПР. В статических ЗПР критериальная функция

и функции ограничений не зависят от времени. Динамические задачи сложнее статических. Динамические задачи отличаются две характерные особенности:

1. В качестве критерия оптимальности в динамических ЗПР выступает обычно не функция, как в статических ЗПР, а функционал, зависящий от функций времени, описывающих поведение некоторых динамических объектов, участвующих в операции.

2. В составе дисциплинирующих условий в динамических ЗПР обычно присутствуют так называемые дифференциальные связи. Они представляют собой дифференциальные уравнения, описывающие поведение динамических объектов, участвующих в операции.

По третьему классификационному признаку - «определенность - риск неопределенность» - ЗПР делятся на три больших класса:

1. Принятие решений при определенности или, иначе, детерминированные ЗПР. Они характеризуются однозначной, детерминированной связью между принятым решением и его исходом. Это наиболее простой и наиболее изученный случай принятия решений, когда относительно каждой стратегии оперирующей стороны заранее, до проведения операции известно, что она неизменно приводит к некоторому конкретному результату. В детерминированных ЗПР критерий оптимальности и дисциплинирующие условия зависят только от стратегий оперирующей стороны и фиксированных детерминированных неконтролируемых факторов, т.е. факторов, полностью известных оперирующей стороне.

2. Принятие решений при риске или, иначе, стохастические ЗПР. В этом случае каждая стратегия оперирующей стороны может привести к одному из множества возможных исходов, причем каждый исход имеет определенную вероятность появления. Предполагается, что принимающему решение эти вероятности заранее, до проведения операции, полностью известны (во всяком случае, могут быть определены с любой требуемой для целей исследования степенью точности). В стохастических ЗПР критерий оптимальности зависит кроме стратегий оперирующей стороны и детерминированных факторов также от фиксированных стохастических факторов, т.е. от случайных факторов, законы распределения которых известны оперирующей стороне.

Статические характеристики (законы распределения, математические ожидания, дисперсии и т.п.) стохастических факторов, а также значения детерминированных факторов являются той исходной информацией, которая может быть использована исследователем операции при определении оптимальной стратегии. Первое из приведенных на-

званий рассматриваемого класса ЗПР - «принятия решений при риске» - связано со следующими обстоятельствами. Несмотря на то что все случайные явления и процессы, сопровождающие операцию и влияющие на ее исход, хорошо изучены и все их необходимые статические характеристики полностью известны, исход каждой конкретной реализации операции заранее неизвестен, случаен. В этом смысле оперирующая сторона всегда рискует получить не тот результат, на который она ориентируется, выбирая свою оптимальную стратегию в расчете на осредненные, статические характеристики случайных факторов.

3. **Принятие решений в условиях неопределенности.** В данных ЗПР критерий оптимальности зависит кроме стратегий оперирующей стороны и фиксированных факторов также от неопределенных факторов, неподвластных оперирующей стороне и неизвестных ей в момент принятия решения (или известных с недостаточной для принятия решения точностью). В результате влияния неопределенных факторов каждая стратегия оперирующей стороны оказывается связанной со множеством возможных исходов, вероятности которых либо неизвестны оперирующей стороне, либо все не имеют смысла. Первое соответствует неопределенным факторам стохастической природы (т.е. недостаточно изученным стохастическим факторам, относительно которых отсутствует необходимая статистическая информация), второе - неопределенным факторам не стохастической природы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается содержание процесса управления экономикой?
2. Что подразумевается под цикличностью процесса принятия решений?
3. Что понимается под понятиями «операция», «оперирующая сторона» и «операционист»?
4. Из чего состоит «типовой процесс» принятия решений?
5. Каким образом классифицируются задачи принятия управленческих решений?

2. ТИПОЛОГИЯ, УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

2.1. Сущность управленческих решений и их классификация

Эффективность управленческой деятельности во многом зависит от правильности принятия решения. Поэтому управленческая деятельность всегда связана с конкретным решением целого ряда вопросов и проблем, так как руководитель любого ранга осуществляет возложенные на него производственные, технические, социальные, экономические, маркетинговые и правовые функции путем подготовки, принятия и организации выполнения решений. Взаимосвязь решаемых проблем учитывается любым руководителем и находит свое отражение как в методах его руководства, так и в структуре управления, во всей управленческой деятельности. Значение решений в управлении экономикой определяется многими объективными по природе и характеру факторами. Важнейшие из них многообразие собственности на средства производства; углубление разделения и специализации труда и производства; усложнение управления трудовыми и материально-техническими ресурсами; расширением межотраслевых, межпроизводственных и внутрипроизводственных связей; создание совместных предприятий; повышение требований к организации производственных процессов; внедрение маркетинга; выход предприятий и отраслей на внешнеэкономические связи; увеличение риска принятия управленческих решений.

Управленческое решение в широком смысле - это форма согласования материальных и духовных потребностей общества с реальными возможностями их удовлетворения. Применительно к экономике республики управленческим решением является гамма сознательного и волевого преодоления противоречий, которые возникают между потребностями и возможностями их удовлетворения.

Управленческое решение - это также программа работ, направленная на определение и реализацию конкретных целей, стоящих перед управляемым объектом. Это одновременно и директивный акт, и комплексный социально-экономический акт, организующий, направляющий и стимулирующий совместные действия десятков, сотен и тысяч людей, отражающий их интересы и потребности, максимальное удовлетворение которых является целью развития нашего общества.

Отсюда постоянно растущие требования к обоснованности и организованности этих действий.

Управленческое решение — это результат конкретной управленческой деятельности менеджера. Принятие решений является основой управления. Выработка и принятие решений — это творческий процесс в деятельности руководителя любого уровня, включающий:

- выработку и постановку цели;
- изучение проблемы на основе полученной информации;
- выбор и обоснование критериев эффективности (результативности) и возможных последствий принимаемого решения;
- обсуждение со специалистами различных вариантов решения проблемы (задачи);
- выбор и формулирование оптимального решения;
- принятие решений;
- конкретизация решения для его исполнителей.

Выработка и принятие решения — узловая процедура в деятельности руководителя, которая определяет весь дальнейший ход процесса управления. Решение связано с анализом возникшей ситуации условий, ее породивших, требует подготовки ряда альтернатив — вариантов и выбора оптимального из них. Управленческие решения принимаются по различным вопросам на всех уровнях, поэтому их классификация имеет важное теоретическое и практическое значение.

Технология менеджмента рассматривает принятие управленческих решений как процесс, состоящий из трех стадий:



На стадии *подготовки управленческих решений* проводится экономический анализ ситуации на микро- и макроуровне, включающий поиск, сбор и обработку информации, а также выявляются и формулируются проблемы, требующие решения.

На стадии *принятия решения* осуществляется разработка и оценка альтернативных решений и курсов действий, проводимых на основе многовариантных расчетов; отбор критериев выбора оптимального решения; выбор и принятие наилучшего решения.

На стадии *реализации решения* принимаются меры для конкретизации решения и доведения его до исполнителей; вносятся необходимые коррективы и дается оценка полученного результата от выполнения

решения. Каждое управленческое решение имеет свой конкретный результат, поэтому целью управленческой деятельности является нахождение таких форм, методов, средств и инструментов, которые могли бы способствовать достижению оптимального результата в конкретных условиях и обстоятельствах.

Управленческие решения могут быть обоснованными, принимаемыми на основе экономического анализа и многовариантного расчета, и интуитивными, которые, хотя и экономят время, но содержат в себе вероятность ошибок и неопределенность.

Принимаемые решения должны основываться на достоверной, текущей и прогнозируемой информации, анализе всех факторов, оказывающих влияние на решение, с учетом предвидения его возможных последствий.

С точки зрения повышения эффективности управленческой деятельности выделяют следующие виды управленческих решений: стратегические и оперативные.

Стратегические решения - это перспективно-принципиальные решения, которые принимаются в связи с необходимостью определить направление, цели и задачи дальнейшего развития соответствующих объектов. В условиях рыночной экономики стратегические решения становятся главным инструментом качественных перемен как в организации производства, новом подходе к экономическим и социальным проблемам, так и во всем хозяйственном механизме. Стратегические решения, принимаемые на уровне предприятий, региона, отрасли, призваны практически реализовать курс на улучшение экономического и социального развития общества за счет качественно новых источников.

Оперативные решения - это по сути хозяйственно руководящие решения. Они принимаются по текущим частным проблемам, чтобы поддержать процесс бесперебойного функционирования управляемого объекта, т.е. поддержать его сложившийся механизм, не изменяя структуры и взаимосвязи. Эти решения руководитель принимает довольно быстро, без особой подготовки. К таким решениям можно отнести приказы о приеме и увольнении работников, их заработной плате, о подготовке предприятия к зиме и т.д. По сфере действия управленческие решения можно подразделить на экономические, организационные, социальные, технические и технологические.

Управленческие решения подразделяются также по уровню управления, которые решаются на уровне мастера, начальника участка, начальника цеха, начальника производства, директора предприятия, объединения, министра.

По направлению воздействия решения бывают внешние и внутренние. Внешние решения направлены на другие уровни, внутренние - охватывают лишь отдельные подразделения или предприятия.

По функциональному содержанию управленческие решения делятся на экономические, организационные, координационные, стимулирующие, регулирующие и контрольные.

По организации разработки управленческие решения могут подразделяться на единоличные, коллегиальные и коллективные. Единоличные решения разрабатываются и принимаются руководителем без согласования и обсуждения их в коллективе или с отдельными лицами. Чаще всего это оперативные решения, не затрагивающие принципиальных проблем развития производства. Коллегиальные решения разрабатываются и принимаются совместно группой специалистов и соответствующих руководителей, обычно требуют серьезной подготовки и имеют многостороннее содержание. Коллективные решения разрабатываются на общих собраниях всеми их участниками независимо от занимаемой должности или характера работы. Такие решения принимаются при рассмотрении спорных вопросов производства.

По типу работы решения делятся на стандартные и нестандартные. Стандартные (иногда называемые программируемыми) - это решения, в отношении которых отработана структура самого решения и процедура его принятия. Среди программируемых решений есть такие, стандартизация которых достигла той стадии, когда их можно описать в виде математических моделей, т.е. появляется возможность возложить значительную часть технической работы на ЭВМ (прогноз развития, автоматизация управления хлопкозаводами будущего). Нестандартные решения - это наиболее сложные обособленные решения. Отличаются они большим простором для творческого подхода к решаемой проблеме. Творческое решение всегда опирается на прогрессивное, новое. При более глубоком анализе эти идеи оказываются не такими уж и новыми, если их разбить на несколько отдельных проблем, хорошо поддающихся стандартизации. Остается 2-3 действительно новых вопроса, которые требуют сугубо творческого подхода (например, разработка мероприятий по комплексному развитию производства).

2.2. Требования, предъявляемые к управленческим решениям

В условиях рыночных отношений управленческое решение остается главным фактором менеджмента, в котором концентрируются и пересекаются все проблемы экономического и социального развития

предприятий, регионов, отраслей с учетом самоуправления трудовых коллективов.

Использование преимущественных экономических методов не исключает применение управленческих решений, воплощающих в себе разум, опыт и волю руководителя, а наоборот, повышает требования к их качеству. На эффективность управленческих решений оказывает влияние большое количество факторов, а именно:

- личностные качества руководителя или группы, организующий орган управления (профессиональная подготовка, образовательный уровень);
- информационное обеспечение процесса выработки решения;
- факторы организационного характера (привлечение специалистов к выработке решения, система методов и форма доведения принятого решения до исполнителей, система контроля и т.д.);
- технические факторы (использование технических средств, ЭВМ и т.д.);
- временные факторы разработки, принятия и реализации решения.

Исходя из этого, основными требованиями, предъявляемыми к управленческим решениям, являются:

- 1) демократичность принимаемых решений;
- 2) научная обоснованность;
- 3) правомочность, единство распорядительства;
- 4) четкая направленность;
- 5) краткость и конкретность во времени;
- 6) оперативность исполнения решений.

2.3. Типовая задача о планировании производства

Постановка задачи. Намечается выпуск двух видов костюмов - женских и мужских. На женский костюм требуется 1 м шерсти, 2 м лавсана и 1 человеко-день трудозатрат, на мужской костюм - 3,5 м шерсти, 0,5 м лавсана и 1 человеко-день трудозатрат. Всего имеется 280 м шерсти, 240 м лавсана и 150 человеко-дней трудозатрат. По плану предусматривается выпуск не менее 110 костюмов, причем необходимо обеспечить прибыль не менее 1400 д.е.

Требуется определить оптимальное число костюмов каждого вида, обеспечивающее максимальную прибыль, если прибыль от реализации женского костюма составляет 10 д.е., а от мужского - 20 д.е.

Тогда исходные данные задачи можем свести в виде следующей таблицы.

Таблица
исходных данных задачи

Ресурсы и показатели	Нормы расхода ресурсов на производство единицы костюма		Вид ограничения	Наличные объемы ресурсов (показ.)
	Жен.(X)	Муж.(У)		
Шерсть, м	1	3,5	$\leq$	280
Лавсан, м	2	0,5	$\leq$	240
Труд, человеко-день	1	1	$\leq$	155
Выпуск костюмов, шт.	1	1	$\geq$	110
План прибыли, д.е.	10	20	$\geq$	1400
Прибыль от реализации единицы готовой продукции, д.е.	10	20	$\rightarrow$	max

Решение. Пусть X - число женских костюмов, а Y - число мужских. Прибыль от реализации женских костюмов составляет $10 X$ д.е., а от реализации мужских $20 Y$ д.е., т.е. необходимо максимизировать целевую функцию

$$F = f(X, Y) = 10X + 20Y.$$

При этом расход шерсти составляет $1,0 X + 3,5 Y$, лавсана $2,0 X + 0,5 Y$, трудовых ресурсов $1,0 X + 1,0 Y$. Поэтому ограничения задачи имеют вид

- (1) $X + 3,5 Y \leq 280$;
- (2) $2,0 X + 0,5 Y \leq 240$;
- (3) $X + Y \leq 150$;
- (4) $X + Y \geq 110$;
- (5) $10 X + 20 Y \geq 1400$.

Первые три неравенства описывают ограничения по ресурсам, четвертое и пятое - соответственно, плановое задание по общему числу костюмов и ограничение по прибыли.

Графическое решение. Поскольку задача двумерная, решим ее графически. Система ограничений - неравенств определяет многоугольник области допустимых решений (рис. 2.3.1). Определим полуплоскости, задаваемые неравенствами-ограничениями задачи. Для этого построим прямые, заменив в ограничениях знаки неравенств на знаки равенств. Чтобы выяснить, какую часть плоскости описывает неравенство, подставим в него пробную точку, например, $(0,0)$ и установим, удовлетворяет ли она неравенству. Если неравенство удовлетворяется, то иско-

мая полуплоскость включает точку $(0,0)$. В противном случае берут другую полуплоскость.

Линии неравенств и целевой функции имеют следующие парные координатные точки (А, В):

- (1) - $A_1(0,80)$ и $B_1(100,51)$;
- (2) - $A_2(100,80)$ и $B_2(105,30)$;
- (3) - $A_3(30,120)$ и $B_3(120,30)$;
- (4) - $A_4(0,110)$ и $B_4(110,0)$;
- (5) - $A_5(0,70)$ и $B_5(80,30)$;
- (F) - $A_F(0,0)$ и $B_F(10,-5)$.

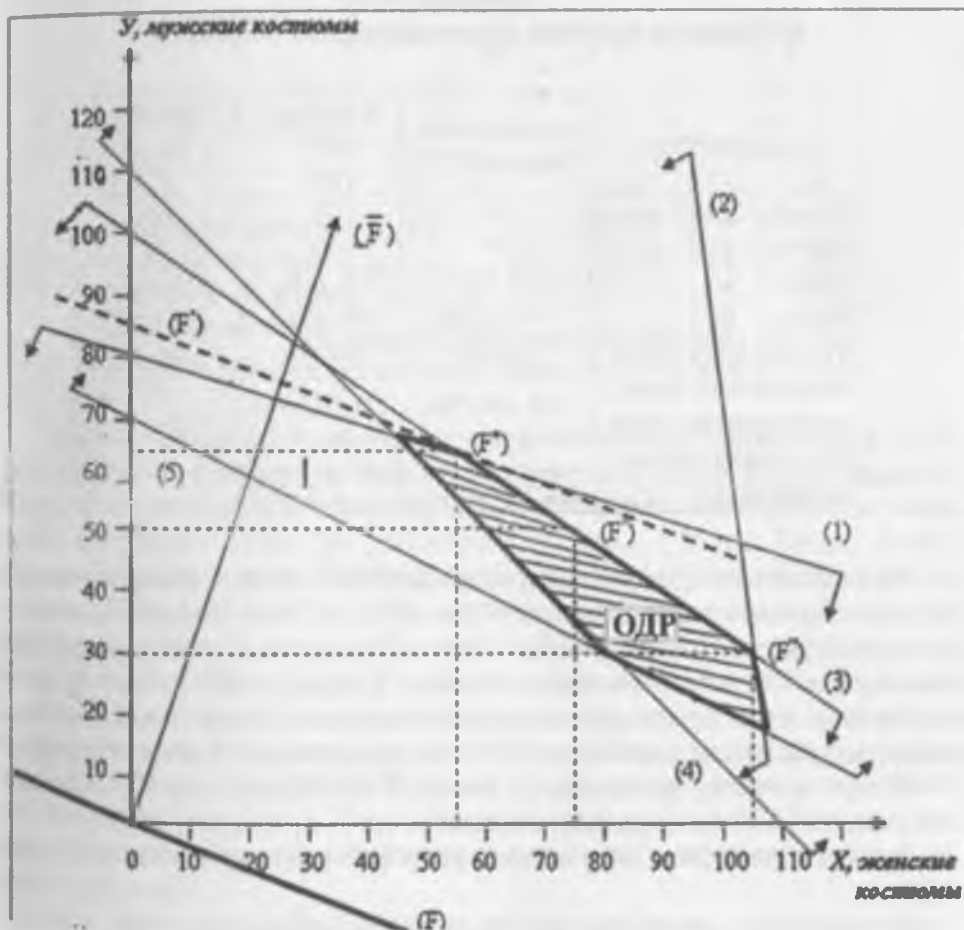


Рис. 2.3.1. Схема графического решения задачи планирования производства

Первое неравенство: прямую (1), задаваемую уравнением $X+3,5Y=280$, строим по точкам $A_1(0;80)$ и $B_1(105;50)$;

Второе неравенство: прямую (1), задаваемую уравнением $2X+0,5Y=240$, строим по точкам $A_2(100;80)$ и $B_2(110;40)$;

Третье неравенство: прямую (1), задаваемую уравнением $X+1,5Y=150$, строим по точкам $A_3(30;120)$ и $B_3(120;30)$;

Четвертое неравенство: прямую (1), задаваемую уравнением $X+Y=110$, строим по точкам $A_4(0;100)$ и $B_4(105;50)$;

Пятое неравенство: прямую (1), задаваемую уравнением $10X+20Y=1400$, строим по точкам $A_5(0;70)$ и $B_5(80;30)$.

**Таблица
результатов решения задачи (исходный вариант)**

Показатели	Оптимальное решение (F^*)	Близкое к ОП-1 (F')	Близкое к ОП-2 (F'')
Костюм жен., штук	54	75	105
Костюм муж., штук	64	50	30
Шерсть, м	278 (+2)	250 (+30)	210 (+70)
Лавсан, м	140 (+100)	175 (+65)	225 (+15)
Трудозатрат, чел-д.	150 (0)	150 (0)	150 (0)
Выполнение плана производства, штук	118 (100,7%)	125 (101,4%)	135 (102,3%)
Выполнение плана прибыли, д.е.	1850 (103,2%)	1750 (102,5%)	1650 (101,8%)

Тогда из области допустимых решений (ОДР — заштрихованное поле) задачи находим оптимальное решение (F^*), т.е. наибольшее значение целевой функции $F^*=f(X,Y)=10X+20Y=1820$ д.е. при $X^*=54$ шт. женских костюмов и $Y^*=64$ шт. мужских костюмов. Для сопоставления из графика находим также другие два альтернативные решения, близкие к оптимальному решению задачи, т.е. $F'=1750$ д.е. при $X'=75$ шт. женских и $Y'=50$ шт. мужских костюмов, а также $F''=1650$ д.е. при $X''=105$ шт. женских и $Y''=30$ шт. мужских костюмов.

Для сопоставления полученных решений сведем их в следующую таблицу.

Отсюда видна целесообразность организации производства, учитывающая оптимальный план производства как наилучшее управленческое решение.

Следует отметить, что такую задачу можно решить при различных изменениях исходных данных, а именно, при изменениях:

- а) норм расхода ресурсов производства;
- б) уровня прибыльности (рентабельности) производства с учетом конъюнктуры товарного рынка;
- в) наличных (требуемых) объемов ресурсов (показателей).

Таблица
результатов решения альтернативного варианта задачи

Показатели	Оптимальное решение (F^*)	Близкое к ОП-1 (F')	Близкое к ОП-2 (F'')
Костюм жен., штук	105	75	54
Костюм муж., штук	30	50	64
Шерсть, м	210 (+70)	250 (+30)	278 (+2)
Лавсан, м	225 (+15)	175 (+65)	140 (+100)
Трудозатрат, чел.-д.	150 (0)	150 (0)	150 (0)
Выполнение плана производства, штук	135 (102,3%)	125 (101,4%)	118 (100,7%)
Выполнение плана прибыли, д.е.	3000 (214,3%)	2250 (160,7%)	2040 (145,1%)

Пусть, например, в результате маркетингового исследования установлено, что в очередном плановом периоде ожидается изменение прибыли от реализации этих двух видов производства, соответственно: женского костюма - 20 д.е./шт., мужского костюма - 15 д.е. Тогда, проводя измененную линию целевой функции задачи через координатные точки $A_d(0;0)$ и $B_d(10;-13,3)$, из ОДР находим другое оптимальное решение задачи, т.е. наибольшее значение целевой функции $F^*=20X+15Y=3000$ д.е. при $X^*=105$ шт. женских костюмов и $Y^*=30$ шт. мужских костюмов. Для сопоставления этого оптимального решения из графика находим также другие два альтернативные решения, близкие к оптимальному, и сведем их в таблицу результатов решения альтернативного варианта задачи. Таким образом можем решить «Задачу о диете» при следующих примерных исходных данных (попробуйте решить её самостоятельно):

Подобные многомерные задачи решаются также с помощью программного средства «Пакета экономических расчетов (ПЭР)» на персональном компьютере поэтапно:

1. Подготовительный этап (подготовка таблицы исходных данных)
2. Вызов (активизация) «ПЭР» через команду `per.exe`.
3. Ввод условий и исходных данных задачи как «электронная таблица» через меню-программы ППП.
4. Сохранение условий и данных задачи на ВЗУ компьютера.
5. Решение задачи с помощью рабочего меню ППП при различных изменениях.
6. Сохранение на ВЗУ или выдача на печать выбранного (оптимального) варианта решения задачи.

Таблица
исходных данных задачи «О диете»

Питательные вещества, необходимые для организма человека (условные)	Нормы содержания п/в в составе порции блюда		Вид ограничения	Суточный рацион человека, усл.ед.
	Блюдо-1 (X)	Блюдо-2 (Y)		
Витамин В ₁	2	1	≥	4
Витамин В ₄	0	3	≥	6
Витамин В ₆	1	3	≥	9
Витамин В ₁₂	3	2	≥	6
Стоимость одной порции блюда, сум	300	240	→	min

Оптимальное решение задачи: $X^*=0,6$ порция; $Y^*=2,8$ порция;
 $F^*=852$ сума.

Контрольные вопросы

1. Что такое «управленческое решение» в широком и узком смыслах?
2. Как классифицируются управленческие решения?
3. Какие факторы оказывают влияние на эффективность управленческих решений?
4. Какие основные требования предъявляются на эффективность управленческих решений?
5. В чем заключается суть и порядок решения типовой задачи планирования производства?

3. ЦЕЛЕВАЯ ОРИЕНТАЦИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

3.1. Постановка задачи принятия управленческого решения

Содержание задачи принятия решения в самой общей форме может быть представлено в виде модели, содержащей исходные данные и условия решения задачи, а также искомый результат. В модель задачи принятия решения целесообразно включать лишь некоторые отдельные элементы и связи, используемые при нахождении решения. Увеличение числа элементов и связей, как правило, приводит к упрощению их содержания, что снижает эффект системного подхода к решению поставленной задачи.

Построение модели задачи принятия решения позволяет выявить и сформулировать основные элементы и связи данного процесса, а также разработать технологический процесс принятия решения. Структура модели зависит не только от содержания задачи, но и от количества лиц, принимающих решение (ЛПР). Следует различать индивидуальное и групповое ЛПР.

Для индивидуального ЛПР задача принятия решений может быть записана в виде последовательности символов, где слева от вертикальной черты расположены символы, описывающие известные, а справа - неизвестные элементы задачи:

$\langle S_0, T, R, S, Z, O, A, F, K, A_{оп} \rangle,$

где S_0 - проблемная ситуация;
 T - время для принятия решения;
 R - ресурсы, необходимые для принятия решения;
 S - множество альтернативных ситуаций, доопределяющих проблемную ситуацию: $S=(S_1, S_2, \dots, S_n)$;
 Z - множество целей, преследуемых при принятии управленческого решения: $Z=(Z_1, Z_2, \dots, Z_l)$;
 O - множество ограничений: $O=(O_1, O_2, \dots, O_i)$;
 F - функция предпочтения ЛПР;
 A - множество альтернативных вариантов решений: $A=(A_1, A_2, \dots, A_m)$;

К - критерий выбора наилучшего решения;

A_{opt} - наилучшее оптимальное управленческое решение.

В ряде случаев время и ресурсы, необходимые для принятия решения, могут быть неизвестны и определяются во время поиска решения. Тогда их необходимо располагать справа от вертикальной черты.

Рассмотрим элементы задачи принятия решения. Организационной точки зрения, принятию управленческого решения предшествует распорядительный акт, в котором в письменной или устной форме констатируется внешнее или внутреннее воздействие, вызывающее отклонение от заданного режима системы, или необходимость изменения самого режима функционирования. Форма этого акта может быть различной, но неизменным остается его содержание. В нем говорится о возникновении проблемы и формулируется постановка задачи принятия решения.

Постановка задачи принятия решения должна содержать характеристику проблемной ситуации, а также при необходимости другие известные элементы модели задачи. Постановка задачи служит основанием для последующей выработки и принятия соответствующего управленческого решения.

В подавляющем числе реальных экономических задач удается осуществлять только сравнительную оценку решений. Она может носить качественный характер. Тогда все альтернативные варианты решения упорядочиваются по предпочтению. Если сравнительная оценка носит количественный характер, тогда можно сравнивать насколько или во сколько раз одно решение лучше другого. Выбор наилучшего решения производится по критерию К, формулировку которого осуществляет лицо, принимающее решение. Следовательно, задача принятия решения формулируется следующим образом.

В условиях проблемной ситуации S_0 , располагаемого времени Т и ресурсов R необходимо доопределить ситуацию S_0 множеством альтернативных ситуаций S, сформулировать множество целей Z, ограничений O, альтернативных решений A, произвести оценку предпочтений решений и найти наилучшее решение A_{opt} , руководствуясь сформулированным критерием выбора К.

Для группового ЛПР задача принятия решения может быть записана в следующем виде:

$$\langle S_0, T, R, S, Z, O, A, f(F), L, A_{opt} \rangle,$$

где $f(F)$ - функция группового предпочтения, зависящая от вектора индивидуальных предпочтений членов группы $F=(F_1, F_2, \dots, F_d)$, d - количество членов в группе;

L - символ обозначает принцип согласованности индивидуальных предпочтений для формирования группового предпочтения.

Наилучшее согласование определяется выбором соответствующего принципа. Наиболее известным принципом согласования индивидуальных предпочтений, образующим групповое предпочтение, является, например, принцип большинства голосов. В данном случае задача принятия решения формулируется следующим образом. В условиях проблемной ситуации S_0 , располагаемого времени Т и ресурсов R необходимо доопределить ситуацию множеством альтернативных ситуаций S, сформулировать множество целей Z, ограничений O, альтернативных вариантов решений A, произвести индивидуальную оценку предпочтений решений, построить групповую функцию предпочтения $f(F)$ на основе, выбранного принципа согласования L, и найти наилучшее решение A_{opt} , удовлетворяющее групповому предпочтению.

Для организационно-экономических объектов управления, к числу которых принадлежит промышленное предприятие и его структурные единицы, задача принятия управленческих решений имеет следующие особенности.

1. Неизвестные элементы задачи, например, ситуации, цели, ограничения, решения, предпочтения, имеют, прежде всего, содержательный характер и только частично определяются количественно. Количество неизвестных элементов задачи существенно больше, чем известных.

2. Определение неизвестных элементов задачи и нахождение наилучшего решения не могут быть полностью формализованы.

3. Элементы задачи принятия решения описываются характеристиками, часть из которых может быть измерена объективно, а для другой части возможно только субъективное измерение, например, приоритеты целей, предпочтения решений и т.п.

4. В ряде случаев приходится решать задачу в условиях неопределенности, обусловленной неполным описанием проблемной ситуации, невозможностью достаточно точной оценки последствий реализации решения. В этих случаях с логическим мышлением важное значение имеет интуиция руководителей и специалистов, принимающих решение.

5. Принимаемые решения могут непосредственно затрагивать интересы ЛПР и экспертов. Поэтому мотивы их поведения влияют на выбор решения.

Перечисленные особенности подчеркивают отличие задачи управленческого решения от математической задачи нахождения оптимального решения, которая обычно формулируется как задача выбора наилучшего решения из множества заданных решений.

В конечном счете постановка задачи принятия решения должна давать ответы на следующие вопросы:

- в чем сущность проблемы;
- каковы основные факторы и условия возникновения и развития проблемной ситуации (по какой причине и по чьей вине возникла данная ситуация):

- актуальность и срочность решения проблемы;
- степень полноты и достоверности информации о проблемной ситуации;
- каковы возможные последствия от неприятия решения;
- кто должен принимать решение.

На этапе формирования решения выполняются следующие процедуры

- (1) анализ проблемной ситуации;
- (2) формирование целей и ограничений решения;
- (3) формирование и оценка альтернативных вариантов решений.

3.2. Анализ проблемной ситуации

В ходе анализа проблемной ситуации осуществляются следующие операции:

1. Определение объективности существования проблемы. Цель такой операции заключается в том, чтобы установить, есть ли в действительности проблема или она является мнимой.

2. Определение новизны проблемной ситуации. Необходимость выявления возможных прецедентов или аналогий с целью использования прошлого опыта в данной проблемной ситуации. К сожалению, информация об имевших место проблемах и способах их решения в управлении производством хранится в памяти руководителей и специалистов. Документы часто содержат очень скудные сведения о проблемных ситуациях, анализе альтернативных путей их решения, поскольку возникновение проблемы часто обусловлено недостатками в работе, наличием виновников.

3. Установление причины возникновения проблемной ситуации. Выявление причин возникновения проблемной ситуации является важнейшим условием принятия правильного решения. Знание причин позволяет своевременно обнаружить проблему в момент ее зарождения. В этом случае выявляются тенденции, которые ведут к зарождению проблемы. В любой момент слежения за развитием проблемных ситуаций может быть принято решение.

4. Выявление взаимосвязи рассматриваемой проблемы с другими проблемами. Определение таких взаимосвязей позволяет установить причинно-следственную зависимость данной проблемной ситуации и способствует выработке комплексного решения.

5. Определение степени полноты и достоверности информации о проблемной ситуации. Написание объективного сценария развития проблемной ситуации в управлении производством и принятии эффективного решения возможно только в случае, если руководители и специалисты располагают полной и достоверной информацией об этой ситуации. Конкретное управленческое решение принимается на основе анализа специально отобранной для этой цели информации. Многие авторы работу с информацией выделяют в самостоятельную стадию технологического процесса принятия решения. Текущий анализ информации позволяет судить о наличии или отсутствии отклонений от заданных параметров производственного процесса, а также обнаружить ту или иную назревающую проблему. Поэтому без конкретного анализа имеющейся у ЛПР информации обойтись нельзя.

6. Определение степени разрешимости проблемы. На первом этапе формирования решения важно знать хотя бы приблизительно возможность решения проблемы. Нет смысла заниматься разработкой решений для явно неразрешимой проблемы. Это сложная, но разрешимая задача. Главным инструментом ее решения является интуиция лица, принимающего решение.

3.3. Формирование целей и ограничений решения

Процесс принятия решения представляет собой выбор одного из возможных вариантов достижения цели, а само управленческое решение - определенный вариант (способ) достижения цели, признанный в данных конкретных условиях оптимальным (рациональным). При этом следует заметить, что «оптимальность» выбранного варианта в большинстве случаев является условной.

В управление производством всякая цель уже содержит в себе в скрытом виде критерии поиска решения. Например, когда цель заключается в повышении качества продукции, то критерием решения может быть улучшение параметров изделия, характеризующих его потребительские качества и научно-технический уровень.

Следовательно, цель принимаемого решения уже известна на стадии постановки задачи при наличии проблемной ситуации. Тем не менее, после анализа проблемной ситуации возникает необходимость уточнить ранее намеченную цель. Она обусловлена рядом причин.

Во-первых, формулировка целей в конкретной проблемной ситуации позволяет четко определить желаемые результаты решения и увязать их с конечными целями предприятия.

Во-вторых, анализ проблемной ситуации может показать необходимость изменения промежуточных и конечных целей деятельности предприятия и его структурных подразделений.

В-третьих, более тщательная проработка целей способствует поиску многоцелевого решения, что экономит время и ресурсы по сравнению с несколькими одноцелевыми (однокритериальными) решениями в управлении производством.

В-четвертых, приобретение опыта в структуризации целей работниками аппарата управления позволяет перейти от ситуационного к программно-целевому управлению, особенно в таких областях производственно-хозяйственной деятельности, как перспективное и текущее технико-экономическое и социальное планирование, управление технической подготовкой производства, материально-техническим обеспечением, капитальным строительством, финансовой деятельностью, маркетингом и т.п.

При формировании целей решения необходимо учитывать основные направления деятельности предприятия:

- научно-техническое развитие;
- производственно-технологическое совершенствование;
- организационно-экономические и социальные условия;
- охрана труда и окружающей среды.

3.4. Формирование и оценка управленческих решений

Выводы и оценки, сделанные на этапе анализа проблемной ситуации, вполне достаточны для того, чтобы найти несколько вариантов решения поставленной задачи. Поэтому цель данного этапа состоит в нахождении как можно более полной совокупности альтернативных вариантов решений, т.е. способов достижения поставленных в решении целей.

Процедура поиска альтернативных вариантов решения сводится к выполнению следующих операций:

1. Определение возможной области и характера решения. Область — это конкретная подсистема управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятия: техническое руководство; управление экономической деятельностью; управление материальными ресурсами; управление кадрами и социальным развитием; общее руководство; линейное управление и оперативное управление производством.

2. Определение типа решения. Тип решения зависит от характера проблемной ситуации, для разрешения которой формулируется реше-

ние. Есть два типа проблемных ситуаций: а) с четко выраженной структурой; б) обладающие слабой структурой. В удовлетворительно структурированных проблемах решение находится целенаправленным выбором из числа стандартных решений с учетом цели, риска, количества и качества имеющейся информации о проблемной ситуации.

3. Поиск «крайних» вариантов решения. Ими являются наилучшее и наихудшее для данных условий решения. В качестве крайних решений можно рассматривать вариант бездействия и достижение целей любой ценой.

4. Формулирование альтернативных вариантов решений, расположенных между «крайними» вариантами. Необходимость нескольких альтернативных вариантов решения обусловлена требованием повышения эффективности искомого решения. Здесь уместен вопрос о том, сколько же альтернативных вариантов решения должно быть. Ведь в практике управления производством очень часто рассматривается только один вариант решения.

5. Оценка вероятности реализации альтернативных вариантов решений. Процесс формирования альтернативных вариантов решений и оценка возможности их реализации — это единый процесс. В нем ЛПР и эксперты производят предварительную оценку решений исходя из степени достижения целей, ограничений и возможности реализации с учетом обусловленных проблемой ситуацией факторов. Это позволяет сразу исключить явно неприемлемые варианты, оставляя лишь те, которые могут быть в дальнейшем реализованы.

6. Качественное и количественное описание преимуществ и недостатков всех вариантов решений. Описание преимуществ и недостатков следует производить с учетом следующих критериев: а) степени достижения поставленных в решении целей; б) удовлетворения сформулированным ограничениям; в) вероятности реализации и г) ожидаемых прямых и косвенных последствий.

7. Сравнительная оценка альтернативных вариантов решений. Техноэкономическое обоснование решений представляет собой абсолютную оценку предпочтений каждого решения в отдельности. Однако для выбора единственного решения важно иметь сравнительную оценку всех вариантов, которая позволяет судить, насколько или во сколько раз одно решение лучше другого, или установить относительную ценность решений.

3.5. Выбор управленческого решения

Этап поиска позволит структурировать задачу принятия решения, сформулировать различные гипотезы развития событий (сценарии), определить цели, ограничения, альтернативные варианты решений, что,

в свою очередь, дало возможность уменьшить неопределенность и вплотную полойти к выбору единственного рационального решения.

Этап поиска решения является наиболее трудоемким, поскольку здесь проводится большая информационная работа: сбор, регистрация и подготовка информации; обработка, прием и передача информации и т. п. Однако наиболее ответственным, хотя и менее трудоемким является этап выбора единственного решения. Основная работа на этом этапе выполняется ЛПР, которое должно осмыслить всю собранную и обработанную ранее информацию и на ее основе сделать выбор. Поэтому работа ЛПР характеризуется большим напряжением, эмоциональной нагрузкой, ответственностью.

На этапе выбора решения выполняются следующие операции:

1. Определение допустимых (приемлемых) решений. Данная операция выполняется путем последовательного сужения множества найденных на этапе поиска альтернативных вариантов решений до подмножества допустимых решений.

2. Определение эффективных решений. Решение называется эффективным, если не существует более предпочтительного с точки зрения выбранного критерия решения. Поэтому сужение множества допустимых решений до подмножества эффективных решений осуществляется на основе выбора и анализа предпочтений.

3. Выбор единственного решения. Выбор единственного решения из множества эффективных в силу несравнимости последних может быть осуществлен только с привлечением дополнительной информации, которая позволяет всесторонне оценить цели и показатели их достижения.

Контрольные вопросы

1. Какова цель построения модели задачи принятия решений?
2. Как формируется постановка ЗПР для индивидуального и группового ЛПР?
3. Какие особенности имеют ЗПР для организационно-экономических объектов управления?
4. Какие операции осуществляются в ходе анализа проблемной ситуации?
5. В чем заключается суть процедуры формирования целей и ограничений ЗПР?
6. Какие операции выполняются в процедуре поиска альтернативных вариантов управленческого решения?
7. Какие операции проводятся на этапе поиска и выбора решения?

4. ВЫБОР УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СЛОЖНЫХ СИТУАЦИЯХ

4.1. Проблемы уникального выбора решения в сложных ситуациях

Процессы принятия решений, понимаемые как выбор одной из нескольких возможных альтернатив, пронизывают всю человеческую жизнь. Большинство решений принимается не задумываясь, так как существует автоматизм поведения, выработанный многолетней практикой. Есть решения, которым мы придаем малое значение, и поэтому мало задумываемся при выборе. И, наконец, существуют проблемы выбора, решая которые, человек испытывает мучительные раздумья. Как правило, эти проблемы имеют исключительный неповторяющийся характер и связаны с рассмотрением целого ряда альтернатив. В таких проблемах новым является либо объект выбора, либо обстановка, в которой совершается выбор. Такие проблемы принятия решений называются проблемами уникального выбора.

Существует множество различных проблем уникального выбора решения. Прежде всего выделим проблемы, в которых в принципе может быть найдено рациональное, понятное другим людям изложение причин, приведших к выбору одной из альтернатив (заметим, что многие человеческие, «житейские» проблемы выбора не попадают под это определение). Наиболее характерными проблемами рационального выбора являются проблемы, возникающие перед людьми, работающими в разных административных службах, при управлении организациями и совокупностью организаций. Любой сотрудник административного аппарата обязан быть рациональным хотя бы для того, чтобы иметь возможность объяснить другим логические основания своего выбора.

Проблемы рационального выбора в уникальных ситуациях, характерных для административной деятельности (выбор плана капиталовложений, выбор проектов проведения научных исследований и разработок, выбор плана производства изделий, выбор перспективного плана развития предприятия и др.), всегда интересовали многих специалистов и исследователей. Список подобных проблем довольно обширен, но все они имеют следующие общие черты:

- уникальность и не повторяемость ситуации выбора;

- сложный для оценки характер рассматриваемых альтернатив;
- недостаточная определенность последствий принимаемых решений;
- наличие совокупности разнородных факторов, которые следует принять во внимание;

- наличие лица или группы лиц, ответственных за принятие решений

Проблемы рационального выбора в уникальных ситуациях существовали всегда, но по ряду причин в последние десятилетия важность их значительно возросла.

Во-первых, резко возрос динамизм окружающей среды и уменьшился период времени, когда принятые раньше решения остаются правильными.

Во-вторых, развитие науки и техники привело к появлению большого числа альтернативных вариантов выбора.

В-третьих, возросла сложность каждого из вариантов принимаемых решений.

В-четвертых, увеличилась взаимозависимость различных решений и их последствий.

В результате всего этого резко возросли трудности рационального решения проблем уникального выбора. Эти проблемы существенно усложнились, и люди, руководители организаций, стали встречаться с ними всё чаще. В будущем можно ожидать ещё большего разнообразия трудных и ответственных проблем выбора решений.

Как же обычно решаются такие проблемы? Из истории мы знаем, что опытных руководителей отличает умение наилучшим образом использовать свой опыт и интуицию. В ситуациях принятия уникальных решений всегда существует нехватка информации, покрыть которую можно лишь верой в одну из возможных гипотез. Опытные руководители обычно используют все полезные советы, но поступают по-своему, на основе своей модели развития будущих событий, своей оценки тех или иных личностей. Проблемы принятия уникальных решений всегда требовали творческого подхода, другими словами, рациональный выбор решения в уникальных ситуациях по своей сути является особым искусством.

В наше время вновь появляющиеся проблемы государства реагируют созданием специальных административных органов, т.е. фактическим расширением административного аппарата. Так, например, во всех промышленно развитых странах существуют министерства науки и техники (или их эквиваленты), в последние годы возникают административные органы по охране окружающей среды, по энергетике.

Каждая административная деятельность характеризуется одними и теми же элементами управленческих функций, которые определяются

следующим набором умений: анализировать, планировать, прогнозировать, организовывать, распоряжаться, координировать, контролировать, мотивировать. Принятие решений (умение распоряжаться) является центральным элементом административной деятельности, по отношению к которому все остальные могут рассматриваться как вспомогательные. Далее под принятием решения в этих условиях понимается особый вид человеческой деятельности, направленный на выбор лучшей из имеющихся альтернатив. Это определение указывает на три необходимых элемента процесса выбора решения:

- проблема, требующая разрешения;
- человек или коллективный орган, принимающий решение;
- несколько альтернатив решения, из которых осуществляется выбор.

При отсутствии одного из этих элементов процесс выбора решения перестает существовать. Имеются следующие предположения о ситуации, в которой находится лицо, принимающее решения (ЛПР):

- ЛПР обладает правом выбора из множества альтернатив;
- ЛПР несет ответственность за принятые решения;
- ЛПР заинтересовано в осуществлении выбора решений;
- ЛПР стремится разрешить имеющуюся проблему.

Хотя эти проблемы могут показаться естественными, они выполняются далеко не всегда. Бывают случаи, когда внешние требования, указания вышестоящих организаций практически предопределяют действия руководителя, навязывая ему выбор определенных альтернатив. В других случаях руководитель может быть удовлетворен положением, когда он физически отстраняется от принятия решения — в этом случае у него нет мотивации к разрешению проблемы.

На условия выбора решения влияет также новизна рассматриваемой проблемы. Если одна и та же проблема встречается неоднократно, то у руководителя вырабатываются типовые методы ее решения. Со временем эти методы могут войти в регламентирующие документы, определяющие решение — при этом выбор исчезает. Но существуют уникальные проблемы выбора решения, когда каждый раз выбор предстает в совершенно другом виде. Это могут быть новые для руководителя объекты выбора (варианты уникальных проектов), либо выбор осуществляется каждый раз в различных условиях (разработка стратегических планов). Такой выбор является наиболее трудным. Он требует выявления основных факторов, влияющих на будущие последствия решения, взвешивания всех «за» и «против».

В целом, при решении проблем выбора в уникальных ситуациях приходится преодолевать ряд существенных трудностей, а именно:

- **многоаспектный характер оценок качества альтернатив** по стоимости и эффективности решения (например, учет влияния внешней среды, побочных явлений, времени и т.п.);

- **трудности выявления всех аспектов сравнения альтернатив** при несовпадении различных интересов оперирующих сторон (например, набор аспектов руководителя не совпадает с набором для вышестоящей организации);

- **трудности сопоставления разнородных качеств**, учитывая разные меры сопоставления разнородных качеств решения (как, например, проблема нахождения меры снижения экономической эффективности производства проекта, эквивалентную уменьшения загрязнения окружающей среды);

- **субъективный характер многих оценок качества альтернатив** (частое использование субъективных оценок либо специалистов, разрабатывающих специальные модели объекта, либо экспертов);

- **трудности организации работы экспертов** из-за большого объема работ, загруженности основной работой, их достаточной компетентности и заинтересованности, надежности информации и т.д.;

- **трудности получения полного списка альтернатив** (например, поиск новой альтернативы).

4.2. Организационные методы решения сложных проблем выбора управленческого решения

В административных органах существует ряд организационных методов решения сложных проблем выбора, которые состоят из утвержденных правил сбора и анализа информации (обычно со сроками), порядка рассмотрения вариантов их согласования и утверждения. Так, например, организационный метод разработки стратегического (перспективного) плана Министерства экономики может реализовываться по следующей схеме:



Во многих случаях организационные методы решения сложных проблем выбора возникают на основе опыта решения подобных задач в прошлом. Рассматривая эти методы с формальной стороны, следует отметить, что они предусматривают необходимые этапы обсуждения проблем, привлечение наиболее компетентных экспертов, сбор информации для ЛПР. Однако неформальный анализ принимаемых решений показывает, что иногда эффективность применения существующих организационных методов не соответствует предъявляемым к ним требованиям. Дело в том, что в последние 10-20 лет сложность решения проблем выбора существенно возросла и многие из традиционных способов их решения оказались малопригодными или совсем непригодными.

Прежде всего, многие из существующих методов не включают в себя жизненно важный этап определения политики выбора решения — перечня всех аспектов, которые необходимо учитывать при принятии решений. Иногда такие перечни замещаются короткими высказываниями типа «максимум эффективности при минимуме потерь», либо неконкретными директивами. Стремление к учету лишь количественных аспектов принимаемых решений маскируется в утвержденных методиках оценки альтернатив в виде различных описательных формул. В них делается попытка строго обосновать соотношения между некоторыми количественными показателями, а многие качественные показатели (требования к квалификации исполнителей работ, ущерб окружающей среде, возможное влияние на климат и т.д.) просто остаются без внимания. Следствием всего этого является однобокий характер принимаемых решений, что приводит к нежелательным последствиям как для ЛПР, так и для лиц, чьи принимаемые решения затрагивают. Например, в результате подобных решений остается без использования закупаемое уникальное оборудование, построенный цех сразу же нуждается в реконструкции, разрабатываемые планы не соответствуют официально утвержденным направлениям программной деятельности и т.д.

В подобных случаях причина заключается не в просчетах того или иного руководителя, хотя бывает и такое. Причина глубже в непригодности некоторых организационных систем эффективно решать многие задачи уникального выбора. Некоторые процедуры использования экспертов не соответствуют современным требованиям. Известны случаи, когда комиссии и советы работают формально, а выносимые рекомендации выражают мнение одного — двух авторитетных членов комиссии. Иногда в комиссии входят эксперты, прямо заинтересованные в выборе определенных альтернатив, или советы и комиссии состоят из специалистов, для которых данная деятельность является дополнительной и обременительной нагрузкой.

Анализ альтернатив требует больших затрат квалифицированного труда. Часто сотрудники административного аппарата, занятые оперативной работой и выполнением многочисленных поручений, просто не имеют времени для проведения такого анализа. Кроме того, они не всегда в достаточной мере подготовлены для выполнения соответствующей аналитической работы. Это приводит к тому, что глобальным стратегическим проблемам выбора уделяется столько же внимания, сколько и мелким поручениям. Отдельные части административного аппарата переходят в состояние метко названное «административным склерозом». Следствием этого является недостаточная подготовленность и обоснованность принимаемых решений.

При отсутствии четкой, продуманной политики, контроля над работой экспертов, строгого анализа их предложений могут появиться несогласованные и даже противоречивые решения.

4.3. Применение системного подхода в проблемах выбора управленческих решений

В наши дни слово «системный» широко используется в самых разнообразных сочетаниях. В инженерных системах говорят о системотехнике, известен системный анализ, системное управление проектами, системное проектирование организаций и т.д. Очевидно, что происхождение слова «системный» во многом связано с идеями общей теории систем и кибернетики.

Основными понятиями, используемыми обычно при системном подходе, являются система как «черный ящик», процесс, вход, выход, обратная связь, ограничения. Эти понятия применяются для систем самой разной природы. В интересующих нас процессах выбора проектирования уникального объекта, разработки стратегического плана отрасли и т.д. также можно выделить соответствующие системы (и в них — подсистемы), понять их связь с другими системами, определить вход (входная информация), выход (решение), обратные связи (анализ решения) и ограничения (ресурсные, трудовые и т.д.). В итоге выделяются системы, решающие определенные проблемы.

А что подразумевается под понятием «системный подход»? Для ответа на этот вопрос рассмотрим имеющиеся рекомендации по системному решению различных по характеру проблем. В соответствии с подходом системотехники выделяются следующие этапы решения проблемы:

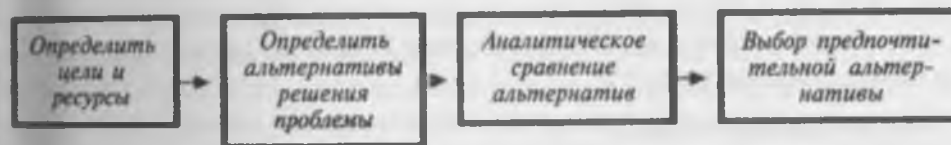
- уяснение задачи и выбор цели;
- перечисление и изобретение альтернатив;

- анализ альтернатив;
- выбор наилучшего решения;
- представление результатов.

В подходе системного анализа и исследования операций обычно выделяют пять логических элементов: (1) цель или совокупность целей; (2) альтернативные средства; (3) ресурсы; (4) математическая (при исследовании операций) или логическая (при анализе систем) модель; (5) критерий выбора предпочтительной альтернативы.

Например, в процессе формирования решений в организации более детально можно выделить следующие этапы:

- 1) определение целей организации;
- 2) выявление проблем в процессе достижения этих целей;
- 3) исследование проблем и постановка диагноза;
- 4) поиск решения проблемы;
- 5) оценка всех альтернатив и выбор наилучшей из них;
- 6) согласование решений в организации;
- 7) утверждение решений;
- 8) подготовка ввода решений в действие;
- 9) управление применением решения;
- 10) проверка эффективности решения.



Этот рисунок отражает то общее, что имеется в различных системных подходах: определение четкой последовательности действий; учет целей и средств; выделение и последовательное рассмотрение альтернативных вариантов решения проблемы; стремление к цели.

Таким образом, системный подход к решению проблем связан, прежде всего, с выделением системы из внешней среды и определением совокупности последовательных, логических шагов рассмотрения проблемы. *Возникает вопрос: чем же отличаются различные методы системного подхода, предназначенные для решения различных проблем?* В первую очередь — способами аналитического сравнения альтернатив. Так, например, в системотехнике используются стандартные методы расчета различных классов технических систем (электронных схем, систем автоматического регулирования и т.д.). При использовании подхода исследования операций имеется целый класс методов: МП, вероятностная оценка, сетевое планирование и т.д., а при системном анализе исполь-

зуется, в первую очередь, сравнительный метод «стоимость-эффективность».

Есть примеры, когда общая схема системного подхода используется для решения сложных проблем без специальных способов аналитического сравнения альтернатив. Последнее время общая схема системного подхода очень популярна. Трудно найти проблему, при решении которой не рекомендовалось бы использовать системный подход.

С чисто прагматической точки зрения можно высказать следующие соображения. Общая схема системного подхода нуждается в конкретном наполнении, чтобы быть орудием конструктивного решения сложных проблем. В качестве такого конкретного наполнения обычно выступают методы сравнения альтернатив.

Разумные шаги по централизации принятия решений можно приписать применению системного подхода. В общем случае дело обстоит следующим образом. Систематизация, введение логических этапов при решении сложных проблем выбора может оказаться полезной для рядовых руководителей и консультантов, но она не является универсальным ключом к решению проблемы. Хотя известный американский специалист С. Янг утверждает, что системный подход в настоящее время уже становится инженерным методом, что не совсем соответствует действительности. Но в то же время сам по себе системный подход может принести только пользу и не принести вреда. Приносит вред превращение его в «модный инструмент».

Контрольные вопросы

1. Что подразумевается под «уникальным выбором решения» в сложных ситуациях?
2. В чем суть организационных методов решения сложных проблем выбора?
3. Что подразумевается под понятием «системный подход»?
4. Можете ли объяснить порядок применения системного подхода в проблемах выбора управленческого решения?

5. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

5.1. Обзор научных методов и теорий решения задач принятия оптимальных решений

При определении возможных методов решения любой задачи принятия решения (ЗПР) следует исходить из анализа математической модели задачи. Как видно из рассмотрения математической модели общей постановки однокритериальной статической детерминированной ЗПР, она полностью совпадает с общей постановкой задачи математического программирования (МП). Поэтому весь богатый арсенал методов, разработанных для решения задач МП, может и должен быть использован для решения ЗПР рассматриваемого класса. В силу этого, в данном разделе приводится обзор методов решения рассматриваемого класса ЗПР с точки зрения МП.

Математическое программирование представляет собой бурно развивающуюся ветвь современной прикладной математики. Содержание математического программирования составляют теория и методы решения задач о нахождении экстремумов функции в ограниченной области допустимых значений переменных, определяемой системой ограничений (равенств и неравенств). Термин «математическое программирование» получил широкое распространение в математической и инженерно-экономической литературе, однако его нельзя считать достаточно удачным. Этот термин не имеет ничего общего с программированием для цифровых вычислительных машин и потому не является достаточно содержательным для определения существа соответствующей математической дисциплины.

Датой возникновения МП в литературе, особенно в переводных источниках, обычно называют 1947 г., когда американским математиком Дж. Данцигом, работавшим в составе группы исследователей по заданию ВВС США над решением некоторых типов экстремальных задач, был разработан численный метод решения задачи линейного программирования. Метод получил название симплекс-метода. Открытие этого метода стало толчком к бурному росту интереса к теории и практике МП.

При построении классификационной схемы задач МП они обычно подразделяются на два больших класса: классические и неклассические задачи. Основным признаком такого деления выступают дифференцируемость целевой функции и функциональных ограничений.

Классическими задачами МП (классическими задачами оптимизации) являются такие, которые удовлетворяют совокупности следующих признаков: а) непрерывность целевой функции $F(X)$ и функциональных ограничений $g(X)$, и наличие у них непрерывных частных производных по крайней мере второго порядка; б) отсутствие среди функциональных ограничений неравенств, что влечет за собой требование неограниченности; г) отсутствие требований дискретности переменных.

Если хотя бы одно из этих требований не удовлетворяется, то задача может быть классифицирована как классическая задача МП. Следует отметить, что из перечисленных требований принципиальными являются лишь первое и последнее. Если же не выполняются другие требования, то за счет введения вспомогательных переменных и, следовательно, увеличения размерности задачи эти требования всегда могут быть удовлетворены (при размерности задачи здесь понимается количество переменных). Увеличение размерности задачи обычно усложняет процесс ее решения.

Классические задачи МП, в свою очередь, подразделяются на два подкласса по признаку отсутствия или наличия ограничений: задачи отыскания безусловного экстремума и задачи отыскания условного экстремума с ограничениями - равенствами.

Неклассические задачи МП обычно подразделяют на два подкласса: специальные и неспециальные задачи МП. К специальным задачам МП относят такие, для которых в силу каких-то специфических особенностей их целевых функций и функциональных ограничений разработаны специальные методы решения. Пример специальной задачи МП - задача линейного программирования. Специфическая особенность этой задачи - линейность целевой функции и функциональных ограничений.

Совокупность специальных методов в публикациях по математическому программированию получила и другое наименование - *непрямые методы поиска экстремума*. В этом названии нашел отражение тот факт, что траектория поиска экстремума при пользовании этими методами проходит не непосредственно в направлении экстремума, а, образно говоря, какими-то окольными путями, с учетом специфических особенностей целевой функции и функциональных ограничений. Например, при решении задачи линейного программирования симплекс-методом траектория поиска начинается в некоторой начальной опорной точке на границе области допустимых значений вектора управления и затем переходит из одной опорной точки в другую в направлении возрастания целевой функции. Сказанное иллюстрирует рис. 2.3.1 из раздела 2.3 настоящего пособия.

Неспециальные задачи МП решаются с использованием неспециальных методов поиска экстремума. Неспециальные методы имеют и дру-

гое название - *прямые методы поиска экстремума*. Эти методы являются универсальными в том смысле, что при их разработке не учитывались какие-либо специфические особенности конкретной задачи оптимизации, а лишь самые общие соображения, связанные с задачей отыскания экстремума. Прямые методы применимы для решения как специальных, так и неспециальных задач МП.

Свойство универсальности прямых методов поиска экстремума вовсе не означает, что эти методы работают лучше специальных методов. В частности, специальные методы в силу их специфической приспособленности к задаче более надежно гарантируют нахождение экстремума функции.

Методы, гарантирующие нахождение экстремума целевой функции за конечное число шагов поиска, в теории МП называются *конечными*. Остальные методы, не гарантирующие точное нахождение экстремума за конечное число шагов поиска, называются *асимптотическими* или *итерационными*. При пользовании этими методами процесс поиска экстремума теоретически может продолжаться бесконечно долго. Поэтому при разработке соответствующих алгоритмов для ЭВМ всегда необходимо сформулировать некоторый четкий признак окончания счета.

Следует иметь в виду, что специальные методы поиска экстремума, несмотря на их достоинство, состоящее в обеспечении гарантии нахождения экстремума, при решении специальных задач большой размерности часто уступают место неспециальным методам в силу своей громоздкости. Например, при решении задач линейного программирования большой размерности симплекс-алгоритм становится столь громоздким, что целесообразнее решать задачу менее точными, но более простыми прямыми методами, например, методами случайного поиска.

Разделение задач МП на специальные и неспециальные является условным, отражающим сегодняшнее состояние развития МП. С ростом достижений МП класс специальных задач МП будет непрерывно расширяться. Таким образом, список специальных задач МП представляет собой своеобразный реестр теоретических достижений МП.

Перечислим основные типы специальных неклассических задач МП.

1. *Задачи линейного программирования (ЛП)*. Они характеризуются тем, что функции $F(X)$ и $g(X)$ являются линейными по X . Задачи ЛП представляют собой количество методов решения задач ЛП. Из них наиболее универсальным и получившим широкое распространение является так называемый симплекс-метод решения задачи ЛП. Этот метод хорошо разработан и доведен до стандартных программ, входящих в состав математического обеспечения современных ЭВМ.

Симплекс-метод является универсальным методом, пригодным для решения любой задачи ЛП. Достоинством его является возможность по-

лучить точное решение задачи за конечное количество шагов. Наряду с универсальными методами теория ЛП располагает также большим количеством специальных методов, разработанных для решения отдельных частных типов задач ЛП, например, методов решения транспортных задач ЛП. Задачи и методы ЛП получили широкое распространение в экономических исследованиях. Привлекательность линейных постановок ЗПР во многом обусловлена большими вычислительными возможностями линейного программирования в отличие от нелинейного программирования, где вычислительные приемы разработаны для решения лишь немногих типов задач. При пользовании линейными постановками ЗПР всегда следует иметь в виду, что линейное, а тем более детализированное описание ЗПР обычно представляет собой довольно грубое приближение реальной задачи, более детальный анализ задачи часто позволяет обнаружить нелинейные и стохастические явления (под нелинейным явлением понимается такое, в котором отсутствует прямая пропорциональность между причиной и результатом).

2. *Задачи квадратичного программирования.* Они характеризуются квадратичной зависимостью целевой функции $F(X)$ и линейной зависимостью функциональных ограничений $g_i(X)$ от X .

3. *Задачи выпуклого программирования.* В этих задачах целевая функция $F(X)$ и функции ограничений $g_i(X)$ относятся к выпуклой функции. Отметим здесь для сведения, что задачи линейного и квадратичного программирования представляют собой частные случаи задач выпуклого программирования, поскольку линейные и квадратичные функции принадлежат к классу выпуклых функций. Следовательно, методы разработаны для решения задач линейного и квадратичного программирования, но не наоборот.

4. *Задачи с сепарабельными целевыми функциями и линейными ограничениями.* Сепарабельной целевой функцией называется такая функция переменных, которая может быть представлена в виде суммы произведений n функций одной переменной. Для решения подобных задач может быть использован метод динамического программирования.

5. *Задачи геометрического программирования.* В задачах этого класса целевая функция и функциональные ограничения относятся к разряду так называемых полиномиальных функций.

6. *Задачи дискретного программирования.* Сюда может быть отнесена любая задача МП, в которой есть дополнительное ограничение на вектор управления X , состоящее в требовании, чтобы все (полностью дискретные задачи) или некоторые (частично дискретные задачи) компоненты вектора X принимали только дискретные неотрицательные значения.

Частным случаем дискретного программирования являются задачи целочисленного программирования.

В настоящее время разработаны методы решения некоторых дискретных задач МП в рассмотренных выше специальных случаях, например, методы Гомори решения задач целочисленного линейного программирования. Требование дискретности хорошо сочетается с методом динамического программирования Беллмана, применяемым для решения задач с сепарабельными целевыми функциями.

Все остальные задачи МП, не сводимые к специальным задачам (т.е. неспециальные задачи), часто называют просто задачами нелинейного программирования. Особенностью задач линейного, квадратичного и выпуклого программирования является их моноэкстремальность (одноэкстремальность). Это означает, что поверхность целевой функции в этих задачах имеет единственный условный глобальный экстремум, расположенный либо внутри области допустимых значений управления, либо на ее границе (последнее всегда имеет место в задачах линейного программирования). Указанная собственность этих задач обусловлена как свойствами их целевых функций, так и свойствами функциональных ограничений.

Напомним здесь, что в задачах МП различают следующие виды экстремума:

- безусловный абсолютный (или глобальный) максимум (минимум);
- безусловный относительный (или локальный) максимум (минимум);
- условный абсолютный максимум (минимум);
- условный относительный максимум (минимум).

Под безусловными экстремумами понимаются экстремумы в отсутствие ограничений, под условными - экстремумы в условиях действия ограничений. Глобальным максимумом (минимумом) называется наибольший (наименьший) из всех максимумов (минимумов). Локальный экстремум - это экстремум в некоторой ограниченной малой окрестности экстремальной точки.

Как уже отмечалось выше, целевые функции в задачах линейного, квадратичного и выпуклого программирования относятся к классу выпуклых функций (линейную функцию можно считать предельным случаем выпуклой функции - поверхность линейной функции образует гиперплоскость в n -мерном пространстве). Выпуклые функции обладают единственным безусловным глобальным экстремумом. Сочетание указанных свойств целевой функции и функциональных ограничений в задачах линейного, квадратичного и выпуклого программирования обусловило их относительную простоту, проявляющуюся в их моноэк-

стремальности. Моноэкстремальность и явилась тем объективным обстоятельством, которое позволило разработать эффективные методы решения, гарантирующие нахождение экстремума в указанных задачах.

Особенность неспециальных задач математического программирования является их потенциальная полиэкстремальность (многоэкстремальность). Это означает, что оптимизируемая целевая функция в области допустимых значений может иметь несколько (заранее неизвестно, сколько) экстремумов (локальных и глобальных).

Подход на основе теории управления является аналогом рационального подхода, используемого менеджерами при принятии управленческих решений. Теория управления как отдельная наука возникла во время второй мировой войны. В то время математические и статистические методы применялись для решения неотложных крупномасштабных военных задач, решить которые было не под силу одному человеку. Математики, физики и военные практики использовали системный анализ для разработки баллистических траекторий, стратегий борьбы с подводными лодками или бомбометания, например, батарейного огня (одновременный залп нескольких орудий).

Рассмотрим задачу, стоящую перед линкором, который пытается потопить вражеский корабль, находящийся в нескольких милях от него. Расчет прицела орудий линкора следует производить с учетом дистанции, скорости ветра, калибра снарядов, скорости и курса обоих кораблей, килевой и бортовой качки стреляющего корабля, а также искривления земной поверхности. Методы таких вычислений, основанные на пробах и ошибках, а также на интуиции, не обеспечивают достаточной точности, требуют слишком много времени и вообще могут не увенчаться успехом. Вот тогда-то на арену и выходит теория управления. Аналитики оказались в состоянии идентифицировать существенные переменные, включенные в задачу наведения на цель, и смогли смоделировать процесс с помощью математических уравнений. Дистанцию, скорость, параметры килевой и бортовой качки и т.д. можно было рассчитать и ввести в уравнение. Ответ получался мгновенно - и орудия начинали стрельбу. Такие факторы, как килевая и бортовая качка, вскоре стали измеряться механически и передаваться непосредственно в механизм наведения на цель. В настоящее время человеческий фактор вполне исключен из процесса прицеливания. Радар захватывает цель, и вся последовательность рассчитывается автоматически.

Теория управления имела поразительный успех при решении многих военных задач. Этот подход к принятию решений проник в корпорации и школы бизнеса, где изучались и разрабатывались необходимые методики.

В настоящее время многие корпорации предписывают своим подразделениям применять именно эти методики. Компьютерное подразделение готовит количественную информацию для анализа. Отделы научного планирования используют математические модели для количественной оценки существенных переменных и последующего количественного представления вариантов решения, а также для того, чтобы установить вероятность успеха того или иного решения. Кроме того, эти подразделения используют такие приемы, как линейное программирование, статистику Байеса, сетевое планирование и компьютерное моделирование.

Теория управления - отличный инструмент для принятия управленческих решений в организации тогда, когда проблемы поддаются анализу и переменные могут быть идентифицированы и измерены. Математические модели могут содержать тысячу и более переменных, и каждая из них определенным образом сказывается на конечном результате. Методы теории управления использовались для корректного решения разнообразных задач: выбора подходящего места для помещения церковной общины, пробного маркетинга первой партии нового товара, бурения нефтяных скважин, радикального преобразования системы распределения телекоммуникационных услуг.

Другими задачами, при которых часто применяются методы теории управления, являются разработки графиков работы служащих аэропорта, врачей скорой помощи, телефонных операторов и сборщиков дорожных пошлин. С помощью теории управления можно быстро и правильно решать задачи, имеющие большое количество явно выраженных переменных, которые человек просто не в состоянии переработать в голове. Эта система наилучшим образом проявляет себя, когда направлена на решение задач, поддающихся анализу, задачи, в которой все переменные могут быть измерены и структурированы с помощью логических действий.

Все более усложняющиеся компьютерные технологии и программное обеспечение позволяют расширять сферу применения теории управления и распространить ее на более широкий круг проблем, что было не возможно раньше. Например, генеральный директор страховой компании «Capital Mortgage» использовал методы теории управления для того, чтобы усовершенствовать практическую деятельность менеджеров, занимающихся «управлением потерями», в задачу которых входило решение, может ли компания предоставить «попечительские» займы своим клиентам, приостановившим платежи, или в таких случаях лучше рекомендовать лишить их права выкупа имущества по закладной. Созданное сложное программное обеспечение, названное «оптимизатором уменьшения потерь», целью которого было анализировать и измерять наибо-

лее важные переменные, генеральный директор страховой компании улучшил показатели в целом на 30%, а в отдельных случаях даже более чем на 50% - к тому же, время обслуживания одного клиента в целом снизилось на 30%-50%. Экономия впечатляюще возросла почти до 800 долларов в каждом случае и в результате за 18 месяцев компания получила 115 млн. долларов чистого дохода.

Одна из проблем, связанная с теорией управления, та, что количественная информация сложных задач принятия решений, как правило, небогата. Неформальные сигналы, которые выявляют существование проблемы, должны восприниматься непосредственно самими менеджерами. Большинство сложнейших математических анализов не имеют смысла, если важные факторы не поддаются количественной оценке, а посему не могут быть включены в модель. Такие вещи, как реакция конкурентов, вкусы потребителей и т.д. являются качественными показателями. В этих случаях роль теории управления заключается в том, чтобы дополнять процесс принятия решения менеджерами. Количественные результаты могут быть переданы менеджерам для обсуждения и последующей интерпретации в соответствии с их неформальными мнениями, взглядами и интуицией. Окончательное решение наряду с количественными показателями может включать в себя также и качественные измерения.

Авторы метода *принятия решений по модели Карнеги* изложили суть ограниченно рационального подхода при принятии решений, а также внесли нечто новое в представления о принятии решений в организациях. До появления этой идеи все исследования экономики строились на том, что компании принимают решения так, как будто вся относящаяся к делу информация как в воронку просачивается к менеджеру, ответственному за решение, для того, чтобы он сделал свой выбор. Исследование же, выполненное группой Карнеги, показало, что к решениям на уровне организации, как правило, подключаются многие менеджеры, и что окончательный выбор менеджеры могут сделать только в коалиции. Коалиция означает альянс между несколькими менеджерами, одинаково представляющими себе цели организации и приоритеты проблемы. Этот альянс может, к примеру, состоять из менеджеров подразделений конвейерной линии, специалистов по кадрам и даже групп людей вне организации, важных клиентов, банкиров или представителей профсоюзов.

Создавать коалиции менеджеров при принятии управленческих решений необходимо по двум причинам. Во-первых, нередко бывает так, что цели организации не определены, а оперативные задачи подразде-

лений - противоречивы. Когда цели неясны и несовместимы, менеджеры не могут прийти к единому мнению о приоритетах проблем. Поэтому они непременно должны собраться вместе и решить какие проблемы следует решать в первую очередь. Во-вторых, каждый из менеджеров хотя и стремится быть рациональным, но ему не избежать ограничений, связанных с факторами, описанными выше. Менеджеры часто не обладают достаточным временем, средствами или интеллектуальными возможностями, чтобы идентифицировать все показатели и переварить всю информацию, относящуюся к решаемой проблеме. Именно эти ограничения и склоняют менеджеров к созданию коалиций. Менеджеры беседуют друг с другом и обмениваются точками зрения для сбора информации и снижения неопределенности. Они консультируются у тех, кто обладает надлежащей информацией и заинтересован в результатах решения проблемы. Создание коалиций способствует выработке управленческого решения, которое поддерживается всеми заинтересованными сторонами.

Формирование коалиций имеет несколько последствий для процесса принятия решений в организации. Во-первых, следует понимать, что решения принимаются преимущественно не для нахождения оптимального решения проблемы, а для удовлетворенности. Удовлетворенность, в свою очередь, означает, что организации получают скорее некоторое удовлетворение, а не максимальный уровень выполнения работы, дающий им возможность достичь нескольких целей одновременно. При рассмотрении проблем коалиция примет то решение, которое воспринимается как удовлетворительное всеми членами коалиции. Во-вторых, менеджеры озабочены насущными проблемами и их быстрым решением или, так называемым, проблемно-ориентированным поиском. Проблемно-ориентированный поиск означает, что менеджеры ищут в непосредственно окружающей их обстановке решение, способное быстро нейтрализовать проблему. Менеджеры не ждут, что им удастся принять «совершеннейшее решение», когда ситуация с трудом поддается определению и насыщена конфликтами. Это важнейшее отличие модели Карнеги от подхода теории управления, которая строится на том, что каждое обоснованное альтернативное решение может быть проанализировано. В модели Карнеги же утверждается, что вполне достаточно найти удовлетворительное решение и что менеджеры обычно принимают первое удовлетворительное решение, всплывающее на поверхность. В-третьих, дискуссии и споры особенно важны на стадии идентификации проблемы в процессе принятия решений. Да тех пор пока члены коалиции не проникнутся проблемой, никаких действий предпринято не будет.

5.2. Типичная процедура обоснования управленческого решения в условиях определенности

Любое исследование, направленное на решение ЗПР, должно, как это положено по типовому процессу принятия управленческого решения, содержать как минимум следующие пункты:

- 1) постановка задачи (имеется в виду содержательная постановка задачи в отличие от формальной, математической постановки);
- 2) формализация задачи;
- 3) математическая постановка (иначе - математическое моделирование задачи);
- 4) анализ математической модели и выбор метода решения;
- 5) разработка или выбор алгоритма решения задачи;
- 6) решение задачи и анализ полученных результатов.

Здесь рассмотрим пример процедуры решения одной простой задачи рассматриваемого класса - задачи оптимального планирования загрузки производственного оборудования. Пример строится по указанной схеме (за исключением пунктов 5 и 6).

Постановка задачи. Рассмотрим операцию оптимального планирования загрузки оборудования производственного участка, производящего продукцию одного вида. Производство продукции связано с затратами ряда исходных ресурсов - трудовых, материальных, энергетических, запасы которых для рассматриваемого планового периода ограничены заданными величинами. Для производства конечной продукции участок располагает несколькими заранее отработанными технологическими способами. Каждый технологический способ характеризуется своей производительностью, т.е. количеством продукции, производимой в единицу времени, а также соответствующими удельными расходами всех видов ресурсов, т.е. расходами в единицу времени. Технологические способы независимы между собой в том смысле, что могут быть использованы одновременно (в параллель).

Руководитель участка заинтересован в максимизации суммарного за время планового периода выпуска продукции, возможного в условиях имеющихся ресурсов. Средством достижения этой цели является выбор соответствующего плана загрузки технологических способов, представляющего собой совокупность времен работы каждого технологического способа в течение рассматриваемого планового периода. Следовательно, для достижения поставленной цели плановому подразделению предприятия требуется решить задачу: найти оптимальный в условиях располагаемых ресурсов план загрузки технологических способов, позволяющий

ний максимизировать общий выпуск за плановый период, а также величину максимально возможного выпуска.

Формализация задачи. Формализуем условия задачи. Количество располагаемых технологических способов производства обозначим через n и каждому способу присвоим порядковый номер j , где R_j - общее количество типов ресурсов, потребных для производства конечной продукции, обозначим через m и каждому типу ресурсов присвоим порядковый номер i , где B_i - запасы ресурсов, которыми располагает производственный участок.

Характеристики совокупности n технологических способов производства представим в виде n -мерного вектора производительностей $C = \|c_j\|$ и матрицы удельных расходов A размера $m \times n$ - $A = \|a_{ij}\|$, где c_j - производительность j -го способа, т.е. количество продукции, производимой по j -му технологическому способу в единицу времени; a_{ij} - расход i -го ресурса за единицу времени использования j -го технологического способа.

Векторы B, C и матрица A представляют собой совокупность параметров, характеризующих свойства объекта исследования - производственного участка. Предполагается, что все эти параметры являются неслучайными величинами, полностью известными руководителю участка и планово-экономическому отделу предприятия.

Искомый план функционирования участка может быть представлен в виде n -мерного вектора $X = \|x_j\|$, компонента которого x_j есть время (в пределах рассматриваемого планового периода T), в течение которого участок выпускает продукцию с использованием j -го технологического способа. Вектор X представляет собой вектор управления производственной деятельностью участка.

Эффективность функционирования производственного участка в рассматриваемой задаче оценивается общим количеством $F(X)$ продукции, произведенной всей совокупностью технологических способов за плановый период. Очевидно, что величина критерия оптимальности $F(X)$ является функцией плана функционирования участка X и вектора производительности C .

Цель руководителя участка математически выражается в стремлении максимизировать значение критерия оптимальности F за счет соответствующего выбора плана X из области его допустимых значений.

Математическая модель задачи. Целевую функцию задачи записываем как

$$F(X) = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \rightarrow \max ,$$

где $X = \|x_j\|$, $C = \|c_j\|$ - n -мерные векторы. Вектор C задан, вектор X является искомым.

Требуется найти значения $\max\{F(X)\}$ и X , удовлетворяющие условиям

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \leq B_i; \quad x_j \geq 0.$$

Анализ математической модели и выбор метода решения. Рассматриваемая задача относится к классу однокритериальных статических детерминированных ЗПР, поскольку: 1) она имеет единственный критерий оптимальности, 2) ее целевая функция и функции ограничения не зависят от времени и случайных и неопределенных факторов. Поэтому для ее решения может быть использован один из методов математического программирования (раздел 4.1).

Как следует из анализа математической постановки рассматриваемой задачи оптимального планирования, она представляет собой типичную задачу линейного программирования. Поэтому для ее решения может быть применен один из методов линейного программирования, в частности, универсальный метод линейного программирования - симплекс-метод. Конкретный выбор метода во многом будет зависеть от математического обеспечения вычислительного центра, где будет решаться задача, а также от размерности $m \cdot n$ конкретной задачи.

5.3. Задача об оптимальной организации перевозки (транспортная задача)

Симплекс-метод дает возможность решить любую задачу линейного программирования. Однако существуют методы, которые учитывают конкретные особенности решаемой задачи, а потому более эффективные. Рассмотрим задачу из трех пунктов A_1, A_2, A_3 к четырем местам назначения B_1, B_2, B_3, B_4 перевозится однородный груз. Из пункта A_1 может быть вывезено 50 т, из A_2 - 40 т, из A_3 - 20 т. В пункт назначения B_1 должно поступить 30 т, в B_2 - 25 т, в B_3 - 35 т, в B_4 - 20 т. Расстояния C_{ij} от i -го поставщика до j -го потребителя приведены в углах таблицы исходных данных задачи, приведенной ниже ($i=1,2,3; j=1,2,3,4$).

Необходимо составить план перевозок, обеспечивающий наименьший общий пробег транспорта в тонно-километрах, при условии, что все запасы вывезены, а потребитель получил необходимое количество груза.

Решение. Пусть X_{ij} - количество груза, которое будет доставлено из i -го пункта отправления в j -й пункт назначения ($i=1,3; j=1,4$). Целевая функция задачи $F(X)$ - минимизировать общий пробег транспорта в тонно-километрах. Особенностью данной задачи является то, что в условиях - ограничений все коэффициенты при неизвестных равны 1. Это облегчает вычисление с помощью симплекс-метода.

Таблица
исходных данных транспортной задачи

		B	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
		30	25	35	20	
A	A ₁	50	3	2	5	1
	A ₂	40	4	3	2	2
	A ₃	20	2	7	1	6

Число переменных в данной задаче равно в общем случае $m \cdot n$, где m - число поставщиков, а n - число потребителей. Число уравнений в системе ограничений равно $(m+n)$. Однако одно из этих уравнений может быть получено из других. Так, если определено наличие груза у всех отправителей и потребность всех получателей, кроме одного, то спрос последнего легко установить как разность между общим запасом и общей потребностью остальных получателей, т.е. система ограничений содержит $m+n-1$ независимых уравнений с $m \cdot n$ неизвестными. Число базисных переменных также будет $m+n-1$, остальные переменные - свободные.

Математическая модель задачи имеет следующий вид:

$$F(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot X_{ij} \rightarrow \min,$$

т.е. целевая функция задачи - минимизация общего пробега транспорта;

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = A_i, \quad \text{для всех } i = 1, 2, \dots, m$$

- условие вывоза всех грузов от каждого пункта поставщиков;

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = B_j, \quad \text{для всех } j = 1, 2, \dots, n$$

- условие доставки грузов для полного удовлетворения потребности каждого пункта получателей;

$$\sum_{i=1}^m A_i = \sum_{j=1}^n B_j$$

- условие равновесия вывоза-доставки всех грузов, т.е. условие «закрытости» задачи, при котором данная задача считается разрешимой;

$$x_{ij} \geq 0, \quad \text{для всех } i = 1, 2, \dots, m \text{ и } j = 1, 2, \dots, n$$

- условие неотрицательности искомых переменных.

Следует отметить, что при «открытой» транспортной задаче сначала она сводится к «закрытому» виду путем введения к условиям задачи фиктивного «пункта» поставщика или потребителя (в зависимости от условия «неравновесия») с нулевыми расстояниями и объемами «неравновесия», и затем решается.

Алгоритм решения транспортной задачи будем сопоставлять с алгоритмом симплекс-метода. Допустимое базисное решение (опорное решение) задачи находится с помощью одного из следующих методов.

Метод северо-западного угла (МСЗУ). Удовлетворяем потребности первого потребителя за счет первого поставщика. Если потребности оказались выше возможностей первого поставщика, то подключаем второго поставщика. Если запасы первого поставщика выше потребности первого потребителя, то остаток запасов первого поставщика передается второму потребителю и т.д. Мы должны заполнить $m+n-1$ клеток. Может оказаться, что число заполненных клеток меньше $m+n-1$ (случай вырождения). Тогда число клеток, недостающих до $m+n-1$, заполняем нулями (эти клетки выбираем произвольно) – это так называемые условные поставки. Процесс получения опорного решения нашей задачи методом северо-западного угла представлен ниже (табл.).

За четыре итерации мы заполнили в таблице (матрице перевозок) пять клеток вместо шести, но удовлетворили условиям - ограничениям (случай вырождения). Надо ввести нулевую клетку - условную поставку, как, например, клетка (1,4), в которой будет записано $X_{14}=0$. Таким образом получим опорное решение: $X_{11}=30$; $X_{12}=20$; $X_{22}=5$; $X_{23}=35$; $X_{34}=20$. Значение целевой функции при таком решении составляет

$$F(X)=3 \cdot 30+2 \cdot 20+3 \cdot 5+2 \cdot 35+6 \cdot 20=335 \text{ (тонно-километров).}$$

Метод наименьших расстояний (стоимостей) перевозок. Он аналогичен методу северо-западного угла. Только заполняют в первую очередь

Таблица
опорного решения задачи с помощью МСЗУ

A \ B		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
		30	25	35	20
A ₁	50	30	20	0	0
A ₂	40	0	5	35	0
A ₃	20	0	0	0	20

те клетки, для которых указанные расстояния (стоимости) наименьшие либо по строкам (по А), либо по столбцам (по В).

Таблица
опорного решения задачи с помощью МНМР (по А)

A \ B		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
		30	25	35	20
A ₁	50	3 5	2 25	5 0	1 20
A ₂	40	4 5	3 0	2 35	2 0
A ₃	20	2 20	7 0	1 0	6 0

Здесь получим альтернативное опорное решение: $X_{11}=5$; $X_{12}=25$; $X_{14}=20$; $X_{22}=5$; $X_{23}=35$; $X_{31}=20$, при котором значение целевой функции составляет

$$F(X)=3 \cdot 5+2 \cdot 25+1 \cdot 20+4 \cdot 5+2 \cdot 35+2 \cdot 20=215 \text{ (тонно-километров)},$$

общий пробег транспорта снижается на 120 тонно-километров, чем первое опорное решение задачи, найденное по методу северо-западного угла.

Оптимальное решение задачи находится с помощью итеративного метода (так называемого «метода потенциалов»). Так, например, решением данной задачи на ПЭВМ (с применением ППП «ПЭР») после двух итераций получено следующее оптимальное решение, при котором наименьшее значение целевой функции составляет также 215 (тонно-километров).

Таблица
оптимального решения задачи с помощью ППП «ПЭР»

A \ B		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
		30	25	35	20
A ₁	50	3 10	2 25	5 0	1 15
A ₂	40	4 0	3 0	2 35	2 5
A ₃	20	2 20	7 0	1 0	6 0

5.4. Анализ и прогнозирование показателей ПР с помощью регрессионных моделей

Регрессия — линия, описывающая вид зависимости среднего результативного показателя (признака Y) от факторного (X) или факторных показателей ($x_1, x_2, \dots, x_n$).

В случае если изучается зависимость Y от одного показателя-фактора, то такая регрессионная зависимость называется *однофакторной*.

Если же изучается зависимость Y от нескольких показателей-факторов (или более двух признаков), то регрессия такого типа называется *многофакторной*.

Такая зависимость может быть описана с помощью более подходящего типа регрессионных моделей. Например, для однофакторных зависимостей:

- а) $Y = a_0 + a_1 \cdot X$ - *прямолинейная*;
- б) $Y = a_0 \cdot X^{a_1}$ - *степенная*;
- в) $Y = a_0 \cdot \log(X)$ - *логарифмическая*;
- г) $Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + \dots + a_n \cdot X^n$ - *полиномиальная*;
- д) $Y = a_0 + a_1 \cdot t$ - *трендовая* (t —порядок времени) и т.п.

Параметры регрессионной модели могут быть определены с помощью *метода наименьших квадратов*. Суть этого метода заключается в следующем.

Выбранную (например, прямолинейную) зависимость подставляют в функцию, подлежащую минимизации суммы квадратов отклонений фактических и расчетных величин результативного показателя за весь период наблюдения, т.е. как

$$\sum (y_j - a_0 - a_1 \cdot x_j)^2 \rightarrow \min.$$

Дифференцируя по коэффициентам уравнения регрессии и приравнявая полученные значения к нулю, получаем следующую систему уравнений, из которой легко найти коэффициенты регрессионной модели:

$$\begin{cases} n \cdot a_0 + a_1 \cdot \sum x_j = \sum y_j \\ a_0 \cdot \sum x_j + a_1 \cdot \sum x_j^2 = \sum x_j \cdot y_j \end{cases}$$

Оценку надежности полученного уравнения регрессии можно проверить по ошибке средней аппроксимации ($\epsilon, \%$) или коэффициенту корреляции (R), вычисляемым следующим образом:

$$\epsilon, \% = \sum |Y_{\phi} - Y_r| \cdot 100 / Y_{\phi} / n;$$

$$R = \sqrt{1 - \sum (Y_{\phi} - Y_r)^2 / \sum (Y_{\phi} - Y_c)^2},$$

где Y_{ϕ} , Y_r и Y_c — соответственно, фактическое, расчетное и среднее значения результативного показателя;

n — число наблюдений показателя.

Коэффициент корреляции принимает значения от 0 до 1: если функция Y и аргумент X независимы, то этот коэффициент равен 0; чем больше величина данного коэффициента, тем теснее связь между выбранными величинами, тем меньше осталось неучтенных факторов. Максимально допустимое значение ϵ — до 15%.

В качестве примера построим простую (прямолинейно-трендовую) регрессионную модель анализа и прогнозирования объема переработки руды на СП «Зарафшан-Ньюмонт» за ряд лет.

Данные переработки руды на СП «Зарафшан-Ньюмонт»*

Годы	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Объемы переработки руды, млн. т	4,2	11,2	13,3	13,5	13,6	14,1	13,9

Определим неизвестные параметры регрессионной модели по следующим расчетам.

П.н.	t	Y	t·Y	T ²
1.	1	4,2	4,2	1
2.	2	11,2	22,4	4
3.	3	13,3	39,9	9
4.	4	13,5	54,0	16
5.	5	13,6	68,0	25
6.	6	14,1	84,6	36
7.	7	13,9	97,3	49
Итого:	28	83,8	370,4	140

Решив систему уравнений, определим параметры прямолинейно-трендовой модели анализа и прогноза объема переработки руды на СП «Зарафшан-Ньюмонт»:

$$Y_t = 6,94 + 1,257 \cdot t \text{ и т.д. (рис.)}$$

* Источник: Горный журнал (спец. выпуск). 2002. №2.

Диаграммы переработки руды на СП "Зарафшан-Ньюмонгл, млн.п



Контрольные вопросы

1. Какие наиболее приемлемые методы существуют для решения ЗПР?
2. Какие пункты содержит как минимум типовой процесс принятия решения?
3. В чем суть модели ЗПР об оптимальной организации перевозок?
4. Можете ли объяснить порядок моделирования ЗПР в условиях определенности?
5. Как находится оптимальное решение транспортной задачи?
6. Что такое регрессия?
7. Как применяется регрессионная модель в целях анализа и прогноза решений?

6. ПРИНЯТИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РИСКА

6.1. Риск в управленческих решениях

РИСК - действие наудачу, в надежде на счастливый исход; угроза полной или частичной потери ресурсов или дохода; нормальная ситуация для менеджера в условиях неопределенности.

Все инициаторы бизнеса должны рисковать. Имеются такие поговорки: «Риск — дело благородное», «Не избегай риска, а, предвидя его, стремись снизить до возможно более низкого уровня».

РИСК — это явление, присущее любой сложной хозяйственной ситуации, которое характеризует возможность и масштаб несоответствия отрицательных или положительных результатов ожидаемым результатам при выборе определенного варианта решения из числа альтернативных исходов.

РИСК — количественная оценка неудачного исхода (потери).

Видами потери могут быть: материальные; финансовые; трудовые; временные; ущерб экологии; ущерб здоровью; потери престижа.

В абсолютном выражении риск может определяться величиной возможных потерь в материально-вещественном (физическом) или стоимостном измерении, если только ущерб поддается такому измерению, т.е. как величина

$$R = -M.$$

В относительном выражении риск определяется как величина возможных потерь, отнесенная к некоторой базе, в виде которой наиболее удобно принимать либо имущественное состояние предпринимателя (хозяйственника), либо общие затраты ресурсов, либо ожидаемый доход от его деятельности, т.е. как величина

$$r = -M / +M.$$

Существуют различные факторы возникновения хозяйственного риска. Общая классификация этих факторов такова:

- а) производственный фактор;
- б) рыночный фактор;
- г) юридический фактор;
- д) субъективный (человеческий) фактор;
- е) финансовый фактор;

- ж) фактор устаревания;
 - з) ущерб от несчастного случая.
- Имеется две категории риска:

1. Риск, связанный с решениями в области повседневной деятельности, а именно:

- 1.1) риск ошибочных действий;
- 1.2) риск, связанный с проявлением стихийных бедствий.

2. Риск, связанный с решениями в области экономического развития, а именно:

- 2.1) риск, связанный с внутренним рынком (в зависимости от структуры и объемов производства, платежеспособного спроса, цен и затрат);
- 2.2) риск, связанный с внешним рынком, а именно, риск, связанный с изменениями межгосударственных отношений, таможенной ставки, спроса на товары мирового рынка и т.п.

Риск носит вероятностный характер. Вероятности возникновения определенного уровня риска бывают: наиболее вероятные; допустимые критические; катастрофические.

6.2. Комплексная оценка риска

Общая ставка риска - сумма частных рисков.

Оценка частного риска - нормативная минимальная ставка потерь плюс поправка (скидка или добавка).

Минимальные ставки (коэффициенты) технического риска:

- огонь - 0,08; самовоспламенение - 0,013;
- взрыв - 0,13; землетрясение - 0,015;
- кража - 0,05; буря, ураган - 0,013;
- обвал - 0,03; забастовка - 0,03;
- молния - 0,06; наводнение - 0,0125;
- падение самолета - 0,006.

Факторы, увеличивающие риск (примерно):

Кража: - склонность местного населения к краже;

- наличие привлекающего оборудования;
- условия складирования;
- используемая охрана и т.п.

Огонь: - наличие горюче-смазочных материалов;

- условия складирования;
- наличие и состояние противопожарной системы;
- условия и состояние электрооборудования;
- доступ к материалам;
- материал сооружения, конструкции, отделки, характер проводимых работ и т.п.

Факторы, снижающие риск (примерно):

- предварительное исследование;
- предварительная экспертиза;
- применение систем защиты и сигнализации;
- применение систем автоматического контроля.

Пример. Ваш телевизор испортился, но Вы предполагаете проявление одного из двух дефектов: дефект А с вероятностью 0,1 и дефект Б с вероятностью 0,9. Если Вы начнете ремонт и окажется, что имеет место дефект А, то успех Вам гарантирован с вероятностью 0,5. При дефекте Б Вы достигнете успеха с вероятностью 0,3. Если позовете соседа, то в первой ситуации вероятность успеха будет 0,1, а во второй - 0,9. Как лучше поступить?

Решение. Составим таблицу вероятностных оценок

	Дефект А (p=0,1)	Дефект Б (p=0,9)
Делаю сам	0,5	0,3
Зову соседа	0,1	0,9

Вероятностная оценка успеха (Р) равна:

для первого решения - $P_1 = 0,1 \cdot 0,5 + 0,9 \cdot 0,3 = 0,32$;

для второго решения - $P_2 = 0,1 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,9 = 0,82$.

Теперь Ваше решение очевидно - позовете соседа.

6.3. Правило деления капитала с целью снижения риска

Рассмотрим математическое обоснование варианта распределения суммы капитала инвестора при покупке акций двух предприятий. Общая сумма получаемого дохода инвестора (Д) равняется

$$D = a \cdot D_1 + (1 - a) \cdot D_2,$$

где а - доля капитала инвестора, выделяемая на покупку акций первого предприятия; D_1 и D_2 - доход на капитал, вложенный в первое и второе предприятие, соответственно.

Математическое ожидание дохода инвестора составит

$$m = a \cdot m_1 + (1 - a) \cdot m_2.$$

Оценка риска решения инвестора характеризуется дисперсией дохода (D). Чем меньше его дисперсия, тем меньше его риск. Решение инвестора о распределении капитала - это выбор значения коэффициента а, обеспечивающего максимум m и минимум D предприятий. D вычисляется по формуле (для каждого предприятия)

$$D[D] = \sum_{i=1}^n (D_i - D)^2 / (n - 1).$$

Вариант 1. Пусть $m_1 = m_2$ и предприятия полностью независимы. В этом случае получим следующее правило деления средств между этими двумя предприятиями:

$$a = D_2 / (D_1 + D_2) ,$$

где D_1, D_2 - дисперсия дохода, соответственно, по предприятиям.

Вариант 2. Пусть $m_1 = m_2$ и предприятия обратно зависимы при получении предпринимательского дохода. В этом случае суммарный доход m не зависит от значения коэффициента a , а дисперсия ожидаемого дохода будет минимальна при

$$a = \sqrt{D_2} / (\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}) .$$

Вариант 3. Пусть $m_1 = m_2$ и предприятия прямо зависимы при получении предпринимательского дохода. В этом случае также суммарный доход m не зависит от значения a , а дисперсия дохода будет минимальна при

$$a = \begin{cases} 1, & \text{если } D_1 < D_2 \\ 0, & \text{если } D_1 > D_2 . \end{cases}$$

6.4. Способы уменьшения негативных последствий хозяйственного риска

Существуют различные способы предотвращения (компенсации) негативных последствий хозяйственного риска. К ним относятся:

1. Выбор варианта управленческих решений с минимальным уровнем риска.
2. Государственное страхование предприятий, оказавшихся в зоне риска.
3. Создание финансовых резервов.
4. Использование кредитов инновационных банков и других субъектов.
5. Прямое управленческое воздействие.

Страхование риска активно используется в рыночной экономике. Каждое физическое или юридическое лицо стремится застраховаться от возможных потерь в будущем. При этом сумма страхования зависит от разновидности страхуемого объекта (табл.).

Десять «золотых правил» снижения риска

1. Дублирование поставщиков — наличие по крайней мере двух поставщиков для каждого закупаемого изделия.
2. Дублирование потребителей — наличие взаимозаменяемых потребителей.
3. Разделение партий при транспортировке важного груза.
4. Хранение важного материала по крайней мере в двух разных местах.

Таблица
«Страховка - управленческое действие»

Страхуемое событие, объект	Страхуемая сумма
Страхуемая сумма	Сумма вероятных убытков
Пожар, стихийное бедствие	Сумма вероятных убытков
Авария автомобиля	Сумма вероятных расходов на ремонт
Потеря, порча груза	Стоимость груза
Качество работы сотрудников	Возможные убытки от снижения качества работы
Честность служащих	Возможные материально- моральные потери
Обязательства договора	Возможные потери от срыва
Деловая активность фирмы	Возможные потери при остановке производства
Здоровье руководителя	Потери фирмы от утраты интеллектуального вклада
Здоровье работников	Возможные расходы на лечение
Цены на рынке	Потери от колебания цен
Кредит	Возможные финансовые потери
Имущество	Стоимость имущества
Работоспособность	Возможное снижение дохода
Страховка	Возможный убыток от разовых выплат по страховке

5. Содержание структуры портфеля капитала: треть - крупные компании; треть - средние компании; треть - небольшие компании (предприятия, фирмы).

6. Наличие номенклатуры портфеля капитала - минимум 12 компаний (предприятий, фирм).

7. Соблюдение «правила пяти пальцев» при оценке правильного портфеля акций:

1 акция — потери; 3 акции - достижение целей; 1 акция - повышенный успех.

8. Разделение капитала по сферам (источникам) дохода. Так, например, в финансовом портфеле средней японской семьи с годовым доходом 5 млн. иен акции составляют 3,9%, с доходом 10-15 млн. иен — 12%, с доходом свыше 15 млн. иен - 16%.

9. Ориентация на среднюю норму прибыли по сферам вложения средств. Например, в США за период 1970 - 1990 гг. средняя норма прибыли равнялась:

марки - 12,9;
 золото - 12,8;
 кигайский фарфор - 12,0;
 бриллианты - 9,9;
 картины - 8,8;
 облигации - 8,1;
 частные дома - 7,7;
 акции - 6,8;
 земля - 5,9;
 валюта - 4,7 (%).

10. Соизмерение роста производства и снижения издержек. Японская формула: «Удвоение производства снижает издержки на треть», а американская формула: «Удвоение производства снижает издержки на 5-20%».

Страхование риска при кредитовании

Страхование риска при предоставлении кредитов может быть разделено на три группы мероприятий: профилактические, регулирующие, экономические.

1. Профилактические мероприятия:

- взаимное информирование банков о кредиторах;
- взаимное информирование банков о результатах своей работы;
- участие в поддержке национальной межбанковской системы;
- участие в поддержке международной межбанковской системы;
- контроль за результатами деятельности предприятий (фирм);
- анализ результатов своей деятельности.

2. Регулирующие мероприятия:

- ограничение суммы разового кредита по уровням управления (сотрудник - 1; начальник отдела - 1,5; управляющий - 3; член правления - 9; два члена правления - 15; правление - более 15);
- ограничение суммы кредита долей капитала кредитора;
- ограничение суммы кредита долей капитала банка (до 25%);
- резервирование прибыли (до 20%);
- ограничение сферы кредитования (не менее 30 в своей области);
- резервирование средств (30 ежедневных расчетов, 20% срочных вкладов, 10% суммы сберегательных счетов).

3. Экономические формы страхования кредита:

- (1) выдача кредита под гарантии специального банка;
- (2) выдача кредита под имущество кредитора;
- (3) выдача кредита под залог ценных бумаг;
- (4) выдача кредита под поручительство;
- (5) страхование кредита под передачу имущества (ломбардный залог);
- (6) страхование кредита в страховом обществе;
- (7) увязка кредитного риска с процентом на кредит и сроком возврата;
- (8) распределение риска кредита между банками;
- (9) предоставление кредита частями.

Залоговое страхование возможных потерь (риска) является распространенным способом страхования. Банки обычно используют следующие коэффициенты по видам залогового имущества:

- облигации государства - 1,0 номинальной цены;
- благородные металлы - 0,8 рыночной цены;
- акции предприятий - 0,6 курсовой цены;
- оборудование - 0,6 балансовой цены;
- товар (услуги, работа) - 0,6 рыночной цены;
- скоропортящиеся товары - 0,2 рыночной цены.

6.5. Зоны риска и кривая распределения вероятностей потери прибыли

С целью вероятностной оценки риска выделяют четыре зоны риска (рис. 6.1):

- (1) не рисковая зона (НРЗ);
- (2) зона допустимого риска (ЗДР);
- (3) зона критического риска (ЗКР);
- (4) зона катастрофического риска (ЗКТР).

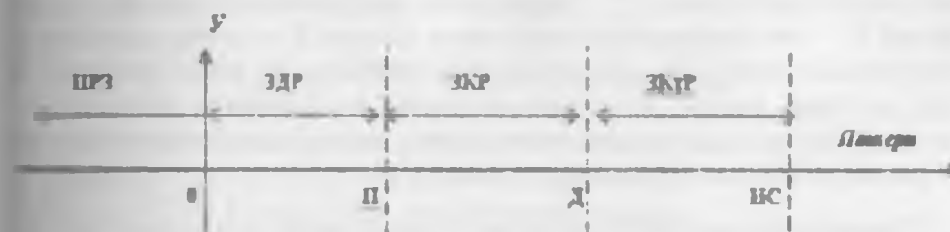


Рис. 6.1. Схема выделения зон риска

Здесь: Y — результирующий показатель хозяйственной деятельности субъекта, П — расчетная прибыль, Д — ожидаемые доход, выручка (сумма затрат плюс прибыль), С — имущественное состояние субъекта.

Типичная кривая распределения вероятностей потери прибыли, т.е. возникновения хозяйственного риска строится с учетом выделенных зон риска (рис. 6.2).

По мнению известных ученых (например, Б.А. Райзберга) можно ориентироваться на следующие предельные значения вероятностей хозяйственного риска:

$$P = 0,1 \text{ (10\%); } P_{кр} = 0,01 \text{ (1\%); } P_{к} = 0,001 \text{ (0,1\%).}$$

Это означает, что не следует идти на хозяйственную сделку, если в десяти случаях из ста можно потерять всю прибыль, в одном случае из ста — потерять всю выручку, хотя бы в одном случае из тысячи — потерять всё.

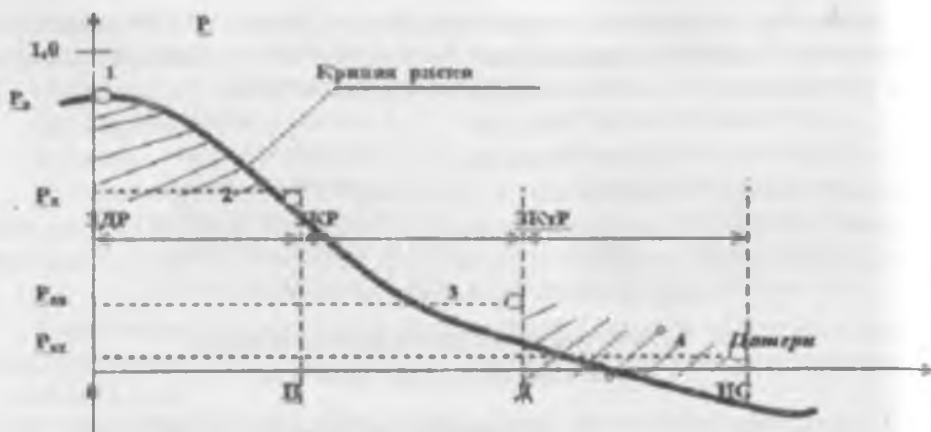


Рис.6.2. Схема типичной кривой распределения вероятностей возникновения риска

Здесь: P — вероятность возникновения определенного уровня потери прибыли; P_d — вероятность появления допустимого риска; $P_{кр}$ — вероятность появления критического риска; $P_{кп}$ — вероятность появления катастрофического риска; P_p — вероятность получения максимальной прибыли; 1 — точка вероятности нулевых потерь; 2 — точка вероятности допустимых потерь, т.е. полной потери прибыли; 3 — точка вероятности критических, равных величине расчетной (ожидаемой) выручки; 4 — точка вероятности возникновения потерь, равных имущественному состоянию хозяйственника (собственника).

Имеется три способа построения кривой риска: статистический, экспертный и расчетно-аналитический.

Статистический способ — это способ изучения статистики потерь, имевших место в аналогичных видах хозяйственной деятельности, т.е. установление частот появления определенных уровней потерь.

Экспертный способ может быть реализован путем обработки мнений опытных специалистов с применением метода экспертной оценки.

Расчетно-аналитический способ основан на теоретических представлениях риска (уровня потерь). Так, например:

- прикладная теория риска хорошо разработана применительно к страховому и игровому риску;
- элементы теории игр в принципе применимы ко всем рискам;
- прикладные математические методы оценочных расчетов производственного, коммерческого, финансового риска пока слабо разработаны.

Рассмотрим следующий математико-статистический метод (так называемый метод «двух сигм») определения коэффициента риска (K):

$$K = P_2 / P_1$$

при $P_{1,2} = P \pm 2 \cdot Q$ - диапазонах (интервале) доверительной вероятности выполнения бизнес плана (БП) предпринимателя;

$P = C_1 / (C_1 + C_2)$ - доверительной вероятности выполнения БП;

Q - среднеквадратических отклонениях удельных затрат, а именно при:

C_1 - удельных затратах на единицу продукции (услуг, работ) при невыполнении БП в связи с чрезмерной его напряженности;

C_2 - удельных затратах на единицу продукции (услуг, работ) при низкой напряженности БП (при недостаточности объема спроса).

Здесь степень риска оценивается по следующей шкале:

$0 < K \leq 20$ - *пессимистический риск*;

$20 < K \leq 40$ - *осторожный риск*;

$40 < K \leq 60$ - *средняя степень риска*;

$60 < K \leq 80$ - *рискованная степень*;

$80 < K \leq 100$ - *высокая степень риска*.

Пример 1. Требуется определить степень риска при доверительной вероятности выполнения бизнес-плана фирмы «Шамс-Навоий», равной 0,95 (допустимый уровень максимального среднеквадратического отклонения удельных затрат равен 0,15 или 15%).

Решение. $P_1 = 0,95 + 2 \cdot 0,15 = 1,25$; $P_2 = 0,95 - 2 \cdot 0,15 = 0,65$;

$K = 0,65 / 1,25 = 0,52$ или 52% - средняя степень риска.

Пример 2. Требуется определить степень риска при доверительной вероятности выполнения бизнес-плана МП «Ритм», равной 0,6 и $Q = 0,05$.

Решение. $P_1 = 0,6 + 2 \cdot 0,05 = 0,7$; $P_2 = 0,6 - 2 \cdot 0,05 = 0,5$;

$K = 0,5 / 0,7 = 0,71$ или 71% - рискованная степень.

Контрольные вопросы

1. Что такое риск и каково его место в управленческих решениях?
2. Какие разновидности риска существуют?
3. Каким образом измеряется и оценивается риск?
4. Перечислите факторы, увеличивающие и снижающие риск?
5. Каково правило деления капитала с целью снижения риска?
6. Какие способы применяют для уменьшения негативных последствий хозяйственного риска?
7. Какие мероприятия применяются для страхования риска при кредитовании?
8. Как выделяются зоны риска?
9. Каким образом иллюстрируется кривая распределения вероятностей возникновения риска?
10. Перечислите способы (методы) построения кривой хозяйственного риска (приведите пример).

7. ПРИНЯТИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

7.1. Классификация ЗПР в условиях неопределенности

Задача принятия решений в условиях неопределенности определялась нами ранее как задача выбора оптимальной стратегии в операции, исход которой помимо стратегий оперирующей стороны и ряда фиксированных факторов (детерминированных или стохастических, или тех и других вместе) зависит также от некоторых неопределенных факторов, неподвластных оперирующей стороне и неизвестных ей в момент принятия решения.

Подчеркнем здесь еще раз принципиальное различие между фиксированными стохастическими факторами и неопределенными факторами. И те и другие факторы приводят к разбросу в возможных исходах операции при многократной реализации одной и той же стратегии оперирующей стороны в аналогичных условиях проведения операции. В этом их сходство между собой и отличие от детерминированных факторов.

В отношении вероятностей различных реализаций исходов операции возможны два случая: 1) вероятности возможных исходов операции не имеют физического смысла; 2) вероятности возможных исходов операции имеют физический смысл, но либо вовсе неизвестны с недостаточной для принятия решений точностью. Первое соответствует неопределенным факторам нестохастической природы, которые не могут быть описаны в терминах теории вероятностей. Второе соответствует факторам стохастической (вероятностной) природы, неопределенность в отношении которых обусловлена их недостаточной изученностью.

Здесь под природой понимается совокупность обстоятельств, в условиях которых приходится принимать решения.

В соответствии с характером причины, вызывающей неопределенность нестохастической природы, можно выделить две группы факторов:

1. Стратегические неопределенности - неопределенные факторы, появляющиеся за счет участия в операции нескольких оперирующих сторон, т.е. разумных, активно действующих участников операции, преследующих различные (несовпадающие) цели. Неопределенность здесь обусловлена тем, что каждая из оперирующих сторон вынуж-

дена принимать решения в условиях, когда ей неизвестны будущие действия (стратегии), которые будут предприняты в процессе проведения операции другими ее участниками. Отсюда следует и название этих факторов.

2. Концептуальные неопределенности - неопределенные факторы, сопутствующие принятию особо сложных решений, имеющих долговременные и далеко идущие последствия, и связанные с нечеткими представлениями оперирующей стороны о своих собственных целях и целях других участников операции, о своих и чужих возможностях в отношении достижения целей, о будущих путях развития и т.п., а также факторы связанные с трудностями количественной оценки степени достижения особо сложных, неформализованных целей, имеющих лишь качественное описание. Подобные неопределенности часто встречаются в экономических и особенно в социально-экономических исследованиях.

ЗПР в условиях действия неопределенных стратегических факторов можно назвать **многосторонними ЗПР**, так как исход соответствующих операций зависит от деятельности нескольких оперирующих сторон многосторонней операции, и создает конфликт между ее участниками, иначе, название подобных ЗПР - задачи в условиях **конфликтной ситуации** или, иначе, **конфликтные ЗПР**.

Конфликтные ЗПР можно подразделить на **одноуровневые** и **многоуровневые**. В одноуровневых ЗПР участники операции не связаны никакими формами подчинения, они действуют на одном уровне власти. Их действия связаны лишь тем, что они участвуют в одной операции и заинтересованы в том или ином ее исходе. Многосторонние многоуровневые задачи принятия решений возникают в сложных системах управления, имеющих иерархическую структуру.

Одноуровневые конфликтные ЗПР могут быть как **антагонистическими**, так и **неантагонистическими**. Антагонистическая ЗПР связана с операцией, в которой сталкиваются интересы двух сторон, преследующих прямо противоположные цели. Очевидно, что многоуровневые ЗПР не являются антагонистическими: исследование ситуаций прямого неподчинения и противодействия нижестоящих руководителей вышестоящим не является предметом математической теории принятия решений.

7.2. Обзор методов управленческих решений в условиях неопределенности

Перейдем к рассмотрению методов решения ЗПР в условиях **природных неопределенностей**, называемых также часто ЗПР в условиях

неизвестного состояния природы. Математическим аппаратом решения этих задач является теория статистических решений.

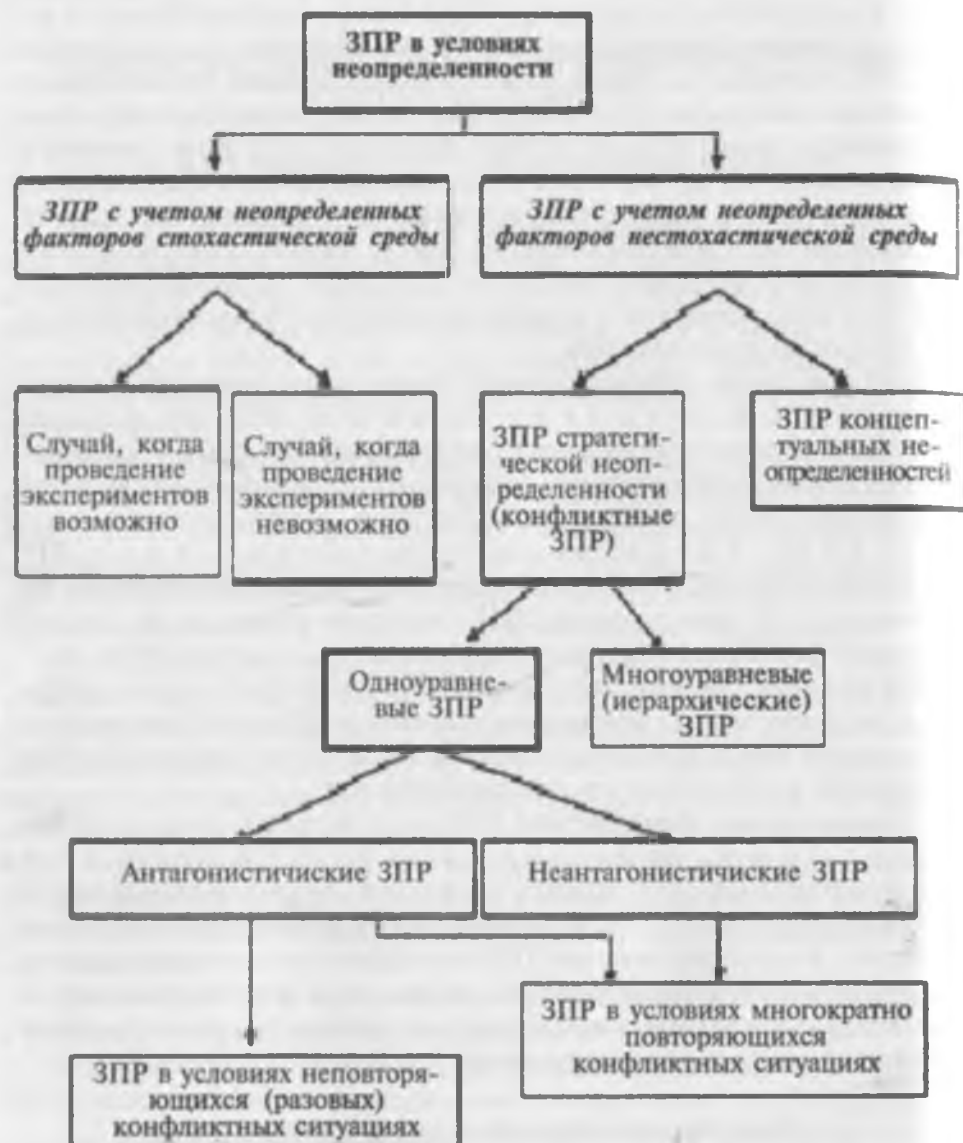


Рис. 7.2.1. Схема классификации задач принятия решений в условиях неопределенности

В теории статистических решений обычно рассматриваются два случая:

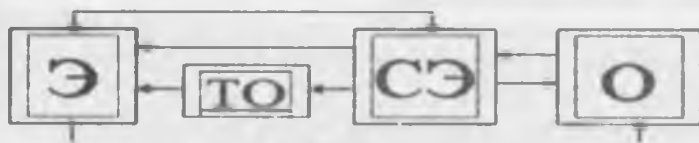
1) операция такова, что не представляется возможным проведение каких-либо экспериментов с целью уточнения значений вероятностей возможных исходов операции;

2) проведение экспериментов возможно.

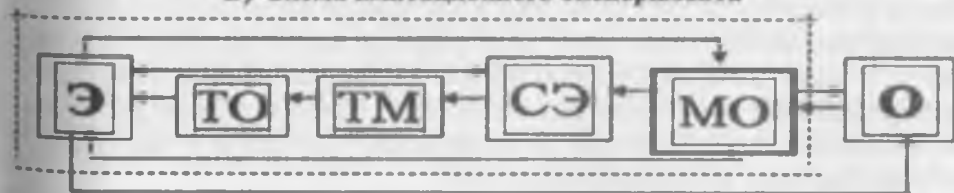
Первый случай является наиболее тяжелым. Здесь решения принимаются на основании различных критериев оптимальности, сформулированных в теории статистических решений. Выбор того или иного критерия является концептуальной проблемой. Соответствующие ЗПР часто называют статистическими играми без экспериментов. Во втором случае в связи с тем, что всякий эксперимент обладает стоимостью, возникает вопрос, сколько и каких экспериментов целесообразно предпринять для уточнения вероятностей возможных исходов. На эти вопросы отвечает теория планирования экспериментов, являющаяся основным содержанием теории статистических решений. Соответствующие ЗПР часто называют статистическими играми с экспериментами.

Эксперименты могут быть натурными или имитационными. Их отличия видны из следующих принципиальных схем проведения подобных экспериментов.

А) Схема натурального эксперимента



Б) Схема имитационного эксперимента



Здесь: Э — экспериментатор; О — исследуемый объект; СЭ — средства проведения эксперимента; ТО — теоретическое представление об исследуемом объекте; ТМ — теоретическое представление о модели объекта; МО — модель объекта.

Следует выделить принципиальное отличие ЗПР в условиях конфликтной ситуации от других видов ЗПР в условиях неопределенности. С конфликтными ЗПР обычно связывают два предположения:

1) каждой оперирующей стороне многосторонней операции известны как цели, так и весь набор возможных стратегий всех других участников операции;

2) поскольку каждый участник многосторонней операции является разумным и активно действующим, то определяющим в его поведении является стремление к максимально возможному достижению собственных целей.

Оба эти предположения определяют и одновременно упрощают подходы к принятию решений в конфликтных ЗПР. На них строятся, в частности, теория игр и теория минимакса.

В указанном смысле ЗПР в условиях «природных» неопределенностей являются принципиально более сложными. Здесь вторым участником операции является «природа». Однако природу нельзя рассматривать как разумного, активно действующего участника операции, ей нельзя приписать никаких сознательно поставленных целей, к достижению которых она стремится. Тем самым неопределенность выступает здесь в более «тяжелой» форме. Однако природа развивается и «действует» в соответствии со своими объективно существующими законами. У человека есть возможность постепенно изучать эти законы, в частности, с помощью специальных экспериментов, и тем самым снижать степень неопределенности. В этом — ключ к решению ЗПР в условиях «природных» неопределенностей.

Наиболее сложный класс ЗПР в условиях неопределенностей составляют ЗПР в условиях действия неопределенных факторов концептуального характера. Эти задачи можно также назвать ЗПР в условиях неопределенных целей и возможностей. Здесь неопределенность выступает в наиболее тяжелой форме. Для решения ЗПР в условиях неопределенности концептуального характера в настоящее время математический аппарат разработан очень слабо. Здесь решение задачи выливается, прежде всего, в чисто концептуальную проблему, направленную на вскрытие неопределенности в отношении концепций. Такая проблема решается с использованием экспертных эвристических процедур, в частности, с использованием метода «дерева целей».

7.3. Принятие управленческих решений в условиях конфликтной ситуации

В данном разделе будут рассмотрены элементы теории игр как математический аппарат, который может быть использован для обоснования решений в условиях конфликтной ситуации. Математическая теория игр или, короче, теория игр, есть раздел современной прикладной

математики, содержанием которой являются методы обоснования оптимальных решений в конфликтных одноуровневых ситуациях, обладающих свойством многократной повторяемости.

В настоящее время теория игр представляет собой ёмкую и развитую математическую дисциплину. Развита теория антагонистических и неантагонистических игр, конечных игр, бесконечных игр, позиционных игр.

Любая ситуация, складывающаяся в ходе военных действий, принадлежит к конфликтным, так, что здесь каждое решение должно приниматься с учетом сознательного противодействия разумного противника. К той же категории принадлежат и ситуации, возникающие при планировании любых военных действий. Интересными примерами конфликтных ситуаций являются спортивные состязания, арбитражные споры, аукционы, выборы в парламент при наличии нескольких кандидатов на одно место и т.д.

Реальные конфликтные ситуации обычно очень сложны и потому трудны для непосредственного анализа благодаря большому количеству сопутствующих факторов, из которых многие, однако, являются второстепенными. Чтобы сделать возможным математический анализ конфликтной ситуации, ее необходимо упростить, учтя только основные факторы. Упрощенная схематизированная модель конфликтной ситуации называется и г р о й.

От реальной конфликтной ситуации игра отличается тем, что ведется по вполне определенным п р а в и л а м. Правила игры представляют собой систему условий, регламентирующих весь процесс развития игры. В частности, правилами игры определяются все возможные варианты действий каждой из оперирующих сторон в конфликтной ситуации. В математической теории игр предполагается, что правила игры известны каждой из оперирующих сторон и неукоснительно ими выполняются.

Терминология, которой пользуются в теории игр, ведет свое происхождение от спортивных и азартных игр. Эти игры носят характер соревнования, происходящего по определенным правилам и заканчивающегося победой того или другого игрока. В соответствии с этим и в теории игр стороны, участвующие в конфликте, условно именуются и г р о к а м и, оценка исхода конфликта - в ы и г р ы ш е м. При этом игроками могут быть как отдельные личности, так и целые коллективы людей, имеющих общие цели (команды).

В игре могут сталкиваться интересы двух или более противников: в первом случае игра называется п а р н о й, во втором — м н о ж е с т в е н н о й. Участники множественной игры могут образовывать коалиции.

Множественная игра с двумя постоянными коалициями обращается в парную игру.

Наиболее простой и теоретически разработанной игрой является парная антагонистическая игра. В ней участвуют два игрока, преследующие прямо противоположные цели. Парная антагонистическая игра относится к классу так называемых игр с нулевой суммой. В этих играх сумма выигрышей всех оперирующих сторон равна нулю. Действительно, в парной антагонистической игре один игрок выигрывает ровно столько, сколько проигрывает второй. Все обычные салонные игры с денежными ставками являются примерами игр с нулевой суммой. С другой стороны, в конфликтных ситуациях, например, экономического характера выигрыш одного игрока может не быть равным проигрышу другого, так как здесь возможны какие-то поступления средств извне. Теория игр с ненулевой суммой много сложнее теории игр с нулевой суммой и в настоящее время разработана еще слабо.

Следует различать понятия «игра» и «партия игры». Игра представляет собой совокупность правил, регламентирующих поведение игроков. Каждый случай игры некоторым конкретным образом от начала и до конца представляет собой индивидуальную партию игры. Как уже отмечалось ранее, рекомендации теории игр по выбору оптимального поведения участников конфликтной ситуации основаны на предположении о многократной повторяемости конфликта. Конкретно в теории это предположение сводится к предположению о том, что любая игра состоит из бесконечного числа индивидуальных партий игры. Поэтому оптимальное в соответствии с рекомендациями теории игр поведение участников конфликтной ситуации является оптимальным «в среднем».

7.4. Применение теории игр и статистических решений

Теория игр — это математическая теория конфликтных ситуаций, разработанная применительно к таким специфическим конфликтным ситуациям, которые обладают свойством многократной (бесконечной) повторяемости.

Целью теории игр является выработка рекомендаций по выбору оптимального поведения участников многократно повторяющейся конфликтной ситуации.

Задача теории игр заключается в нахождении решения (стратегии) игры. Здесь выражение «решить игру» означает «найти оптимальную стратегию для каждого из игроков и соответствующую цену игры».

Ценой игры называется выигрыш (проигрыш), соответствующий оптимальным стратегиям игроков.

Возникает вопрос: *какое поведение (какую стратегию) следует считать оптимальным для каждого из участников конфликтной ситуации?*

Отвечая на этот вопрос следует заметить, что применяемые математические методы теории игр исходят из следующих основных принципов:

1. Каждый игрок считает других игроков (своего противника) столь же разумными, как и он сам, и не рассчитывает на его промахи.

2. Каждый игрок является достаточно осторожным и стремится придерживаться такой линии поведения, которая гарантирует ему некоторый средний результат независимо от поведения противника (принцип осторожности или принцип гарантированного результата).

Здесь не учитываются просчеты и ошибки игроков, а также элементы азарта и риска. Таким образом, *оптимальной стратегией* называется такая стратегия, которая при многократном повторении игры гарантирует данному игроку максимально возможный средний выигрыш (или минимально возможный средний проигрыш) независимо от поведения противника.

Введем следующие обозначения:

X — первый игрок;

Y — второй игрок (противник);

x_i — стратегии игрока X ;

y_j — стратегии игрока Y ;

$Q = \|q_{ij}\|$ — *платежная матрица*, т.е. матрица среднего платежа игрока Y игроку X , если игрок X предпринимает стратегию x_i , а игрок Y — стратегию y_j , т.е. *матрица выигрышей* игрока X ;

S_1, S_2 — нижняя и верхняя цена игры.

Тогда *минимаксом* или *нижней ценой* игры называется элемент платежной матрицы (Q), равный максимуму из минимумов по строкам матрицы, т.е. нижняя цена игры определяется по формуле

$$S_1 = \max_{i=1, m} \min_{j=1, n} q_{ij}.$$

Минимаксом или *верхней ценой* игры называется такой элемент матрицы Q , который равен минимуму из максимумов по столбцам матрицы, т.е. *стратегия предельной осторожности* или *стратегия гарантированного результата* игрока X и определяется по формуле

$$S_2 = \min_{j=1, n} \max_{i=1, m} q_{ij}.$$

Очевидно, что $S_1 \leq S_2$. Если $S_1 = S_2$, то соответствующий элемент платежной матрицы Q называется *седловой точкой* или *"чистой ценой"* игры. При $S_1 = S_2 = 0$ игра называется *безобидной игрой*.

Пример 1.

$X \backslash Y$	y_1	y_2	y_3	y_4	S_1
x_1	3	8	2	3	2
x_2	4	3	8	5	3
x_3	7	2	1	6	1
S_2	7	8	8	6	

Пример 2.

$X \backslash Y$	y_1	y_2	y_3	S_1
x_1	1	3	10	1
x_2	6	4	5	4
x_3	6	3	2	2
S_2	6	4	10	

Как видно из полученных решений, цена игры первого случая (пример 1) определяется в интервале $S \in [S_1, S_2] = [3, 6]$, т.е. нижняя цена ($S_1 = 3$) при стратегиях x_2, y_2 и верхняя цена ($S_2 = 6$) при стратегиях x_3, y_4 , а во втором случае — однозначно, т.е. $S = 4$ при стратегиях x_2, y_2 (пример 2).

Допустим, что $A = \|a_{ij}\|$ — матрица выигрышей при каждой паре стратегий (x_i, P_j) , где x_i — возможная стратегия оперирующей стороны; P_j — возможное состояние (проигрыш) природы принятия решений (например, погода, покупательский спрос, объем перевозок, привлекательность товара, имидж фирмы и т.п.).

Тогда *риском игрока* (r_i из матрицы риска $R = \|r_{ij}\|$) при использовании определенной стратегии x_i в условиях P_j называется разность между мак-

симальным выигрышем, который он мог бы получить, и выигрышем при использовании стратегии x_i в условиях Π_j , т.е.:

$$r_{ij} = \max_{i=1,m} a_{ij} - a_{ij}.$$

Пример 3.

Матрица выигрышей

Матрица риска

Π						Π				
Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_1		Π_2	Π_3	Π_4		
X						X				
x_1	1	4	5	9		x_1	3	4	4	0
x_2	3	8	9	4		x_2	1	0	0	5
x_3	4	5	3	2		x_3	0	3	6	7

Выбор решений при подобных статистических играх без экспериментов может быть осуществлен с помощью одного из следующих критериев оптимальности.

1. Максиминный критерий Вальда, т.е. критерий крайнего пессимизма

$$W = \max_{i=1,m} \min_{j=1,n} a_{ij}.$$

Критерий Вальда ориентирует ЛПР на наихудшие условия и рекомендует выбрать ту стратегию, для которой в худших условиях выигрыш максимален.

2. Критерий минимаксного риска Севиджа, т.е. выбрать ту стратегию, при которой величина риска принимает наименьшее значение с самой неблагоприятной ситуацией или такую, которая гарантирует минимум максимального риска

$$S = \min_{i=1,m} \max_{j=1,n} a_{ij}.$$

Сущность этого критерия в том, чтобы любыми путями избежать большого риска при принятии решения. Здесь пессимизм проявляется в том, что худшим считается не минимальный выигрыш, а максимальный риск — максимальная потеря выигрыша.

3. Критерий пессимизма-оптимизма Гурвица

$$H = \max_{i=1,m} \left[\alpha \cdot \min_{j=1,n} a_{ij} + (1 - \alpha) \cdot \max_{j=1,n} a_{ij} \right],$$

где $\alpha \in [0,1]$ — некий коэффициент, характеризующий степень пессимизма-оптимизма оперирующей стороны (ЛПР).

Пример 4. АО «Навоийдонмахсулот» производит муку и мучную продукцию. Руководство наметило на 2008 год сотрудничество со следующими малыми и частными предприятиями (фирмами): СП «Дока хлеб» (x_1), МП «Навоий-Шамс» (x_2) и ЧМФ (x_3). Стратегия сотрудничества АО с этими предприятиями (фирмами) зависит от возможных состояний природы принятия решений, а именно, от: месторасположения (P_1), имиджа (P_2), товарооборота (P_3), платежеспособности (P_4). Маркетинговые данные о матрице выигрышей (прибыли, в усл.ед.) приведены в таблице исходных данных задачи.

Таблица исходных данных

(В усл.ед.)

Природа Стратегия	Место- распо- ложение	Имидж фирмы	Товаро- оборот	Платеже- способ- ность
СП «Дока хлеб»	5	4	1	6
МП «Шамс-Навоий»	4	6	2	8
Частные магазины и фирмы	3	4	3	7

Используя матрицы выигрышей, требуется определить стратегию сотрудничества АО «Навоийдонмахсулот» с различными предприятиями (фирмами) города.

Решение 1. Крайняя пессимистическая стратегия (по критерию Вальда) — это стратегия сотрудничества АО с ЧМФ, учитывая их месторасположение и объемы товарооборота.

Матрица выигрыша

$x \backslash p$	p_1	p_2	p_3	p_4	w_i
x_1	5	4	1	6	1
x_2	4	6	2	8	2
x_3	3	4	3	7	3

2. Стратегия минимаксного риска (по критерию Севиджа) – это стратегия сотрудничества АО с МП «Шамс-Навоий», учитывая те же факторы с точки зрения предпринимательского риска.

Матрица риска

$x \backslash p$	p_1	p_2	p_3	p_4	s_i
x_1	0	2	2	2	2
x_2	1	0	1	0	1
x_3	2	2	0	1	2

3. Стратегии пессимизма-оптимизма (по критерию Гурвица) – это стратегия оптимизма при сотрудничестве АО с МП, стратегия пессимизма - ЧМФ, а также стратегия среднего оптимизма-пессимизма - одновременно с МП и ЧМФ.

Матрица выигрыша

$x \backslash p$	p_1	p_2	p_3	p_4	$h_{\min}$	$h_{\max}$	H_i при:		
							$\alpha=0,05$	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,95$
x_1	5	4	1	6	1	6	5,8	3,5	1,3
x_2	4	6	2	8	2	8	7,7	5	2,3
x_3	3	4	3	7	3	7	6,8	5	3,2

Таким образом, имеем следующую итоговую таблицу решений задачи.

Стратегии сотрудничества АО «Навоийдонмахсулот» с другими предприятиями (фирмами) города

№: п/п	Критерии выбора решения	Оптимальная стратегия	Близкая к оптимальной стратегия
1.	Пессимистический критерий Вальда	<i>Частные магазины и фирмы</i>	МП «Шамс-Навоий»
2.	Критерий минимаксного риска Севиджа	МП «Шамс-Навоий»	СП «Дока-хлеб», МП «Шамс-Навоий»
3.	Оптимистический критерий Гурвица	МП «Шамс-Навоий»	Частные магазины и фирмы
4.	Пессимистический критерий Гурвица	<i>Частные магазины и фирмы</i>	МП «Шамс-Навоий»
5.	Критерий Гурвица среднего оптимизма-пессимизма	МП «Шамс-Навоий» и ЧМФ	СП «Дока-хлеб»

Контрольные вопросы

1. Каковы классификационные признаки и разновидности задач принятия решений в условиях неопределенности?
2. В чем заключается суть имитационного эксперимента?
3. Какие особенности имеет процесс принятия управленческих решений в условиях конфликтной ситуации?
4. Какое поведение (какую стратегию) следует считать оптимальным для каждого из участников конфликтной ситуации?
5. Как применяются элементы теории игр для выбора стратегических решений?
6. Какую интерпретацию имеют элементы матриц «выигрышей» и «риска»?
7. Как выбирается стратегическое решение при статистических играх без экспериментов с помощью критериев оптимальности Вальда, Севиджа и Гурвица?

8. РАЗРАБОТКА ОПЕРАТИВНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

8.1. Основные понятия оперативного управления

Оперативное управление — одна из важнейших подсистем управления предприятием (фирмой) с целью обеспечения равномерной и ритмичной работы в намеченных сроках.

Центральное место в оперативном управлении занимает **оперативно-календарное планирование (ОКП)**, задача которого состоит в формировании календарных планов-графиков выполнения работ предприятием, цехами, участками, на рабочих местах по отдельным отрезкам времени — месяцам, декадам, суткам, часам.

Система сетевого планирования и управления (СПУ) представляет собой комплекс графических и расчетных методов, организационных мероприятий с целью моделирования, анализа и оптимизации плана комплекса работ по проектированию или производстве продукции (услуг).

Основным средством в системе СПУ является **сетевой граф** (сетевой график, сетевая модель или просто сеть), представляющий собой безмасштабное графическое изображение планируемого процесса и отражающий взаимосвязь и последовательность входящих в него работ.

Объектом управления в системах СПУ является коллектив исполнителей, располагающий определенными материальными и финансовыми ресурсами, и выполняющий комплекс работ, направленных на достижение конечного результата в установленные сроки.

Система СПУ охватывает следующие **основные этапы** оперативного управления комплексом работ:

- 1) выявление работ, которые необходимо произвести в процессе ПР и связей между ними;
- 2) построение сетевого графика (СГ) процесса на основе предварительно составленного перечня всех входящих в этот процесс работ и связей между ними;
- 3) установление количественных оценок по каждой работе (время, стоимость, ресурсы);
- 4) расчет параметров СГ вручную или с помощью компьютера;

5) анализ и оптимизация СГ с целью получения определенных оптимальных показателей процесса (например, минимальный срок, минимальная стоимость и т.п.);

6) использование СГ как основного инструмента оперативного управления ходом работ.

Система СПУ (СГ) успешно применяется для оперативного управления сложными строительными работами, процессом производства крупных изделий, разработки и внедрения различных инновационных проектов.

Основными элементами сетевой модели являются: работа, событие, продолжительность работы, критический путь, резерв времени.

Работа — это любые процессы, действия, приводящие к достижению определенных результатов (событий). Работы могут иметь такие количественные показатели, как продолжительность, трудоёмкость, стоимость, материальные ресурсы для их выполнения.

Событие — это момент времени, определяющий возможность осуществления начала или окончания какой-то работы или нескольких работ. Оно бывает исходным (предшествующим) и завершающим (последующим, конечным).

Критический путь — это полный путь комплекса работ, имеющий наибольшую продолжительность. Все работы и события, лежащие на критическом пути, также называются критическими.

8.2. Применение теории графов в принятии оперативных управленческих решений

Сетевая модель (сетевой график) как инструмент теории графов сама по себе не может служить средством управления комплексом. Для этой цели менеджеру необходимо располагать количественными оценками элементов сети — параметрами.

Рассмотрим временные параметры СГ, включающие параметры событий (j) и работ (i, j). Будем считать, что для каждой работы (i, j) задано время (продолжительность) её выполнения (t_{ij}), которое представляется над стрелкой, обозначающей соответствующую работу (а дуга или вершины СГ обозначают события).

Продолжительность (время) выполнения работ определяется:

1) по достигнутой производительности труда (для работ, выполнявшихся ранее в аналогичных условиях);

2) по нормам времени, если таковые нормативы имеются на предприятии (фирме);

3) с помощью экспертных оценок, получаемых на основании опроса опытных специалистов;

4) с помощью вероятностных оценок, если предыдущими способами не удастся его оценить.

Временные параметры событий

(1) Наиболее ранний срок свершения события

$$T_j^P = \max_i |T_i^P + t_{ij}|, \quad \text{где } T_i^P = 0.$$

(2) Наиболее поздний срок свершения события

$$T_j^N = \min_i |T_j^N - t_{ij}|, \quad \text{где } T_n^N = T_n^P, \\ n - \text{последнее событие.}$$

(3) Резерв времени свершения события

$$R_j = T_j^N - T_j^P.$$

Временные параметры работ

(4) Срок раннего начала работы

$$T_{ij}^{PN} = T_i^P.$$

(5) Срок раннего окончания работы

$$T_{ij}^{PO} = T_i^P + t_{ij} \quad \text{или} \quad T_{ij}^{PO} = T_{ij}^{PN} + t_{ij}.$$

(5) Срок позднего начала работы

$$T_{ij}^{NN} = T_j^N - t_{ij}.$$

(5) Срок позднего окончания работы

$$T_{ij}^{NO} = T_j^N \quad \text{или} \quad T_{ij}^{NO} = T_{ij}^{NN} + t_{ij}.$$

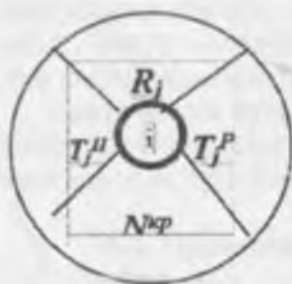
(6) Полный резерв времени работы

$$R_{ij} = T_{ij}^{NN} - T_{ij}^{PN} \quad \text{или} \quad R_{ij} = T_{ij}^{NO} - T_{ij}^{PO}, \\ \text{или} \quad R_{ij} = T_j^N - T_i^P - t_{ij}.$$

Пример. Внедрение новой техники на НМЗ-НГМК

Вначале рассчитаем временные параметры событий методом вычислений непосредственно на сетевом графике (рис), где N^p - номера предшествующих событий, через которые к данному идет критический путь. В центре круга записывается номер события (j); в левом секторе — наиболее поздний срок свершения события j (T_j^N), в правом — наиболее ранний срок свершения события j (T_j^P), в верхнем — резерв времени свершения события j (R).

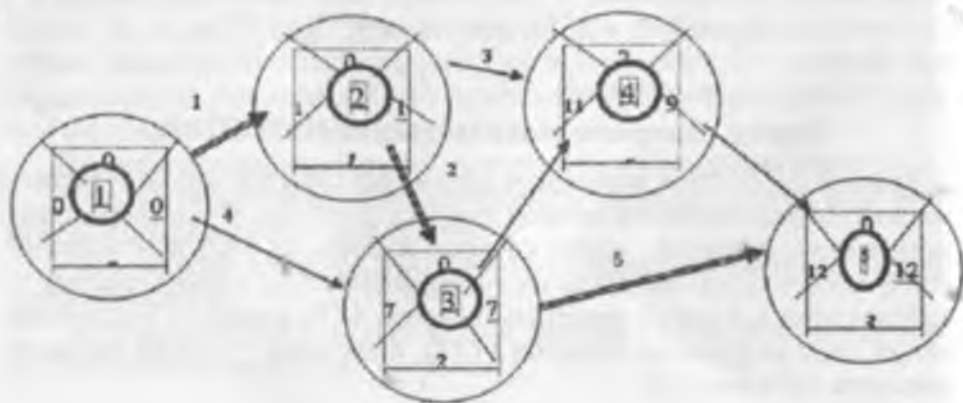
П. н.	Название работы	Продолжительность работы, дни	Обозначения работы
1.	Закупка и доставка нового оборудования	1	1,2
2.	Разработка проекта внедрения новой техники	4	1,3
3.	Монтаж и наладка нового оборудования	6	2,3
4.	Обучение кадров	3	2,4
5.	Испытание нового оборудования	2	3,4
6.	Внесение изменений на технологической линии	5	3,5
7.	Пуск новой линии в эксплуатацию	1	4,5



Расчеты показывают, что сетевой график комплекса выполняемых работ, изображенный на следующем рисунке, имеет единственный критический путь через события 1-2-3-5. Продолжительность критического пути равна 12 дням.

Событие 4 в данном сетевом графике, лежащее на ненапряженном пути, имеет резерв времени, равный 2 дням. Резервы времени остальных событий равны 0.

Используя полученные значения временных параметров событий по формулам (1) - (3), можно рассчитать временные параметры работ по формулам (4) - (6), а также полные резервы времени этих работ. Результаты расчета приведены в сводной таблице временных параметров работ СГ.



Таким образом, выявлено, что три работы (1,3 и 6) лежат на критическом пути и резервов времени не имеют. Остальные четыре работы (2, 4, 5 и 7) лежат на ненапряженных путях и поэтому имеют полные резервы времен (соответственно, 3, 6, 2 и 2 дня).

**Таблица
временных параметров работ**

П.н.	Работа (i,j)	Продолж. работы (t _{ij})	Ранние сроки		Поздние сроки		Резервы работы (R _{ij})
			начала (T _{ijPH})	окончания (T _{ijPO})	начала (T _{ijПН})	окончания (T _{ijПО})	
1.	1,2	1	0	1	0	1	0
2.	1,3	4	0	4	3	7	3
3.	2,3	6	1	7	1	7	0
4.	2,4	3	1	4	7	10	6
5.	3,4	2	7	9	9	11	2
6.	3,5	5	7	12	7	12	0
7.	4,5	1	9	10	11	12	2

Анализ СГ выполняется с целью, во-первых, правильности оценки времени критических работ и работ, имеющих минимальные резервы времени; во-вторых, сравнения установленного срока выполнения комплекса работ со сроком, полученным в результате расчета временных параметров СГ. Главная цель анализа СГ с временной оценкой работ состоит в определении наиболее целесообразных способов достижения оптимальных сроков выполнения комплекса работ.

Под **оптимизацией СГ** понимается последовательное преобразование сети, приводящее к улучшению организации выполнения комплекса работ, более разумному использованию ограниченных ресурсов с учетом выполнения работ. Указанные преобразования осуществляются за счет:

1) распределения резервов времени между критическими работами и работами, имеющими минимальные резервы времени, что фактически означает переброску (перераспределение) в разумных пределах материальных и трудовых ресурсов на указанные работы, причем технологически однородные и выполняемые в один и тот же период;

2) ускорения выполнения работ критического пути с помощью привлечения дополнительных ресурсов;

3) параллельного выполнения работ критического пути, если позволяет технология комплекса работ;

4) изменения технологии выполнения комплекса этих работ.

В качестве ограничений задачи оптимизации СГ принимаются предельные (минимальные и максимальные) величины продолжительности и стоимости работ, материальных и трудовых ресурсов, т.е. ограничения

$t_{ij}^{\min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{\max}$ - по продолжительности работ;

$c_{ij}^{\min} \leq c_{ij} \leq c_{ij}^{\max}$ - по стоимости работ;

$r_{ij}^{\min} \leq r_{ij} \leq r_{ij}^{\max}$ - по видам материальных и трудовых ресурсов.

Задачу анализа и оптимизации СГ удобно и намного проще решить с помощью ППП «ПЭР» на современных компьютерах (с применением СРМ – метода критического пути или PERT – техники обзора и оценки программ).

8.3. Методы подготовки оперативных управленческих решений

МЕТОД АНАЛОГИИ - использование аналогичных ситуаций из других областей знаний или прошлого опыта (например, применение передового опыта или опыта развитых зарубежных стран).

МЕТОД ИНВЕРСИИ - преодоление психологической инерции и подход к проблеме с новой позиции (например, внедрение инновационного проекта).

МЕТОД МОЗГОВОГО ШТУРМА - свободное высказывание идей без критики обсуждения (например, обсуждение проблемных ситуаций с помощью Кейс-метода).

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ - выделение функциональных направлений, формирование по ним идей и способов решения, подготовка комбинаций идей (например, экспертиза инвестиционного проекта).

МЕТОД УПРОЩЕНИЯ – отбрасывание несущественных и выделение определяющих факторов (например, многофакторный анализ или прогноз).

КЛАССИФИКАЦИЯ - отнесение проблемы (ситуации, задач) к типовым группам в соответствии с выделенным признаком (например, классификация систем или задач ПУР).

СТРУКТУРИЗАЦИЯ - разделение на части, развертывание проблемы (например, выделение подсистем или задач системы).

МЕТОД ДНЕВНИКОВ - подготовка предложений заранее и предварительный анализ лидером (например, ведение дневника по производственной практике).

ИНДУКЦИЯ - умозаключение от отдельных фактов к общему утверждению (например, ситуационный анализ).

ДЕДУКЦИЯ - вывод по правилам логики от общих закономерностей к частному результату (например, системный анализ).

ТАБЛИЦЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ - описание комбинации условий и рекомендуемых действий в форме таблицы (например, таблицы БКГ, «рынок-продукция» или «рынок-технология», SWOT-анализа).

ДЕРЕВО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ - описание возможных действий с учетом их последовательности и альтернатив ситуаций (например, «главная цель — цели — проблемы — задачи — мероприятия»).

8.4. Некоторые практические рекомендации принимающему оперативное решение

- Выбор есть всегда.
- Принимать решения, как правило, легко. Трудно принять хорошее решение.
 - Представьте себе минусы и плюсы каждого варианта (минусы - это плата за плюсы выбранного Вами варианта решения).
 - Не сравнивайте «минусы» принятого варианта с «плюсами» отвергнутого Вами же решения.
 - Риск при выборе неизбежен («риск — дело благородное»).
 - Реализовать одновременно два варианта невозможно. Чем-то придется жертвовать.
 - Обсуждая свою проблему, помните, что голос собеседника советательный.
 - Не возвращайтесь на полпути. Начали дело - идите до конца.
 - Менеджером можно назвать человека только тогда, когда он принимает решения или реализует их через других людей.
 - Если рассмотреть проблему достаточно внимательно, то Вы увидите себя как часть этой проблемы.
 - Исследуйте проблему с разных точек зрения и добейтесь полного понимания всех ее особенностей.
 - Научиться принимать решение необходимо для каждого человека.
 - Лучше одно плохое решение, чем два хороших.
 - Хороший план сегодня лучше безупречного завтра.
 - Компромисс всегда обходится дороже любой из альтернатив.
 - Ничто никогда не строится в срок и в пределах сметы.
 - Нельзя сказать о глубине лужи, пока не попадешь в нее.
 - Новые законы создают и новые лазейки.
 - Когда несколько человек берут такси, за всех платит севший на переднее сиденье.

- Если Вы хотите, чтобы команда выиграла прыжки на высоту, найдите одного человека, который может прыгнуть на семь футов, а не семь человек, прыгающих каждый на один фут.

- Квалифицированный специалист удачно избегает малейших ошибок, неуклонно двигаясь к какому-нибудь глобальному заблуждению.

- Когда нет необходимости принимать решение, необходимо не принимать его.

- Если сомневаешься - не делай, если не сомневаешься - подумай.

- Любые предложения люди понимают иначе, чем тот кто их вносит.

- Все, что хорошо начинается, кончается плохо.

- Если за работу отвечает более одного человека, виновного не найти.

- Надежность оборудования обратно пропорциональна числу и положению лиц, за ним наблюдающих.

- Всегда не хватает времени, чтобы выполнить работу как надо, но на то, чтобы ее переделать, время находится.

- Кто может - делает, кто не может - учит.

- Предоставленные самим себе события имеют тенденцию развиваться от плохого к худшему.

- Если Вам кажется, что ситуация улучшается, значит Вы чего-то не заметили.

- С пола упасть нельзя.

- Все можно наладить, если вертеть в руках достаточно долго.

Контрольные вопросы

1. Что такое оперативное управление?

2. Что представляет собой система СПУ?

3. Что такое сетевой граф?

4. Каковы основные элементы сетевой модели?

5. Каковы основные правила построения сетевых графиков?

6. Какие временные параметры и как рассчитываются они для событий и работ СГ?

7. В чем заключается суть анализа и оптимизации СГ?

8. Определите временные параметры событий и работ, а также критический путь СГ на контрольном примере.

9. ПРИМЕНЕНИЕ ДЕЛОВОЙ ИГРЫ И КЕЙС-МЕТОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

9.1. Деловая игра как инструмент принятия решений

Деловая игра — это инструмент презентации конкретных эпизодов принятия управленческих решений при наличии соответствующей базовой информации. Это набор фактов, где лицу, принимающему решения (ЛПР), создаются условия, подобные производственным или реальным.

Существует три главные категории деловой игры:

Категория А. Определение ЛПР (например, студентом) конкретной проблемы.

Категория Б. Постановка вопроса или вопросов руководителем (преподавателем) и просьба к «советникам» (студенту) рекомендовать методы преодоления этих трудностей.

Категория В. Игры, предусматривающие проблему и ее решение, но требующие от коллектива ЛПР (группы) объяснения, почему приняты эти меры и возможные при этом осложнения.

При выборе той или иной категории нужно принять решение о включении в игру одного вопроса или нескольких для решения их КЛПР (группой). От сложности вопроса будет зависеть его включение в программу обсуждения в виде короткого 30-60 минутного упражнения или на это выделить больше времени. В некоторых случаях обсуждение может быть построено на деловой игре, которая длится несколько дней.

Учебная деловая игра используется при развитии навыков или практических занятий с целью:

- аналитического мышления;
- выявления проблем и их решения,
- принятия оптимального решения;
- презентации точек зрения;
- составления прогнозов и выводов;
- выслушивания других мнений и их понимания.

Руководителю организации и проведения деловых (реальных или учебных) игр следует соблюдать следующие основные правила игры:

1) необходимо внимательно определиться с ситуацией, с которой ЛПР должен столкнуться в своей работе, что чаще всего не решается или создает проблемы;

2) помните об уровне оперирующих сторон (ЛПР, исполнителей и других участников);

3) постарайтесь взять типичные случаи у производителей;

4) не пытайтесь отобрать частные случаи, чтобы иллюстрировать частные моменты; в одном случае может отражаться несколько их различных аспектов;

5) участники игры должны чувствовать себя в курсе условий игры - местонахождение, работа, персонал и др.;

6) лучше всего изложить описание ситуации до начала игры, чтобы участники ознакомились и были в курсе проблемы и чтобы не тратить время на объяснение деталей во время обсуждения самой ситуации;

7) если нет возможности заранее подготовить письменную информацию, можно сэкономить время и помочь участникам игры запомнить моменты, если оставить организационную структуру, с деталями о персонале на виду в течение всего хода игры; и будет правильно, если все это оставляется в дополнение к письменному описанию в виде справочного материала;

8) сама игра может включать описательный эпизод или ситуацию, или папку документов для изучения, или то и другое, если папка является отражением реальной жизни, уменьшится количество материала для ознакомления не слишком отвлекающее внимание, направленное на соответствующие факты, освобождая участников игры от задачи выявления сути проблемы;

9) если игра сама по себе слишком затянута или сложная рекомендуется (как и в случае с исходным материалом) излагать ее на бумаге, чтобы участники игры могли ознакомиться с ней заранее;

10) перед началом руководителю игры нужно сказать несколько вводных слов, где отметить, что игра отражает конкретную ситуацию, которую можно встретить в жизни; что ситуация является типичной и актуальной, основывающаяся на случаях, которые имели место или могут иметь место в реальной жизни;

11) контролируйте ход игры посредством:

- сокращения или увеличения времени;
- изложения определенных параметров, в пределах которых работают игроки, например, больше информации не будет или дополнительного изучения ситуации не требуется;
- ограничением или добавлением подробностей, которые требуют игроки, например, полный отчет, основные рекомендации, презентация и т.д.;

- повышения или ослабления давления, поощряя соперничество между игроками;

- вводом неожиданных условий и т.д.;

12) в конце игры игрокам предлагается вернуться к обсуждению причин, побудивших их поступить так или иначе, и выявить таким образом наилучшее решение проблемы;

13) объективно оцените ход игры и степень активности игроков.

В качестве учебного примера деловой игры рекомендуется решить задачи принятия управленческого решения в реальных производственных ситуациях, как «Организация малого предприятия», «Предприятие и банкротство» или «Кто поможет предпринимателю?» и т.п.

9.2. Обсуждение проблемных ситуаций принятия управленческих решений (Кейс-метод)

Кейс — это:

(1) описание реальной ситуации, включающей проблему, которую необходимо решить менеджеру (ЛПР или КЛПР);

(2) ситуация, обычно изложенная с точки зрения менеджера, которому предстоит принять решение, которое может быть обсуждено оперирующими лицами (ЛПР или КЛПР);

(3) возможность создания в аудитории атмосферы принятия решения по конкретной ситуации с учетом имеющихся возможностей и рисков;

(4) материал для проведения детальных дальнейших исследований.

Учебные кейсы — это возможность создания в аудитории атмосферы принятия решений по конкретной проблемной ситуации ПУР с учетом имеющихся возможностей и рисков путем обсуждения альтернативных решений. Эффективное применение кейс-метода (**case study**) активизирует познавательную деятельность студентов, предоставив учебной группе возможность обсудить проблемную ситуацию (задачу), соединить свои знания и идеи, проследить содержание и процесс обсуждения.

Применение кейс-метода в ПУР основывается на следующие его положительные аспекты:

- помогает сформулировать проблему;
- помогает провести анализ конкретной ситуации;
- представляет возможность провести дискуссии по различным методам решения конкретной проблемы;
- дает возможность практического применения теоретических знаний;
- дает возможность распространения полученных решений на другие случаи;

· позволяет управлять возможными изменениями в управленческой деятельности организации.

Кейсы могут быть использованы в качестве инструмента индивидуальной или командной презентации, обсуждения в группах и последующей дискуссии, а также как ролевая игра (деловая игра) ПУР.

Источниками информации при написании кейса могут являться средства массовой печати, информационно-аналитические материалы о деятельности отдельных предприятий или организаций (отчеты, информационные издания и другие), материалы исследований сферы деятельности конкретных предприятий или организаций, их подразделений, а также Интернет.

Структура кейса:

- 1) правильное и содержательное название кейса;
- 2) последовательное изложение событий, описание предприятий (фирм), используемых технологий и отрасли, в которой осуществляют свою деятельность эти предприятия (фирмы), а также проблему, которую необходимо решить для сложившейся конкретной ситуации;
- 3) вопрос (или несколько вопросов) для обсуждения проблемы.

При составлении кейса необходимо учитывать следующие аспекты:

- основная цель составления кейса;
- целевая аудитория, для которой составляется кейс;
- выявление необходимого объема информации для составления кейса;
- возможные пути получения необходимой информации;
- выбор типа составляемого кейса;
- выбор предметов, для которых может быть использован данный кейс;
- включение в случае необходимости дополнительной информации в виде приложений для облегчения процесса принятия решения.

Порядок работы с кейсами:

- выявление основной проблемы ПУР;
- выявление степени влияния различных факторов на основную проблему;
- разделение основных и второстепенных факторов;
- рассмотрение альтернативных путей решения проблемы;
- выбор и обоснование оптимального решения.

Обсуждение кейса следует вести в следующей последовательности:

1. Индивидуальное ознакомление с содержанием кейса.
2. Обсуждение кейса в малых группах.
3. Коллективное (групповое) обсуждение кейса.

При обсуждении кейса следует обратить внимание на следующие аспекты:

- определить основную цель рассматриваемого кейса;
- рассмотреть возможность сравнения ситуации в кейсе с реальной обстановкой;
 - выявить возможные «ловушки», то есть обсуждение второстепенных вопросов, принятие неправильных решений и т.п.;
 - выявить информацию, которая может быть непонятной для аудитории или неправильно понята ею;
 - определить информацию, которая имеет основное значение при решении проблемы, изложенной в кейсе;
 - выявить промежуточные шаги для решения проблемы, изложенной в кейсе;
 - установить альтернативные пути решения проблемы, изложенной в кейсе;
 - установить виды численных расчетов, необходимых для решения проблемы;
 - определить структуру и порядок обсуждения кейса;
 - определить время обсуждения кейса;
 - определить порядок завершения дискуссии;
 - заключительный комментарий и подведение итогов дискуссии.

Контрольные вопросы

1. Что такое «деловая игра»?
2. В чем заключается цель проведения учебных деловых игр?
3. Каковы правила проведения деловых игр?
4. Как различается кейс от учебного кейса?
5. Каковы основные правила составления и обсуждения проблемных ситуаций?
6. Какое практическое значение имеет применение деловой игры и кейс-метода в разработке управленческого решения?

10. ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

10.1. Организация разработки и доведения управленческого решения до исполнителей

На эффективность управленческих решений оказывает множество различных факторов, в том числе и порядок действий руководителей и специалистов, принимающих решения. Поэтому очень важно в управлении производством иметь надежную методику, которая бы регламентировала организацию работ по принятию решений. Конечно, принятие решений -- процесс во многом субъективный и в данном случае речь не идет о какой-то жесткой регламентации действий руководителя. Установить процедуру, пригодную на все случаи принятия решений, невозможно. Поэтому здесь речь может идти лишь о том, чтобы дать некоторые общие рекомендации по организации процесса выработки и реализации решений. Исследования отечественных и зарубежных ученых, а также руководителей-хозяйственников, занимающихся проблемами управленческих решений, свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на эффективность решений оказывает информационная база. Именно наличие достоверной и надежной информации позволяет оценить зрелость той или иной хозяйственной проблемы, правильно поставить и оценить ее, и выбрать адекватные ей средства обоснования решения.

С целью накопления информации о наиболее типичных управленческих проблемах считается целесообразным каждой функциональной подсистеме управления иметь соответствующие карточки управленческих проблем. Эти *карточки проблемной ситуации* могут содержать следующие рекомендации:

1. *Выявление проблемы*, требующей принятия соответствующего управленческого решения, производится на основе анализа сложившейся в объекте управления ситуации (*ситуационный анализ*).

Конкретная ситуация - совокупность условий, возникающих в результате разного рода внутренних и внешних воздействий, нарушающих нормальное функционирование управляемого объекта.

Критическая ситуация - это ситуация, требующая немедленных действий по принятию решений. Состояние проблемной ситуации в фиксируемый момент определяется целью ситуации (желаемое состояние объек-

та), проблемой (соотношения желаемого и реального состояния) и конкретными условиями (состояние материальных, финансовых, трудовых, информационных и других решений).

2. *Проблемная ситуация описывается содержательно, и по возможности совокупностью количественных характеристик. Описание проблемной ситуации, раскрытие причин ее возникновения и развития должно заканчиваться краткой содержательной формулировкой проблемы, которую необходимо решить.*

3. *Определяется время на решение проблемы и требуемые на принятие решения ресурсы (опыт и квалификация лиц, принимающих решение, необходимая информация, вычислительные ресурсы ЭВМ и т.п.).*

Ниже приведен пример заполнения карточки проблемной ситуации, возникшей в результате необходимости изменения действующей на предприятии системы оплаты труда.

Карточка проблемной ситуации

«Выбор системы оплаты труда рабочих, обеспечивающей освоение проектной мощности предприятия после реконструкции»

Реконструкция завода по выпуску бытовых холодильников позволяет увеличить их производственную мощность с 75 тыс. шт. до 340 тыс. шт. в год.

На заводе действует индивидуальная система оплаты труда, которая в условиях освоения производственной мощности требует ежегодного прироста численности рабочих на 250-300 чел. Однако существующий в городе дефицит рабочей силы и проблемы социально-бытового характера не позволяет обеспечить такой прирост.

Проблемная ситуация заключается в необходимости изменения системы оплаты труда в целях уменьшения дополнительной потребности в рабочей силе в условиях резкого увеличения производственной мощности.

Цель принятия решения: обеспечить достижение конечных производственных результатов, совершенствование системы стимулирования труда.

В качестве *ограничений* выступают:

а) сроки разработки и внедрения новой системы оплаты труда (они не должны превышать шесть месяцев);

б) объем выпуска, фонд оплаты труда, особенности организации и технологии производства.

Характер проблемы зависит от конкретной ситуации, в которой она возникает и разрешается. Часто даже однотипные проблемы на разных предприятиях решаются по-разному. Поэтому очень важно иметь информацию о решениях, принятых в конкретных условиях, что позволит не только накопить данные о причинах, породивших проблему, но и о специфике обоснования управленческого решения. Такую информацию можно сформировать с помощью технологической карты принятия управленческого решения.

10.2. Технологическая карта принятия управленческого решения

1. Формирование решения

1.1. Анализ проблемной ситуации

1.1.1. Объективность существования проблемы

Она подтверждается следующими факторами:

а) необходимостью увеличения объемов производства холодильников до 340 тыс. шт. в год;

б) невозможностью обеспечить прирост объема производства имеющейся численностью рабочих при существующей производительности труда;

в) невозможностью обеспечить прирост численности рабочих, необходимой для требуемого объема производства, на 250-300 чел. в год.

1.1.2. Новизна проблемы

Аналогичная проблема на заводе не решалась.

1.1.3. Причина возникновения проблемы

Она связана с отсутствием взаимодействия на стадии разработки проекта реконструкции между подсистемами «Техническое руководство», «Управление экономической деятельностью» и «Управление кадрами и социальным развитием».

1.1.4. Связь данной проблемы с другими проблемами

Решение данной проблемы связано с необходимостью учета других проблем, влияющих на освоение проектной мощности:

а) изменение социально-бытовых условий на заводе;

б) повышение качества продукции;

в) сокращение текучести кадров;

г) повышение квалификации кадров.

1.1.5. Цели и ограничения решения

Цель принимаемого управленческого решения:

а) достижение конечных производственных результатов - освоение проектной производственной мощности а1 и проектной трудоемкости а 2;

б) совершенствование системы стимулирования труда: уменьшение текучести кадров б1; возможность внедрения новой системы в течение 6 месяцев б2; повышение квалификации кадров б3.

В качестве ограничений выступают:

а) сроки разработки и внедрения новой системы (они должны быть не более 6 месяцев);

б) время для принятия решения о системе оплаты труда (оно не должно превышать 2 месяцев).

1.1.6. Степень разрешимости проблемы

Изменение системы оплаты труда является одним из факторов повышения производительности труда, следовательно, данная проблема может быть решена.

1.2. Формирование и оценка решения

1.2.1. Область и характер решения

Область управленческого решения - организация заработной платы в цехах основного производства, а характер - организационно-экономическое решение.

1.2.2. Тип решения

Оригинальное.

1.2.3. Крайние варианты решения

Наихудшее решение - оставить существующую индивидуальную сдельную систему оплаты труда и за счет улучшения социально-бытового обеспечения работающих увеличить численность рабочих до уровня, позволяющего освоить проектную (производственную) мощность.

Наилучшее решение - внедрить инновационную систему оплаты труда, предусматривающую оплату за профессиональные знания, количество и качество труда, применяемую в США.

1.2.4. Альтернативные варианты решения

Предлагаются три варианта систем оплаты труда:

а) повременная;

б) повременно-премиальная;

в) аккордная.

1.2.5. Качественная оценка преимуществ и недостатков решения

1. Индивидуальная сдельная система оплаты труда обеспечивает заданную производительность труда, но не гарантирует качество продукции.

2. Повременная - обеспечивает необходимое качество продукции, но не гарантирует достижение требуемой производительности труда.

3. Повременно-премиальная система оплаты труда обеспечивает достижение нормативов по производительности труда и качеству продук-

ции, но при условии внедрения в комплексе с новой технологией, техникой и организацией.

4. Аккордная система является неприемлемой в условиях массового конвейерного производства.

5. Инновационная система оплаты может иметь трудности при внедрении, вследствие резких различий в социальных и организационно-экономических условиях труда на отечественных и зарубежных предприятиях.

1.2.6. Оценка вероятности реализации

Все варианты систем заработной платы за исключением аккордной и инновационной могут быть реализованы.

2. Выбор решения

2.1. Определение допустимых (приемлемых) решений

Решения 4 и 5 с учетом установленных ограничений являются неприемлемыми и из дальнейшего рассмотрения исключаются.

2.2. Ранжирование решений

Оценка предпочтений различных вариантов решения проведена на основе метода расстановки приоритета. Экспертные оценки ранжирования решений для каждой цели и показателя степени ее достижения приведены ниже (табл.).

Результаты экспертной оценки решений

Решение (из п.1.2.5 ТК)	Показатели цели (из п.1.1.5 ТК)					Сумма рангов	Приоритет
	а		б				
	а1	а2	б1	б2	б3		
1	2	3	2	1	3	11	2
2	3	2	3	3	2	13	3
3	1	1	1	2	1	6	1

С учетом установленного приоритета наилучшим вариантом является решение 3, т.е. повременно-премиальная система оплаты труда.

2.3. Выбор единственного решения

Как видно из приведенной выше таблицы, решение 1 хуже решения 3, но лучше решения 2. Решение 3 лучше решения 2 по всем показателям. Следовательно, решение 2 можно отбросить, поскольку имеется лучшее решение 3 и близкое к нему решение 1.

Сравнение решений 1 и 3, как видно из таблицы, показывает, что за исключением показателя б2, решение 3 лучше, чем решение 1.

Технологическая карта отражает в строгой логической последовательности результаты мыслительной деятельности ЛПР по поиску наилучшего решения. Она является как бы готовым продуктом работы ЛПР, особенно если он привлекается в качестве эксперта со стороны и служит основой для объективной оценки компетентности ЛПР (КЛПР).

В управлении производством желательно по стереотипным проблемам иметь готовые решения в виде карточки решений. Карточка решения заполняется на основе технологической карты и позволяет работникам аппарата управления получить ответы на вопросы:

По какой причине и по чьей вине возникла данная ситуация?

Каковы возможные последствия от непринятия решения?

Кто должен принять решение в данной ситуации?

Какие должностные лица и структурные подразделения должны быть привлечены для устранения возникшей ситуации?

Какая исходная информация необходима для устранения возникшей ситуации?

Какие конкретные практические мероприятия или действия необходимо предпринять для решения возникшей проблемы?

Кому передается решение для исполнения и кто контролирует его исполнение?

Карточка решения состоит из трех разделов:

Первый раздел включает признаковую часть и содержит наименование и характер проблемной ситуации, причину возникновения и возможные последствия от непринятия решения.

Второй — основной раздел включает описание действий и решений, принимаемых для устранения проблемной ситуации.

Третий раздел содержит мероприятия по реализации решения.

Применение такой карточки позволяет упорядочить процесс принятия решений, сократить время на выбор действий руководителей по устранению проблемной ситуации, повысить качество решений за счет использования опыта принятия решений в типичных ситуациях, исключить дублирование в действиях руководителей при принятии решений.

10.3. Организация исполнения и контроля за реализацией управленческого решения

Основная цель организации исполнения управленческих решений состоит в устранении различных помех и причин их возникновения, появляющихся в результате несогласованности действий исполнителей в процессе реализации решения.

Согласованность деятельности всех участников реализации решения основывается на сбалансированности их прав и обязанностей, которое должно устанавливаться как по горизонтальным, так и по вертикальным линиям связи в организационной структуре управления (ОСУ).

По горизонтали стыкуется деятельность административно разобщенных независимых подразделений, находящихся на одном уровне управления, не подчиняющихся друг другу. Поэтому здесь эффективное сотрудничество возможно лишь на основе договоров, условия которых должны быть предусмотрены планом реализации решения, либо самим решением и гарантировать, что выполнение требований решения всегда выгоднее для всех участников, чем невыполнение.

По вертикали должна стыковаться деятельность исполнителей, связанных иерархией подчинения. Баланс прав и обязанностей при выполнении решения обеспечивается путем делегирования полномочий и организацией эффективной системы контроля.

Задача вышестоящего субъекта управления - создать условия для работы подчиненных. Он должен обеспечивать:

- соответствие их деятельности общим интересам (целям) решения;
- свободную реализацию собственных интересов каждого звена ОСУ в рамках созданных условий.

Абстрактной схемы распределения прав и обязанностей не существует. В каждом случае оно должно соответствовать характеру проблемной ситуации.

В общем случае алгоритм формирования организационно-функциональной структуры механизма реализации решений включает следующие операции:

- структуризацию целей, предусмотренных данным решением (выявление целей и задач для всех участников процесса реализации решения);
- конкретизацию целей и задач в технико-экономических показателях работы объекта управления (предприятия, цеха, участка, исполнителя);
- формулирование основных проблем, требующих решения для достижения поставленных целей;
- нахождение возможных путей и способов разрешения проблем.

Эти задачи могут быть решены при соблюдении следующих условий:

1) решения в организационно-экономических объектах носят многоцелевой характер, поэтому поскольку многообразие разнородных целей в решении не может быть сведено к одному измерителю, необходимо установить важность различных целей;

2) структуризация целей осуществляется как по горизонтали (классам), так и по вертикали (уровням): цели низших уровней конкретизируют вышестоящие цели и выступают по отношению к ним как задачи отдельных подразделений и работников; цели, находящиеся на одном уровне, могут быть равнозначными, обеспечивающими или конкурирующими;

3) система целей должна быть сопоставимой, полной, взаимоувязанной, определенной, реальной.

Определенность цели предусматривает, во-первых, функциональную определенность, т.е. привязку к конкретным функциям управления; во-вторых, временную определенность (регулярный или разовый характер цели); в-третьих, объектную привязку к подразделению, исполнителю.

Формулировка целей может быть осуществлена в виде:

- графа (дерева) целей, где цели высшего уровня последовательно дезагрегируются на составляющие подцели, а взаимоувязка осуществляется системой кодирования;

- в виде матрицы целей, где по столбцам и строкам перечисляются одни и те же цели, а на пересечении строк и столбцов ставится 1 (если имеет место взаимосвязь) или 0 (если связь отсутствует).

Для конкретизации целей в показателях указываются внешние показатели, характеризующие конечные результаты работы предприятия, и внутренние показатели, определяющие состояние объекта управления.

Структуризация целей позволяет:

- выделить основные функции и задачи, ориентированные на достижение соответствующих целей;
- провести анализ и выявить недостатки в действующей СУ, которые мешают нормальному ходу исполнения решений;
- рационально распределить функции и задачи на разных уровнях управления между службами и должностными лицами;
- установить рациональную технологию выполнения вариантов управленческих решений.

Правильно организованный на стадии реализации решений *контроль* позволяет:

- стимулировать работу исполнителей без недостатков;
- получить удовлетворение от хорошо выполненной работы;
- организовать учебу исполнителей;
- оценить потенциальные возможности коллектива и выявить резервы и упущенные возможности, которые могут быть использованы в последующих решениях.

Завершающим этапом реализации решения является *подведение итогов* его выполнения. Это обстоятельство должно стать важнейшим принципом управления. Итоги должны проводиться в любом случае, независимо от того, как реализовано решение, выполнены ли поставленные цели и задачи или они не достигнуты вообще. Подводить итоги целесообразно в форме совещаний, собраний со специальной повесткой дня, или отводя этой проблеме место в печати, наглядной агитации и т.п.

В процессе подведения итогов следует:

- проанализировать все этапы процесса подготовки, принятия и реализации решения;
- оценить успехи, рассмотреть выявление в работе исполнителей недостатки;
- зафиксировать внимание работников на вновь возникших проблемах.

Таким образом, управленческий цикл заканчивается подведением итогов. В то же время он служит началом нового цикла, поскольку создает исходную базу для нового управленческого решения.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит суть и значение ведения карточек проблемных ситуаций?
2. Какое содержание имеет технологическая карта принятия управленческих решений?
3. Как осуществляется экспертная оценка ранжирования решений?
4. Из каких разделов состоит карточка решения?
5. В чем заключается основная цель организации исполнения управленческих решений?
6. Что позволяет узнать правильно организованный контроль за реализацией управленческих решений?
7. В чем заключается суть подведения итогов выполнения управленческого решения -завершающего этапа его выполнения?

11. ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

11.1. Роль информации в управленческих решениях

Информация (от лат. *Informatio* — разъяснение, изложение) — отчужденное знание, выраженное на определенном языке в виде знаков алфавита, записанное на материальный носитель, доступное для воспроизведения без участия автора и переданное в каналы общественной коммуникации (опубликованное).

«Информация, по определению Н. Винера, — это обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособления к нему наших чувств. Процесс получения и использования информации является процессом нашего приспособления к случайностям внешней среды и нашей жизнедеятельности в этой среде».¹

Информация — основа маневра предпринимателя с веществом и энергией. Она позволяет получить решение, как эффективнее и экономически выгоднее организовать производство товаров или услуг. Знания и информация становятся стратегическими ресурсами, поскольку наряду с эмпирическим знанием и повседневным опытом в экономическую деятельность непосредственно вовлекается систематизированное теоретическое знание.

Информация является одним из основных ресурсов роста производительности предприятия, поскольку именно она позволяет:

- устанавливать стратегические цели и задачи предприятия и использовать открывающиеся возможности;
- принимать обоснованные и своевременные управляющие решения;
- координировать действия разрозненных подразделений, направляя их усилия на достижение общих поставленных целей.

Поэтому на любом предприятии организуется и систематически ведется работа в следующих основных направлениях:

- выявление проблем и определение информационных потребностей;

¹ Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине.

- отбор источников информации;
- сбор информации;
- обработка информации и оценка ее полноты и значимости;
- анализ информации и выявление тенденций в избранных сферах;
- разработка прогнозов и альтернатив поведения предприятия;
- оценка альтернатив различных действий, выбор стратегии и принятие управляющих решений для реализации стратегических планов.

С другой стороны, информация - это знания для других, отчужденные от их первоначального живого носителя (генератора) и ставшие сообщениями (в той или иной степени переработанными). К ним относятся знания, сконцентрированные в статьях, книгах, патентных описаниях, устных сообщениях, в управленческих документах, проектной документации, моделях, алгоритмах, программах и т.д. Практически каждый предприниматель имеет свой стиль управления, поэтому успешно функционирующее знание в одном месте может оказаться непригодным в другом. Это же относится к феномену интернационализации знаний: интернационально только общенаучное знание.

На основе синтеза многих подходов можно дать следующее определение термина «информация», учитывающее в том числе его современное правовое звучание: *информация — это отчужденное знание, записанное на определенном языке в виде знаков на материальный носитель, доступное для воспроизведения без участия автора и переданное в каналы общественной коммуникации.*

В современных условиях в экономике и управлении возникают, распространяются и развиваются три основных информационных потока:

- информация, которая существует в виде овеществленных знаний в наукоемкой продукции;
- информация, отражающая человеческие профессиональные знания, частично фиксируемые в виде изобретений, патентов, лицензий, но главным образом в виде производственных навыков и приемов;
- информация по искусству, методам и технологии практического решения задач управления современным производством, по вопросам завоевания рынков сбыта при производстве даже высококачественной продукции.

Для принятия любого решения требуется информация, притом чем сложнее решение, тем больше объем необходимой информации. К тому же информация должна соответствовать определенным требованиям. Быть полной, достоверной и своевременной. Кроме того, управленческие решения должны быть обоснованы и приняты на основе экономического анализа и многовариантного расчета, и интуитивны, которые,

хотя и экономят время, но содержат в себе вероятность ошибок и неопределенность.

Принимаемые решения должны основываться на достоверной, текущей и прогнозируемой информации, анализе всех факторов, оказывающих влияние на решение, с учетом предвидения его возможных последствий. Руководители обязаны постоянно и всесторонне изучать поступающую информацию для подготовки и принятия на ее основе управленческих решений, которые необходимо согласовывать на всех уровнях внутрифирменной иерархической пирамиды управления.

Количество информации, которую необходимо переработать для выработки эффективных управленческих решений, настолько велико, что оно давно превысило человеческие возможности. Именно трудности управления современным крупномасштабным производством обусловили широкое использование электронно-вычислительной техники, разработку АСУ, что потребовало создания нового математического аппарата и экономическо-математических методов.

На этом основании проблему можно сформулировать так: необходимость обеспечения (поддержки) принятия решений информацией, которая должным образом отобрана, обобщена, систематизирована и проанализирована, то есть пригодна для принятия правильного и обоснованного решения в каждой конкретной ситуации.

11.2. Информационная система поддержки принятия управленческих решений

С информационной точки зрения стержнем разработки обоснованных управленческих решений является **система подготовки принятия решений (СППР)**.

Цель разработки и внедрения СППР – информационная поддержка оперативных возможностей и комфортных условий для высшего руководства и ведущих специалистов для принятия обоснованных решений, соответствующих миссии предприятия, а также его стратегическим и тактическим целям.

Основой такой системы являются:

- доставка статистических данных и информации аналитической и сводной как из внутренних, так и из внешних источников для экономических и финансовых оценок, сопоставление планов, разработка моделей и составление прогнозов в бизнесе;
- формирование и эксплуатация во взаимодействии с руководством соответствующей системы информационных, финансовых, математи-

ческих и эвристических моделей экономических и финансовых процессов.

Концептуальное решение поставленной проблемы должно базироваться на обеспечении доступа к данным и информации, и формировании адаптивной системы моделей предпринимательства. При этом необходимо обеспечить:

- доступ к данным внутренних и внешних источников информации, использующих серийно выпускаемые базы данных;
- управление данными и информацией в разнородных комплексах, что позволяет обеспечить их открытость (локальность, мобильность и интерактивность);
- хранение данных и информации в унифицированных форматах, пригодных для дальнейшего анализа, синтеза и представления, включая модели «что, если?»;
- анализ и синтез финансовой и экономической информации, моделирование состояний, процессов и условий;
- представление информации в виде диаграмм, графиков, географических карт в форме, интуитивно понятной и удобной руководству для выработки решений.

Таким образом, целью создания СППР является обеспечение методической и информационной поддержки подготовки принятия решений по ключевым финансово-экономическим вопросам высшим руководством и менеджерами среднего звена предприятия на основе оперативного стратегического анализа и прогноза финансовых и экономических показателей. Это подразумевает постоянное проведение прогнозирования, мониторинга, анализа и корректировки деятельности предприятия и его подразделений, предоставляемых продуктов и услуг, обслуживаемых клиентов, состояния рынков и условий конкуренции на них.

Одним из основных отличий аналитической от оперативной обработки данных управленческих решений является не столько большой объем обрабатываемых данных, сколько необходимость поддерживать обработку произвольных, заранее не регламентированных запросов из различных источников информации.

Предварительная и общая классификация источников информации. Информационное, программное и техническое обеспечение призваны систематизировать как внутренние, так и внешние источники информации ПУР.

В качестве *внутренних источников информации* могут выступать:

- транзакционные системы, предназначенные для операционной работы, в том числе с клиентами, включая клиентов филиалов и представительств;

- система внутрифирменного электронного документооборота;
- документы из электронных хранилищ;
- документы на бумажных носителях.

К *внешним источникам информации* относятся:

- информационные агентства, поставляющие данные как в электронном виде, так и на бумажных носителях;
- законодательные и регулирующие органы;
- клиенты и партнеры предприятия, представляющие данные в электронном виде и на бумажных носителях.

Общая классификация источников информации такова:

- 1) периодическая литература (газеты, журналы, сборники и др.);
- 2) научные труды, отчеты, обзоры НИИ;
- 3) патенты, авторские свидетельства, рационализаторские предложения;
- 4) статистические данные и бюллетени;
- 5) нормативно-техническая документация;
- 6) сведения и отчеты о деятельности зарубежных фирм;
- 7) доклады на международных и местных научно-практических семинарах, конференциях и симпозиумах (конгрессах);
- 8) законы, указы и постановления правительства республики;
- 9) служебные письма, радио и телевидение;
- 10) международная сеть компьютеров (Интернет);
- 11) данные анкетных опросов экспертов и др.

Обычно классификация информации проводится по различным признакам.

Например, по характеру (первичная, вторичная), по видам носителя (звукозаписные, печатные, табличные, графические, машинные), по содержанию (количественные, качественные, смешанные) и по времени (отчетные, текущие, прогнозные).

При формировании информационных фондов следует предварительно произвести обследование всевозможных внутренних и внешних источников информации, оценить потенциальный объем и содержание переносимых в информационный фонд сведений, требований к структуризации информации и возможности ее поддержания.

Доставка информации. Доставка информации из внешних и внутренних источников может осуществляться по выделенным каналам, по глобальным электронным сетям коммерческого или общего назначе-

ния, по корпоративным и локальным компьютерным сетям, по почте или через курьера. Для работы с бумажными документами отрабатываются технологии формирования электронных копий в рамках электронного архива. Предусматриваются методы анализа неструктурированной и слабо структурированной информации, включая ее поиск и доставку по запросам пользователя.

Управление информацией. Исходные данные, поступающие в систему из различных источников, как правило, фильтруются. В частности, могут осуществляться следующие этапы преобразования:

- проверка корректности (внутренняя непротиворечивость данных, безопасность внесения данной записи для системы в целом);
- реформатирование (приведение к общему формату в соответствии с принципом интегрированности данных и информации);
- фильграция и агрегирование данных;
- исключение дублированных данных;
- датирование данных (обязательное внесение метки данных в соответствии с принципом историчности).

Целесообразно предусматривать возможность описания различных структур данных как администратором системы, так и конечным пользователем, причем структура данных, видимая с места конечного пользователя должна быть настраиваема как под определенный тип пользователя, так и под конкретную решаемую задачу.

Хранение информации. Информационное хранилище должно быть с учетом предметной ориентации данных, историчности, интегрированности и неизменяемости во времени. Данные в информационном хранилище структурированы за счет использования данных в зависимости от уровня агрегирования.

Для экономии времени пользователя обеспечивается многоуровневое хранение информации. При этом сохраняются как некоторые детальные, так и агрегированные данные. Ввиду сложности многоуровневой структуры информационного хранилища необходимо поддерживать её целостность, т.е. соответствие данных вышележащих уровней ниже лежащим, а также детальных данных — данным оперативным и других внешних систем.

Анализ информации. Как известно, мало собрать информацию и организовать ее хранение, важно уметь пользоваться ею. История учит, что на базе одной и той же информации могут делаться различные, не исключено, что и противоположные, выводы.

Основными потенциальными пользователями информационных фондов являются среднее и высшее звено управления, системные аналитики. Зачастую это неординарно мыслящие люди, многие из которых до-

статочны эрудированны в области компьютерных технологий современных аналитических методов. Только небольшая часть их аналитических потребностей может быть предварительно сформулирована, регламентирована и документирована. Поэтому особое место в их работе отводится вопросам анализа, в том числе математической поддержке подготовки принятия решений.

Современные информационные системы поддерживают интерпретацию информации как совокупности бизнес - объектов. Это чрезвычайно удобно для непрофессиональных пользователей ЭВМ, так как подобные средства позволяют аналитику, тем более менеджеру воспринимать модель данных в виде списка знакомых и естественных для него объектов, таких, как «клиенты», «договоры», «оплата труда» и др.

Представление информации. Представление информации — один из наиболее существенных факторов всей концепции менеджмента. Высшее руководство предприятия зачастую видит только этот компонент информационных систем. Поэтому успех СППР во многом связан не только с содержанием, но и с возможностями изобразительного ряда для представления результатов анализа и моделирования.

К пользовательскому интерфейсу СППР предъявляются повышенные требования, в том числе:

- организация пользовательского интерфейса по двухуровневой схеме: работа в автоматическом и интерактивно-исследовательских режимах;
- удобная языковая среда работы конечного пользователя;
- дружественный графический (оконный) пользовательский интерфейс;
- наличие легкодоступной многоуровневой системы помощи и обучения для каждого пользовательского окна и по каждому структурному элементу, в том числе по функциональному признаку;
- широкое применение графической интерпретации исходных данных и результатов обработки;
- предоставление пользователю возможности настройки экранных форм и элементов графического интерфейса;
- применение в программах защитной системы от несанкционированных и неправильных действий пользователя;
- повышенные меры безопасности, обязательного использования регламентированного доступа и системы паролей;
- переносимость объектов пользовательского интерфейса и др.

Особое значение имеет доступность системы помощи и обучения возможностям и последовательностью работы с СППР. Следующим фактором, влияющим на осмысление ситуации лицом, принимающим решение, является гибкое и настраиваемое использование интерфейса.



Схема структуры и содержания ИО СППР

11.3. Современные управленческие информационные технологии и системы

При эффективной организации сбора и регистрации данных по принципу последовательных решений могут применяться различные виды информационной технологии:

- сбор и регистрация данных непосредственно в процессе производства (на местах возникновения затрат) в форме единого документа и использование центральной ЭВМ для агрегирования данных; обработка данных в режиме диалога для расчета показателей на терминале;
- получение свободного документа, использование машиносчитывающего носителя информации (например, дискеты), обработка данных по производственному отделению на персональных компьютерах.

Решение вопросов внедрения новых технологий требует комплексного, разностороннего подхода. Важно не только исследовать технико-экономические и организационные аспекты проблемы, но и учитывать влияние внедрения новых технологий на положение работника в производственном процессе. В частности, требуется анализ трудовых функций работника, его образа действия, навыков, способностей, условий труда. Представляют большую трудность оценка трудовых и социально-экономических факторов.

Технология информационной деятельности предполагает: создание системы записей (цифровой и текстовой информации) с применением средств компьютерной техники; использование форм как носителей информации, формирование базы и знаний данных; создание пакетов прикладных программ и экспертных систем.

Базы данных

На предприятиях в компьютерном виде накапливается и сохраняется информация о проектах, выполняемых данным предприятием; о деталях, блоках, узлах, компонентах, используемых в проектах; о поставщиках и складах, где размещаются детали; о служащих и отделах, которые являются исполнителями проектов. В таких базах данных могут быть записаны любые информационные массивы, и по аналогии базы данных можно считать электронными библиотеками. Такие электронные библиотеки обеспечивают совершенно новые информационные возможности: возможности выбирать факты и фрагменты текста, а не книги (журналы) целиком. В машине нет «полок», поэтому возможно прямо заглянуть внутрь книги и вывести на экран дисплея (монитора) только ту часть книги, которая интересна пользователю. Например, «электронный учебник».

Экспертные системы

Важным шагом в развитии информационных систем является построение экспертных систем. Экспертная система должна задавать вопросы пользователю, производить оценку ситуации и получать решение, представляемое в каком-либо виде пользователю. Кроме того, от экспертной системы могут потребоваться демонстрация способа, которым получено решение, и его обоснование.

Экспертная система моделирует мыслительный процесс человека-эксперта, который является специалистом по решению определенного типа проблем. С помощью экспертных систем решаются задачи, относящиеся к классу формализованных, слабоструктурированных задач. Алгоритмизированное решение таких задач или не существует в силу неполноты, неопределенности, неточности, расплывчатости рассматриваемых ситуаций и знаний о них, или же такие решения неприемлемы на практике в силу сложности разрешающих алгоритмов. Основная разница между информационно-поисковой и экспертной системами заключается в том, что первая осуществляет поиск имеющейся в ней информации по заданной теме, а вторая — логическую переработку информации с целью получения новой информации, которая в явном виде в нее не вводилась. При этом на основе *базы знаний* машины автоматически определяются не только факты, как в базе данных, но и генерируются новые знания путем логического вывода. Экспертные системы способны в сложных ситуациях дать квалифицированную консультацию (совет, подсказку, ориентацию), помогая предпринимателю или специалисту принять обоснованное решение.

Экспертная система может создаваться для какого-либо конкретного пользователя, и тогда при ее создании учитываются специфические требования заказчика, его вкус и наклонности. К таким системам можно отнести различные *автоматизированные рабочие места* (например, «АРМ-руководителя», «АРМ-экономиста», «АРМ-бухгалтера» и т.п.).

Структурно-экспертные системы содержат подсистемы логического вывода, базы знаний и интеллектуальных интерфейсов – программы «общения» с машиной. *Базы знаний* – это свод эмпирических правил истинности заключений (высказываний) по данной теме (проблеме); базы эмпирических данных и описания проблем, а также вариантов их решений.

Автоматизированные системы управления предприятием (АСУП)

АСУП – человеко-машинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления предприятием.

АСУП является сложной системой, состоящей из взаимосвязанных *функциональных и обеспечивающих подсистем*.

Подсистемы, выделенные по признаку общности функций управления, называются *функциональными (ФП)*. Состав этих подсистем на различных предприятиях может быть различным в зависимости от размера предприятия, специфики производства и существующей системы управления. Обычно выделяются следующие ФП АСУП:

- 1) технико-экономическое планирование;
- 2) управление технической подготовкой производства;
- 3) управление МТС;
- 4) оперативное планирование и управление основным производством;
- 5) управление вспомогательным производством;
- 6) управление сбытом и маркетингом;
- 7) управление качеством продукции;
- 8) управление кадрами;
- 9) управление финансами;
- 10) бухгалтерский учет и статистическая отчетность.

В рамках каждой ФП решается комплекс взаимосвязанных задач планирования, учета, анализа, контроля, мотивации и оперативного регулирования хода производства, в том числе с использованием экономико-математических методов и моделей.

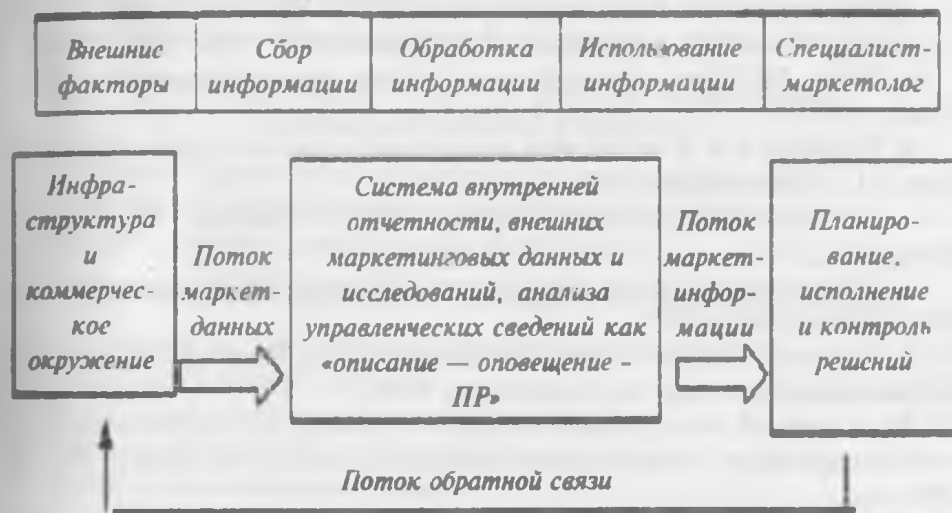
Обеспечивающие подсистемы АСУП должны способствовать решению задач её функциональных подсистем. Сюда относится информационное, техническое, методическое, математическое, программное, лингвистическое и правовое обеспечение.

АСУП дают возможность четко и своевременно контролировать процесс производства, оперативно рассчитывать и анализировать ТЭП предприятия. Например, АСУП Янгильского консервного завода, АСУП карьера Мурунтау.

Маркетинговая информационная система (МИС)

МИС — совокупность процедур и методов, разработанных для создания, анализа и распространения информации (сведений) для опережающих рыночных управленческих решений на регулярной основе. Она занимает центральное место в структуре службы маркетинга (рис.):

Система маркетинговой информации



Структурная схема МИС

Контрольные вопросы

1. Что такое информация?
2. Какова роль информации в управленческих решениях?
3. В чем заключается цель разработки и внедрения СППР?
4. Какие требования предъявляются к пользовательскому интерфейсу СППР?
5. Что такое ИСС и какое место оно занимает в структуре службы маркетинга?
6. Какие особенности имеют современные информационные технологии и системы (базы данных, экспертные системы, АРМ, АСУП)?

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдугафаров А., Улашев И.О. Модели и методы многоуровневой интегрированной обработки информации региональной экономики. Т.: Фан, 1993.
2. Абдуганиев И.Х., Мавлани Ш.И. Управленческие решения: процесс их подготовки, принятия и реализации. Т.: ЦПИУЛ, 2002.
3. Геронимус Ю.В. Игра, модель, экономика. М.: Знание, 1989.
4. Занутдинов Ш. и др. Основы менеджмента. Т.: Укитувчи, 1996.
5. Глухов В.В. Основы менеджмента. Учебно-справочное пособие. С.П.: Питер, 1995.
6. Грешилов А.А. Как принять наилучшее решение в реальных условиях. М.: Радио и связь, 1991.
7. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Основы менеджмента и маркетинга / Под ред. Р.С.Седегова. Минск: Высшая школа, 1995.
9. Седегов Р.С. и др. Оптимизация информационной экономической системы предприятия. М.: Экономика, 1988.
10. Улашев И.О. и др. Методические указания по использованию в учебном процессе передовой педагогической технологии. Навои: НГГИ, 2001.
11. Улашев И.О. Обсуждение проблемных ситуаций (кейс-метод обучения). Навои: НГГИ, 2003.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ФУНКЦИИ РЕШЕНИЯ В МЕТОДОЛОГИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ	
1.1. Содержание процесса управления экономикой	4
1.2. Основные понятия теории и схема процесса принятия решений	5
1.3. Классификация задач принятия управленческих решений	6
2. ТИПОЛОГИЯ, УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ	
2.1. Сущность управленческих решений и их классификация	9
2.2. Требования, предъявляемые к управленческим решениям	12
2.3. Типовая задача о планировании производства	13
3. ЦЕЛЕВАЯ ОРИЕНТАЦИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ	
3.1. Постановка задачи принятия управленческого решения	19
3.2. Анализ проблемной ситуации	22
3.3. Формирование целей и ограничений решения	23
3.4. Формирование и оценка управленческих решений	24
3.5. Выбор управленческого решения	25
4. ВЫБОР УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СЛОЖНЫХ СИТУАЦИЯХ	
4.1. Проблемы уникального выбора решения в сложных ситуациях ...	27
4.2. Организационные методы решения сложных проблем выбора управленческого решения	30
4.3. Применение системного подхода в проблемах выбора управленческих решений	32
5. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	
5.1. Обзор научных методов и теорий решения задач принятия оптимальных решений	35
5.2. Типичная процедура обоснования управленческого решения в условиях определенности	44
5.3. Задача об оптимальной организации перевозки (транспортная задача)	46

5.4. Анализ и прогнозирование показателей ПР с помощью регрессионных моделей	50
6. ПРИНЯТИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РИСКА	
6.1. Риск в управленческих решениях	53
6.2. Комплексная оценка риска	54
6.3. Правило деления капитала с целью снижения риска	55
6.4. Способы уменьшения негативных последствий хозяйственного риска	56
6.5. Зоны риска и кривая распределения вероятностей потери прибыли	59
7. ПРИНЯТИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	
7.1. Классификация ЗПР в условиях неопределенности	62
7.2. Обзор методов управленческих решений в условиях неопределенности	63
7.3. Принятие управленческих решений в условиях конфликтной ситуации	66
7.4. Применение теории игр и статистических решений	68
8. РАЗРАБОТКА ОПЕРАТИВНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	
8.1. Основные понятия оперативного управления	75
8.2. Применение теории графов в принятии оперативных управленческих решений	76
8.3. Методы подготовки оперативных управленческих решений	80
8.4. Некоторые практические рекомендации принимающему оперативное решение	81
9. ПРИМЕНЕНИЕ ДЕЛОВОЙ ИГРЫ И КЕЙС-МЕТОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	
9.1. Деловая игра как инструмент принятия решений	83
9.2. Обсуждение проблемных ситуаций принятия управленческих решений (Кейс-метод)	85
10. ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	
10.1. Организация разработки и доведения управленческого решения до исполнителей	88
10.2. Технологическая карта принятия управленческого решения	90
10.3. Организация исполнения и контроля за реализацией управленческого решения	93

11. ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

11.1. Роль информации в управленческих решениях	97
11.2. Информационная система поддержки принятия управленческих решений	99
11.3. Современные управленческие информационные технологии и системы	104
ЛИТЕРАТУРА	108

УЛАШЕВ ИСТАМ ОДИЛОВИЧ
РАЗРАБОТКА УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Учебное пособие

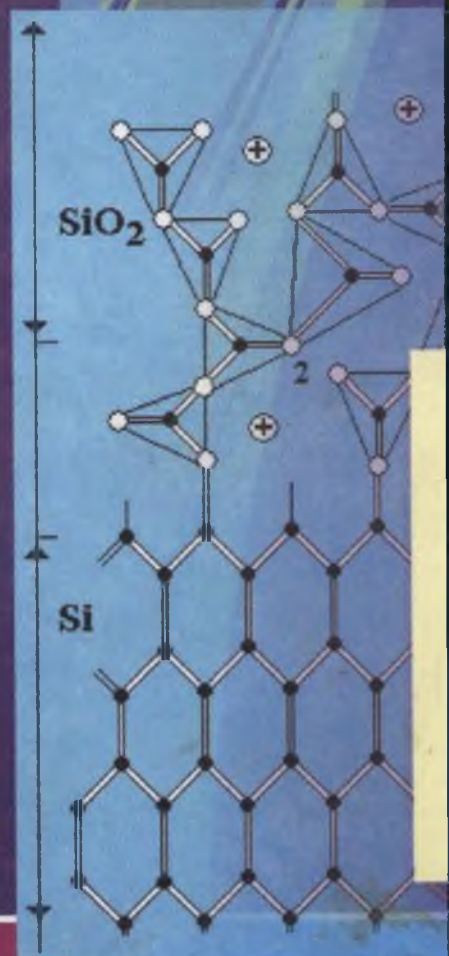
Редактор *Э.Хуснутдинова*
Технический редактор *М.Алимов*
Компьютерная верстка *А.Рузиев*

Подписано в печать 06.08.2007. Формат 60х84 $\frac{1}{4}$.
Усл.печл. 6,5. Уч.издл. 7,0. Тираж 500 экз. Заказ № 235.
Цена договорная.

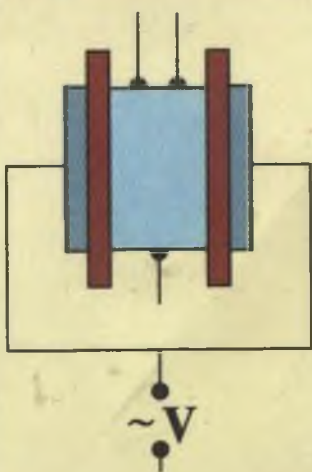
Издательство «**IQTISOD—MOLIYA**».
700084, Ташкент, ул. Х. Асомова, 7.
Счет-договор № 52-2007.

Отпечатано в типографии ООО "Тошкент тезкор босмахонаси"
100200, г. Ташкент, ул. Радиальная, 10.

YARIMO'T SIRT F



KAZGICHLAR FIZIKASI



537
Ya-73

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS
TA'LIM VAZIRLIGI

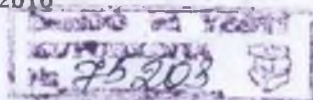
A. TESHABOYEV, S. ZAYNOBIDINOV, S. VLASOV,
I. KARIMOV, V. ABDUAZIMOV

YARIMO'TKAZGICHLAR SIRTI FIZIKASI

*O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi
oliy o'quv yurtlari talabalari uchun o'quv qo'llanma sifatida
tavsiya etgan*

5

TOSHKENT — «ILM ZIYO» — 2010



Taqrizchilar: **N. Rahimov** – fizika-matematika fanlari doktori, NamDU kafedra mudiri, professor,
E.A. Musayev – fizika-matematika fanlari nomzodi, AndDU dotsenti.

Mas'ul muharir: **M.K. Bahodirxonov** – fizika-matematika fanlari doktori, ToshDTU kafedra mudiri, professor.

Ushbu o'quv qo'llanma yarimo'tkazgichli kristallar sirtining tuzilishi, ulardagi fizik va kimyoviy jarayonlar, sirdagi holatlarning tabiati, ularga atrof-muhitning ta'siri, sirdagi holatlarning elektron asboblarda ishlashiga ta'siri va ularni tadqiq etish usullarini o'rganishga bag'ishlangan.

O'quv qo'llanma oliy o'quv yurtlarining yarimo'tkazgichlar, mikroelektronika va avtomatika, elektron asboblarda hamda boshqa sohalar bo'yicha tahsil olayotgan talaba va aspirantlarga, shuningdek, o'qituvchi va mutaxassislarga mo'ljallangan.

SO'ZBOSHI

Hozirgi kunda yarimo'tkazgichlar sirti fizikasi fan va texnika-ning eng jadal rivojlanayotgan sohasi hisoblanadi. Ushbu hol yarimo'tkazgichlar sirlari va yarimo'tkazgichlarning boshqa muhitlardan ajralish chegaralari xossalariining yarimo'tkazgich hajmida kuzatiladigan xossalardan sezilarli ravishda farqlanishi bilan bog'liqdir. Ushbu farqlar bir qator omillarga bog'liq bo'lib, ularning asosiylari yarimo'tkazgich panjarasi davriy strukturasiining uzilishi va sirt oldi sohadagi kristall strukturaning qayta qurilishidan iborat. Yarimo'tkazgich sirtida uzilgan valent aloqalar bog'lanishlarining mavjudligi, shuningdek, ajralish chegarasiining boshqa tomonida g'alayonlanuvchi potensialning mavjudligi yarimo'tkazgich sirt oldi sohasidagi potensial reyefning o'zgarishiga olib keladi. Bundan ajralish chegaralarining mavjudligi yarimo'tkazgichning optik, elektrik, mexanik va boshqa xossalariiga ta'sir ko'rsatishini bilib olish mumkin.

Ajralish chegaralarining yarimo'tkazgichlarning fizik xossalariiga ta'siri qattiq jismlar elektronikasida yorqin kuzatiladi, chunki bu yerda turlicha ajralish chegaralari (yarimo'tkazgich-metall, yarimo'tkazgich-dielektrik va yarimo'tkazgich-yarimo'tkazgich turdagi) yarimo'tkazgich asboblari va integral sxemalarning strukturaviy elementlarining ajralmas elementlaridir. Yarimo'tkazgichlar sirti va yarimo'tkazgich-dielektrik ajralish chegarasi xarakteristikalarini, shuningdek, ushbu xarakteristikalariga turlicha (temperatura, nurlanish, bosim va h.k.) omillar ta'sirini tadqiqlash zamonaviy yarimo'tkazgichlar fizikasining dolzarb masalasidir.

Ushbu o'quv qo'llanmada oliy o'quv yurtlarida o'qitiladigan yarimo'tkazgichlar sirt fizikasidagi yuqorida qayd etilgan masalalar atroflicha qamrab olingan.

Ushbu o'quv qo'llanmadan talabalar o'tilgan mavzularni yanada mukammal bilishlari uchun har bir bob oxirida savol va topshiriqlar

berildi. Talabalar savollarga javob topish maqsadida o'tilgan mavzuni yana bir marta o'qib chiqadilar va mavzuga doir bilimlarini mustahkamlaydilar. Bundan tashqari, qo'llanma so'ngida o'tilgan mavzularga doir masalalar va ularning yechimlari berildi. Shuningdek, fizik kattaliklar birliklari keltirildi. O'ylaymizki, bular talabalarga yarimo'tkazgichlar sirti fizikasini yanada to'liqroq tushunib olishlarida yordam beradi. Ushbu o'quv qo'llanma qo'lyozmasini o'qib chiqib, uni yanada yaxshilashga doir fikr-mulohazalarini bildirgan barcha do'stlarimizga minnatdorchilik bildiramiz.

Mualliflar.

I BOB. YARIMO'TKAZGICHLAR SIRTIDA ELEKTRONLAR HOLATLARI

KIRISH

Yarimo'tkazgichlar sirti fizikasiga qiziqishning paydo bo'lishi sirtida yuz beradigan hodisalarning yarimo'tkazgich hajmidagi jarayonlarga, shuningdek, ko'pchilik yarimo'tkazgichli asboblarda ishiga ta'siri aniqlanganligi bo'ldi. Hozirda yarimo'tkazgichlar elektronikasida kichik hajmli tranzistor, sig'im, induktivlik va boshqa elementlarni ko'p miqdorda o'z ichiga olgan integral mikrosxemalardan iborat bo'lgan tuzilmalar keng miqyosda ishlab chiqarilishi, ularning turli sohalarga (kompyuterlar, televizorlar, aloqa va energetik qurilmalar) joriy qilinishi yarimo'tkazgichlar sirti fizikasini astoydil o'rganish masalasini dolzarb qilib qo'ymoqda, chunki qo'llaniladigan yarimo'tkazgich elementlar hajmining tobora kichrayib borishi ular sirtining ahamiyatini kundan kunga oshirmoqda.

Yarimo'tkazgich kristalining sirtida uzoq (diskret) va uzluksiz ravishda taqsimlangan energetik sathlar tizimi mavjud. Ularning kelib chiqish sabablari turlicha. Biz quyida ularni ayrim-ayrim ko'rib chiqamiz.

Sirtidagi mahalliy energetik sathlar va ulardagi sirtidagi zaryadi sirt yaqinida energiya sohalari egadi. Bu esa kristallar elektr o'tkazuvchanligini, chiqish ishini, fotoelektrik xossalari o'zgartirib yuboradi.

Yarimo'tkazgichlar sirti ta'sirini o'rganish ko'pgina hodisalarni aniqlashga yordam beradi. Sirtning holati kristall hajmida sodir bo'ladigan jarayonlar qanday borishini ko'rsatadi. Masalan, sirtidagi sathlar rekombinatsiya markazlari bo'lib, namunada muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning yashash davriga ta'sir ko'rsatishi mumkin. Sirtidagi sochilish masalalarini o'rganish ham muhim muammolardan biridir. Sirtidagi hodisalarni o'rganish yarimo'tkazgichlar fizikasining muhim va dolzarb masalalaridan biri hisoblanadi. Bundan tashqari, yarimo'tkazgichlar sirti xossalari o'rganish fizik kimyoning ba'zi masalalarini, xususan, kataliz muammolarini hal qilishda ham zarur. Sirtning holati quyosh energiyasidan foydalanishga mo'ljallangan asboblarda va qurilmalar

ishida alohida ahamiyatga ega. Umuman olganda, sirdagi holatlar yarimo'tkazgichli diodlar, tranzistorlar ishlashida muhim ahamiyatga ega.

Asboblarni tashqi ta'sirdan himoyalash uchun ularning sirti atrofidagi muhitdan ajratish (saqlash) muammosi ham eng zarur amaliy vazifalardandir. Hozirda kristallarning atomar toza sirtini hosil qilish mumkin. Bunday holatni nazorat qilish usullari ham ishlab chiqilgan.

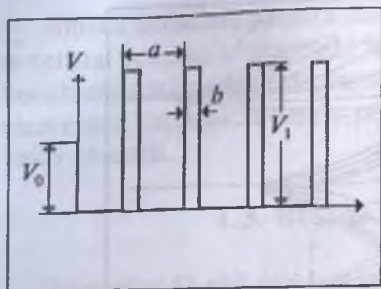
Yarimo'tkazgichlar sirti fizikasini o'rganishda ko'plab ijobiy natijalarga erishildi. Bu sohada tadqiqotlar davom etmoqda, chunki texnika va texnologiyaning rivoji, yarimo'tkazgichlar elektronikasining tez o'sishi yangidan yangi masalalarni hal etishni vazifa qilib qo'y-moqda.

1.1. Tammning sirt holatlari nazariyasi

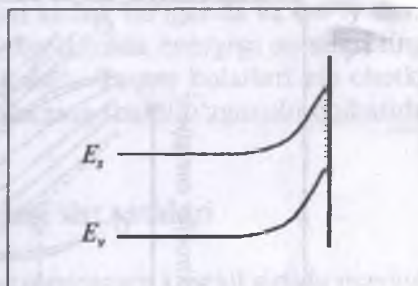
1932-yilda I.E. Tamm cheksiz va chekli kristallda elektronlarning energetik spektri muhim darajada turlicha bo'lishligini ko'rsatgan. Cheksiz kristalldagi elektronlarning ruxsat etilgan energiyalari sohalardan boshqa chekli kristallda uning uzilishi natijasida elektronlar uchun yangi energetik holatlar paydo bo'ladi. Bu holatlarga mos keladigan to'lqin funksiyalari kristall chegarasida eng katta (maksimal) bo'lib, kristallning ichiga va vakuum tomonga o'tgan sari so'nib boradi.

Agar kristall chegaralangan va chetki elementar yacheykadagi potensial to'siq kristall ichidagisidan farqli bo'lsa, cheksiz kristall ichida taqiqlangan holatlar o'rniga chekli kristallar sirtida ruxsat etilgan energetik holatlar vujudga kelishi mumkin. Ma'lumki, har qanday kvant tizimning energetik spektrini hosil qilish uchun Shredinger tenglamasini yechish kerak. Buning uchun to'lqin funksiya tanlashdan tashqari kristall ichidagi potensial o'zgarishini bilish kifoya (1.1-rasm).

E.I. Tamm o'zining birinchi hisobida bir o'lchovli masalani yechishda Kronig-Pennining kuchsiz bog'langan elektronlar modelini qabul qilgan. Bunda eng chetki potensialning ichki to'siqlardan farqi bo'lgan. Shu tarzda Tamm sathlar energiyasini aniqlash uchun teng-lama yaratdi.



1.1-rasm.



1.2-rasm.

Sirt elektron holatlar nazariyasining keyingi rivojida nazariya uch o'lovli fazo holini umumlashtirishi, tadqiqlashi, shuningdek, kristall ichidagi davriy potensialning turli ko'rinish hollari qarab chiqildi.

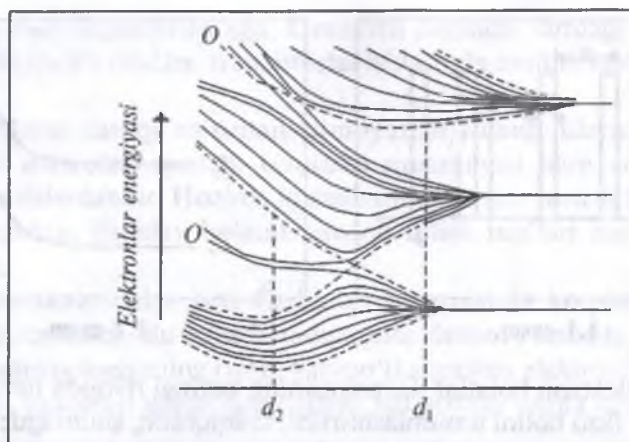
Chekli muntazam kristall sirtida kristall atomlarining davriy joylashishi kesilganligi oqibatida uzoq-uzoq elektron energiyalari holatlari spektri vujudga keladi. Bu holatlar *Tamm holatlari (sathlari)* deyiladi.

Tamm holatlari zichligi (konsentratsiyasi) sirtidagi atomlar zichligi yordamida aniqlanadi, ya'ni bu zichlik $\sim 10^{15} \text{ sm}^{-2}$ tartibda bo'ladi. Bunday zichlik mavjud bo'lganida sirtidagi energetik sohalar paydo bo'ladi (1.2-rasm).

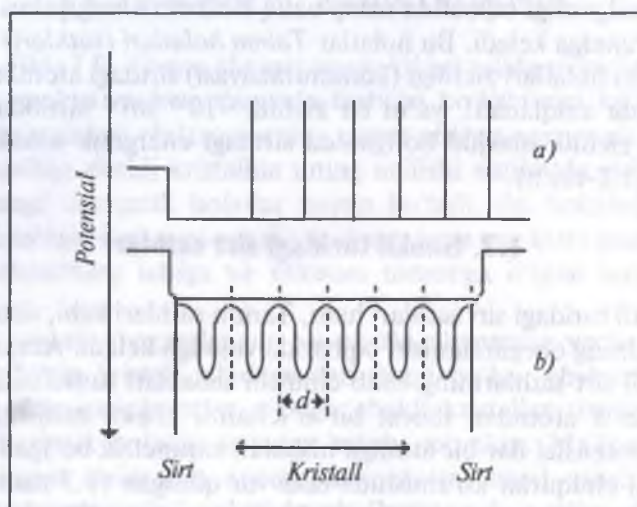
1.2. Shokli turidagi sirt sathlari

Shokli turidagi sirt sathlari ham, Tamm sathlari kabi, sirtida davriy potensialning chegaralanishi oqibatida vujudga keladi. Ammo Tamm va Shokli sirt sathlarining kelib chiqishi sabablari turlichadir. Shokli modelida 8 atomdan iborat bir o'lchamli chekli zanjir qaralgan. Davriy potensial har bir atomga nisbatan simmetrik bo'lgan ixtiyoriy potensial chuqurlar ko'rinishida tasavvur qilingan (1.3-rasm).

Eng muhimi, potensial o'ra buzilmagan, uning shakli ichki chuqurlarnikidan farq qilmaydi. Shokli bunday zanjircha uchun elektronlar energiyalari spektrini topgan va bu spektrning panjara doimiysi cheksizidan to kichik kattalikkacha kichrayganida qanday o'zgarishini o'rgangan. Zanjirchadagi atomlar orasidagi masofa katta bo'lganda tizimning energetik spektri ayrim atomlar uchun diskret (uzoq-uzoq) sathlar ko'rinishida bo'ladi va har bir sath sakkiz karra aynigan bo'ladi.



1.3-rasm.



1.4-rasm.

Panjara doimiysi kamaya borgan sari ayrim sathlarga parchalanadi, bunda d_1 dan kichik bo'lgan atomlararo masofalarda sathlar kesishadi.

Bu holda kristallning taqiqlangan sohasida ikkita sath paydo bo'ladi, ulardan biri pastki ruxsatlangan sohada, ikkinchisi yuqorigi sohada hosil bo'ladi (1.4-rasm).

Shokli holatlari panjara doimiysi kichik bo'lganda va qat'iy davr potensial (chetki chuqurniki ham) bo'lganida energiya sohalarining kesishishi natijasi sifatida vujudga keladi. Tamm holatlari esa chetki elementar kataklarda davriy potensialning shakli o'zgarishi oqibatida kelib chiqadi.

1.3. Boshqa turdagi sirt sathlari

Tamm va Shokli turidagi sathlar muntazam kristall sirtida mavjud bo'lishi mumkin. Muayyan texnologiya bo'yicha olingan yarimo'tkazgich kristalining haqiqiy sirtida mazkur holatlardan boshqa elektronlar uchun energetik holatlar ham vujudga kelishi mumkin. Masalan, sirtida joylashib olgan kirishma atomlari, kristall panjarasining sirt nuqsonlari, dislokatsiyalar va h.k.lar ana shularga sabab bo'ladi. Sirdagi holatlarni keltirib chiqaradigan muhim sabablardan biri sirtga yot atomlarning adsorblanishi (yopishib olishi) bo'lib, bunda sirt sathining energetik vaziyati panjara parametrlariga, shuningdek, adsorblanuvchi modda (adsorbant) ga bog'liq bo'ladi. Tabiiyki, bu hollarda sirdagi sathlar zichligi har xil bo'ladi. Zichligi katta bo'lganda bu sathlar ham energetik sohalar tashkil qilishi mumkin.

? Savol va topshiriqlar

1. Tamm sirt holatlari paydo bo'lishining sababi nimada?
2. Shokli turidagi sirdagi holatlar nima sababdan kelib chiqadi?
3. Tamm va Shokli sathlaridan boshqa sathlarni hosil qiluvchi sabablarni aytib bering.

II BOB. YARIMO'TKAZGICHLAR SIRTIDA FAZOVIIY ZARYAD SOHASI

Kristall sirtida energetik sathlarning borligi ularda elektr zaryad hosil bo'lishiga olib keladi. Kristallning haqiqiy sirti unda oksid qatlami hosil bo'lishi, atrof-muhit bilan o'ralganligi, ionlar adsorblanishi natijasida zaryadlanib qolishi mumkin.

Erkin zaryad tashuvchilar kristall hajmidan uning sirti sohasiga tortiladi. Shu tufayli qo'sh zaryadlangan qatlam hosil bo'ladi.

Faraz qilaylik, sirdagi har bir atom bitta sirt sathini beradi. Bu sathlar zaryadlangan bo'lsin, bu holda ularning zichligi taxminan 10^{15} sm^{-2} bo'ladi.

Metallarda erkin elektronlar zichligi hajmi 10^{22} sm^{-3} , bir atom tekislikda 10^{14} sm^{-2} chamasida bo'ladi. Metallda sirdagi zaryadni kamaytirish uchun 10 atom tekislikdagi, ya'ni 10^{-7} sm qatlamdagi erkin zaryadlar ishtirok etishi kifoya. Bu hajmiy zaryad qatlami metall xossalariga muhim ta'sir ko'rsatmaydi.

2.1. Yarimo'tkazgichlar sirtidagi fazoviy zaryad qatlami

Yarimo'tkazgichlarda metalldagiga nisbatan erkin zaryad tashuvchilar zichligi ancha kichik. Masalan, n -tur yarimo'tkazgichda erkin elektronlar zichligi $n=10^{15} \text{ sm}^{-3}$ yoki bir atom tekislikka $N_1=10^7 \text{ sm}^{-2}$ to'g'ri keladi desak, sirdagi sathlar zichligi $N_s=10^{11} \text{ sm}^{-2}$ bo'lsa, sirt zaryadini neytrallashtirish uchun 10^{-4} sm qalinlikdagi qatlamdan, ya'ni 10^4 chamasidagi atom tekislikni o'z ichiga olgan qatlamdan erkin zaryad tashuvchilar uzoqlashtirilishi kerak bo'ladi. Bu qatlam *fazoviy zaryad qatlami* deyiladi. Erkin zaryad tashuvchilar zichligi yana ham kam bo'lgan yarimo'tkazgichlarda fazoviy (hajmiy) zaryad qatlami ancha ichkariga kirishi mumkin.

Shunday qilib, yarimo'tkazgichlarda sirt fazoviy zaryad qatlami mavjud bo'lib, u yarimo'tkazgichlar xossalariga ta'sir ko'rsatishi mumkin. Bu sohada energiya sohalari egiladi. Ordinata o'qi bo'yicha kristallda elektronlarning potensial energiyasi, absissa o'qida esa sirdan kristall ichiga tomon masofa qo'yilgan (2.1-rasm).

Fazoviy zaryad sohasi chuqurligi xususiy yarimo'tkazgich uchun Debay ekranlash uzunligi L ga teng deb olinadi:

$$L = \sqrt{\frac{\epsilon k T}{2 \pi e n_i}}, \quad (2.1)$$

bunda, ϵ — dielektrik doimiyligi, n_i — xususiy yarimo'tkazgichda zaryad tashuvchilar zichligi, e — elektron zaryadi.

Yarimo'tkazgich sirti yaqinida fazoviy zaryad sohasi hosil bo'lishi mumkin. Kristalldagi bu soha yarimo'tkazgichlarning ko'p xossalari ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun yarimo'tkazgich sirtining fazoviy zaryad qatlami o'rganiladi.

Fazoviy zaryad sohasi umumiy nazariyasini Garret va Brattayn ishlab chiqqan. Bu nazariya asosida olib borilgan tadqiqotlar yarimo'tkazgich kristali sirti elektron tuzilishi haqida miqdoriy ma'lumotlar olish imkonini berdi. 2.2-rasmda n -turidagi yarimo'tkazgich sirti yaqinidagi sohaning energetik diagrammasi keltirilgan. Bu yerda, ϕ — elektrostatik potensial, u energiya sohalariga egilishini ifodalaydi: ϕ_0 — hajmdagi potensial, uni taqiqlangan soha o'rtasiga mos potensialga teng deb qabul qilingan; mazkur potensialning sirtidagi qiymati — ϕ_s ; F_0 — yarimo'tkazgich hajmdagi fermiy sathi; F_s — sirtidagi energiya sohalariga egilishi kattaligi. Sirtidagi elektrostatik potensial sathidan Fermi sathigacha masofa F_s ni ba'zan sirt potentsiali deyiladi.

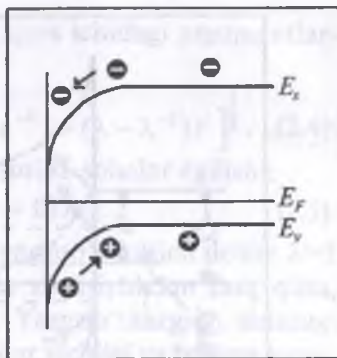
Mazkur nazariya o'z oldiga quyidagi masalalarni qo'yadi:

- 1) fazoviy zaryad $\phi(x)$ potentsiali qanday o'zgarib borishini aniqlash;
- 2) sirt yaqini sohasida hajmdagiga nisbatan ortiqcha zaryad tashuvchilar zichligini, hajmiy zaryad kattaligini va ular aniqlaydigan sirt $\Delta\delta_s$ o'tkazuvchanlikni topish.

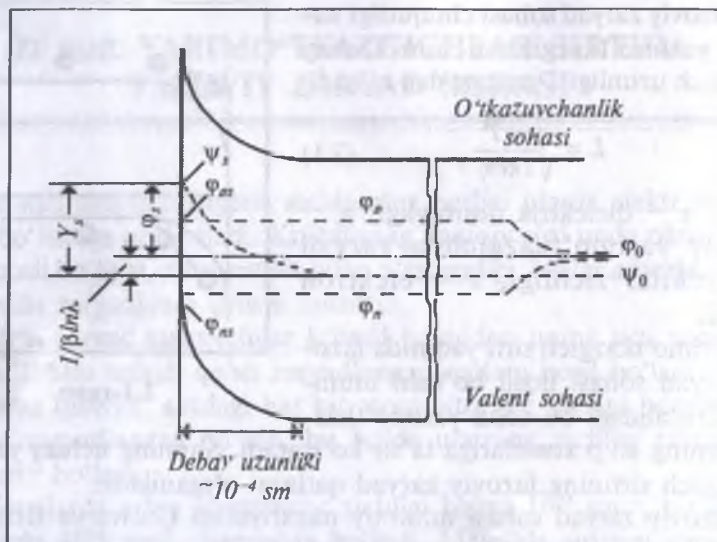
Nazariyada ushbu farazlar qabul qilingan:

- 1) yarimo'tkazgich hajmida kirishmalar zichligi kichik, binobarin, yarimo'tkazgich aynimagan va sohalaridagi elektronlar hamda kovaklarga nisbatan klassik Bolsman statistikasini qo'llash mumkin;

- 2) sirt yaqinida sohalar egriligi yetarlicha kichik, bu joyda ham yarimo'tkazgich aynimagan, sirt yaqinida sohalar chegarasi Fermi sathidan yetarlicha uzoqda;



2.1-rasm.



2.2-rasm.

3) kristall hajmida kirishmalar to'la ionlashgan deb hisoblanadi. Kremniya III va V guruh elementlar kirishmalari sathi xona temperaturasida (300 K) to'la ionlashgan bo'ladi. Sirt yaqinida elektrostatik potensial $\varphi(x)$ ning o'zgarishi qonuniyatini topish uchun *Puasson tenglamasini* yechish kerak:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi}{\epsilon} \rho(x), \quad (2.2)$$

bunda, ϵ – dielektrik doimiy, $\rho(x)$ – zaryadlar zichligi.

O'lchamsiz kattaliklar kiritiladi:

$$Y = \frac{e}{kT} (\varphi - \varphi_0) = \beta(\varphi - \varphi_0), \quad \lambda = \left(\frac{P_0}{n_0} \right)^{1/2},$$

$$P = \beta(F_p - F_0), \quad N = \beta(F_n - F_0),$$

bunda, $\beta = \frac{e}{kT}$, F_p , F_n – Fermi kvazi sathlari.

Puasson tenglamasini taqriban yechish ancha murakkab. (2.2) tenglama ba'zi hisoblashlardan keyin

$$\frac{dY}{dx} = \pm \frac{2}{L} \Phi(Y, \lambda, P, N) \quad (2.3)$$

ko'rinishga keladi. Bunda $\Phi(Y, \lambda, P, N)$ qavs ichidagi argumentlar-ning muayyan funksiyasi:

$$\Phi(\cdot) = [\lambda e^{\varphi} (e^{-4} - 1) - \lambda^{-1} e^{-N} (1 - e^{+4}) + (\lambda - \lambda^{-1}) Y]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.4)$$

Sirtning energetik sxemasidan sirt yaqinida sohalar egilishi:

$$Y_s = \beta(\varphi - \varphi_0) = \beta F_s + \ln \lambda \quad (2.5)$$

ko'rinishda ifodalanishi mumkin. Xususiy yarimo'tkazgich uchun $\lambda=1$ va $Y_s = \beta F_s$. Yarimo'tkazgich qay darajada xususiylikdan farq qilsa, $Y_s = \beta F_s$ shuncha bir-biridan farq qiladi. Yarimo'tkazgich sirtidagi o'tkazuvchanlik, ortiqcha zaryad tashuvchilar zichligi va boshqa kattaliklar βF_s ga bog'liq ravishda qaraladi.

2.2. Fazoviy zaryad sohasining ko'rinishi

(2.3) tenglamadan

$$x = \frac{1}{2} L \int_0^{Y_s} \frac{1}{F(Y, \lambda, P, N)} dY \quad (2.6)$$

kelib chiqadi. Tenglamadagi integrallash bajarilsa, sathiy potensial φ ning x ga bog'liqligi topilgan bo'lardi. Ammo bu hisob ancha murakkab. Buning o'rniga fazoviy zaryad qatlamini bir necha alohida sohalarida $\varphi(x)$ funksiyasini topish qulayroqdir. Odatda uch soha: siyraklashtirilgan soha, inversion qatlam va boyitilgan soha ko'rib chiqiladi.

1. Siyraklashtirilgan sohada sohalardagi erkin zaryad tashuvchilar zichligi kompensirlanmagan kirishmalar zichligidan ancha kichik bo'ladi. Agar n -turdagi yarimo'tkazgichda sohalar yuqoriga egilgan ($Y_s < 0$) bo'lsa, p -turdagi yarimo'tkazgichda sohalar pastga ($Y_s > 0$) egilgan bo'lsa, siyraklashtirilgan sohasi vujudga keladi.

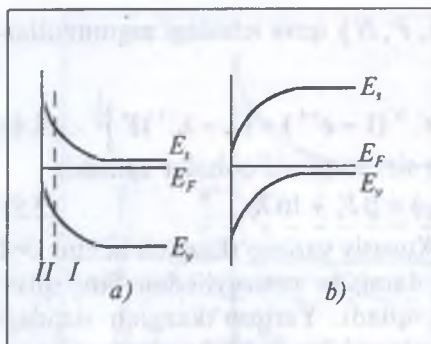
Bu sohada $F(Y, \lambda, P, N)$ funksiyada birinchi va ikkinchi hadlar uchinchi dan kichik, binobarin:

$$\frac{dY}{dx} = \pm \frac{2}{L} (Y, \lambda - \lambda^{-1}) \frac{1}{2} Y \frac{1}{2} \quad (2.7)$$

musbat ishora sohalar yuqoriga, manfiy esa sohalar pastga egilgan hollar uchun. (2.7) ifoda integrallangandan so'ng quyidagi ifoda

$$Y = Ax^2 \quad (2.8)$$

kelib chiqadi. Ammo bu qonuniyat bajariladigan soha torginadir (2.3-rasm, a, b).



2.3-rasm.

$F(Y, \lambda, P, N)$ da birgina qo'shiluvchini yo birinchi, yoki ikkinchi qo'shiluvchini hisobga olib, (2.3) tenglama yechiladi. Bu tanlash yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanligi turiga bog'liq. Sohalarning egilish qiymati namunaning legirlanishi darajasiga (elektronlar beruvchi yoki kovaklar hosil qiluvchi kirishmalar zichligiga) bog'liq bo'ladi. Umuman aytganda, inversion qatlam uchun (2.3) tenglama taqriban yechiladi.

3. Agar n -tur yarimo'tkazgichda sohalar pastga, p -tur yarimo'tkazgichda sohalar yuqoriga egilgan bo'lsa, bu hollarda boyitilgan soha hosil bo'ladi, ya'ni asosiy zaryad tashuvchilar zichligi hajmdagiga nisbatan sirt yaqinida katta bo'ladi, ammo inversion qatlam holidagidek boyitilgan soha kengligi ham yetarlicha kichik. $F(Y, \lambda, P, N)$ funksiyada uchinchi hadni tashlab yuborib, (2.3) tenglamani yechib $\varphi(x)$ potensial taqsimoti topiladi. Umuman olganda, (2.3) tenglamani soniy hisoblab, butun fazoviy zaryad sohasida $\varphi(x)$ bog'lanishni olish mumkin.

2.3. Sirdagi elektr o'tkazuvchanlik

Sirdagi zaryad tashuvchilarning ortiqcha zichligi deb sirdagi haqiqiy zichlik bilan hajmdagi zichlik orasidagi farqqa aytiladi. Ortiqcha zichlikni aniqlash sirdagi o'tkazuvchanlikni aniqlash imkoniyatini beradi. Sohalar egilishi katta bo'lgan hol uchun (yuqoriga) kovaklar va elektronlarning ortiqcha zichliklari G_r va G_n ifodalari topilgan:

$$G_o = \text{Ln}_i e^{2\beta(F_o - \varphi_s)}, \quad (2.9)$$

$$G_n = \text{Ln}_i e^{\frac{1}{2} \beta (\varphi_s - F_n)} \quad (2.10)$$

Bu ortiqcha zichliklar sirtidagi o'tkazuvchanlik o'zgarishini aniqlaydi:

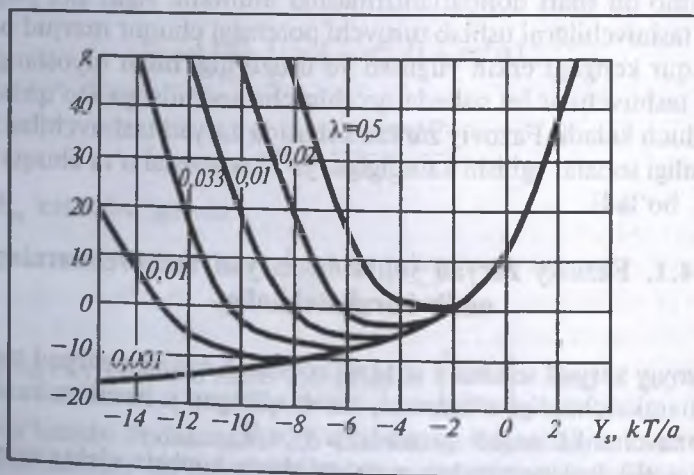
$$\Delta \sigma_s = \epsilon \mu_o (G_n + b G_o), \quad (2.11)$$

bunda $b = \mu_n / \mu_o$, μ_n va μ_o — elektronlar va kovaklar harakatchanligi. Bu hisobda zaryad tashuvchilar harakatchanligi hajmda va sirtida bir xil deb olingan. Ammo sirtidagi harakatchanlik hajmdagisidan kichikroq bo'ladi (sirtidagi qo'shimcha sochilish hisobiga). Shuning uchun $\Delta \sigma_s$ ning qiymatlari (2.11) bo'yicha hisoblaganidan kichik bo'ladi. Statsionar holda ($P=N=0$)

$$\Delta \sigma_s = \frac{1}{2} e \mu_o \text{Ln}_i g \lambda^{-1/2}, \quad (2.12)$$

$$g = \lambda^{-1/2} \int_{Y_s}^0 \frac{\lambda (e^{-Y} - 1) + b \lambda^{-1} (e^Y - 1)}{F(Y, \lambda)} dY. \quad (2.13)$$

g ning turli λ qiymatlariga tegishli qiymatlari hisoblanib, jadvallari tuzilgan. n -turdagi yarimo'tkazgich uchun sirtidagi o'tkazuvchanlik integrali (2.13) ifodaning sohalar egilishi Y_s ga bog'lanishi egri chiziqlari ko'rsatilgan. Bunda $g(Y_s)$ egri chiziqda minimumlarning mavjud bo'lishi quyidagicha tushuntiriladi (2.4-rasm).



2.4-rasm.

Y_s ning musbat qiymati oshib borgan sari sohalar pastga egila boradi. n -turdagi yarimo'tkazgich sirtidagi o'tkazuvchanligi sirt elementlar soni ortib borishi hisobiga ortadi. Sohalar yuqoriga egila borganda esa $\Delta\sigma_s$ o'tkazuvchanligi kamayadi. U inversion qatlam hosil bo'lguncha davom etadi. Y_s yana kattalasha borganda sirtidagi o'tkazuvchanlik inversion qatlam o'tkazuvchanligi oshishi hisobiga ortadi.

$\Delta\sigma_s(Y_s)$ o'tkazuvchanlik egri chizig'ining minimumi

$$Y_{s,min} = \ln \lambda^{2/b} \quad (2.14)$$

qiymatga mos tushadi. Bu ifodani tahlil qilish uncha qiyin emas. Shuni aytish kerakki, $\Delta\sigma_s(Y_s)$ kristallning xossalari (λ va b ga) bog'liq.

Maydon effekti yordamida sirtidagi potensialni o'zgartirib, sirt o'tkazuvchanlikning sohalar egilishiga bog'liq ravishda o'zgarishini tajribada o'rganish mumkin.

2.4. Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilar harakatchanligi

Oldingi bobda hajmdagi va sirtidagi harakatchanlik birday bo'ladi, deb hisoblangan edi. Agar erkin zaryad tashuvchilarning erkin yugirish yo'li l fazoviy zaryad sohasi L kengligidan ancha kichik ($L \gg l$) bo'lganda yuqoridagi faraz to'g'ri bo'ladi.

Ammo bu shart qonoatlantirmasligi mumkin. Agar sirt yaqinida zaryad tashuvchilarni ushlab turuvchi potensial chuqur mavjud bo'lsa, bu chuqur kengligi erkin yugirish yo'li uzunligi bilan qiyoslanganda zaryad tashuvchilar bu sohada qo'shimcha sochilishga (to'qnashishlarga) duch keladi. Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilar harakatchanligi sohalar egilishi kattaligiga, ya'ni potensial o'ra chuqurligiga bog'liq bo'ladi.

2.4.1. Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilarning omik harakatchanligi

Fazoviy zaryad sohasida sirtidagi sochilish evaziga zaryad tashuvchilar harakatchanligi o'zgarishi, hisob qilingan μ harakatchanlik va σ o'tkazuvchanlik orqali qaraladi: $\mu = \sigma/e_n$.

d qalinlikdagi namunaga x yo'nalishida kuchsiz elektr maydoni E_x qo'yilgan va u_x tokini beradi (2.5-rasm).

Sirt yaqinidagi fazoviy zaryad E_z maydon paydo qiladi. Sirtagi tok zichligi integral bo'yicha

$$I_x = \int_a^b i_x(z) dz \quad (2.15)$$

hisoblanadi. Bu integral ikki hol uchun hisoblangan:

1) $\varphi(z) = E_z z$, E_z — doimiy. Bunda sirtagi o'tkazuvchanlik $\sigma_s = \frac{I_x}{E_z} = eN_1(\mu_{eff})$

ko'rinishida (μ_{eff}) harakatchanlik orqali hisoblanadi. Sirt yaqinidagi potensial o'radagi zaryad tashuvchilar soni

$$N_1 = C \left(\frac{2\pi kT}{m} \right)^{3/2} \frac{kT}{eE_z} \quad (2.16)$$

I_x tok ifodasi ham aniqlangan:

$$I_x = \pi^{1/2} D_1 \alpha kT [1 - e^{-\alpha^2} (1 - \operatorname{erf} \alpha)] \quad (2.17)$$

Hajmiy harakatchanlik $\mu_0 = q\ell/m$ ekanligini e'tiborga olsak, quyidagi natijani olamiz:

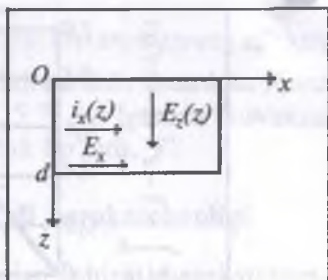
$$\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} \right)_s = 1 - e^{-\alpha^2} (1 - \operatorname{erf} \alpha), \quad (2.18)$$

$$\alpha = \frac{(2mkT)^{1/2}}{eE_z \tau} \quad (2.19)$$

E_z katta bo'lganda

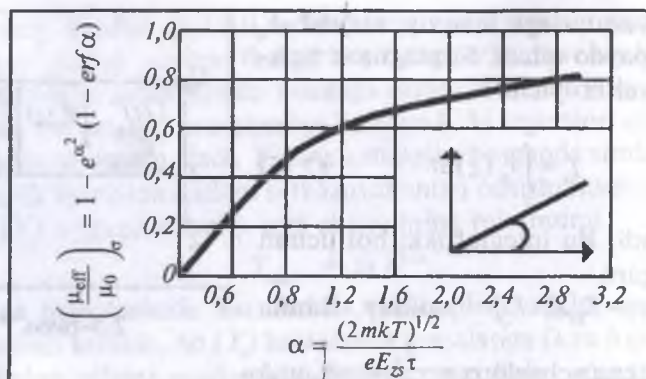
$$\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} \right)_s \approx \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} \quad (2.20)$$

Taqribiy nisbat o'rinli. 2.6-rasmda $\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} \right)_s$ ning α ga, ya'ni E_z ga bog'lanishi ifodalangan. 2.6-rasmdan ko'rinadiki, α katta (sohalar egilishi kichik) bo'lganda sirtagi sochilish muhim emas, effektiv harakatchanlik amalda hajmiy harakatchanlikka teng ($\mu_{eff}/\mu_0 > 1$).

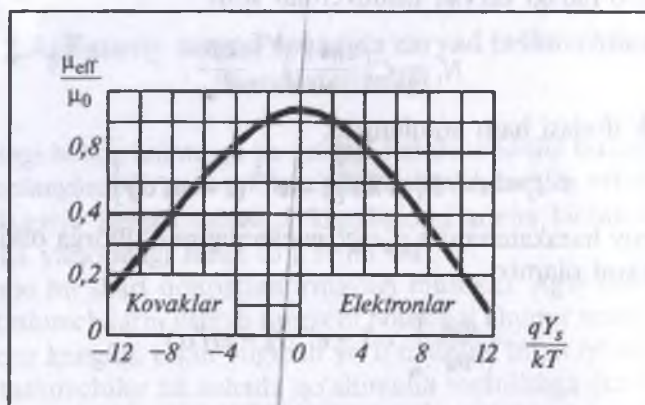


2.5-rasm.





2.6-rasm.



2.7-rasm.

Ammo α kichik (sohalar egilishi katta) bo'lganda effektiv harakatchanlik hajmiysidan bir necha marta kichik bo'lishi mumkin.

2) $\varphi(z)$ ni Puasson tenglamasidan topiladi. Bu holda $(\mu_{eff}/\mu_0)_0$ uchun ifoda ancha katta. 2.7-rasmda xususiy o'tkazuvchanlik germa-niy uchun hisoblangan bog'lanish keltirilgan. $Y > 0$ (sohalar pastga egilgan) bo'lgan holda potensial o'rada (sirt qatlamida) erkin elektronlar joylashgan. Erkin chiziqning tomoni elektronlar harakatchanligi-ning o'zgarishini ifodalaydi. $Y_s < 0$ bo'lganda kovaklar harakatchanligi o'zgaradi.

Rasmdan ko'rinadiki, $Y_s \sim 12 \frac{kT}{e}$ bo'lganida elektronlarning effektiv harakatchanligi hajmdagidan 10 marta kichik bo'lishi mumkin. Xona temperaturasida va sirtidagi potensial 0,25 V bo'lganida kovaklar harakatchanligi hajmdagidan 2 marta kichik bo'ladi.

2.4.2. Fazoviy zaryad sohasida Xoll harakatchanligi

Xoll effekti bo'yicha o'lchashlarni amalga oshirib, harakatchanlikni aniqlash mumkin: $\mu_n = R\sigma$; bunda, R — Xoll doimiysi, σ — o'tkazuvchanlik. μ_n — mikroskopik yoki o'tkazuvchanlik bo'yicha μ (omik) harakatchanlikdan farq qiladi: $\mu_n = \chi\mu$, bundagi χ ko'paytgich 1 dan 2 gacha o'zgaradi, uning qiymati sochilish xususiyatiga bog'liqdir. Sfera sohali aynimagan yarimo'tkazgichlarda l erkin

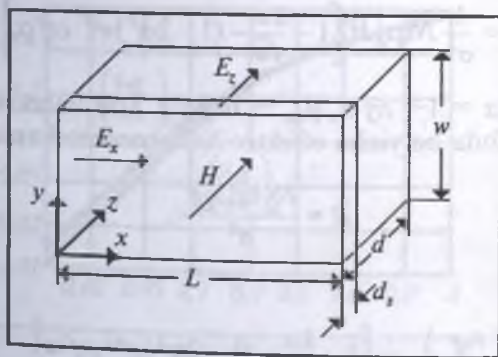
yugurish yo'li energiyaga bog'liq bo'lmagan holda $\chi = \frac{3\pi}{8}$ bo'ladi.

Agar $l \sim v$ bo'lsa, bunday namunalarda parametr 1 ga yaqin bo'ladi. Ellipsoidal (Ge va Si da shunaqa) izoenergetik sirtli aynimagan

yarimo'tkazgichlarda $l = \frac{3\pi}{8} \rightarrow \frac{3(2\chi+1)}{(\chi+2)^2}$. Bunda χ — ko'ndalang va

bo'ylama effektiv massalar nisbati. χ ning qiymati fazoviy zaryad sohasida hajmi uchun hisoblangan qiymatdan farq qilishi mumkin.

2.8-rasmda ko'rsatilganidek, uzunligi L , kengligi W , qalinligi d bo'lgan namunaga x yo'nalishida E_x elektr maydon, z yo'nalishida H_z magnit maydon qo'yilgan, u holda x yo'nalishida tok o'tib tursa,



2.8-rasm.

bu yo'nalishda E_y Xoll maydoni vujudga keladi. Xoll maydoni magnit maydoni tomonidan zaryad tashuvchilarga ta'sir qiluvchi Lorens kuchini muvozanatlagani uchun ushbu yo'nalishda tok bo'lmaydi: $E_y = 0$.

Toklar ifodalari:

$$I_x = \int_0^d ix(z) dz, \quad (2.22)$$

$$I_y = \int_0^d iy(z) dz = 0. \quad (2.23)$$

σ — o'tkazuvchanlik va R — Xoll doimiysi ma'lum.

$$\sigma = \frac{I_x}{E_x W d}, \quad (2.24)$$

$$R = \frac{E_y W d}{I_x H} \quad (2.24)$$

ifodalarga ega.

I_x (2.22) ifodadan va E_y (2.23) ifodadan aniqlanadi. Buni (2.24) va (2.25) ga qo'yib sirtidagi o'tkazuvchanlik σ va Xoll doimiysi R ni hisoblash mumkin.

σ uchun ifoda σ_s uchun olingan (2.24) ifodaga mos tushadi, ammo

$$R = \frac{1}{\sigma^2} Ne\mu_b^2 H \left[1 - \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} - (1 - 2\alpha^2) e^{\alpha^2} \operatorname{erf} \alpha \right], \quad (2.26)$$

bu yerda, $\operatorname{erfc} \alpha = 1 - \operatorname{erf} \alpha$, μ_{bn} — hajmiy Xoll harakatchanligi.

Quyidagi ifoda bo'yicha effektiv Xoll harakatchanligi kiritiladi:

$$R = \frac{eN(\mu^2)_{eff}}{\sigma^2}. \quad (2.27)$$

Binobarin,

$$\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_b} \right)_H = \left[1 - \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} - (1 - 2\alpha^2) e^{\alpha^2} \operatorname{erf} \alpha \right]. \quad (2.28)$$

Soniyl hisob ko'rsatishicha, $\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_b}\right)_H$ nisbat $\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_b}\right)_\sigma$ dan birmuncha farq qiladi. α katta bo'lganda (E_z kichik, sohalar egilishi ham kichik) ikkala nisbat ham 1 ga intiladi.

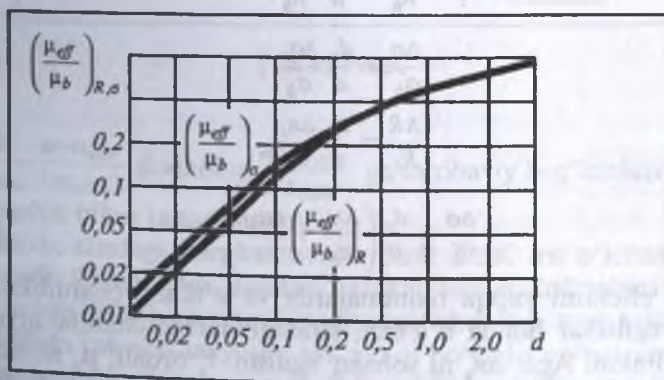
Kichik α larda (sohalar egilishi katta) $\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_b}\right)_\sigma$ egri chiziqliy birozu yuqorida joylashgan $\alpha \rightarrow 0$ bo'lganda:

$$\left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_b}\right)_\sigma = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}, \quad \left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_b}\right)_H = \alpha. \quad (2.29).$$

2.4.3. Sirtidagi sohada zaryad tashuvchilar harakatchanligini tajribada o'rganish

Mumkin bo'lgan o'lchash sxemalarining eng qulay ko'rinishi 2.9-rasmda tasvirlangan. Bunda zaryad tashuvchilar effektiv harakatchanligi yupqa namunalarda o'lchanadi, chunki bunday namunalarda sirtidagi sochilish muhim bo'ladi.

Bu holdagi ekvivalent sxemani qaraylik. Kristallni z o'qi bo'ylab ikki sohaga — ekranlash uzunligi d_s tartibidagi sirt yaqinidagi sohaga va d_b qalinlikdagi hajmiy sohaga ajratiladi. Ikkala soha ham Xoll EYK ga hissa qo'shadi. Ular parallel ulangan. Keyinchalik s indeks sirtidagi kattaliklarga, b indeks hajmiy kattaliklarga tegishli bo'ladi.



2.9-rasm.

2.10-rasmdan ko'rinadiki, Xoll kuchlanishini

$$V = \frac{RIH}{d} = \frac{I}{G} = \frac{V_b G_b + V_s G_s}{G_b + G_s} \quad (2.30)$$

ko'rinishida yozish mumkin. Bunda I — qo'yilgan elektr maydon paydo qilgan to'la tok, G — namunaning to'la o'tkazuvchanligi, R — Xoll doimiysi. Unga quyidagi ifodalar o'rinni:

$$V_b = \frac{R_b I_b H}{d_b}; \quad G_b = \sigma_b \frac{L d_b}{W}; \quad \frac{I_b}{I} = \frac{G_b}{G} = \frac{\sigma_b d_b}{\sigma_b d_b + \sigma_s d_s}, \quad (2.31)$$

$$V_s = \frac{R_s I_s H}{d_s}; \quad G_s = \sigma_s \frac{L d_s}{W}; \quad \frac{I_s}{I} = \frac{G_s}{G} = \frac{\sigma_s d_s}{\sigma_b d_b + \sigma_s d_s}. \quad (2.32)$$

(2.31) va (2.32) ifodalarni (2.27) ga qo'ysak,

$$R = d \frac{R_b d_b \sigma_b^2 + R_s d_s \sigma_s^2}{(d_b \sigma_b + d_s \sigma_s)^2} \quad (2.33)$$

solishtirma o'tkazuvchanlik uchun $\sigma = \frac{1}{d} (d_b \sigma_b + d_s \sigma_s)$ ifodani olish qiyin emas.

Zonalarning sirt yaqinida egilishi o'zgarganida σ_s va R_s kattaliklar o'zgaradi, ammo σ_b va R_b lar o'zgarmay qoladi.

Agar dastlabki egilish nolga teng deyilsa ($R_b = R_s$, $\sigma_b = \sigma_s$), Xoll doimiysining nisbiy o'zgarishi

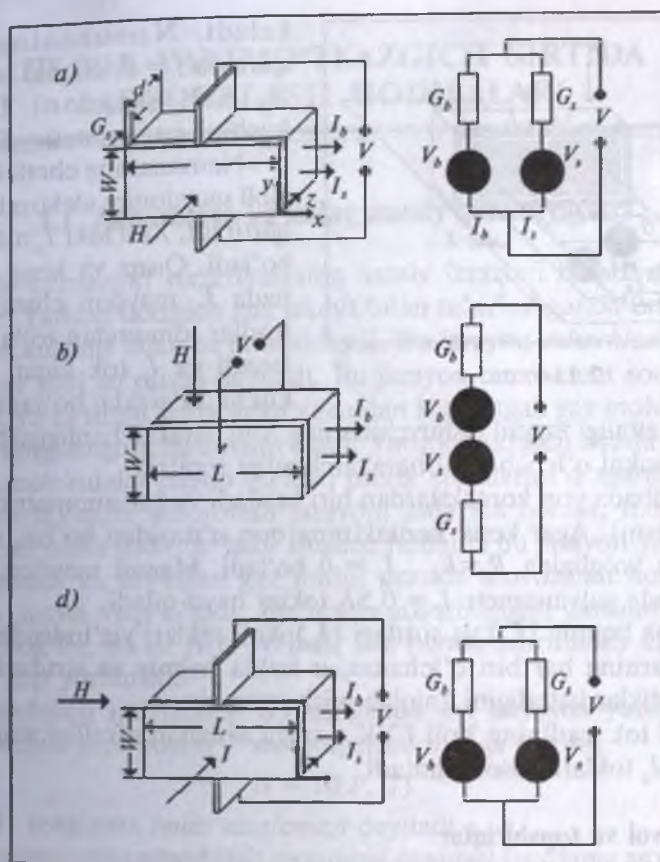
$$\frac{\Delta R}{R_b} = \frac{d_s}{d} \frac{\Delta R_s}{R_b}, \quad (2.35)$$

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_b} = \frac{d_s}{d} \frac{\Delta \sigma_s}{\sigma_b}, \quad (2.36)$$

$$\frac{\Delta R}{R_b} = \frac{d_s}{d} \frac{\Delta n_s}{n_b}, \quad (2.37)$$

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_b} = \frac{d_s}{d} \left(\frac{\Delta n_s}{n_b} + \frac{\Delta \mu_s}{\mu_b} \right)_b. \quad (2.38)$$

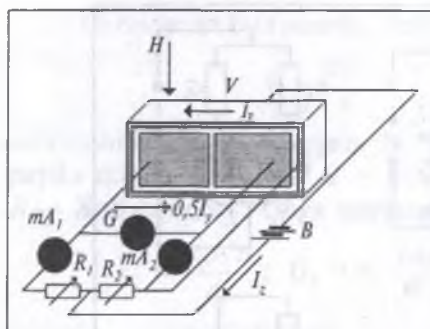
Xoll effektini yupqa namunalarda va o'tkazuvchanlilikni turli sohaviy egilishlar holida o'lchab, sirdagi harakatchanlik qiymatini olish mumkin. Agar Δn_s ni sohalar egilishi Y_s orqali, μ_s ni esa turli Y_s larda baholansa, bu holda masala soddalashadi. n_b va μ_b kattaliklar R va σ ni qalin namunalarda o'lchashdan topiladi.



2.10-rasm.

$\frac{R}{R_{\max}} \frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\min}}$ ifodaning $\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\min}}$ ga tajribaviy bog'lanishi topilgan va nazariya bilan taqqoslangan.

Odatda sirdagi harakatchanlik Xoll EYK ini o'lchash orqali aniqlanadi. Shuningdek, sirdagi harakatchanlik Xoll tokini o'lchash orqali aniqlanishi ham mumkin. Bu usul shunday: agar kristalldan x yo'nalishida tok o'tkazayotib, uni z o'qi bo'yicha yo'nalgan N magnet maydonga joylansa, zaryad tashuvchilarga ta'sir etuvchi Lorens kuchi y yo'nalishida Xoll toki paydo qiladi va E_y maydon vujudga



2.11-rasm.

keladi. Namunaning o'rta qismida $I_y = 0$, chunki bu joyda E_y Xoll maydoni Lorens kuchini muvozanatlaydi.

Namunaning chetlarida esa Xoll maydonini elektrodlar qisqartiradi, Xoll toki I_y maksimal bo'ladi. Qisqa va keng namunada E_y maydon chetki elektrodlar tomonidan to'la qisqalanadi va I_y tok faqat Lorens kuchi ta'sirida bo'ladi. Xoll

toki I_y kattaligi zaryad tashuvchilarning Xoll harakatchanligiga bog'liq. Shu I_y tokni o'lchab Xoll harakatchanligi topiladi.

Tajribada yon kontaktlardan biri kesiladi va galvanometr ulanadi (2.11-rasm). Agar kesik kontaktning qoq o'rtasidan bo'lsa, magnit maydon yo'qligida $R_1 = R_2$, $I_g = 0$ bo'ladi. Magnit maydon paydo qilinganda galvanometr $I_g = 0,5 I_y$ tokini qayd qiladi.

I_y tok hajmiy (I_{yb}) va sirdagi (I_{ys}) Xoll toklari yig'indisidir. Agar bu toklarning har biri o'lchansa, u holda hajmiy va sirdagi harakatchanliklar kattaligini aniqlab olish mumkin.

Xoll tok usulining Xoll EYK usuliga nisbatan afzalligi shundaki, u I_s va I_b toklarni oson ajratadi.

? Savol va topshiriqlar

1. Yarimo'tkazgichlar sirtida fazoviy zaryad sohasi paydo bo'lishini tushuntiring.
2. Sirdagi elektr o'tkazuvchanlik va uning hajmiy o'tkazuvchanlikdan qanday farqlari bor?
3. Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilarning omik harakatchanligi xususiyatlarini aytib bering.
4. Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilarning Xoll harakatchanligining omik harakatchanlikka munosabati qanaqa?
5. Sirdagi harakatchanlikni o'rganishning qanday usullari bor?

III BOB. YARIMO'TKAZGICH SIRTIDA ADSORBLASH HODISALARI

3.1. Adsorblash va uning asosiy qonuniyatlari

Endi Lengmyur nazariyasining asosiy farazlari haqida to'xtalib o'tamiz. Yarimo'tkazgich gaz muhit bilan ta'sirlashganda uning sirti gaz molekulalari bilan to'la boshlaydi. Bu jarayon *adsorblash* (sirtga yopishish yoki so'rilish) deyiladi. Bu jarayon muvozanat sodir bo'lguncha, ya'ni sirtga kelayotgan va undan ketayotgan gaz molekulalari sonlari tenglashguncha davom etadi. Yarimo'tkazgich sirtida adsorblangan molekulalar paydo bo'lishi uning xossalarini o'zgartiradi.

Ba'zi hollarda adsorblash jarayoni juda tez boradi, muvozanat deyarli bir onda sodir bo'ladi. Boshqa hollarda bu jarayon yetarlicha sekin boradi va sirt bilan gaz muhit orasida muvozanat hosil bo'lguncha ancha vaqt o'tadi. Bu holda adsorblangan zarralar soni N vaqtga bog'liq, ya'ni $N(t)$ bo'ladi. Biz bunda adsorblash kinetikasi haqida gap yuritamiz.

Adsorbsion muvozanat o'rnatilganda sirt birligida yutilgan gaz molekulalari soni bosim P va temperatura T ga bog'liq:

$$N = N(P, T). \quad (3.1).$$

(3.1) tenglama *holat tenglamasi* deyiladi.

Lengmyurning adsorblash nazariyasi quyidagi farazlarga asoslangan:

1. Adsorblash ayrim adsorbsion markazlarda yuz beradi. Har bir markaz birgina gaz molekulasini tutib tura oladi. Sirt faqat mazkur molekulalarga nisbatan birday bog'lanish energiyali bir xil adsorbsion markazlarga ega. Bunday sirtni energetik bir jins sirt deyiladi.

2. Adsorblangan molekulalar bir-biri bilan o'zaro ta'sirlashmaydi, ya'ni bog'lanish mustahkamligi faqat markaz va molekula tabiatiga bog'liq.

3. Sirdagi adsorbsion markazlar soni mazkur sirt uchun doimiy berilgan kattalik. U temperaturaga bog'liqmas va sirtning to'ldirilishi uni o'zgartirmaydi.

4. Molekula adsorblangan holatda bo'lganda uning adsorbsion markaz bilan bog'lanish energiyasi o'zgarmaydi.

3.2. Adsorblash kinetikasi

Adsorblash jarayoni sekin borganda adsorblangan molekularlar (zarralar) soni vaqt bo'yicha o'zgaradi: $N = N(P, T)$. Sirt birligida adsorblash markazlari soni N^* bo'lsin. Bu holda adsorblash kinetikasi tenglamasi

$$\frac{dN}{dt} = \alpha P(N^* - N) - \beta N, \quad (3.2)$$

bo'ladi. Bundan

$$\alpha = \chi s / \sqrt{2\pi M k T}, \quad \beta = \eta e^{-E_b / kT} \quad (3.3)$$

kelib chiqadi. (3.2) tenglamadagi birinchi had 1 s da sirtning 1 sm^2 ga keluvchi molekularlar sonini, ikkinchi had esa shu vaqtda shu sirtidan ketuvchi molekularlar sonini bildiradi. M – adsorblangan molekula massasi, s – uning effektiv yuzi, χ – gaz molekulasining markazda ushlab qolish ehtimolligi, η – molekulaning desorblash (ajralib chiqish) ehtimolligi, E_b – bog'lanish energiyasi.

Jarayon boshlanishida sirtning to'ldirilishi kichik ($N \ll N^*$) bo'lgani sababli, desorblashni e'tiborga olmasa ham bo'ladi. Adsorblash tezligi uchun

$$\frac{dN}{dt} = \alpha P N^* \quad (3.4)$$

tenglamani olamiz.

(3.2) tenglamani $t = 0$ da $N = 0$ boshlang'ich shartda yechsak,

$$N(t) = \frac{N^*}{1+b/\alpha} (1 - e^{-\alpha t}), \quad (3.5)$$

bunda $\alpha = \alpha P + \beta$, $b = \beta / \alpha t \ll 1/\alpha$ bo'lganda (3.5) yechim (3.4) ifodaga mos tushadi. Bu Lengmyur ifodalari bo'lib, haqiqatda kuzatiladi, ba'zan esa Roginskiy–Zeldovich tenglamasi

$$\frac{dN}{dt} = C e^{-\gamma / N} \quad (3.6)$$

va uning yechimi

$$N(t) = \frac{1}{\gamma} \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \quad (3.7)$$

qo'llaniladi, bunda $\gamma > 0$. Dastlab bu yechim CO ning MnO_2 sirtida adsorblanish kinetikasi uchun qo'llangan va ijobiy natija olingan.

3.3. Adsorbsion muvozanat

Agar $t = \infty$ (adsorbsion muvozanat o'rnatilgan) deb hisoblansa, (3.5) dan izoterma tenglamasi hosil qilinishi mumkin:

$$N(t) = \frac{N^*}{1+(b/p)} \quad \text{yoki} \quad N(t) = N^* \frac{P/b}{1+P/b}, \quad (3.9)$$

bunda $b = b_0 \exp(-E\alpha/kT)$.

Kichkina bosimlar sohasida ($P \ll b$ yoki $N \ll N^*$):

$$N = N^* P/b. \quad (3.10)$$

Agar adsorblash vaqtida molekula ikkita atomga ajralsa (masalan, H_2 molekulasi ikkita H atomiga), (3.9) o'rniga

$$N = \frac{N^*}{1+\sqrt{b/P}} \quad (3.11)$$

ifoda o'rinli bo'lib, past bosimlar sohasida

$$N(t) = N^* \sqrt{\frac{P}{b}} \quad (3.12)$$

bo'ladi.

Gaz muhit bir qancha gazlar aralashmasidan iborat bo'lsa, har bir gaz uchun izoterma

$$N(t) = N^* \frac{P_i / b_i}{1 + \sum_i P_i / b_i} \quad (3.13)$$

ko'rinishida bo'ladi. Agar hamma gazlar bir xil markazlarda adsorblansa, u holda

$$N(t) = N^* \frac{P_i / b_i}{1 + \sum_i P_i / b_i}. \quad (3.14)$$

Lengmyurning (3.9) izotermasi hamma vaqt ham tajribada tasdiqlanmaydi. Ko'pincha Freydlitxning

$$N = CP^n \quad (3.15)$$

darajali izotermasi (bunda C va $n < 1$ — doimiylar) yoki

$$N = C \ln(P/P_0) \quad (3.16)$$

logarifmik izoterma (C va P_0) o'rinli bo'ladi. Yuqorida adsorbsion muvozanat o'rnatilganda qanday qonuniyatlar bo'lishligi va ularning bajarilishi haqida qisqacha to'xtaldik. Endi adsorblash kinetikasi haqida

ma'lumot beramiz. Faraz qilaylik, sirt va gaz muhiti orasida adsorbsion muvozanat o'rnatilgandan so'ng bosim keskin kamayadi – adsorblangan molekularlar sirtini tashlab keta boshlaydi, desorblash jarayoni boshlanadi.

(3.2) tenglamani $t = 0$ da $N = N_0$ bo'ladi (N_0 muvozanatli to'ldirilganlik) degan boshlang'ich shartga tayanib yechilsa,

$$N = N_0 e^{-\beta t} \quad (3.17)$$

kinetika tenglamasini olamiz. Desorblash (adsorblash temperaturasi) natijasida haqiqatda sirtidan hamma adsorbatni uzoqlashtirib bo'lmaydi. Molekulalarning bir qismi qaytmas ravishda adsorblanganicha qoladi. Ularni sirtidan uzoqlashtirish uchun temperaturani yetarlicha ko'tarish kerak.

3.4. Fizik va kimyoviy adsorblash

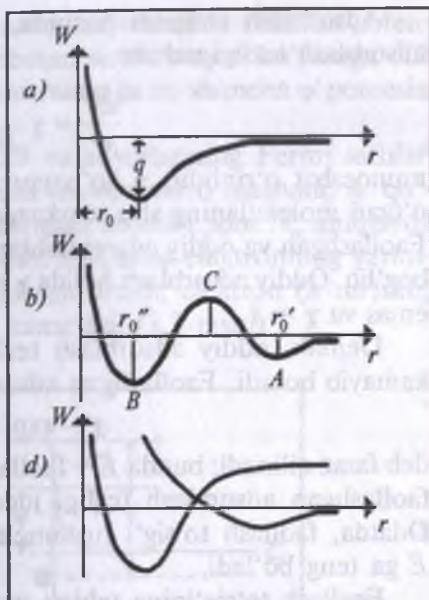
Fizik va kimyoviy adsorblashlar orasida qanday farq bor? Bu farq adsorblangan molekulani sirtida tutib turuvchi kuchlar tabiati har xilligidan kelib chiqadi.

Haqiqatan, qattiq jism bilan molekula orasida vujudga kelib adsorblashni taqozo qiluvchi kuchlar turli tabiatli bo'ladi. Bu kuchlar elektrostatik, Van-der-Vaals, elektr ta'sir kuchlari bo'lsa, bu holda adsorblashni *fizik adsorblash* deyiladi. Agar adsorblash uchun javobgar kuchlar kimyoviy tabiatga ega bo'lsa, bu holda *kimyoviy adsorblash* (*xemosorblash*) deyiladi. Bu holdagi adsorblash molekulaning qattiq jism bilan kimyoviy birikuvidan iborat. 3.1-rasm, *a* da sistema W energiyasining adsorbent sirti va adsorblanuvchi zarra orasidagi r masofa funksiyasi sifatidagi adsorbsion egri chiziq tasvirlangan. Bunda E_b – adsorblash issiqligi (bog'lanish energiyasi), r_0 – muvozanat holdagi masofa.

Xemosorblash, fizik adsorblashdan farqli ravishda kichikroq r_0 va ancha katta E_b orqali ifodalanadi. Fizik adsorblashda $E_b \sim 0,01-0,1$ eV bo'lsa, kimyoviy adsorblashda $E_b \sim 1$ eV chamasida. Fizik adsorblashda adsorblanuvchi (sirtga yutiluvchi) molekula va adsorbent panjarasi ikki mustaqil sistema tariqasida qaralishi mumkin. Kimyoviy adsorblashda molekula va panjara bitta kvantmexanik sistemani tashkil etadi.

3.1-rasmda ko'rsatilgan adsorbsion minimumlarni hisoblash masalasi ustida to'xtaylik. 3.1-rasm, *a* dagi $W = W(r)$ egri chiziqdagi fizik (Van-der-Vaals) adsorblash minimumini hisoblashda muvoza-

natdagi r_0 masofa uchun adsorblanadigan zarra va adsorbent atomi radiuslari yig'indisiga teng yoki kichikroq qiymatlar olingan. Radiuslar yig'indisidan kichik masofalarda Van-der-Vaals kuchi o'zaro ta'siri (fizik adsorblash tushuniladi) ma'nosini yo'qotadi. Bu holda almashinuv o'zaro ta'sir kuchiga kiradi. Ko'pincha adsorbsion egri chiziq $W=W(r)$ 3.1-rasm, *b* dagidek chiziladi, unda energetik (aktivatsion) to'siq bilan ajralgan ikkita minimum bor. Bunda birinchi chuqurmas $r = r_0'$ minimum fizik adsorblash deb ataladi va chuqurroq $r = r_0''$ minimumni kimyoviy adsorblashga tegishli deb hisoblanadi ($r_0'' < r_0'$). Zarraning



3.1-rasm.

A nuqtadan energetik to'siq orqali *B* nuqtaga o'tishi zarraning fizik adsorblash holatiga o'tishini bildiradi. Ammo bunday adsorblash egri chizig'i bo'lmaydi. Fizik va kimyoviy adsorblashlar, sistemaning ikki turli elektron holatini ifodalaydigan ikki turli adsorbsion minimumni ajratadigan energetik to'siq, 3.1-rasm, *d* da ko'rsatilganidek, ikki adsorbsion egri chiziqlar kesishishi oqibatida vujudga kelishi mumkin.

Endi xemosorblashni ko'rib chiqamiz.

Sistemani dastavval qo'zg'atish (faollash)dan so'ng amalga oshadigan adsorblashni faollashgan (aktivlashgan) adsorblash deyiladi. Bunda muayyan energiya sarflanadi.

Odatda kimyoviy adsorblash faollashgan adsorblash bo'ladi, ammo bu zaruriy shart emas. Faollashgan adsorblash kinetikasi oddiy (faollashmagan) adsorblashnikidan farq qiladi. Oddiy adsorblash juda tez boradi, adsorbsion muvozanat amalda bir onda qaror topadi, temperatura qancha past bo'lsa, shuncha tezroq yuz beradi. Faollashgan adsorblash hamda muvozanat sekin qaror topadi. Adsorblash tezligini o'lchash mumkin, temperatura qancha yuqori bo'lsa, bu tezlik shuncha katta bo'ladi. Isitish adsorblashni tezlashtiradi.

Adsorblash jarayoni boshida, (3.3) va (3.4) ifodaga muvofiq, adsorblash tezligi uchun

$$\frac{dN}{dt} = \chi \frac{sN^*}{\sqrt{2\pi MkT}} P \quad (3.18)$$

munosabat o'rinalidir. χ ko'paytuvchi gazdan adsorbsion markazga o'tgan molekulaning shu markazda qolishligi ehtimolini ifodalaydi. Faollashgan va oddiy adsorblashlar farqi χ ko'paytuvchi ko'rinishiga bog'liq. Oddiy adsorblash holida χ koeffitsiyent temperaturaga bog'liq emas va $\chi = 1$.

Demak, oddiy adsorblash tezligi temperatura oshganda sekin kamayib boradi. Faollashgan adsorblashda

$$\chi \sim \exp(-E/kT) \quad (3.19)$$

deb faraz qilinadi; bunda E — faollash energiyasi. Demak, T ortganda faollashgan adsorblash tezligi juda tez eksponensial ortib boradi. Odatda, faollash to'sig'i tushunchasi kiritiladi va uning balandligi E ga teng bo'ladi.

Faollash to'sig'ining tabiati qanday?

Faollash to'sig'i molekula adsorblanganda uning atomlarga yoki radikallarga parchalanishi holida vujudga keladi. Bu masala vodorod molekulasi H_2 ning ikkita N atomga ajralishi misolida ko'rib chiqilgan. Umumiy holda

$$N^* \sim e^{-E_1/kT}, \quad \chi \sim e^{-E_2/kT}. \quad (3.20)$$

Faollash energiyasi $E = E_1 + E_2$.

Faollash to'sig'i fizik va kimyoviy adsorblash (xemosorblash) hollarida vujudga kelishi mumkin.

3.5. Yarimo'tkazgichda anion va kationni adsorblash

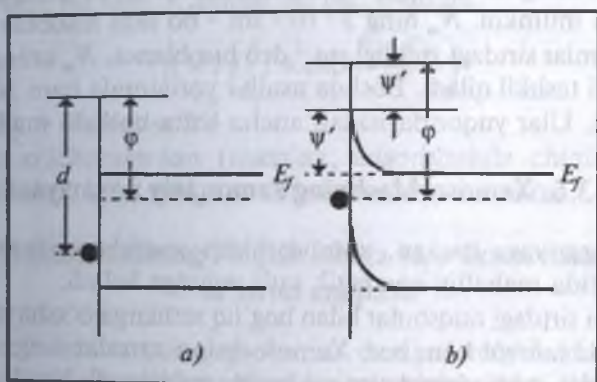
Ko'pincha, kimyoviy adsorblashda adsorblanadigan molekula va yarimo'tkazgich orasida zaryad tashuvchilar almashinuvi yuz beradi, deb hisoblanadi. Bunda sirt zaryadlanadi. Agar N_m adsorbent sirtining 1 sm^2 yuziga adsorblanadigan molekulalar soni teng bo'lsa, sirtidagi zaryad zichligi eN_m bo'ladi.

Xemosorblash vaqtida elektron qattiq jismdan adsorblangan atomga o'tsa, unda manfiy ion adsorblanadi. Buni *anion adsorblash* deyiladi va u n -tur yarimo'tkazgichda sodir bo'ladi.

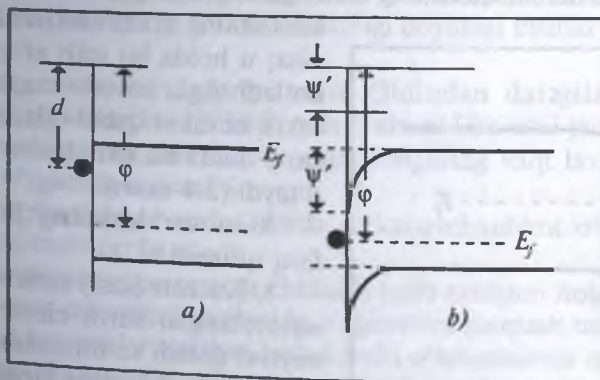
Anion adsorblashda sirtning manfiy zaryadlanishi elektron potensial energiyasining hajmdagiga nisbatan sirtga yuqori bo'lishiga olib keladi. Binobarin, elektron chiqishi uchun ϕ ga qo'shimcha ϕ' potensial to'siq vujudga keladi (3.2-rasm).

Adsorblash davomida ϕ' kristall va adsorbatning Fermi sathlari tenglashguncha ortib boradi. Bunda muvozanat o'rnashadi. ϕ' qo'shimcha to'siq balandligini adsorblangan atomlar soni N_m aniqlaydi.

Xulosa shuki, anion adsorblanishi natijasida elektronning yarim-o'tkazgichdan chiqish ishi ϕ' miqdorga ortadi, elektron (n -tur)ning yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligi kamayadi (3.3-rasm).



3.2-rasm.



3.3-rasm.

Kation adsorblash p -tur yarimo'tkazgichda yuz beradi. Agar yarim-o'tkazgichdan chiqish ishi adsorblangan atomning ionlanish energiyasidan katta bo'lganda kation adsorblanish kuzatiladi. Bu holda kristall sirtida musbat ion adsorblanadi. Adsorblangan atomlar soni orta borgan sari sirt yaqinida sohalar pastga egiladi, p -tur yarimo'tkazgichdan chiqishi va uning o'tkazuvchanligi kamayadi.

Puasson tenglamasini yechib,

$$N_m = \left[\frac{\varepsilon}{2\pi e} n_0 \phi' \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.21)$$

bog'lanish olingan. Shunga ko'ra, tajribadan ϕ' ni aniqlab, N_m ni topib olish mumkin. N_m ning $3 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ bo'lishi hisoblab topilgan. Asosiy atomlar sirtidagi zichligi sm^{-2} deb hisoblansa, N_m uning 1% dan kamrog'ini tashkil qiladi. Boshqa usullar yordamida ham N_m qiymati aniqlanadi. Ular yuqoridagisidan ancha katta bo'lishi ma'lum.

3.6. Xemosorblashning zamonaviy nazariyasi

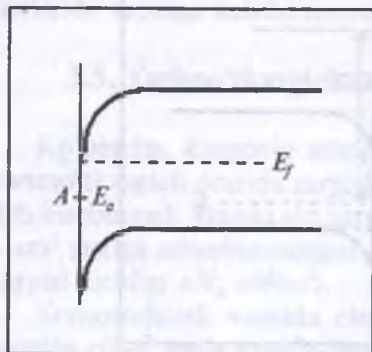
Bu nazariyaga asosan, xemosorblash vaqtida yarimo'tkazgich kristali sirtida mahalliy energetik sath vujudga keladi.

Bu sath sirtidagi nuqsonlar bilan bog'liq sathlarga o'xshaydi. Ammo ular orasida tafovut ham bor. Xemosorbsion zarralar sirtga keladi va undan ketadi, oddiy nuqsonlar esa joyida qolaveradi. Yutilish vaqtida hosil bo'ladigan sath (E_d) ning vaziyati adsorbent kristall panjarasi xossalriga hamda atomning tabiatiga bog'liq. Agar adsorbsion sathga

kristallning erkin elektroni joylasha olsa, u holda bu sath akseptor sath bo'ladi. Agar adsorbsion sath o'ziga erkin kovakni qabul qiladigan bo'lsa, u holda bu sath donor vazifasini o'taydi (3.4-rasm).

Xemosorblashning ikki shakli farq qilinadi.

1. Kuchsiz (sust) xemosorblashda adsorblangan zarra elektr jihatdan neytral qoladi va binobarin, u bilan qattiq jism orasidagi aloqada erkin zaryad tashuvchilar qatnashmaydi.



3.4-rasm.

2. Mustahkam xemosorblashda adsorblangan zarracha elektr zaryadlangan bo'ladi. Kristall panjaraning erkin zaryad tashuvchilari xemosorbsion bog'lanishda bevosita ishtirok etadi.

N_m — kristall sirtida adsorblangan molekullarning umumiy soni, $N_{1/m}$ zaryadlangan holatdagi molekullar soni bo'lsin. Adsorblangan molekulaning zaryadlangan holatda bo'lish ehtimolligi $\eta = \frac{N_1}{N_m}$ ga teng.

Agar bu sath E_a akseptor bo'lsa, u holda

$$\eta = 1 / \left(1 + \exp \frac{E_F - E_a}{kT} \right) \quad (3.22)$$

bo'ladi. Agar bu sath E_d donor bo'lsa, u holda

$$\eta = 1 / \left(1 + \exp \frac{E_d - E_F}{kT} \right) \quad (3.23)$$

bo'ladi, E_F — Fermi sathi.

Elektr o'lchamlardan (masalan, adsorblashda chiqish ishining o'zgarishini o'lchab) ηN_m kattalikni aniqlash mumkin.

3.7. Adsorblashning chiqish ishiga va o'tkazuvchanlikka ta'sirini aniqlash

Adsorblashda sirtning qoplanish darajasi to'g'risida ma'lumot beradigan tajribalar o'tkazuvchanlikni va chiqish ishini o'lchashlardir.

Yarimo'tkazgichlarning elektrik xossalriga adsorblashning ta'sirini o'rganish uchun tadqiqolanuvchi kristall vakuumga joylanadi. Bunday tadqiqotlarda namuning o'tkazuvchanligi quyidagi usullar yordamida o'lchanadi:

1. *O'zgarmas tok ko'prigi usuli*. Oldindan darajalab olingan muvozanatsiz ko'prikn qo'llash qulay, chunki bu usul jarayon kinetikasi adsorblash vaqtida namuna qarshiligining vaqt bo'yicha o'zgarishini o'rganish imkonini beradi.

2. *Kompensatsion usul*. Odatda o'tkazuvchanlikni o'lchashning ikki zondli usuli qo'llaniladi.

3. Namunada o'zgarmas kuchlanish tutib turilgani holda namuna orqali tokning adsorblash oqibatida o'zgarishini aniqlash usuli. Bu eng sodda usul kattaliklar tartibini baholovchi o'lchashlarda qo'llaniladi.

Kontakt potentsiallar ayirmasini o'lchashning butun bir qator usullari mavjud.

Adsorblash jarayonida chiqish ishining o'zgarishini tadqiqlashda yarimo'tkazgich-metall kontaktining metall qatlamida chiqish ishi o'lchashlar vaqtida o'zgarmasligiga ishonch bo'lishi kerak. Tajribalar natijalari ko'rsatishicha bu shart bajariladi.

Biquibiy (bir vaqtda elektron va kovak) o'tkazuvchanlikli yarimo'tkazgich uchun adsorblash vaqtida sirt zaryadi ishorasini aniqlashda bir vaqtda ham chiqish ishi, ham o'tkazuvchanlik o'lchansa yaxshi natija olinadi.

Suv bug'lari, spirt, aseton va boshqa moddalarning yarimo'tkazgichga adsorblanishi (sirtiga yutilishi) uning sohalarini pastga egadi, bu esa o'tkazuvchanlik va chiqish ishini o'lchashlarda namoyon bo'ladi. Kislorod odatda chiqish ishini va p -tur kristall o'tkazuvchanligini amalga oshiradi, ya'ni kislorod yutilganda sirt manfiy zaryadlanadi.

Dipol momentli molekulalar muayyan yo'nalishda adsorblanganda sohalar egilishiga molekulalarning kristall bilan bog'lanishi donor yoki akseptor xususiyatli bo'lishiga ta'sir ko'rsatadi. Adsorblash jarayonida sirtga har xil oriyentirlangan molekulalar sohalar egilishini bir tomonga o'zgartirishi mumkin.

Suv bug'i muhitida germaniyni sirdagi o'tkazuvchanligi n -tur, ozon atmosferasida p -tur bo'ladi, quruq kislorod muhitida o'tkazuvchanlik minimumi kuzatiladi. Ba'zi hollarda bosim keng oraliqda o'zgarganida ham o'tkazuvchanlik minimumini olish va adsorblash vaqtida hosil bo'ladigan sirdagi sathlar parametrlarini aniqlash mumkin.

Molekulalar adsorblanganda sirdagi potensialning o'zgarish usuli sirdagi elektron holatlar haqida muhim ma'lumot olishga yordam beradi.

? Savol va topshiriqlar

1. Adsorblash hodisasi nima?
2. Adsorblashning asosiy qonuniyatlarini bayon qiling.
3. Adsorblash jarayoni borishini tavsiflang.
4. Adsorbsion muvozanat sharoitini bayon qiling.
5. Fizik adsorblash deb qanday adsorblashga aytiladi?
6. Kimyoviy adsorblashni fizik adsorblashdan farqi nimada?
7. Anion va kation adsorblashlarni ta'riflang.
8. Xemosorblash nazariyasi asoslarini tushuntiring.

IV BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA MAYDON EFFEKTI

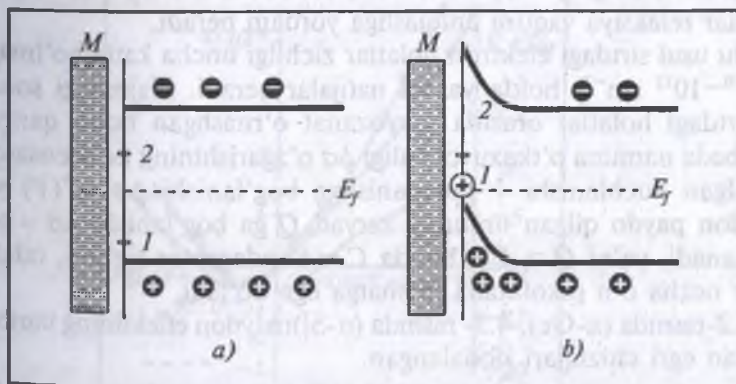
Sirtagi potensialni o'zgartirishning mukammalroq usuli *maydon effekti* deb atalgan hodisadir.

U quyidagidan iborat: agar bir qoplamasi namuna, ikkinchisi metall bo'lgan, qoplamalar orasiga katta dielektrik singdiruvchanlik (Σ) li izolator (dielektrik) joylangan kondensator yig'ilsa va unga kuchlanish berilsa, bu holda yarimo'tkazgich sirti yaqinida hajmiy zaryad hosil bo'ladi. U metall plastinkadagi zaryadni neytrallaydi.

Faraz qilaylik, maydon (kuchlanish) qo'yilguncha mazkur (p -tur) o'tkazgich uchun energiya sohalarining boshlang'ich egilishi nolga teng edi (4.1-rasm, *a*). Kuchlanish berilganda (4.1-rasm, *b*) sirt yaqinidagi sohada kovaklar zichligi hajmdagidan ortiq bo'ladi, energiya sohalarini yuqoriga egiladi.

Yarimo'tkazgich namunasi sirtida hosil qilinadigan maydonni o'zgartirib, sirtagi potensialni keng oraliqlarda o'zgartirish mumkin. Bu o'zgarishda sirt sohasidagi zaryadlar taqsimoti o'zgaradi. Elektr maydon ta'sirida yarimo'tkazgich kristalli o'tkazuvchanligining o'zgarish hodisasini *maydon effekti* deyiladi.

Ma'lumki, yarimo'tkazgich sirtida elektron holatlari mavjud bo'ladi. Maydon ta'sirida paydo bo'lgan zaryadlarning bir qismi ana shu holatlarga o'tiradi. Sirtagi holatlar zichligi qancha katta bo'lsa,



4.1-rasm.

maydon effekti hodisasida o'tkazuvchanlikning kuzatilgan statsionar o'zgarishi shuncha kichik bo'ladi. Shuning uchun sirdagi holatlar parametrlari haqida ma'lumot olish uchun maydon effektini o'lchashdan foydalanish mumkin. Tashqi elektr maydon yordamida sirdagi potensialni o'zgartirish usuli oldin qaralgan molekulalar adsorblash usuliga nisbatan qator afzalliklarga ega.

1. Maydon effekti usulida tekshirishlar o'tkazilganda sirdagi holatlar tizimi o'zgarmaydi, adsorblash holida o'zgarish bo'lar edi. Bunda faqat sirdagi holatlarning to'ldirilganligi o'zgaradi. Ammo juda katta kuchlanish hosil qilinganda elektradsorblash hodisasi yuz beradi.

2. Maydon effekti usulida yetarlicha oraliqda sirdagi potensialni amalda uzluksiz o'zgartirib borish va istalgan sohalar egilishini hosil qilish mumkin.

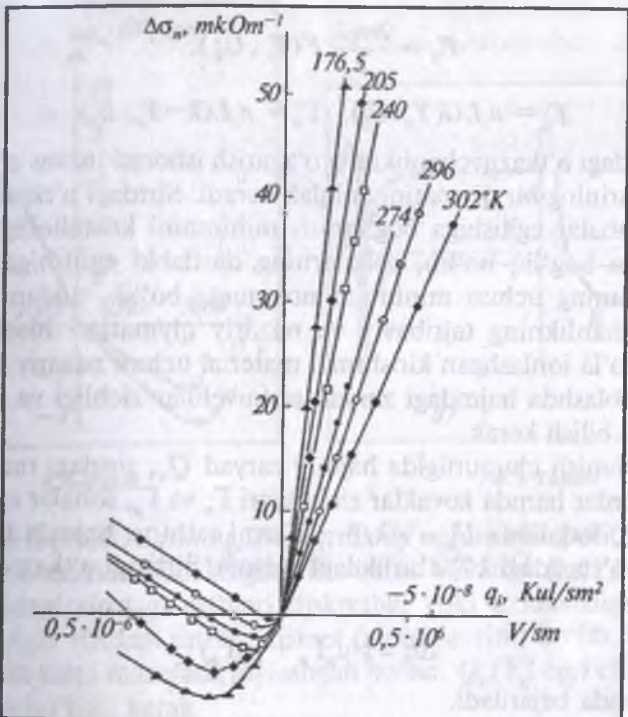
4.1. Maydon effekti usulida yarimo'tkazgichlar sirtining energetik tuzilishini o'rganish

Statsionar (vaqt bo'yicha doimiy) holda maydon effektini o'lchash asosida sirdagi o'tkazuvchanlik turini (n -tur yoki p -tur ekanligini) aniqlash, sirda sohalar boshlang'ich egilishini topish va sohalar egilishining qo'yilgan kuchlanishga bog'liqligini aniqlash mumkin. Maydon effekti ma'lumotlari asosida sohalar egilishiga bog'liq ravishda sirt sohasidagi zaryad va sirtga o'tgan zaryad miqdorini aniqlash mumkin. Nihoyat, maydon effekti kinetikasini o'rganish sirdagi holatlar relaksiya vaqtini aniqlashga yordam beradi.

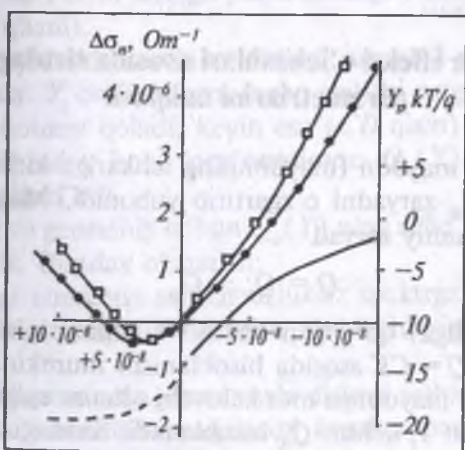
Bu usul sirdagi elektron holatlar zichligi uncha katta bo'lmagan ($\sim 10^{10} - 10^{12} \text{ sm}^{-2}$) holda yaxshi natijalar beradi. Hajmdagi sohalar va sirdagi holatlar orasida muvozanat o'rnashgan holni qaraylik. Tajribada namuna o'tkazuvchanligi $\Delta\sigma$ o'zgarishining kondensatorga qo'yilgan kuchlanishi V kuchlanishga bog'lanishi $\Delta\sigma = f(V)$ yoki maydon paydo qilgan umumiy zaryad Q ga bog'lanishi $\Delta\sigma = \varphi(Q)$ o'lchanadi, ya'ni $Q = CV$, bunda C — kondensator sig'imi, odatda, C bir necha o'n pikofarada qiymatga ega bo'ladi.

4.2-rasmda (n -Ge), 4.3- rasmda (n -Si) maydon effektining tajribada olingan egri chiziqlari ifodalangan.

$$Q_{sc} = 2en_s L F(Y_s, U_b), \quad (4.1)$$



4.2-rasm.



4.3-rasm.

$$E_s = \frac{2en_i L}{\varepsilon} F(Y_s, U_b), \quad (4.2)$$

$$\Gamma_p = n_i LG(Y_s, U_b), \quad \Gamma_n = n_i LG(-Y_s, U_b) \quad (4.3)$$

holda sirtidagi o'tkazuvchanlikning o'zgarish ishorasi ushbu o'tkazuvchanlik turining bir qiymatini aniqlab beradi. Sirtidagi o'tkazuvchanlikning sohalar egilishiga bog'lanish minimumi kristallning hajmiy xossalriga bog'liq bo'lib, sohalarining dastlabki egilishiga bog'liq emas. Shuning uchun minimum nol nuqta bo'lib, undan boshlab o'tkazuvchanlikning tajribaviy va nazariy qiymatlari hisoblanadi. Hajmda to'la ionlashgan kirishmali material uchun nazariy egri chiziqni hisoblashda hajmdagi zaryad tashuvchilar zichligi va harakatchanligini bilish kerak.

Ekranlanish chuqurligida hajmiy zaryad Q_{sc} , sirtidagi maydon E_s va elektronlar hamda kovaklar zichliklari Γ_n va Γ_p , sohalar egilishi Y_s bo'lsa, bu ifodalarda $U_b = \ln \lambda / \beta - \text{Fermi sathi}$ va hajmda taqiqlangan soha o'rtasidagi kT/e birlikdagi masofa. Sirtidagi o'tkazuvchanlik hisobi

$$\Delta \sigma = e(\mu_p \Gamma_p + \mu_n \Gamma_n) \quad (4.4)$$

ifoda asosida bajariladi.

Hajmda kirishmalar ionlashish darajasi ixtiyoriy bo'lganda hisob ancha murakkab bo'ladi.

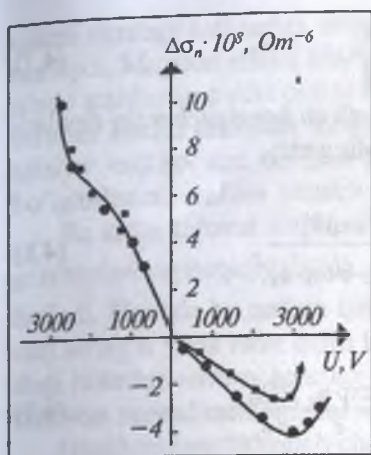
4.2. Maydon effekti o'lchashlari asosida sirtidagi sathlar parametrlarini aniqlash

Tashqi elektr maydon (maydonning ichkariga kirishi) ekranlash chuqurligidagi Q_{sc} zaryadni o'zgartirib yuboradi. Maydon ta'sirida hosil bo'lgan umumiy zaryad

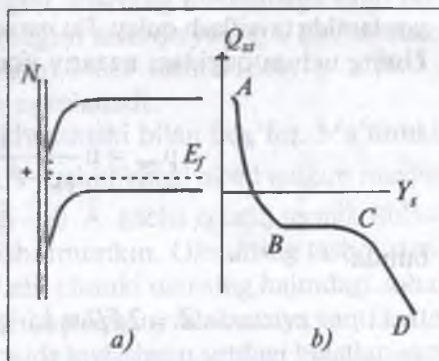
$$Q = Q_{sc} + Q_{ss} \quad (4.5)$$

elektrodga (metallga) qo'yilgan har bir kuchlanish qiymati uchun Q ning kattaligi $Q = CV$ asosida hisoblanishi mumkin. $Y_s(V)$ bog'lanishdan mazkur maydonga mos keluvchi sohalar egilishini aniqlash mumkin. Topilgan Y_s uchun Q_{sc} hisoblanadi. Sirtidagi zaryad

$$Q_{ss}(Y_s) = CV - Q_{sc} Y_s \quad (4.6)$$



4.4-rasm.



4.5-rasm.

ifodadan topiladi. Shuningdek, germaniy uchun olingan $Q_{ss}(Y_s)$ bog'lanish 4.4-rasmda ifodalangan. Bir qator hollarda $Q_{ss}(Y_s)$ bog'lanish namunadagi sirtagi sathlari diskretligi yoki uzluksizligini aniqlab beradi. Agar sirtagi sathlar diskret (ayrim-ayrim) bo'lib, bir-biridan yetarlicha katta masofada joylashgan bo'lsa, $Q_{ss}(Y_s)$ egri chiziq pog'onasimon bo'lishi kerak.

Buni 4.5-rasmda ko'rish mumkin. Soha pastga egiladi deyilganda ($Y_s > 0$) dastlab Fermi sathiga yaqin sirtagi 1-sathi to'ldiriladi (4.5-rasm, b, AB qismi).

Biror Y_s qiymatida u to'la to'ldiriladi, ammo 2-sath Fermi sathidan ancha yiroqda. Y_s ortib borgan (soha egilishi ortgan sari) Q_{ss} zaryad BC qismda doimiy qoladi, keyin esa (CD qism) 2-sath to'ldirilishi o'zgaradi. Shunday holat pog'onasimon $Q_{ss}(Y_s)$ bog'lanish CH_2O uchun kuzatilgan edi.

Kremniy va germaniy uchun $Q_{ss}(Y_s)$ ning silliq pog'onasiz o'zgarib borishi xosdir. Bunday o'zgarish:

- 1) sirtagi energetik sathlar uzluksiz spektrga ega bo'lganda;
- 2) bir-biriga yaqin joylashgan sirt sathlarida bu holat o'rinli bo'ladi.

Quyi temperaturada germaniyda diskret sathlar kuzatiladi. Maydon effekti o'lchashlari natijalarini harakatchanlik o'lchamliligiga ega kattalik

$$M_{me} = \frac{d\Delta\sigma_s}{dQ} \quad (4.7)$$

yordamida tavsiflash qulay. Bu *maydon effekti harakatchanligi* deyiladi. Uning uchun quyidagi nazariy ifoda olingan:

$$\mu_{me} = \mu \frac{b^{-1} - \lambda^{-2} \exp Y_s}{1 + \lambda^{-2} \frac{Z}{\exp Y_s} \varphi \exp \varphi_s}, \quad (4.8)$$

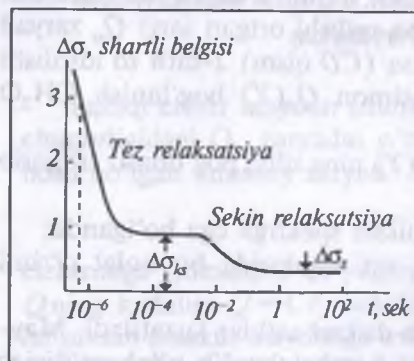
bunda

$$Z = 2F/\lambda n_i L; \quad \varphi = \frac{\exp \varphi_s}{e} \frac{dQ_{ss}}{d\varphi_s}. \quad (4.9)$$

Kremniy uchun sirtidagi sathlari parametrlari μ_{σ} ni o'lchash va oddiy yo'l bilan sirtidagi sathlarga ushlanish egri chizig'i tahlil etilgan.

4.3. Maydon effekti kinetikasi

Maydon effektining dastlabki tadqiqotlardayoq sirtidagi o'tkazuvchanlik maydon hosil qilingan paytda tez o'zgaradi, so'ngra avval juda tez, keyin sekinlik bilan ma'lum statsionar qiymatgacha (ba'zan nolgacha) kamayadi, deb tasdiqlangan edi. Maydon effektining bunday o'zgarishi germaniy, kremniy, Cu_2O , PbS , CdS , GaAs yarim-o'tkazgichlarida kuzatilgan. 4.6-rasmda $\Delta\sigma$ ning τ ga bog'lanishi ifo-



4.6-rasm.

dalangan. Rasmdan ko'rinadiki, 10^{-8} s tartibidagi vaqtda sirtidagi o'tkazuvchanlik dastlabki qiymatidan ancha pastga tushadi, $\sim 10^{-5}$ s da qandaydir $\Delta\sigma_s$ kva-zistatsionar qiymatga ega bo'ladi. Keyin yana 10^{-3} s dan sekundgacha, hatto soatlargacha statsionar qiymat $\Delta\sigma_s^{sm}$ ga egalik qiladi.

$\Delta\sigma$ ning vaqt o'tishi bilan kamayishiga sabab: maydon hosil qilgan zaryad tashuvchilarning bir

qismi sirtidagi sathlariga o'tadi. U endi o'tkazuvchanlikda qatnasha olmaydi. Maydon effekti kinetikasining bu xususiyati germaniy va kremniyda sathlarning ikki tizimi borligini, ularning relaksatsiya vaqti birbiridan kuchli darajada farq qilishligini tasdiqlaydi. $\tau_s \leq 10^{-8}$ s relaksatsiya vaqtiga ega bo'lgan sathlarni «tez» sathlar deb, $\tau_s \geq 10^{-3}$ s bo'lganlarini «sekin» sathlar deb nomlanadi.

Bu katta tafovut sathlarning joylashishi bilan bog'liq. Ma'lumki, germaniyning haqiqiy sirtida $\sim 10 \text{ \AA}$ qalinlikdagi oksid qatlam mavjud bo'ladi. Havoda bu qatlam qalinligi $\sim 50 \text{ \AA}$ gacha ortadi, termik ishlodan so'ng u yana ham qalin bo'lishi mumkin. Oksidning tashqi sirtidagi holatlar «sekin» holatlar bo'ladi, chunki ularning hajmdagi sohal bilan zaryad tashuvchilar almashinuvi qiyin, relaksatsiya vaqti katta.

Oksid-yarimo'tkazgich chegarasida joylashgan sirtidagi holatlar «tez» holatlar bo'ladi, chunki ularning τ_s kichikdir. 4.7-rasmdagi diagrammalar yordamida maydon effekti kinetikasini batafsil qarab chiqamiz.

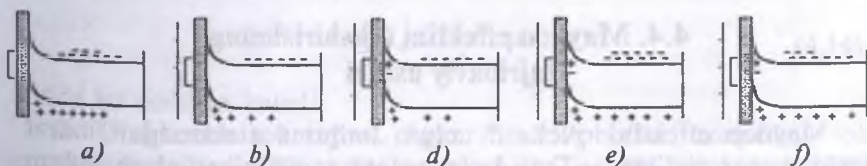
Maydon kiritilguncha n-Ge namunasi sirtida inversion qatlam mavjud bo'lsin (sohalarning boshlang'ich egilishi yuqoriga qaragan, 4.7-rasm, a).

Metall plastinka manfiy bo'ladigan qilib maydon kiritamiz (kuchlanish beramiz) (4.7-rasm, b). Plastinkadagi zaryadni neytrallash uchun noasosiy zaryad tashuvchilar (kovaklar) hajmdan sirt yaqinidagi soha-ga, elektron esa hajmdan metall elektrodga o'tadi.

Sirt yaqinidagi potensial to'siqning balandligi shunday o'zgaradiki, bunda hajmiy zaryad sohasida N ta ortiqcha kovaklar, hajmda esa N taga kam elektronlar va kovaklar paydo bo'ladi. Binobarin, namuna o'tkazuvchanligi o'zgaradi:

$$\Delta\sigma_s = eN(\mu_{ps} - \mu_{nb} - \mu_{pb}). \quad (4.10)$$

Bu $\Delta\sigma_s$ ning o'rnashish jarayoni diffuzion—dreyf muvozanat hosil bo'lishi (Maksvell relaksatsiya vaqti) $\tau_m = \epsilon/4\pi\sigma_0$ vaqt davomida yuz beradi, bunda, σ_0 — namunaning solishtirma qarshiligi.



4.7-rasm.

Bu vaqt zaryad tashuvchilarning ekranlanish masofasiga teng masofaga diffuziyasi vaqtiga to'g'ri va mazkur materialning RC si bilan aniqlanadi. Tekshirilgan Ge namunalari uchun $\tau_m \sim 10^{-11} - 10^{-12}$ s bo'lgan.

Bundan keyin $\tau_s \sim 10^{-8}$ s relaksatsiya vaqti davomida sohalar va «tez» sathlar orasida muvozanat paydo bo'ladi (4.7-rasm, d): «tez» sirtidagi sathlar va hajmiy zaryad sohasidagi umumiy zaryad eN ga teng. Agar umumiy zaryadning sirtida o'rtnashgan qismini x orqali belgilasak, u holda maydon paydo qilingandan 10^{-8} s keyin o'tkazuvchanlik o'zgarishi

$$\Delta\sigma_s = eN[(1-x)\mu_{ps} - \mu_{ns} - \mu_{pb}] \quad (4.11)$$

bo'ladi. Namunada ortiqcha zaryad tashuvchilar yashash vaqtiga τ ga teng (Ge uchun $\sim 10^{-5}$ s) vaqtda hajmda, maydon kiritilguncha mavjud bo'lgan kovaklar va elektronlar zichliklari muvozanati o'rtnashadi (4.7-rasm, e).

O'tkazuvchanlikning $\sim 10^{-5}$ s o'tgandan keyingi o'zgarishi

$$\Delta\sigma_s = eN(1-x)\mu_{ps} \quad (4.12)$$

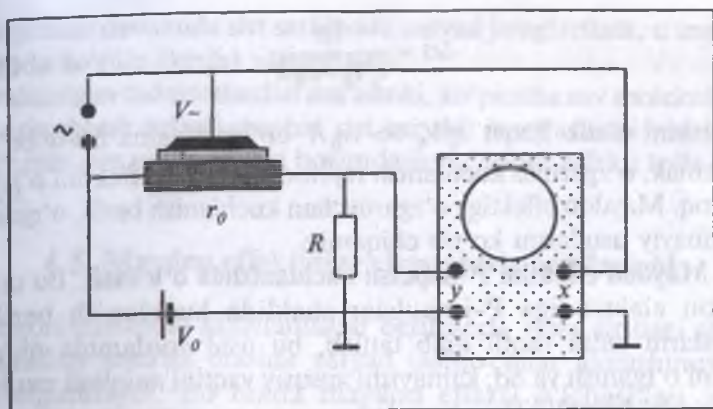
$\Delta\sigma_s$ ning keyingi o'zgarishi zaryad tashuvchilarning «sekin» sirtidagi sathlarga o'tishi bilan bog'liq bo'ladi (4.7-rasm, f). Ularning zichligi katta bo'lganligi uchun maydon paydo qilgan barcha zaryadlar «sekin» sathlarga o'tib olishi mumkin. Sohalarining sirt yaqinida egilishi o'zining oldingi qiymatiga qaytadi, $\Delta\sigma_s$ esa nolga intiladi. Bu jarayon keng oraliqda (minutlardan soatlargacha) o'zgaradigan «sekin» holatlar relaksatsiyasi vaqtida yuz beradi.

Ma'lumki, maydon effekti kinetikasini turli vaqt oraliqlarida tadqiqlash asosida bir qator muhim parametrlar olinadi. «Tez» va «sekin» sirt sathlari relaksatsiya vaqtlari va ortiqcha zaryad tashuvchilar yashash vaqti topiladi.

Bu holda maydon effekti harakatchanligiga teng bo'lgan zaryad tashuvchilar sirt harakatchanligini ham aniqlab olsa bo'ladi.

4.4. Maydon effektini tekshirishning tajribaviy uslubi

Maydon effektini o'lchash uchun namuna elektroddan iborat kondensator yig'iladi. «Tez» holatlardagi zaryadni aniqlash uchun o'zgaruvchan kuchlanishga asoslangan maydon effekti usuli qo'lla-



4.8-rasm.

niladi. Uning prinsipial sxemasi 4.8-rasmda tasvirlangan. Ge namunasiga bir necha volt V_0 o'zgaras kuchlanish beriladi. Maydoniy elektrodga V o'zgaruvchan kuchlanish ulanadi. Natijada yuklama qarshilik R da V o'zgaruvchan signal paydo bo'lib, u Y - ossillograf plastinasiga uzatiladi. Agar ossillografning X plastinasiga ma'lum kuchlanish berilsa, ekranda o'tkazuvchanlik o'zgarishining V o'zgaruvchiga bog'lanishini bevosita kuzatish mumkin. Signal bilan namuna qarshiligi orasidagi bog'lanishni topish qiyin emas:

$$\Delta\sigma = \frac{v(R+r_0)^2}{r_0^2 V_0 R - v r_0 R(r_0 + R)} \quad (4.13)$$

Bu bog'lanish ancha murakkab. Biz ikki xususiy holni ko'ramiz.

1. O'zgaras kuchlanish rejimi. Agar $R \ll r_0 - \Delta r$ bo'lsa, maydon ta'sirida namuna o'tkazuvchanligining o'zgarishi namuna va yuklama orasida kuchlanish taqsimotini deyarli o'zgartirmaydi. Namunada maydon o'zgaras bo'lib, zanjirda tok o'zgaradi. (4.13) ifoda bu holda

$$\Delta\sigma = \frac{v}{V_0 R} \sim V \quad (4.14)$$

sodda ko'rinishga keladi.

2. O'zgaras tok rejimi. Agar $R \gg r_0$ bo'lsa, zanjirdagi tok o'zgaras bo'ladi. Bu yuklama qarshiligi orqali aniqlanadi. Shu sababli (4.13) ifoda

$$\Delta\sigma = \frac{vR}{r_0^2 V_0 - v r_0 R} \quad (4.15)$$

ko'rinishini oladi. Faqat $r_0^2 V_0 \gg v r_0 R$ bo'lgandagina $\Delta\sigma \sim v$ bo'ladi.

Demak, o'zgarma kuchlanish rejimida maydon effektini o'lchash qulayroq. Maydon effektiga o'zgaruvchan kuchlanish berib, o'rganishni tajribaviy usullarini ko'rib chiqamiz.

1. Maydon effektini P-impulslar kuchlanishda o'lchash. Bu usulda maydon elektrodiga P-impulslar shaklida kuchlanish beriladi. Impulslarni katta vaqtli qilib tanlab, bu usul yordamida maydon effektini o'rganish va $\Delta\sigma$, kamayishi xususiy vaqtini aniqlash mumkin. Uning ba'zi kamchiliklari ham bor.

2. Maydon effektini sinusoidal kuchlanishda o'lchash. Bu usul yordamida maydon effekti egri chizig'ini ossillograf ekranida bevosita kuzatish mumkin. Bu usulning asosiy afzalligi shundaki, maydon effekti egri chizig'ini rasmga olish vaqti ossillogrammani fotosuratga olish vaqtiga amalda teng va sirt sathlari parametrlarining mumkin bo'lgan sekin o'zgarishlar natijalarini buzmaydi va h.k.

3. Sohalarda dastlabki egilishi o'zgargani sababli o'zgaruvchan signallarda maydon effektini o'lchash usuli. Kichik signal deb amplitudasi kT/e dan kichik bo'lgan o'zgaruvchan kuchlanishga aytiladi. Sirt energetik tizimini o'rganishda maydon effektini kichik sinusoidal yoki impulsli kuchlanishlardan (kichik signallardan) foydalanish usuli eng ko'p tarqalgan. Bu usulning afzalliklari: nazariya bilan taqqoslash qulayligi, elementar effektlarni ajratib olish imkoniyati, maydon yordamida, sirtida, o'rganilayotgan sohaning kichkina qismdagina sirt sathlarini to'ldirilish darajasini o'zgartirish imkoniyati.

Bu usuldan foydalanib sirt potentsiallari o'zgarish egri chizig'ini olish uchun molekulalarni adsorblash yoki ko'ndalang elektr maydon yordamida sohalarning dastlabki egilishi o'zgartiriladi. Maydon effektini o'lchash kichik o'zgaruvchan signalda (kuchlanishda) bajariladi.

Maydon effektini o'lchashda jamg'arilish effekti mavjud bo'lishini e'tiborga olish zarur. Bu effekt hamma usullarda kuzatiladi. Jamg'arilish effekti shundan iboratki, sirt sathlarida o'rnashgan zaryad kritik V_k kuchlanishdan katta kuchlanishlarda maydon ta'sirida qaytmas tarzda o'zgaradi. Aftidan, bu effekt elektr maydon ta'sirida atrof-muhit molekulalarini qo'shimcha adsorblash bilan bog'liq. Ketma-

ket impulsar davomida sirt sathlarida zaryad jamg'ariladi, u impulsar oralig'ida so'rilib (ketib) ulgurmaydi.

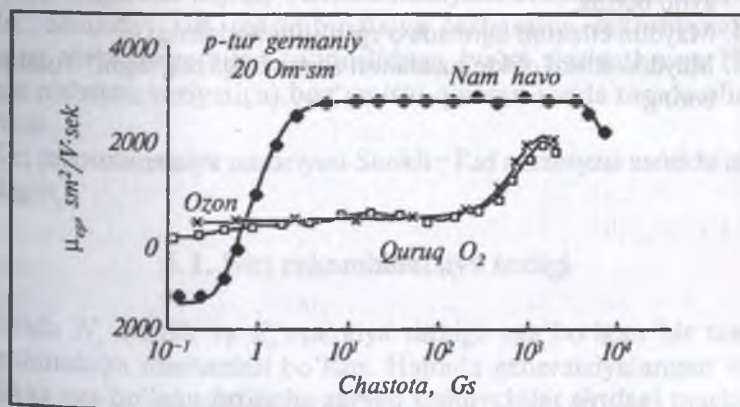
O'tkazilgan tadqiqotlardan ma'lumki, ko'pincha suv molekularini elektradsorblash tufayli musbat sirt zaryadi jamg'arilishi yuz beradi. $1 \cdot 10^{-6}$ mm.sim.ust. dan past bosimda jamg'arilish effekti to'la g'oyib bo'ladi.

4.5. Maydon effektining chastotaviy bog'lanishi

Yuqori chastotali kuchlanishlar berilganda «tez» sirtagi sathlari va hajmdagi sohalar orasida zaryad tashuvchilar almashinuvi yuz berib ulgurmaydi. Bu holda maydon effekti o'lchashlari zaryad tashuvchilarning sirtagi harakatchanligi haqida ma'lumot beradi. Chastotalarning keng oralig'idagi maydon effektining chastotaviy bog'lanishini o'rganish mazkur sathlarning relaksatsiya vaqtini, shuningdek, namunada zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini aniqlaydi.

Maydon effekti kinikasini o'rganish yana sirt holatlarining energetik vaziyatini va elektronlar, kovaklarni ushlash kesimi haqida ma'lumot beradi.

Tajribada «maydon effekti harakatchanligi»ning chastotaviy bog'lanishi ham o'rganilgan. Maxsus ishlab chiqilgan usullar yordamida maydon effekti harakatchanligining chastotaga bog'lanishi aniqlangan. Masalan, p-Ge uchun bu bog'lanish 300 Gs–10 MGs oraliqda turli gaz muhitlarda o'tkazilgan o'lchashlar natijasi 4.9-rasmda ifodalangan.



4.9-rasm.

Yuqori chastotalar sohasida (10MGs chamasida) maydon effekti harakatchanligi μ_{me} atrof-muhitga bog'liqmas va hajmdagi asosiy tashuvchilar harakatchanligiga yaqin. Bu chastotalarda sohalar va «tez» sathlar orasida zaryad tashuvchilar almashinuvi yuz bermaydi, $\tau_s \sim 10^{-8}$ s. Sirtida inversion qatlam mavjud bo'lganda yuqori chastotalar sohasida μ_{me} kovaklarning hajmdagi harakatchanligidan 50% ortiq. Biror ω oralig'ida μ_{me} o'zgarmas, ammo $\omega \sim 1/2\pi\tau$ chastotalarda u keskin pasayadi va hajmdagining $\sim 30\%$ ini tashkil qiladi.

Sirtida boyigan qatlam mavjud bo'lganida asosiy zaryad tashuvchilar sirtga chiqadi, μ_{me} ning ishorasi o'zgarmas bo'ladi.

Tajribada kuzatilgan μ_{me} ning chastotaviy bog'lanishlarini nazariya bilan taqqoslab, «tez» sirtidagi sathlar parametrlarini miqdoran aniqlash mumkin. Ammo nazariyada bir turdagi sath bor deb faraz qilingan, aslida sathda bir qancha turli sathlar bo'ladi. Bu tajriba bilan nazariya orasida nomutanosiblikni keltirib chiqaradi. Biroq nazariya mukammal bo'lsa, tajribada olinishi mumkin bo'lgan ma'lumotlarni oldindan bilish imkoniyatini beradi.

? Savol va topshiriqlar

1. Maydon effekti qanday hodisa?
2. Maydon effekti usuli yordamida yarimo'tkazgichlar sirtining energetik tuzilishi qanday o'rganiladi?
3. Maydon effekti o'lchamlari orqali sirtidagi sathlar parametrlarini aytib bering.
4. Maydon effektini tajribada o'rganishni ifodalang.
5. Maydon effekti elektr kuchlanish chastotasiga bog'liqmi? Tushuntirib bering.

V BOB. YARIMO'TKAZGICHLARDA SIRTDAGI REKOMBINATSIYA

Ko'pchilik yarimo'tkazgichlarda zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasi, asosan, kirishmaviy markazlar (rekombinatsiya markazlari) orqali yuz beradi. Ular hajmda taqiqlangan soha o'rtasi yaqinida joylashgan bo'ladi. Bunday rekombinatsiya nazariyasini Shokli va Rid ishlab chiqqan. Zonalararo rekombinatsiya imkoniyati ham bor, ammo uning ehtimolligi ancha kichik.

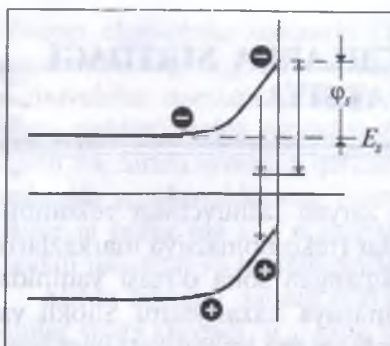
Toza kristallar hajmida rekombinatsiya markazlari kam, shu sababli sirt sathlari orqali rekombinatsiya muhim bo'lishi mumkin. Yupqa namunalarda elektron va kovaklar asosan sirtida rekombinatsiyalanadi va shuning uchun zaryad tashuvchilarning effektiv yashash vaqti ana shu rekombinatsiya orqali aniqlanadi. Sirtidagi rekombinatsion markazlar vazifasini sirt elektron holatlar bajaradi. Ular hajmdagi sohalar bilan yaxshi aloqada bo'ladi va zaryad tashuvchilarni tutib qolishning yetarlicha katta kesimlariga egadir.

Sirt rekombinatsiya jarayonlarini o'rganish sirtidagi sathlar tabiati, ularning energetik tizimi haqida ma'lumotlar beradi. Ba'zi o'ziga xosliklardan qat'i nazar, sirt va hajmiy rekombinatsiya, asosan, bir xil qonuniyatlarga bo'ysunadi. Biroq, ayrim hollarda sirt rekombinatsiyani o'rganish hajmiy rekombinatsiyani bilishdan ko'ra qulayroqdir. Shunday sirt rekombinatsiya tezligining rekombinatsion sathning elektronlar bilan to'ldirilishiga (ya'ni shu sathning Fermi sathiga nisbatan vaziyatiga) bog'lanishi qiyosan sodda tarzda olinishi mumkin.

Sirt rekombinatsiya nazariyasi Shokli—Rid nazariyasi asosida ishlab chiqilgan.

5.1. Sirt rekombinatsiya tezligi

Sirtida N_s zichlik va E_s energiya sathiga ega bo'lgan bir turdagi rekombinatsiya markazlari bo'lsin. Hajmda generatsiyalangan va Δn zichlikka ega bo'lgan ortiqcha zaryad tashuvchilar sirtidagi markazlar orqali rekombinatsiyalanadi. Shu rekombinatsiya tezligini hisoblaymiz.



5.1-rasm.

Agar E_s sathda elektronning bo'lish ehtimolligini f_s bilan belgilasak, uning termodinamik muvozanat holati ifodasi quyidagicha bo'ladi:

$$f_{s0} = \left[\exp \frac{-E_s - E_F}{kT} + 1 \right]. \quad (5.1)$$

Elektronlarning o'tkazuvchanlik sohasidan E_s sathiga o'tish surati sirt yaqinida n_s zichlikka, E_s sathning band bo'lmagan qismiga proporsional bo'ladi:

$$-\left(\frac{dn_s}{dt}\right)_1 = \chi_{ns} n_s N_s (1 - f_s), \quad (5.2)$$

bunda χ_{ns} — elektronning E_s sathda bo'lish koeffitsiyenti, elektronlarning shu sathdan ketish sur'ati:

$$\left(\frac{dn_s}{dt}\right)_2 = \beta_{ns} f_s N_s, \quad (5.3)$$

bunda β_s — mazkur o'tish koeffitsiyenti. Ravshanki, elektronlar zichligi o'zgarishi deb

$$-\left(\frac{dn_s}{dt}\right)_1 = -\left(\frac{dn_s}{dt}\right)_1 - \left(\frac{dn_s}{dt}\right)_2 = \chi_{ns} (1 - f_s) n_s N_s - \beta_s f_s N_s, \quad (5.4)$$

muvozanat sharoitida:

$$\chi_{ns} (1 - f_s) n_{s0} N_s = \beta_s f_{s0} N_s. \quad (5.5)$$

(5.1) ifodadan foydalansak,

$$\beta_{ns} = \chi_{ns} N_s \left(\frac{-E_s}{kT} \right), \quad (5.6)$$

endi $\beta_{ns} = \chi_s \exp \left(\frac{-E_s}{kT} \right)$ belgilash kiritsak,

$$-\frac{dn_s}{dt} = \chi_{ns} n_s N_s [(1 - f_s) n_s - n_{s1} f_s]_1, \quad (5.7)$$

bundagi

$$n_{s1} = N_s \exp \left(\frac{E_s}{kT} \right). \quad (5.8)$$

Xuddi shu yo'l bilan kovaklar zichligining o'zgarishini topamiz:

$$-\frac{dp_s}{dt} = \chi_{ns} N_s [P_s f_s - P_{1s} (1 - f_s)], \quad (5.9)$$

bunda

$$p_{1s} = N_s \exp\left(\frac{E_s}{kT}\right). \quad (5.10)$$

Elektronlar va kovaklar zichligi o'zgarishlari rekombinatsiya natijasida bir-biriga teng, ya'ni $\frac{dn_s}{dt} = \frac{dp_s}{dt}$ va bundan f_s topiladi:

$$f_s = \frac{\alpha_{ns} n_s + \alpha_{ps} p_s}{\alpha_{ns} (n_s - n_{1s}) + \alpha_{ps} (p_s + p_{1s})}. \quad (5.11)$$

Rekombinatsiya natijasida elektron zichligi o'zgarishi endi

$$-\frac{dn_s}{dt} = \frac{\alpha_{ns} \alpha_{ps} N_s (n_s p_s - n_{s0} p_{s0})}{\alpha_{ns} (n_s - n_{1s}) + \alpha_{ps} (p_s + p_{1s})} \quad (5.12)$$

ko'rinish oladi. $\frac{dn_s}{dt} = \frac{\Delta n_s}{\tau_s} = s$ sirt rekombinatsiya tezligini bildiradi,

ya'ni 1 s da sirtning 1 sm² yuzida rekombinatsiyalanayotgan elektronlar va kovaklar sonini bildiradi va sm/s birlikka ega. Hajmiy p va n zichliklar bilan sirt p_s va n_s zichliklari orasidagi bog'lanishlar:

$$p_s = p e^{+\varphi_s / kT}, \quad n_s = n e^{-\varphi_s / kT} \quad (5.13)$$

ko'rinishlarda bo'lgani uchun, $n_s \cdot p_s = n_{s0} \cdot p_{s0}$ ayirmani $p \cdot n - n_0 \cdot p_0$ ayirma bilan almashtirish mumkin:

$$p = p_0 + \Delta p, \quad n = n_0 + \Delta n, \quad \Delta n = \Delta p_s. \quad (5.14)$$

Natijada s uchun uzil-kesil quyidagi ifoda olinadi:

$$s = \frac{(p_0 + n_0 + \Delta n) N_s \gamma_{ns} \gamma_{ps}}{\gamma_{ns} n_1 + \gamma_{ps} p_1 + [\gamma_{ns} n \exp(-\varphi_s / kT) + \gamma_{ps} p \exp(\varphi_s / kT)]}. \quad (5.15)$$

Kuchsiz generatsiya holida $\Delta p \ll p_0$, $\Delta n \ll n_0$, ammo $\Delta p = \Delta n$ bo'ladi va rekombinatsiya tezligi

$$s = \frac{\gamma_{ns} \gamma_{ps} N_s (p_0 + n_0)}{\gamma_{ns} (n_s + n_1) + \gamma_{ps} (p_s + p_1)} \quad (5.16)$$

sodda ko'rinishni oladi. Bu yerda

$$p_1 n_1 = n^2, \quad p_s n_s = p n. \quad (5.17)$$

Sirt rekombinatsiya tezligi tushunchasini qo'llash chegarasi bormi? Ha, bor. Uni quyidagi tahlildan ko'ramiz. Bu masalani miqdoran tadqiqi quyidagi xulosalarga olib keladi:

1. Agar butun hajm bo'yicha generatsiya bir tekis bo'lib, sirt potentsiali uncha katta bo'lmasa, yuqorida kiritilgan sirt rekombinatsiyasi tezligi tushunchasi adolatlidir.

2. Agar ortiqcha zaryad tashuvchilar generatsiyasi L ekranlash qalinligidagi sirt sohasidagina yuz bersa, u holda $p_s n_s = pn$ tenglik bajarilmaydi, ya'ni hajm bilan sirt orasidagi muvozanat buziladi.

3. Agar zaryad tashuvchilar diffuzion siljish uzunligi l_d fazoviy zaryad sohasi L_s uzunligidan kichik bo'lsa, bu holda ana shu qatlamdagi rekombinatsiya muhim bo'lib qoladi, hajm va sirt muvozanati buziladi.

Hisobning natijasiga ko'ra, $p_s n_s = pn$ tenglikning bajarilishi sharti

$$L_1 = \left(+L_2 + \frac{s}{v_d} \right); \quad (5.18)$$

$$L_1 = \frac{1}{l_d} \int_0^p e^{-Y} dx; \quad L_2 = \frac{i}{l_d} \int_0^{l'} e^Y dx; \quad v_d = \frac{l_d}{\tau_p}, \quad (5.19)$$

bunda, l' — sirtidan $Y = 1$ bo'ladigan tekislikkacha masofa; l_d — diffuzion siljish uzunligi; τ_p — elektron yarimo'tkazgichlarda kovaklar yashash vaqti; v_d — diffuzion siljish tezligi.

Germaniy uchun amalda foydalaniladigan sohalar egilishi sohasida (6.18) shart bajarilishi tasdiqlangan. Ammo yetarlicha katta Y_s va juda katta s bo'lganda rekombinatsiya tezliklari bo'lganda mazkur tushuncha ma'nosini yo'qotadi. Yuqori om li kristallarda (past om li larga nisbatan) kichik egilishlarda (6.18) bajarilmasligi mumkin. Kremniy uchun amalda foydalanadigan sirt potentsiali qiymatlarida s tushunchasidan ehtiyotkorlik bilan foydalanish kerak. Yana taqiqlangan sohasigacha keng bo'lgan yarimo'tkazgichlarda sirt rekombinatsiya tezligi tushunchasini juda katta kichik sohalar egilishi holidayoq qo'llanib bo'lmaydi.

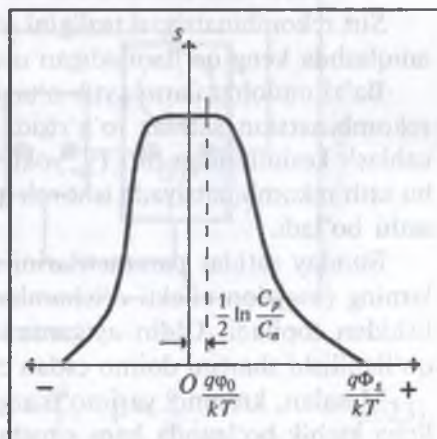
5.2. Sirt rekombinatsiyasini o'rganish

Sirt rekombinatsiyasi tezligi sohalarining sirt yaqinida egilishi kattaligiga bog'liq, chunki u sirt yaqinida qancha ortiqcha elektronlar va kovaklar bo'lishligini, sirt rekombinatsiya markazlarining zaryad tashuvchilar bilan to'ldirilishini aniqlaydi.

Sirt rekombinatsiyasi tezligining sirt Φ_s potensial bog'lanishi o'rganilgan. Bunday bog'lanishning ko'rinishi 5.2-rasmda tasvirlangan.

Undan kovaklar va elektronlar ushlanishi effektiv kesimlari nisbatini $s(\Phi_s)$ bog'lanish maksimumi siljishi kattaligi bo'yicha ushbu

$$\Phi_0 = \frac{kT}{2I} \ln \frac{\gamma_{ps}}{\gamma_{ns}} \quad (5.20)$$



5.2-rasm.

ifoda yordamida aniqlanadi.

Rekombinatsion sath energiyasi E_s ni aniqlash uchun $s(\Phi_s)$ bog'lanishni ikki xil temperatura T_1 va T_2 da o'lchanadi. Bu holda har bir temperatura uchun Φ_s ning ikkita qiymati olinadi, bunda $s = \frac{1}{2} s_{\max}$. Yana rekombinatsion sath vaziyatini $s_{\max}$ ning temperaturaviy bog'lanishidan aniqlasa ham bo'ladi, chunki

$$s_{\max}(T) = \text{const} \exp\left(\frac{E_c - E_s}{kT}\right). \quad (5.21)$$

Birgalikda olib borilgan mazkur ikkala o'lchashlar E_s ni bir qiymatli aniqlash imkonini beradi.

Sirt rekombinatsiya markazlari N_s zichligini odatda sirt sathlariga tutilgan zaryadning sohalar egilishiga bog'lanishidan topiladi. Bu bog'lanish maydon effekti o'lchashlaridan olinadi.

γ_p/γ_n nisbat $s(\Phi_s)$ bog'lanish maksimumi siljishidan aniqlanadi, $s_{\max}$ qiymatlaridan har ikki γ_p va γ_n ushlanish ko'ndalang kesimlarini aniqlash mumkin.

Shunday qilib, maydon effekti va sirt rekombinatsiya tezligini o'rganish bo'yicha birgalikda o'tkaziladigan o'lchashlar natijalari asosida sirt sathini xarakterlovchi barcha to'rt parametрни — sirt sathining zichligi N_s , uning energetik vaziyati E_s , bu sathga kovaklar va elektronlar tutib olinishi (ushlanishi), γ_{ps} va γ_{ns} ko'ndalang kesimlarini aniqlab olish mumkin.

Sirt rekombinatsiyasi tezligini o'lchash sirt sathlari parametrlarini aniqlashda keng qo'llaniladigan usuldir.

Ba'zi mulohazalarni aytib o'taylik. Mazkur usul yordamida faqat rekombinatsion sathlar to'g'risida ma'lumot olish mumkin. Agar ushlar kesimlaridan biri (γ_{ps} yoki γ_{ns}) ancha kichik bo'lsa, u holda bu sath rekombinatsiyada ishtirok qilmaydi, yopishish yoki ushlanish sathi bo'ladi.

Bunday sathlar parametrlarini sirt sathlariga ushlangan zaryadlarning (maydon effekti o'lchamlaridan aniqlanadigan) sohalar egilishidan topiladi. Oldin aytganimizdek, sirt rekombinatsiya tezligi qo'llanilishi shartini doimo esdan chiqarmaslik kerak.

Masalan, kremniy yarimo'tkazgichi hoida sohalar egilishi yetarlicha kichik bo'lganda ham s tushunchasi o'z ma'nosini yo'qotadi, demak, s ning o'lchanishlaridan kremniy uchun sirtdagi sathlar parametrlarini aniqlash hamma vaqt ham mumkin bo'la bermaydi.

5.3. Sirt rekombinatsiyasi tezligi s ni o'lchashning tajribaviy usullari

Sirt potensialning qiymati turlicha bo'lgan hollarda sirtdagi rekombinatsiya tezligi s ni o'lchash sirt sathlarning rekombinatsion parametrlarini aniqlash imkoniyatini berishligini ko'rdik.

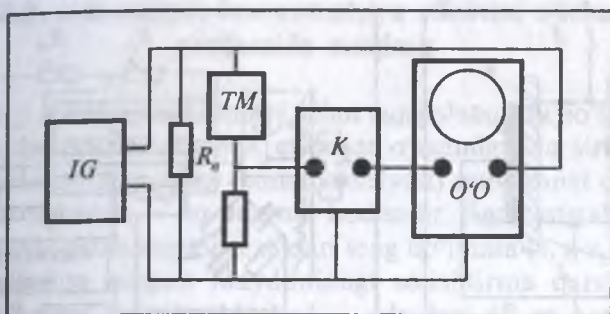
$s(Y_s)$ tajribaviy bog'lanishni olish uchun molekulalarni adsorblash yoki tashqi elektr maydon yordamida sohalar egilishini o'zgartirib o'lchashlar o'tkazilishi kerak. Agar maydon effektining tajribaviy egri chizig'ini nazariyasi bilan solishtirib sohalar egilishining maydonga bog'lanishini topilsa, bu holda undan $s(Y_s)$ bog'lanishini topish qiyin emas.

5.3.1. s ni impulsli usullar yordamida effektiv yashash vaqtini aniqlash

Yupqa namunalarda effektiv yashash vaqti va sirt rekombinatsiyasi tezligi s orasidagi munosabat.

Agar namuna L balandlikli va $W \cdot d = S$ asosli to'g'ri burchakli parallelepiped shaklida bo'lsa va bu holda $s \ll 2D/d$ shart bajarilsa, quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$\frac{1}{\tau_f} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2s}{d}, \quad (5.22)$$



5.3-rasm.

bunda
$$\bar{d} = \frac{d}{1+\alpha+\beta}, \quad \alpha = \frac{d}{L}, \quad \beta = \frac{d}{w}, \quad (5.23).$$

bu yerda: D — diffuziya koeffitsiyenti, τ_f — effektiv yashash vaqti, τ_b — hajmiy yashash vaqti. (5.22) ifodaga asosan, s ni o'lchash τ_f va τ_b ni o'lchashdan iborat bo'ladi.

τ_f ni ortiqcha o'tkazuvchanlikning so'nishi bo'yicha aniqlash.

Usul quyidagidan iborat. To'g'ri to'rtburchakli parallelepiped shaklidagi yarimo'tkazgich namunasiga zaryad tashuvchilar to'dasi kiritiladi (purkaladi) va vaqt davomida namunaning ortiqcha o'tkazuvchanligi o'zgarishi kuzatiladi. Qurilmaning blok-sxemasi 5.3-rasmda tasvirlangan.

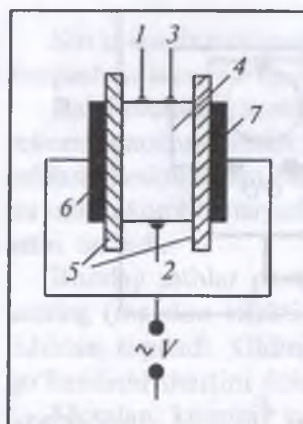
O'lchashlar tashqi (tortuvchi) V_0 kuchlanishning kichik qiymatlarida bajariladi. Agar τ_f yetarlicha katta yoki o'lchagich maydon katta bo'lsa, u holda maydon zaryad tashuvchilarni tortib chiqaradi. Bu effekt e'tiborga olinsa,

$$\frac{1}{\tau_f} = \frac{1}{\tau_1} - \frac{\mu V_0}{L^2} \quad (5.24)$$

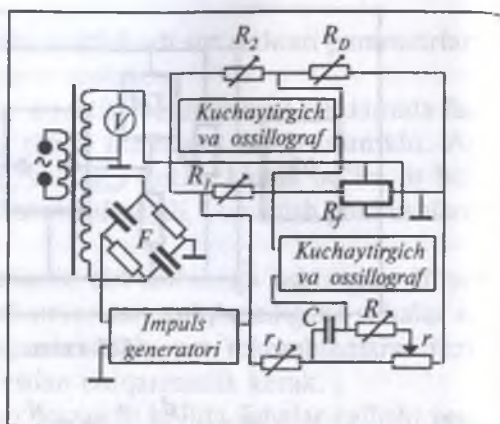
hosil bo'ladi. τ_f — o'lchagich maydon yo'q bo'lgandagi, τ_1 esa o'lchagich maydon borligidagi ortiqcha o'tkazuvchanlik pasayishi vaqti doimiylari.

Effektiv yashash vaqti τ_f ni Meni ko'prigi yordamida o'lchash.

Effektiv yashash vaqtini, ya'ni s ni sohalar egilishi turlicha bo'lganda o'lchashda, τ_f ni Meni ko'prigida o'tkazuvchanlik o'zgarishini esa oddiy o'zgaruvchan tok ko'prigida o'lchanadi. Namunani bunday o'lchashlarga quyidagicha tayyorlanadi. Namunaning chet-



5.4-rasm.



5.5-rasm.

lariga omik kontaktlar o'tkaziladi. Chetlardan birida omik kontakt yonida sust injensiyalaydigan (kam zaryad tashuvchilar kirita oladigan) kontakt kavsharlanadi (5.4-rasm).

O'tkazuvchanlik o'zgarishini oshirish uchun ko'ndalang maydon paydo qilinishida kuchlanish namunaning ikkala sirtiga ulanadi.

Bir vaqtda τ_r va maydon effektini o'lchash uchun yig'iladigan qo'shaloq ko'prikk sxemasi 5.5-rasmda tasvirlangan. Maydon elektrodligariga va impulsli generatorni yurgazib yuborishga beriladigan o'zgaruvchan kuchlanishlar birgina transformatorning ikkita ikkilamchi o'ramalaridan olinadi. Faza aylantirgich FA shunday boshqariladiki, P-impulsar ko'prikk berilgan paytda sinusoidal ko'ndalang maydon musbat yoki manfiy maksimumga erishadi. Impulsning davomiyligi sinusoidal kuchlanish davridan ancha kichik qilib beriladi, bunda impuls berilganda ko'ndalang maydonni o'zgarmas deb hisoblash mumkin.

Sinusoidal signal (kuchlanish) amplitudasini o'zgartira borib τ_r va sirtidagi o'tkazuvchanlikning sirtga qo'yilgan maydonga (kuchlanishga) bog'lanishini aniqlash mumkin. Bunday uslubiyatni qo'llash o'lchash vaqtini qisqartiradi, o'lchashlar jarayonida maydon effekti egri chizig'i o'zgarishini nazorat qilish imkonini beradi.

Maxsus uslubni qo'llab, maydon effektini bevosita ekranda kuza-tish mumkin. Agar faza aylantirgich yordamida Meni ko'prigini ishga tushiruvchi impuls vaqtini sinusoidal ko'ndalang kuchlanishga nisbatan o'zgartirilsa, τ_r ni turli kuchlanishlarda o'lchash mumkin.

5.3.2. s ni magnit konsentratsiya effektini o'lchash yordamida aniqlash

Qalinligi d diffuzion uzunlik l_d bilan taqqoslanuvchi bo'lgan yupqa namunalarda galvanomagnitik effektlar o'rganilganda sirt yaqinida zaryad tashuvchilar zichligi (konsentratsiyasi) muvozanat qiymatdan chetlanishi mumkin — bu anomal hodisadir. Agar kristallning ikki sirtida sirt rekombinatsiyasi tezliklari teng bo'lmasa ($s_1 \neq s_2$), u holda bu namunaning magnit maydonidagi solishtirma qarshiligi $\Delta\rho_n$ o'zgarishi uchun ifodada ikki had — odatdagi H^2 ga proporsional had, undan boshqa yana H ga proporsional had mavjud bo'ladi:

$$\frac{\Delta\rho_n}{\rho_0} = \alpha H^2 + 4ALHE_r \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + d/\tau}, \quad (5.25)$$

bunda ρ_0 — magnit maydon bo'lmaganda namuna solishtirma qarshiligi; A — namuna parametrlari (p , n , μ_n , μ_p) ga, temperaturaga, namuna geometriyasiga bog'liq ko'paytuvchi; E_r — namunadagi elektr maydon. Bu effektни *magnit konsentratsiya effekti* deyiladi. (5.25) ifodada ikkinchi had s ga bog'liq bo'lgani uchun bu effektdan s ni o'lchash maqsadida foydalanish mumkin. (5.25) ifoda

$$d \ll l_d = \sqrt{D\tau}; \quad d \ll \frac{D}{s} \quad (5.26)$$

shartlar bajarilganda adolatli, bunda s kattalik s_1 va s_2 lardan eng kichigi, D — diffuziya koeffitsiyenti:

$$D = \frac{kT}{e} \cdot \frac{(n+p)\mu_n\mu_p}{n\mu_n + p\mu_p}. \quad (5.27)$$

Kuchsiz H maydonda

$$\frac{\mu_n H}{e} \ll 1 \quad \text{va} \quad \Delta\rho_n \ll \rho_0. \quad (5.28)$$

Bu shartlar bajarilganda (5.25) ifoda o'zgarmas maydonda ham

$$\omega \ll \omega_{kr} = \frac{2D}{d^2} \quad (5.29)$$

chastotali o'zgaruvchan maydon uchun ham adolatli. $\omega = \omega_{kr}$ chastotalarda (5.25) dagi ikkinchi had yo'qoladi. Ikkinchi hadni o'lchash — uning E_r ga bog'liqligidir. $\Delta\rho_n \ll \rho_0$ bo'lganda namunaning qarshiligi

$$\tau_r = r_0(1 + cE_r); \quad c = 4AH \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + d/\tau}, \quad (5.30)$$

bunda r_0 namunaning $E_r=0$ bo'lgandagi magnit maydondagi qarshiligi.

Agar namunaga o'zgaruvchan $E = E_0 \sin \omega t$ elektrik maydon berilsa va uni H magnit maydonga joylashtirilsa, namunadagi E_r asosiy garmonikadan tashqari yana o'zgarmas E_c tashkil etuvchi va ikkinchi garmonikaga ega bo'ladi:

$$E_r = E_c + E_\omega \cos \omega t + E_{2\omega} \cos 2\omega t. \quad (5.31)$$

Bu ifodada E_c , $E_{2\omega}$ kattaliklar $E_\omega^2 \cdot \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2 + \frac{d}{\tau}}$ ga proporsional.

Shuning uchun bu nisbatni:

1) E va E_c ni o'lchashlardan,

2) $E_{2\omega}$ va E_ω ni ayrim-ayrim o'lchashlardan aniqlab olish mumkin.

Agar s_1 va s_2 lardan biri ma'lum bo'lsa, qaralayotgan usul ikkinchisini aniqlash imkonini beradi.

Namunaning biror tarafida sirdagi rekombinatsiya tezligi aniqlanmoqchi bo'linsa, bu usul qulay. Haqiqatan ham

$s = |s_1 - s_2| \ll s_1$ bo'lganda

$$\Delta E_{2\omega} = \frac{AHE_\omega^2}{2s_1} \Delta s = B \frac{\Delta s}{s_1}. \quad (5.32)$$

A o'zgarmas tajribada aniqlanadi.

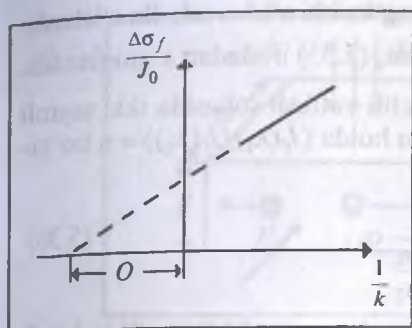
$E_{2\omega}$ va E_ω ni o'lchab, bevosita Δs aniqlanadi. Mazkur o'lchashlar usulini:

1) noasosiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (zichligi) asosiy-larnikidan uncha kichik bo'lmaganda;

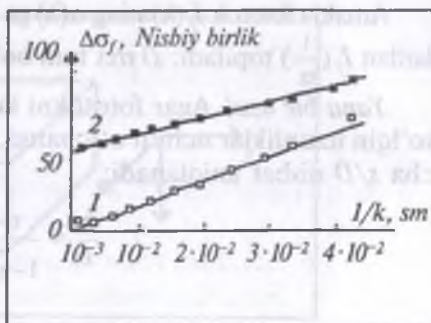
2) diffuzion siljish uzunligi yetarlicha katta bo'lganda (bu holda l_g dan qalinligi kam namuna tayyorlash mumkin) sirt rekombinatsiya tezligi s ni o'lchashda qo'llanilishi mumkin.

5.3.3. Fotoo'tkazuvchanlikning spektral bog'lanishini o'lchash orqali s ni aniqlash

Fotoo'tkazuvchanlikning spektral taqsimoti egri chizig'ining shakli, ma'lumki, kristallarning sirt xossalari bilan qattiq bog'langan. Masalan, sirt (sohalararo) yutilish sohasida yorug'lik kuchli yutilganda



5.6-rasm.



5.7-rasm.

zaryad tashuvchilar sirt yaqinidagi sohada vujudga keladi (generatsiyalanadi) va s ancha katta bo'lganda sirt sathlari orqali tez rekombinatsiyalanadi. Sirt rekombinatsiya tezligini fotoo'tkazuvchanlikning spektral bog'lanishini o'lchash natijalari asosida aniqlashning bir necha usuli mavjud. Ularning eng soddasini ko'rib chiqamiz.

Kuchli darajada yutiladigan yorug'lik uchun $\alpha l \gg 1$ va $\alpha d \gg 1$ shartlar bajarilganda $\Delta\sigma_f$ fotoo'tkazuvchanlik (yorug'lik hisobidan qo'shimcha o'tkazuvchanlik) quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{\Delta\sigma_f}{J_0} = A^* \left(1 + \frac{s}{D} \cdot \frac{1}{\alpha} \right), \quad (5.33)$$

$$A^* = \frac{\beta_1 e \lg^2 (1-r)(\mu_n + \mu_p)}{l \left(D + s \lg \operatorname{cth} \left(\frac{d}{2 \lg} \right) \right)}, \quad (5.34)$$

bunda, α va r — mos ravishda, yorug'lik yutilish va qaytarilishi koeffitsiyentlari; β_1 — kvant chiqish, D — diffuziya koeffitsiyenti, J_0 — 1 s da 1 sm^2 sirt yuziga tushayotgan fotonlar soni.

(5.33) ifodadan ko'rinishicha, bu holda $\frac{\Delta\sigma\phi}{J_0}$ ning $\frac{1}{\alpha}$ ga bog'lanishi chizig'iy funksiyadir (5.6-, 5.7-rasmlar).

Bu chiziqni $\frac{1}{\alpha}$ o'qi bilan kesishguncha ($\frac{\Delta\sigma\phi}{J_0} = 0$ bo'lguncha) davom ettirilsa, uning kesishish nuqtasida

$$\alpha = -\frac{D}{s}. \quad (5.35).$$

Amalda fototok $I_f(\lambda)$ ning $\alpha(\lambda)$ ga bog'lanishi o'lchanadi. Bu o'lchashlardan $I_f(\frac{1}{\alpha})$ topiladi. D ma'lum bo'lsa, (5.35) ifodadan s aniqlanadi.

Yana bir usul. Agar fototokni kuchli yutilish sohasida ikki tayinli to'lqin uzunliklar uchun o'lchansa, u holda $(I_f(\lambda_1)/I_f(\lambda_2)) = \eta$ bo'yi-cha s/D nisbat aniqlanadi:

$$\frac{s}{D} = \frac{\eta - 1}{1 - \eta \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \alpha_1, \quad (5.36)$$

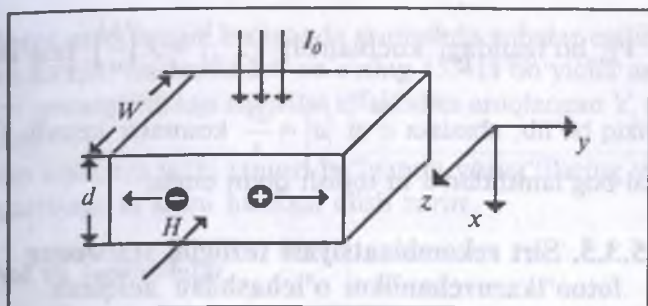
bunda α_1 va α_2 mos ravishda, λ_1 va λ_2 ga tegishli yutilish koef-fitsiyentlari. Mazkur material uchun tayinli α_1 va α_2 qiymatlar uchun $s/D = f(\eta)$ bog'lanish grafigi yasaladi. Bu holda nisbatning o'lchanishi birdaniga s/D qiymatini beradi. Bu usulni qo'llash uchun ikki tayinli to'lqin uzunlikni ajratib beruvchi filtrlar (elaklar) bo'lishi kifoya.

5.3.4. Sirt rekombinatsiyasi tezligi s ni fotomagnit effekt (Kikoin-Noskov effekti) asosida aniqlash

Yarimo'tkazgichni kuchli darajada yutiladigan yorug'lik bilan yoritganda, yoritilayotgan sirt qatlamida ortiqcha zaryad tashuvchilar paydo bo'ladi va yorug'lik tushishi yo'nalishida ularning zichliklari gradiyenti vujudga keladi. Yoritilayotgan sirtga qarama-qarshi x tomon-ga zaryad tashuvchilarning diffuzion oqimlari paydo bo'ladi. Agar yoritilayotgan bu namunani z yo'nalishidagi (ko'ndalang) magnit maydonga joylansa, Lorens kuchi ta'sirida elektronlar va kovaklar y o'qining qarama-qarshi tomonlariga og'adi va magnit diffuzion tok hosil bo'ladi. Bu esa namunaning qarama-qarshi yon yoqlarida teskari ishorali zaryadlar to'planishiga va tegishli elektr (E_y) maydon hosil bo'lishiga olib keladi. Bu esa magnit diffuzion tokka qarshi dreyf tok paydo qiladi. Statsionar holatda bu toklar bir-birini muvozanatlaydi, ammo E_y bilan bog'liq fotomagnitik EYK V_{fm} hosil bo'ladi (5.8-rasm):

$$V_{fm} = \frac{A\beta_1 I_0}{B + \beta_1 I_0}, \quad (5.37)$$

bunda, A va B — kattaliklar magnit maydoni H bo'lgan namunaning fizik va geometrik parametrlari. Bu kattalik sirdagi rekombinatsiya tezliklari bilan ifodalanadi, β_1 — kvant chiqish, I_0 — yoritilish tezligi. Yoritilish yetarlicha kuchli bo'lganda ($B \ll \beta_1 I_0$):



5.8-rasm.

$$V_{fm} = A = W \frac{\chi H}{C} \frac{D}{\lg s_1} \frac{\frac{D}{\lg} (\operatorname{ch} \frac{d}{\lg} - 1) + \operatorname{sh} \frac{d}{\lg}}{\frac{D}{\lg s_L} \operatorname{sh} \frac{d}{\lg} + \operatorname{ch} \frac{d}{\lg} - 1}. \quad (5.38)$$

Bu yerdagi manfiy belgilar oldingi bandlarda izohlangan, ammo s_0 va s_L — yoritilayotgan va yoritilmayotgan qarshi sirtga tegishli.

Yupqa namunalar ($d \ll \lg$) uchun sirt rekombinatsion sathlar va noasosiy tashuvchilar zichligi gradiyenti muhim, x yoʻnalishida diffuzion oqim, binobarin, y yoʻnalishda magnitdiffuzion tok namunaning yoritilmaydigan sirtidagi rekombinatsiya tezligi s_L orqali aniqlanadi. Yoritilayotgan sirtidagi rekombinatsiya namuna ichkarisida nomuvozanatliy tashuvchilar taqsimotiga taʼsir koʻrsatmaydi, faqat effektni biroz kamaytiradi. $\lg \gg \frac{D}{s} \gg \frac{d}{2}$ shart bajarilganda

$$V_{fm} = \omega \frac{\chi H}{C} s_L. \quad (5.39).$$

Yana boshqa usul — fotooʻtkazuvchanlik kompensirlangan fotomagnit effekt spektr taqsimotini oʻlchash orqali s ni aniqlash usuli ham mavjud. Agar namuna orqali fototok oʻtkazib, fotomagnit effekt EYK ni fotokuchlanish bilan qoplansa, yaʼni $V_{fk} = V_{fm}$ qilinsa, $\alpha d \gg 1$ va $\alpha/\lg \gg 1$ boʻlganda

$$\frac{1}{V} = \frac{B}{H} \left(1 + \frac{s}{D} \frac{1}{\alpha} \right), \quad (5.40)$$

bunda $B = B(\lg, s, d, \omega, \tau_p, \tau_n)$.

$V_{fk} = V_{fm}$ bo'lgandagi kuchlanish V . $\frac{1}{V} = f\left(\frac{1}{\alpha}\right)$ bog'lanishlar to'g'ri chiziq bo'lib, absissa o'qi $|a| = \frac{D}{s}$ kesmalar kesadi. Demak, bu spektral bog'lanishdan s ni topish qiyin emas.

5.3.5. Sirt rekombinatsiyasi tezligini statsionar fotoo'tkazuvchanlikni o'lchashdan aniqlash

Kuchli yutiladigan yorug'lik ($\alpha \rightarrow \infty$) hamda yupqa namunalar ($d \ll lg$) uchun ikkala sirtida ham rekombinatsiya tezligi bir xil ($s_0 = s_l$). Statsionar fotoo'tkazuvchanlik

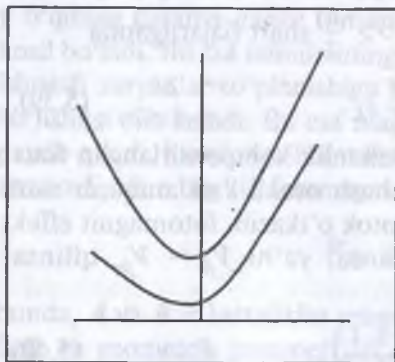
$$\Delta G = K \tau_l = K \left(\frac{1}{\tau_b} + \frac{2s}{d} \right)^{-1}, \quad (5.41)$$

bunda, $K = e(\mu_n + \mu_p)g$; g — generatsiya tezligi.

K doimiyni effektiv yashash davrini o'lchashdan ($\mu = \frac{e\tau_f}{m}$!) aniqlash mumkin. U holda ΣG ni sohalarning tayinli egilishida o'lchash s ni aniqlash imkonini beradi. $s(Y_s)$ bog'lanishni o'rganish usuli ishlab chiqilgan. Bunda bir vaqtda maydon effekti va statsionar fotoo'tkazuvchanlik (har xil kuchlanishda) o'lchanadi va yorug'likning

P-impuls-lari bilan yoritiladi, davomiyligi $t_{im} \gg \tau_f$. Sinusoidal ko'ndalang maydon chastotasi yorug'likni uzib turish chastotasiga karrali bo'lmaydi.

Maydon effekti va fotoo'tkazuvchanlik signallari qator bosqichlardan so'ng ossillografga uzatiladi. Ossillograf ekranida ikki egri chiziq kuzatiladi, biri (5.9-rasm, pastki chiziq) qorong'idagi maydon effekti-ga, ikkinchisi (yuqorigi chiziq) yoritilgandagi maydon effekti-ga tegishlidir.



5.9-rasm.

Injeksiya sathi kichik bo'lganda yoritishda sohalar egilishi o'zgarishi ham kichik, bu holda ΣG va s ning (5.41) bo'yicha aniqlangan qiymatlari qorong'ilikdagi maydon effektidan aniqlangan Y_s qiymatiga mos keladi.

Ammo injeksiya sathi yuqori bo'lganda yorug'likning sirt potentsiali o'zgarishiga ta'sirini hisobga olish zarur.

? Savol va topshiriqlar

1. Generatsiya va rekombinatsiya jarayonlarining umumiy ta'riflarini aytib bering.
2. Sirt rekombinatsiyasining qanday markazlari bor? Uning tezligi s qanday kattalik?
3. Sirtiy rekombinatsiyani o'rganish usullarini tavsiflang.
4. Sirtiy rekombinatsiya tezligi s ni impulsli usullar yordamida aniqlashni tushuntiring.
5. Fotoo'tkazuvchanlikdan foydalanib s qanday aniqlanadi?
6. Magnit konsentratsiya effektini o'lchash usulida s qanday topiladi?

VI BOB. YARIMO'TKAZGICHLAR SIRTIDAGI «TEZ» SATHLAR

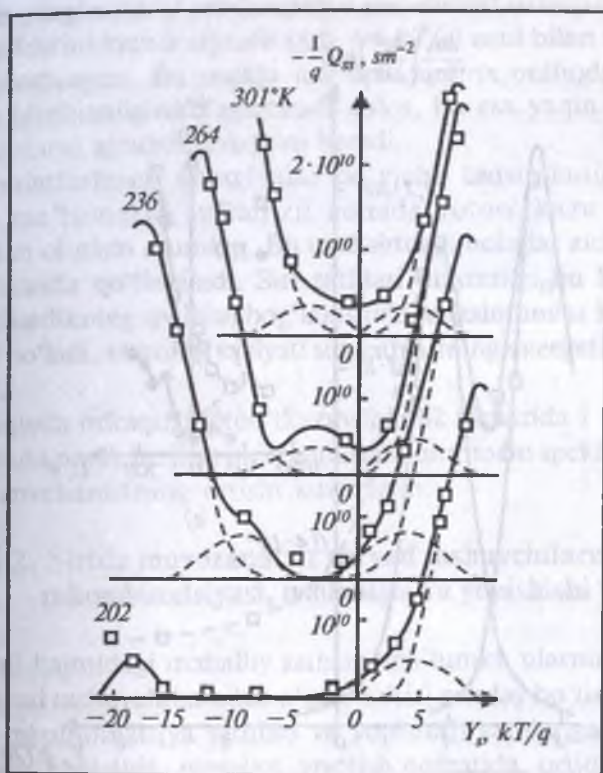
Maydon effekti kinetikasini o'rganish natijasida germaniy va kremniy sirtida farqli relaksatsiya vaqtlariga ega bo'lgan sirt sathlarining ikki tizimi mavjudligi aniqlangan. Yarimo'tkazgich—oksid chegarasida joylashgan sirtidagi sathlar hajmdagi energiya sohalari bilan yaxshi elektrik aloqada bo'ladi va ularning relaksatsiya vaqtlari kichik ($\sim 10^{-8}$ s). Bu sathlar shartli ravishda «tez» sathlar deb nomlangan. Ulardan farqli ravishda, oksid—atrof-muhit chegarasida joylashgan sirt holatlarni «sekin» sathlar deb nomlangan, chunki ularning relaksatsiya vaqti katta (10^{-3} s dan o'nlab sekund va undan ham ortiq).

Elektronlar va kovaklarni ushlab olish ko'ndalang kesimlari nisbatiga qarab «tez» sirt sathlari rekombinatsiya sathlari ham, yopishish yoki tutish sathlari ham bo'lishi mumkin. «Sekin» sathlar orqali rekombinatsiya bo'lmaydi va ular tutish sathlari bo'ladi. Ularda tutilgan zaryad katta zichlikka ega bo'lganligi tufayli sirtida sohalar egilishi kattaligini aniqlaydi.

6.1. «Tez» sathlarning energetik spektri

Yarimo'tkazgich sirti modelini to'g'ri tanlash uchun sirt sathlari energetik spektri qanday bo'lishligini bilish kerak. Agar sirt holatlari diskretligi ravshan bo'lsa, tez sathlardagi zaryadning Y_s ga bog'lanishi egri chizig'ida bir necha pog'onalar bo'lishi kerak, maydon effekti harakatchanligining Y_s ga bog'lanishida esa bir necha maksimumlar bo'lishi lozim. Agar ularning bir qismi rekombinatsiya sathlari xizmatini bajarsa, u holda $s(Y_s)$ bog'lanishda ham bir necha maksimum bo'lishi kerak (6.1-rasm).

Ammo germaniyda ham, kremniyda ham mazkur egri chiziqlar silliq shaklda bo'ladi. Ularning hech birini sirtida bir sath bor degan faraz asosida tushuntirib bo'lmaydi. Bunday holat sirt holatlari uzluksiz spektrga, diskret spektrga (holatlar yaqin joylashgan) ega bo'lganida ham o'rinli bo'ladi.



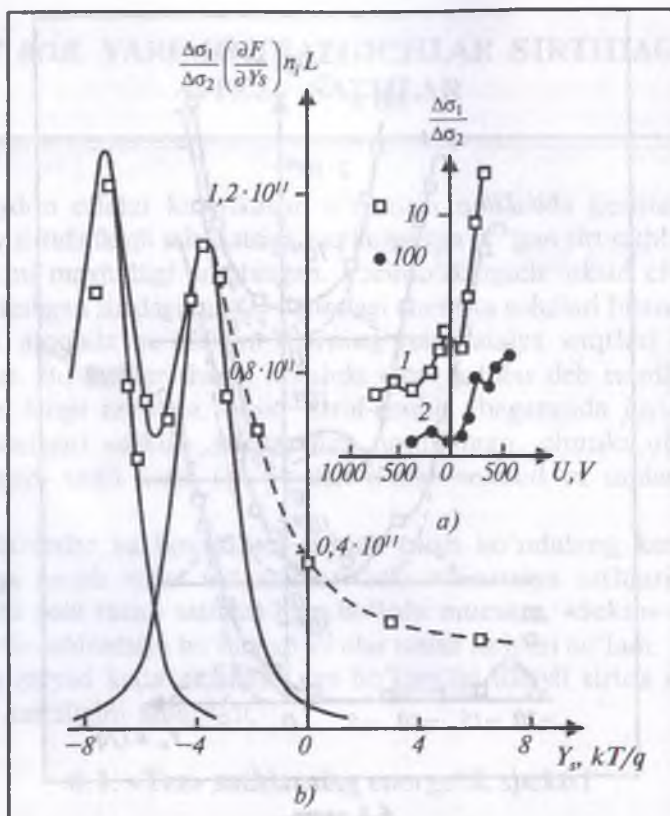
6.1-rasm.

Biroq, germaniy va kremniyning taqiqlangan sohasi o'rtasi yaqinida diskret sathlar tizimi mavjudligi tajribada tasdiqlangan. Ba'zi hollarda diskret sathlar bilan birga uzluksiz taqsimlangan sathlar ham bor deb faraz qilinadi, ular ruxsatlangan sohalar yaqinida joylashgan bo'ladi.

«Tez» sathlarning miqdoriy parametrlarini, asosan, uchta usul bilan:

- 1) statsionar maydon effektining o'lchashlaridan;
- 2) sirt rekombinatsiyasi tezligi va maydon effektini bir vaqtda o'lchashlaridan;
- 3) maydon effektining kinetikasi va chastotaviy bog'lanishini o'rganish aniqlangan.

«Tez» sirt sathlarining turli temperaturadagi parametrlari $\partial Q_s / \partial Y_s$ hosila orqali ifodalanadigan maydon effekti harakatchanligini



6.2-rasm.

o'lchashdan topiladi. Agar sathlar diskret bo'lsa, $\frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s}$ ning ψ_s ga bog'lanishi bir qator cho'qqilarga ega bo'ladi. 6.1 va 6.2-rasmlarda turli temperaturalarda bu bog'lanish tasvirlangan. Xona temperaturasida taqiqlangan soha o'rtasi yaqinida ikki sath yetarlicha aniq ko'rinadi, ularning zichligi $\sim 10^{-10} \text{ sm}^{-2}$. Temperatura pasaysa, ruxsatlangan sohalarga yaqin joylashgan va kattaroq zichlikka ega bo'lgan ($\sim (1-2,5)10^{11} \text{ cm}^{-2}$) yana ikki sath ko'rinadi. Past temperaturada (masalan, $\sim 202 \text{ K}$ da) taqiqlangan soha o'rtasidagi sathlar yo'q yoki zichligi juda kam, shuning uchun ham ular maydon effekti o'lchashlarida namoyon bo'lmaydi.

Kremniydagi sirdagi sathlar spektrining diskret (uzuq) bo'lishligini maydon effektini kichik signalli ($\Delta\Phi, \ll kT/e$) usul bilan o'lchashlar asosida isbotlangan. Bu usulda maydon torgina oraliqdagi sirdagi sathlar to'ldirilganligini o'zgartiradi xolos, bu esa yaqin joylashgan diskret sathlarni ajratish imkonini beradi.

Sirt holatlarining energiyalar bo'yicha taqsimlanishi haqida bevosita ma'lumotni infraqizil sohada fotoo'tkazuvchanlikni o'lchashdan olinishi mumkin. Bu usul sirdagi holatlar zichligi ancha katta bo'lganda qo'llaniladi. Sirt sathlari diskretligi bu holda fotoo'tkazuvchanlikning spektral bog'lanishida maksimumlar ko'rinishida namoyon bo'ladi, ularning vaziyati sirt sathlarining energetik vaziyatini aniqlaydi.

Kremniyda infraqizil fotoo'tkazuvchanlik spektrida 1 dan 4 mkm gacha sohada nozik tuzilish aniqlanmagan, ammo bu spektral oraliqda fotoo'tkazuvchanlikning ortishi kuzatilgan.

6.2. Sirt muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasi, ushlanishi va yopishishi

Kristall hajmidagi mahalliy sathlar, ma'lumki, ularning muvozanatsiz zaryad tashuvchilar bilan o'zaro ta'siri qanday bo'lishiga bog'liq ravishda rekombinatsiya sathlari va yopishish sathlariga ajratib qaraladi. Agar kristallda, masalan, yoritish oqibatida, ortiqcha tashuvchilarning muvozanatsiz zichligi paydo qilingan bo'lsa, bu holda yoritish to'xtatilganda zichlik muvozanat qiymatiga qaytishi (relaksatsiya) yuz beradi. Bir ishorali (masalan, elektronlar) tashuvchilar kirishmaviy markazga to'planadi. Ma'lum vaqt o'tgach kirishmaviy sath to'plangan elektronlarni sohaga qaytarib issiqlik (issiqlik harakati hisobiga) berishi yoki muvozanatsiz kovakni ushlab olishi mumkin. Agar kovakni ushlab olish ehtimolligidan elektronni sohaga qaytarib berish ehtimolligi katta bo'lsa, mazkur sath *yopishish sathi* deyiladi. Aks holda, agar sathning elektron va kovakni ushlab olish ehtimolligi sohaga qaytarib berish ehtimolligidan katta bo'lsa, bunday sathni *rekombinatsiya sathi* deyiladi.

Elektronni ushlab olgan qandaydir A sath uchun kovakni ushlab olish ehtimolligini sohaga qaytarib berish (issiqlik energiyasi hisobiga sohaga o'tkazish) ehtimolligiga nisbati

$$K_n = \frac{\gamma_n \gamma_p}{\gamma_n N_c \exp(-E_a / kT)}, \quad (6.1)$$

bunda p — kovaklar zichligi, E_a — sathning energetik vaziyati.

Kovakni ushlab turgan sath uchun

$$K_p = \frac{\gamma_p n}{\gamma_p N_v \exp(-(E_g - E_a) / kT)}, \quad (6.2)$$

bunda E_g — taqiqlangan soha kengligi.

Agar $K_p \ll 1$ bo'lsa, A sath yopishish sathi bo'ladi, agar $K_p \gg 1$ bo'lsa, u tez rekombinatsiya sathi bo'ladi va $K_p \sim 1$ bo'lsa, sekin rekombinatsiya sathi bo'ladi. (6.1) va (6.2) ifodalardan ko'rinib turganidek, sathning qanday bo'lishi temperaturaga, noasosiy zaryad tashuvchilar zichligi va boshqa omillarga ham bog'liq bo'ladi.

Yupqa namunalar fotoo'tkazuvchanligi, maydon effektini o'rganishdan ma'lumki, mazkur effektlarning tez relaksatsiyasi sirt rekombinatsiya jarayonlari bilan ham, sirt tutish jarayonlari bilan ham bog'liq. Mazkur sathning yopishish markazi bo'lishi sharti quyidagicha ifodalanadi:

$$K_{ns} = \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \exp(E_i - E_f + Y_s) \ll 1, \quad (6.3)$$

bu joyda E_f — fermi sathi energiyasi: E_f va E_i taqiqlangan sohaning o'rtasidan hisob qilinadi.

«Tez» sirt sathlar parametrlari temperaturaga bog'liq. Masalan, germaniyda o'tkazilgan maydon effekti o'lchashlariga asosan xona temperaturasida to'rtta «tez» sirt sathlarning hammasi rekombinatsion markazlar bo'ladi. Temperatura pasaygan sari sathlarning rekombinatsion xossalari susayib, yopishish ehtimolligi ortib boradi. Temperatura ~250 K gacha pasaytirilganda taqiqlangan sohaning yuqorigi yarmisida sathlar yopishishi sathlari bo'la boshlaydi. Yana ham past temperatura T da qolgan 2 ta sath ham yopishish sathlari bo'lib oladi.

Kremniyning yupqa namunalarida kichik signalli maydon effekti va fotoo'tkazuvchanlik relaksatsiyasi ko'rinishi Y_s ga bog'liq. Boyitilgan yoki kuchsiz siyraklashtirilgan qatlamlar uchun sirt rekombinatsiyasi aniqlaydigan tez relaksatsiya jarayoni kuzatiladi. Sirtida inversion qatlam bo'lgani uchun relaksatsiya sekin boradi, bu esa sirtida yopishish borligini ko'rsatadi.

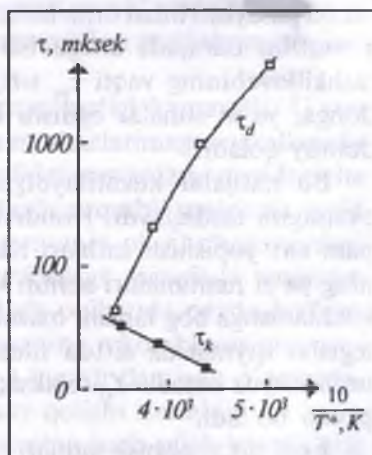
6.3. Sirtagi yopishish sathlari

Kremniyning yupqa namunalarida xona temperaturasida fotoo'tkazuvchanlik ikki — qisqa vaqtli va uzoq vaqtli tashkil etuvchilardan iborat. Tashkil etuvchilarni tavsiflovchi xususiy vaqtning temperaturaga bog'lanishi turlicha: uzoq vaqtli tashkillovchining vaqti doimiysi τ_{uz} temperatura kamaygan sari ortib boradi, qisqa vaqtlisiniki τ_q pasayadi. $\tau\left(\frac{1}{T}\right)$ bog'lanishning ortishi yopishish jarayonlariga xos, pasayuvchi $\tau\left(\frac{1}{T}\right)$ bog'lanish esa rekombinatsion jarayonlarga xosdir.

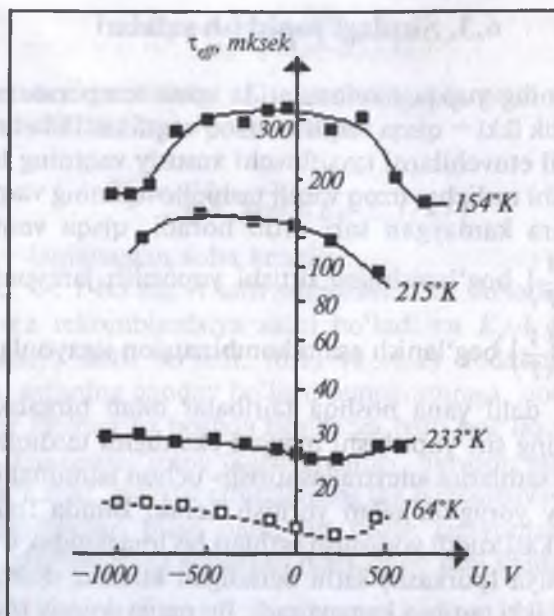
Bu tajribaviy dalil yana boshqa tajribalar bilan birgalikda zaryad tashuvchilarning sirt yopishishi mavjud ekanligini tasdiqladi.

Yopishish sathlarini «neytrallashtirish» uchun namunani yetarlicha kuchli doimiy yorug'lik bilan yoritish kerak. Bunda fotoo'tkazuvchanlik kinetikasi xuddi yopishish sathlari bo'lmaganidek o'tib boradi. ~ 0,5% injeksiya (purkash) sathi beradigan kuchsiz doimiy yoritish xususiy vaqttni ikki tartibga kamaytiradi. Bu natija doimiy (qo'shimcha) yoritish holida relaksatsiya rekombinatsion tabiatga ega, degan xulosa-ga olib keladi.

Namunada elektron-kovak juftlarni tortib chiqaruvchi bo'y-lama elektr maydonning fotoo'tkazuvchanlik tashkillovchilariga ta'sirini o'rganish ham sirtagi yopishish hodisasi mavjudligini tasdiqlaydi. Maydonni paydo qilish (kuchlanish berish) rekombinatsiya bilan, ya'ni namunada elektron-kovak juftlari borligi bilan bog'liq qisqa vaqtli relaksatsiyani muhim darajada tezlashtiradi. Maydon τ_{uz} ni o'zgartirmaydi, bu yopishish effekti uchun tabiiydir, chunki yorug'lik paydo qilgan zaryad tashuvchilar yopishish markazlari tutib olgani yaqinida mahalliy-lashgan va ularni maydon kristalidan chiqara olmaydi.



6.3-rasm.



6.4-rasm.

Sirt sathlarida zaryad tashuvchilarning yopishishi effektini n -tur yarimo'tkazgichda kuzatish oson. Relaksatsiya vaqti τ ning T temperatura pasayishi bilan ortib borishi faqat yupqa namunalarda kuzatiladi. τ muhim darajada sirtga ishlov berilishiga bog'liq. Uzoq vaqtli tashkillovchining vaqti τ_{uz} sirtga qo'yilgan tashqi ko'ndalang maydonga, ya'ni sohalar egilishi kattaligiga bog'liq, ammo τ_{uq} amalda doimiy qoladi.

Bu natijalar kuzatilayotgan yopishish effektlari sirtga tegishli ekanligini tasdiqlaydi. Kondensator foto EYK i Y_{kf} ni o'lchashlarda ham sirt yopishish sathlari namoyon bo'ladi. Aniqlanishicha, n -Si ning ba'zi namunalari uchun kondensator foto EYK ining qo'yilgan kuchlanishga bog'lanishi maksimumga ega, ya'ni sohalar egilishining tegishli qiymatida sirtga musbat zaryad to'planadi, kovaklarning tutilishi yuz beradi. Y_{kf} relaksatsiyasida uzoq vaqtli (τ_{uz}) tashkillovchi paydo bo'ladi.

Endi sirt yopishish sathlari zichligini baholaymiz. Uni bu markazlar to'yinib oladigan injeksiya sathi kattaligi bo'yicha amalga oshiriladi.

Olingan $N_{\text{yon}}^s \sim 7 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-2}$ qiymatlar maydon effekti o'lchashlaridan topilgan qiymatlarga yaqin, ammo hajmiy yopishish sathlari zichligidan ($N_{\text{yon}}^b \sim 10^{12} - 10^{14} \text{ sm}^{-2}$) ancha kam. Katta signallar (kuchlanishlar)da olib borilgan o'lchashlarda sirtidagi yopishish sathlari to'la to'yingan va namoyon bo'lmaydi. Kichik signallar bilan o'lchashlar olib borilganda sirt yopishishni e'tiborga olish zarur. Kremniy uchun zaryad tashuvchilarning sirtida yopishishi xona temperaturasida mavjud bo'ladi.

6.4. «Tez» sirtidagi sathlarning tabiati

«Tez» sirtidagi sathlar parametrlarining temperaturaga, yoritishga bog'liq ravishda o'zgarishi o'rganilgan, sirt tabiiy qariganida, vakuumda va gaz muhitida yuqori temperaturada qizdirilganda sathlar tizimi o'zgarishi o'rganilgan, molekulalarni adsorblashning rekombinatsion xossalarga ta'siri tekshirilgan. Bu sohada hali o'rganiladigan ko'p muammolar mavjud.

Germaniy dastlab yaxshi o'rganilgan yarimo'tkazgich. Germaniyni sirtidagi rekombinatsion markazlar germaniy-oksidi chegarasida adsorblangan kislorod bilan bog'liq degan farazni atomar toza sirt xossalari tadqiqlashlar tasdiqladi. Namunalarni vakuumda $T \sim 500^\circ \text{C}$ bo'lganda qizdirish oqibatida paydo bo'lgan rekombinatsion markazlar eng katta zichligi 10^{12} sm^{-2} bo'lib, u sirtidagi atomlar zichligi (10^{15} sm^{-2}) dan ancha kichik. Bu ma'lumot asosida rekombinatsion markazlar vazifasini germaniy-oksidi chegarasidagi tuzilish nuqsonlari bajaradi, degan xulosaga kelish mumkin.

Suvni adsorblashda sirt rekombinatsiya tezligi kamayadi. U suv molekulalari tomonidan rekombinatsion markazlarining neytrallanishi oqibati deb talqin qilinadi. Neytrallash effekti mexanizmi quyidagicha tasavvur qilinadi. Suv molekulasini yoki boshqa qutbli molekula (yoki ion) sirtidagi rekombinatsion markaz (germaniy-oksidi chegarasidagi nuqson) yaqinida panjara doimiysi tartibidagi masofada mahkam joylashadi. Molekular yoki ion adsorblash oqibatida paydo bo'lgan mahalliy maydon ta'siri natijasida markazning rekombinatsion parametrlari (uning energetik vaziyati γ_n , γ_p) kuchli darajada o'zgarishi, xususan, markaz rekombinatsion bo'lmay qolishi mumkin.

Suvni efir bilan almashtirilsa, markazning tutib olish ko'ndalang kesimi o'zgarishi kuzatiladi. Germaniy sirtiga xos effektlar kremniy

ustida bajarilgan tadqiqotlarda namoyon bo'lmaydi, chunki germaniy va kremniyning sirti har xil yedirish va oksidlash tezliklariga, shuningdek, turli adsorbsion-desorbsion xossalarga ega.

«Tez» sathlar kremniyda ham, germaniyda ham yarimo'tkazgich-oksidi chegarasidagi tuzilish nuqsonlari bilan bog'liq. Bu sathlarning zichligi germaniydagiga nisbatan kremniyda bir necha marta katta ekan. Kremniy sirtiga barqarorlik xos: suv yoki kislorod adsorblanganda (sirtga yutilganda) mustahkam Si-O bog'lanishlar vujudga keladi. Shakllangan oksid pardasi mustahkam va kimyoviy barqaror. Atmosferani yana o'zgartirish «tez» sirt sathlar tizimiga ta'sir qilmaydi. Namunalarni vakuumda qizdirish sirtidagi sathlar zichligini qaytmas ravishda kamaytiradi, sirtidagi rekombinatsiya tezligini ancha kamaytiradi.

«Kuydirish» ishlovi kremniydagi sirt yopishish sathlariga ta'sir ko'rsatadi, ularning shakllanishida sirtga yutilgan (adsorblangan) suv molekullari muhim o'rin tutadi. Nam gely atmosferasida ($T \sim 250-400^\circ \text{C}$) kuydirilganda (qizdirilganda) yopishish sathlari zichligi ortadi. Ammo sirtni «suvsizlantiruvchi» kuydirishda (masalan, vakuumda) sirtidagi yopishish sathlari ancha kamayib ketadi. Bu natija kremniy sirtida yopishish sirti paydo bo'lishida xemosorbsion o'zgarishlar borligidan darak beradi.

? Savol va topshiriqlar

1. Yarimo'tkazgichlar sirtidagi «tez» sathlarning asosiy xossalari va tabiati nimadani iborat?
2. Sirtida zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasi qanday tarzda kechadi?
3. Sirtida zaryad tashuvchilar tutilishi hodisasini tavsiflang.
4. Sirtidagi yopishish sathlarining asosiy belgisini aytib bering.
5. «Tez» sathlarning yarimo'tkazgichda kechadigan jarayonlarga ta'siri qanday?
6. «Tez» sathlar hosil qilishda qanday omillar muhim ahamiyatga ega?

VII BOB. «SEKIN» SIRTDAGI SATHLAR

Yarimo'tkazgich — gaz sirtida «sekin» sathlar deb atalgan sirt sathlari tizimi mavjud. Ularning vaqtiy doimiysi 10^{-5} s dan to minut, hatto soatlargacha qiymatlarga ega bo'ladi. «Sekin» sathlarining «tez» sathlardan farqi shundaki, «sekin» sathlarning relaksatsiya vaqti katta, chunki ular bilan sohalar orasida zaryad tashuvchilar almashinuvi qiyinlashgan, ammo «sekin» sathlar zichligi ancha katta (10^{11} – 10^{13} sm^{-2}) va u sirt to'siq balandligini «sekin» sathlar to'ldirganligi asosida aniqlanadi.

7.1. «Sekin» sirt sathlarining energetik spektri

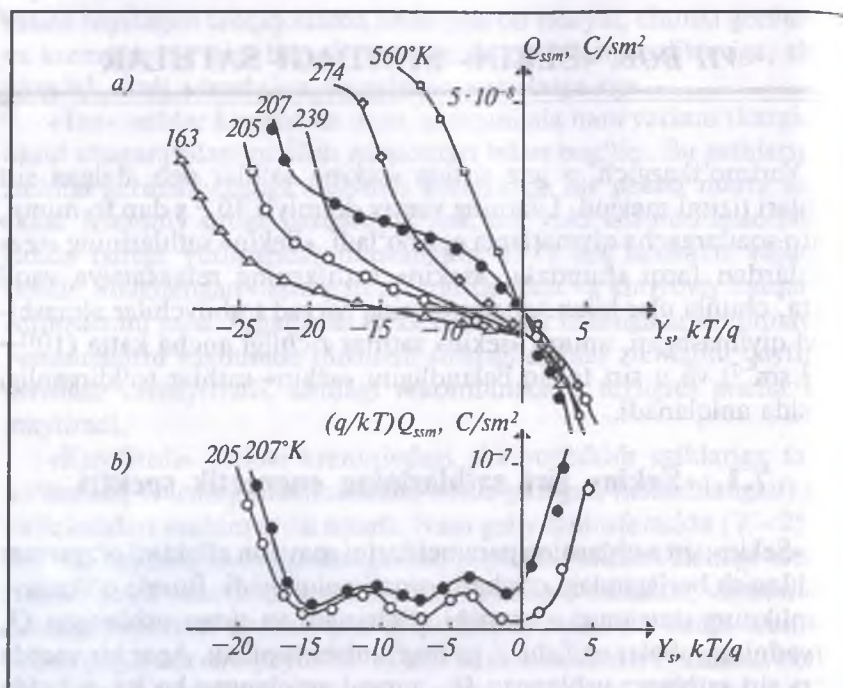
«Sekin» sirt sathlarning parametrlarini maydon effektini o'zgarmas kuchlanish berilgandagi o'lchash orqali aniqlanadi. Bunda o'tkazuvchanlikning statsionar o'zgarishi o'lchanadi va sirtga ushlangan Q_{ss} zaryadning sohalar egilishi Y_s ga bog'lanishi topiladi. Agar bir vaqtda «tez» sirt sathlarga ushlangan $Q_{ss,1}$ zaryad aniqlangan bo'lsa, u holda «sekin» sathlarga zaryad $Q_{ss,2} = Q_{ss} - Q_{ss,1}$ bo'ladi.

Shunday o'lchashlar germaniy, kremniy va ayrim boshqa yarim-o'tkazgichlarda «sekin» sirt sathlar spektri diskret sathlar tizimidan iborat ekanligini tasdiqlaydi. Bu diskretlik past temperaturalarda ravshanroq namoyon bo'ladi (7.1-rasm).

Kremniy sathini 3 ta «sekin» sath orqali tavsiflash mumkin. Ularning parametrlari vakuumda yetarlicha katta maydonlar hosil qilinda ham deyarli o'zgarmaydi. «Sekin» sirt sathlar zaryad tashuvchilarni tutuvchi markazlar xizmatini bajaradi va sirt rekombinatsiyada qatnashmaydi.

7.2. Sirtida yuz beradigan sekin relaksatsion hodisalarni tajribada o'rganish

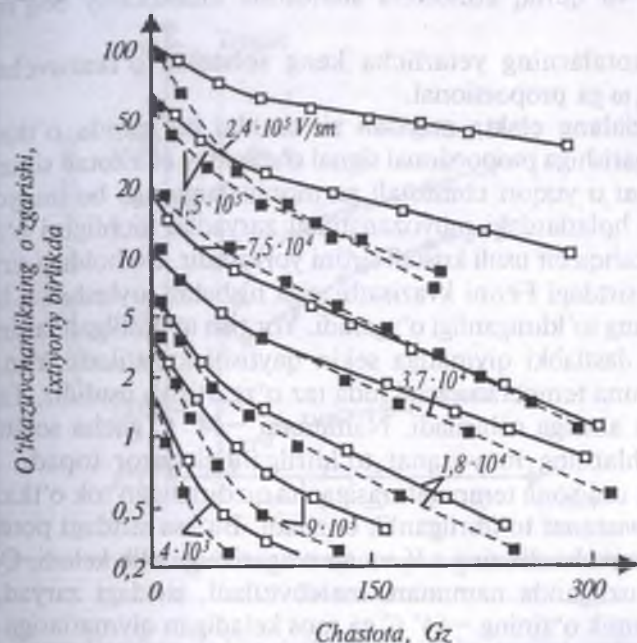
To'ldirilgan sirtidagi muvozanat holatlar Fermi sathi bo'yicha aniqlanadi. U esa temperaturaga bog'liq. Albatta, qaysi bir ta'sir oqibatida tizim muvozanatdan chiqarilsa, «sekin» sathlar to'ldiril-



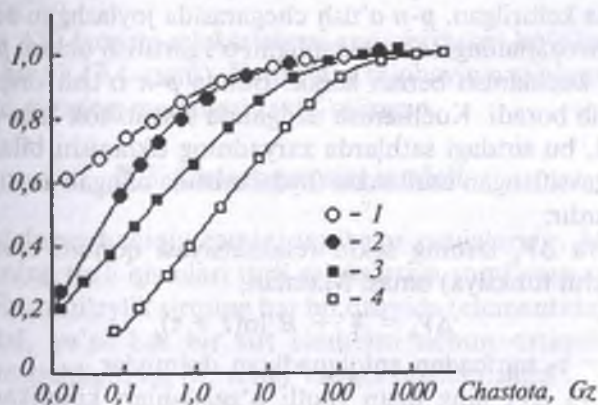
7.1-rasm.

ganligi o'zgaradi. Tashqi ta'sir yo'qolganda bu sathlarda muvozanatdagi zaryad o'rnashib boradi. Mazkur kinetikani o'rganish yarim-o'tkazgich sirtining energetik spektri haqida bir qator muhim ma'lumotlar beradi. Sirdagi sathlar nomuvozanatni to'ldirilganligini paydo qilishning bir necha usullari bor. Eng tarqalgan usul maydon effekti usulidir. Germaniy o'tkazuvchanligining o'zgarmas ko'ndalang elektr maydon paydo qilingan va yo'q qilingandagi o'zgarishi «sekin» relaksatsiyasi o'rganilgan (7.2-rasm). Qiyosan past chastotalar sohasida maydon effektining chastotaga bog'lanishi olinganda (7.3-rasm) maydon effektning kuchli darajada pasayishi zaryad tashuvchilarning «sekin» holatlarga tutilishi bilan bog'liq ekanligi ko'rinadi.

Chastota ortganda kamroq tashuvchilar «sekin» sathlarga tutiladi. $\omega > 100$ Gs bo'lganda bu sathlar ishlamaydi, chunki ular bilan soha orasida zaryad tashuvchilar almashinuvi yuz berib ulgurmaydi, chastota yana ham ortganda signal o'zgarmasdan qoladi. Muhim natijalar:



7.2-rasm.



7.3-rasm.

1. Nam va quruq atmosfera sharoitida chastotaviy bog'lanish turlicha.

2. Chastotalarning yetarlicha keng sohasida o'tkazuvchanlik o'zgarishi $I_g \omega$ ga proporsional.

3. Ko'ndalang elektr maydon sinusoidal bo'lganda o'tkazuvchanlik o'zgarishiga proporsional signal o'shanday chastotali sinusoida bo'ladi, ya'ni u yuqori chastotali garmonikalarga ega bo'lmaydi.

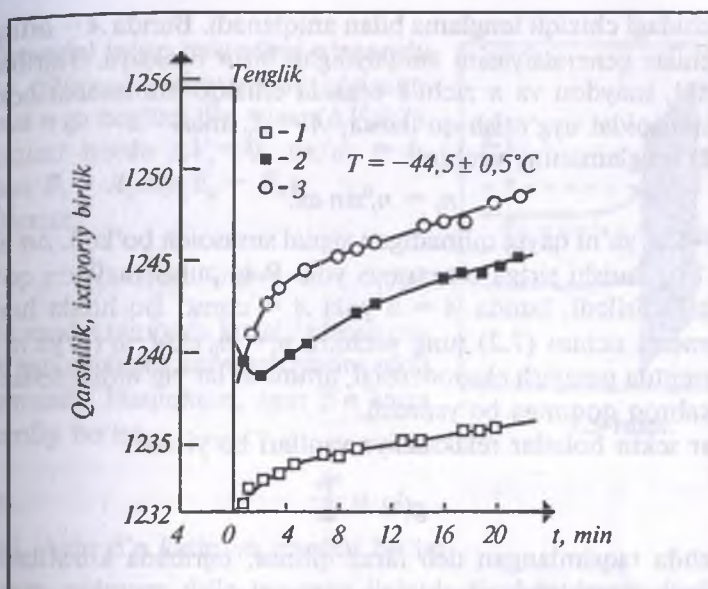
«Sekin» holatlardagi muvozanatdagi zaryadlar zichligini o'zgartirishning boshqa bir usuli kristall sirtini yoritishdir. Bu holdagi sirdagi sathlarning sirdagi Fermi kvazisathlariga nisbatan joylashishi, binobarin, ularning to'ldirilganligi o'zgaradi. Yoritish to'xtatilganda sirdagi zaryadning dastlabki qiymatiga sekin qaytishi kuzatiladi. Yana bir usul — namuna temperaturasini juda tez o'zgartirish usulidir. Tajriba quyidagicha amalga oshiriladi. Namunani -44°C gacha sovitiladi, «sekin» sathlarning muvozanat to'ldirilganligi qaror topadi. Agar namunadan uni xona temperaturasigacha qizdiradigan tok o'tkazilsa, u holda muvozanat to'ldirilganlik buziladi. Bu esa sirdagi potensial va sirt o'tkazuvchanlikning ΔV_k va $\Delta \sigma$ o'zgarishiga olib keladi. Qizdiruvchi tok uzilganda namunani tez sovitiladi, sirdagi zaryad, sirt o'tkazuvchanlik o'zining -44°C ga mos keladigan qiymatlariga qaytadi. Bu usuldan past temperaturalarda foydalaniladi. Sirt sathlari muvozanat to'ldirilganligi o'zgarishini yuzaga keltiradigan uchala usuldan foydalanilganda $\Delta \sigma$ va ΔV_k ning relaksatsiyasi egri chiziqlari bir xil bo'lar ekan. $\Delta \sigma$ ning uchala usuldagi relaksatsiyasi egri chiziqlari 7.4-rasmda keltirilgan. p - n o'tish chegarasida joylashgan sekin sathlarning muvozanatdagi to'ldirilganligini o'zgartirish uchun p - n o'tishga teskari kuchlanish berish kerak. Bunda p - n o'tish orqali teskari tok o'zgarib boradi. Kuchlanish uzilganda teskari tok asta-sekin so'nib boradi, bu sirdagi sathlarda zaryadning tiklanishi bilan bog'liq. Yuqorida tavsiflangan usullardan foydalanishda olingan asosiy natijalar quyidagilardir:

1. $\Delta \sigma$ va ΔV_k larning sekin relaksatsiyasi qonuni eksponensial (ko'rsatkichli funksiya) emas. Masalan,

$$\Delta V_k = A' + B' \ln(t + \tau), \quad (7.1)$$

A' va $B' - \tau$ tajribadan aniqlanadigan doimiylar.

2. $\Delta \sigma$ va ΔV_k ning uzun vaqtli o'zgarishlari kinetikasi temperaturaga kuchli darajada bog'liq. Temperatura kamayishi bilan ularning pasayishi keskin sekinlashadi.



7.4-rasm.

3. Zaryadlarning sekin sathlarga o'tishi tezligi zaryad tashuvchilarning muvozanatsiz zichligiga proporsional, ya'ni maydon ortishi yoki yoritish tezligi ko'payishi bilan mazkur tezlik ham ortadi.

4. $\Delta\sigma$ va ΔV_k pasayishi kinetikasi kuchli darajada atrof atmosferasiga bog'liq.

5. $\Delta\sigma$ va ΔV_k larning relaksatsiyasi egri chiziqlari ko'rilgan uchala holda ham bir xil (7.4-rasm). Keltirilgan tajribaviy natijalarni tushuntirish uchun sirtning modellari taklif qilingan.

7.3. Geterogen sirt modeli

Bu modelning haqiqiy zamini tajribalar natijalaridir. Modelning asosida sirtning turli qismlari turli relaksatsiya vaqtlariga ega, degan faraz bor. Faraz qilaylik sirtning har bir qismida (elementida) pasayish eksponensial, ya'ni har bir sirt elementi uchun ortiqcha zaryad tashuvchilar zichligining (n_i ning) vaqtga bog'lanishini

$$\frac{dn_i}{dt} + \frac{1}{\tau_i} n_i = A \quad (7.2)$$

ko'rinishidagi chiziqli tenglama bilan aniqlanadi. Bunda A – ortiqcha tashuvchilar generatsiyasini aniqlaydigan biror funksiya. Tajribadan ma'lumki, maydon va n zichlik orasida chiziqli munosabat bor. U holda sinusoidal uyg'otish qo'llansa, $A = A_0 \sin \omega t$.

(7.2) tenglamaning yechimi:

$$n_i = n_i^0 \sin \omega t. \quad (7.3)$$

$\Delta \sigma \sim \Sigma n_i$, ya'ni qayta qilinadigan signal sinusoida bo'ladi. $\Delta \sigma$ ning vaqtga bog'lanishi sirtga o'zgarimas yoki P-impulsli maydon qo'yilganda tekshiriladi, bunda $A = 0$ yoki $A = \text{const}$. Bu holda har bir sirt elementi uchun (7.2) ning yechimi $n_i = n_0 \exp(-t/\tau)$, ya'ni har bir elementda pasayish eksponensial, ammo n_i lar yig'indisi $\Delta \sigma$ uchun murakkabroq qonunga bo'ysunadi.

Agar sekin holatlar relaksatsiya vaqtlari bo'yicha

$$g(\tau) = \frac{1}{\tau} \quad (7.4)$$

ko'rinishda taqsimlangan deb faraz qilinsa, tajribada kuzatiladigan (logarifmik masshtabdagi) chiziqli qonunni olish mumkin. $g(\tau)$ -relaksatsiya vaqti τ bo'lgan holatlarning sirt zichligi. Ge uchun $\tau = 0,02 \div 20$ s. τ ning kristall sirti bo'ylab o'zgarib borishini oksid qatlami qalinligi bir tekis emasligini ko'rsatadi.

7.4. Elektronlar o'tishlari modeli

Bu model «katta signal» holidagi, ya'ni «sekin» sirt sathlaridagi zaryadning o'zgarishi, binobarin, sirt potentsiali o'zgarish yetarlicha katta bo'lgandagi tajriba natijalarini tushuntirish uchun taklif qilingan. Zaryad tashuvchilarning sohadan «sekin» sathlarga o'tish tezligini sirt yaqinida potentsial to'siq balandligi aniqlaydi, deb faraz qilinadi. O'z navbatida, bu balandlik oldin «sekin» sathlarga o'tib olgan zaryad tashuvchilar soniga bog'liq. Bu modelni 7.5-rasmdagi sohalar chizmasi yordamida tushuntirish mumkin. Ushbu masalani sodda tushunish uchun sirt sath bilan o'zkazuvchanlik sohasi orasida elektronlar almashinuvi yuz beradi deb faraz qilamiz. Tashqi maydon potentsial to'siqni ΔY_s ga o'zgartirsin, sohadagi ortiqcha tashuvchilar soni: a) «sekin» sathdan sohaga o'tishlar teskari o'tishlar ($\sim \exp(\Delta Y_s/kT)$) orqali aniqladi:

$$\frac{dn}{dt} = B_1 \exp[-(E_s - E_t)] - A_1 \exp(Y_s/kT). \quad (7.5)$$

Potensial to'siq balandligi o'zgarishi paydo qilingan tashuvchilar konsentratsiyasi n ga bog'liq: $\beta'n = \exp(\Delta V_s/kT)$. Statsionar holda $\Delta V_s = 0$, $dn/dt = 0$, bundan $B_1 = A_1 \exp(E_s - E_F)$.

Demak,

$$\frac{dn}{dt} = A_1(1 - e^{\beta'n}). \quad (7.6)$$

Bu model tajribada kuzatiladigan pasayish egri chiziqlar asimmetriyasini oson tushuntiradi. Haqiqatan, agar $\beta'n$ katta va manfiy bo'lsa,

$$\frac{dn}{dt} = A_1 \quad (7.7)$$

bo'ladi. Agar $\beta'n$ katta va musbat bo'lsa,

$$\frac{dn}{dt} = -A_1 \exp(\beta'n) \quad (7.8)$$

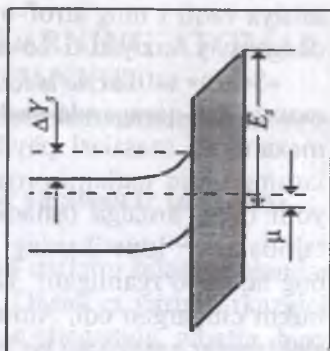
bo'ladi, ya'ni maydon hosil qiladigan zaryadlar ishorasi turlicha bo'lganda pasayish tezligi muhim ahamiyatga ega bo'ladi. Chunki u elektronlar o'tishi modeli kuzatiladigan $\Delta\sigma \sim \ln(1 + \tau)$ turidagi bog'lanishni ham tushuntira oladi.

Shuni ta'kidlash kerakki, ko'rib chiqilgan ikkala model ham bir-birini to'ldiradi. Bundan, ikkala modelni birlashtirish kuzatilgan ko'pchilik hodisalarni to'liq tushunishga yordam beradi, degan mulohaza kelib chiqishi tabiiy.

7.5. «Sekin» sirtidagi sathlar tabiati

Ma'lumki, germaniy va kremniy yarimo'tkazgichlarida «sekin» sirtidagi sathlarning mavjud bo'lishligi sirtida oksid qatlamining borligi bilan bog'langan.

Kuzatilgan hodisalar oksidning tashqi sirtida joylashgan sathlar «sekin» relaksatsion jarayonlarda hal qiluvchi vazifani o'tashligini tasdiqlaydi. Masalan, «sekin» sathlar relaksatsiyasi vaqti oksid qalinligi oshgan sayin ortib boradi. Agar oksid ichida joylashgan sathlar muhim ahamiyatga ega bo'lganda yuqoridagi hodisa kuzatilmay edi. Relak-



7.5-rasm.

satsiya vaqti τ ning atrof-muhitga bog'liqligi ham «sekin» sathlarning chegaraviy vaziyatini ko'rsatadi.

«Sekin» sathlar va sohalar orasida zaryad tashuvchilar almashinuvi masalasini qaraganda tashuvchilarning oksid qatlami orqali o'tish mexanizmi masalasi paydo bo'ladi. Faraz qilinishicha, tashuvchilarning oksid qatlami orqali o'tishi potensial to'siqdan tunnel effekt yo'li bilan amalga oshadi. Bu muammoni yechishda hal qiluvchi tajribalar — kinetikaning temperatura va oksid pardasi qalinligiga bog'liqligi o'rganilgan. Tajribalar, asosan, tunnel effekt foydasiga hukm chiqargan edi. Ammo ba'zi tadqiqotlar to'siq orqali (ustidan) elektronlar emissiyasi bo'lishi ham mumkinligini ko'rsatadi. Demak, mazkur ikkala mexanizmni e'tiborga olish zarur.

? Savol va topshiriqlar

1. «Sekin» sathlarning asosiy belgisi qanday?
2. «Sekin» sathlarning energiya holatlari tizimini aytib bering.
3. Geterogen sirt modeli yordamida «sekin» sathlarni tushuntiring.
4. Elektronlar o'tishi modeli qanday kerakli natijalar beradi?
5. «Sekin» sathlar qanday paydo bo'ladi?

VIII BOB. YARIMO'TKAZGICHLARNING ATOMAR TOZA SIRTINI O'RGANISH

8.1. Yarimo'tkazgichlarning haqiqiy va atomar toza sirti

Yarimo'tkazgichning haqiqiy sirti oksid qatlami bilan qoplangan va ko'p tuzilish nuqsonlariga ega bo'ladi. Oksid va yarimo'tkazgich chegarasida hamda atrofdagi atmosfera bilan chegarada, albatta, biror miqdorda adsorblangan chet kirishmalar joylashgan bo'ladi. Dastlab, shunday moddalar bilan ishlashga to'g'ri kelgan. Ammo, keyinroq kristallarni tozalash usullari ishlab chiqilgach yarimo'tkazgichlarning toza sirtini o'rganish imkoniyati paydo bo'ldi. Bunday sirtlarni o'rganish muhim ahamiyatga ega. Sababi:

1. Bunday tadqiqotlar Tamm sathlari mavjudligini tajribada isbotlash imkonini beradi.

2. Tamm sathlari toza sirtida ko'pligi sababli sohaviy sirt o'tkazuvchanlik mavjud bo'lishligini tekshirish mumkin bo'ladi.

3. Gazlarning toza sirtida adsorblanishi jarayonlarini o'rganish muhim ahamiyatga ega.

4. Atomar toza sirtida maydon effektini o'rganish va shu usul bilan sirtning oksidlanishi oqibatida yuz beradigan o'zgarishlar, «tez» va «sekin» holatlar tabiati haqida yangi ma'lumotlar berishi mumkin.

5. Sirtga kirishmalar kiritish muammosi muhim masaladir. Germaniy va kremniyning sirti atomar toza bo'lsa, uning o'tkazuvchanligi ancha katta, shuning uchun ular asosida asboblarni yasash mumkin emas. Biroq muayyan kirishmalar kiritib, sirt o'tkazuvchanligi va sirt rekombinatsiyasini vaqt o'tishi bilan o'zgaraydigan qilinadi.

8.2. Yarimo'tkazgichlar atomar toza sirtini hosil qilish usullari

Atomar toza sirt olish uchun birinchi shart — o'ta yuqori vakuum bo'lishidir. Gazning bosimi 10^{-9} – 10^{-10} mm. sim. ustuni tartibida bo'lganda olingan atomar toza sirtni zarur o'lchashlar uchun yetarli vaqt davomida saqlab turish mumkin. Agar vakuum qurilmaning

barcha qismlarini yetarlicha yuqori temperaturada 300–400° C uzoq vaqt (12–30 soat chamasida) gazzsizlansa, bunday vakuumni elektro-razryad hamda moyli nasoslar yordamida hosil qilish mumkin.

Atomar toza sirt hosil qiladigan va unda 10^{-9} mm simob ustuni chamasida vakuumni uzoq vaqt (bir necha hafta) tutib tura oladigan qurilmalar ham yaratilgan. Ammo shunday past bosim bo'lganda ham tozalashdan biror vaqt o'tgach, tekshirilayotgan sirt adsorblangan molekulalar qatlami bilan qoplanadi.

Lekin bu jarayon sekin ketadi, chunki adsorblanadigan gazning ulushiy bosimi kichik, sirtga adsorblanish ehtimoli ham kichik. Adsorblangan molekulalarning bir qatlami hosil bo'lishi vaqti 40–400 soat atrofida bo'ladi.

Yuqori temperaturali qizdirish usulida sirtni tozalash

Agar kristallni vakuumda suyulish temperaturasiga yaqin temperaturagacha qizdirilsa, bu holda dastlab oksid qatlami bug'lanib ketadi, so'ngra asosiy modda ham bug'lanadi. Natijada sirt yetarli darajada tozalanadi. Qaralayotgan usulni suyulish temperaturasi ancha yuqori bo'lgan (1683° K) kremniyga qo'llash mumkin. 1550 K temperaturada vakuumda qizdirish orqali kremniyning toza sirti hosil qilinadi. Bu jarayonda kremniy ichiga qurilmaning shisha devorlaridan bor (B) kirib qoladi, u *p*-o'tkazuvchanlik hosil qiladi. Bundan qutulish chorasini: kvardsdan yasalgan asbob-uskunadan foydalanish yoki borni ionlar yordamida bombardimon qilish usulida sirtidan uzoqlashtirishdir.

Bu usulning kamchiliklari ham yo'q emas. Qizdirish vaqtida yarim-o'tkazgichning hajmiy xossalari (elektrik o'tkazuvchanligi, yashash vaqti va boshqalar) ancha o'zgaradi. Qizib ketgan qurilma qismlari ham ba'zi gazlarni chiqaradi, ular sirtidagi zarralar bilan birikmalar hosil qilib tozalash o'rniga ifloslashni keltirib chiqaradi. Shularni e'tiborga olib, mazkur tozalash usulini qo'llash mumkin.

Ushbu usulni yarimo'tkazgich birikmalarga qo'llab bo'lmaydi, chunki yuqori temperaturali qizdirish tarkibni buzadi.

Ionlar bilan bombardimon qilish usuli

Bu usul ko'p tarqalgan va samaralidir. Yarimo'tkazgich sirtini bir necha yuz eV energiyagacha tezlantirilgan inert gaz ionlari bilan

bombardimon qilish sirtidagi oksid qatlamini, shuningdek, dastlabki moddaning 1–2 atom qatlamini ketkazadi. Biroq, keyingi jarayon birmuncha nuqsonlar hosil qiladi. Bu nuqsonlarni ketkazish uchun 15–30 minut davomida yuqori temperaturali kuydirish (1100–1200° K) qo'llaniladi. Kuydirish vaqtida ham sirt qisman ifloslanishi mumkin. Shuning uchun ionlar bilan bombardimonlash–kuydirish texnologik amallari ko'p marta takrorlangandagina qanoatlanarli bo'ladi.

Bu usul elementar (Ge, Si va boshqalar) yarimo'tkazgichlar sirtini tozalashda yaxshi natijalar beradi, ammo yarimo'tkazgich birikmalarning toza sirtini hosil qilishda hamma vaqt ham ijobiy natija beravermaydi.

Vakuumda «yorish» usuli

Kristallni yuqori vakuumda «yorish» yo'li bilan tozalash usulining soddaligi, shuningdek, uning yarimo'tkazgich birikmalarga qo'llanilishi tufayli foydalanish sohasi ancha kengdir. $\sim 10^{-9}$ – 10^{-10} mm.sim.ust. bosimli vakuumga joylangan kristallni kerakli kristallografik yo'nalishi (kremniy uchun (111)) bo'ylab yoriladi. Magnit maydon yoki boshqa usul bilan boshqariladigan maxsus urgich mahkamlangan kristallga zarb beradi, natijada kristall yoriladi. Yorishning boshqa bir usuli – sirtga oldindan tayyorlangan chuqur izga pona bosiladi.

Bu usul qo'llanganda qizdirish amalga oshirilmaydi. Kristall yorilishi bilanoq uning sirtidagi elektr xossalarini bevosita o'lchash mumkin.

Sovuq bug'lanish usulida sirtni tozalash

Usul quyidagidan iborat: kuchli elektr maydon ($\sim 10^8$ V/sm) musbat zaryadlangan nayzadan sirtidagi kirishma atomlarini va kristall panjarasi yuqorigi qatlamlaridagi atomlarni uchirib yuboradi. Maydon tekshirilayotgan modda nayzasi va tekis elektrod orasida hosil qilinadi.

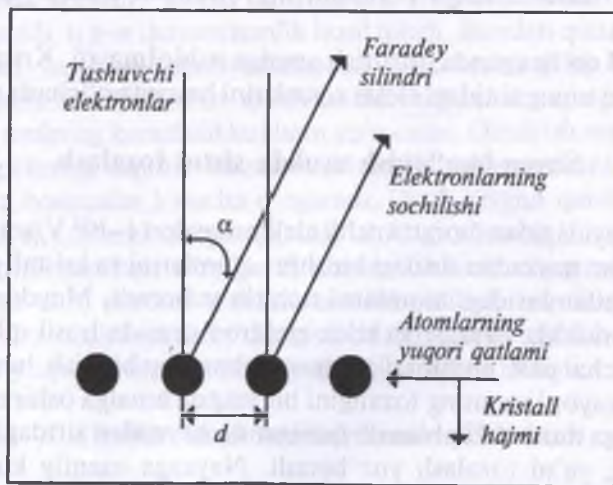
Yetarlicha past chastotali o'zgaruvchan kuchlanish berib sirtni tozalash jarayoni va uning tozaligini bir vaqtda amalga oshirish mumkin: nayzaga musbat kuchlanish berilganda nayzadan sirtidagi atomlar bug'lanadi, ya'ni tozalash yuz beradi. Nayzaga manfiy kuchlanish berilganda avtoelektron emissiya kuzatiladi, bu sirtning elektronogrammasini olish imkonini beradi.

8.3. «Sekin» elektronlar difraksiyasi usulida sirtning tozaligini tekshirish

Energiyasi 20 dan 200 eV gacha bo'lgan elektronlar dastasi tekshiriladigan sirtga tik yo'naltiriladi (8.1-rasm). Sirtan sochilib ketgan sekin elektronlar elektrometrga ulangan siljувchi kollektor yordamida yig'iladi. Difraksion manzarani olish kollektorning burilish burchagiga bog'liq ravishda kollektor tokini o'lchashdan iborat bo'ladi. Keyin dastaning energiyasi boshqa bo'lganda va kristallning yo'nalishi har xil bo'lganda o'lchashlar qaytariladi. Bu ishni tezlashtirish uchun kollektor tokini avtomatik ravishda yozib oladigan har xil usullar qo'llaniladi. Ba'zi usullarda sochilgan elektronlar tezlantiriladi va difraksion manzara bevosita luminescent ekranda kuzatiladi.

Tajribadan ma'lumki, 50 eV energiyali sochilgan elektronlarning 75% i tekshirilayotgan moddaning yuqorigi qatlami atomlari tomonidan chiqariladi. Demak, difraksion manzara kristall sirtini, tuzilmasini tavsiflaydi.

«Sekin» elektronlar difraksiyasi yordamida germaniy va kremniyning yuqori temperaturali qizdirish va boshqa usullar bilan olingan sirlari o'rganilgan.

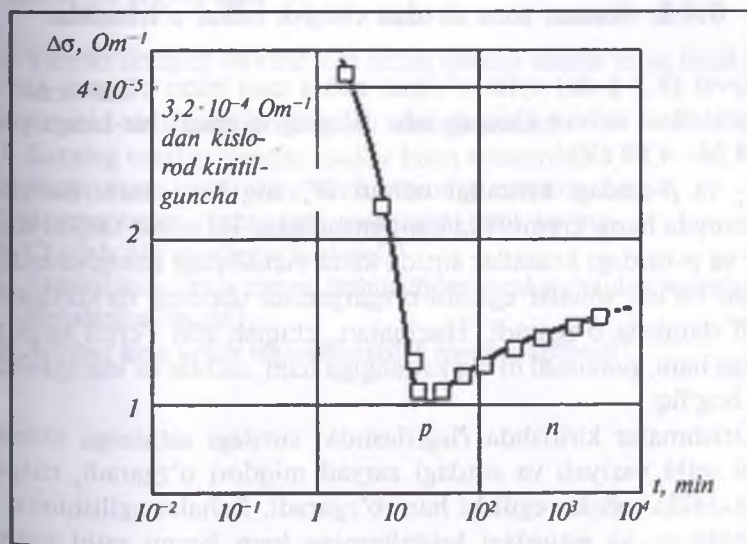


8.1-rasm.

8.4. Yarimo'tkazgichlar atomar toza sirtining fizik xossalari

8.4.1. Sirt o'tkazuvchanligi

Germaniyning atomar toza sirti ancha katta p -turdagi o'tkazuvchanlikka ega. Buning isboti sirtida maydon effekti, vakuumda kristallni yorish usullari bo'yicha o'lchashlardan aniqlangan. Sirtidagi o'tkazuvchanlikning yorib olingan sirt uchun qiymati ($3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Om}^{-1}$) bu kattalikning ionlar bombardimoni bilan tozalangan sirt uchun qiymatiga mos tushadi. Bu tozalikning yetarlicha yuqori ekanligini ko'rsatadi. Toza sirtida oksigenning adsorblanishi dastlabki bosqichida p -o'tkazuvchanlikni biroz oshiradi, keyin esa namuna o'tkazuvchanligi pasayadi. Agar o'lchashlar oksigenning bosimi yetarlicha yuqori bo'lganda bajarilsa, u holda Ge ning sirt o'tkazuvchanligi eng kichik qiymatigacha pasayib, so'ng yana orta boshlaydi. Minimumning borligi oksigen adsorblanishida sirt o'tkazuvchanligi p -turdan n -turga o'tganligini ko'rsatadi. O'tkazuvchanlik turi o'zgarishi maydon effekti harakatchanligi ishorasini o'zgartiradi.



8.2-rasm.

Sirtidagi o'tkazuvchanlik kattaligi bo'yicha fazoviy zaryad sohasidagi kovaklar ortiqcha zichligi qiymatini baholash mumkin ($\sim 10^8 \text{ sm}^{-2}$). Germaniyaning atomar toza sirtida sohalar egilishi (yuqoriga) shuncha kattaki, Fermi sathi valent sohaga kirib qoladi. Bu kovaklar gazining aynishi demakdir. Mazkur egilish sirt sathlarda ancha manfiy zaryad borligini bildiradi, ya'ni bu sathlar akseptorlar bo'ladi. Maydon effekti o'lchashlaridan ularning zichligi uchun 10^{12} sm^{-2} , ba'zan $4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ gacha qiymatlar borligi aniqlangan.

Kremniyning atomar toza sirti keyinroq o'rganila boshlagan, ammo bu tadqiqotlar ko'lami juda tez kengaygan va chuqurlasha boshlagan. Kremniyda olingan natijalar germaniydagidan ancha farq qilgan. Xususan, yorishdan hosil qilingan sirtli kremniy namunasining sirtidagi o'tkazuvchanligi n -tur ekan, shuningdek, atomar toza sirtli kremniy asosidagi p - n - p tranzistor tuzilmalarida inversion qatlamlar kuzatilmagan.

Sirtidagi sathlar zichligi juda katta bo'lgani uchun maydon effektini o'lchash ancha qiyin. Kremniyning sirt o'tkazuvchanligi sirtga oksigen adsorblanganda, Ge dagiga nisbatan ancha kam o'zgaradi.

8.4.2. Atomar toza sirtidan chiqish ishini o'lchashlar

Avval (8.2-§ da) aytib o'tilgan uchta usul bilan olingan germaniy kristallari uchun chiqish ishi W ning qiymati bir-biriga yaqin ($W=4,66-4,80 \text{ eV}$).

n - va p -turdagi kristallar uchun W ning farqi kam. Bu effekt germaniyda ham, kremniyda ham kuzatilgan. Bu effekt talqini shuki, n -tur va p -turdagi kristallar sirtida katta zichlikdagi energiya sathlari mavjud bo'lib, sohalar egilishi o'zgarganida ularning to'ldirilganligi kuchli darajada o'zgaradi. Haqiqatan, chiqish ishi Fermi sathi vaziyatiga ham, potensial to'siq kattaligiga ham, sathlar to'ldirilganligiga ham bog'liq.

Kirishmalar kiritishda (legirlashda) sirtidagi sathlarga nisbatan Fermi sathi vaziyati va sirtidagi zaryad miqdori o'zgaradi, natijada sirt yaqinida sohalar egilishi ham o'zgaradi. Sohalar egilishining bu o'zgarishi n - va p -turdagi kristallarning ham Fermi sathi vaziyati farqini ko'rsatadi.

8.4.3. Atomar toza sirtida harakatchanlik va rekombinatsiya tezligi

Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilar harakatchanligi atomar toza sirtli germaniyni yupqa namunalarida Xoll effektini o'lchash orqali aniqlanadi. Bunda kovaklar harakatchanligi $\sim 600 \text{ sm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ ga teng bo'ladi. Oksigen adsorblana borgan sari sirt potentsiali kamayadi, harakatchanlik esa ortadi.

Turli usullar bilan olingan atomar toza sirtlarda sirt rekombinatsiya tezligi juda kichik (yorib olingan germaniy sirtida $100\text{--}300 \text{ sm/s}$). Ionlar bilan bombardimon qilingan sirt uchun s katta ($\sim 10^4 \text{ sm/s}$). Bu qiymat kuydirish (qizdirish) natijasida kamayadi. Oksigen adsorblangan holda sirt rekombinatsiya tezligi ancha ortadi va 10^3 sm/s ga yetadi. Sirt sathlarining zichligi nihoyatda katta bo'lgan atomar toza sirtlarda s juda kichik bo'lgani sababi — sirt yaqinida baland potentsial to'siqning borligi sirtidagi rekombinatsiyani sekinlashtiradi.

Sirt potentsiali juda katta bo'lganda sirt rekombinatsiyasi tezligi tushunchasi o'z ma'nosini yo'qotishi mumkin.

? Savol va topshiriqlar

1. Yarimo'tkazgich atomar toza sirtini qanday usullar bilan hosil qilish mumkin?
2. Atomar toza sirtni hosil qilish nimaga kerak?
3. Sirtning tozaligi qanday usullar bilan tekshiriladi?
4. Atomar toza sirtida sirt o'tkazuvchanligi tabiati qanday?
5. Atomar toza sirtning fizik xossalari aytib bering.
6. Chiqish ishi qanday o'lchanadi?
7. Atomar toza sirtida zaryad tashuvchilar harakatchanligi xususiyatlari nimalardan iborat?
8. Atomar toza sirtida rekombinatsiya qanday kechadi?

IX BOB. YARIMO'TKAZGICHLAR SIRTI ENERGETIK TUZILISHINI TEKSHIRISH USULLARI

Sirtning elektronlar energiya holati tuzilishini o'rganishning mukammal usullarini yaratish sirt fizikasining muhim vazifasidir. Quyida shunday usullarning bir nechtasini ko'rib chiqamiz.

9.1. Kanal-effekt

Tekis (planar) triod (tranzistor) xarakteristikalarini atrof-muhit o'zgarganida kuchli darajada o'zgarishi ma'lum. Bu $p-n-p$ o'tishlar sirtida kanal hosil bo'lishi bilan bog'liq. Kanal—baza sirtidagi yupqa qatlam bo'lib, uning o'tkazuvchanligi turi hajmdagidan farq qiladi. Kanal emitterdan kollektorga tomon omik o'tish paydo qiladi va shu yo'sinda $p-n-p$ o'tishni shuntlaydi.

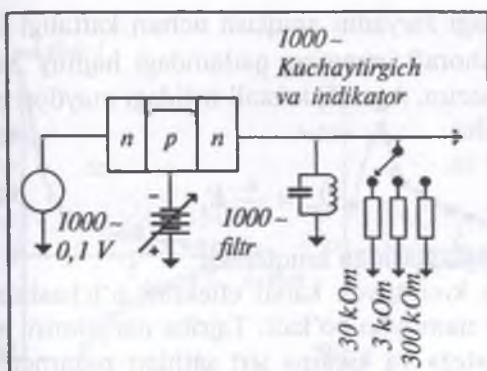
Kanalning mavjud bo'lishi atrof-muhit molekulalarining adsorblanishida hosil bo'ladigan sohalarining kuchli egilishi sababli baza sirtida inversion qatlam yuzaga keladi.

$n-p-n$ o'tishda baza sirtida musbat zaryad ko'proq joylashib olganda kanal paydo bo'ladi (sohalar pastga egilgan). Bu sirtida adsorblash vaqtida (masalan, suv adsorblanishida) donor sathlar hosil bo'lganida yuz beradi.

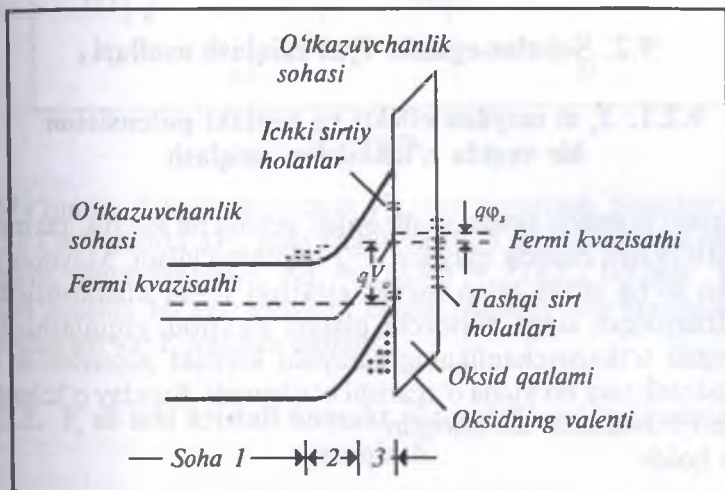
$p-n$ o'tishga berilgan teskari kuchlanish V_a ortib borganida kanalning o'tkazuvchanligi kamayib boradi, V_a yetarlicha katta bo'lib qolganda kanal o'tkazuvchanligi 0 ga teng, ya'ni kanal to'siladi. Sababi: yarimo'tkazgich kristali sirtidagi zaryad bazaning sirtga yaqin sohasidagi erkin zaryad tashuvchilar va ionlangan kirishmalar bilan neytrallanadi. Teskari kuchlanish ortganida $p-n$ o'tish oshadi, shu bilan birga, o'tish sohasida ionlangan kirishmalar soni kattalashadi va endi sirt zaryadini neytrallash uchun kamroq erkin tashuvchilar kerak bo'ladi. Inversion qatlam hosil bo'lmaydi. Kanal to'siladi (9.1-rasm).

Kanalning o'tkazuvchanligi bo'yicha sirt potensialini, sirtidagi zaryadni va sirtidagi holatlar parametrlarini aniqlaydigan usul mavjud.

Tajribada kanal o'tkazuvchanligini o'lchash uchun 9.1- rasmdagi sxemadan foydalaniladi. $p-n-p$ o'tishda kanalni tekshirishda, akseptor



9.1-rasm.



9.2-rasm.

turidagi (sirdagi zaryad manfiy) sirt sathlari hosil qiladigan gazlarni adsorblash qo'llaniladi. Eng qulayi — kislorod. Uning (ayniqsa ozonning) atmosferasida germaniy va kremniy uchun kanal-effekt kuza-tiladi.

Inversion qatlamli sirtning energetik sxemasi 9.2-rasmda tasvir-
langan. Inversion qatlam (p -soha) va n -turdagi asosiy kristall orasiga V_a kuchlanish qo'yilgan. Kristall E_{Fp} va E_{Fn} ikki kvazisathlari bilan xarakterlanadi, $(E_{Fp} - E_{Fn}) = V_a$.

Sirt sathlaridagi zaryadni aniqlash uchun kattaligi unga teng va qarama-qarshi ishorali inversion qatlamdagi hajmiy zaryad $\bar{Q}_{sc}$ ni hisobga olinishi lozim. Agar E_s kristall sirtidagi maydon bo'lsa, Gauss teoremasi bo'yicha

$$\bar{Q}_{sc} = \frac{\epsilon}{4\pi} E_s \quad (9.1)$$

E_s ni Puasson tenglamasidan aniqlanadi.

Germaniy va kremniyda kanal effektini o'lchashda «sekin» va «tez» sirt sathlari namoyon bo'ladi. Tajriba natijalarini nazariy hisob bilan taqqoslab «tez» va «sekin» sirt sathlari parametrlarini topish mumkin. Sirt sathlarining kanal-effekti va maydon effekti asosida aniqlangan energetik vaziyatlari va zichliklari bir-biriga yaqin.

9.2. Sohalar egilishi Y_s ni aniqlash usullari

9.2.1. Y_s ni maydon effekti va kontakt potensialini bir vaqtda o'lchashdan aniqlash

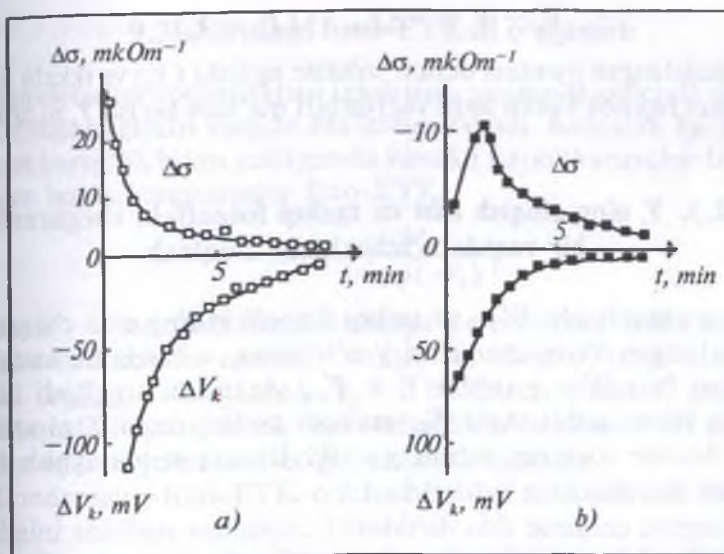
Yarimo'tkazgich sirtiga sluda orqali yetarlicha kuchli, taxminan $(2-7) \cdot 10^5$ V/sm elektrik maydon 1-2 minut qo'yiladi. Maydon uzilishidan so'ng sluda bilan metall elektrod tezda chetlashtiriladi. Tekshirilayotgan sirtga titrlovchi platina elektrod yaqinlashtiriladi. Bir vaqtda o'tkazuvchanlikning pasayishi kontakt potensiallar ΔV_k ayirmasining vaqt bo'yicha o'zgarishi o'lchanadi. Bunday o'lchashlar natijalari 9.3-rasmda tasvirlangan.

Bu holda

$$\Delta V_k = \Delta Y_s + \Delta V_{ok} + \Delta V_{din} \quad (9.2)$$

bu yerda, ΔY_s — sohalar egilishi o'zgarishi; ΔY_{ok} — sirdagi oksid qatlamida potensial tushishi o'zgarishi; ΔY_{din} — adsorblangan molekular dipollari qatlamida potensial tushishi.

$\Delta \sigma_s = f(\Delta V_k)$ ni turli dipolli har xil gazlar atmosferasida o'lchanganida amalda hamma egri chiziqlar mos tushadi. Demak, ΔV_{din} kichik ekan. Xususiy o'tkazuvchanlikli germaniy uchun $T = 300$ K, oksid qatlam qalinligi ≈ 40 Å, $\epsilon_{ok} = 4$ bo'lganda $Y_s = 7kT$. Bundan $\Delta V_{ok} = 0,4kT$, $Y_s = 5kT$ bo'lganda, $\Delta V_{ok} \approx 0,1kT$ kelib chiqadi.



9.3-rasm.

Ma'lumki, Y_s kamaygan sayin V_{ok} ham kamayadi. Shuning uchun $Y_s < 5kT$ bo'lganida ΔV_{ok} juda kichik va (9.2) da uni hisobga olmaslik mumkin. Shunday qilib, $\Delta\sigma_s = f(\Delta V_k) = f(\Delta Y_s)$ bo'ladi. Tajriba natijasi asosida bu egri chiziqni chizib, nazariy bog'lanishlar bilan taqqoslanadi va Y_s aniqlab olinadi.

9.2.2. Y_s ni ikki kristall kontakt potensiallarini taqqoslashdan aniqlash

Bu usul quyidagicha. Sohalari egilishi ma'lum bo'lgan namunaning va tekshirilayotgan kristallning kontakt potensiallari (V_k va V_x) o'lchanadi. O'lchashlar titrash (vibratsion) usulida olib boriladi.

$$V_k - V_x = \Delta V = +\Delta E_{F0} - \Delta V_{din} + \Delta\chi_0 + \Delta V_{ok}, \quad (9.3)$$

bunda, $E_{F0} = \frac{kT}{e} \ln \frac{P_0}{n_i}$ hajmda Fermi sathi vaziyati, χ_0 - tashqi chiqish ishi. Baholashning ko'rsatishicha, ΔV_{din} , $\Delta\chi_0$, ΔV_{ok} hadlar kichik bo'lganligi sababli (9.3) da tashlab yuborish mumkin. U holda

$$V_k - V_x = +\Delta E_{F0} - (Y_x - Y_0). \quad (9.4)$$

Darajalangan namuna uchun sohalar egilishi (Y_0) va ikkala namuna uchun hajmda Fermi sathi vaziyatlari ma'lum bo'lsa Y_x ni aniqlash oson.

9.2.3. Y_s ning chiqish ishi va tashqi fotoeffekt chegarasini bir vaqtda o'lchashdan aniqlash

Agar chiqish ishi W ni va tashqi fotoeffektning qizil chegarasiga mos keladigan foton energiyasi χ o'lchansa, u holda bu kattaliklar orasidagi farq $W - \chi$ ushbu $Y_s + E_{F0}$ yig'indini aniqlaydi (E_{F0} - hajmda Fermi sathi). Agar E_{F0} ma'lum bo'lsa, unda Y_s ni aniqlash oson. Atomar toza sirt uchun $\chi < W$. Bu esa sirtida aynish holati borligini ko'rsatadi.

9.2.4. Y_s ni erkin zaryad tashuvchilarning yorug'lik yutishi bo'yicha aniqlash

Bu usulda erkin zaryad tashuvchilarning (E.Z.T.) infraqizil (IQ) nurlanishni sirt yaqinida yutishi natijasida sirt potensialining o'zgarishi aniqlanadi. Ma'lumki, agar yarimo'tkazgichda sohalaridan biri n karra aynigan bo'lsa, tegishli spektral oraliqda yorug'lik yutilganda zaryad tashuvchilar sohaning bir tarmog'idan ikkinchisiga o'tishi mumkin. Darhaqiqat, germaniy va kremniyda valent sohada ikki karra aynish bor, ya'ni unda og'ir va yengil kovaklar tarmoqlari mavjud.

IQ yorug'likni yutib erkin kovaklar bir tarmoqdan ikkinchi tarmoqqa o'tadi. Tajriba germaniy uchun bu hodisa 3,4, 4,7 va 20 mkm IQ yorug'lik yutilganida kuzatilgan.

Agar IQ yorug'lik sirt yaqinida yutilsa, bu holda yutilishning o'zgarishi bo'yicha sohalar egilishi kattaligi o'zgarishi ΔY_s ni aniqlash mumkin. Bu tajribaning qiyinchiligi shundaki, sirt sust yutiluvchi IQ yorug'lik bilan yoritilishi kerak va o'sha vaqtda shu yorug'lik sirt yaqinidagi sohada yutilishi lozim. Bu shartlarni bajarish uchun kristall sirtiga parallel ravishda va yupqa qatlamdan nur o'tkaziladi; bunda sirtidan to'la ichki qaytish hodisasidan foydalaniladi. Tavsiflangan usul Y_s to'g'risida ma'lumot beradi.

9.3. Sirtdagi foto-EYK ni o'rganish

Kondensator fotoeffektini tekshirish yarimo'tkazgichda sirt yaqinida sohalar egilishi haqida ma'lumot beradi. Kristallni kuchli yutiladigan yorug'lik bilan yoritganda kovakli fotoo'tkazuvchanlik o'rinli bo'lgan holda kondensator foto-EYK

$$E = \frac{L^*}{1 + \exp(-Y_s)}, \quad (9.5),$$

bunda L^* — yoritilish amplitudasiga proporsional kattalik. $Y_s > 0$ (sohalar berkituvchi egilishi) bo'lganda effekt Y_s bilan birga ortib boradi ($m_0 \Sigma_{\max} = L^*$ gacha). $Y_s > 0$ bo'lganda effekt Y_s o'sgan sari oshib boradi. Biquatbli fotoo'tkazuvchanlik holida foto-EYK ishorasini sohalar egilishi yo'nalishi orqali aniqlash mumkin.

Kondensator foto-EYK o'lchashlaridan sirt potensial to'siq bandligini aniqlash mumkin. Tekshirish olib borishda ehtiyot bo'lish kerak. Chunki, tajribada o'lchanadigan kondensator foto-EYK o'ziga yana diffuzion tarkiblovchini, shuningdek, hajmiy foto-EYK ni olishi mumkin.

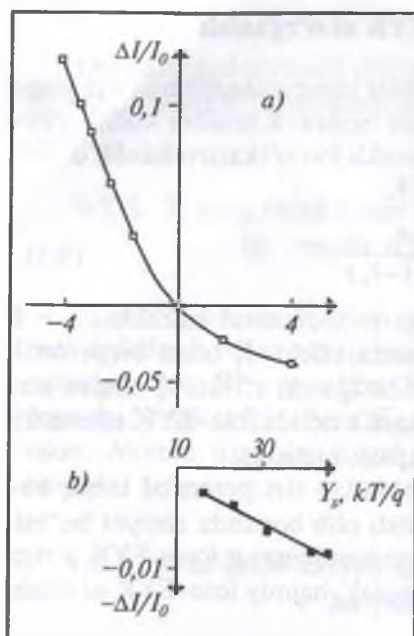
9.4. Maydon effektining luminessent usuli

Bu usul luminessent kristallar sirtini o'rganishda foydali hisoblanadi. Birinchi marta luminessent effekt Cu_2O va CdS da oshkor qilingan.

Agar namunani kuchli yutiladigan yorug'lik bilan yoritilsa va uning yoritilayotgan sirtiga kondensator orqali kuchli elektr maydon berilsa, bu holda luminessensiya intensivligi (oqimi) o'zgarishi kuzaatiladi. Maydon elektrodida potensialning ishorasiga bog'liq ravishda luminessensiya yo o'chadi, yo kuchayadi. Luminessensiya intensivligining $\Delta I/I_0$ o'zgarishi, maydon $\sim 5 \cdot 10^5$ V/sm bo'lganda 50–60% ni tashkil qiladi. Luminessensiyaning o'chishi maydon asosiy zaryad tashuvchilar uchun berkituvchi sohalar egilishi hosil qilganda, kuchayishi esa antiberkituvchi egilganida yuz beradi.

Bu hodisaning ikki sababi bor:

1. Eksitonlarning nurli parchalanishi yoki nurli rekombinatsiya sharoitining (ekranlash chuqurligida luminessensiya uchun javobgar kirishma sathlarining to'ldirilganligi o'zgarishi oqibatida) o'zgarishi natijasida luminessensiya intensivligi o'zgaradi.



9.4-rasm.

2. Bevosita kristall sirtida eksitonlar parchalanishi yoki rekombinatsiya sharoiti o'zgaranda sirt elektron holatlar to'ldirilganligi o'zgaradi. Bu ham luminessensiya intensivligini o'zgartiradi. Sezilarli luminescent maydon effekti sirt sathlarida bevosita eksitonlar parchalanishi sharoiti o'zgarishi bilan bog'liq.

Mazkur effektning chastotaviy bog'lanishi ham muhim sirtga 100–3000 Hz oraliqdagi chastotali o'zgaruvchan kuchlanish berilganda chastota pasayishi bilan effekt kuchayadi. Luminescent effektning ortishi sababi mazkur chastotalarda sirdagi sathlarda eksitonlar parchalanishi shartlarining o'zgarishidir.

$Y_s = f(V)$ va $(\Delta I/I_0) = \varphi(V)$ bog'lanishlardan V ni chiqarib tashlab,

$$(\Delta I/I_0) = f_1(Y_s) \quad (9.6)$$

bog'lanish hosil qilinadi. Shunday egri chiziq 9.4-rasmda tasvirlangan.

Umumiy holda luminescent effektning Y_s ga bog'lanishi murakkab, ammo bir necha xususiy hollarda ($Y_s < 1$ kT, antiberkitish egilishi, $Y_s > 10$ kT) mazkur bog'lanish aniqlangan. Xulosa shuki, maydon luminescent effekti usuli asosida agar (9.6) bog'lanish ma'lum bo'lsa sirdagi sathlarning parametrlarini aniqlash mumkin.

9.5. Sig'im maydon effekti usuli

Sirdagi potensial o'zgarganida fazoviy zaryadning o'zgarishini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$C_s = \beta \frac{dQ_{sc}}{dY_s} \quad (9.7)$$

Kristall sirtida boyitilgan qatlam hosil bo'lganida sirt potentsiali o'sib borganda, undagi sig'im ham ortadi.

Kristall sirtida siyraklashtirilgan qatlam hosil bo'lganida hajmiy zaryadni ionlangan kirishmalar tashkil qiladi. Bunday qatlam berkituvchi qatlam deyiladi. Hajmiy zaryad kristall ichkarisiga tortiladi, shuning uchun sirt sig'imi kamayadi.

Inversion qatlamlar hosil bo'lganda hajmiy zaryad qatlami kengligi kichik bo'ladi. Shunday qilib, sirtidagi sig'imning sohalar egilishiga bog'lanishi minimumga ega bo'ladi (9.5-rasm).

Tajribada bu bog'lanishni topish uchun kondensator sirtidagi potensial kattaligi hosil qilinadi. Undagi kuchlanish doimiy bo'lgani holda metall-dielektrik-yarimo'tkazgich tizimining impedansi (qarshiligi) o'lchanadi.

Boyitilgan qatlamning sig'imi kattaligini asosiy zaryad tashuvchilar harakati ko'rsatadi. Shuning uchun u o'zgaruvchan kuchlanish bilan birga o'zgarib boradi. Bunday o'zgarish chegarasi ushbu

$$\frac{2\pi}{\omega} \gg \frac{\varepsilon}{\sigma_0} \quad (9.8)$$

shart orqali aniqlanadi. Bu yerda σ_0 — o'tkazuvchanlik. (9.8) tengsizlik deyarli hamma foydalanadigan chastotalar uchun bajariladi. Inversion qatlam sohasidagi Q_i zaryadning va sirt holatlaridagi Q_{ss} zaryadning o'zgarish tezligi uncha katta emas. Uni noasosiy zaryad tashuvchilarning hajmda vujudga kelishi jarayonlari, shuningdek, sirt sathlari va sohalar orasida zaryad tashuvchilar almashinuvi jarayonlari orqali aniqlanadi. Bunda sirt sig'imi chastotaga bog'liq.

Yuqori chastotalarda Q_i va Q_{ss} zaryadlar o'zgaruvchan kuchlanishga yeta olmaydi. Bu holda yarimo'tkazgichning sirt sohasining sodda ekvivalent sxemasi ko'rinishida tasvirlanishi mumkin, bunda C_0 — dielektrikning sig'imi, C_{sc}^∞ — fazoviy zaryad qatlami sig'imi, R — yarimo'tkazgichning qarshiligi. Demak, umumiy sig'im

$$C^\infty = \frac{C_{sc}^\infty C_0}{C_{sc}^\infty + C_0} \quad (9.9)$$

kondensatorda doimiy kuchlanish turlicha bo'lganda sirt sig'imini o'lchash sirt sathlari parametrlarini aniqlashga yordam beradi.

Qaralayotgan tizimning sig'imini katta sirt potentsiallaridan kichigi yordamida aniqlanadi. Shunday qilib, katta musbat kuchlanish berib, n -tur yarimo'tkazgichlar yoki katta manfiy kuchlanishlar berib, p -tur yarimo'tkazgich uchun C_0 qiymati aniqlanadi. Katta chastotalarda tizim sig'imini (C_0 ni) o'lchab, (9.9) ifodadan C_{sc}^{∞} hisoblab olinadi. O'z navbatida, C_{sc}^{∞} sig'im sohalar egilishi Y_s ga bog'liq bo'lganligi uchun endi Y_s ni aniqlash mumkin. Metall elektrodda maydon hosil qilgan umumiy zaryad $Q_{um} = C_0 V$ ma'lum, $Q_{ym}(V) - Q_{sc}(Y_s) = Q_{st}(Y_s)$ ayrima sirt sathlaridagi zaryadni Y_s funksiyasi sifatida aniqlashga yordam beradi. Bu egri chiziqdan sirt sathlarining parametrlari topiladi.

? Savol va topshiriqlar

1. Kanal effekti deb qanday hodisaga aytiladi?
2. Sohalar egilishi Y_s ni aniqlashning qanday usullari bor?
3. Y_s ni maydon effekti va kontakt potentsialini bir vaqtda o'lchash orqali topish mumkinmi?
4. Y_s ni chiqish ishi va tashqi fotoeffekt chegarasini o'lchash qanday amalga oshiriladi?
5. Sirtida yorug'lik yutilishi bo'yicha Y_s ni aniqlash mumkinmi? Sababini tushuntiring.
6. Y_s ni aniqlashda foto-EYK ning ahamiyati nimada?
7. Luminessensiya hodisasi Y_s ni topishga yordam beradimi?
8. Elektr sig'imning maydon effekti sohalar egilishini topishga qanday yordam beradi?

X BOB. YARIMO'TKAZGICHLI ASBOBLAR ISHLASHIGA SIRTNING TA'SIRI

10.1. Sirt holatiga bog'liq bo'lgan yarimo'tkazgichli asboblarning parametrlari

Yarimo'tkazgichli asboblarning elektr parametrlari ko'p hollarda kristallning sirt xossalriga bog'liq. Yarimo'tkazgich qurilmalarning kamchiligi shu asboblarning sirtining beqarorligi va standart emasligi bilan bog'langan.

Yarimo'tkazgichli asboblarning ishi beqarorligining asosiy sababi namlikdir. Ma'lumki, kristall sirti oksid amorf parda bilan qoplangan, ammo u sirtning namdan yaxshi himoya qila olmaydi.

Yarimo'tkazgichli asboblarning parametrlari sirtning tozaligiga bog'liq. Kristall sirtidagi keraksiz kirishmalar va boshqa yot unsurlarni bartaraf qilish sirtning tozalashda toza kimyoviy moddalar ishlatiladi. Ular sirtidagi nazorat qilinmaydigan moddalar miqdorini kamaytiradi. Na, K, Ca va boshqa elementlar ionlarini tozalangan (distillangan) suvda yuvib ketkaziladi. Kristall hajmidan sirtga diffuziyalanadigan moddalarni (Cu, Al, Fe va boshqalar) sirtidan uzoqlashtirish uchun germaniy va kremniyli organik moddalarda ishlovdan o'tkazish kerak.

Yarimo'tkazgichli asboblarning parametrlariga sirtning ta'siri quyidagi effektlarda namoyon bo'ladi:

1) $p-n-p$ o'tishda kanal bo'lgan holda sirt potensialining kattaligi sezilarli darajada yassi tranzistorning kollektori teskari tokini aniqlaydi;

2) $p-n$ -o'tishda teskari tokning, shuningdek, kollektor tokining (sirt yaqinida o'tishning kuchli maydonida zaryad tashuvchilar ko'payishi bilan bog'langan) dreyfi ham kuzatiladi;

3) teshilish kuchlanishi kollektor yaqinidagi sohaning sirtidagi potensialiga bog'liq va hajmda teshilish kuchlanishidan ancha kichik bo'lishi mumkin;

4) sirt potentsiali o'zgarganda sirt rekombinatsiyasi tezligining o'zgarishi bilan bog'liq ravishda yarimo'tkazgichli tranzistorning tokni o'tish koeffitsiyenti dreyfi yuz beradi;

5) tranzistor impuls rejimda ishlaganda tranzistorning «to'kilish» effekti kuzatiladi. Bunda asbob past chastotalarda ishga tushmaydi. Bundan tashqari, qisqa impulslarda sirt teshilish effekti ham kuzatiladi;

6) yarimo'tkazgichli qurilmalarning $1/f$ shovqinlari sirtga ishlov berilishiga bog'liq bo'ladi;

7) fotodiodlar va fototranzistorlarning qisqa to'lqinlar sohasidagi spektral xarakteristikalari qiyofasi sirtagi rekombinatsiyasi orqali aniqlanadi.

10.2. Sirdagi kanallar va sirt teshilishi

p - n -o'tishning teskari toki, ma'lumki, p - n -o'tishdan diffuzion siljish uzunligidan katta bo'lmagan masofada elektron-kvant juftlar generatsiyasi (vujudga kelishi) bilan aniqlanadi. Biroq suv bug'lari va boshqalar atmosferasida p - n -o'tishning teskari toki Shokli nazariyasi qiymatidan ancha katta ekanligi ma'lum bo'ldi. Bu ortiqcha toklar p - n -o'tish yaqinidagi sirtida kanallar hosil bo'lishi bilan bog'liqdir.

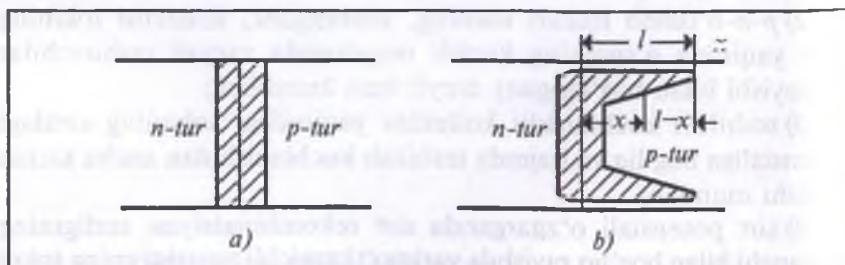
10.1- rasmda sirtida kanal yo'qligi (a) va kanal borligi (b) hollarida p - n -o'tishning hajmiy zaryad sohasi ko'rsatilgan. Tabiiyki, p - n -o'tish yuzasining kattalashishi o'tish orqali teskari tokni ko'paytiradi, ya'ni ortiqcha tok hosil qiladi.

Tajribadan ma'lumki, ortiqcha tokning kattaligi kanal uzunligiga to'g'ri proporsional va p - n -o'tishga qo'yilgan kuchlanish bilan logarifmik qonun bo'yicha o'zgaradi.

Ortiqcha i_k -to'la tokning kattaligi

$$i_k = j_k l \quad (10.1)$$

ko'rinishda ifodalanadi, bunda j_k — kanalning bir birlik uzunligiga to'g'ri kelgan ortiqcha tok, l — uzunligi.



10.1-rasm.

Kanal boshlangan joydan x masofada

$$i_k = j_k(1 - X). \quad (10.2)$$

Agar x masofada kuchlanish tushishi $U(x)$ bo'lsa, inversion qatlam R_x qarshiligi $U(x)$ ga proporsional, ya'ni

$$R_x = AU(x) \quad (10.3)$$

bunda A – atrof-muhitga bog'liq koeffitsiyent. x kesim uchun

$$\frac{du}{dx} = -R_x i_x = AU_x(1 - x) \quad (10.4)$$

tenglamani yozish mumkin. Bu tenglamani integrallasak

$$\int \frac{du}{u} = -A j_k \int_0^l (1 - x) dx ;$$

$$\ln(U/U_0) = A j_k (L/2), \quad (10.5)$$

bundan

$$l = \sqrt{\left(2 \ln \frac{U_l}{U_0} / A j_k\right)},$$

$$i_k = i_k l = \sqrt{\frac{2 j_k}{A} \ln(U_l/U_0)}, \quad (10.6)$$

U_l – kanal oxiridagi kuchlanish, U_0 – berilgan kuchlanish.

Yuqori omli materiallarda kanallar oson hosil bo'ladi, chunki bu holda inversion qatlam hosil bo'lishi uchun qiyosan kichik sohalar egilishi kifoya.

Agar asbobning sohalari bir-biriga yaqin qarshilikka ega bo'lsa, atrof-muhit o'zgarganda, masalan, nam atmosferadan quruq kislorodga o'tilganda dastlab p -sohada, keyin esa n -sohada kanal paydo bo'lishi mumkin. p -materialda kanallar oson hosil bo'ladi va n -materialdagiga nisbatan barqarorroq bo'ladi.

p - n -o'tishdagi kuchlanish muayyan kritik qiymatdan oshganda o'tishning teskari toki keskin ko'payadi va teshilish hodisasi kuzatiladi. Teshilish kuchlanishining hajmdagiga nisbatan pasayishi sababi: sirt yaqinida p - n -o'tish sohasining torayishi bo'ladi, o'tish ichida maydon kattalashadi. Bu holda sirtga yaqin sohada zaryad tashuvchilarning ko'chkisimon ko'payib ketishiga sharoit paydo bo'ladi. Bu effekt bilan p - n -o'tishning teskari toki dreyfi ham bog'langan.

Sirtga yaqin soha zaryad tashuvchilarning ko'payishi tranzistorning impuls rejimida ishlash sharoitini o'zgartirib yuboradi.

10.3. Tokni uzatish ko'effitsiyentiga sirdagi holatlar ta'siri

Tranzistorning umumiy bazali sxemasida tokni uzatish ko'effitsiyenti α ni va umumiy emitterli sxemasida tok bo'yicha kuchaytirish ko'effitsiyenti $\beta = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}$ ni baza sohasida rekombinatsiya orqali aniqlanadi. Bazada zaryad tashuvchilar yashash vaqti qancha kichik bo'lsa, bazaga kiritilgan tashuvchilarning shuncha katta qismi rekombinatsiyalanadi. Demak, ular kollektorga yetib bormaydi, α uzatish ko'effitsiyenti kamayadi. α hajmdagi rekombinatsiya sur'atiga ham, sirdagi rekombinatsiya s tezligiga ham bog'liq.

α ning s ga bog'liqlik ifodasi:

$$\alpha = 1 - \frac{\sigma_b \omega}{\sigma_e L_e} - \frac{s C_k w}{S_k D_p} - \frac{w^2}{2 L_b^2}, \quad (10.7)$$

bunda, w — baza kengligi, σ_b va σ_e — mos ravishda baza va emitter o'tkazuvchanligi, L_b va L_e — baza va emitterda diffuziya uzunligi, S_k — ko'ndalang kesim yuzi, C_k — rekombinatsiya effektiv sirti.

α bilan s orasidagi bog'lanish kuzatiladigan σ ning uzun to'liqlinli dreyfi effektini aniqlaydi. α ning dreyfi emitter toki keskin o'zgar-ganda (tok dreyfi) tranzistor temperaturasi o'zgar-ganda (temperatu-raviy dreyf) kuzatiladi. Ikki effekt ham sirt holatiga bog'liq. Injeksiya sathi (emitter toki) o'zgar-ganida tokni uzatish ko'effitsiyenti α o'zining qandaydir statsionar qiymatigacha sekin o'zgaradi. U sirtning ishloviga bog'liq. Darvoqe, injeksiya sathi o'zgar-ganida sirdagi holatlarga ushlab olingan zaryad, demak, sirdagi potensial sekin o'zgaradi. Bu esa s ni o'zgartiradi, s ning o'zgarishi α ga ta'sir qiladi. Dreyf vaqti «sekin» sirdagi holatlar relaksatsiya vaqti tartibida bo'ladi. Agar sirt tuzoqlarini (sathlarni), bazani emitter yaqinida kuchli yutiladigan yorug'lik bilan yoritib, to'ldirilsa, bu holda tok bo'yicha kuchaytirish ancha katta bo'ladi.

Tok bo'yicha kuchaytirish ko'effitsiyentining temperaturaviy dreyfi-ning bir necha xili bor:

1. Agar tranzistorni uzoq vaqt xona temperaturasidan yuqori temperaturada tutib turilsa, bu holda α va β ning sekin kamayib

borishi kuzatiladi. Bu effekt yarimo'tkazgich (masalan, Ge) sirtining oksidlanish jarayoniga bog'liq. Bunda α va β o'zgarmaydi.

2. Tranzistorni xona temperaturasiga yuqori temperaturali holatdan sovitganda α va β parametrlarning kamayishi kuzatiladi. Xona temperaturasida tranzistorlar saqlanganda α va β sekin ortib, 5–10 kecha-kunduzdan so'ng statsionar qiymatga erishadi. Jarayon qaytar va u shunday tushuntiriladi: qizdirganda oksid qatlamdan namlik tranzistor ichiga kiradi. Tranzistor sovitila boshlanganda oksid qatlam namlanadi, uning tezligini oksid parda qalinligi orqali aniqlanadi va u namlik chiqishdagi (degidratatsiyadagi) tezlikdan ancha kichik bo'ladi. Bu jarayon α va β ning sekin dreyfini tushuntiradi.

3. «48 soatli effekt» ham oksid qatlamda namlik ko'chishi bilan bog'liq. Agar p - n - p tranzistorni yuqori (100° C chamasidagi) temperaturada biror vaqt tutib turilsa, keyin xona temperaturasigacha sovitilsa, α va β vaqt bilan sekin o'zgaradi. Bunda parametrlarning statsionar qiymatiga 48 soat o'tgandan keyin erishiladi. Temperaturaviy dreyf vaqti oldingi holdagidek, ammo effektning ishorasi teskari. Bu effekt qaytar effekt. α va β ning pasayish vaqti oksid qatlami qalinligiga bog'liq emas.

10.4. $1/f$ shovqinlar

Kremniy va germaniydan tayyorlanadigan yarimo'tkazgichli qurilmalarning ortiqcha shovqini bor. Uning spektri $1/f$ qonuniga bo'y-sunadi. $1/f$ shovqin yetarlicha katta chastotalar oralig'ini egallaydi. Ipsimon Ge namunasi uchun $1/f$ qonun $2,5 \cdot 10^{-4}$ Hz dan 1 MHz gacha oraliqdagi chastotalar sohasida qoniqarli bajariladi. Bu shovqinlar temperaturaga kuchsiz bog'langan bo'lib, kristall sirti holatiga bog'liq bo'ladi. Ular sirtning ishlovi va atrof atmosferasiga juda sezgir. Masalan, p - n -o'tishni suv bug'lari atmosferasiga joylansa, $1/f$ shovqinlar bir necha tartibga ortib ketadi.

Mazkur shovqinlarni kamaytirish maqsadida tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Sirt o'tkazuvchanlik minimumiga mos bo'lgan sirt potentsiali qiymatlari sohasida sohalar ancha egilishi sirt o'tkazuvchanlikka kuchsiz ta'sir qiladigan holda $1/f$ shovqinlar juda kam bo'ladi. Kuchsiz shovqinlar $s(Y_s)$ bog'lanish maksimumiga mos Y_s lar sohasida ham kuzatilishi mumkin. Boyitilgan qatlamdan inversion qatlamga o'tganda shovqinning ancha ortib ketishi kuzatilgan.

10.5. Yarimo'tkazgich asboblari sirtini barqarorlash

Tranzistorlarni tok bo'yicha kuchaytirish koeffitsiyenti yuqori bo'lishi uchun bazaning sirti mumkin bo'lganicha, kichik sirt rekombinatsiyasi tezligiga (s) ega bo'lishi kerak. Sirt potensial kattaligi uncha katta bo'lmasligi lozim, chunki sirtida inversion qatlamlarda kanallar hosil bo'ladi, kuchli darajada jamg'aruvchi qatlamlar holida esa teshilish kuchlanishi pasayadi.

Asosiy talab — kristall sirtini ataylab oksidlab qalin va mustahkam himoyalovchi oksid pardasi hosil qilishdir. Bu usul kremniy asosidagi asboblari tayyorlashda ayniqsa samaralidir. Kremniyga kislorod oqimida yuqori temperaturali ishlov berib, uning sirtida mustahkam kremniy oksidi SiO_2 pardasi hosil qilinadi. Uning qalinligi 500 Å dan 1 mkm gacha. Parda sirtini keyingi oksidlashdan saqlaydi. Bunday qoplamli asbob atrof-muhitdagi o'zgarishlarni sezmaydi.

Sirtini asbobni tayyorlashdan oldin oksidlasa yaxshi bo'ladi. Ammo asbob tayyorlangandan keyin ham uni oksid parda bilan qoplasa bo'ladi. Buning uchun past temperaturada tayyor asbob sirtida oksid parda olish uchun namunani ozon atmosferasida qizdirish yoki xona temperaturasida suvsiz eritmada anodli oksidlash usullaridan foydalaniladi.

Yarimo'tkazgichli asboblari va integral mikrosxemalarni planar texnologiya bo'yicha tayyorlashda himoyaviy dielektrik pardalar (qatlamchalar) katta rol o'ynaydi.

Kimoyaviy dielektrik pardalarga quyidagi asosiy talablari qo'yiladi: boshlang'ich taglik sirtiga diffuziyalanuvchi elementlarning (bor, surma, arseniy va b.) kirishini to'la himoyalash; vaqt o'tishi bilan kimyoviy barqarorlik va turg'unlik; bir jinslilik va nuqsonsizlik; yuqori solishtirma qarshilik va elektr mustahkamlik; yuqori mexanik mustahkamlik talablari qo'yiladi. Albatta bu talablarni to'la bajaradigan moddani topish qiyin. Biroq, ma'lum talablarga javob beradigan moddalar mavjud.

10.5.1. Kremniyni termik oksidlash.

10.5.2. Suv bug'ida kremniyni termik oksidlash

Bunda boshlang'ich kremniy (Si) taglikda oksidlovchi muhitda qizdirish natijasida himoyaviy dielektrik SiO_2 pardasi hosil qilinadi. Bu usul qalinligi va tuzilishi bo'yicha tekis hamda yuqori himoyaviy

va dielektrik xossaga ega bo'lgan sifatli niqoblovchi parda olish imkoniyatini beradi.

Kremniy sirtida yuqori tozalikdagi ($\rho \sim 10\text{--}20 \text{ mOm}\cdot\text{sm}$) himoyaviy dielektrik parda olish uchun suv bug'ida oksidlashda foydalaniladi. Bug' miqdori reaksiya tezligini chegaralamagan holda yuqori temperaturada kerakli reaksiyalar yuz beradi. Suv bug'i parsial bosimini saqlash uchun kremniy plastinkalar sirtida suvni qizdirib turish kerak. Oksid pardasining shakllanishi kremniy sirtiga oksid qatlam orqali suvning diffuzion ko'chishi hisobiga bo'ladi. Albatta oksid qatlamning o'sish tezligi taglikning yo'nalishiga, elektr o'tkazuvchanlik turiga va taglikdagi kirishmalar zichligiga ham bog'liq.

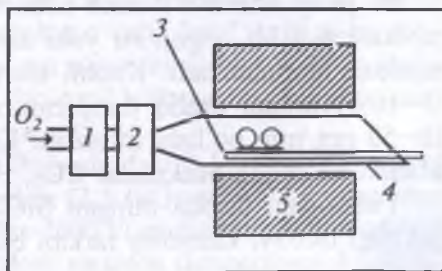
Oksidlanish jarayoni 1100°C dan yuqorida oksid qatlamning x qalinligi vaqtda parabolik $x^2 = Bt$ qonun bo'yicha, 1100°C dan pastda esa $x_2 + b_1x = b_2t$ qonun bo'yicha o'sadi. Oksidlanish temperaturasi qancha kichik bo'lsa, oksid qatlam o'sish qonuni chiziqlikka shuncha yaqin bo'ladi. Bu hol $500\text{--}800^\circ \text{C}$ da yuqori bosimli suv bug'i atmosferasida oksidlashda kuzatiladi.

10.5.3. Quruq kislorod muhitida kremniyni termik oksidlash

Bu usul yuqori temperaturada o'tkaziladi. Bunda hosil bo'lgan parda yuqori sifatli niqob xossasiga ega bo'ladi. Kremniy-oksid chegarasida bog'langan zaryadlar kam bo'lishini ta'minlaydi.

Atmosfera bosimida oksidlash jarayonining temperaturasi $850^\circ\text{--}1200^\circ \text{C}$ oralig'ida bo'ladi. Tegishli qurilma 10.2-rasmda tasvirlangan.

Ishchi sohada temperaturani $900^\circ\text{--}1200^\circ \text{C}$ oralig'ida o'zgartirish mumkin. Pechkaning ishchi kanaliga reaktor 4 o'rnatiladi, ushlagich 3ga plastinkalar o'rnatilib, reaktorga joylashtiriladi. Reaktor 1 ga quritgich, filtr 2 orqali quruq kislorod kiritiladi va quyidagi reaksiya boradi: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$. Oksid o'sishi tezligini temperaturaga va parda qalinligiga bog'liqligini turli bosqichlarda nazorat qilish mumkin.



10.2-rasm.

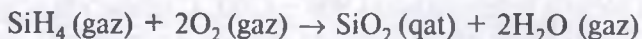
Yarimo'tkazgichli asboblari va IMS lar ishlab chiqarishda yuqorida ko'rilgan usullarning umumlashgan ko'rinishidan iborat 2 va 3 bosqichli oksidlashdan foydalaniladi. Termik o'stirilgan pardalarning chegara qalinligi 1–1,5 mkm dan oshmaydi. Planar texnologiyada pardalarning qalinligi 0,2–0,8 mkm bo'lishi kifoya.

10.5.4. Kremniy oksid pardalarini pirolitik o'tkazish usuli

Bu usul kremniy oksid pardasini har qanday materiallardan tayyorlangan taglikka o'tkazishi mumkin. Uning zaruriy afzalligi shundaki, bu jarayon ancha past temperaturada amalga oshiriladi.

1. **Tetraetoksisilanning parchalanishi.** Bu jarayonda reaksiya mahsulotlari to'g'ridan to'g'ri taglik sirtiga yoki alohida kameraga beriladi. Tetraetoksisilan $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ning parchalanish reaksiyasi $700\text{--}750^\circ\text{C}$ da yuz beradi. Reaksiya natijasida SiO_2 , SiO , SO va gaz ko'rinishidagi organik radikallar ajralib chiqadi. Agar $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ parchalanishi taglik bilan bir kamerada o'tkazilsa, unda taglik temperaturasi piroliz temperaturasi bilan bir xil bo'ladi. Agar parchalanish reaksiyasi bir kamerada, taglik boshqa kamerada bo'lsa, unda taglik temperaturasi piroliz temperaturasidan ancha kichik bo'ladi.

2. **SiH_4 silanning kislorod bilan parchalanish usuli.** Bu usul kremniy oksidi pardasini $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ va $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ turdagi yarimo'tkazgich birikmalarga, ularning stexiometrik tarkibini buzmagani holda o'tkazish imkonini beradi. Yuqori sifatli SiO_2 pardasini olish uchun jarayon $150\text{--}300^\circ\text{C}$ da olib boriladi:



Bu jarayonlarni o'tkazish uchun boshlang'ich moddalar sifatida monosilan SiH_4 , argon Ar yoki azot (N) va kislorod (O) aralashmasidan foydalaniladi. Kuchli inert gaz bilan aralashtirilgan silan (3–10%) holda oraliq temperaturada SiO_2 ning o'tkazish tezligi 10–50 nm/min bo'lishi mumkin. Kisloroddan tashqari, oksidlovchi sifatida kislorodli birikmalar CO_2 , H_2O lardan foydalaniladi.

Yuqoridagi usulda olingan SiO_2 pardasi plastinka sirti bo'ylab qalinligi birday, kimyoviy tarkibi barqaror bo'ladi.

10.5.5. Kremniyning anodli oksidlash usuli

Bunday oksidlashning ikki xili mavjud: kremniy sirtini suyuq elektrolitda oksidlash va gaz plazmada oksidlash.

1. **Elektrolitik anodlash.** Anod oksidlanishi asosan o'zgarmas tok maromida o'tkaziladi. Buni amalga oshirish uchun zaruriy sharoit yaratish kerak. Bunda oksid parda qalinlashishi bilan oksidga qo'yilgan U kuchlanish ortib boradi. Agar oksidga E maydon bir jinsli bo'lsa,

$$\frac{dV}{dt} = E \frac{dx}{dt} = J \frac{EM}{\alpha F \rho}$$
 tenglama o'rinli bo'ladi, bunda J — chegara qismida tok zichligi, M — oksidning gramm-mol miqdori, ρ — uning zichligi, αF — bir gramm-mol oksid hosil qilish uchun kerakli elektr miqdori, $F = 9,65$ C/mol — Faradey soni.

Elektrolitlar sifatida odatda suv miqdori oz bo'lgan organik eritmalaridan foydalaniladi. Elektrolit o'tkazuvchanligini boshqarish uchun HNO_3 , H_2PO_4 , $NaOH$, $NaNO_3$ va boshqalarni kiritish mumkin. Bu birikmalarning anionlari oksidlovchi sifatida elektrkimyoviy jarayonlarda qatnashadi.

2. **Kremniyni gazli oksidlash.** Bu usulda elektrolit o'rniga gazdan foydalaniladi. Gazli anodlash qalin oksid pardalar olishda qo'llaniladi. Yuqori chastotali maydon bilan paydo qilingan kislorod plazma manfiy zaryadlangan kislorod ionlari manbayi bo'ladi. Plazmadagi kislorod ionlari kremniy plastinalari bilan ta'sirlashadi. Oksidning o'sishi anod oksidlash o'tkazish rejimiga, ya'ni kameraning bosimi, temperatura va plazma zichligiga bog'liq.

10.5.6. Past temperaturali ion-plazma yordamida oksidlash

Bu usul hatto uy temperaturasida yuqori tezlikda pardalar olish imkonini beradi. Yarimo'tkazgich sirti qismi — oksid va oksid-tashqi muhit orasidagi tezlantiruvchi maydon o'sishi dreyf tezlikni ko'paytiradi, diffuziya tezligining ortishi esa o'suvchi qatlamda zarrachalar zichligi gradiyentini o'stiradi. Bu ikki omil kislorod tarkibli plazmada oksidning o'sish mexanizmiga ta'sir qiladi.

Bu usulda oksidlanish 50–200 Pa bosimda olib boriladi. Razryadni qo'zg'atish yuqori chastotali maydon (2,5 GGs gacha) bilan amalga oshirilib, razryadda quvvat 200 dan to 1000 Vt gacha o'zgarishi mumkin.

Plazmaning o'rta parametrlari: elektron temperatura $5 \cdot 10^4$ K, taglikka nisbatan anod potensial +35 V, plazma zichligi $\sim 10^{13}$ el/sm³,

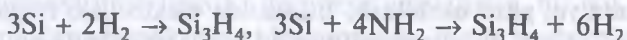
ionlanish darajasi $(5-6) \cdot 10^{-2} \%$. Kremniy plastinka yerga ulangan kattodga nisbatan musbat potensial $(+50 \div +400 \text{ V})$ ostida turadi. Oksid pardaning o'sish tezligi $8-18 \text{ nm/min}$.

10.5.7. Kremniy nitrid qoplamalarini hosil qilish.

Aralash qoplamalar

SiO_2 himoya qatlamlarini ba'zi hollarda qo'llash mumkin bo'lmay qoladi. Bunday hollarda kremniy nitridi Si_3N_4 yoki kremniy nitridi va oksid kombinatsiyasidan foydalaniladi. Kremniy nitridi kimyoviy termik barqaror, elektrga chidamli, dielektrik singdiruvchan va yaxshi niqoblash xossasiga ega. $\text{Si}_3\text{N}_4-\text{SiO}_2$ tizimda kimyoviy birikmalar – kremniy oksinitridlar hosil qilishi mumkin. Uning ko'p tarqalgan birikmalaridan biri Si_2ON_2 .

Kremniy nitrid qatlamini kremniy sirtida vujudga keltirish mumkin. Buning uchun azot (N) yoki uning faol birikmalari bilan kremniy nitridlanadi. Sirtini to'g'ridan to'g'ri nitridlash quyidagi reaksiyalar bo'yicha boradi:



Birinchi reaksiyaga asosan kremniy nitrid pardasini ochiq nay usulida olish lozim. Ishchi kameraga kremniy plastinkalari joylashtiriladi va u orqali azot oqimi o'tkaziladi. Temperatura 1200°C va azot oqimi $300 \text{ sm}^3/\text{min}$ bo'lganda kremniy plastinka sirtida kremniy nitridi pardasi hosil bo'ladi.

Ikkinchi reaksiyaga asosan, kimyoviy reaksiya bo'lishi uchun temperatura yanada yuqoriroq bo'lishi mumkin. Bu usul texnologiyada kam qo'llaniladi. Silanni ammiak bilan nitridlashning kimyoviy reaksiyasini qo'llash $700-1100^\circ \text{C}$ da kremniy nitridini olish imkonini beradi. Bunda $1/20$ nisbatda silan va ammiak $(3 \cdot 5) \cdot 10^3 \text{ sm}^3/\text{min}$, tezlikda vodorod (H) oqimi bilan birgalikda kremniy plastinalar joylashtirilgan ishchi kamera orqali o'tkaziladi.

10.5.8. Himoyaviy dielektrik pardalarning sifatini nazorat qilish

Pardalarning asosiy ko'rsatkichlari: 1) parda qalinligi; 2) qatlamdagi ochiq tirqishlar; 3) kremniy-himoyaviy parda chegarasidagi nuqsonlar miqdori nazorat qilinadi.

Yarimo'tkazgichlar texnologiyasida dielektrik parda qalinligi *mikrotortish*, *interferometr* va *ellipsometr* usullarida aniqlanadi. Mikrotortish usuli namuna taglikka dielektrik pardani qoplamasdan va qoplagandan so'ng mikrotortishga asoslangan. Rang (interferensiya) usulida himoyaviy parda — taglik sirtiga tushuvchi oq nurni to'ldiruvchi interferensiyaga asoslangan. Oq yorug'likning ma'lum bir qismi so'ndiruvchi interferensiyada qatnashib, pardaning sirti bir xil rangda ko'rinadi.

So'nuvchi interferensiya sharti:

$$2dn = \frac{2k-1}{2} \lambda.$$

Bu ifodada, d — pardaning qalinligi, n — pardaning sindirish koeffitsiyenti, λ — tushuvchi yorug'lik to'lqin uzunligi, $k=1,2,3$ — interferensiya tartibi. Rang usulida parda qalinligini aniqlashda nisbiy xatolik 10% dan oshmaydi.

Ellipsometrik usulda Si_2O va Si_3N_4 pardalarning qalinligini o'lchash chizig'i bo'yicha qutblangan nurning himoyaviy parda sirtidan qaytishiga asoslangan. Ma'lum burchak ostida tushgan nur qaytishida elliptik qutblangan to'lqin hosil bo'ladi. Yorug'lik manbayi sifatida lazer nurlaridan ham foydalanish mumkin.

G'ovaklarni aniqlashda bir necha usullardan foydalaniladi. Misni elektrolitik o'tkazish usulida sirtida Si_2O vujudga keltirilgan plastinka mis ionli elektrolitga joylashtiriladi. Unga manfiy potensial beriladi. Elektroliz jarayonida mis ionlari plastinadagi g'ovaklar bor joylarga o'tiradi. Bu joylarning miqdoriga qarab parda sifati to'g'risida xulosa chiqariladi.

Diffuzion legirlash usulida yarimo'tkazgich taglik materialga diffuziya jarayonida kirishmalar kirib material elektrik o'tkazuvchanligini o'zgartirishiga asoslangan. Diffuziya jarayoni o'tkazilgandan so'ng pardaning qayerida g'ovaklar bo'lsa, o'sha yerdan diffuziya boradi, mahalliy p - n -o'tishlar hosil bo'ladi. Keyin kimyoviy parda taglikdan ketkaziladi va mahalliy p - n -o'tishlar pardalardagi g'ovaklar miqdori to'g'risida ma'lumot olish mumkin bo'ladi.

Elektrografik usulda ham pardalardagi g'ovaklar nazorat qilinadi. Gidroxinonning 3–4% li eritmasidan qo'llangan fotoqog'ozlar plastinkalar sirtiga joylashtiriladi. Fotoqog'ozli plastinkaga ikkita metall disk — elektrod qisib, ular orqali tok o'tkaziladi. Bu toklar fotoqog'oz emulsiyasiga yorug'likday ta'sir qiladi.

Pardadagi nuqsonlar miqdori va o'lchami mikroskop yordamida aniqlanadi. Dielektrik-yarimo'tkazgich chegarasi holati, undagi zaryad tashuvchilar zichligi, sirt potentsiali, dielektrikdagi qo'zg'almas zaryadlar sirt holatlari zichligi, qo'zg'almas zaryadlar turg'unligi, sirt holatlarining relaksatsiyasi vaqti bilan baholanadi. Bu parametrlarni metall-dielektrik-yarimo'tkazgich (MDY) tuzilmalar tayyorlab, avtomatik qurilmalarda volt-farad tavsiflarini o'lchash bilan nazorat qilinadi.

10.5.9. *p-n*- o'tishlarni himoyalash usullari

Bu yerda qotishmali, qotishma-diffuzion va liza-qotishmali usullarda olingan *p-n*- o'tishlarni himoyalash masalalari haqida ma'lumot beramiz. Bu turdagi asboblarga Si_2O va Si_3N_4 pardalar *p-n*- o'tishlar va omik kontaktlar olingandan so'ng qoplanadi. Oldin aytilganidek, kislorod tarkibli birikmalarning suvli eritmalaridan ham foydalanish mumkin. Ular kremniy bilan o'zaro ta'sirlashib, sirtini oksidlaydi — yupqa himoya pardasini hosil qiladi. Masalan, 100 ml suv va 50 mg natriy asetati, 200 ml suv va 70 ml ortofosfat kislota, 100 ml suv va 50 ml sulfat kislota, 150 ml suv va 10 g dinatriy fosfat va boshqa aralashmalardan foydalanish mumkin.

Metall oksid pardalar yarimo'tkazgich material sirtida himoya qoplamasini hosil qiladi. Bu pardalarning solishtirma qarshiligi 10^{14} – 10^{15} Om · sm bo'lib, namga barqaror va issiqqa chidamlidir.

Al_2O_3 , BeO, TiO_2 , ZrO_2 himoya pardalarini o'tqazish uchun manba temperaturasini 800–1200° C da, *p-n*- o'tishli kristall temperaturasini 350–500° C da ushlab turish kerak. Manba va yarimo'tkazgichlar kristall orasidagi masofa 10–20 sm bo'lishi maqsadga muvofiqdir. Parda hosil qilish jarayoni kvars nayda olib boriladi, uning bir uchiga manba (masalan, Al_2O_3 li tigel) va ikkinchi uchiga *p-n*- o'tishli kristall joylashtiriladi. Kvars naydan avval havo chiqarilib, keyin kerakli miqdorda tashuvchi reagent (masalan, HCl, HBr gazi) kiritiladi. Himoya pardalari manbalari sifatida ishqoriy yer metallari; titanatlar, sirkonatlar va staniatlardan foydalaniladi.

Ko'pchilik yarimo'tkazgichli asboblarda IMS lar uchun shisha pardalar bilan himoyalash qo'llaniladi. Shisha bilan himoyalash asboblarda elektrik parametrlarini yaxshilaydi — asbobning turg'unligi, mustahkamligi va ishlash muddatini oshiradi.

Kremniy asosidagi asboblarni himoya qilish uchun borosilikatli, fosforosilikatli va qo'rg'oshinsilikatli shishalar ishlatiladi. Yana boshqa murakkab tarkibli shishalardan ham foydalanish mumkin. *p-n*- o'tishlarni himoyalashda alumosilikatli shishalar ko'p qo'llanilmoqda, chunki bu shishalar va kremniyning termik kengayishi koeffitsiyentlari bir-biriga yaqin. Oksidlangan kremniy sirtiga shishani o'tqazish himoyalashni yanada yaxshilaydi — oksid qatlam kremniy bilan shisha orasidagi yopishqoqlikni oshiradi.

Alumosilikatli shishani odatda 0,2 mkm dan yupqa bo'lmagan oksid qatlamli kremniy kristaliga surkaladi. Agar oksid qatlami undan yupqa bo'lsa, oksid qatlam orqali yarimo'tkazgich materialiga natriy ionlari kirib borishi mumkin. Bunday shishalarda natriy ionlari bor bo'ladi (masalan, 35% SiO_2 + 35% Al_2O_3 , 29,9% BeO + 0,1% Na_2O). Shuning uchun alumosilikatli shishalar asosan yetarlicha qalinlikdagi Si_2O qatlami mavjud yarimo'tkazgichli kristallarda qo'llaniladi. Himoya pardalari sifatida xalkogenid va murakkab tarkibli shishalar ishlatiladi.

? Savol va topshiriqlar

1. Yarimo'tkazgichli asboblarning qanday parametrlari sirt holatiga bog'liq bo'ladi?
2. Sirtida kanallar qanday hosil bo'lishini aytib bering.
3. Sirtning elektrik teshilishi qaysi sharoitda yuz beradi?
4. Asboblarda yuz beradigan shovqinlar nimadan kelib chiqadi?
5. Yarimo'tkazgichlar sirtini barqarorlash uchun qanday tadbirlar ko'riladi?

XI BOB. YARIMO'TKAZGICH SIRTI BILAN HAJMINING O'ZARO TA'SIRI

11.1. Yarimo'tkazgichning sirti va hajmidagi xossalar orasidagi bog'lanish

Yarimo'tkazgichning sirtidagi E_{Fs} va hajmidagi E_{Fv} Fermi sathi orasida bir qiymatli bog'lanish bor. Bu bog'lanish butun kristallning elektroneytrallik shartidan keltirib chiqariladi:

$$\sigma + \int_0^{\infty} \rho(x) dx = 0 \quad (11.1)$$

bunda σ – sirt zaryad zichligi, $\rho(x)$ – hajmiy zaryadning x tekislikdagi zichligi. Yarimo'tkazgich $x \geq 0$ yarimfazoni egallaydi, deb faraz qilinadi.

σ zichlik, bosim g , temperatura T va sirtidagi Fermi sathi holati E_{Fs} ning funksiyasi

$$\sigma = \sigma(P, T, E_{Fs}) \quad (11.2)$$

(11.1) dagi ikkinchi had T , E_{Fs} , E_{Fv} lar funksiyasi, ya'ni

$$\int_0^{\infty} \rho(x) dx = R(T, E_{Fs}, E_{Fv}). \quad (11.3)$$

Endi elektroneytrallik sharti

$$\sigma(P, T, E_{Fs}) + R(T, E_{Fs}, E_{Fv}) = 0 \quad (11.4)$$

bo'ladi. Bundan E_{Fs} ni E_{Fv} funksiyasi sifatida aniqlash mumkin.

$$E_{Fs} = f(P, T, E_{Fv}) \quad (11.5)$$

Bu amal murakkab, shuning uchun uni ayrim xususiy hollardagina bajarish mumkin. E_{Fv} ni kristall ichidagi elektroneytrallik shartidan, ya'ni

$$\rho(E_{Fv}) = 0 \quad (11.6)$$

topilsa, u holda (11.5) dan E_{Fs} aniqlangan bo'ladi. (11.4) tenglamani yechmasdan

$$(dE_F/dE_{FV}) \geq 0 \quad (11.7)$$

bo'lishligini ko'rsatish mumkin. Sirt yaqinida sohalar egilishini

$$V_s = V(0) = E_{Fs} - E_{FV} \quad (11.8)$$

kattalik orqali tavsiflash o'rinli. Bu *sirt potentsiali* deyiladi. Bu sirt fizikasida muhim o'rin tutadigan kattalik bo'lgani uchun uni aniqlab olish juda zarur.

Hisoblashlar quyidagi natijalarga olib keladi

a) deyarli ionlanmagan kirishma holida:

$$2 \operatorname{sh} \frac{V_s}{2kT} = -\frac{\sigma}{\sigma^*}. \quad (11.9)$$

$$\text{Bunda } \sigma^* = \sqrt{(\chi kT/2\pi)^{n^*}}, \quad n^* = p + N_{\frac{+}{\alpha}} = n + N_{\frac{-}{\alpha}} \quad (11.10)$$

b) deyarli ionlangan kirishma holida:

$$p \left(e^{V_s/kT} - 1 - \frac{V_s}{kT} \right) + n \left(e^{-V_s/kT} - 1 + \frac{V_s}{kT} \right) = n^* \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^2. \quad (11.11)$$

Sirti V_s potentsial turli omillarga bog'liq.

1. **Sirt potentsiali sirtidagi σ zaryadga bog'liq.** Bunda ikki chegaraviy holni ko'rib chiqaylik:

a) $|V_s| \ll kT$ bo'ladigan oz egilgan sohalar holida (11.9) va (11.11) tenglamalardan

$$V_s = -kT \frac{\sigma}{\sigma^*} \quad (11.12)$$

ifoda kelib chiqadi. $|V_s| \ll kT$ bo'lgani uchun $\sigma/\sigma^* \ll 1$;

b) kuchli egilgan sohalar holida (11.9) dan

$$V_s = \pm kT \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right) \quad (11.13)$$

ifoda olinadi, bunda agar $\sigma < 0$ bo'lsa, yuqoriga (+) ishora, $\sigma > 0$ bo'lsa, pastga (-) ishora o'rinli bo'ladi; $|\sigma| \gg \sigma^*$ ko'rilgan hollarda V_s sirt σ zaryadga chiziqli, logarifmik bog'langan. Bu holda (11.11) dan

$$V_s = \pm kT \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^2 \quad (11.14)$$

kvadratik bog'lanish ifodasi kelib chiqadi.

2. Sirt potentsiali V_s ga kristall ichidagi kirishmalar ta'sir qiladi. Oldingi ifodalardan ko'rinadiki, asosiy zaryad tashuvchilar zichligi

n^* qancha katta bo'lsa, σ^* shuncha katta, binobarin, V_s shuncha kichik bo'ladi. Demak, kirishmalar kiritib sohalar egilishini (V_s ni) kamaytirish mumkin.

3. Sirt V_s potentsiali T temperaturaga bog'liq. Haqiqatan T temperatura oshgan sari n^* ortib boradi, V_s esa kamayadi.

4. Sirt V_s potentsialiga adsorblash ham ta'sir ko'rsatadi. Agar adsorblangan zarralarning sirt zichligi N deb olinsa, undagi zaryad $\sigma_a = \pm eN$ bo'ladi, demak, adsorblash hisobidan sohalar egilishi o'zgarishi ΔV_s uchun oz ionlangan yoki to'la ionlangan kirishmalar hollarida

$$\Delta V_s = \pm 2kT \frac{eN}{|\sigma_p|} \quad (eN \ll |\sigma_p|), \quad (11.15)$$

$$\Delta V_s = \pm kT \ln \left(\frac{eN}{\sigma_p} \right) \quad (eN \gg |\sigma_p|) \quad (11.16)$$

ifodalar olinadi.

11.2. Sirtning zaryadlanishiga bog'liq effektlar

Sirtida sathlar mavjud bo'lishi sirtning zaryadlanishiga olib keladi. Bu esa qator effektlarni keltirib chiqaradi:

1. Sirtidagi zaryad yarimo'tkazgichdan elektronlarning chiqish ishiga ta'sir qiladi. Binobarin, sirtida adsorblangan zarralar zichligi va tabiati chiqish ishini aniqlashda muhim bo'ladi.

2. Sirtidagi zaryadga elektrik o'tkazuvchanlik ham bog'liq.

3. Sirt zaryadining kattaligi va ishorasiga yarimo'tkazgich hajmidagi kirishmalar taqsimoti bog'liq.

4. Agar yarimo'tkazgich sirti zaryadlangan bo'lsa, bu holda sirt yaqinida sohalar egrilanishi oqibatida sirtida turli masofada zaryad tashuvchilar zichligi turlicha bo'ladi. Demak, sirt o'tkazuvchanlik hajmiy o'tkazuvchanlikdan farq qiladi. Sirt o'tkazuvchanlikni χ_s deb belgilab, uning V_s ga bog'lanishini topamiz.

Harakatchanliklar μ_n va μ_p yarimo'tkazgichning hamma joyida o'zgarmas qiymatga ega deb hisoblansa:

$$\chi_s = \chi - \chi_0 = e\mu_n \int_0^{\infty} (n(\chi) - n_v) d\chi + e\mu_p \int_0^{\infty} (p(\chi) - p_v) d\chi, \quad (11.17)$$

bundagi n_v va p_v — elektronlar va kovaklarning hajmdagi zichliklari.

Belgilashlar bu yerda quyidagicha:

$$\chi_{nv} = e\mu_n n_V, \quad \chi_{pV} = e\mu_p p_0, \quad \mu^{VM/kT} = \chi_{nv} / \varphi_{pV} \quad (11.18)$$

Integrallash natijasi:

$$\chi_s = 4 \sqrt{\chi_{nv} \chi_{pV}} \int_0^s \left(\operatorname{sh} \frac{V_M - V}{2kT} \operatorname{sh} \frac{V}{2kT} \right) \left(\frac{dV}{d\chi} \right)^{-1} V. \quad (11.19)$$

$V_s = V_M$ bo'lganda $\chi_s(V_s)$ egri chizig'i minimumdan o'tadi, chunki

$$\frac{d\chi_s}{dV_s} = 4 \sqrt{\chi_{nv} \chi_{pV}} \left(\operatorname{sh} \frac{V_M - V_s}{2kT} \right) \left(\operatorname{sh} \frac{V_s}{2kT} \right) \left(\frac{dV}{d\chi} \right)^{-1}_{\chi=0}. \quad (11.20)$$

Sohalar kuchli darajada egilib kambag'allashgan qatlam hosil qilganda sirt yaqinidagi o'tkazuvchanlik turi hajmdagidan boshqacha bo'lishi mumkin. Bu hodisa *o'tkazuvchanlik inversiyasi* deb ataladi. Shu hodisaga erishiladigan sohalar egriligi V_i *inversiya potentsiali* deyiladi.

$$e\mu_n n(V_i) = e\mu_p p(V_i) \quad (11.21)$$

shartidan topiladigan inversiya potentsiali

$$V_i = \frac{1}{2} V_M \quad (11.22)$$

ga teng bo'ladi.

5. Tashqi maydon va adsorblash o'tkazuvchanligiga ta'sir ko'rsatadi. Umuman aytganda, sirt o'tkazuvchanligi χ_s va V_s ni o'zgartira oladigan barcha sabablar ta'sir ko'rsatadi.

Ma'lumki, bir plastinka o'rganilayotgan yarimo'tkazgich bo'lgan yassi kondensatorga (uning ikkinchi plastinasini maydoniy elektrod deyiladi) E elektr maydon qo'yilgan bo'lib, yarimo'tkazgich sirtining bir birligida σ elektr zaryad paydo qilingan bo'lsin:

$$\sigma = -\frac{E_0}{4\pi} E, \quad (11.23)$$

bunda E_0 – kondensatormi to'ldiradigan muhitning dielektrik doimiysi. σ zaryad sirt holatlari va hajmdagi zaryad qatlami orasida taqsimlangan bo'ladi:

$$\delta = \sigma + \int_0^\infty \rho(\chi) d\chi. \quad (11.24)$$

Muvozanat paytida:

$$\sigma = \sigma(V_s), \quad \int_0^{\infty} \rho(\chi) d\chi = R(V_s) \quad (11.25)$$

(11.25) ni (11.24) ga qo'ysak, E va V_s ni bog'lovchi tenglama hosil qilamiz.

Tashqi maydon ulangan paytda u hosil qilgan zaryad sirt yaqinidagi qatlamda yig'ilgan, sirdagi zaryad esa avvalgiday qolgan bo'ladi. Sirt χ_s o'tkazuvchanlik keskin o'zgarib ketadi. Vaqt o'tishi bilan maydon hosil qilgan zaryad tashuvchilar sirt yaqinidagi qatlamdan qisman sirtning o'ziga o'tadi. Natijada σ va χ_s o'zgaradi, bunda χ_s ning kattaligi o'zining dastlabki qiymatiga yaqinlashadi, ba'zan unga teng bo'lib qoladi.

V_s sirt potensialini, binobarin, χ_s ni o'zgartira oladigan yana bir sabab adsorblashdir. Adsorblash oqibatida mazkur o'zgarishlar

$$\Delta V = V_s - V_{s0}; \quad \Delta \chi_s = \chi_s - \chi_{s0} \quad (11.26)$$

ko'rinishida ifodalanadi, V_{s0}, χ_{s0} — adsorblash e'tiborga olinmagandagi kattaliklar.

Agar akseptor xossali zarralar adsorblansa, sirt yaqinidagi qatlamda kovaklar ko'payadi, elektronlar kamayadi. Bu holda $\Delta V_s > 0$ hamda n -yarimo'tkazgich holida $\Delta \chi_s < 0$, p -yarimo'tkazgich holida $\Delta \chi_s > 0$ bo'ladi.

Donor xossali zarralar adsorblanganda bu tengsizliklarning aksi bo'ladi. Endi «kvaziyakkalangan» sirt tushunchasi bilan tanishaylik.

Haqiqiy yarimo'tkazgich sirtida holatlar zichligi katta bo'lsa, sirtida o'rtnashgan elektronlar va kovaklar zichligi ancha katta bo'ladi. Agar bu zichliklar farqi yetarlicha kichik bo'lsa, bu holda yarimo'tkazgich sirti ancha maxsus xossalarga ega bo'ladi.

O'tkazuvchanlik sohasi bilan Fermi sathi orasidagi masofa hajmda

$$E_{FV}, \text{ sirtida } E_F \text{ bo'lsin. Demak, } \frac{|\Delta E_{FV}|}{kT} \geq 1 \text{ bo'ladi. (11.5) } \frac{|\Delta E_F|}{kT} \ll 1$$

tenglamadan bo'lishligi ma'lum bo'ladi. Bu holda E_F vaziyat E_{FV} vaziyatga bog'liq emas. Bu esa yarimo'tkazgichning sirt xossalarini uning hajm xossalariga bog'liq bo'lmaydi, demakdir. Bu holda hajm sirtga ta'sir ko'rsatmaydi, sirtni muayyan E_{FV} oralig'ida «kvaziyakkalangan» sirt deyish mumkin.

Endi «kvaziyakkalangan» sirtning ba'zi xossalari ko'rib o'tamiz. «Kvaziyakkalangan» sirt holida sirdagi to'la zaryad:

$$\sigma(E_F) = 0, \quad (11.27)$$

Ammo hajmda

$$p(E_F) = 0. \quad (11.28)$$

Demak, E_{FV} va E_F lar bir-biriga bog'liq bo'lmagan (11.27) va (11.28) munosabatlardan aniqlanadi.

«Kvaziyakkalangan» sirtga bog'liq sirt holatlarining uch turi bor.

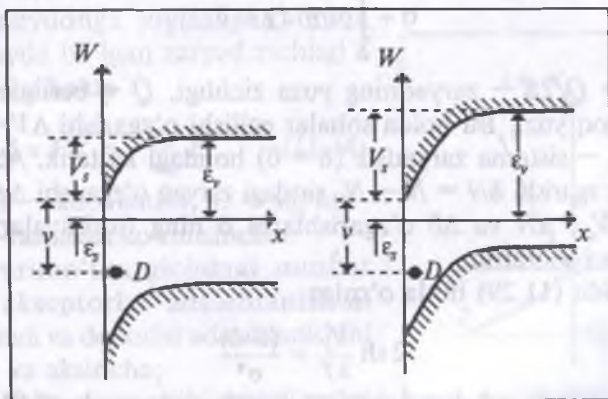
A. Sirt energetik sohalarga tegishli holatlar. Bunday sohalar mavjud bo'lganida ularda holatlar zichligi N_s katta bo'ladi. Bu zichlik sirdagi elektronlar va kovaklar zichliklari yig'indisidan ancha katta bo'lganda «kvaziyakkalanish» sharti bajariladi.

B. Turli tuzilish nuqsonlariga tegishli holatlar. Ular sirtida hamma vaqt mavjud (vakansiyalar, sirtga chiqib olgan panjara atomlari yoki ionlari, yot atomlar, kirishmalar va h.k.).

D. Sirt xemosorblangan atomlar yoki molekulalar. Ular xuddi tuzilish nuqsonlari bajargan ishlarni bajaradi va sirt holatlarining umumiy zichligiga hissa qo'shadi.

Shunday qilib, haqiqiy sirt ham, ideal (mukammal) sirt ham «kvaziyakkalangan» sirt xossasiga ega bo'lishi mumkin.

Baholash ko'rsatishicha, $N_s > 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ bo'lganida sirtning «kvaziyakkalangan» deb hisoblashga bo'ladi. Oldin aytilgandek, «kvaziyakkalangan» sirt holida E_F vaziyat E_{FV} vaziyatga bog'liq emas. Shuning



11.1-rasm.

uchun E_{FY} qancha o'zgarsa V_s ham shuncha o'zgaradi, ammo E_F o'z joyida qoladi (11.1-rasm).

«Kvaziyakkalangan» sirt holdida hajm sirtga ta'sir ko'rsatadi. E_F o'zgarsa V_s o'zgaradi va shuning uchun V_s bog'liq hajmdagi xossalari o'zgaradi.

11.3. Zaryadlangan yarimo'tkazgichning adsorbsion xossalari

Zaryadlangan adsorbentlar xossalarini ko'rib chiqish bir qator muhim effektlarni o'rganish imkonini beradi:

1. Yarimo'tkazgichga qo'yilgan tashqi elektrik maydon yarimo'tkazgichda zaryad paydo qiladi, u esa adsorbsion xossalarni o'zgartiradi.

2. Ionlarni xemosorblash yarimo'tkazgich xossalariga ta'sir qiladi. Bu holda adsorblangan zarralar zaryad kiritadi, bu esa qator xususiyatlar keltirib chiqaradi.

3. Tashqi nurlanish ostidagi yoki radiofaol qo'shimchalar bilan ta'minlangan yarimo'tkazgichda statsionar zaryad ushlanib turgan holda yarimo'tkazgichning xemosorbsion xossalari boshqacha bo'ladi.

Dastlab yarimo'tkazgich zaryadlangan holda chiqish ishi va adsorbsion qobiliyat o'zgarishini tekshiramiz. Bu holda zaryad taqilanishi sharti

$$\sigma + \int_0^{\infty} \rho(\chi) d\chi = \delta, \quad (11.29)$$

bu holda $\delta = Q/2S$ — zaryadning yuza zichligi, Q — berilgan zaryad, S — yon yoq yuzi. Bu holda sohalar egilishi o'zgarishi $\Delta V_s = V_s - V_{s0}$ bo'lib, V_{s0} — sistema zaryadsiz ($\delta = 0$) holdidagi kattalik. Adsorbsion qobiliyat o'zgarishi $\delta/N = N - N_0$, sirdagi zaryad o'zgarishi $\Delta\sigma = \delta - \sigma_0$. Masala ΔV_s , ΔN va $\Delta\delta$ o'zgarishlarni δ ning funksiyalari sifatida aniqlashdan iboratdir.

Bu holda (11.29) ifoda o'rniga

$$2 \operatorname{sh} \frac{V_s}{kT} = \frac{(\delta - \delta_0)}{\sigma^*} \quad (11.30)$$

tenglik yoziladi. σ^* ko'rinishi o'shanday. Agar dastlabki zaryad adsorblangan zaryaddan ancha katta va barcha nuqsonlar to'la

ionlangan, deb hisoblansa δ va N lar δ ga bog'liq emas, ya'ni $\sigma = \sigma_0$ (11.30) asosida va yarimo'tkazgich musbat zaryadlangan ($\delta > 0$) desak, boshqa sharoit o'zgarib, u holda sohalar yuqoriga egila boradi, ya'ni chiqish ishi ortadi va aksincha, manfiy zaryadlanishda ($\delta < 0$) sohalar pastga egiladi (V_s kamayadi), chiqish ishi kamayadi.

Ma'lumki, N — adsorbsion qobiliyat uncha katta bo'lmagan sathlar to'ldirilganligi holida quyidagicha:

$$N = \frac{\alpha P}{\eta_0} = \alpha P \left[1 + \exp \left(\mp \frac{E_{FV} + V_s - V}{kT} \right) \right]. \quad (11.31)$$

Adsorbsion qobiliyatning nisbiy o'zgarishi

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \eta_0^{\pm} \left[\exp \left(\mp \frac{\Delta V_s}{kT} \right) - 1 \right], \quad (11.32)$$

bunda $\eta_0^{\pm}$ — zaryadlanmagan yarimo'tkazgichda «mahkam» bog'langan zarralarning nisbiy miqdori. Endi (11.30) ifoda boshqacharoq ko'rinish oladi:

$$\exp \left(\frac{V_s}{2kT} \right) = \left(\frac{\delta - \sigma}{2\sigma^*} \right) + \sqrt{\left(\frac{\delta - \sigma}{2\sigma^*} \right)^2 + 1}. \quad (11.33)$$

$\sigma = \sigma_0$ deb hisoblasak va (11.32) ni (11.33) ga qo'ysak, $\Delta N/N_0$ ning δ ga bog'lanishi ifodasini olamiz.

Tashqi elektr maydon yarimo'tkazgichning adsorbsion qobiliyatiga ta'sir ko'rsatadi. Plastina shaklidagi yarimo'tkazgich tashqi bir jinsli elektr maydonga joylashgan, unda sirtida paydo bo'lgan zaryad zichligi δ bo'lsin. Bu holda

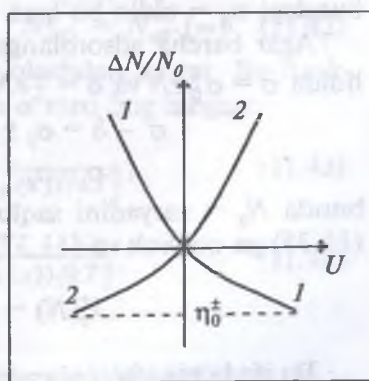
$$d = CV = -\frac{\epsilon_0}{4\pi} E, \quad (11.34)$$

bunda, V — kuchlanish, C — sig'im.

11.2-rasmdan ko'rinishicha:

a) yarimo'tkazgichdagi musbat zaryad akseptorlar adsorblanishini kamaytiradi va donorlar adsorblanishini oshiradi va aksincha;

b) effekt simmetrik emas, ya'ni kuchlanish ortib borgan sari musbat



11.2-rasm.

effekt ortadi, shu vaqtda manfiy effekt $\Delta N/N_0 = -\eta_0^+$ kattalikka asimptotik yaqinlashib boradi. Xulosa shuki, sirtning adsorbsion qobiliyatining tashqi maydon ta'sirida o'zgarishi sirtida xemosorblashning zaryadlangan shakli o'zgarishi bilan bog'liq.

Yarimo'tkazgich sirtida *ionlarning adsorblanish hodisasi* ham e'tiborga loyiqdir. Yarimo'tkazgich yassi parallel plastinkadan iborat bo'lsa, uning ikkala sirtida bir muayyan tur zarralar xemosorblangan bo'lsin. N bilan sirt birligida adsorblangan zarralar sonini belgilaymiz. Barcha zarralar neytral bo'lgan va ular bir zaryadli ionlar bo'lgan hollarda $V_s = V_s(N)$ bog'lanishni aniqlaylik. Kristall ichida kirishmalar

oz ionlangan deb hisoblaymiz. Yana $\left(\frac{\delta - \sigma}{\sigma^*}\right)^2 \gg 1$ deb faraz qilamiz. Bu hollarda

$$V_s = \pm kT \ln \left(\frac{\delta - \sigma}{\sigma^*} \right)^2. \quad (11.35)$$

Zarralar neytral bo'lganda

$$\sigma = \sigma_p \pm eN^\pm, \quad \delta = 0 \quad (11.36)$$

va kichik to'ldirilganlik sharoitida, ya'ni

$$eN \ll |\sigma_p|, \quad (11.37)$$

sirt potensial

$$V_s = V_s(0) \pm \frac{2kTe}{|\delta_p|} N^\mp, \quad (11.38)$$

bundagi σ_p — oldin bo'lgan (biografik) zaryadlar sirt zichligi.

Agar barcha adsorblangan zarralar bir zaryadli ionlar bo'lsa, u holda $\sigma = \sigma_p^\mp eN$ va $\delta = \mp eN$, demak,

$$\begin{aligned} \sigma - \delta &= \sigma_p \pm e(N - N^\pm) = \sigma_p \pm eN_0, \\ \sigma &= \sigma_p \mp eN^\mp \quad \text{va} \quad \sigma = \mp eN, \end{aligned} \quad (11.39)$$

bunda N_0 — zaryadini saqlovchi ionlarning sirt zichligi. (11.39) ni (11.35) ga qo'ysak va (11.37) ni e'tiborga olsak,

$$V_s(N) - V_s(0) = \mp \frac{2kTe}{|\delta_p|} N_0 \quad (11.40)$$

Bu ifoda manfiy ionlarning adsorblanishi sohalarni pastga egilishini ko'rsatadi. Ikkala holda ham chiqish ishi, o'tkazuvchanlik o'zgaradi.

11.4. Sirtning yarimo'tkazgich ichida kirishmaning taqsimlanishiga ta'siri

Cheklangan yarimo'tkazgich holida sirt holatlarining mavjudligi sirtida zaryad paydo bo'lishiga sababchi bo'ladi. Bu zaryadning elektr maydoni yarimo'tkazgich kristali ichiga qandaydir masofaga kiradi, kirishmalarning tekis taqsimoti buziladi. Sirt yaqinidagi maydon zaryad tashuvchilarning dreyf tokini hosil qiladi. Buning natijasida ionlangan kirishmaning zaryadi sirtidagi zaryadga teskari ishorali bo'lgan zarralari sirtga tomon suriladi, bir xil ishoralilari esa sirtidan ichkariga ko'chadi. Bunda sirt bilan hajm orasida zarralar zichligi gradiyenti hosil bo'ladi. Bu esa dreyf tokka qarshi diffuzion tokni vujudga keltiradi. Shu ikki tok muvozanatlashganda kirishmaning muvozanatdagi taqsimoti yuzaga keladi, bunda sirt yaqinidagi qatlamlarda kirishmalar ko'proq yoki ozroq bo'ladi. Yarimcheksiz yarimo'tkazgichni ko'rib chiqamiz, u $x \geq 0$ yarimfazoni egallagan bo'lsin. Yarimo'tkazgichda qatlam donor kirishma bo'lsin (n -tur). Kirishma zichligini N_d , uning neytral va zaryadli qismlarini N_d^0 va N_d^+ deb belgilaymiz.

Ravshanki,

$$N_d = N_d(x), \quad N_d^0 = N_d^0(x), \quad N_d^+ = N_d^+(x), \quad (11.41)$$

bunda

$$N_d = N_d^0 + N_d^+.$$

Quyidagi belgilarni kiritamiz:

$$N_{dV} = N_d(\infty), \quad N_{dV}^0 = N_d^0(\infty), \quad N_{dV}^+ = N_d^+(\infty) \quad (11.42)$$

Masala (11.41) dagi funksiyalarni aniqlashdan iborat. Bu funksiyalar elektronlar muvozanati sharoitida o'zaro bog'langan:

$$N_d^0(x) = \frac{N_d(x)}{1 + \exp[(-E_d + E_F(x))/kT]}, \quad (11.43)$$

$$N_d^+(x) = \frac{N_d(x)}{1 + \exp[(E_d - E_F(x))/kT]}. \quad (11.44)$$

Demak,

$$\frac{N_d^+(x)}{N_d^0(x)} = \exp\left(\frac{E_F(x) - E_d}{kT}\right); \quad \frac{N_d^+(x)}{N_{dV}^0} = \exp\left(\frac{E_{FV} - E_d}{kT}\right). \quad (11.45)$$

Puasson tenglamasi:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{4\pi e^2}{\epsilon} [N_d^+(x) - n(x)] \quad (11.46)$$

ifodasida $n(x) = n_0 \exp(-V(x)/kT)$. (11.47)

Tegishli chegaraviy shartlardan foydalanib, (11.46) tenglama yechilsa,

$$|V(x)/2kT = \frac{\exp x/l + \text{th}(V/kT)}{\exp x/l - \text{th}(V/kT)}, \quad (11.48)$$

bundagi l – ekranlanish uzunligi. Yana ba'zi amallarni bajarib, ushbu natijalarni olamiz:

$$N_d(x) = \begin{cases} = N_{dV} + n^* \left[\text{sh}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l} - \gamma \right) \right]^{-1} & (V_s) \geq \text{bo'lganda,} \\ = N_{dV} - n^* \left[\text{ch}^2 \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l} + \gamma \right) \right]^{-1} & (V_s) \leq \text{bo'ladi.} \end{cases} \quad (11.49)$$

γ -o'lchamsiz kattalik V_s bilan bog'langan

$$\pm V e^{-\gamma} = \text{th} V_s / 4kT. \quad (11.50)$$

Bundan tashqari,

$$\left(\frac{dV}{dx} \right)_{x=0} = \frac{4\pi e}{\epsilon} \sigma \quad (11.51)$$

bo'lishini ham bilamiz. Bu ifoda yordamida mazkur masala tahlilini davom ettirish mumkin. Xulosa shuki, (11.49) ifoda oldimizga qo'ygan masalaning yechimidir.

Kirishmalar yarimo'tkazgichning adsorbsion qobiliyatiga ta'sir ko'rsata oladimi? Tahlil bu savolga «ha» deb javob beradi.

Yarimo'tkazgichning adsorbsion qobiliyati uning sirtida Fermi sathi holatiga bog'liq bo'ladi. Akseptor gaz uchun Fermi sathi qancha pastda bo'lsa adsorbsion qobiliyat shuncha katta, donor gaz uchun esa aksincha.

Har qanday donor kirishma hamma vaqt E_{FV} ni kamaytiradi, akseptor kirishma esa E_{FV} ni orttiradi. Shuning uchun donor kirishma sirtning donor gazga nisbatan adsorbsion qobiliyatini kamaytiradi, akseptor gazga nisbatan oshiradi. Akseptor kirishma esa aksincha ta'sir ko'rsatadi. Tajribalar buni tasdiqlaydi.

Kirishmalarni xemosorblashga faqat Fermi sathini (elektronlar muvozanatini) siljitish yo'li bilan emas, balki xemosorbsion zarralar va kimyoviy birikma hosil qilish yo'li bilan ham ta'sir ko'rsatish mumkin.

11.5. Metall ustidagi yarimo'tkazgich pardasi

Ayrim metallar ko'pincha binar birikma shaklidagi yarimo'tkazgich parda bilan qoplangan bo'ladi. Binobarin, ko'p jarayonlar shu yarimo'tkazgich sirtida kechadi. Agar pardaning L qalinligi ekranlanish uzunligidan kichik bo'lsa, pardaning xemosorbsion xossalari uning qalinligi va metallning xossalari bog'liq bo'ladi. Bu masala pardaning tashqi sirtidagi Fermi sathi vaziyatini L va metalldan chiqish ishi A_0 ning funksiyasi sifatida aniqlashdan iborat.

Agar elektronning parda sirtidagi potensial energiyasini V_L orqali, metall va yarimo'tkazgich orasidagi kontakt potentsiallar ayirmasini V_0 bilan belgilasak, masala

$$V_L = V_L(L, V_0)$$

funksiyani tahlil qilishga keladi.

Tahlil quyidagicha xulosalar chiqarishimizga sabab bo'ladi. Agar parda sirti musbat zaryadlangan ($\sigma > 0$) bo'lsa, uning adsorbsion qobiliyati donor gazga nisbatan parda yupqalashgan sari ortib boradi, akseptor gazga nisbatan kamayadi.

Agar parda sirti manfiy zaryadlangan ($\sigma < 0$) bo'lsa, donor gazga nisbatan pardaning adsorbsion qobiliyati u yupqalashgan sari ortadi, maksimumdan o'tadi, so'ngra kamayadi, akseptor gazga nisbatan kamayadi, minimumdan o'tadi, so'ngra ortadi.

Pardaning katalitik xossalari ham uning qalinligi va taglik sifatida olingan metallning tabiatiga bog'liq bo'ladi.



Savol va topshiriqlar

1. Yarimo'tkazgichning sirti bilan hajmi orasida qanday bog'lanishlar bor? Misol yordamida tushuntiring.
2. Sirtning zaryadlanishida qanday effektlar muhim ahamiyatga ega?
3. Zaryadlangan yarimo'tkazgichning adsorbsion xossalarini tushuntiring.
4. Sirt kirishma taqsimotiga ta'sir ko'rsatadimi?
5. Metall ustiga o'tkazilgan yarimo'tkazgich pardasining xossalari qanday?

XII BOB. YARIMO'TKAZGICHNING KATALITIK TA'SIRI

12.1. Katalizning asosiy tushunchalari

Yarimo'tkazgichlar ko'pgina kimyoviy reaksiyalarda katalizator vazifasini o'taydi.

Mis oksidi, rux oksidi, vanadiy besh oksidi kabi yarimo'tkazgichlar katalizator vazifasini bajaradi. Metallarning ba'zilar ham katalizator bo'ladi. Ammo yarimo'tkazgichlarda kataliz ko'proq qo'llaniladi.

Metallarning ko'pchiligi yarimo'tkazgich pardasi bilan qoplangan bo'ladi. Bu pardani ketkazish qiyin.

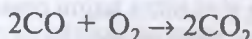
Kataliz haqidagi tushunchalar fizika va kimyoda ko'p o'rganiladi. Yarimo'tkazgich ichiga kiritilgan kirishmalar uning katalitik xossalariga ta'sir ko'rsatishi va yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi bilan uning katalitik ta'siri orasida bog'lanish borligi, yarimo'tkazgichda ichki fotoeffektни paydo qiladigan yorug'likning uning adsorbsion va katalitik faolligiga ta'siri kuzatilgan. Yarimo'tkazgich katalizator bo'lib ishlagan vaqtida uning elektr o'tkazuvchanligining va chiqish ishining o'zgarishi aniqlangan.

Yarimo'tkazgich katalitik jarayonda faol qatnashadi. Yarimo'tkazgichning katalitik xossalari uning tarkibi va elektronlar holatlariga ko'ra aniqlanadi.

Katalizatorning aktivligi va tanlovchanligi

Faraz qilaylik, reaksiyada ishtirok etuvchi gazlar aralashmasiga qattiq jism — katalizator kiritildi. Bunda reaksiya tezligi ortadi. Tezlikning nisbiy ortishini *katalizator faolligi* deyiladi.

Masalan, karbon oksidi oksidlanishi karbonat angidrid hosil bo'lishiga olib keladi:

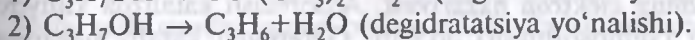
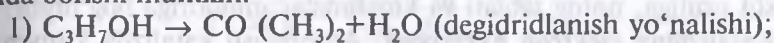


Katalizator ishtirokisiz bu reaksiya juda sekin boradi. U ham bo'lsa, bir necha yuz gradusga teng yuqori temperaturalarda sodir bo'ladi. MnO_2 , Ag_2O , Co_2O_3 kabi katalizatorlar ishtirokida bu reaksiya hatto -60°C da ham katta tezlik bilan boradi.

Katalizator kimyoviy reaksiyalarning ayrim bosqichlari tezligini har xil darajada o'zgartiradi. Reaksiyaning natijaviy tezligini eng sekin borgan bosqichga ko'ra aniqlanadi.

Agar reaksiyada ishtirok etuvchi moddalar parallel borgan reaksiyalarda qatnashsa, u holda ularning har biri tezligini katalizator turlicha o'zgartirishi mumkin. Demak, katalizator ta'sirida reaksiyaning o'z yo'nalishi o'zgartirilishi mumkin. Katalizatorning bu qobiliyati *katalizatorning selektivligi (tanlovchanligi)* deyiladi.

Masalan, izopropil spirt C_3H_7OH ning parchalanishi ikki yo'nalishda borishi mumkin:



Birinchi yo'nalishda katalizator sifatida ZnO , ikkinchi yo'nalishda Al_2O_3 ishlatiladi.

Yarimo'tkazgichning katalitik faolligi va selektivligi (tanlovchanligi) u yo bu tashqi ta'sir oqibatida o'zgarishi mumkin. Masalan, temperatura ko'tarilganda katalizator faolligi ortadi.

Yarimo'tkazgichga kirishmalar kiritib ham katalizator xossalarini o'zgartirish mumkin. Bu xossalar yarimo'tkazgichning xususiyatiga ham bog'liq bo'ladi.

Ko'pincha katalizator tarkibi reaksiya jarayonida o'zgarishi mumkin. Masalan, reaksiya katalizatorni zaharlashi mumkin, bunda uning faolligi pasayadi.

Ideal holda katalizator reaksiyadan keyin to'la tiklanadi. Amalda esa u reaksiya jarayonida asta-sekin o'zgarib boradi, ma'lum vaqtdan so'ng faolligi to'xtaydi. Reaksiyani tezlashtiruvchi katalizatorning o'zi ham kimyoviy jarayonda qatnashadi.

Reaksiyani faollash energiyasi

Qattiq jism tomonidan tezlashtirilayotgan har qanday kimyoviy jarayon adsorblash va desorblash bosqichlarini o'z ichiga oladi. Faraz qilaylik, qattiq jism (katalizator) gazsimon faza bilan tutashgan.

Gaz molekullari dastlab qattiq jism sirtida adsorblanadi, keyin o'zaro yoki gaz molekullari bilan reaksiyaga kirishadi. Shundan keyin reaksiya mahsuloti desorblanadi (ajralib chiqadi). Demak, katalizator gazlar aralashmasiga kiritilganda reaksiya amalda gazlar fazasidan qattiq jism sirtiga ko'chadi.

Ikki faza chegarasida boradigan reaksiya — *geterogen katalitik reaksiya* deyiladi.

Reaksiyaning tezlik doimiysi $K(T)$ temperatura funksiyasi orqali ko'pincha sirtning katalitik faolligi tavsiflanadi. Uning (Arrenius qonunining) ko'rinishi:

$$K(T) = K_0 \exp(-E/KT) \quad (12.1)$$

bo'lib, bundagi E — reaksiyani aktivlash energiyasi.

$\ln K$ ning $1/T$ ga bog'lanishi to'g'ri chiziq bilan tasvirlanadi. Uning ordinata bilan kesishishi $\ln K_0$ bo'ladi. E va K_0 namunaning tayyorlanishi usuliga, uning tabiati va kirishmalar miqdoriga bog'liqdir.

Katalizning elektron nazariyasi. Adsorblash katalizda kimyoviy adsorblash (xemosorblash) bo'ladi. Geterogen kataliz nazariyasi xemosorblash nazariyasi bilan chambarchas bog'langan. Asosiy maqsad katalizator tanlash bo'lgani uchun katalizator ishlashi mexanizmini bilish zarur.

Kimyoviy jarayonda har qanday geterogen kataliz jarayoni elektron mexanizmga ega. Shu mexanizmni o'rganish — katalizning elektron nazariyasi vazifasidir.

Yarimo'tkazgichda yuz beradigan elektron jarayonlar uning elektr, optik, magnit xossalari bilan bir vaqtda katalitik xossalari ham belgilab beradi. Yarimo'tkazgichning elektronlar aniqlab beradigan xossalari va uning katalitik xossalari orasida muayyan bog'lanish bor. Shu bog'lanishni topish nazariya oldidagi asosiy vazifadir.

Bu nazariyaning vujudga kelishi hozirgi zamon yarimo'tkazgichlar fizikasining kataliz hodisalari sohasiga kirishi edi. L.V.Pisarjevskiy qattiq jismlarning katalitik xossalari, ularning elektron xossalari bilan bog'liqligini aniqlagan. Ammo uning nazariyasi kvant mexanika paydo bo'lishidan oldin, N.Bor nazariyasi asosida yaratilgan edi. Hozirgi vaqtda elektron nazariya mukammal nazariy asoslar asosida ish yuritadi.

12.2. Katalizda Fermi sathi

Katalizator sirtida xemosorblangan zarrachalarning hammasi emas, balki ularning muayyan qismi reaksiyada qatnashadi. Demak, xemosorblashning faol va nofaol shakllari bo'ladi. Reaksiya tezligi, sirtidagi faol shakllarning nisbiy miqdoriga (η^0 , η^- , η^+) bog'liq. Reaksiya tezligi g ifodasiga shu η^0 , η^- , η^+ kattaliklar kiradi. Elektron muvozanat

holida bu kattaliklar Fermi sathi vaziyatiga bog'liq bo'ladi. Fermi sathining esa sirt tekisligida o'tkazuvchanlik sohasi ostidagi chuqurligi E_{F_s} deb hisoblanadi. U holda

$$g = g(E_{F_s}). \quad (12.2)$$

Bu funksiyaning ayrim reaksiyalar uchun ko'rinishi bilan keyinroq tanishamiz. Fermi sathi vaziyati sirtning muayyan to'ldirishlari hollarida ham reaksiya tezligi aniqlanadi.

Ikki holni farqlash lozim:

$$\frac{dg}{dE_{F_s}} < 0 \text{ va } \frac{dg}{dE_{F_s}} > 0. \quad (12.3)$$

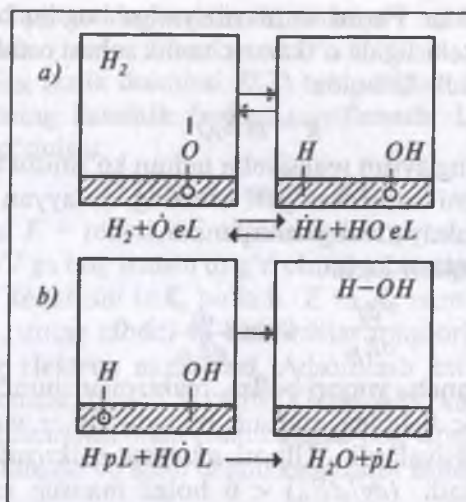
Fermi sathi qancha yuqori bo'lsa, reaksiyalar shuncha tez boradigan va $(dg/dE_{F_s}) < 0$ holga mansub bo'ladi. Bu — elektronlar tezlashtiradigan reaksiyalardir. Ularni *akseptor reaksiyalar* yoki *n-sinf reaksiyalari* deyiladi. $(dg/dE_{F_s}) < 0$ holga mansub reaksiyalarning tezligi Fermi sathi qancha past bo'lsa, shuncha katta bo'ladi. Ularni *donor reaksiyalar* yoki *p-sinf reaksiyalari* deyiladi. Bu — kovaklar tezlashtiradigan reaksiyalardir.

Shuni ta'kidlash kerakki, ayrim hollarda reaksiya tezligi Fermi sathi E_{F_s} vaziyatiga bog'liq bo'ladi. Spirtning kichik E_{F_s} larda degidrlanishi (bunda H_2 ajraladi) va yetarlicha katta E_{F_s} larda degidratlanish (bunda H_2 ajraladi) misol bo'la oladi (12.1-rasm).

Reaksiyaning akseptor yoki donor sinfiga mansubligini tajriba orqali bilish mumkin. Buning uchun uni: a) boshqa sharoit o'zgar-magan holda akseptor va donor kirishmalarning reaksiya tezligiga ta'siri bo'yicha; b) reaksiya tezligi va yarimo'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi orasidagi bog'lanish bo'yicha; d) reaksiya tezligi va yarimo'tkazgichning chiqish ishi o'zgarishidagi parallelizm bo'yicha tajriba ma'lumotlari asosida yechiladi.

Katalizda kollektiv va mahalliy effektlar farqlanadi. Fermi sathi xemosorblash va katalizda asosiy o'rin tutgani sababli kollektiv effektlar haqida so'z yuritiladi. Bu holda adsorblangan zarraning bir butun sifatidagi kristall panjarasi bilan o'zaro ta'siri qaraladi. Bunda panja-raning barcha elektronlari va kovaklari reaksiyada qatnashadi.

Boshqa bir holda adsorblangan zarra adsorblash markazi bilan o'zaro ta'sirlashadi, bunda adsorblangan zarra va u zarrani biriktirib olayotgan zarraning elektronlari reaksiyada qatnashadi. Bunday effekt-ni *mahalliy effekt* deyish mumkin.



12.1-rasm.

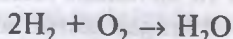
Kirishmalarning adsorbsion va katalitik xossalarga ta'siri masalasi ham kollektiv o'zaro ta'sirlanish sifatida ikki yoqlama qaralishi mumkin.

Birinchidan, kirishma tabiati va zichligi bilan Fermi sathi vaziyati bog'liq, Fermi sathiga esa sirtning adsorbsion qobiliyati va katalitik faollik bog'langan. Bunda kirishmaning ta'sir effekti naqd kollektiv effektdir.

Ikkinchidan, kirishma atomlari adsorblash va katalizda faol markazlar vazifasini bajarishi yoki aksincha, bunday markazlarni ishdan chiqarishi mumkin. Bu holda biz *mahalliy effekt* bilan ish ko'ramiz. Sharoitga qarab bu ikki effektdan biri ustun bo'lishi mumkin.

12.3. Katalitik reaksiylarning elektron mexanizmlari

Vodorodning oksidlanishi. Dastavval vodorodning oksidlanish reaksiyasini ko'raylik:



Bu reaksiyaning katalizatorlari ham *n*-tur, ham *p*-tur yarimo'tkazgichlar (ZnO , V_2O_3 , NiO , CuO va b.) bo'ladi. 12.1-rasmda reaksiyaning mexanizmi tasvirlangan.

Yarimo'tkazgich sirtida xemosorblangan kislorod atomlari bo'lib, ular elektroneytral yoki manfiy zaryadlangan holatda bo'ladi, deb hisoblaymiz. Reaksiyaning birinchi bosqichida H_2 molekulasini O^- ioniga adsorblanadi (12.1-rasm, a). Natijada sirtida H atomlari va OH molekulari vujudga keladi. Ular yo neytral, yoki H^+ va OH^- ionlar ko'rinishida bo'ladi.

Reaksiyaning ikkinchi bosqichida H atomi OH molekulasini bilan birlashadi, H_2O molekulasini desorblanadi (ajraladi).

Bu holda reaksiya tezligi doimiysi

$$K = K_0 \exp \left(-\frac{E + E_{FS}^+}{kT} \right). \quad (12.4)$$

Reaksiya tezligi kristall sirtidagi Fermi sathiga bog'liq bo'lar ekan. Demak, Fermi sathini siljitib, reaksiya tezligini boshqarish mumkin. Yuqoriga siljish reaksiyani sekinlatadi, pastga siljish uni tezlatadi. Bu reaksiya donor reaksiyalar sinfiga tegishlidir.

Tajribadan ma'lumki, vodorod atmosferasida namunani qizdirish Fermi sathini ko'taradi, katalitik faollikni kamaytiradi. Kislorod atmosferasida qizdirish Fermi sathini pasaytiradi, faollik ortadi.

12.4. Chiqish ishi, elektr o'tkazuvchanlik va katalitik faollik orasidagi bog'lanish

Bu bog'lanishning kelib chiqishi quyidagicha izohlanadi. Oldin aytilganidek, katalitik faollikni (boshqa sharoit bir xil bo'lgani holda) kristall sirtidagi Fermi sathi vaziyatiga qarab aniqlanadi. Bundan ikkita muhim xulosa kelib chiqadi.

Birinchi xulosa — katalitik faollik bilan elektronning yarimo'tkazgichdan chiqishi orasida muvofiqlik mavjud.

g — reaksiya tezligi, γ_t — termoelektron chiqish ishi, Fermi sathining o'tkazuvchanlik sohasidan uzoqligi sirtida E_{FS} , hajmda E_{FV} bo'lsin. U holda

$$g = g(E_{FS}), \quad (12.5) \quad \varphi_t = E_{FS} + \sigma + V_d \quad (12.6)$$

bunda, σ — panjarada erkin elektronning yaqinlik energiyasi, V_d — chiqish ishining dipol tashkil etuvchisi. Yuqoridagi ifodalardan:

$$\frac{dg}{d\varphi_t} = \frac{dg}{dE_{FS}} = \begin{cases} > 0, \text{ donor reaksiya holda} \\ < 0, \text{ akseptor reaksiya holda} \end{cases}. \quad (12.7)$$

Ikkinchi xulosa — katalitik faollik g va elektr o'tkazuvchanlik χ orasida muvofiqlik mavjud.

Umumiy holda:

$$\chi = \chi(E_F, E_{F_0}). \quad (12.8)$$

Elektron o'tkazuvchanlik holida:

$$\frac{d\chi}{dE_{F_0}} < 0, \quad \frac{d\chi}{dE_F} < 0. \quad (12.9)$$

Kovak o'tkazuvchanlik holida:

$$\frac{d\chi}{dE_{F_0}} > 0, \quad \frac{d\chi}{dE_F} > 0. \quad (12.10)$$

(12.5) va (12.8) ifodalardan:

$$\frac{dg}{d\chi} = \frac{dg dE_{F_0}}{(d\chi E_{F_0})}. \quad (12.11)$$

$(dE_F/dE_{F_0}) > 0$ ekanligini e'tiborga olsak, (12.10) ifodadan quyidagi natijalarga egamiz:

	n -yarimo'tkazgich	p -yarimo'tkazgich
n -reaksiya	$d\partial/dx > 0$	$D\partial/dx < 0$
p -reaksiya	$D\partial/dx > 0$	$D\partial/dx < 0$

Demak, χ o'tkazuvchanlik va ∂ kattaligi faollik orasida muayyan muvofiqlik bor. Yuqoridagi tahlil shunday xulosaga olib keladi: *yarimo'tkazgichning chiqish ishini yoki elektr o'tkazuvchanlikni o'zgartiradigan omillar (sabablar) uning katalitik faolligini ham o'zgartirishi kerak.* Ushbu muvofiqlik juda ko'p tajribalarda tasdiqlangan. Yana shuni ta'kidlaymizki, elektr o'tkazuvchanlik bilan adsorbsion qobiliyat orasida ham bog'lanish mavjud.

12.5. Turli omillarning katalitik faollikka ta'siri

12.5.1. Tashqi elektr maydon ta'siri

Yarimo'tkazgichga turli omillar bilan ta'sir ko'rsatib, uning kattalik qobiliyatini boshqarish mumkin:

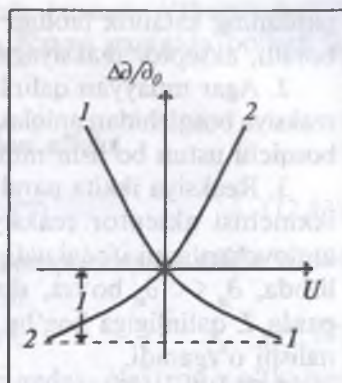
1) yarimo'tkazgich hajmiga yoki sirtiga kiritiladigan kirishma;

2) fotoelektrik jihatdan faol yorug'lik bilan kristallni yoritish;

3) tashqi elektr maydon katalizator sirtiga ko'ndalang qo'yiladi;

4) pardaning qalinligi.

Tashqi elektr maydonning katalitik faollikka ta'siri *elektrokatalitik effekt* deyiladi. Uni maydon ta'sirida reaksiya tezligining nisbiy o'zgarishi sifatida tavsiflanadi:



12.2-rasm.

$$\frac{\Delta \partial}{\partial_0} = \frac{\partial - \partial_0}{\partial_0}, \quad (12.12)$$

bundagi ∂ va ∂_0 — maydon bor va yo'q holdagi reaksiya tezliklari: $\partial = \partial(E_F)$, $\partial = \partial(E_{F0})$, E_{F0} ba E_{F0} — tegishli Fermi sathlari.

Hisobning natijasi:

$$\frac{\Delta \partial}{\partial_0} = \exp(e\Delta V_s/kT) - 1, \quad (12.13)$$

bunda $\Delta V_s = V_s - V_{s0}$ — maydon paydo qilgan sohalar egilishining o'zgarishi. Ammo ΔV_s beriladigan U tashqi kuchlanishga bog'liq. Binobarin, $\Delta \partial/\partial_0$ ham shu U ga bog'liq ravishda tekshiriladi. 12.2-rasmda akseptor (1-egri chiziq) va donor (2-egri chiziq) hollari uchun mazkur bog'lanish tasvirlangan.

Yarimo'tkazgichning adsorbsion qobiliyatiga maydon ta'siri *elektroadsorbsion effekt* deyiladi.

12.5.2. Metall sirtida hosil qilingan yarimo'tkazgich pardasining katalitik xossalari

Pardaning qalinligini L , taglik metallning chiqish ishini A deb belgilasak, $\partial = \partial(A_L)$ ba $A_L = A_L(L - A_0)$ bog'lanishlar tahlili quyidagi xulosalarga olib keladi:

1. Agar L yetarlicha katta bo'lganda pardaning sirti musbat zaryadlangan bo'lsa ($\sigma_L > 0$) yoki manfiy zaryadlangan bo'lsa ($\sigma_L < 0$) va $V_0 \geq V_L$ bo'lsa (V_L va V_0) elektronning tashqi va ichki sirdagi potensial energiyasi, σ — sirt zaryad zichligi. L kichrayganda

pardaning katalitik faolligi donor reaksiyaga nisbatan bir tekis ortib boradi, akseptor reaksiyaga nisbatan kamayib boradi.

2. Agar muayyan qalinlikdagi pardadagi reaksiya tezligini donor reaksiya bosqichidan aniqlasa, yupqaroq pardada reaksiyaning akseptor bosqichi ustun bo'lishi mumkin.

3. Reaksiya ikkita parallel yo'nalishda ketsa, ulardan biri donor, ikkinchisi akseptor reaksiya bo'ladi. ∂_a/∂_a nisbat katalizatorning tanlovchanligini ifodalaydi. $\partial_a \gg \partial_a$ bo'lsa, reaksiya akseptor yo'nalishda, $\partial_a \ll \partial_a$ bo'lsa, donor yo'nalishda ketadi. Bu tengsizliklar parda L qalinligiga bog'liq va L ning o'zgarishi bilan reaksiya yo'nalishi o'zgaradi.

4. Taglik vazifasini bajarayotgan metallning chiqish ishi A_0 qancha katta bo'lsa, pardaning donor reaksiyaga nisbatan katalitik faolligi shuncha katta.

Demak, (oksid) pardaning qalinligini o'zgartirish yo'li bilan namunaning katalitik faolligi va tanlovchanligini boshqarish mumkin.

Metall xromni qoplagan xrom oksidi pardasida vodorod peroksidi (H_2O_2) ni parchalash reaksiyasini o'rganish yuqorida bayon qilingan nazariy mulohazalarni tasdiqlagan edi.

12.5.3. Kirishmalar ta'siri

Oldin ko'rib o'tganimizdek, kristallning sirti va hajmiga kirishmalar kiritib kristall sirtidagi Fermi sathini muayyan darajada boshqarish mumkin. Fermi sathining siljishi sirtning adsorbsion qobiliyatiga, katalitik faolligiga kirishmalarning ta'sirini ifodalovchi mexanizm bo'ladi. Kirishma deganda kristall panjarasining har qanday nuqsonlari nazarda tutiladi.

Bilamizki, *akseptor* va *donor* turidagi ikki xil kirishma bo'ladi. Donor kirishma hamma vaqt Fermi sathini yuqoriga siljitadi, akseptor esa pastga siljitadi: temperatura ko'tarilganda yoki kirishma miqdori kamayganda Fermi sathi hamma vaqt taqiqlangan soha o'rtasiga yaqinlashadi.

Yarimo'tkazgichdagi kirishma miqdorini o'zgartirish yo'li bilan katalizator xossalari boshqarish mumkin. Agar reaksiya ikki (donor va akseptor) yo'nalishda borayotgan bo'lsa, kirishma kiritib Fermi sathini siljitib reaksiyani bir yo'nalishda tezlashtirish, ikkinchi yo'nalishda sekinlashtirish mumkin.

Ammo yetarlicha yuqori temperaturada (xususiy o'tkazuvchanlik sohasida) Fermi sathi taqiqlangan soha o'rtasi yaqinida bo'ladi va uni kirishma deyarli siljitmaydi.

12.5.4. Kompensatsion effekt

$$K = K_0 \exp(-E/KT) \quad (12.13)$$

Arrenius qonuni bajariladigan hollarda kompensatsion effekt o'rinli bo'ladi. Ko'pincha, kompensatsion effekt

$$\ln K_0 = A + BE \quad (12.14)$$

bog'lanish orqali ifodalanadi. Xuddi shuningdek, elektron χ o'tkazuvchanlik

$$\chi = \chi_0 \exp(-U/KT) \quad (12.15)$$

qonun bo'yicha o'zgaradi. Logarifmik masshtabda

$$\ln \chi_0 = a + bu. \quad (12.16)$$

Agar (12.14) qonuniyat mavjud bo'lsa (12.1), Arrenius qonuni egri chiziqlari bir nuqtada kesishishi kerak. E ning o'sishi bilan bir vaqtda K_0 ning o'sishini *kompensatsion effekt* deyiladi. U bunday talqin qilinadi: Arrenius qonunidagi K_0 va E kattaliklar kirishma zichligiga bog'liq, ular ma'lum darajada bir-birini to'ldiradi. Ba'zi mualliflar tasdiqlashicha, faollash energiyasi E va ko'paytuvchi K_0 bir tekis yarimo'tkazgich donalari o'lchami L ga bog'liq. Mana shundan ham kompensatsion effekt kelib chiqadi.

? Savol va topshiriqlar

1. Kataliz hodisasini tavsiflang. Katalitik faollik nima?
2. Fermi sathi katalizda qanday o'rin tutadi?
3. Katalitik reaksiyalar mexanizmlarini aytib bering.
4. Chiqish ishi, elektr o'tkazuvchanlik va katalitik faollik orasida qanday bog'lanishlar bor?
5. Katalizda tashqi elektr maydon qanday ta'sir ko'rsatadi?
6. Metall sirtidagi yarimo'tkazgichlar pardasi katalizda qanday ahamiyatga ega?
7. Kirishmalar katalizga ta'sir ko'rsatadimi?
8. Katalizda kompensatsion effektning o'zmi qanday?

XIII BOB. YARIMO'TKAZGICHLARNING HAQIQIY SIRTIDAGI JARAYONLAR

13.1. Sirt tuzilishi nuqsonlarining adsorblashdagi o'rni

Biz bu bobda yarimo'tkazgich haqiqiy real sirtining ba'zi maxsus xossalari qarang chiqamiz. Avvalo sirtning tekislik, ya'ni ikki o'lchamli davriy tuzilma deylik, unda ayrim mahalliy buzilishlar bo'lsin. Ular *sirt nuqsonlari* deyiladi.

Ular vakansiyalar yoki yot atomlar, o'z o'rnidan (tugunidan) sirtga chiqarib yuborilgan panjaraning xususiy (o'z) atomlari, yot atomlar guruhlariga bo'lishi mumkin. Nuqsonlar sirt xossalari ikki yo'l bilan:

- birinchidan, Fermi sathi orqali ta'sir ko'rsatishi mumkin, chunki u nuqsonlar tabiati va zichligiga bog'liq;
- ikkinchidan, sirt jarayonlarning o'zida sirt rekombinatsiyada, adsorblashda va katalizda nuqsonlarning bevosita qatnashishi orqali ta'sir ko'rsatishi mumkin.

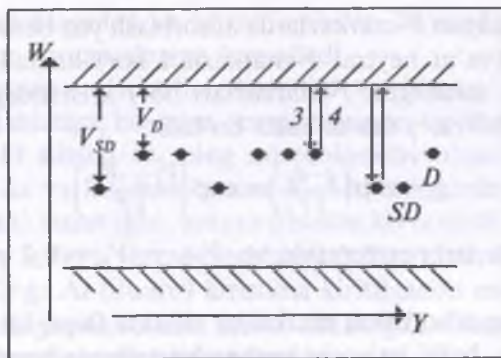
Bir xil muayyan nuqsonlar bor deb faraz qilaylik. Sirtida bunday nuqsonlarning ko'proq va ozroq zichlikli sohalari bor bo'lsin. U holda Fermi sathi turli joyda har xil vaziyatda bo'ladi:

$$E_F = E_F(y, z).$$

Bu esa sirtida energiya sohalari egrilangan bo'ladi, demakdir. Haqiqatan, nuqsonlar notekis joylashgan holda Fermi sathi E_F sirtning turli joyida turlicha bo'ladi, adsorblanish qobiliyati ham har xil bo'ladi. Yana bir misol shuki, sirtning turli joylarida xemosorbsion bog'lanish har xil bo'lishi mumkin. Bunday sirt parchalarini «akseptor» va «donor» parchalar deb nomlash mumkin.

E_F har xil joylarda katalitik faollik ko'proq yoki kamroq bo'ladi.

Biroq, nuqsonlarning notekis taqsimlanishi sababli hosil bo'lgan sirtning bir jinsli emasligi adsorblash natijasida biroz tekislanishi mumkin. Temperatura ko'tarilgan sari yuza tekislanadi. Bunda nuqsonlar ko'chadi va ularning zichligi tenglashadi.



13.1-rasm.

Endi tuzilish nuqsonida yuz beradigan adsorblashni ko'rib chiqaylik. Misol uchun M^+ va R^- ionlardan tuzilgan MR panjaradagi F -markazda bir valentli elektrmusbat C atom adsorblanadi, deylik. F -markaz yonida mahalliylashgan elektron bo'lgan bo'sh metalloid tugunidan iborat. Uni DL deb belgilaymiz. U mahalliy erkin valentlik bo'lib, o'ziga chet zarrani qabul qila oladi. Agar shu F -markazdan uning elektroni uzoqlashtirilgan bo'lsa, uni D_pL bilan belgilaymiz.

13.1-rasmda kristall sirtining energetik sohaviy chizmasi keltirilgan. Rasmda F -markazlarni mahalliy D donor sathlar, C atomlar xemosorblangan F -markazlarni esa CD mahalliy donor sathlar bilan belgilangan.

F -markazda adsorblash yuz berganda xemosorblashning «mustahkam» shakli elektron, neytral «sust» shakl esa zaryadlangan. Haqiqatan, mazkur holda xemosorblangan zarra bo'sh metalloid tuguniga bog'lanadi, u esa elektr zaryadiga qiymati teng musbat zaryadga ega deb qaraladi.

«Mustahkam» bog'lanish holida bo'sh tugunning zaryadi bu bog'lanishga jalb qilingan elektron zaryadi bilan to'ldiriladi.

«Sust» bog'lanish holida bu zaryad to'ldirilmaydi. «Mustahkam» bog'lanish — ikki elektronli bog'lanish, «sust» bog'lanish bir elektronli bog'lanish bo'ladi.

Adsorblash sharoitida D sathlar yo'qolib, ularning o'rniga CD sathlar paydo bo'ladi. Bu esa Fermi sathi siljishiga olib keladi.

Agar D va CD sathlar o'tkazuvchanlik sohasidan pastda bo'lsa, $D_pL + eL \leftrightarrow DL$, $CD_pL + eL \leftrightarrow CDL$ o'tishlar bo'lmaydi. Bu holda

neytral va ionlangan F -markazlarda adsorblash yuz beradi. Shu holda «ranglangan» (ya'ni neytral F -markazlari bor) kristallda «ranglanmagan» (ya'ni ionlangan F -markazlari bor) kristalldagiga nisbatan adsorbsion qobiliyat γ marta katta bo'ladi:

$$g = \exp\left(\frac{q-q_0}{kT}\right) = \exp\left(\frac{V_{CD}-V_D}{kT}\right) \quad (13.1)$$

(masalan, xona temperaturasi va $V_{CD} - V_D = 0,2$ eV bo'lganda $\gamma = 10^3$ bo'ladi).

F -markazlar adsorbsion markazlar sifatida faqat ishqoriy galoidlardagina emas, balki ixtiyoriy boshqa kristallarda ham uchraydi.

F -markazlar bilan bir qatorda, adsorblanish markazlari sifatida V -markazlar ham vujudga keladi.

V -markaz MR kristallardagi yonida kovak joylashgan metallardagi bo'sh sath birlashmasidir. F - va V -markazlardan tashqari, sirtidagi boshqa nuqsonlar ham adsorblash markazlari bo'la oladi. Masalan, CO molekullari uchun xemosorblangan O atomlari adsorblash markazlari bo'ladi.

Sirtning nuqsonlari adsorblash markazlari va sirtning erkin valentliklari uchun mahalliylik (o'rnashish) markazlari bo'la turib katalizda faol markazlar vazifasini bajarishi mumkin. Shunday nuqsonlar birlashmalari («ansambllari») ham shunday vazifani o'tay oladi.

Haqiqatda sirtidagi ayrim nuqsonlar va ularning birlashmalari kristall panjarasi bilan bir butunni tashkil qiladi va ularning xossalari panjaraning xossalari bilan aniqlanadi.

13.2. Fotoadsorbsion effekt

Yarimo'tkazgichning yorug'lik ta'sirida adsorbsion qobiliyatining o'zgarishi *fotoadsorbsion effekt* deyiladi. Sirtning adsorbsion qobiliyati o'zgarishini yoritish boshlangandan va u to'xtatilgandan so'ng adsorbsion hajmda kuzatiladigan bosim o'zgarishi bo'yicha aniqlanadi.

Ba'zan yoritish boshlangach bosim pasayadi (fotoadsorblash), gohida bosim ortadi (fotodesorblash). Binobarin, adsorbsion qobiliyatning nisbiy o'zgarishi yo musbat, yoki manfiy bo'lishi mumkin. Fotoadsorbsion effekt ichki fotoeffekt paydo qiladigan, ya'ni yarim-

o'tkazgichli elektronlar va kovaklar bilan boyitadigan chastotali yorug'lik bilan yoritgandagina kuzatiladi.

Fotoadsorbsion effektning kattaligi va ishorasi adsorbent va adsorbatning tabiatiga, bosimga, temperaturaga, kirishmalarga bog'liq. Masalan, ZnO sirtida O₂ ning adsorblanishi o'rganilganda xona temperaturasida va kislorod bosimi kichik bo'lganda musbat effekt (fotoadsorblash) kuzatilgan, ammo u bosim ko'tarilishi bilan kamayib borib, manfiy effekt (fotodesorblash) bilan almashingan. O'sha tizimdagi ZnO ga Al (donor) kirishma kiritilganda manfiy effekt, Li (akseptor) kiritilganda musbat effekt kuzatilgan. Haqiqiy sirt hoida effektini quyidagicha tushunish mumkin.

Sirtida uning tuzilish nuqsonlarida joylashgan elektronlar (yoki kovaklar) adsorbsion markazlar xizmatini bajaradi deb hisoblanadi va sirtning adsorbsion qobiliyati shunday markazlarning sirt birligidagi soni bilan aniqlanadi. Yoritish ta'sirida tegishli sirt sathlarining elektronlar va kovaklar bilan to'ldirilganligi o'zgaradi, shu bilan adsorbsion markazlar zichligi va sirtning adsorbsion qobiliyati o'zgaradi.

Yarimo'tkazgichda, xususan, uning sirtida yoritish paydo qilgan o'zgarishlar yoritish to'xtagandan so'ng qancha uzoq saqlanishi, ya'ni yarimo'tkazgichning «xotirasi» masalasiga murojaat qilaylik. Shuni ta'kidlash o'rinliki, «yoritish» atamasini keng tushunilsa, u faqat elektrmagnit nurlanishni (ko'rinuvchi, ultrabinafsha yorug'lik, rentgen va γ -nurlar) emas, balki zarralar (neytronlar, protonlar, elektronlar, α -zarralar) bilan nurlashni ham o'z ichiga oladi:

a) bir marta nurlanishga uchragan yarimo'tkazgich uni doimo eslab qolishi mumkin bo'lgan chegaraviy hol bo'lishi mumkin. Agar yarimo'tkazgichda yadroviy reaksiyalar paydo qiladigan og'ir zarralar bilan nurlash hollarida shunday bo'ladi. Bunda panjaraning o'z atomlari o'rnida yot atomlar paydo bo'ladi. Bu — qaytmas jarayon;

b) yarimo'tkazgich nurlanishni biror vaqt «eslaydigan», keyin esa asta-sekin «esdan chiqaradigan» hollar bilan ish ko'ramiz. Bunda nurlash yarimo'tkazgichning kimyoviy tarkibini o'zgartirmaydi, ammo panjarada tuzilish (radiatsion) nuqsonlari paydo qiladi. Bu nuqsonlar asta-sekin yo'qoladi, temperatura qancha yuqori bo'lsa, bu jarayon shuncha tez ketadi. Yarimo'tkazgich «xotirasini» yo'qotadi;

d) bevosita ionlantirish orqali yarimo'tkazgichda muvozanatsiz zaryad tashuvchilar paydo qiladigan, ammo tuzalish nuqsonlari hosil

qilmaydigan elektrmagnitik nurlash muhim ahamiyatga ega. Bu holda yarimo'tkazgich nurlash davom etib turganicha uni «xotirlaydi». Nurlash to'qnashuvdan so'ng amalda bir onda o'zining dastlabki muvozanat holatiga qaytadi. Bir qator hollarda mazkur qoida buziladi: yarimo'tkazgich nurlanish haqidagi «xotirani» qandaydir vaqt saqlab turadi. Fotoadsorbsion effektda xuddi shunday «xotira» mavjud bo'ladi. Shu holga e'tibor beramiz va ba'zi qonuniyatlarni bayon qilamiz:

1. Agar yarimo'tkazgich nurlansa, keyin nurlanish o'chirilsa va biroz vaqt o'tgach adsorblash o'tkazilsa, bu holda qorong'idagi adsorbsion qobiliyat ortadi, nurlash qancha uzoq davom etsa, bu ortish ham shuncha katta bo'ladi. Yetarlicha uzoq nurlanganda (yoritilganda) adsorbsion qobiliyat to'yinadi.

2. Dastlab nurlashga uchratilgan shunday yarimo'tkazgichning fotoadsorbsion qobiliyati kamroq bo'lar ekan, dastlabki nurlash qancha uzoq bo'lsa, u shuncha sezilarli bo'ladi. Dastlabki nurlash davomiyligi uzoq bo'lganda fotoadsorbsion qobiliyat yo'qoladi.

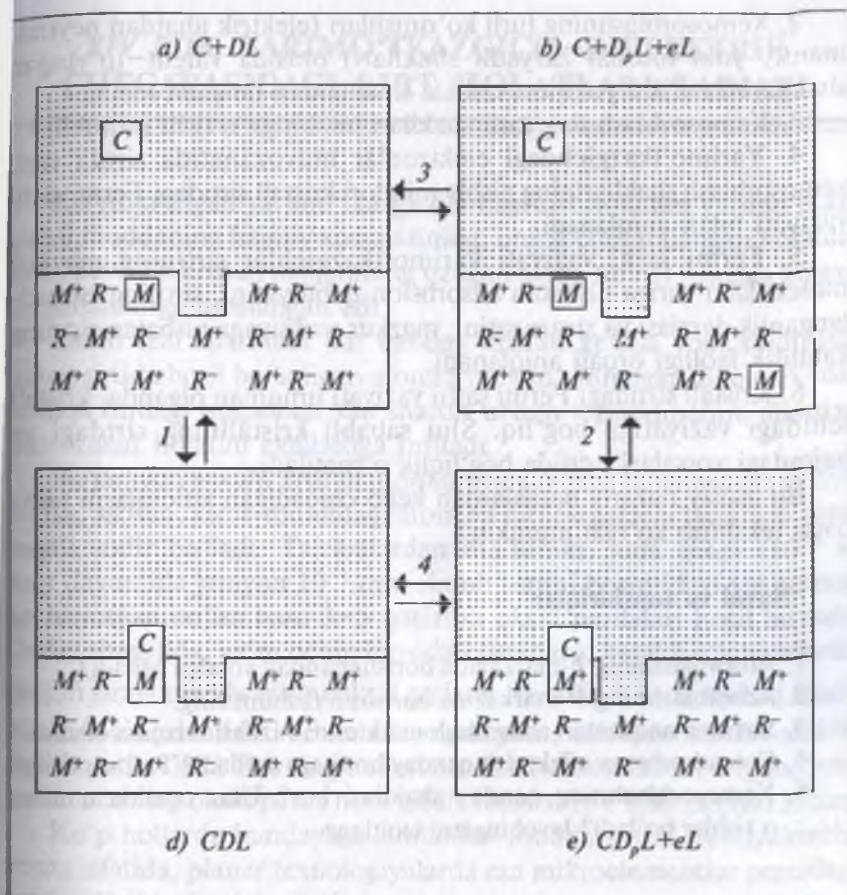
3. Qorong'ilikdagi adsorbsion qobiliyat ortganda, fotoadsorbsion qobiliyat kamayganda nurlash o'chirilgandan ancha keyin ham saqlanib qoladi. Asta-sekin bu kattaliklar o'zining dastlabki qiymatiga ega bo'ladi.

4. Fotoadsorblash jarayonida nurlash to'xtatilsa, ayrim hollarda adsorblash «inersiya» bo'yicha biroz vaqt davom etadi (ta'sirdan so'nggi effekt).

5. «Ta'sirdan so'nggi effekt» kattaligi, ya'ni nurlash to'xtatilgandan keyin adsorblangan modda miqdori temperatura yuqori bo'lganda kam bo'ladi. Yetarlicha yuqori temperaturada effekt yo'qoladi.

6. Fotoadsorblash uchun $N = N(t)$ egri chiziq ko'pincha 13.2-rasmdagi ko'rinishda bo'ladi, bunda N – adsorblangan zarralarning sirt zichligi, t – vaqt, uni nurlash boshlanishi paytidan hisob qilinadi. Ko'p tajribalarda nurlash vaqtida vujudga keladigan va nurlash to'xtatilgandan so'ng ancha vaqt saqlanadigan adsorbsion markazlarining tabiati o'rganilgan. Bunday markazlar vazifasini nurlash paydo qilgan va sirt nuqsonlarda o'tirib olgan muvozanatsiz zaryad tashuvchilar bajarishi tasdiqlandi.

Agar nurlash adsorblashdan oldin o'tkazilsa, bu markazlar oldin paydo bo'ladi. Ular nurlashgacha sirtida mavjud bo'lishi mumkin. Nihoyat, mazkur markazlar adsorblash jarayonida ham paydo bo'ladi.



13.2-rasm.

Mahalliy holatlardagi zaryad tashuvchilarda adsorblanish haqidagi tasavvur fotoadsorblash kinetikasida «induksion davr» ning mavjudligini tushunish imkonini beradi.

Xemosorblash elektron nazariyasining asosiy holatlari quyidagilardan iborat:

1. Yot molekulaning kristall panjarasi bilan o'zaro ta'siri masalasini qarab chiqish xemosorblashning turli shakllari borligini ko'rsatadi. Xemosorblanadigan zarra bilan kristall panjaraning erkin elektronlari va kovaklari bog'lanishlarda ishtirok etishi mumkin.

2. Xemosorblashning turli ko'rinishlari (elektrik jihatdan neytral, manfiy yoki musbat zaryadli shakllari) orasida valent-to'yingan shakllarini radikal yoki ion-radikal shakllardan farqlash lozim.

3. Xemosorblashning turli shakllari bir-biriga o'tishi mumkin.

4. Yarimo'tkazgichdagi elektronlar muvozanatida sirtida turli xemosorblash shakllarining nisbiy miqdori kristall sirtidagi Fermi sathi vaziyati bilan aniqlanadi.

5. Fermi sathi vaziyati yarimo'tkazgichlar sirtining mazkur molekular turiga nisbatan adsorbsion qobiliyatini, sirtning zaryadlanganlik darajasi va xususiyatini, mazkur reaksiyaga nisbatan sirtning katalitik faolligi orqali aniqlanadi.

6. Kristall sirtidagi Fermi sathi vaziyati umuman olganda, kristall ichidagi vaziyatiga bog'liq. Shu sababli kristallning sirtidagi va hajmdagi xossalari orasida bog'liqlik o'rnatiladi.

Bu asosiy nazariy natijalardan kelib chiqadigan xulosalarni tajribada tekshirib ko'rish mumkin.

Savol va topshiriqlar

1. Adsorblashning F -markazida borishi qanday amalga oshadi?
2. Adsorblashning V -markazida borishini tushuntiring.
3. Sirtning nuqsonlari adsorblash markazlari vazifasini bajara oladimi?
4. Fotoadsorbsion effekt deb qanday hodisaga aytiladi? Tushuntiring.
5. Xemosorblashning qanday shakllari bor? Ular orasida qanday o'tishlar bo'ladi? Javobingizni izohlang.

XIV BOB. YARIMO'TKAZGICH—DIELEKTRIK CHEGARASIDAGI SIRT HOLATLARI TABIATI

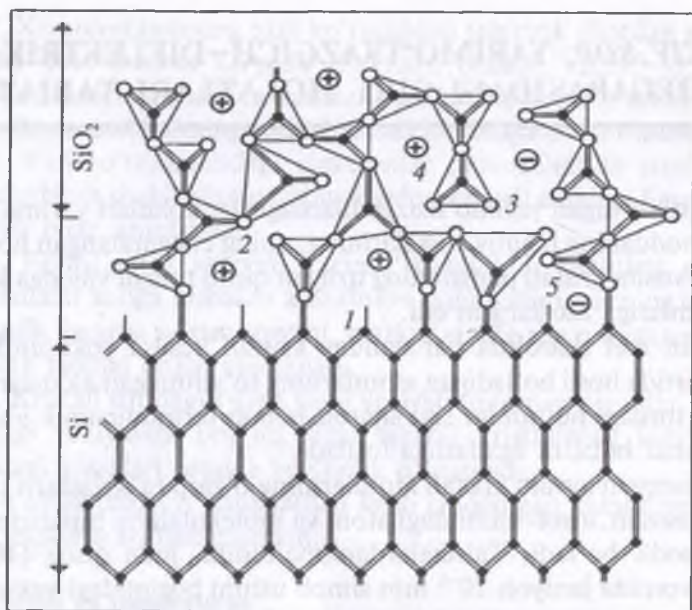
Ko'rib o'tilgan yarimo'tkazgichlardagi sirt holatlari yarimo'tkazgichli moddaning hajmiy xossalarining, uning chegaralangan holatda, ya'ni bevosita kristall panjaraning uzilgan qismi tufayli vujudga kelgan o'zgarishlariga asoslangan edi.

Lekin real sharoitda har qanday kristall kesilsa yoki sindirilsa, uning sirtida hosil bo'ladigan atomlarning to'yinmagan aloqalari yoki boshqa turdagi nuqsonlar shu sharoit uchun termodinamik jihatdan muvozanat holatini egallashga intiladi.

Bu jarayon avvalo kristall atomlarining o'zaro ta'sirlashuvi tufayli bo'lsa, asosan, atrof-muhitdagi atom va molekullarni biriktirib olish orqali sodir bo'ladi. Tajribalardan ma'lumki, juda qisqa (10^{-6} s) vaqt davomida jarayon 10^{-5} mm simob ustuni bosimidagi vakuumda kechayotgan bo'lsa ham 3—5 qatlamli oksid pardalari hosil bo'ladi. Oddiy sharoitda, ya'ni ochiq havoda kristallarni kerakli o'lchamlarda qirqish jarayonlarida esa bu oksid qatlami 50—100 Å larni tashkil etadi. Natijada biz kristall sirti deb ta'riflayotgan yuza, aslida shu modda oksididan iborat bo'ladi. Shuning uchun modda xususiyatlarini o'rganayotganda ularning oksid parda hosil qilish xossalarini e'tiborga olish lozim.

Ko'p hollarda bunday qatlamlardan modda sirtini himoyalovchi vosita sifatida, planar texnologiyalarda esa mikroelementlar orasidagi to'siq sifatida foydalaniladi.

Demak, yarimo'tkazgichli moddalarni elektrfizik xossalarini o'rganishda, ulardan turli xil elektron asboblari tayyorlashda bu qatlam xususiyatlarini, xususan, bunday yarimo'tkazgich—oksid chegarasidagi jarayonlarni bilish va ularni e'tiborga olish zarur ekan (14.1-rasm). Barcha oksidlar elektr o'tkazuvchanligiga ko'ra dielektrik bo'lgani uchun bunday tizimlar *yarimo'tkazgich-dielektrik tipidagi tuzilma* deb ataladi. Bu tuzilmaning xossasini o'rganish uchun unga metall kontaktlar qilinishi tufayli tuzilma metall-dielektrik-yarimo'tkazgich (MDY) ko'rinishiga ega bo'ladi. Bu tuzilmada dielektrik (ya'ni oksid) qatlami elektr maydoni, temperatura, radiatsiyalar ta'siriga sezgir,



14.1-rasm. Ikki o'lchamli tekislikda oksidlovchi qatlam strukturasi:

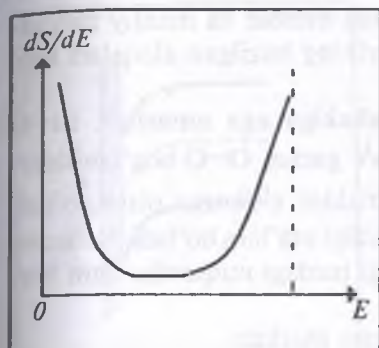
1 – tugallanmagan bog'lanish; 2 – ko'priksimon kislorod; 3 – ko'priksiz kislorod; 4, 5 – harakatchan musbat va manfiy ionlar.

yarimo'tkazgichli qatlam xossalari esa nisbatan kamroq o'zgaradi. Bunday tuzilmada tok tashuvchilarning harakati asosan yarimo'tkazgich-dielektrik chegarasining xossalariga bog'liq bo'ladi.

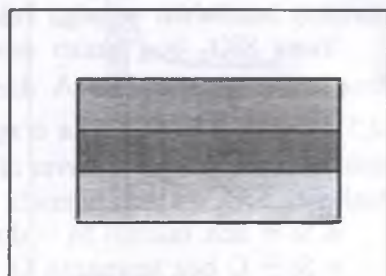
Yarimo'tkazgich-dielektrik chegarasidagi sirtidagi holatlarning paydo bo'lishiga kristall sirtidagi kislorod atomlarining diffuziyalanishi tufayli erishiladi.

Bu sohadagi sirt holatlari toza atomar sirtidagi holatlardan ancha kam ($\sim 10^{13} \text{ sm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$) va ularning energetik holatlari yarimo'tkazgichning taqiqlangan sohasida joylashgan. Bu holatlarga xos bo'lgan umumiy bir xususiyat – ularning butun taqiqlangan sohada energiyasi bo'yicha kvaziuzluksiz holdagi taqsimotidir. Ular taqiqlangan sohani ma'lum energetik oraliqda bir tekisda taqsimlanib, soha chegaralarida monoton ravishda ortib boradi (14.2-rasm).

Chegara sohasidagi bunday holatlarning paydo bo'lish mexanizmi va ularning mikroskopik tuzilishi haqida aniq bir fizik-kimyoviy



14.2-rasm.



14.3-rasm.

tushunchalar haligacha mavjud emas. Shunday bo'lsa-da, to'plangan ilmiy-amaliy ma'lumotlar asosida ular haqida umumiy tasavvur hosil qilish mumkin.

Misol uchun kremniy-dioksid kremniy rusumidagi tuzilmani ko'rsatadigan bo'lsa, kremniy sirtida SiO_2 dielektrik qatlamni hosil qilish asosan $800\text{--}1200^\circ\text{C}$ da kremniyni kislorod oqimi ostida qizdirish orqali hosil qilinadi. SiO_2 qatlamning o'sishi $\text{Si-O} \rightarrow \text{SiO}_2$ kimyoviy reaksiya orqali boradi va uning tezligi temperatura va kislorod zichligi orqali boshqariladi. Bunday diffuziya jarayonlari tufayli Si va SiO_2 qatlamlari orasida $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{SiO}_n\text{-Si}$ tipidagi o'tish qatlami vujudga kelishiga olib keladi ($n = 2-0$). Bunday o'tish qatlamining tekislikdagi ko'rinishi 14.3-rasmda berilgan. Bunday ko'rinishga o'tish sohasidagi kremniy atomlarining buzilgan valent bog'lanishlari, ya'ni elektronlari uzilib, bo'sh qolgan holatlar musbat zaryadlar manbayi bo'lib xizmat qiladi. Bunday markazlarni kremniy kristalida va SiO_2 qatlamida mavjud bo'lgan metall atomlari bilan o'zaro ta'sirlashuvi ularni qayta taqsimlanishiga olib keladi. Ayrim atomlar SiO_2 qatlam hajmiga kirib qolib, undagi elektrneyrallikni buzadi, boshqalari kremniy kristali ichida diffuziyanadi. Bunday taqsimotni belgilovchi omil segregatsiya koeffitsiyenti (η) hisoblanadi, ya'ni atomlarning Si va SiO_2 dagi

diffuziya koeffitsiyentlari nisbati $\eta = \frac{D_{\text{Si}}}{D_{\text{SiO}_2}}$. Agar $\eta < 1$ bo'lsa, SiO_2

qatlam aralashma atomni itaruvchi bo'ladi va Si ni chegaraga yaqin qismida bunday atomlar soni ko'proq bo'ladi, $\eta > 1$ bo'lsa — aksincha.

Bunday jarayonlar tufayli o'tish sohasida musbat va manfiy zaryadlangan metall ionlari, Si-O birikmalarining buzilgan aloqalari kabi tarkibiy buzilishlar vujudga keladi.

Yana SiO₂ bog'lanish aniq bir shaklga ega emasligi, Si-O bog'lanish uzunligi 1,56 Å dan 1,66 Å gacha, O-O bog'lanishlari 2,5 Å dan 2,7 Å gacha o'zgarib turishini e'tiborga olsak, o'tish sohasini aniq shaklini tasavvur qilish qiyinligi ma'lum bo'ladi. Bulardan tashqari, SiO₂ qatlami hajmida quyidagi turdagi nuqsonlar ham bor:

≡ Si - uch valentli Si - donori;

≡ Si - O bog'lanmagan O - amfoter markaz;

V₀ ≡ Si...O kislorod vakansiyasi - ikkilanma donori;

V_{Si} ≡ kremniy atomi vakansiyasi - donori;

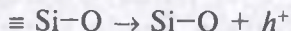
O₁ - tugunlararo kislorod - donori;

Si₁ - tugunlararo kremniy atomi - ikkilanma donori;

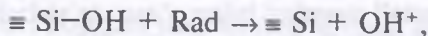
O₂, V₀, Si-H, Si: OH, M-O va boshqa komplekslar.

Kremniyda esa V, V-P, O₁, Si₁, O₂, M, M-O, O-O kabi nuqsonlar mavjuddir. Bunday nuqsonlarning mavjudligi va tashqi ta'sirlar tufayli ularning o'zaro ta'sirlashuvlari dielektrik-yarimo'tkazgich chegarasidagi sirt holatlariga ham ta'sir etadi. Mana shunday fizik-kimyoviy jarayonlar natijasida musbat va manfiy zaryadli markazlar paydo bo'ladi.

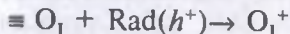
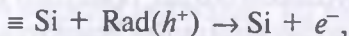
≡ Si-O bog'lanmali komplekslari erkin elektronlarni tutib olib, bo'sh o'rin - kovaklar hosil qiladi:



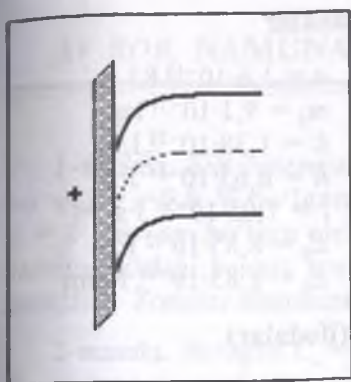
Bu esa oksid qatlamida manfiy, chegara sohasida esa musbat zaryadlar hosil bo'lishiga olib keladi. Si-SiO₂ tuzilmalari nurlantirilganda chegaraviy sohada



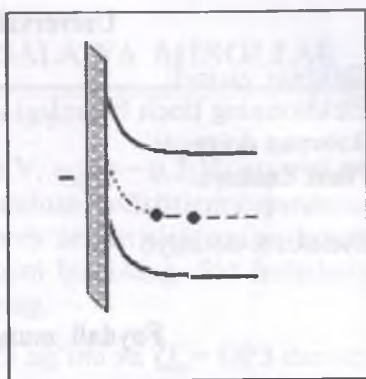
oksid qatlamda esa



reaksiyalar tufayli gidroksil, kislorod, kremniy ionlari, erkin elektronlar kabi zaryadlar hosil bo'ladi va ular sirt holatlar tabiatini belgilaydi. Agar MDY tuzilmasi tashqi elektr maydonga kiritilsa Si-SiO₂ chegarasida yarimo'tkazgich tomonida elektronlar to'planishi (boyitilishi) yoki kamayishi kuzatiladi.



14.4-rasm.



14.5-rasm.

MDY ning metall kontaktiga musbat kuchlanish qo'yilsa, bunda n -tipdagi Si sohasidagi energetik diagrammani ko'rinishi 14.4-rasmdagi kabi bo'ladi.

Kuchlanish qutblari o'zgartirilsa, ya'ni metall kontaktga manfiy kuchlanish qo'yilsa — elektronlar kamayishi kuzatiladi (14.5-rasm) va kuchlanish yana ham kattalashuvi ikkala holda ham o'tkazuvchanlikni inversiyaga olib kelishi mumkin.

Elektronlarni ko'payishidan kamayishiga o'tish chegarasida, ya'ni inversiya chegarasidagi tashqi kuchlanish kattaligi tekis soha kuchlanishi deyiladi. Si—SiO₂ chegarasidagi sirt holatlarini o'rganishning asosiy usullaridan biri MDY turidagi tuzilmalarni volt-farada, ya'ni C—V xususiyatlarini o'rganishdir. Bu usul MDY tuzilmalarining C—V xususiyatlarini o'lchab, ularni nazariy hisoblangan xossalari bilan solishtirishdan iborat. Bunday o'lchovlar asosida chegaraviy sohadagi sirt holatlarining $10^{-10} \text{ sm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ gacha bo'lgan miqdorlarni aniqlash mumkin.

Universal fizik kattaliklar

Elektron zaryadi	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl}$
Elektronning tinch holatdagi massasi	$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Bolsman doimiysi	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/kg}$
Plank doimiysi	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
	$t = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
Dielektrik doimiysi	$E_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
	$E_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/sm}$

Foydali munosabatlar (ifodalar)

$$\frac{kT}{q} (T = 300 \text{ K}) = 0,0259 \text{ V};$$

$$\frac{kT}{q} (T = 77 \text{ K}) = 0,066 \text{ V};$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J};$$

$$e^x \approx 10^{0,43x} \approx 10^{x/2,3}$$

$$\begin{array}{llll} e^1 = 2,7; & e^2 = 7,4; & e^3 = 20; & e^4 = 55; \\ e^5 = 178; & e^6 = 403; & e^7 = 1100; & e^8 = 3000; \\ e^9 = 8100; & e^{10} = 22000. & & \end{array}$$

Dielektriklarning fizik parametrlari

T.r.	Birliklari	Fizik parametrlari	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅
1.	X, eV		0,9	1,95	1,0	2,45
2.	Kg, eV	Taqiqlangan zona	8,0	5,1	8,7	4,45
3.	ϵ	Dielektrik singdiruvchanlik	3,8	6,8	9,0	27
4.	n	Sindirish ko'rsatkichi	1,48	1,97	1,77	2,2
5	E, V/sm	Elektr maydon kuchlanishi	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
6.	ρ , g/sm ³	Zichlik	2,65	3,44	3,96	8,53
7.	M, g/mol	Molekular massa	60	140	102	442
8.	α , A/V	O'sish doimiysi	5,0	—	15,5	16, 6

Metallarning termodinamik chiqish ishi

Metall	Mg	Al	Ni	Cu	Au	Ag	Pt
ϕ , eV	3,35	4,1	4,55	4,7	5,0	5,1	5,1

XV BOB. NAMUNAVIY MASALA VA MISOLLAR

1-masala. Sirt potentsiali $\varphi_{S1} = 0,3 \text{ V}$, $\varphi_{S2} = -0,2 \text{ V}$, $\varphi_{S3} = 0,5 \text{ V}$ va $\varphi_{S4} = -0,9 \text{ V}$ bo'lgan holatlar uchun solishtirma qarshiligi $\rho = 1 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan elektron-kremniy uchun elektron va kovaklarning sirdagi hajmiy konsentratsiyasini hisoblang. Sirt holatlarini aniqlang. Zonalar diagrammasini chizing.

2-masala. Berilgan $C_{sc} = \text{yar/o't OP3 sig'imi}$ va $Q_{sc} = \text{OP3 dan to'liq umumiy zaryad}$. Sirt potentsiali $\varphi_{S1} = 0$, $\varphi_{S2} = \varphi_0$ va $\varphi_{S3} = 2\varphi_0$ bo'lgan hol uchun $\rho = 10 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ p-Si uchun Q_{sc} va C_{sc} larning qiymatini toping.

3-masala. Solishtirma qarshiligi $\rho_n = 0,1 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan n-Ge uchun sirt potentsiali $\varphi_s = -0,6 \text{ V}$ ga teng bo'lganda, Q_{sc} fazoviy zaryad sohasidagi to'la zaryadni, sirt elektr maydon qiymatini E_s hamda inversiya kanalidagi kovaklar sonining ko'pligini G_R hisoblang.

4-masala. Solishtirma qarshiligi $\rho_n = 15 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan elektron kremniy (Si) va germaniy (Ge) uchun ekranlovchi Debay uzunligini hisoblang. Temperatura $T = 300 \text{ K}$ bo'lganda va elektr maydonning yarimo'tkazgich hajmiga kirib borish chuqurligi qachon Debay uzunligidan katta bo'lishligini (agar mumkin bo'lsa) ko'rsating.

5-masala. Temperatura $T = 300 \text{ K}$ bo'lganda xususiy yarimo'tkazgichlar kremniy (Si), germaniy (Ge), galliy arsenid (GaAs) va antimonid indiy (InSb) uchun ekranlovchi Debay uzunligini hisoblang va taqqoslang.

6-masala. Donorlar konsentratsiyasi $N_D = 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ bo'lgan galliy arsenidning (GaAs) fazoviy zaryadlar sohasidagi to'la zaryadini Q_{sc} va sig'imi C_{sc} ni hisoblang. Hisoblashlarni quyidagi sirt potentsial φ_s qiymatlarida amalga oshiring.

$$\varphi_s = \frac{1}{2} \varphi_0; \quad \varphi_s = 0; \quad \varphi_s = -\frac{1}{2} \varphi_0; \quad \varphi_s = -\varphi_0;$$

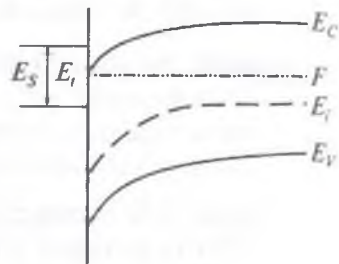
$$\varphi_s = \frac{3}{2} \varphi_0; \quad \varphi_s = -2\varphi_0; \quad \varphi_s = -\frac{3}{2} \varphi_0.$$

$T = 300 \text{ K}$ ga teng deb hisoblang.

7-masala. Xona ($T = 300\text{ K}$) va suyuq azot ($T = 77\text{ K}$) temperaturalarida kremniy (Si) va germaniy (Ge), galliy arsenid (GaAs) va antimonid indiy (InSb) uchun elektronlarning De-Broyl to'liq uzunligini hisoblang va baholang.

8-masala. Akseptorlar konsentratsiyasi $N_A = 10^{18}\text{ sm}^{-3}$ bo'lgan kovakli kremniy uchun sirt potensialining quyidagi qiymatlarida ($\varphi = 0$; $\varphi_s = \varphi_0$; $\varphi = 2\varphi_0$) sirt holatlar zaryadini Q_{ss} hisoblang. Temperatura $T = 300\text{ K}$ ga teng. $N_{ss} = 2 \cdot 10^{12}\text{ sm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ ga teng bo'lgan sirt holatlar zichligi kremniyning man etilgan sohasi bo'yicha teng taqsimlangan. Sirt holatlar zaryadini (Q_{ss}) fazoviy zaryadlar sohasidagi to'la zaryad bilan (Q_{ss}) taqqoslang.

9-masala. Solishtirma qarshiligi $\rho = 7,5\text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan elektron-kremniyning taqiqlangan sohasida $N_s = 8 \cdot 10^{11}\text{ sm}^{-2}$ konsentratsiyali yarimo'tkazgichning taqiqlangan sohasining o'rtasidan $E_i = 0,45\text{ eV}$ yuqorida joylashgan monoenergetik sirt holat joylashgan. Yarimo'tkazgichning sirtida Fermi sathi sirt holatlar energetik sathlari bilan mos



tushgan holda, yani bo'ysungan hol uchun sirt holatlarning doimiy vaqtini (τ), sirt holatlarning ekvivalent ketma-ketligi sig'imini (C_s) va qarshiligini (R_s) hisoblang. Bunda energetik sathning tutib qolish ko'ndalang kesim yuzi $S_i = 10^{-10}\text{ sm}^2$ va $T = 300\text{ K}$ ga teng.

10-masala. Solishtirma qarshiligi $\rho = 10\text{ Om} \cdot \text{sm}$ bo'lgan kovakli kremniyda uzluksiz sirt holatlar zichligi N_{si} mavjud. ($N_{ss} = 5 \cdot 10^{11}\text{ sm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$). Quyidagi o'lchash sig'imi chastotalarida $f_1 = 10^2\text{ Hz}$; $f_2 = 10^4\text{ Hz}$; $f_3 = 10^6\text{ Hz}$ sirtidagi holatlarning ekvivalent parallel sig'imi C_p va o'tkazuvchanligi G_p ni hisoblang. Bunda sirtidagi potensial qiymati $\varphi_s = -0,2\text{ V}$. Sirt holatlarning tutib qolish ko'ndalang kesim yuzasi $S_i = 10^{-15}\text{ sm}^2$ ga teng.

11-masala. Solishtirma qarshiligi $\rho = 1,5\text{ Om} \cdot \text{sm}$ li xona temperaturasida bo'lgan ($T = 300\text{ K}$) elektron germaniyda tutib qolish ko'ndalang kesim yuzasi $S_i = 10^{-16}\text{ sm}^2$ bo'lgan uzluksiz sirt holatlar mavjud. Quyidagi sirtidagi potentsiallar qiymatlarida: $\varphi_{s1} = +0,2\text{ V}$; $\varphi_{s2} = 0$; $\varphi_{s3} = -3/2\varphi_0$, sirt holatlarning doimiy vaqti τ ni hisoblang.

12-masala. Parallel sirtagi holatlarning ekvivalent o'tkazuvchanligining G_p/ω , chastotaga ω bog'lanish xossalari berilgan. Ushbu xossalarning maksimal qiymati $(G_p/\omega)_{\max} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Hz}^{-1} \text{ sm}^2$ ga teng va bu $\omega = 10^5 \text{ Hz}$ chastotaga to'g'ri keladi. Mana shu holatlar uchun sirt holatlar zichligi N_{ss} ni aniqlang. Sirt holatlarning doimiy vaqtini toping. Agar sirt konsentratsiyasi $n_{s0} = 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ bo'lsa, sirt holatlarni baholang.

13-masala. Xona temperaturasida ($T = 300\text{K}$) bo'lgan, oksidining qalinligi $d_{ok} = 1000 \text{ \AA}$ li, maydon elektrodining yuzasi $S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^2$ ga teng va solishtirma qarshiligi $\rho = 1 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ni tashkil etadigan elektron germaniy asosidagi $n\text{-Ge-SiO}_2\text{-Al}$ sistema mavjud. Mana shu MDY sistema uchun sirt potensial $\phi_s = 0$ ga teng, ya'ni «yassi sohalar» sharoitida sistemaning yassi sohalar sig'imi C_{FB} ning qiymatini hisoblang. Agar oksidning qalinligi $d_{ok} = 1 \text{ mkm}$ ga o'zgarsa, C_{FB} ning qiymati qanday o'zgaradi?

XVI BOB. BERILGAN MASALA VA MISOLLARNING YECHIMLARI

1. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

n-Si

$\varphi = 1 \text{ Om} \cdot \text{sm}$

$\varphi_{S1} = 0,3 \text{ V}$

$\varphi_{S2} = -0,2 \text{ V}$

$\varphi_{S3} = 0,5 \text{ V}$

$\varphi_{S4} = -0,9 \text{ V}$

$n_s, P_s = ?$

$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$

$\mu = 1500 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

Yechimi. Elektron va kovaklarning sirtiy konsentratsiyasi klassik ko'rinishda quyidagicha bo'ladi.

$$n_s = n_0 \cdot e^{-\beta \varphi_s}$$

$$P_s = n_0 \cdot e^{-\beta(\varphi_s + 2\varphi_0)}$$

Bundan kerakli parametrlarni topamiz.

$$n_0 = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 1} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$$

$$P_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = 6,1 \cdot 10^4 \text{ sm}^{-3}$$

$$2\varphi_0 = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} = 2 \cdot 0,0259 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,65 \text{ V}$$

$$n_{S1} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,3} = 4,5 \cdot 10^{20} \text{ sm}^{-3}$$

$$P_{S1} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot (0,3+0,65)} = 5,0 \cdot 10^{-1} \text{ sm}^{-3}$$

$$n_{S2} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,2} = 1,9 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$$

$$P_{S2} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot (-0,2+0,65)} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ sm}^{-3}$$

$$n_{S3} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,5} = 1,7 \cdot 10^7 \text{ sm}^{-3}$$

$$P_{S3} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot (-0,5+0,65)} = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$$

$$n_{S4} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,9} = 3,4 \text{ sm}^{-3}$$

$$P_{S4} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot (-0,9+0,65)} = 6,5 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$$

n_S va P_S larni n_0 , P_0 va lar bilan solishtirib quyidagi xulosalarga kelimiz:

$$\varphi_{S1} = 0,3 \text{ V bo'lganda to'yingan holat,}$$

$$\varphi_{S2} = -0,2 \text{ V bo'lganda kambag'allashgan holat,}$$

$$\varphi_{S3} = -0,5 \text{ V bo'lganda kuchsiz inversiya holat,}$$

$$\varphi_{S4} = -0,9 \text{ V bo'lganda kuchli inversiya holatlariga to'g'ri kelar ekan.}$$

2. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

KDB-10

$$\varphi_{S1} = 0, \varphi_{S2} = \varphi_0 \text{ va } \varphi_{S3} = 2\varphi_0$$

Qo'shimcha kerakli ko'rsatkichlar.

$$\mu_n = 1500 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

$$\chi_S = 11,8; n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$$

Yechimi. $\varphi_{S1} = 0$ hol uchun fazaviy zaryadlar sohasida yarimo'tkazgichning umumiy sirt zaryadi bo'lmaydi, sig'im esa yassi zonalar sig'imiga (C_{FB}) teng.

$$Q_{sc} = 0,$$

$$C_{sc} = C_{FB} = \sqrt{\frac{\epsilon_S \cdot \epsilon_0 \cdot q \cdot N_D}{kT/q}}.$$

Kerakli parametrlarni hisoblaymiz.

$$N_D = \frac{1}{q \cdot \mu_p \cdot P} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$$

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,29 \text{ V}$$

$$C_{FB} = \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,0259}} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2$$

$\varphi_s = \varphi_0$ bo'lgan hol uchun yarimo'tkazgichning sirti xususiy, ya'ni kambag'allashgan sohadan kuchsiz inversiya sohasiga o'tish chegarasi qiymatidir.

$$Q_{sc} = Q_b = \sqrt{2\xi_s \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D \cdot (\varphi_0 - kT/q)} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15} \cdot 0,26} = 9,3 \cdot 10^{-9} \frac{C}{sm^2}$$

$$C_{sc} = C_b = \sqrt{\frac{\xi_s \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_A}{2(\varphi_0 - kT/q)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{2(0,29 - 0,03)}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{F}{sm^2}$$

$\varphi_s = 2\varphi_0$ holat kuchsiz inversiya sohasidan kuchli inversiya sohasiga o'tish chegarasini belgilaydi (mos keladi).

$$Q_{sc} = Q_{sc} = \sqrt{2 \cdot \xi_s \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D \cdot 2\varphi_0} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15} \cdot 0,58} = 1,4 \cdot 10^{-8} \frac{C}{sm^2}$$

$$C_{sc} = \sqrt{\xi_s \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_A / 2\varphi_0} =$$

$$= \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,58}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{F}{sm^2}$$

3. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

n-Ge

$\rho_n = 0,1 \text{ Om} \cdot \text{sm}$

$\varphi_s = -0,6 \text{ V}$

$Q_{sc} = ? \quad E_s = ? \quad G_R = ?$

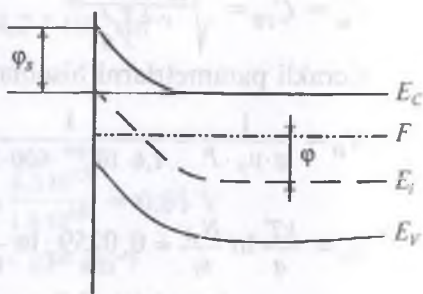
Yechimi. Kerakli qo'shimcha

kattaliklarni yozamiz:

$\mu_n = 3900 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$

$\xi_s = 16,0$



Fazoviy zaryadlar sohasiga tegishli Q_{sc} , E_s va G_R parametrlarni hisoblash uchun, yarimo'tkazgichning sirt holatlarini aniqlab olish zarur. Buning uchun kerakli parametrlarni hisoblaymiz:

$$N_D = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 0,1} = 1,6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$$

$$\varphi_0 = kT \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,6 \cdot 10^{16}}{2,5 \cdot 10^{10}} = 0,17 \text{ eV}$$

$2\varphi_0$ qiymati 0,34 eV ga teng, $2\varphi_0 = 0,34 \text{ eV}$. $\varphi_s < 0$ bo'lganligi uchun $|\varphi_s|$ absolut qiymati $2\varphi_0$ dan kichik, yani $|\varphi_s| < 2\varphi_0$ kuchli inversiya holatiga to'g'ri keladi (yuqoridagi chizmaga qarang).

Endi Debay uzunligini aniqlaymiz.

$$L_D = \sqrt{\frac{\xi_s \cdot \xi_0 \cdot kT}{q \cdot N_D}} = \sqrt{\frac{16,8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{16}}} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ sm} = 0,037 \text{ mkm}.$$

Kuchli inversiya sohasi uchun fazoviy zaryad sohasidagi to'la zaryadni Q_{SC} , asosan erkin kovaklar zaryadi tashkil etadi.

$$Q_{SC} \approx q \cdot G_R = \frac{\sqrt{2} \cdot \xi_s \cdot \xi_0 \cdot kT}{q \cdot L_D} \cdot e^{\frac{\beta(\varphi_s - 2\varphi_0)}{2}} =$$

$$= \frac{1,4 \cdot 16,8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{3,7 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{\frac{38,6(-0,6+0,34)}{2}} = 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot e^5 = 2,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{C}}{\text{sm}^2}.$$

$$G_R = Q_{SC}/q = \frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-13}} = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}.$$

$Q_{SC} = \xi_s \cdot \xi_0 \cdot E_s$ bo'lganligini hisobga olgan holda (bo'lganligi uchun), bundan E_s ni topamiz:

$$E_s = \frac{Q_{SC}}{\xi_s \cdot \xi_0} = \frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{16,8,85 \cdot 10^{-14}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ V/sm}.$$

4. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

n-Si, n-Ge

$\rho_n = 15 \text{ Om} \cdot \text{sm}$

$L_D = ?$

Yechimi. Qo'shimcha kerakli kattaliklarni yozamiz:

$$\xi_{\text{Ge}} = 16; \quad \xi_{\text{Si}} = 11,8; \quad \mu_{\text{nGe}} = 3900 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}.$$

$$\xi_{\text{nSi}} = 1500 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}; \quad n_{\text{Si}} = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}; \quad n_{\text{Ge}} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$$

Ekranlovchi Debay uzunligi L_D quyidagicha topiladi:

$$L_D = \sqrt{\frac{\xi_{\text{Si}} \cdot \xi_0}{q \cdot n_D} \cdot \frac{kT}{q}}.$$

Bundan kerakli parametrlarni hisoblaymiz.

$$N_{\text{DSi}} = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 15} = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}.$$

Shunga o'xshash germaniy uchun ham hisoblaymiz:

$$N_{\text{DGe}} = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 15} = 1,1 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}.$$

Olingan natijalarni o'z o'rniga qo'yib, L_D ni hisoblaymiz:

$$L_D = \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,8 \cdot 10^{14}}} = 2,5 \cdot 10^{-5} = 0,25 \text{ mkm}$$

Xuddi shunday germaniy uchun.

$$L_D = \sqrt{\frac{16,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,1 \cdot 10^{14}}} = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ sm} = 0,46 \text{ mkm}.$$

Kichik qiymatlarda potensialning (kT/q tartibida) elektr maydonning yarimo'tkazgich hajmiga kirib borish chuqurligi Debay uzunligi bilan aniqlanadi. Siyraklashtiruvchi katta nurlanish qiymatlarida φ_s esa, elektr maydonning yarimo'tkazgich hajmiga kirib borish chuqurligi W , Debay uzunligidan L_D katta bo'ladi. Chunki,

$$W = \sqrt{\frac{2\xi_s \cdot \xi_0 \varphi_s}{q \cdot N_D}}$$

bo'ladi va bu holda

$$\frac{W}{L_D} = \sqrt{\frac{2\varphi_s}{kT/q}} \gg 1$$

bo'ladi.

5. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

Si, Ge, GaAs, InSb

$T = 300 \text{ K}$

$n = p = n_i$

$L_D = ?$

Yechimi. Xususi yarimo'tkazgichlar uchun Debay uzunligi quyidagicha aniqlanadi:

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} \cdot \epsilon_0}{q \cdot N_D} \cdot \frac{kT}{q}}$$

Xususi yarimo'tkazgichlar Si, Ge, GaAs va InSb ning dielektrik singdiruvchanligi va xususi konsentratsiyalarining qiymatlarini topib va formulaga qo'yib L_D larni hisoblaymiz:

$$L_{DSi} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{10}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ sm} = 33 \text{ mkm}$$

$$L_{DGe} = \frac{16,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,5 \cdot 10^{13}} = 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ sm} = 0,96 \text{ mkm}$$

$$L_{DGaAs} = \frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{16}} = 1,2 \cdot 10^{-1} \text{ sm} = 1200 \text{ mkm}$$

$$L_{DInSb} = \frac{17,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{16}} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ sm} = 0,035 \text{ mkm}$$

Shunday qilib, taqqoslash natijalariga asosan, yarimo'tkazgichning man etilgan zona kengligi oshib borishi bilan Debay uzunligi L_D oshib borar ekan.

6. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

$$N_D = 10^{16} \text{ sm}^{-3}; \quad \varphi_s = \frac{1}{2} \varphi_0; \quad \varphi_s = 0; \quad \varphi_s = -\frac{1}{2} \varphi_0;$$

$$\varphi_s = -\varphi_0; \quad \varphi_s = \frac{3}{2} \varphi_0; \quad \varphi_s = -2\varphi_0; \quad \varphi_s = -\frac{3}{2} \varphi_0.$$

$$Q_{SC} = ? \quad C_{SC} = ?$$

Yechimi. Qo'shimcha kattaliklarni foydalanish uchun topib yozamiz:

$n_i = 1,1 \cdot 10^7 \text{ sm}^{-3}$ — galliy arsenidning xususiy konsentratsiyasi;

$\xi_{\text{GaAs}} = 10,9$ — galliy arsenidning dielektrik singdiruvchanligi.

Galliy arsenid uchun φ_0 va L_D larni hisoblaymiz:

$$\varphi_0 = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,026 \cdot \ln \frac{10^{16}}{1,1 \cdot 10^7} = 0,54 \text{ eV}$$

$$L_D = \sqrt{\frac{\xi_{\text{Si}} \cdot \xi_0 \cdot kT}{q \cdot N_D}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ sm} = 0,04 \text{ mikm.}$$

Fazoviy zaryadlar sohasining to'la zaryadini Q_{SC} va sig'imi C_{SC} ni hisoblash uchun φ_S ning har bir sohasi uchun taqribiy hadlardan foydalanamiz.

I. To'yingan holat uchun. Fazoviy zaryad sohasidagi to'la zaryad quyidagicha hisoblanadi:

$$\begin{aligned} Q_{SC} = Q_n &= - \frac{\sqrt{2} \cdot \xi_S \cdot \xi_0 \cdot kT}{q \cdot L_D} \cdot e^{\frac{\beta \varphi_s}{2}} = \\ &= - \frac{1,4 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{\frac{38,6 \cdot 0,27}{2}} = -8,7 \cdot 10^{-9} \exp^{(5,2)} = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kl}}{\text{sm}^2} \end{aligned}$$

Fazoviy zaryad sohasining sig'imi esa quyidagicha:

$$C_{SC} = \frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,4 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{\frac{38,6 \cdot 0,27}{2}} = 1,7 \cdot 10^{-7} \cdot e^{5,2} = 3,11 \cdot 10^{-5} \text{ F/sm}^2$$

II. Yassi sohalar holati uchun.

Bunda $Q_{SC} = 0$ bo'ladi.

$$C_{SC} = \frac{\xi_{\text{Si}} \cdot \xi_0}{L_D} = \frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{4 \cdot 10^{-6}} = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ F/sm}^2$$

III. Boyitilma holat uchun.

$$\begin{aligned} Q_{SC} = Q_b &= \sqrt{2 \xi_S \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D \left(-\varphi_S - \frac{kT}{q} \right)} = \\ &= \sqrt{2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{10} \cdot 0,24} = 2,8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Kl}}{\text{sm}^2} \end{aligned}$$

$$C_{SC} = C_b = \sqrt{\frac{\xi_{Si} \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D}{2 \left(-\varphi_S - \frac{kT}{q} \right)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16}}{2 \cdot 0,24}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2$$

IV. Xususiy yarimo'tkazgichning sirt holati uchun.

$$Q_{SC} = Q_b = \sqrt{2 \cdot \xi_{Si} \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D \left(-\varphi - \frac{kT}{q} \right)} =$$

$$= 2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16} \cdot 0,51 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Kl/sm}^2$$

$$C_{SC} = C_b = \sqrt{\frac{\xi_{Si} \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D}{2 \left(-\varphi_S - \frac{kT}{q} \right)}} = \sqrt{\frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 0,51}} = 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2$$

V. Kuchsiz inversiya holati uchun.

$$Q_{SC} = Q_b = \sqrt{2 \xi_{Si} \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D \left(-\varphi_S - \frac{kT}{q} \right)} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16} \cdot 0,78} = 4,9 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Kl}}{\text{sm}^2}$$

$$C_{SC} = C_b = \sqrt{\frac{\xi_{Si} \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D}{2 \left(-\varphi_S - \frac{kT}{q} \right)}} = \sqrt{\frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 0,78}} = 3,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{F}}{\text{sm}^2}$$

VI. Ostona potensialiga to'g'ri keluvchi holat uchun.

$$Q_{SC} = Q_b = \sqrt{2 \xi_{Si} \cdot \xi_0 \cdot q \cdot N_D (-\varphi_S)} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16} \cdot 10^8} = 5,8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Kl}}{\text{sm}^2}$$

$$C_{SC} = C_P = \frac{\xi_{Si} \cdot \xi_0}{\sqrt{2} \cdot L_D} = \frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,4 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 1,7 \cdot 10^{-7} \frac{\text{F}}{\text{sm}^2}$$

C_P — parallel sig'im.

VII. Kuchli inversiya holati uchun.

$$Q_{sc} = Q_p = \frac{\sqrt{2} \xi_{Si} \xi_0}{L_D} \cdot \frac{kT}{q} \cdot e^{\frac{\beta(-\varphi_s - 2\varphi_0)}{2}} =$$

$$= \frac{1,4 \cdot 10,985 \cdot 10^{-14}}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{\frac{38,60,27}{2}} = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kl}}{\text{sm}^2}$$

$$C_{sc} = \frac{\xi_{Si} \xi_0}{\sqrt{2} \cdot L_D} \cdot e^{\frac{\beta(-\varphi_s - 2\varphi_0)}{2}} = \frac{10,985 \cdot 10^{-14}}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{\frac{38,60,27}{2}} = 3,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{F}}{\text{sm}^2}$$

7. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

Si, Ge, GaAs, InSb.

$T_1 = 300 \text{ K}$;

$T_2 = 77 \text{ K}$

$\lambda = ?$

Yechimi. Masalaning yechilishida kerakli bo'lgan kattaliklarni topib yozamiz:

$$m_{Si}^* = 0,97 m_0, \quad m_{GaAs}^* = 0,068 m_0,$$

$$m_{Ge}^* = 1,6 m_0, \quad m_{InSb}^* = 0,013 m_0$$

Debroyl to'liq uzunligining qiymati quyidagi formula orqali hisoblanadi:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{(2m^* \cdot kT)^{1/2}}$$

Aniqlik uchun Debroyl to'liq uzunligini (λ) kremniy Si va germaniy Ge, «og'ir» elektronlar uchun hisoblaymiz. Bundagi m^* – anizotropdir.

Yuqoridagi formulada Plank doimiysi h qatnashganligi uchun hamma hisoblashlar SI birliklar sistemasida olib boriladi.

Debroyl to'liq uzunligini (λ) $T = 300 \text{ K}$ hol uchun hisoblaymiz:

$$\lambda_{Si} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{(2 \cdot 0,97 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{1/2}} = 7,7 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 77 \text{ \AA},$$

$$\lambda_{Ge} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{(2 \cdot 1,6 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{1/2}} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 60 \text{ \AA},$$

$$\lambda_{GaAs} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{(2 \cdot 0,068 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{1/2}} = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 290 \text{ \AA},$$

$$\lambda_{InSb} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{(2 \cdot 0,013 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{1/2}} = 6,69 \cdot 10^{-8} \text{ m} \approx 670 \text{ \AA}.$$

Endi $T = 77 \text{ K}$ hol uchun Debroyl to'liqin uzunligini hisoblaymiz.

Debroyl to'liqin uzunligini $T = 300 \text{ K}$ uchun hisoblanganligi sababli quyidagini topamiz:

$$\frac{\lambda(T=77)}{\lambda(T=300)} = \sqrt{\frac{300}{77}} = 2.$$

Shunday qilib, $T = 77 \text{ K}$ bo'lganda Debroyl to'liqin uzunligi ikki marta oshadi. Demak,

$$\lambda_{Si} = 154 \text{ \AA}, \lambda_{Ge} = 120 \text{ \AA}, \lambda_{GaAs} = 580 \text{ \AA}, \lambda_{InSb} = 1340 \text{ \AA}.$$

Endi Debroyl to'liqin uzunligining birliklarini tekshirib ko'ramiz:

$$[\lambda] = \frac{[\hbar]}{[m]^{1/2} \cdot [kT]^{1/2}} = \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{kg}^{1/2} \cdot \text{J}^{1/2}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{kg}^{1/2} \cdot \text{N}^{1/2} \cdot \text{m}^{1/2}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^{1/2} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{kg}^{1/2} \cdot \text{m}^{1/2}} = \text{m}$$

8. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

p-Si;

$$N_A = 10^{18} \text{ sm}^{-3};$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$N_{SS} = 2 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$$

$$\varphi_S^{(1)} = 0, \quad \varphi_S^{(2)} = \varphi_0, \quad \varphi_S^{(3)} = 2\varphi_0;$$

$$Q_{SS} = ? \quad Q_{SC} = ?$$

Yechimi. Masalani yechish uchun qo'shimcha kerakli kattaliklarni topib yozamiz: $\xi = 11,8$; $n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}$.

Sirt holatlar zaryadining qiymati quyidagicha topiladi:

$$Q_{SS} = -q \cdot N_{SS}(\varphi_s - \varphi_0).$$

Masala shartiga ko'ra fazoviy zaryad sohasidagi to'la zaryad Q_{SC} ionlashgan akseptorlar hisobiga mavjud va quyidagiga teng:

$$Q_{SC} = \sqrt{2q\xi_s \cdot \xi_0 \cdot N_A \cdot \varphi_s}.$$

Kerakli parametrlarni hisoblab topamiz:

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,026 \cdot \ln \frac{10^{18}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,46 \text{ V}.$$

$$\varphi_s^{(1)} = 0 \text{ hol uchun}$$

$$Q_{SS}^{(1)} = +qN_{SS}\varphi_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{12} \cdot 0,46 = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Kl/sm}^2;$$

$$\varphi_s^{(2)} = \varphi_0 \text{ hol uchun } Q_{SS}^{(2)} = 0 \text{ bo'ladi.}$$

$$\varphi_s^{(3)} = 2\varphi_0 \text{ hol uchun}$$

$$Q_{SS}^{(3)} = -q N_{SS}\varphi_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{12} \cdot 0,46 = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Kl/sm}^2.$$

Endi fazoviy zaryad sohasidagi to'la zaryadni hisoblashga o'tamiz:

$$Q_{SC}^{(1)} = 0$$

$$Q_{SC}^{(2)} = \sqrt{2q\xi_s \cdot \xi_0 \cdot N_A \cdot \varphi_0} =$$

$$= \sqrt{-2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{18} \cdot 0,46} = -3,9 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Kl}}{\text{sm}^2}$$

$$Q_{SC}^{(3)} = \sqrt{2q\xi_s \cdot \xi_0 \cdot N_A \cdot 2\varphi_0} =$$

$$= \sqrt{-2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{18} \cdot 0,92} = -5,5 \cdot 10^{-7} \text{ Kl/sm}^2.$$

9. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

n-Si;

$$S_i = 10^{-10} \text{ sm}^2;$$

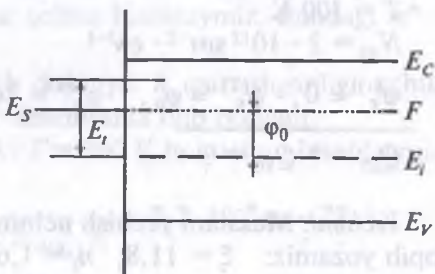
$$N_s = 8 \cdot 10^{11} \text{ sm}^2;$$

$$\rho = 7,5 \text{ Om} \cdot \text{sm};$$

$$E_i = 0,45 \text{ eV};$$

$$T = 300 \text{ K}.$$

$$C_s = ? \quad R_s = ? \quad \tau = ?$$



Yechimi. Masalani yechish uchun qo'shimcha kerakli kattaliklarni keltirib yozamiz:

$$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3};$$

$$\mu_n = 1500 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s},$$

$$m^* = 0,97m_0$$

Masalaning mohiyatini tushunish uchun zonalar diagrammasini chizamiz.

Monoenergetik sathli sirtiy holatlar uchun ularning doimiy vaqti ekvivalent sig'im va qarshiliklar quyidagi ifodalar orqali topiladi.

$$C_S = \frac{q^2}{kT} \cdot N_S \cdot f_0 \cdot (1 - f_0); \quad R_S = \frac{kT}{q^2} \cdot \frac{1}{N_S(1-f_0) \cdot \alpha_n \cdot n_{S0}};$$

$$\tau = R_S \cdot C_S = \frac{f_0}{\alpha_n \cdot n_{S0}}.$$

Endi kerakli parametrlarni hisoblaymiz:

$$f_0 = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_i - E_S}{kT}}} = \frac{1}{2}; \quad n_{S0} = n_0 \cdot e^{\varphi_S}; \quad \varphi_S = \frac{E_i}{q} - \varphi_0; \quad \varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i};$$

$$N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n}; \quad \alpha_n = S_i v_T; \quad v_T = \sqrt{\frac{2kT}{m^*}}.$$

Kerakli kattaliklarni o'rniga qo'yib hisoblaymiz:

$$N_D = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 7,5} = 5,5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3};$$

$$\varphi_0 = 0,026 \cdot \ln \frac{5,5 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,27 \text{ V};$$

$$\varphi_S = 0,45 - 0,27 = 0,18 \text{ V};$$

$$n_{S0} = 5,5 \cdot 10^{14} \exp \frac{0,18}{0,026} = 5,7 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3};$$

$$v_T = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{0,979 \cdot 1 \cdot 10^{-31}}} = 1 \cdot 10^5 \text{ m/s} = 1 \cdot 10^7 \text{ sm/s};$$

$$\alpha_n = 1 \cdot 10^7 \cdot 10^{-16} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ sm}^3/\text{s}.$$

Olingan natijalarni C_S , R_S va τ larning ifodalariga qo'yamiz. Natijada quyidagilarga ega bo'lamiz:

$$C_S = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,026} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ F/sm}^2;$$

$$R_S = \frac{0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 5,7 \cdot 10^{17}} = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ Om} \cdot \text{sm}^2;$$

$$\tau = \frac{0,5}{10^{-9} \cdot 5,7 \cdot 10^{17}} = 8,8 \cdot 10^{-10} \text{ s}.$$

10. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

$$\rho = 10 \text{ Om} \cdot \text{sm};$$

$$\varphi_S = -0,2 \text{ V};$$

$$N_{SS} = 5 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1};$$

$$f_1 = 10^2 \text{ Hz};$$

$$f_2 = 10^4 \text{ Hz};$$

$$f_3 = 10^6 \text{ Hz};$$

$$S_i = 10^{15} \text{ sm}^2.$$

$$C_p = ? \quad G_p = ?$$

Yechimi. Hisoblash uchun qo'shimcha kerakli parametrlarni yozamiz:

$$\mu_p = 600 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s},$$

$$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-3}.$$

Uzluksiz sirt holatlari uchun C_p va G_p lar quyidagicha ifodalanadi:

$$C_p = \frac{qN_{SS}}{\omega\tau_m} \arctg \omega\tau_m,$$

$$G_p = \frac{qN_{SS}}{\omega\tau_m} \ln(1 + \omega^2\tau_m^2)$$

Endi $\varphi_S = -0,2 \text{ V}$ uchun fazoviy zaryad sohasini aniqlaymiz. Demak,

$$\varphi_S = -0,2 \text{ V}; \quad \varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}; \quad N_A = \frac{1}{q\mu_p \rho p}$$

Kattaliklarni o'rniga qo'yib hisoblaymiz:

$$N_A = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{19} \cdot 600 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3},$$

$$\varphi_0 = 0,026 \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,29 \text{ V}.$$

Zonalar egriligi siyraklashtiruvchi, ya'ni $\varphi_s < 0$, lekin $|\varphi_s| < \varphi_0$, shuning uchun fazoviy zaryad sohasi siyraklashgan bo'ladi.

Sirt holatlar qayta zaryadlanishida qatnashuvchi asosiy tok tashuvchilar kovaklar hisoblanadi.

Endi kerakli parametrlarni hisoblaymiz:

$$\tau_m = \frac{1}{\alpha_n \cdot n_{SO}}; \alpha_n = v_i \cdot S_n; P_{SO} = p_0 e^{\beta \varphi}.$$

$$P_{SO} = 1 \cdot 10^{15} \exp \frac{-0,2}{0,026} = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-3}$$

$$v_i = 10^7 \text{ m/s}.$$

$$\alpha_n = 10^7 \cdot 10^{-15} = 10^{-8} \text{ sm}^3/\text{s}$$

$$\tau_m = \frac{1}{10^{-8} \cdot 4,4 \cdot 10^{11}} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}.$$

Olingan natijalarni C_p va G_p larning ifodalariga qo'yamiz.

$$C_p^{(1)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{6,28 \cdot 10^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \arctg 6,28 \cdot 10^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ F} \cdot \text{sm}^{-2}$$

$$G_p^{(1)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln(1 + 6,28 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}) = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-2}$$

$$C_p^{(2)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{6,28 \cdot 10^4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \arctg 6,28 \cdot 10^4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ F} \cdot \text{sm}^{-2}$$

$$G_p^{(2)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln(1 + 6,28 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}) = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-2}$$

$$C_p^{(3)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{6,28 \cdot 10^6 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \arctg 6,28 \cdot 10^6 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ F} \cdot \text{sm}^{-2}$$

$$G_p^{(3)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln(1 + 6,28 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}) = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-2}$$

C_p va G_p larning birliklarini aniqlaymiz:

$$[C_p] = \frac{Kl \text{ sm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}}{\text{s}^{-1} \cdot \text{s}} = \frac{Kl}{\text{sm}^2 \cdot \text{V}} = \frac{\text{F}}{\text{sm}^2},$$

$$[G_p] = \frac{Kl \text{ sm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}}{\text{s}} = \frac{Kl}{\text{sm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}} = \frac{\text{A}}{\text{sm}^2 \cdot \text{V}} = \frac{1}{\text{Om} \cdot \text{sm}^2}.$$

11. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

$n\text{-Ge}$;

$\rho = 1,5 \text{ Om} \cdot \text{sm}$

$\varphi_{S1} = +0,2 \text{ V}$; $\varphi_{S2} = 0$;

$\varphi_{S3} = -\frac{3}{2} \varphi_0$; $S_t = 10^{-16} \text{ sm}^2$;

$N_C = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$; $\mu_n = 3900 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

$\tau = ?$

Yechimi. Doimiy vaqt τ ning ifodasi quyidagicha yoziladi:

$$\tau = \frac{1}{\alpha_n n_{SO}}.$$

Endi kerakli parametrlarni hisoblaymiz:

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i},$$

$$N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 1,5} = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}.$$

O'rniga qo'ysak,

$$\varphi_0 = 0,026 \cdot \ln \frac{1,1 \cdot 10^{15}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,1 \text{ V},$$

$$\alpha_n = S_t \nu_T = 10^{-16} \cdot 10^7 = 10^{-9} \text{ sm}^3/\text{s}.$$

Sirt holatlarning qayta zaryadlanishida qatnashadigan zaryad tashuvchilarning tipini va sirt holatlarni aniqlaymiz.

Agar $\varphi_{S1} = +0,2 \text{ V}$ bo'lsa, u holda $n\text{-Ge}$ uchun bu to'yingan holatdir. Qayta zaryadlanishda erkin elektronlar qatnashadi:

$$\eta_{SO}^{(1)} = \eta_0 \cdot e^{\beta \psi_s} = 1,1 \cdot 10^{15} \cdot \exp \frac{0,2}{0,026} = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}.$$

Agar $\varphi_{S2} = 0$ bo'lsa, bu holat yassi zonalar holatiga to'g'ri keladi. Elektronli germaniy uchun sirt holatlarning qayta zaryadlanishida

$$\eta_{SO}^{(2)} = \eta_0 = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3} \text{ konsentratsiyali elektronlar ishtirok etadi.}$$

Agar $\varphi_{S3} = -\frac{3}{2} \varphi_0$ bo'lsa, n-Ge uchun bu kuchsiz inversiya holatiga to'g'ri keladi. Sirt holatlarning qayta zaryadlanishida

$$P_{SO} = n_0 \cdot e^{\beta(-\psi_s - 2\varphi_0)} =$$

$$= n_0 \cdot e^{\frac{-\beta \psi_s}{2}} = 1,1 \cdot 10^{15} \cdot \exp \frac{0,1}{2 \cdot 0,026} = 1,6 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$$

konsentratsiyali kovaklar ishtirok etadi.

Topilgan α_n va n_{SO} ning qiymatlarini o'rniga qo'yib, τ ning qiymatini topamiz:

$$\tau_1 = \frac{1}{10^{-9} \cdot 2,5 \cdot 10^{18}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ s};$$

$$\tau_2 = \frac{1}{10^{-9} \cdot 1,1 \cdot 10^{15}} = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ s};$$

$$\tau_3 = \frac{1}{10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{14}} = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ s}.$$

12. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

$$\frac{G_P}{\omega}_{\max} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ F/sm}^2$$

$$\omega = 2 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

$$n_{SO} = 10^{12} \text{ sm}^{-3}$$

$$N_{SS} = ? \quad \tau = ?$$

Yechimi. $\frac{G_P}{\omega} = f(\omega)$ bog'lanishning maksimal qiymati uchun quyidagilarni bilamiz.

$$\frac{G_P}{\omega} /_{\max} = 0,27; \omega_{\max} \cdot \tau = 1,98.$$

Shunday qilib,

$$N_{ss} = \frac{\frac{G_P}{\omega} /_{\max}}{0,27q} = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{0,27 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,6 \cdot 10^{10} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$$

$$\tau = \frac{1,98}{\omega_{\max}} = \frac{1,98}{2 \cdot 10^5} = 10^{-5} \text{ s}.$$

Endi sirt holatlarni baholash uchun τ ning kattaligidan sirt holatlarning tutib qolish ko'ndalang kesim yuzasini hisoblaymiz:

$$\tau = \frac{1}{\alpha_n n_{SO}} = \frac{1}{v_t \cdot S_t \cdot \eta_{SO}};$$

$$S_t = \frac{1}{v_t \tau \eta_{SO}} = \frac{1}{10^{-5} \cdot 10^7 \cdot 10^{12}} = 10^{-14} \text{ sm}^2 = 100 \text{ \AA}^2 = (10 \text{ \AA})^2$$

Elektronlar uchun tutib qolish ko'ndalang kesim yuzasi Kulon markaziga mos kelgani uchun sirt holatlar donor xossali sirtiy holatlarga to'g'ri keladi.

13. Masalaning yechilishi.

Berilgan:

$n\text{-Ge-SiO}_2\text{-Al}$;

$\rho_{\text{Ge}} = 1 \text{ Om} \cdot \text{sm}$;

$S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^2$; $d_{ok}^{(1)} = 1000 \text{ \AA}$

$\varphi_s = 0$; $d_{ok}^{(2)} = 1 \text{ mmk}$; $T = 300 \text{ K}$

$C_{FB} = ?$

Hisoblash uchun qo'shimcha kerakli parametrlarni topamiz va yozamiz:

$\mu_n = 3900 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$; $\epsilon_{\text{Ge}} = 16$; $\epsilon_{\text{ox}} = 3,82$

MDY strukturaning sig'imi C quyidagicha aniqlanadi.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{S \cdot C_{ox}} + \frac{1}{S \cdot C_{sc}}.$$

Bu yerda:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0}{d_{ox}}; \quad C_{SC} = \frac{\epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0}{L_D} \quad \text{va} \quad L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} \cdot \epsilon_0}{q \cdot N_D} \cdot \frac{kT}{q}}$$

ifodalar bilan topiladi.

$$N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n} \quad \text{orqali ifodalanadi.}$$

Endi kerakli parametrlarni hisoblashga o'tamiz.

$$N_D = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 1} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3};$$

$$L_D = \sqrt{\frac{16,8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,026}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{15}}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ sm};$$

$$C_{ox}^{(1)} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1 \cdot 10^{-5}} = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ F/sm}^2;$$

$$C_{SC}^{(FB)} = \frac{16,8,85 \cdot 10^{-14}}{1,2 \cdot 10^{-5}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ F/sm}^2;$$

$$C_{FB}^{(1)} = \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-8}} + \frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-7}} \right)^{-1} = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ F} = 130 \text{ pF};$$

$$C_{ox}^{(2)} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{10^{-4}} = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ F/sm}^2;$$

$$C_{FB}^{(2)} = \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-9}} + \frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-7}} \right)^{-1} = 1,65 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 16,5 \text{ pF};$$

$$\frac{C_{FB}^{(1)}}{SC_{ox}^{(1)}} = \frac{130 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-8}} = 0,76;$$

$$\frac{C_{FB}^{(2)}}{SC_{ox}^{(2)}} = \frac{16,5 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-9}} = 0,97.$$

ADABIYOTLAR

1. Г.П.Пека. Физика поверхности полупроводников. Киев, из-во Киевского университета, 1967.

2. А.Боонстра. Поверхностные свойства германия и кремния. М., «Мир», 1970

3. А.В.Ржанов. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М., «Наука», 1971.

4. Ф.Ф.Волькенштейн. Физико-химия поверхности полупроводников. М., «Наука», 1973.

5. В.Н.Овсюк. Поверхностные состояние в полупроводников. Новосибирск, из-во Новосибирского ГУ, 1980.

6. Ф.Ф. Волькенштейн. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции. И., «Наука», 1987.

7. Х.Дункен, В.Лыгин. Квантовая химия адсорбции на поверхности твердых тел. И., «Мир», 1980.

8. Б.И.Болтакс. Диффузия в полупроводниках. М., из-во «Физматгиз», 1961.

9. A.Teshaboyev, S.Zaynobiddinov, E.A.Musayev. Yarimo'tkazgichli asboblar texnologiyasi. Т., «Talqin», 2006.

MUNDARIJA

So'zboshi	3
I bob. Yarimo'tkazgichlar sirtida elektronlar holatlari	
Kirish	5
1.1. Tammning sirt holatlari nazariyasi	6
1.2. Shokli turidagi sirt sathlari	7
1.3. Boshqa turdagi sirt sathlari	9
II bob. Yarimo'tkazgichlar sirtida fazoviy zaryad sohasi	
2.1. Yarimo'tkazgichlar sirtidagi fazoviy zaryad qatlami	10
2.2. Fazoviy zaryad sohasining ko'rinishi	13
2.3. Sirdagi elektr o'tkazuvchanlik	14
2.4. Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilar harakatchanligi	16
2.4.1. Fazoviy zaryad sohasida zaryad tashuvchilarning omik harakatchanligi	16
2.4.2. Fazoviy zaryad sohasida Xoll harakatchanligi	19
2.4.3. Sirdagi sohada zaryad tashuvchilar harakatchanligini tajribada o'rganish	21
III bob. Yarimo'tkazgich sirtida adsorblash hodisasi	
3.1. Adsorblash va uning asosiy qonuniyatlari	25
3.2. Adsorblash kinetikasi	26
3.3. Adsorbsion muvozanat	27
3.4. Fizik va kimyoviy adsorblash	28
3.5. Yarimo'tkazgichlarda anion va kationni adsorblash	30
3.6. Xemosorblashning zamonaviy nazariyasi	32
3.7. Adsorblashning chiqish ishiga va o'tkazuvchanlikka ta'sirini aniqlash	33
IV bob. Yarimo'tkazgichlarda maydon effekti	
4.1. Maydon effekti usulida yarimo'tkazgichlar sirtining energetik tuzilishini o'rganish	36
4.2. Maydon effekti o'lchashlari asosida sirdagi sathlar parametrlarini aniqlash	38
4.3. Maydon effekti kinetikasi	40
4.4. Maydon effektini tekshirishning tajribaviy uslubi ..	42
4.5. Maydon effektining chastotaviy bog'lanishi	45
V bob. Yarimo'tkazgichlarda sirdagi rekombinatsiya	
5.1. Sirt rekombinatsiya tezligi	47
5.2. Sirt rekombinatsiyani o'rganish	50
5.3. Sirt rekombinatsiyasi tezligi s ni o'lchashning tajribaviy usullari	52
5.3.1. s ni impulsli usullar yordamida effektiv yashash vaqtini aniqlash	52
5.3.2. s ni magnit konsentratsiya effektini o'lchash yordamida aniqlash	55

5.3.3. Fotoo'tkazuvchanlikning spektral bog'lanishini o'lchash orqali s ni aniqlash	56
5.3.4. Sirt rekombinatsiyasi tezligi s ni fotomagnit effekt (Kikoin-Noskov effekti) asosida aniqlash	58
5.3.5. Sirt rekombinatsiyasi tezligini stasionar fotoo'tkazuvchanlikni o'lchashdan aniqlash	60
VI bob. Yarimo'tkazgichlar sirtidagi «tez» sathlar	
6.1. «Tez» sathlarning energetik spektri	62
6.2. Sirtida muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasi, ushlanishi va yopishishi	65
6.3. Sirtidagi yopishish sathlari	67
6.4. «Tez» sirtidagi sathlarning tabiati	69
VII bob. «Sekin» sirtidagi sathlar	
7.1. «Sekin» sirtiy sathlarning energetik spektri	71
7.2. Sirtida yuz beradigan sekin relaksatsion hodisalarni tajribada o'rganish	71
7.3. Geterogen sirt modeli	75
7.4. Elektronlar o'tishlari modeli	76
7.5. «Sekin» sirtidagi sathlar tabiati	77
VIII bob. Yarimo'tkazgichlarning atomar toza sirtini o'rganish	
8.1. Yarimo'tkazgichlarning haqiqiy va atomar toza sirti	79
8.2. Yarimo'tkazgichlar atomar toza sirtini hosil qilish usullari	79
8.3. «Sekin» elektronlar difraksiyasi usulida sirtning tozaligini tekshirish ..	82
8.4. Yarimo'tkazgichlar atomar toza sirtining fizik xossalari	83
8.4.1. Sirt o'tkazuvchanligi	83
8.4.2. Atomar toza sirtidan chiqish ishini o'lchashlar	84
8.4.3. Atomar toza sirtida harakatchanlik va rekombinatsiya tezligi	85
IX bob. Yarimo'tkazgichlar sirti energetik tuzilishini tekshirish usullari	
9.1. Kanal-effekt	86
9.2. Sohalar egilishi Y ni aniqlash usullari	88
9.2.1. Y ni maydon effekti va kontakt potensialini bir vaqtda o'lchashdan aniqlash	88
9.2.2. Y ni ikki kristall kontakt potensiallarini taqqoslashdan aniqlash ...	89
9.2.3. Y ning chiqish ishi va tashqi fotoeffekt chegarasini bir vaqtda o'lchashdan aniqlash	90
9.2.4. Y ni erkin zaryad tashuvchilarning yorug'lik yutishi bo'yicha aniqlash	90
9.3. Sirtidagi foto-EYK ni o'rganish	91
9.4. Maydon effektining luminescent usuli	91
9.5. Sig'im maydon effekti usuli	92
X bob. Yarimo'tkazgichli asboblarda ishlashiga sirtning ta'siri	
10.1. Sirt holatiga bog'liq bo'lgan yarimo'tkazgichli asboblarning parametrlari	95

10.2. Sirtidagi kanallar va sirt teshilishi	96
10.3. Tokni uzatish koeffitsiyentiga sirtidagi holatlar ta'siri	98
10.4. 1/f shovqinlar	99
10.5. Yarimo'tkazgich asboblari sirtini barqarorlash	100
10.5.1. Kremniyni termik oksidlash	100
10.5.2. Suv bug'ida kremniyni termik oksidlash	100
10.5.3. Quruq kislorod muhitida kremniyni termik oksidlash	101
10.5.4. Kremniy oksid pardalarini pirolitik o'tkazish usuli	102
10.5.5. Kremniyning anodli oksidlash usuli	103
10.5.6. Past temperaturali ion-plazma yordamida oksidlash	103
10.5.7. Kremniy nitrid qoplamalarini hosil qilish. Aralash qoplamalar ...	104
10.5.8. Himoyaviy dielektrik pardalarning sifatini nazorat qilish	104
10.5.9. <i>p-n</i> - o'tishlarni himoyalash usullari	106

XI bob. Yarimo'tkazgich sirti bilan hajmining o'zaro ta'siri

11.1. Yarimo'tkazgichning sirti va hajmidagi xossalari orasidagi bog'lanish ...	108
11.2. Sirtning zaryadlanishiga bog'liq effektlar	110
11.3. Zaryadlangan yarimo'tkazgichning adsorbsion xossalari	114
11.4. Sirtning yarimo'tkazgich ichida kirishmaning taqsimlanishiga ta'siri ...	117
11.5. Metall ustidagi yarimo'tkazgich pardasi	119

XII bob. Yarimo'tkazgichning katalitik ta'siri

12.1. Katalizning asosiy tushunchalari	120
12.2. Katalizda Fermi sathi	122
12.3. Katalitik reaksiyalarning elektron mexanizmlari	124
12.4. Chiqish ishi, elektr o'tkazuvchanlik va katalitik faollik orasidagi bog'lanish	125
12.5. Turli omillarning katalitik faollikka ta'siri	126
12.5.1. Tashqi elektrik maydon ta'siri	126
12.5.2. Metall sirtida hosil qilingan yarimo'tkazgich pardasining katalitik xossalari	127
12.5.3. Kirishmalar ta'siri	128
12.5.4. Kompensatsion effekt	129

XIII bob. Yarimo'tkazgichlarning haqiqiy sirtidagi jarayonlar

13.1. Sirt tuzilishi nuqsonlarining adsorblashdagi o'rni	130
13.2. Fotoadsorbsion effekt	132

XIV bob. Yarimo'tkazgich — dielektrik chegarasidagi sirtiy holatlar tabiati to'g'risida

137

Universal fizik kattaliklar. Foydali munosabatlar. Dielektriklarning fizik parametrlari. Metallarning termodinamik chiqish ishi	142
---	-----

XV bob. Namunaviy masala va misollar

143

XVI bob. Berilgan masala va misollarning yechimlari

146

Adabiyotlar

164

22.379
Ya73

Yarimo'tkazgichlar sirti fizikasi: oliy o'quv yurtlari talabalari uchun o'quv qo'llanma / A. Teshaboyev va boshq.; mas'ul muharrir M.K. Bahodirxonov; O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi. — T.: «ILM ZIYO», 2010. — 168 b.

I. Teshaboyev A. va boshq.

BBK22.379ya73

Alisher TESHABOYEV, Sirojiddin ZAYNOBIDINOV,
Sergey Igorevich VLASOV, Ibrohim Nabiyeovich KARIMOV,
Valixon Adhamovich ABDUAZIMOV

YARIMO'TKAZGICHLAR SIRTI FIZIKASI

*O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi
oliy o'quv yurtlari talabalari uchun o'quv qo'llanma sifatida
tavsiya etgan*

Toshkent — «ILM ZIYO» — 2010

Muharrir *B. Akbarov*

Rassom *Sh. Odilov*

Tex. muharrir *T. Greshnikova*

Musahhih *M. Ibrohimova*

2010-yil 2-avgustda chop etishga ruxsat berildi. Bichimi 60×84 1/16.
«Tayms» harfida terilib, ofset usulida chop etildi. Bosma tabog'i 10,5.
Nashr tabog'i 9,5. 500 nusxa. Buyurtma № 9–10.

«ILM ZIYO» nashriyot uyi, 100129, Toshkent,
Navoiy ko'chasi, 30-uy. Shartnoma № 11–10.

«PAPER MAX» bosmaxonasida chop etildi.
Toshkent, Chilonzor tum., Oltinko'l 1-tor ko'chasi, 2.

18842,40