

Министерство высшего и среднего специального  
образования Республики Узбекистан

Ташкентский государственный технический университет  
имени Абу Райхана Бирони

# *Учебное пособие*

*по курсу:*

## **Техника оптической связи и оптоэлектронные системы**

*для студентов магистратуры по специальности  
«Интегральные радиоэлектронные устройства»*



Ташкент 2004

УДК.621.391

Техника оптической связи и оптоэлектронные системы:

Учебное пособие/ Таджиев А.А., Назаров А.М. ТашТГУ, 2004.

Данное учебное пособие создано впервые на основании Государственного образовательного стандарта высшего образования 2001г.

Учебное пособие по курсу «Техника оптической связи и оптоэлектронные системы» написано на кафедре «Радиотехнические и оптоэлектронные устройства и системы» ТГТУ для студентов магистратуры по специальности «Интегральные радиоэлектронные устройства» и соответствует учебному плану данной специальности.

Рецензенты: Зав. кафедрой «Устройства радиосвязи» ГУИТ  
акад. Раджабов Г.Д.

Зав. лаб. «Прикладная физика», ИЭ АН Рuz  
к.ф.-м.н. Азизов С.

Рекомендовано к печати решением научно - методического совета Ташкентского государственного технического университета им. Абу Райхана Беруни.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработчиков средств передачи информации привлекают два основных достоинства лазерных систем: огромная информационная емкость и возможность получения остронаправленного излучения при сравнительно малых габаритах излучающих устройств. Использование средств оптического диапазона позволит повысить объем передаваемой информации на несколько порядков, а за счет высокой направленности излучения требуемая мощность оптического передатчика по сравнению с мощностью передатчика СВЧ диапазона снизится примерно до  $10^6$  раз.

В настоящее время действуют экспериментальные лазерные системы связи. Опубликовано много исследований как по разработке, так и по применению таких систем. Однако для практической реализации лазерных линий связи самостоятельного значения необходимо еще решить ряд проблем, например, таких, как создание сверхширокополосных высокоэффективных модуляторов, приемников длинноволновой части оптического диапазона, световодов с достаточно малыми потерями, разработка быстродействующих устройств сканирования лучей с целью отыскания корреспондента, а также образование большого числа каналов (т. е. обеспечение многоканальности). Нельзя считать завершенной и разработку теоретических основ лазерной связи. Специфика оптического диапазона заключается в том, что оптическая связь развивается на стыке нескольких наук. При разработке теории необходимо учитывать законы не только электромагнетизма, но также физической оптики и квантовой механики.

В настоящее время уже создано значительное количество типов оптических квантовых генераторов, серийно выпускаемых промышленностью. Эти генераторы работают в различных участках оптического диапазона: инфракрасном, видимом и ближнем ультрафиолетовом.

Достоинства систем оптического диапазона: огромная информационная емкость и высокая направленность объясняются весьма важными свойствами, присущими излучениям квантовых приборов: высокими когерентностью, монохроматичностью и стабильностью частоты. По степени когерентности квантовые излучатели не уступают другим источникам электромагнитного поля, используемым в СВЧ диапазоне, и намного превосходят все известные до сих пор в оптике источники излучения.

Благодаря высокой монохроматичности и стабильности излучения лазеры можно использовать для создания ближних, дальних и сверхдальних (в том числе космических) линий многоканальной связи. Сверхузкая направленность излучения позволяет резко снизить мощность передающих устройств. Задачей ближайшего будущего является разработка и внедрение многоканальных систем передачи информации оптического диапазона, отличающихся огромной информационной емкостью и большой помехоустойчивостью. Крупным достижением является возможность создания волоконно-оптических линий связи в условиях крупных городов для соединения городских телефонных станций, информационно-вычислительных комплексов, а в дальнейшем и для магистральных междугородных линий.

## §1.1. Общие сведения

Разумеется, нет ничего нового в использовании частот оптического диапазона для передачи информации. Визуальные методы связи широко используются не только в социальном, но и в животном мире. Человек применял оптические сигналы для передачи информации на большие расстояния еще во времена первобытной цивилизации. Днем он использовал для этого, например, дымовые сигналы или отраженный солнечный свет, а ночью сигнальные огни.

Человечество вступило в XXI столетие, называемое эрой “информационных технологий”, и дальняя связь вновь возвращается к использованию оптического диапазона для несущих частот сигналов и становится преимущественно цифровой по своему характеру.

Разумеется, некоторые специальные пользователи пожелают сохранить аналоговый способ передачи информации, а другие – использовать для передачи информации радиоволны, распространяющиеся в атмосфере или космическом пространстве.

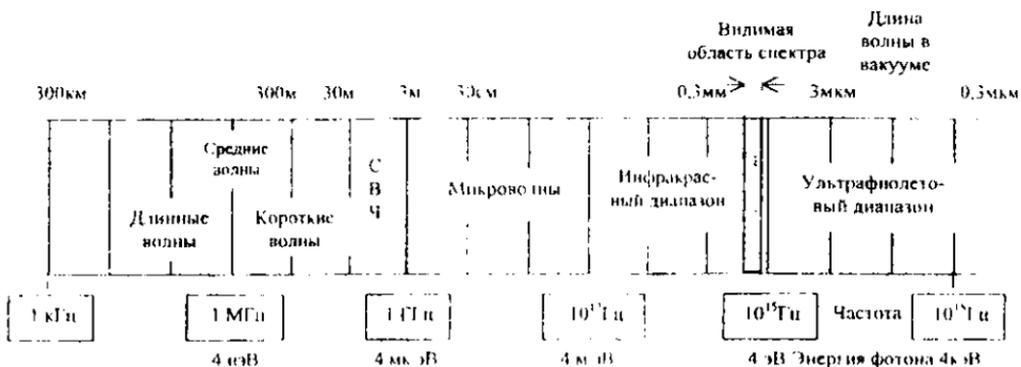
Новизна и преимущество современных оптических систем связи заключаются в том, что оптический сигнал обычно распространяется направленно по световодной системе и обеспечивает высокую информационную емкость канала связи.

Однако необходимо подчеркнуть, что эти характеристики пока еще не выше достигнутых в современной телефонной аппаратуре. Главная побудительная причина замены коаксиального кабеля и микроволновой радиосвязи соответственно на оптическое волокно и оптическую связь заключается в существенном уменьшении общей стоимости системы связи.

Достоинства систем оптического диапазона – огромная информационная емкость и высокая направленность – объясняются весьма важными свойствами, присущими излучениям квантовых приборов: высокими когерентностью, монохроматичностью и стабильностью частоты. По степени когерентности квантовые излучатели не уступают другим источникам электромагнитного поля, и намного превосходят все известные до сих пор в оптике источники излучения.

В зависимости от частоты, а также способа излучения и регистрации различают несколько видов электромагнитных волн: радиоволны, оптическое излучение. Спектр электромагнитных колебаний, а также соответствующие им энергии приведены на рис. 1.1.

Рис. 1.1. Спектр электромагнитных колебаний



### §1.2. Структурная схема оптической системы связи

Обобщенная структурная схема оптической системы связи (рис. 1.2) идентична системам связи других типов. Отличие состоит лишь в том, что используемая в таких системах несущая частота на несколько порядков выше, чем в системах радиосвязи и радиорелейных линиях.

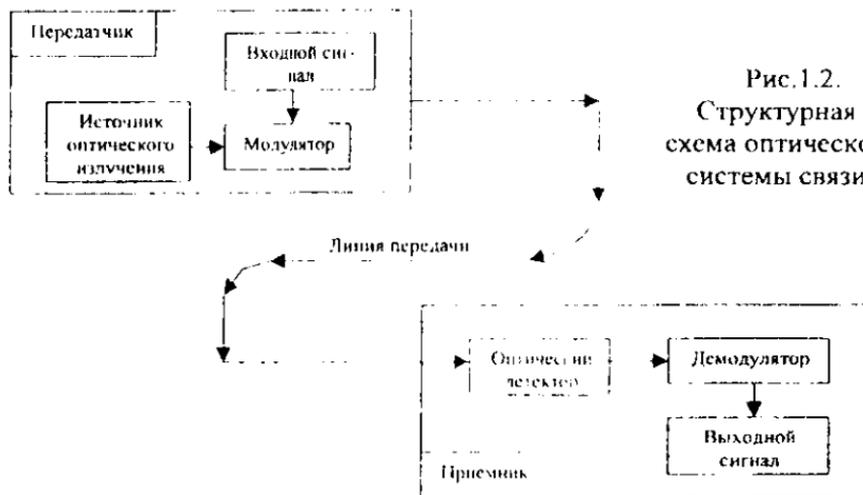


Рис.1.2. Структурная схема оптической системы связи

## Основные виды оптических систем связи

Вернемся к обобщенной структурной схеме оптической системы связи, изображенной на рис. 1.2. Она включает в себя следующие основные компоненты:

1. Источник оптического излучения.
2. Средства модуляции оптического излучения передаваемым сигналом.
3. Среду, в которой распространяется оптическое излучение.
4. Фотоприемник, который преобразует принятый оптический сигнал в электрический.
5. Электронные устройства усиления и обработки сигнала, служащие для восстановления исходного сигнала и представления его в виде, удобном для использования.

Приведенная структурная схема одинаково пригодна как для аналоговых, так и цифровых систем связи, использующих направленную или открытую передачу оптического излучения. Применение оптических волокон для передачи оптических сигналов позволяет реализовать очень ограниченное число комбинаций, разумно сочетаемых источников излучения и фотоприемников различных типов. В качестве излучателей можно назвать полупроводниковые источники излучения, а в качестве фотоприемников — полупроводниковые фотодиоды. Большим достоинством полупроводниковых светодиодов и лазеров как источников излучения является простота осуществления прямой модуляции излучаемой мощности.

При использовании оптического излучения, распространяющегося в свободном пространстве, число возможных комбинаций источников излучения, фотоприемников и методов модуляции значительно больше. Основное требование для излучателей — высокая интенсивность излучения, а это обычно означает, что требуется использовать лазер. В таком случае возникает необходимость во внешних устройствах модуляции лазерного излучения, если только не применен полупроводниковый лазер. Затухание оптического сигнала на пути распространения часто изменяется, приводя к флуктуациям уровня мощности сигнала на входе приемника. В аналоговых системах связи это приводит к невозможности использования прямых методов модуляции мощности излучения, и поэтому обычно применяют поднесущую частоту. В приемнике могут быть применены как полупроводниковые фотодиоды, так и фотоумножители, однако выбор типа фотодетектора зависит от длины волны, на которой он должен работать, а также от требований к габаритам приемника.

К числу двух самых важных технических характеристик канала связи относятся его информационная пропускная способность и максимальное расстояние между ретрансляторами. Информационная пропускная способность канала связи определяется шириной полосы частот, в которой передается сигнал, и отношением сигнал/шум в приемнике. Проанализируем влия-

ние каждого из этих факторов.

Полоса частот, в которой передается сигнал, может быть ограничена почти в любой точке системы связи допустимой скоростью модуляции источника излучения; модулятором; средой, в которой распространяется сигнал (если среда обладает дисперсией, то это приведет к искажению формы сигнала в процессе его распространения); фотодетектором; электронными элементами приемника.

На практике без особых трудностей можно реализовать модуляцию светодиодов частотами до 100 МГц, а полупроводниковых лазеров — вплоть до 1 ТГц. Имеющиеся в настоящее время полупроводниковые *p-i-n* и лавинные фотодиоды способны детектировать оптические сигналы с частотой модуляции свыше 1 ТГц. Однако использование самых высоких указанных частот требует разработки совершенно нового весьма сложного усилителя для приемника.

Самым важным является то обстоятельство, что оптическое волокно представляет собой дисперсионную среду и в процессе распространения по нему световых импульсов последние расширяются, а аналоговые оптические сигналы подвергаются фазовым искажениям. В оптических системах связи волокно ведет себя как фильтр нижних частот, частота среза которого обратно пропорциональна расстоянию распространения, т. е. его длине. Поэтому оптическое волокно можно характеризовать параметром, представляющим собой произведение ширины полосы пропускания на расстояние. В зависимости от типа волокна и характеристики используемого источника излучения это произведение может быть меньше 10 МГц · км или больше 10 ТГц · км.

В открытых системах связи, где средой распространения оптических сигналов является воздух или свободное космическое пространство, не наблюдается значительной дисперсии и, следовательно, отсутствуют обусловленные ею ограничения полосы пропускания системы связи. Число вариантов построения таких систем связи столь велико, что их рассмотрение здесь нецелесообразно.

### §1.3. Отношение сигнал-шум в системах связи

Другой важный параметр системы связи — отношение сигнал-шум определяется эффективным уровнем шума на входе усилителя приемника и полезной мощностью оптического сигнала на входе фотодетектора. Отличительная особенность оптических систем связи заключается в том, что шум приемника содержит составляющую, прямо пропорциональную мощности принимаемого оптического сигнала. Это так называемый дробовой (фотонный) шум, характерный для процесса детектирования, ограничиваемого квантовым шумом. Поэтому в большинстве обычных оптических систем связи, в которых используется модуляция оптического излучения по мощности, уровень шума зависит от величины сигнала. Важно отметить, что шум

приемника обычно минимизирован, однако следует иметь в виду, что он увеличивается обычно пропорционально ширине полосы частот, занимаемой сигналом.

Мощность поступающего в приемник сигнала зависит от мощности, излучаемой передатчиком, и затухания в канале связи. Выше уже указывалось, что уровень затухания, который мог бы быть достигнут, является одним из ключевых параметров, определяющих возможности использования оптических систем связи. Весьма желательно, чтобы процессы преобразования сигналов из одного вида в другой (электрического в оптический в излучателе и оптического в электрический в фотоприемнике) происходили с возможно более высокой эффективностью (КПД). К сожалению, КПД источников оптического излучения весьма низок.

В аналоговых системах связи отношение сигнал-шум непосредственно определяет качество канала связи. В цифровых системах оно определяет вероятность ошибки при принятии решения о том, был передан импульс или нет. Удобно выражать значения различных уровней мощности оптического сигнала в относительных единицах, например в дБм, которые характеризуют уровень мощности по отношению к 1 мВт. Такое обозначение общепринято в технике связи.

Типичный уровень мощности, который может быть введен в ступенчатое волокно с помощью светодиода, составляет 50 мкВт ( - 13 дБм). При использовании полупроводникового лазера он может быть увеличен до 1 мВт (0 дБм). Минимальная мощность на входе приемника, обеспечивающая достаточно низкий коэффициент ошибок, обычно равна 0.1 вВт/(Мбит/с). В качестве примера рассмотрим систему связи с информационной пропускной способностью 10 Мбит/с. В этом случае требуемый уровень мощности на входе приемника должен быть порядка 1 вВт ( - 60 дБм). Мы должны предусмотреть дополнительную мощность на потери в волокне и на системный запас по мощности. Последний, равный 10 дБ, вполне достаточен. При этом получается следующее распределение мощности источника излучения:

Таблица 1.1.

Распределение мощности источника излучения	Светодиод	Лазер
Мощность передатчика	-13 дБм	0 дБм
Максимальная мощность, требуемая на входе приемника	-60 дБм	60 дБм
Системный запас по мощности	10 дБ	10 дБ
Допустимые потери мощности в волокне	+37 дБ	+50 дБ

При коэффициенте затухания в волокне 5 дБ/км использование светодиода позволит устанавливать регенераторы через 7.4 км, а лазера - через

10км. Само собой разумеется, что дисперсионные характеристики волокна должны быть согласованы с требуемой скоростью передачи информации на этих расстояниях. Следовательно, дисперсия волокна должна быть достаточно малой, чтобы обеспечить величину произведения скорости передачи информации на расстояние, равную  $74 \text{ (Мбит/с)} \cdot \text{км}$  в первом случае и  $100 \text{ (Мбит/с)} \cdot \text{км}$  во втором. Как будет показано позднее, значения затухания  $5 \text{ дБ/км}$  и дисперсионного предела  $70 \dots 100 \text{ (Мбит/с)} \cdot \text{км}$  представляются очень скромными, если сравнить их с характеристиками стандартных систем связи, использующих наиболее совершенные типы оптического волокна. Во многих разработанных к настоящему времени оптических системах связи, достигнуты значительно большие расстояния между ретрансляторами, чем в рассмотренном примере.

#### Контрольные вопросы

1. Расскажите о спектре электромагнитных колебаний.
2. Назовите основные компоненты, входящие в оптические системы связи.
3. Какими достоинствами обладают полупроводниковые диоды как источники излучения?
4. Что из себя представляет информационная пропускная способность?
5. Какие требования предъявляются к излучателям?
6. Как ведет себя волокно в оптических средах?
7. Что такое дробовой шум, характерный для детектирования?
8. Укажите уровень мощности светодиода в ступенчатом оптическом волокне?
9. Что такое отношение сигнал-шум системы связи?
10. Как распределяются мощности излучения в случае применения светодиода и лазера?

## Глава 2            Квантовые системы

### §2.1. Основное свойство и характеристика квантовых систем

*Квантовой системой* (или *микросистемой*) называется совокупность элементарных частиц вещества – молекул, атомов, электронов, взаимодействующих между собой и с внешним электромагнитным полем.

Основным свойством квантовых систем является дискретность (прерывность) энергетических состояний, т. е. внутренняя энергия их может иметь лишь строго определенные квантовые значения. Примеров, доказывающих прерывность состояний микросистем, можно было бы привести множество. Однако прежде чем этот факт был установлен, прошли многие годы. Ученые размышляли, дискутировали. В частности, Н. Бор, будучи твердо убежден в том, что “электронное строение атома Резерфорда управ-

ляется с помощью кванта действия”, писал: “По законам механики, чтобы электрон в планетарном атоме Резерфорда не упал на ядро, он должен вокруг него вращаться. В то же время по законам электродинамики он должен при этом излучать энергию и в конце концов все равно упасть на ядро. Нужно запретить ему падать на ядро!”. Рассуждая таким образом, он сформулировал свои знаменитые постулаты, суть которых заключается в том, что в атоме существуют орбиты, вращаясь по которым, электрон не излучает; и излучение же происходит только при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую.

Современная теория, как мы увидим далее, не пуждается в таком утверждении и вообще не считает дискретность состояний обязательным признаком квантовой системы. Тем не менее для определенных условий постулаты Бора и до сего времени являются справедливыми.

Энергия атома определяется расстоянием между электроном и ядром: чем дальше электрон от ядра, тем большей энергией обладает он, а значит, и вся квантовая система. Высший уровень энергии соответствует отрыву электрона от атома — это уровень *ионизации*. Если электрон находится на самой внутренней орбите, его энергия (*и* энергия атома) будет наименьшей. Такое состояние атома называется *основным* или *нормальным*. Остальные уровни соответствуют *возбужденным* состояниям атома.

В реальных условиях приходится иметь дело с микросистемами, состоящими из очень большого числа атомов или молекул. Поэтому необходимо учитывать взаимное влияние атомов и их взаимодействие с внешним электромагнитным полем. В результате взаимодействия частиц и вследствие их теплового хаотического движения изменяются их положения и расширяются уровни энергии. Вместо фиксированных значений энергии появляются целые области или полосы с непрерывным ее значением.

Если квантовая система находится в состоянии термодинамического равновесия, среднее число атомов на том или ином уровне, т. е. *численность уровня*, подчиняется закону Больцмана:

$$N_i = N_0 \exp\left\{-\frac{W_i - W_0}{kT}\right\}, \quad (2.1)$$

где  $N_i$  — число частиц на уровне с энергией  $W_i$ ;  $B$  — множитель, зависящий от абсолютной температуры  $T$ ;  $N_0$  — общее число частиц данного рода в квантовой системе;

$k$  — постоянная Больцмана;  $W_0$  — начальный (основной) уровень энергии квантовой системы.

Прологарифмировав соотношение (2.1) и решив его относительно  $T$ , получим  $T = -(W_i - W_0)/(B k \ln N_i/N_0)$ .

Обычно на верхнем уровне энергии  $W_i$  всегда меньше частиц, чем на нижнем [это видно из формулы (2.1)], поэтому логарифм — отрицательная величина, а температура — положительная. В оптических квантовых генераторах (ОКГ), как мы увидим далее, создаются условия, когда на верхнем энергетическом уровне находится больше частиц, чем на нижнем. Тогда логарифм принимает положительное значение ( $N_i/N_0 > 1$ ), а температура ста-

новится отрицательной.

## §2.2. Характеристики квантовых систем

Отрицательная температура характеризует неравновесные системы, которые называются *системами с инверсной населенностью*. Термическое равновесие восстанавливается при переходе электронов с верхних, возбужденных, состояний на нижнее, основное. Эти переходы могут совершаться спонтанно (самопроизвольно) по истечении  $10^{-5}$  -  $10^{-10}$  с или под действием внешних сил (вынужденно). Вынужденные переходы называются еще *стимулированными* или *индуцированными*.

В основе принципа работы ОКГ лежит явление вынужденного, или индуцированного, излучения. При исследовании процессов, происходящих в ОКГ, главными являются два вопроса: как обеспечить возбужденное состояние вещества, а значит, и возможность усиления электромагнитных волн; какие процессы происходят при взаимодействии электромагнитного поля с веществом. Полный анализ этих вопросов требует привлечения квантовой теории, которая наиболее точно описывает динамику микросистем. Однако в той или иной задаче можно использовать приближенные методы, в частности статистический подход к анализу квантовомеханических явлений. В этом случае исходными данными являются система энергетических уровней и вероятности переходов между ними.

Квантовые переходы между состояниями системы описываются кинетическими уравнениями, определяющими изменение во времени населенности уровней, плотности энергии (фотонов) в веществе. Решение системы кинетических уравнений позволяет проанализировать механизм процессов возбуждения активной среды, определить условия, при которых возможно усиление и генерирование колебаний, выбрать оптимальные параметры ОКГ и т. д.

Достоинства статистического метода - простота математического аппарата, тесная связь математического исследования с физической, качественной картиной процесса. Вместе с тем этот приближенный метод не позволяет детально проанализировать спектр колебаний, квантовые флуктуации поля и излучения и др. Строгое решение этих задач возможно только при использовании квантовой теории.

## §2.3. Взаимодействие квантовых систем с электромагнитным полем

Процессы излучения и поглощения энергии представляют результаты взаимодействия квантовых систем с электромагнитным полем. В зависимости от определенных условий квантовые системы могут изменять свои энергетические состояния. При переходе из возбужденного состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией происходит излучение. Частота

колебаний, излучаемых квантовой системой, определяется разностью энергий начального и конечного состояний и вычисляется по формуле  $\omega_{21} = (W_2 - W_1)/\hbar$ , где  $\omega_{21}$  — частота излучаемых колебаний;  $W_2, W_1$  — энергия верхнего и нижнего стационарных состояний.

При поглощении кванта энергии происходит обратный процесс: из состояния с меньшей энергией  $W_2$  система переходит в состояние с энергией  $W_1$ , поглощая излучение с частотой  $\omega_{12} = \omega_{21}$ .

Причиной изменения состояния энергии квантовой системы являются возмущающие воздействия. Если эти изменения происходят под воздействием внешнего электромагнитного поля, их называют *индуцированным излучением (поглощением)*, если самопроизвольно, — *спонтанным*. Причина последних — внутренние флуктуации, природа которых детально еще не раскрыта.

Определение вероятности переходов возможно при решении уравнения Шрёдингера. Однако квантовомеханический подход к анализу переходов в квантовой системе, хотя и позволяет многосторонне оценить процессы излучения и поглощения энергии и учесть все особенности процессов, в математическом отношении весьма сложен, и его использование в инженерной практике затруднительно.

Вместе с тем еще до создания современного математического аппарата квантовой механики Эйнштейном был предложен термодинамический подход к анализу квантовых явлений. Методика Эйнштейна в литературе носит название *вероятностного метода*. Применение этого метода позволяет составить систему кинетических уравнений, определяющих количество переходов в квантовой системе, и рассмотреть ряд основных вопросов кинетики и излучения.

Проанализируем процессы, происходящие в квантовой системе, следуя методике Эйнштейна. Пусть имеется система (рис. 2.1), состоящая из двух энергетических уровней  $W_1$  и  $W_2$ . В этих энергетических состояниях находятся соответственно  $N_1$  и  $N_2$  частиц. Полагаем, что совокупность частиц расположена в электромагнитном поле с плотностью энергии  $\rho$ , под действием которого происходят переходы.

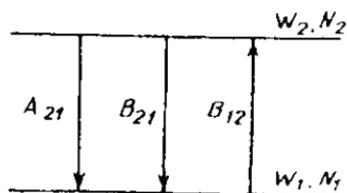


Рис. 2.1

Вероятность переходов между рассматриваемыми уровнями характеризуется постоянными коэффициентами  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  и  $B_{12}$ , которые получили название *коэффициентов Эйнштейна*. Рассмотрим физические соображения, на основании которых он ввел эти коэффициенты.

Вероятность спонтанного излучения не зависит от плотности энергии внешнего электромагнитного поля, она должна зависеть лишь от времени: чем больше промежуток времени, тем больше вероятность спонтанного перехода с верхнего уровня на нижний.

Для вероятности спонтанного перехода со второго уровня на первый за время  $dt$  получим величину

$$d\nu_{21}^{sp} = A_{21} dt. \quad (2.2)$$

Из выражения (2.2) следует, что коэффициент Эйнштейна  $A_{21}$  представляет вероятность перехода за единицу времени.

Индукированные излучение и поглощение возникают под действием внешнего электромагнитного поля. Физически очевидным является то, что вероятность этих процессов должна быть пропорциональна плотности энергии электромагнитного поля  $\rho$  и времени. Поэтому для вероятностей индуцированного излучения можно записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} d\nu_{21}^{in} &= \rho B_{21} dt \quad \text{для переходов } 2 \rightarrow 1; \\ d\nu_{12}^{in} &= \rho B_{12} dt \quad \text{для переходов } 1 \rightarrow 2. \end{aligned}$$

Физический смысл коэффициентов  $B_{21}$  и  $B_{12}$  состоит в том, что они представляют вероятности индуцированного излучения или поглощения за единицу времени, рассчитанные для единичной плотности электромагнитного поля.

Если известны вероятности переходов, то нетрудно составить уравнения, определяющие изменение количества частиц на первом и втором энергетических уровнях.

Изменение частиц  $dN_2$  на втором уровне за время  $dt$

$$dN_2 = -N_2(A_{21} + \rho B_{21}) dt + N_1 B_{12} \rho dt. \quad (2.3)$$

Количество частиц на втором уровне уменьшается за счет спонтанного и индуцированного излучений и увеличивается за счет поглощения энергии частицами, находящимися на первом уровне, и перехода их на второй уровень.

Аналогично можно получить уравнение и для изменения частиц на первом уровне:

$$dN_1 = -N_1 \rho B_{12} dt - N_2(A_{21} + \rho B_{21}) dt. \quad (2.4)$$

Уравнения (2.3) и (2.4), определяющие изменение количества частиц на энергетических уровнях, носят название *кинетических*.

В этих уравнениях непосредственно не видна квантовая природа явлений; она скрыта в вероятностных коэффициентах  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  и  $B_{12}$ . Естественно, что в рамках вероятностного метода эти коэффициенты нельзя определить расчетным путем. Детально анализируя состояние квантовой системы, Эйнштейн получил соотношения, связывающие коэффициенты  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  и  $B_{12}$  и позволяющие вычислить их по экспериментальным данным:

$$B_{21} = (g_1/g_2) B_{12}; \quad (2.5)$$

$$B_{12} = \frac{\pi^2 c^4}{\eta \omega_{21}^3 \Lambda \omega_{21}} A_{21}, \quad (2.6)$$

где  $g_1$ ,  $g_2$  — статистические веса первого и второго уровней (кратности вырождения);  $c$  — скорость распространения света;  $\omega_{21}$  — частота перехода;  $\Lambda \omega_{21}$  — полоса частот, в пределах которой происходит переход. Обычно экспериментально определяют  $A_{21}$ ,  $\omega_{21}$ ,  $\Lambda \omega_{21}$  после чего рассчитывают осталь-

ные коэффициенты.

Практическая ценность вероятностного метода заключается в его физической наглядности и математической простоте. Он был предложен Эйнштейном лишь на основе физических соображений. В соответствии с современной теорией он является следствием более полной квантовой теории.

## §2.4. Влияние переходов в системе на плотность энергии внешнего поля

Следует отметить, что переходы могут быть *излучательными* (с излучением электромагнитной энергии в виде фотона) и *безизлучательными* (с выделением теплоты, например, в кристаллической решетке, в материале стенок газоразрядных приборов). Излучательные переходы еще носят название *оптических* (все остальные переходы — тепловые и др. — *неоптические*).

В теории ОКТ представляет интерес изучение макросистем, состоящих из  $M$  гождественных микросистем (например, атомов и молекул), обладающих отдельным спектром энергетических состояний. Такой макроскопической системой является активная среда (или активное вещество) ОКТ. Состояние макросистемы можно определить через статистическое распределение составляющих ее микросистем по стационарным энергетическим состояниям.

Для большинства ОКТ наиболее важным является рассмотрение ансамбля слабозаимодействующих микрочастиц. В этом случае макросистема может быть охарактеризована тем же энергетическим спектром, что и каждая отдельная микросистема (атом, молекула).

Изолированная макросистема, находящаяся при постоянной температуре  $T$ , стремится к некоторому определенному вероятному состоянию, распределению микросистем по энергетическим уровням. Наиболее вероятное состояние системы — это состояние с наименьшей энергией, так называемое *равновесное*.

Отношение населенностей двух уровней в равновесном состоянии определяется в соответствии с распределением Больцмана

$$N_i = N N_n \exp\left\{-\frac{W_i - W_n}{kT}\right\}$$

Равновесное состояние является динамическим равновесием. В системе непрерывно происходят переходы с выделением и поглощением энергии. Поглощая энергию, частицы переходят из основного состояния в возбужденное. Через некоторый промежуток времени частица спонтанно возвращается в основное состояние. Среднее время нахождения частицы в возбужденном состоянии называется *временем жизни*. Время жизни частицы есть величина, обратная коэффициенту Эйнштейна для спонтанного излучения:  $T_{21} = 1/A_{21}$ . Для большинства возбужденных состояний время жизни составляет  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  с. Однако имеются такие состояния, время жизни в которых

значительно больше и достигает примерно  $10^{13}$  с. Такие состояния называются *метастабильными*. На этих уровнях происходит “накопление” частиц, увеличение населенности сверх равновесной.

Изолированная система частиц, находящаяся в любом состоянии, отличающемся от распределения Больцмана для данной температуры, является неравновесной и будет стремиться к состоянию равновесия. Процессы возврата системы в равновесное состояние называются *релаксационными*.

Рассматривая переходы в квантовой системе под воздействием внешнего поля, мы не касались вопроса, каким образом влияют переходы в системе на плотность энергии внешнего поля.

Контрольные вопросы:

1. Что называют квантовыми системами?
2. Что такое система с инверсной населенностью?
3. Что лежит в основе работы ОКГ?
4. Объясните индуцированные и спонтанные излучения.
5. В чем заключается вероятностный метод анализа квантовых явлений?
6. Что вы знаете о коэффициентах Эйнштейна?
7. Какая система частиц является неравновесной?
8. Что такое время жизни?
9. Какие состояния называются метастабильными?
10. Когда происходит ненаправленное излучение?

## Глава 3

### Световоды

#### §3.1. Оптическое волокно (световоды)

Типичное оптическое волокно с оболочкой состоит из стеклянной или кварцевой сердцевины, диаметр которой равен 4 - 100 мкм. Сердцевина окружена стеклянной, кварцевой или полимерной оболочкой, показатель преломления которой немного меньше, чем у сердцевины. Внешний диаметр волокна равен 100 - 200 мкм.

Если луч света, преломившись на границе раздела воздух - сердцевина на торце волокна, затем попадает на границу сердцевина - оболочка под углом, большим критического (рис. 3.1), происходит полное внутреннее отражение. В связи с цилиндрической симметрией волокна полное внутреннее отражение этого луча имеет место и на нижней границе сердцевины, луч оказывается, таким образом, захваченным сердцевиной. Траектория луча, каналируемого вдоль сердцевины, имеет зигзагообразный характер, полное внутреннее отражение происходит в каждой точке излома. Лучи, изображенные на рис. 3.1, а, всегда пересекают ось волокна, их называют меридиональными. Легко показать с помощью рис. 3.1, б, что закон Снеллиуса требует выполнения следующего соотношения

$$\sin \theta_a = n_1 \sin \theta \quad (3.1)$$

на торце волокна. Поскольку на границе между сердцевиной и оболочкой имеет место полное внутреннее отражение, должно выполняться неравенство

$$\theta' < \pi/2 - \theta_c \quad (3.2)$$

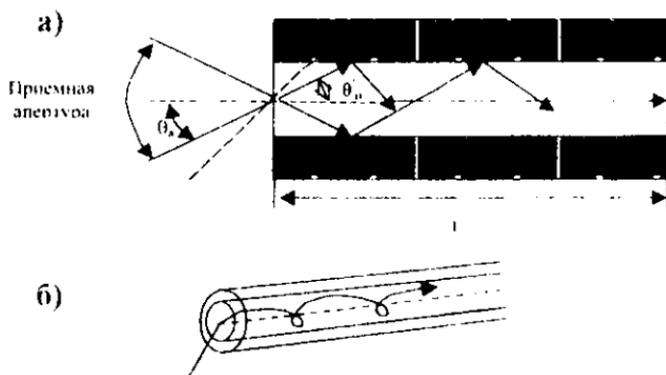


Рис. 3.1. Трасектории меридиональных (а) и косых (б) лучей в оптическом волокне

Следовательно, необходимым условием того, чтобы луч распространялся внутри сердцевины волокна и не попал в оболочку, является следующее:

$$n_{\text{обол}} \sin \theta_c = \sin \theta_a = n_1 \sin (\pi/2 - \arcsin n_2/n_1) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.3)$$

На основании рис. 3.1, а можно также утверждать, что все лучи, которые попадают на торец сердцевины волокна внутри конуса, образующая которого составляет угол  $\theta_a$  с осью волокна, будут распространяться вдоль волокна и выйдут из его выходного торца практически без потерь. Угол  $\theta_a$  называется *приемным углом волокна* для меридиональных лучей. Уравнение (3.3) определяет важный параметр волокна, называемый *числовой апертурой*  $NA$  по аналогии с числовой апертурой линзы или объектива, и является, как мы увидим позднее, очень полезной величиной, так как позволяет оценить количество световой энергии, которую можно ввести от источника света в волокно. Эта величина безразмерная и зависит только от показателей преломления  $n_1$  и  $n_2$ . Обычно оболочку и готовят из плавящего кварца  $SiO_2$ , имеющего показатель преломления для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов  $n_2 \approx 1,46$ , а по соображениям технологического и прикладного порядка относительная разница показателей преломления  $\Delta$  обычно не должна превышать 1%, т. е.

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 < 0,01$$

Обычно числовая апертура для волокон, применяемых в системах оптической связи, находится в пределах  $0,1-0,2$ , что соответствует приемным углам  $\theta_a \approx 5,7 \div 11,5^\circ$ . Однако в волокнах, не предназначенных для устройств дальней связи, числовая апертура может быть и больше  $0,5$ ; т. е.  $\theta_a \approx 30^\circ$ .

Все сказанное выше относилось только к меридиональным лучам, т. е. таким, которые лежат в одной плоскости с осью волокна. Кроме меридиональных существуют лучи, которые распространяются внутри сердцевинки, не пересекая ось волокна. Такие лучи называются *косыми*, они распространяются таким образом, что их траектории не лежат в одной плоскости, в отличие от меридиональных лучей (рис. 3.1, б). Детальное рассмотрение косых лучей не входит в задачи данной книги. Скажем только, что часть этих лучей, как выясняется, постоянно теряет энергию по мере распространения вдоль волокна. Во всех случаях, когда длина волокна достаточно велика (километр и более), вклад этой части косых лучей в перенос энергии минимален. В то же время на малых расстояниях, измеряемых метрами, косые лучи могут переносить (в зависимости от условий ввода излучения) достаточно большую часть общей мощности.

### §3.2. Типы световодов

В системах передачи информации оптического диапазона могут быть использованы различные типы световолокон. На рис. 3.2 показаны поперечные сечения наиболее часто используемых типов световолокон и приведены соответствующие профили показателя преломления.

В случаях а и б сердцевина волокна радиусом  $a$  имеет показатель преломления  $n_1$  и окружена оболочкой с несколько меньшим показателем преломления  $n_2$ , причем  $n_2 < n_1$  ( $1 - \Delta$ ), где  $\Delta \ll 1$ . При таких условиях одномодовый режим распространения может быть достигнут при  $\Delta \leq 1\%$ , а диаметр центральной жилы примерно равен  $5$  мкм. Одномодовые волокна, как правило, применяются с одномодовыми источниками - лазерами, они обеспечивают наибольшую полосу пропускания. Для ряда применений могут оказаться весьма желательными некогерентные источники, в этих случаях целесообразно использовать многомодовые волокна (рис. 3.2, в).

На рис. 3.2, в представлен

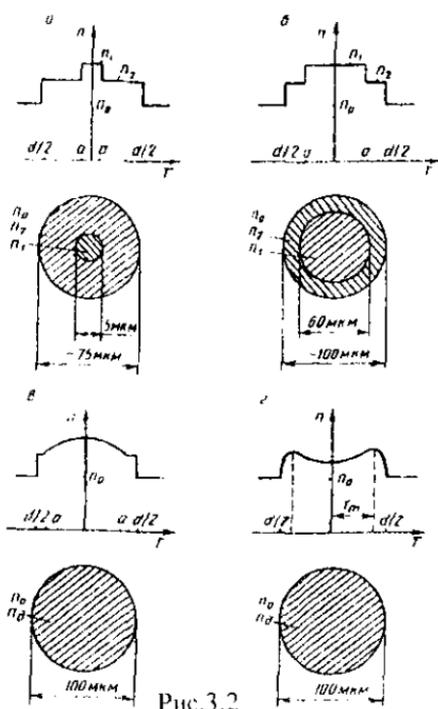


Рис. 3.2

волокна (рис. 3.2, в).

На рис. 3.2, в представлен практически важный вид волокна, распределение состава стекла которого подобрано таким образом, что радиальный профиль показателя преломления изменяется по параболическому закону с максимальным значением по оси:  $n = n_1(1 - \Delta(r_m/a)^2)$ ,  $0 \leq r_m \leq a$ , где  $r_m$  — расстояние от оси; значение  $a$ .

Практически значение  $\Delta$  лежит в пределах 0,01 — 0,02, а  $n_1 \cong 5$ . Применительно к оптической связи достоинство волокна с параболическим профилем показателя преломления заключается в пониженной дисперсии по сравнению с многомодовыми волокнами со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 3.2, в). Волокно с параболическим профилем показателя преломления получило название SEI.FOC.

Волокно, представленное на рис. 3.2, г, отличается аксиально-симметричным распределением показателя преломления с максимальными значениями вблизи  $r = r_{\max}$ . Изменение показателя преломления по поперечному сечению волокна не превышает 1%. Хотя выбор такого типа волокна не является оптимальным, тем не менее оно обладает одновременно очень низкими потерями (менее 6 дБ/км) и очень низкой дисперсией (менее 2 нс/км). Все описанные волокна могут быть покрыты пленкой, имеющей очень большой коэффициент поглощения, что необходимо для поглощения излучения, рассеянного из сердцевины в оболочку. Это уменьшает вероятность перекрестных помех между смежными волокнами в многожильных кабелях.

В настоящее время исследуется возможность создания практически применимых оптических волокон с наименьшими потерями и дисперсией. Уже созданы, например, оптические волокна с потерями 6 и 10 дБ/км на основе кремнезема. Оптические волокна со ступенчатым профилем показателя преломления имеют такие коэффициенты ослабления на длине волны 0,82 мкм с шириной полосы пропускания 200 или 400 МГц для длины волокна 1 км. Числовая апертура равна 0,20, диаметр сердцевины — примерно 60 мкм.

Среди оптических волокон профили с параболической зависимостью показателя преломления представляют особый интерес благодаря своим линзоподобным характеристикам. Групповые скорости различных типов волн в них практически равны, значит, фазовые искажения здесь пренебрежимо малы. Задержку, соответствующую этим искажениям, можно найти при использовании лучевого представления. Как известно, основная волна является гауссовым пучком, а поля высших типов волн имеют распределение Лагерра-Гаусса. Все эти типы волн имеют различные пути и время распространения. Наибольшее время прохождения будет при спиральном пути. Угол спирали определяется формулой:  $\cos\theta = ((1-3\Delta)/(1-\Delta))^{1/2}$ .

Длина спирального пути в  $1/\cos\theta$  раз больше пути вдоль оси волокна. Считая показатель преломления на окружности волокна наименьшим, получим выражение для времени задержки на единицу длины волокна:  $t_d = \frac{n_0}{c} \left( \frac{1-\Delta}{\cos\theta} - 1 \right)$ . Подставив значение  $\theta$ , найдем  $t_d = \frac{3}{2} \frac{n_0}{c} \Delta$ . Если, например,

$n_1 = 1,5$  и  $\Delta = 1\%$ , то возможная задержка  $t = 0,75$  нс/км. Нетрудно подсчитать, что соответствующая ширина полосы будет около 700 МГц.

Могут применяться также трехслойные световолокна с чередованием по радиусу коэффициентов преломления  $n_1 - n_2 - n_1$ . Такие волокна позволяют получить одномодовый режим работы при больших, чем у двухслойного волокна, поперечных размерах. Это облегчает сращивание волокон и ввод в них излучения. Разработана конструкция световолокна, в которой в качестве диэлектрика с показателем  $n_2$  используется воздух.

И, наконец, исследуется возможность использования четырехслойного диэлектрического световолокна для дальнейшего упрощения требований сопряжения волокон с источниками одномодового излучения и между собой.

## Виды световодов

Подобно плоским диэлектрическим волноводам в интегрально-оптических схемах, волоконные световоды различной длины применяют для направленной передачи оптического излучения, которое вводят через торцевой (обычно плоский) конец световолокна. В простейшем случае оптическое волокно представляет собой тонкую нить круглого сечения из прозрачного в нужной спектральной области материала (стекло, кварц, различные полимеры). Канализация света в нем основывается на явлении полного внутреннего отражения. Как в прямолинейном, так и в изогнутом волоконном световоде канализированные волны можно наглядно представить лучами, распространяющимися зигзагообразно, под углами к его оси и каждый раз испытывающими полное внутреннее отражение на поверхности раздела. Разумеется, для этого необходимо, чтобы коэффициент преломления материала световода был обязательно больше коэффициента преломления окружающей его среды.

### §3.3. Ступенчатые волоконные световоды

Пучок света, испытывая полное внутреннее отражение и распространяясь в однородной прозрачной среде, в идеальном случае не должен терять энергию, т. е. постепенно затухать. Однако практически потери все же происходят. Учитывая большую длину волокна (в отличие от плоского волновода в интегрально-оптических схемах), они могут оказаться значительными. Как будет показано ниже, заметная часть потерь приходится прежде всего на рассеяние света на поверхности волокна, т. е. происходящие в световолокне процессы подвержены влиянию окружающей среды и внешних воздействий. Это, а также низкая механическая прочность делают тонкую прозрачную нить непригодной для непосредственного применения в качестве световода.

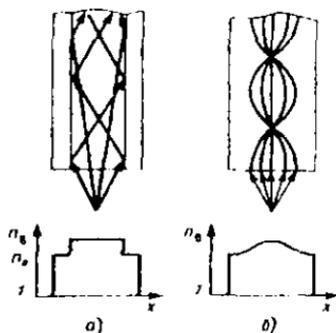
Положение радикально изменяется при переходе к двухслойному световоду, представляющему собой световодную сердцевину (жилу), покрытую оболочкой из материала, показатель  $n_2$  которого меньше, чем жилы  $n_1$ . Как и в интегрально-оптическом волноводе, при полном внутреннем отражении световая волна несколько проникает в оболочку, поэтому, для того

чтобы волна не затухала, в соответствующей области спектра оболочка должна быть прозрачной. Необходимо также обеспечить высокое совершенство границы раздела между сердцевинной и оболочкой. Если толщина оболочки превышает несколько длин волн света, интенсивность световой волны, достигающей внешней поверхности оболочки, оказывается пренебрежимо малой. Поэтому на процесс распространения канализируемых в сердцевине волн состояние поверхности оболочки практически не влияет. Световод со ступенчатым профилем коэффициента преломления можно покрыть еще одной защитной, упрочняющей, например, полимерной, оболочкой, снабдить армирующими элементами, обеспечивающими необходимую, механическую прочность и стойкость к воздействиям окружающей среды, т. е. превратить волоконный световод в *оптический кабель*, пригодный для практического использования. Оптический кабель может содержать как один, так и множество световодов, включать в себя, кроме того, электрические провода для обеспечения питания, например, удаленных электронных устройств.

В волоконном световоде лучи испытывают полное внутреннее отражение от цилиндрической поверхности сердцевинной.

Угол падения луча на эту поверхность (отсчитываемый, как и ранее, от нормали к ней) зависит от направления луча, падающего на входной торец световода. Канализируются только те лучи, которые ограничены конической поверхностью, образующей с осью световода угол  $\theta_a$ , определяемый выражением, аналогичным числовой апертуре плоского волновода, но с заменой  $n_1$  на  $n_0$ . Числовая апертура — важная характеристика волоконного световода. Лучи, падающие на торец световода под углом, выходящим за пределы  $\theta_a$ , не испытывают полного внутреннего отражения от поверхности сердцевинной, преломляются в оболочке и могут приводить к нежелательным паразитным связям, например, между световодами в многожильных кабелях. Для их устранения желательно, чтобы вторая защитная оболочка была светопоглощающей.

Диаметр сердцевинной волоконного световода может в зависимости от его назначения составлять от нескольких микрометров до нескольких сотен микрометров, а толщина оболочки — от нескольких десятков микрометров вплоть до миллиметра (один из стандартных диаметров оболочки — 125 мкм). Когда диаметр сердцевинной соизмерим с длиной волны света, по световолокну, как и по плоскому волноводу, может распространяться только дискретная совокупность волн. Им соответствуют различные углы падения лучей на поверхность раздела сердцевинная — оболочка, а это, в свою очередь, приводит к различной длине пути, которые проходят лучи (рис. 3.3, а). В результате передаваемый по световоду сигнал искажается.



**Рис.3.3.** Устройство и ход лучей в ступенчатом (а), градиентном (б) световодах. Внизу - распределение показателя преломления по радиальному сечению

Если на вход световода подать короткий световой импульс (например, при использовании ИКМ), то при достаточно большой длине может случиться, что на выходе импульсы, переносимые разными модами, окажутся разделенными по времени, т.е. на выходе вместо одного импульса появится серия импульсов. Если входной импульс удлинять, то серия на выходе в конце концов сольется в один импульс увеличенной длительности. По этой причине нельзя беспредельно увеличивать частоту модуляции распространяющегося по волноводу сигнала: период модуляции, по-видимому, должен превышать разницу времени прохождения световода отдельными модами.

### §3.4. Градиентные и другие виды световодов

Изменение показателя преломления на границе между сердцевинной и оболочкой двухслойного волокна обычно происходит не скачком, как показано на рис.3.3,а, в большей или меньшей мере плавно. На практике применяют также волоконные световоды, у которых сердцевина изготовлена заведомо такой, чтобы показатель преломления постепенно убывал от максимального значения на ее поверхности (рис.3.3,б). Второй прозрачный слой (как у двухслойного световода) отсутствует; световедущая жила может быть защищена непосредственно эластичной упрочняющей оболочкой. Волоконные световоды такого типа называют *градиентными*, *градианами* или *селфоками* (последнее от англ. self-focusing - самофокусирующийся).

Лучи, распространяющиеся вдоль оси градиентного световода, не отклоняются, а направленные под углом к ней, испытывают рефракционное искривление траектории (явление, подобное рефракции в атмосфере Земли, газовой оболочке Солнца и т. п.). Если луч введен в световолокно под малым углом к его оси, он изгибается сравнительно слабо и возвращается к оси. Лучи, введенные в градиентный световод под большими углами, заходят в области световода, которые отстоят дальше от его оси. При этом, однако, они распространяются быстрее, так как при удалении от оси показатель пре-

ломления уменьшается ( $v=c/n_n$ ). Возникает возможность уравнивать времена распространения лучей, падающих на торец световода под разными углами, задавая необходимый закон изменения  $n_n(x)$  (рис.3.3,6). Как показывают расчеты, таким свойством обладает световедущее волокно, в котором  $n_n$  убывает от его оси к периферии по квадратичному закону. Для всех волноводных мод оптическая длина пути в этом случае практически одинакова, т. е. модовая дисперсия в таком световоде резко ослаблена.

При использовании волоконных световодов возникает проблема, связанная с тем, что в длинноволновой спектральной области ( $\lambda \sim 1,7-1,8$  мкм) хорошо освоенные стекла, используемые для изготовления световодов, сильно поглощают излучение. Они поэтому не могут служить световедущим материалом для среднего и дальнего инфракрасного диапазона. Для этой спектральной области могут применяться так называемые *газодieleктрические световоды*. Такой световод представляет собой микрокапилляр (тонкую стеклянную трубку), заполненный газом, показатель преломления которого больше, чем воздуха, окружающего микрокапилляр снаружи, но меньше, чем стекла. Для этого капилляр наполняют, например, углекислым газом или же воздухом под давлением. В такой конструкции реализуется такое же соотношение показателей преломления, как в плоском диелектрическом волноводе на подложке без защитного слоя. Существует некоторый интервал углов по отношению к оси волновода, когда световой пучок превращается в излучательную моду подложки. В рассматриваемом случае это приводит к канализации волны, распространяющейся во внутренней плоскости микрокапилляра. Распространяясь зигзагообразно, световой пучок каждый раз дважды проходит стенку капилляра. Канализоваться за счет отражения от внутренней стенки капилляра луч не может, так как при этом полное внутреннее отражение невозможно. Излучение в стенках капилляра поглощается, однако они могут быть сделаны тонкими, в результате чего потери можно уменьшить вплоть до 100 раз по сравнению с монолитным световодом, имеющим диаметр, равный диаметру капилляра. Оптическое волокно можно изготовить, заполняя кварцевый капилляр прозрачной жидкостью с подходящими свойствами, например, тетрахлорэтиленом.

В некоторых случаях могут представлять интерес волоконные световоды, выполненные в виде тонкой кварцевой жилы, подвешенной внутри микрокапилляра. Роль светоотражающей оболочки в этом случае играет воздух, находящийся в пространстве между жилой и внутренней поверхностью капилляра, поэтому для изготовления капилляра можно использовать низкого качества стекло. Форма сечения жилы может быть самой разной.

Контрольные вопросы:

1. Какие вы знаете типы световодов?
2. Расскажите о видах световодов.
3. Что такое дисперсия в световодах?
4. Какие виды дисперсии вы знаете?
5. Укажите принципиальные различия между различными видами и типами световодов?

6. Какие волокна называют selfoc?
7. Какие потери имеют оптические волокна?
8. Что из себя представляют оптические волокна?
9. Что из себя представляет оптический кабель?
10. Когда применяются газо-диэлектрические световоды?

## Глава 4

### Электромагнитная теория распространения излучения в оптических волноводах.

#### §4.1. Уравнения Максвелла.

Известно, что наиболее правильные результаты при описании любого оптического явления можно получить, применив математический аппарат волновой оптики, т. е. анализ распространения электромагнитных волн. Основной механизм, обеспечивающий волноводное распространение в оптических волокнах, может быть полностью описан в рамках полного внутреннего отражения лучей.

Следует отметить, что оптико-геометрический подход оказывается полезным до тех пор, пока диаметр сердцевины волокна  $2a$  и величина  $\Delta$  не становятся меньше некоторых значений. Чтобы представить себе примерные значения  $a$  и  $\Delta$ , при которых геометрическая интерпретация достаточно правильна, оба эти параметра, а также длину волны распространяющегося излучения  $\lambda$ , объединяют в один общий параметр, называемый *нормализованной частотой*, или *V-параметром*, который определяется как

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (4.1)$$

Если  $V \geq 10$ , геометрический подход, основанный на лучевом приближении, дает точные результаты при рассмотрении большинства явлений распространения излучения в волокне. При  $V < 10$  геометрическая оптика уже не может использоваться при анализе свойств оптических волокон и требуется полный электромагнитный анализ, основанный на положениях волновой оптики.

В качественном приближении можно рассуждать так: если диаметр сердцевины сравним с длиной волны света, тогда оптическое волокно можно рассматривать только как волновод, работающий на оптических частотах, аналогично тому, как рассматриваются металлические волноводы для СВЧ диапазона. С другой стороны, некоторые результаты, полученные с помощью волновой теории, могут быть сведены к результатам геометрического

расчета, если предположить, что  $\lambda \rightarrow \infty$ .

Хорошо известно, что ограниченный оптический пучок диаметром  $D$ , распространяющийся в однородной среде, характеризуется дифракционной расходимостью

$$\Delta\theta \sim \lambda / D. \quad (4.2)$$

Однако при распространении по волокну, в котором и сердцевина, и оболочка однородны, большинство лучей, формирующих пучок, совершает многократные полные внутренние отражения, тем самым влияние дифракционной расходимости существенно ограничивается и пучок продолжает сохранять свое поперечное сечение.

Проблема распространения электромагнитной волны в оптическом волноводе требует решения (с учетом граничных условий) известных уравнений Максвелла, которые в системе МКС имеют вид:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.3).$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.4).$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (4.5).$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.6).$$

совместно с материальными уравнениями, определяющими свойства среды, в которой происходило распространение:

$$J = \sigma E \quad (4.7)$$

$$D = \epsilon E \quad (4.8)$$

$$B = \mu H \quad (4.9)$$

где  $E$  и  $H$  — напряженность электрического и магнитного полей соответственно;  $D$  и  $B$  — электрическая и магнитная индукция;  $J$  — плотность тока;  $\sigma$ ,  $\epsilon$  и  $\mu$  — проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемость рассматриваемой среды.

Уравнения Максвелла (4.3)–(4.6), хотя и являются дифференциальными уравнениями первого порядка, образуют систему связанных дифференциальных уравнений, решение которой с учетом граничных условий иногда представляет существенные трудности. Эти трудности можно преодолеть, если записать так называемое “волновое” уравнение, которое является уравнением второго порядка с разделяющимися переменными и решение которого в зависимости от граничных условий, т. е. от свойств среды, дает характеристики волноводного распространения в достаточно простой форме.

## §4.2. Волновое уравнение

Чтобы вывести волновое уравнение, соответствующее диэлектрической пленочной структуре, мы должны положить, что  $\sigma = 0$  и — поскольку среда немагнитная  $\mu = \mu_0$  ( $\mu_0$  — магнитная проницаемость свободного пространства). Применяя к выражению (4.3) оператор ротора, мы получим

$$\nabla^2 E + \nabla(\nabla \cdot E) = -\mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (4.10)$$

Подставляя в формулу (4.10) уравнение (4.8) и используя векторное тождество

$$\nabla \cdot (\varepsilon E) = \nabla \varepsilon \cdot E + \nabla \varepsilon \cdot E \quad (4.11)$$

мы преобразуем ее к виду

$$\nabla^2 E + \nabla \left( \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) \cdot E - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (4.12)$$

Аналогично можно получить уравнение для вектора  $H$

$$\nabla^2 H + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \varepsilon \times (\nabla \times H) - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (4.13)$$

Уравнения (4.12) и (4.13) известны как *векторные волновые уравнения*.

Если мы предположим, что  $\varepsilon = \varepsilon(x, y)$ , т. е. свойства среды не меняются вдоль направления распространения волны, то решение уравнения (4.12) можно записать в такой форме:

$$E_i(x, y, z) = E_i(x, y) e^{i(\alpha x + \beta z)}; \quad i = x, y, z \quad (4.14),$$

где направление распространения выбрано вдоль оси  $z$ , а  $\beta$  называется постоянной распространения.

Аналогичным образом можно предположить, что решение для магнитного поля имеет форму

$$H_i(x, y, z) = H_i(x, y) e^{i(\alpha x + \beta z)}; \quad i = x, y, z. \quad (4.15)$$

Уравнения (4.13) и (4.15) описывают плоские волны, являющиеся решениями волновых уравнений для данного значения постоянной распространения  $\beta$ , значения которой, в свою очередь, определяются параметрами волновода. На самом же деле, граничные условия, накладываемые параметрами волновода, допускают существование только определенных дискретных значений  $\beta$ . Поперечные распределения поля  $E_i(x, y)$  и  $H_i(x, y)$ , соответствующие этим значениям  $\beta$ , называются в соответствии с применяемой терминологией *модами волновода*. Волноводная мода определяется как некоторое особое распределение поля, которое распространяется вдоль волновода с сохранением определенного состояния поляризации, постоянной групповой скоростью  $v_g$  ( $v_g = d\omega/d\beta$ ) и без изменения структуры своего первоначального поперечного распределения. В зависимости от геометрии и физических характеристик волновода последний может поддерживать распространение нескольких мод или только одной моды. В первом случае волновод называется *многомодовым*, во втором — *одномодовым*. На практике в большинстве случаев полное выражение для поля в волноводе, возбуждае-

мом оптическим пучком, может быть представлено в виде суммы мод, которые распространяются внутри волновода (так называемые *направляемые* волноводные моды) и континуума излучательных, т. е. не направляемых волноводом, мод.

### §4.3. Дисперсия в световодах

В оптических системах связи информация часто кодируется в виде последовательных во времени импульсов (например, в ИКМ-системах), которые затем передаются по волокну. Уже отмечалось, что если импульс введен в волокно, он обычно уширяется по мере распространения по волокну, так что детектируемый на выходе импульс имеет другую форму и большую длительность по сравнению с импульсом на входе. Это явление называется *дисперсией* и определяет одну из двух наиболее важных передаточных характеристик волокна, ответственных за искажение формы передаваемого сигнала. Вторая характеристика связана с *ослаблением* оптического сигнала. Скорость передачи информации, которой можно добиться, применяя волокно определенного типа и заданной длины, определяется числом импульсов, которые можно передать по волокну в единицу времени без существенного перекрытия импульсов на выходе линии. Поскольку значения дисперсии волокна существенно ограничивают допустимую скорость модуляции оптического передатчика в любой волоконно-оптической линии связи, дисперсия является мерой ширины полосы пропускания (или просто полосы) линии.

Дисперсия, или уширение, импульса в оптическом волокне, как можно показать, бывает обусловлена тремя причинами: межмодовой дисперсией, дисперсией материала и волноводной дисперсией, причем два последних механизма объединяются в то, что называется внутримодовой дисперсией.

### §4.4. Межмодовая дисперсия

*Межмодовая дисперсия*, как вытекает из названия, возникает из-за разности групповых скоростей, а следовательно, времен распространения различных мод в волноводе. В лучевом приближении это явление соответствует тому, что различные лучи затрачивают неодинаковое время на то, чтобы пройти от одного торца волокна до другого.

Однако даже если межмодовая дисперсия почти исчезает в волокне с соответственно подобранным профилем показателя преломления, т. е. оптимизированном, конечность ширины спектра практически используемых оптических источников, а также Фурье-спектра передаваемых сигналов приводит к *внутримодовой дисперсии*. Дисперсия материала вызвана зависимостью показателя преломления объемных материалов, из которых формируется волокно, от длины волны. Второй фактор – волноводная дисперсия – связан с зависимостью постоянной распространения данной моды от длины волны.

Межмодовая дисперсия – основной источник дисперсии во всех мно-

гомодовых волокнах, кроме оптимизированных, а внутримодовая дисперсия является единственной причиной дисперсионных явлений в одномодовых волокнах. Если стремиться к достижению сверхширокой полосы в многомодовом волокне, необходимо учитывать также эффект так называемой "профильной дисперсии". Профильная дисперсия происходит из-за разной зависимости от длины волны показателя преломления в сильно легированной центральной и слабо легированной периферийной областях сердцевинной и нелегированной (или легированной другими материалами) оболочке.

Выражение для уширения импульса в ступенчатом волокне в виде разницы времен прохождения луча по кратчайшему и наиболее длинному оптическим путям:

$$\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{n_1 L}{c} \left( \frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \frac{J_{l-1}(u)}{J_l(u)} \approx w \frac{K_{l-1}(w)}{K_l(w)} \quad (4.1)$$

Уравнение (4.1) позволяет определить уширение импульса в многомодовых ступенчатых волокнах (где межмодовая дисперсия играет доминирующую роль) весьма точно, хотя оно и получено только на основе лучевого рассмотрения. Однако дело в том, что хотя лучевая оптика подходит для анализа многомодовых волокон, она не годится для описания волокон с произвольным модовым составом. В частности, лучевые методы не позволяют описать внутримодовую дисперсию, что делает невозможным решения общей задачи без применения волновой оптики.

Контрольные вопросы:

1. Что из себя представляет уравнение Максвелла?
2. Что из себя представляет нормализованная частота?
3. Чем характеризуется оптический лучок в однородной среде?
4. Запишите волновое уравнение.
5. Когда волновод называется одномодовым?
6. Когда волновод называется многомодовым?
7. Что такое межмодовая дисперсия?
8. Какое явление называется дисперсией?
9. Что такое внутримодовая дисперсия?
10. Что такое профильная дисперсия?

## §5.1. Генераторы оптического излучения

*Основные параметры и характеристики генераторов оптического излучения*

Для оптических систем передачи информации в качестве источников излучения могут быть использованы квантовые генераторы, работающие как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Мы не будем рассматривать механизм работы генераторов оптического излучения различных типов, так как он широко освещен в литературе, отметим только, что параметры и характеристики лазеров, представляющие интерес при разработке оптических систем передачи информации, могут быть разделены на спектральные, пространственные и энергетические.

К *спектральным характеристикам* относится длина волны (частота) излучения, ширина спектра излучаемых колебаний, интервал временной когерентности. *Пространственные характеристики* - это прежде всего диаметр светового пучка, угловая расходимость луча или диаграмма направленности, определяемая как телесный угол, в котором распространяется большая часть передаваемого излучения. К *энергетическим характеристикам* можно отнести мощность излучения, пороговую мощность возбуждения, потребляемую мощность и коэффициент полезного действия.

Спектральные характеристики источников излучения определяют возможность прохождения излучения через различные среды (атмосферу, воду, световолокна, оптические элементы), величины угла расходимости и минимальный размер сфокусированного пятна, а также какие фотоприемники или оптические материалы следует применять в системах передачи информации. Энергетические и пространственные характеристики излучения определяют дальность действия системы в целом, а также выбор элементов и узлов, формирующих диаграмму направленности излучения. Кроме рассмотренных, важны такие эксплуатационные параметры, как рабочая температура, время готовности источников излучения к работе, ресурс работы и надежность. Рабочая температура является в ряде случаев ограничивающим фактором при использовании источников оптического излучения в системах передачи информации. Одни источники излучения работают в условиях комнатной температуры, другие - в условиях охлаждения, иногда до температур, близких к абсолютному нулю (2-4 К). Момент готовности к работе определяется временем установления стабильного режима с заданными характеристиками излучения, начиная с момента включения. Ресурс работы и надежность работы источников излучения являются не только техническими, но также и одними из основных экономических критериев оценки качества системы. Поэтому необходимо стремиться к использованию в системах передачи информации источников излучения с большим ресурсом и высокой надежностью.

Для многоканальных систем передачи информации оптического диа-

пазона можно использовать генераторы как когерентного, так и некогерентного излучения. Наиболее широко из когерентных источников применяются газовые и полупроводниковые лазеры, а также твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате. Из некогерентных источников излучения распространены светодиоды (электролюминесцентные и суперлюминесцентные диоды).

## **§5.2. Требования к источникам излучения для волоконно-оптических систем**

Общие требования к источникам излучения для волоконно-оптических систем связи можно сформулировать следующим образом:

- длина волны излучения источника должна совпадать с одним из минимумов спектральных потерь волоконных световодов;
- конструкция источника должна обеспечивать достаточно высокую мощность выходного излучения и эффективный ввод его в волоконные световоды;
- источник должен иметь высокую надежность и большой срок службы;
- габаритные размеры, масса и потребляемая мощность должны быть минимальными;
- простота технологии должна обеспечивать невысокую стоимость и высокую воспроизводимость характеристик.

Особенности конкретных систем предъявляют ряд специфических требований к характеристикам источников излучения. Весьма жесткими эти требования являются в высокоскоростных системах передачи информации на большие расстояния с использованием одномодовых волоконных световодов и в фазовых волоконно-оптических датчиках. В первую очередь, речь идет о спектральных характеристиках излучения.

## **§5.3. Полупроводниковые лазеры**

Одним из перспективных источников излучения для волоконно-оптических линий связи являются полупроводниковые лазеры (ППЛ). Основными достоинствами их являются компактность, малые масса и габариты, механическая прочность, простота методов накачки и высокоскоростной прямой модуляции, большой КПД (50–80%) и хорошее согласование с оптическим волокном. В ППЛ электрическая энергия постоянного тока непосредственно преобразуется в когерентное световое излучение. Благодаря этому они более эффективны.

Известны несколько способов создания инверсной населенности в ППЛ. Наиболее широко распространен способ инжекции электронов и дырок через  $p-n$ -переход. В таком лазере поток электронов движется через переход от материала  $n$ -типа к материалу  $p$ -типа.

ППЛ создаются на основе легированных  $p$ - и  $n$ -полупроводников, в

которых разрешенные энергетические состояния свободных носителей (электронов в полупроводнике *n*-типа и дырок в полупроводнике *p*-типа) представляются волновыми функциями, определяемыми по всему пространству микросистемы. Это приводит к большой степени перекрытия собственных функций  $\psi(x,t)$ , т. е. к образованию энергетических зон (валентной зоны, зоны проводимости и запретной зоны), занимающих значительные энергетические интервалы.

Равновесие в распределении электронов и дырок нарушается при приложении к переходу напряжения в прямом направлении. В кристаллах полупроводника *p*- и *n*-типов на границе раздела возникает большой градиент концентрации электронов и дырок. Вследствие этого электроны, находящиеся в зоне возбужденных состояний *n*-области, начнут переходить из этой области на более низкие, "заполненные" дырками, уровни в *p*-области (такое движение электронов можно представить так же, как движение дырок из *p*-области в *n*-область).

По мере диффузии электронов в *p*-область в этой области поблизости от *p-n*-перехода образуется отрицательный объемный заряд. Аналогичный положительный объемный заряд образуется в *n*-области. Образование объемных зарядов приводит к возникновению так называемого потенциального барьера, препятствующего дальнейшей диффузии носителей. Несмотря на наличие объемных зарядов, в целом полупроводник остается нейтральным и находится в состоянии электрического равновесия. Обязательным условием такого равновесия является равенство уровней Ферми для обеих областей полупроводника.

Если к области отрицательного объемного заряда (*p*-области) приложить положительный потенциал, величина потенциального барьера понизится на величину приложенного напряжения и может стать равной нулю при некотором значении напряжения. В этом случае создаются условия для свободного перемещения электронов проводимости из *n*-области в *p*-область, где они могут рекомбинировать с дырками, испуская при этом электромагнитное излучение.

Таким образом, при приложении к переходу напряжения в прямом направлении высота потенциального барьера понижается, электроны и дырки вливаются в смежные *p*- и *n*-области, где рекомбинируют друг с другом, и в узкой области *p-n*-перехода шириной в несколько микрометров возникает электромагнитное излучение.

Процесс рекомбинации протекает очень быстро ( $10^{-11}$ - $10^{-12}$  с). Поэтому для поддержания инверсной заселенности необходимо непрерывно компенсировать убывание неравновесных носителей путем введения (инъекции) электронов в *n*-область. Такое перемещение носителей осуществляется за счет внешнего источника тока (источника накачки). Поэтому ИИЛ получили название инжекционных лазеров. Длительность токового импульса накачки определяет длительность свечения *p-n*-перехода.

Впервые полупроводниковые лазеры были созданы на *p-n* переходе в арсениде галлия. При комнатной температуре лазер работал в импульсном

режиме излучения:

$\tau_{\text{ини}} = 50$  нс,  $P_{\text{ини}} = 20$  Вт. Трудности с обеспечением необходимого теплоотвода сильно ограничивают возможности создания полупроводниковых лазеров для работы при комнатной температуре в непрерывном режиме. Дело в том, что плотность тока накачки должна быть достаточно высокой. Эта плотность исчисляется сотнями и тысячами ампер на квадратный сантиметр и зависит от температуры. Ширина спектра излучения также зависит от величины тока, проходящего через лазерный диод.

Инжекционные лазеры на  $p-n$ -переходе обладают следующими достоинствами: компактностью (малыми габаритами и массой); простотой источника накачки (кристаллы полупроводника имеют низкое сопротивление — сотые доли ома — в прямом направлении, поэтому для накачки можно использовать низковольтные (1–2 В) источники); высоким КПД (50–80%); простотой модуляции (изменением питающего тока).

*К недостаткам относится следующее:* сравнительно широкий диапазон разброса значений КПД (от нескольких единиц до десятков процентов); широкий спектр излучения (порядка  $5 \cdot 10^3$  мкм); сравнительно большой угол расходимости луча (1–10°); незначительная мощность.

Перспективными являются инжекционные лазеры на двойных гетероструктурах, состоящих из слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (с различным значением  $x$ ), выращенных эпитаксией из жидкой фазы. С помощью пятислойных структур, в которых области локализации носителей и света разделены, удалось уменьшить пороговые плотности тока до  $700 \text{ А/см}^2$  для импульсного режима работы при комнатной температуре, причем это значение не является предельным. Уже созданы высокоэффективные ППЛ, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. Совпадение диапазона излучаемых волн этих ППЛ с диапазоном минимальных потерь оптического стекловолокна делает их наиболее перспективными для оптической связи.

Возможность управления длиной волны излучения в ППЛ открывает пути для передачи многоканальной информации по одному волокну путем частотного уплотнения.

В отличие от светодиодов мощность, передаваемая в световолокно от инжекционного лазера, принципиально неограниченна. Высокоэффективная передача мощности в многомодовое волокно может быть осуществлена сближением торца волокна и выходного торца лазера или при использовании волокна со сферическим концом.

Время излучательной рекомбинации носителей, равное примерно 1 нс для GaAs и несколько наносекунд для  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , уменьшается в режиме вынужденного излучения. Поэтому можно легко осуществить модуляцию инжекционных лазеров с высокой частотой непосредственным изменением тока инжекции.

Серьезная проблема — повышение срока службы инжекционных лазеров.

При накачке, обеспечивающей выходную мощность до десятков милливатт, полосковые лазеры с двойной гетероструктурой, работающие в не-

прерывном режиме при комнатной температуре, как правило, генерируют несколько поперечных и продольных мод (типов колебаний), занимающих спектральный интервал порядка  $10^{-4}$  мкм. Тем не менее уже наблюдался стабильный одномодовый одночастотный выход (мощность 10 мВт) на лазерах с относительно большим (до 10 000 ч) сроком службы. Вместе с тем для этих лазеров характерны случаи катастрофической деградации, приводящие к повышению порога генерации, снижению квантовой эффективности и прекращению непрерывности излучения. Деградация вызывается кристаллическими дефектами в виде темных пятен, проникающих в активную область, а также дефектами в виде безызлучательных темных линий. Эти кристаллические дефекты, образуя неизлучающие зоны, снижают коэффициент усиления, увеличивают потери и повышают скорость рекомбинации, что приводит к концентрации тока в неизлучающих зонах, снижению плотности тока в других зонах и деградации ППЛ.

Для предотвращения деградации необходимо выбирать бездефектные кристаллы. Снижение дефектов достигается добавками в активную область небольших количеств алюминия, а также при выращивании кристаллов. Эти меры позволяют повысить срок службы полупроводниковых лазеров с двойной гетероструктурой до 10 000 ч и более. Кроме того, добавление алюминия приближает длину волны излучения лазера к зоне минимальных потерь оптического волокна 0,81 -- 0,85 мкм.

Таким образом, инжекционные лазеры с двойной гетероструктурой можно характеризовать следующими параметрами: излучаемая мощность в многомодовом режиме --- до 50 мВт, в одномодовом --- до 10 мВт; КПД --- 10%, полоса модуляции --- порядка  $10^3$  МГц; коэффициент ввода излучения в волокно --- примерно 50%. В любом случае спектральная ширина достаточно узка, чтобы не учитывать дисперсию материала волокна при передаче на большие расстояния.

Увеличения мощности ППЛ при комнатной температуре можно достичь, соединяя лазерные диоды в решетку. В одном из экспериментов 12 диодов соединялись друг с другом через теплопоглотители толщиной около 25 мкм. Высота решетки составила 1 мм, при этом  $p-n$ -переходы диодов следуют через 75 мкм. Такое устройство позволило получить пиковую мощность 1 кВт при частоте повторения импульсов 1,2 кГц и длительности импульсов 30 нс. В данной конструкции решетка соединялась со сферическим зеркалом, дающим изображение задних граней диодов, т. е. используется суммарная мощность при двустороннем излучении в одном направлении.

Одна из важнейших характеристик ППЛ --- поперечные моды излучения, определяющие эффективность согласования их с оптическим волокном.

Поперечные моды излучения лазеров с двойной гетероструктурой возникают в направлении, перпендикулярном к плоскости перехода. Образующийся в этом же направлении диэлектрический волновод создает ограничение излучения, благодаря чему наряду с ограничением растекания носителей снижается порог излучения лазера, становится возможным режим непрерывной работы при комнатной температуре, но, с другой стороны, увеличива-

ется угол расходимости излучения. Обычно для  $Al_xGa_{1-x}As$ -лазеров с двойной гетероструктурой толщина активной области выбирается не более 0,5 мкм, угол расходимости излучения в вертикальном направлении в этом случае равен 60°. Поскольку угол восприятия света оптическим волокном составляет всего 10 - 20°, очень трудно добиться эффективного согласования с лучом лазера, имеющим такой большой угол расходимости.

Существуют различные способы уменьшения угла расходимости излучения. Создание раздельных областей рекомбинации носителей и расширения света позволит добиться снижения вертикального угла расходимости излучения до 15°. Аналогичного эффекта можно добиться за счет создания асимметричной конструкции, изменением количества алюминия по обе стороны от активной области и т. п.

Промышленных типов ППЛ в настоящее время достаточно много, и перспективы их использования в системах передачи информации с улучшением эксплуатационных параметров лазеров можно считать обнадеживающими. Важную роль играют разработки ППЛ на диапазон 1,1 --- 1,5 мкм. Для оптической дальней связи их можно рекомендовать благодаря приближению к зоне минимальных потерь оптического волокна и чрезвычайно малой дисперсии материала.

#### §5.4. Газовые ОКГ

Передачики на газовых лазерах наиболее универсальны. Они позволяют получить большие выходные мощности (до десятков киловатт) в непрерывном режиме, широкий диапазон волн излучения, высокую стабильность частоты. В эксплуатации они, как правило, не требуют сложных систем охлаждения, надежны и долговечны.

Активный элемент газового лазера представляет стеклянную или кварцевую трубку (кювету), диаметр которой колеблется от миллиметра до нескольких сантиметров, а длина — от единиц и десятков сантиметров до нескольких метров. Газовая кювета располагается в ОКГ между двумя зеркалами.

Газовые лазеры можно классифицировать по различным признакам. В зависимости от состава рабочего вещества, энергетические уровни которого используются для получения инверсии, различают атомарные, ионные и молекулярные лазеры:

по диапазону генерируемого излучения — ультрафиолетовые, видимые и инфракрасные;

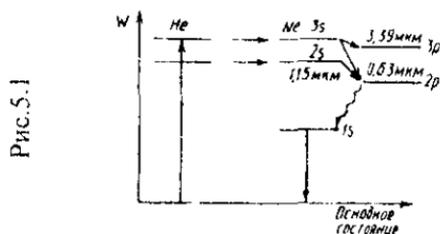
по роду активного вещества — гелий-неоновые, аргоновые, на углекислом газе и др.;

по режиму работы — непрерывные, импульсные, одномодовые, одночастотные и т. п.

Классификация по роду активного вещества представляется наиболее целесообразной: она практически определяет рабочий диапазон длин волн, примерную мощность, условия эксплуатации, что наиболее важно знать специалистам, связанным с передачей информации.

Рассмотрим основные характеристики гелий-неонового ОКЛ.

На рис. 5.1 показаны энергетические диаграммы гелия и неона. Излучение происходит при переходах между уровнями  $3s \rightarrow 2p$ ,  $3s \rightarrow 3p$ ,  $2s \rightarrow 2p$ . Остальные переходы безызлучательные.

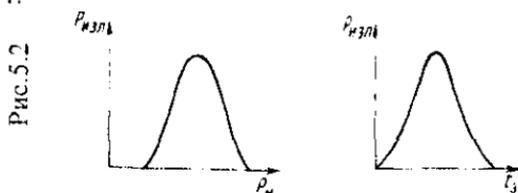


Энергетические характеристики газового лазера — мощность излучения  $P_{изл}$  и КПД — зависят от следующих факторов: мощности накачки  $P_{н}$ , пропускания зеркал резонатора  $\tau$ ; диаметра газоразрядной трубки  $d$ .

Характер зависимости  $P_{изл} \sim f(P_{н})$  (рис.5.2) объясняется следующим: при малой мощности накачки газовый разряд еще слабый, преобладающее число атомов неона находится в основном состоянии, происходит весьма эффективная передача энергии возбуждения атомов гелия к атомам неона, и мощность излучения  $P_{изл}$  растет.

С ростом мощности накачки  $P_{н}$  одновременно протекают два процесса: увеличивается число возбужденных атомов гелия и происходит заселение верхних энергетических уровней неона. Первый процесс способствует увеличению мощности излучения, второй препятствует, потому что снижается эффективность передачи энергии от гелия к неону и обеспечить инверсию населенностей сложнее вследствие увеличения количества частиц на нижних уровнях  $2s$  и  $2p$  излучательных переходов неона  $2s \rightarrow 2p$ ,  $3p \rightarrow 3s$ ,  $3s \rightarrow 2p$ . При некотором уровне накачки величины инверсии и мощности излучения максимальны. Превышение этого уровня накачки приводит к уменьшению излучаемой мощности.

Таким образом, механизм генерации колебаний ограничивает величину мощности, которая может быть достигнута в гелий-неоновом лазере. На практике эти лазеры имеют мощность, не превышающую нескольких десятков милливатт.



Достижение максимальной выходной мощности связано также с выбором пропускания  $\tau$ , полупрозрачного зеркала ОКЛ. При малых пропусканиях мощность излучения мала, поскольку связь генератора с внешним пространством незначительна, а при больших пропусканиях ухудшаются условия самовозбуждения, и при некотором пропускании зеркал генерация срывается.

так как условия баланса амплитуд не выполняются (рис. 1.2).

Важным моментом является существование уровня  $1s$ . Из-за большого времени жизни этого уровня на нем происходит накопление атомов в результате радиационных переходов с нижнего лазерного уровня. Атомы в состоянии  $1s$  сталкиваются с электронами разряда и возвращаются обратно на нижний лазерный уровень  $2s$ . Это уменьшает разность населенностей. Из состояния  $1s$  атомы релаксируют в основное состояние, главным образом за счет столкновений со стенками трубки. Поэтому усиление на переходе  $3 \rightarrow 2$  возрастает при уменьшении диаметра газоразрядной трубки.

Из наиболее важных характеристик источников оптического диапазона необходимо отметить поляризацию излучения. Эта характеристика, как увидим далее, может быть с успехом использована для повышения помехоустойчивости систем передачи информации методом поляризационной селекции сигналов. В газовых лазерах плоскополяризованное излучение может быть получено выполнением среза излучающего торца трубки под углом Брюстера.

Срок службы газовых лазеров ограничивается специфическими процессами в разряде, которые ведут к нарушению состава рабочей смеси. Основным таким процессом является поглощение (сорбция) газа в разряде стенками трубки и электродами. Вследствие этого давление газа по мере работы уменьшается, что ведет к снижению мощности генерации. КПД таких лазеров примерно составляет 0,1 %.

Несмотря на относительно малые мощность и КПД, гелий-неоновые лазеры весьма перспективны для решения задач создания многоканальных линий лазерной связи. Несомненными преимуществами их являются: острая направленность излучения; высокая монохроматичность (возможно получение одночастотного режима); большая стабильность излучаемых колебаний.

Для увеличения мощности излучения в последнее время стали применять ионные лазеры. В этих генераторах в отличие от гелий-неоновых используются не атомные переходы, а переходы между возбужденными состояниями ионов. Оказалось, что такие лазеры способны генерировать гораздо большую мощность, благодаря тому что рабочие состояния ионных переходов располагаются на энергетической диаграмме значительно выше, а вероятности ионных переходов, как правило, больше, чем вероятности атомных переходов.

Наибольшее распространение из ионных ОКГ непрерывного действия получили аргониевые лазеры. Мощность генерации, получаемая на трубках длиной 30 - 50 см, составляет несколько ватт. Есть сообщения о достижении мощности излучения 30 - 50 и даже 120 - 150 Вт.

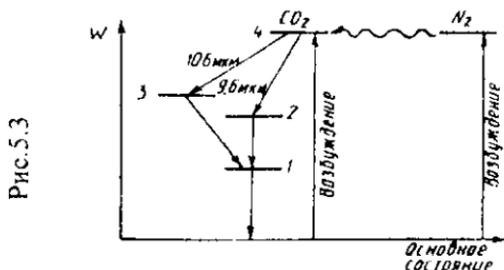
Основными недостатками газовых лазеров, использующих атомные и ионные переходы, являются низкий КПД и сравнительно небольшая мощность излучения. Малая эффективность накачки их связана главным образом с тем, что вероятный рабочий уровень очень высоко расположен над исходным состоянием, с которого идет возбуждение. Поэтому в процессе возбуждения принимает участие лишь незначительная доля общего числа электро-

нов. Другими словами, в них мала эффективность электронного механизма накачки.

Для повышения КПД перспективно использование низкорасположенных энергетических уровней, в частности колебательных, которые располагаются значительно ближе друг к другу, чем электронные. Это обуславливает выгодность использования переходов между колебательными состояниями для генерации. Однако генерация при этом возможна на более низких частотах, чем при использовании электронных переходов.

Рассмотрим молекулярный газовый лазер, работающий на смеси азота и углекислого газа. Схема нижних колебательных состояний молекул  $CO_2$  и  $N_2$  показана на рис. 5.3.

Генерация возникает на переходах  $4 \rightarrow 3$  и  $4 \rightarrow 2$ , что соответствует длинам волн 10,6 и 9,6 мкм. Считается, что возбужденное состояние азота характеризуется большой населенностью.



При взаимодействии возбужденных молекул азота с молекулами  $CO_2$ , находящимися в основном состоянии, возможна передача возбуждения, ведущая к преимущественному заселению состояния 4. Так возникает инверсия на переходах  $4 \rightarrow 3$ ,  $4 \rightarrow 2$ .

В лазере на смеси  $CO_2$  и  $N_2$  достигнуты максимальные для газовых генераторов мощности (до 5 кВт в непрерывном режиме). Добавка в смесь гелия еще более увеличивает мощность генерации (доходящей до 10 кВт). КПД генераторов на  $CO_2$  достаточно высок (6—10%).

Газовые лазеры могут работать и в импульсном режиме. Генерация получена на нескольких сотнях линий в чрезвычайно широком диапазоне от вакуумной ультрафиолетовой области спектра (0,16 мкм) до субмиллиметрового диапазона.

Основной интерес к импульсному режиму связан с применением в газовых лазерах мощного импульсного разряда. Это позволило поднять мощность генерации гелий-неонового лазера на три порядка (примерно до 100 Вт).

Импульсный метод возбуждения оказался чрезвычайно важным и в известной мере универсальным средством получения инверсии в газовом разряде. В качестве активных сред применяются пары металлов и газообразные соединения. В настоящее время импульсная генерация наблюдается на многих химических элементах. Никакой другой метод возбуждения не позволяет пока достичь таких результатов. Максимальная пиковая мощность импульс-

ных газовых лазеров (ИГЛ) непрерывно растет и в настоящее время достигает 2,5 МВт. При одинаковой пиковой мощности энергия, затрачиваемая на возбуждение ИГЛ в режиме свободной генерации, на 2—3 порядка меньше, чем в случае лазеров на твердом веществе с оптической накачкой. Пороговая энергия ИГЛ также намного ниже и составляет, как правило, десятые и даже сотые доли джоуля.

Дополнительные достоинства ИГЛ — простота устройства, надежность, невысокая стоимость (используются легкодоступные газы). Для гелий-неоновых лазеров наиболее подходящим является переход  $2s \rightarrow 2p$  (1,15 мкм). Мощность в импульсе составляет несколько сотен ватт при длительности импульсов около 1 мкс. Перспективным является использование и лазеров на смеси  $CO_2$  и  $N_2$  (10,6 мкм) в импульсном режиме, мощность излучения которых — сотни киловатт в импульсе.

В настоящее время промышленностью выпускается множество различных типов гелий-неоновых лазеров. Аргоновые лазеры конструктивно менее отработаны, чем гелий-неоновые, поэтому их эксплуатационные характеристики хуже. Наиболее мощными являются газодинамические лазеры на  $CO_2$ , которые развивают в непрерывном режиме мощность около 60 кВт при многомодовом излучении и 30 кВт в одномодовом. В зарубежной печати сообщалось о достижении мощности 160 кВт, но и это не предел: газодинамические лазеры могут развить мощность в непрерывном режиме до  $10^6$  кВт.

Для повышения мощности в импульсном режиме в лазерах на  $CO_2$  увеличивается давление газовой смеси. Это, кроме того, позволяет получить ультракороткие импульсы длительностью до  $10^{-11}$  с, благодаря чему можно повысить эффективность многоканальных систем передачи информации с временным разделением каналов. КПД в лазерах с высоким давлением газовой смеси достигает примерно 25%.

Контрольные вопросы:

1. Что является основными параметрами генераторов?
2. Расскажите о принципе работы п/п лазера.
3. Какие основные характеристики присущи различным типам лазеров?
4. Какие существуют требования к источникам излучения для волоконно-оптических систем?
5. Расскажите о принципе работы газового лазера.
6. Какие типы газовых лазеров вы знаете?
7. Объясните принцип действия полупроводникового лазера.
8. Перечислите достоинства ППЛ.
9. Перечислите недостатки ППЛ.
10. Как можно увеличить КПД газового лазера?

## Распространение оптического излучения в атмосфере и направляющих средах

### §6.1. Принципы распространения оптического излучения

Основное уравнение систем передачи информации оптического диапазона может быть записано в виде  $P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = L\alpha F$ , где  $P_{\text{вых}}$ ,  $P_{\text{вх}}$  — мощности на выходе передатчика и на входе приемника;  $L$  — затухание в оптических элементах передающего и приемного устройств;  $\alpha$  — затухание в свободном пространстве;  $F$  — затухание, обусловленное влиянием атмосферы.

Величина  $L$  рассчитывается известными в оптике методами без особых принципиальных трудностей. Она может быть определена и экспериментально. В общем случае она составляет 3—10 дБ.

Для расчета величины  $\alpha$  можно использовать известную формулу дальности:  $\alpha = 4\pi R^2 / (A_{\text{прм}} G_{\text{прд}}) = \lambda^2 R^2 / (A_{\text{прм}} * A_{\text{прд}})$ , где  $R$  — длина трассы,  $A_{\text{прм}}$  —  $A_{\text{прд}}$  — апертура приемной и передающей антенны;  $G_{\text{прд}}$  — усиление передающей антенны.

Наиболее сложно определить  $F$ . Этот параметр заслуживает более подробного рассмотрения. Применение лазеров для передачи информации стимулирует интенсивное развитие исследований распространения в атмосфере электромагнитных волн оптического диапазона. Результаты этих исследований позволяют в настоящее время создать достаточно полную картину перекоса оптических сигналов в атмосфере. При распространении в атмосфере оптическая волна испытывает превращения, вызванные молекулярным поглощением и рассеянием атмосферными газами, аэрозольным, комбинационным и резонансным рассеянием, рефракцией, нелинейным взаимодействием излучения со средой. Существенным отличием оптических волн от электромагнитных волн радиодиапазона является сильная зависимость распространения их в атмосфере от ее свойств. При распространении в земной атмосфере оптический сигнал претерпевает следующие изменения: энергетическое ослабление; флуктуации амплитуды и фазы волны; рефракцию, вызванную вертикальной и горизонтальной неоднородностями атмосферы. Как правило, эти эффекты могут рассматриваться независимо, что позволяет решать сложную задачу распространения оптического сигнала в атмосфере по частям.

Величина  $F$  является случайной функцией времени и пространства и по этому может характеризоваться законом ее распределения или моментами. Вместе с тем в ряде случаев можно рассматривать затухание, предполагая регулярное состояние атмосферы для наилучшего и наихудшего случаев, и найти соответственно минимальное  $F_{\text{min}}$  и максимальное  $F_{\text{max}}$  значения, а также установить некоторые качественные особенности явления.

## §6.2. Ослабление оптического излучения в атмосфере

Ослабление излучения при прохождении через атмосферу может быть описано уравнением Бугера:  $I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\beta(\nu)R)$ , где  $I_0(\nu)$  — излучение на входе среды;  $\beta(\nu)$  — коэффициент затухания, равный сумме коэффициентов молекулярного поглощения  $\beta_{m,n}$ , рассеяния на частицах  $\beta_p$ .

На высотах до 12 км основную роль в поглощении излучения играют молекулы углекислого газа и водяных паров (концентрация водяных паров колеблется от  $10^{-3}$  до 4 % по объему, а углекислого газа от 0,03 до 0,05 %).

Твердые и жидкие включения замутняют атмосферу и играют большую роль в образовании облаков, тумана, являясь ядрами конденсации водяных паров. Главная причина помутнения атмосферы — дым, наземная пыль, бактерии, соли. Над городами, индустриальными центрами возникают так называемый слой смога (густой туман с дымом и копотью) и другие образования, связанные с загрязнением воздуха. Известно, что в тумане водяные пары имеют размеры от 0,1 до 50–60 мкм. Наиболее часто встречаются размеры 7–15 мкм при  $t > 0^\circ\text{C}$  и 2–5 мкм при  $t < 0^\circ\text{C}$ . Размер капель в облаках 2–30 мкм, дымки (очень слабый туман) примерно 1 мкм (их количество достигает 40–50 на  $1 \text{ см}^3$ , а в сильном тумане — до 50–600 на  $1 \text{ см}^3$ ).

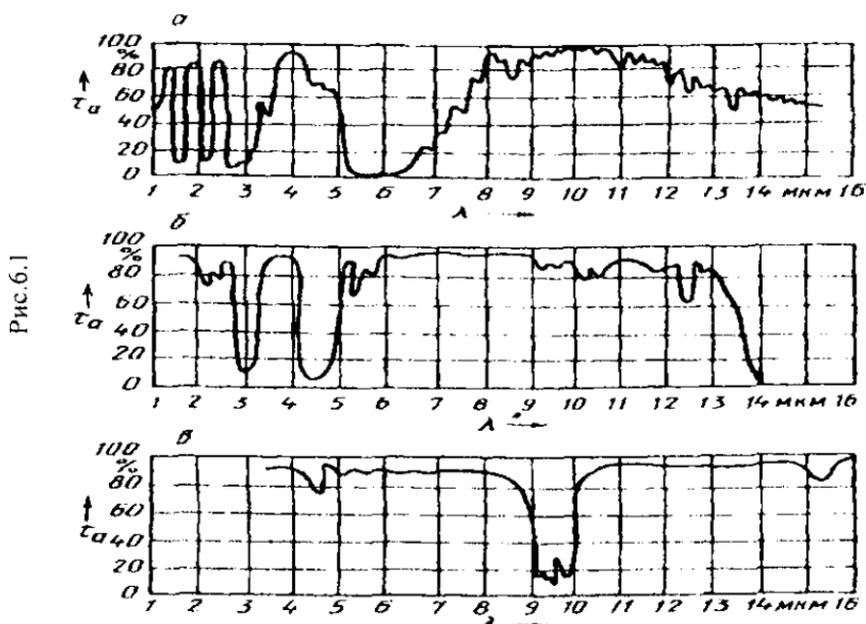
Затухание в “чистой атмосфере” (дальность метеовидимости  $s_m \geq 10$  км) определяется в основном рассеянием в аэрозоле. Параметр  $s_m$  для дневных условий определяется как расстояние, на котором фотометрический контраст  $S_\phi$  равен контрастной чувствительности  $\epsilon_0$  глаза:

$S_\phi = (B_\phi - B_n) B_\phi = \epsilon_0$ , где  $B_n$  — яркость цели (предмета);  $B_\phi$  — яркость фона, на котором наблюдается предмет.

На рис. 6.1 представлены графики коэффициентов пропускания  $\tau_a$ , обусловленные поглощением молекулами водяного пара (а), двуокиси углерода (б) и озона (в). Эти кривые были сняты с относительно низкой спектральной разрешающей способностью. Поэтому можно считать, что изменение ослабления, показанное на рис. 6.1, представляет грубую картину пропускания. В действительности поглощение в атмосфере резко изменяется при изменении частоты излучения, поскольку спектр молекулярного поглощения имеет линейчатый характер, а не полосовой. Определение такой структуры поглощения в настоящее время является предметом исследований.

На основе графиков, приведенных на рис. 6.1, и при наличии подобных графиков тонкой структуры поглощения можно правильно выбрать несущую частоту ОКГ и сделать вывод о необходимости ее стабилизации в областях с минимальным поглощением. В целом получить точные оценки величин поглощения и рассеяния излучения в атмосфере трудно, поскольку концентрация ее составляющих определяется температурой и давлением, зависящими от географической широты, высоты слоя и состояния погоды. Поэтому продолжаются георетические и экспериментальные поиски с целью получения

исчерпывающих сведений об ослаблении излучения лазера в атмосфере.



Необходимо отметить еще один фактор, оказывающий отрицательное влияние на системы передачи информации оптического диапазона, нарушение когерентности излучения лазера в турбулентной атмосфере, возникающее вследствие завихрения воздуха или наличия ячеек воздуха с различными показателями преломления, что вызывает отклонение центральной оси диаграмм направленности излучения, а в ряде случаев и фазовые искажения волнового фронта. Размеры и число завихрений на пути распространения излучения постоянно меняются из-за воздушных потоков. Вызванные турбулентностью потери примерно пропорциональны длине пути распространения и площади апертуры приемника. Сложность проблемы, связанной с турбулентностью, ставит под сомнение вопрос о возможности супергетеродинного приема в лазерных системах передачи информации в условиях атмосферы.

### §6.3. Физические принципы распространения излучения в направляющих средах

При прохождении луча света из одной среды в другую на границе раздела сред происходит отражение и преломление (рис. 6.2) света. При этом справедливо соотношение  $\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_2 / n_1$ , где  $\alpha_1, \alpha_2$  — угол падения и угол преломления;  $n_2, n_1$  — показатели преломления сред.

Если луч проходит из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления, т. е.  $n_1 > n_2$ , то  $\sin \alpha_2 > \sin \alpha_1$  и  $\alpha_2 > \alpha_1$ . В этом случае, как видно из рис. 6.2, луч  $l$ , падающий под углом  $\alpha_1$ ,

частично отражается (луч  $I'$ ) и частично проникает в среду с показателем преломления  $n_2$  под углом  $\alpha_2$  (луч  $I''$ ). При некотором критическом значении  $\alpha_{кр}$  угол  $\alpha_2 = \pi/2$  и  $\sin \alpha_2 = 1$ . Угол  $\alpha_{кр}$  называется *критическим углом внутреннего отражения*.

Если угол падения  $\alpha_1 > \alpha_{кр}$  происходит полное внутреннее отражение.

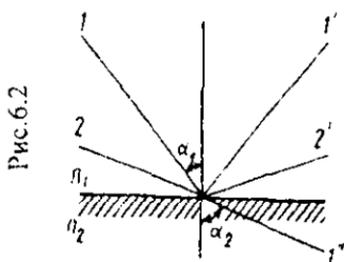


Рис.6.2

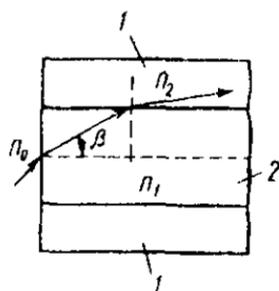


Рис.6.3

Падающий под таким углом луч света 2 полностью отражается от границы раздела сред (луч  $2'$ ) по законам зеркального отражения с коэффициентом, близким к 1.

Рассмотрим двухслойное волокно (рис. 6.3), состоящее из сердцевинки (центральной жилы) 2 и оболочки 1. Поле направляемой волны сосредоточено в основном в области сердцевинки волокна, некоторая часть поля проникает в оболочку, но оно спадает почти экспоненциально в радиальном направлении от границы сердцевинки. Величина этого поля на наружной поверхности волокна может быть сделана сколь угодно малой. Числовая апертура  $A_0 = n \sin \beta$  при данном  $n$  определяет максимальный телесный угол конуса лучей, пропускаемых волокном. При превышении этого угла в световолокне с оболочкой не происходит полного внутреннего отражения луча на границе сердцевинка - оболочка. Он будет преломляться и распространяться в оболочке, т. е. световозвращения сердцевинки будет нарушена.

Для двухслойного волокна числовая апертура  $A_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ . Из этой формулы следует, что чем больше разность между  $n_1$  и  $n_2$ , тем больше числовая апертура и конический пучок лучей с большим телесным углом пройдет через световолокно. Однако максимальное значение  $n_1$  ограничивается светопропусканием используемого материала. Так, для стекол чем больше показатель преломления  $n$ , тем меньше их светопропускание. Таким образом, числовая апертура  $A_0$  позволяет оценивать собирающую способность волокна в отношении падающего на него потока излучения: чем больше числовая апертура, тем выше собирающая способность волокна, тем большую интенсивность имеет поток излучения на выходе из волокна.

Обычно цилиндрические волокна изготавливают, используя для сердцевинки высокопреломляющие тяжелые флинтты, а для оболочки - легкие кро-

ны. Для такой пары стекол при  $n_1 = 1,75$  и  $n_2 = 1,52$  числовая апертура  $A_0 = 0,86$ , что соответствует пропусканию лучей с углом при вершине около 2 рад, падающих из воздуха на входной торец световолокна.

Одна из важнейших характеристик световолокна – светопропускание  $\tau = \Phi / \Phi_0$ , где  $\Phi$ ,  $\Phi_0$  – прошедший и падающий световые потоки.

Назовем несколько причин, вызывающих потери излучения при распространении сигнала по световоду.

Первая причина – поглощение и рассеяние в материале волокна. Многочисленные ионы металлов и ионы группы ОН, присутствующие в стекле и имеющие электронные переходы, вызывают полосы поглощения. Длина волны пика поглощения и ширина полосы для данного иона могут быть различными для разных составов стекол. Следовательно, технология изготовления стекла оказывает существенное влияние на зависимость потерь волокна от длины волны излучения. Для обеспечения низкого уровня потерь на поглощение требуется высокая чистота материала.

Существует ряд механизмов рассеяния, которые вызывают потери, рэлеевское рассеяние, так называемое Ми-рассеяние, вынужденное комбинационное рассеяние, рассеяние Мандельштама – Бриллюэна. Рэлеевское рассеяние обусловлено тепловыми флуктуациями на интервалах, меньших длины волны. Ми-рассеяние происходит на неоднородностях, сравнимых по размеру с длиной волны. Вынужденное комбинационное рассеяние и рассеяние Мандельштама – Бриллюэна вызывается нелинейными эффектами. Их влияние сказывается, начиная с некоторого порогового значения мощности излучения. Явление нелинейного взаимодействия между распространяющейся волной и материалом приводит к перекачке мощности первоначальной волны в излучения с другими длинами волн. При передаче сигналов на большие расстояния эти нелинейные эффекты определяют верхний предел уровня мощности, которая может быть передана по каналу связи.

Потери за счет поглощения и рассеяния в материале волокна можно учесть формулой  $\alpha_{\text{оп}} = \exp(-\epsilon L)$ , где  $\epsilon$  – показатель ослабления света материалом;  $L$  – путь, который луч проходит в волокне.

Вторая причина – потери на входном и выходном торцах оптического волокна за счет отражения (френелевские потери). Эти потери можно учесть формулой

$$\alpha = (1 - \rho_{\text{ф}})^2 \quad (6.1)$$

где  $\rho_{\text{ф}}$  – коэффициент френелевского отражения.

Формула (6.1) учитывает ту часть энергии потерь, которая пройдет через обл торца.

Третья причина – потери за счет неполноты отражения от боковых направляющих поверхностей волокна при распространении излучения (неполного внутреннего отражения). Эти потери могут быть весомыми при большой длине оптического волокна и соответственно большом числе отражений. Учесть их можно выражением  $\alpha_{\text{отр}} = \rho^m$ , где  $\rho$  – коэффициент отражения при однократном отражении;  $m$  – число отражений. Необходимо от-

метить, что  $\rho$  является сложной функцией углов  $\beta$ . Однако, учитывая его малое изменение, приближенно можно считать  $\rho$  постоянной величиной.

Кроме рассмотренных, могут быть и другие, менее существенные причины потерь (рассеяние за счет геометрической вариации размера сердцевины волокна, рассеяние в оболочке, излучение вследствие искривлений световода и др.). В общем случае расчет светопропускания достаточно сложен. Однако приближенные оценки можно получить, используя вышеприведенные формулы.

Если источник излучения расположен симметрично относительно оси волокна, а интенсивность излучения постоянна, светопропускание можно оценить выражением

$$\tau = (1 - \rho_0)^2 e^{-\frac{2}{\beta_1} \int_0^{\beta_1} \rho^2 d\beta}, \quad (6.2)$$

где  $\beta_1$  — критический угол;  $d$  — диаметр световолокна.

Эта формула справедлива для случая, когда поперечные размеры волокна намного больше длины волны излучения, т. е.  $d \gg \lambda$ . При  $d \geq \lambda$  световолокна работают как диэлектрические волноводы.

Конический пучок лучей, падающий на входной торец световолокна, дифрагирует на нем и возбуждает внутри сердцевины и в оболочке дискретный набор отдельных типов волн. Чем меньше размеры  $d$  по сравнению с  $\lambda$ , тем меньшее число типов волн может распространяться в световолокне. Таким образом, световолокна могут быть одномодовыми ( $d > \lambda$ ) и многомодовыми ( $d \gg \lambda$ ).

В световолокне различные типы волн имеют разные фазовые скорости, т. е. испытывают дисперсию и имеют соответственно разные углы по отношению к оси световолокна. Отдельные типы волн, достигая выходного торца, снова испытывают на нем дифракцию, как на диафрагме с отверстием.

Эти особенности затрудняют расчет светопропускания. Представляет интерес определение доли мощности излучения, проходящего через световолокно, для каждого типа волны (конкретного типа  $\lambda$ ).

#### Контрольные вопросы:

1. По каким причинам происходит ослабление оптического излучения в атмосфере?
2. Что вы знаете о распространении излучения в направляющих средах?
3. Что такое “рассеяние Мандельштама — Бриллюэна”?
4. Назовите причины, вызывающие потери излучения при распространении сигнала по световоду.
5. Что называется “критическим углом внутреннего отражения”?
6. Что такое “френелевские потери”?
7. Чем отличаются оптические волны от электромагнитных волн?
8. Чем вызвано нарушение когерентности лазера в турбулентной атмосфере?
9. Как определяется светопропускание световолокна?
10. Как рассчитывается светопропускание волокна?

### §7.1. Общая характеристика фотодетекторов

Для передачи сигналов в диапазоне длин волн 1 ... 2 мкм прямое детектирование с использованием р-і-п-фотодиодов или лавинных фотодиодов остается самым удобным методом восстановления электрического сигнала из оптического как в замкнутых, так и в открытых системах связи. Однако возможное использование более длинных или более коротких волн заставляет рассмотреть другие методы и другие типы устройств детектирования оптических сигналов. При длинах волн меньше 1 мкм становится целесообразным использовать фотозлектронный умножитель (ФЭУ). Достоинством ФЭУ является то, что они имеют большую площадь фотокатода (до 10 см<sup>2</sup>), очень высокий внутренний коэффициент умножения (более 10<sup>6</sup>), вносят относительно небольшой аддитивный шум и имеют полосу пропускания свыше 1 ГГц. Основными недостатками ФЭУ являются низкая квантовая эффективность (менее 0,1), большой размер, ограниченный срок службы, хрупкость и необходимость использования стабилизированных высоковольтных источников питания (обычно около 1 кВ). На более длинных волнах, в частности на 10 мкм, связанных с лазерными источниками излучения на CO<sub>2</sub>, становится целесообразным использование гетеродинного детектирования, обеспечивающего более высокую чувствительность и дающего возможность реализовать другие методы модуляции.

### §7.2. Прямое фотодетектирование

Существуют два основных метода приема оптического излучения – *прямое фотодетектирование* и *гетеродинный прием*. Первый метод наиболее широко применяется в оптических системах передачи информации благодаря простоте схемы приема, а также из-за того, что для гетеродинного метода необходим режим одномодового и даже одночастотного излучения. Однако при прямом фотодетектировании теряется информация о частоте и фазе оптического излучения, т. е. фотодетектор нечувствителен к частотной или фазовой модуляции. Поэтому здесь могут быть использованы только разновидности амплитудной модуляции. Сигнал на выходе фотодетектора пропорционален мощности принимаемого модулированного светового потока. Точнее, фотодетектор, используемый в системах передачи информации, представляет квантовый счетчик: он реагирует на отдельные фотоны с соответствующей для каждой длины волны квантовой эффективностью.

Приемники излучения, осуществляющие демодуляцию сигналов в оптических системах передачи многоканальной информации, должны отвечать определенным требованиям, предъявляемым к их характеристикам, совместности с элементами системы и стоимости. К этим требованиям относятся: высокая квантовая эффективность, под которой понимают отношение среднего тока фотодетектора к среднему значению мощности излучения, падаю

шего на детектор; высокая чувствительность на длине волны излучения оптических генераторов; достаточная полоса пропускания, или быстродействие, обеспечивающая требуемую скорость передачи многоканальной информации; минимальный шум, вносимый детектором; малая зависимость рабочих характеристик от изменения окружающих условий.

В фотоприемнике происходит преобразование энергии светового поля в электрический ток или напряжение.

Непосредственно за фотопреобразовательной входной частью приемника следуют различные радиотехнические узлы (по существу те же, что и в радиоприемниках). Выбор этих узлов определяется конкретными требованиями к системе передачи информации. Например, если оптические сигналы были переданы с помощью СВЧ поднесущей, то после фотопреобразовательной части следуют СВЧ преобразователь и усилитель промежуточной частоты. Это относится и к гетеродинному, и фотодетекторному методам входного тракта.

Таким образом, схема приема оптического излучения после фотопреобразовательной части не отличается от схемы обычного радиоприемника. Поэтому при рассмотрении методов приема оптического излучения основное внимание будет уделено фотопреобразовательной входной части приемных устройств.

Основное достоинство прямого фотодетектирования — простота приемного устройства, что означает снижение стоимости, массы, габаритов и потребляемой мощности по сравнению с гетеродинным методом приема. Однако фотодетектор не может отличать фотоны сигнала от фотонов помех (фонового шума), которые поступают в относительно широкой спектральной полосе чувствительности. Чтобы обеспечить спектральную селекцию, используют светофильтры, а для пространственной селекции — уменьшение поля зрения входной оптической системы.

Фотопреобразователи можно разделить на два класса — детекторы с внешним и внутренним фотоэффектами. В качестве критериев оценки фотодетекторов используются следующие параметры: спектральная характеристика; квантовая эффективность; пороговая чувствительность; интегральная чувствительность; темновой ток; частотная характеристика.

Под *спектральной характеристикой* понимают зависимость чувствительности детектора от длины волны падающего на него светового излучения. *Пороговой чувствительностью* называют минимальную мощность излучения, создающую на выходе приемника сигнал, равный напряжению шумов. *Интегральной или общей чувствительностью* называется отношение фототока на выходе детектора к мощности светового потока, падающего на него. Эмиссия электронов на выходе фотодетектора может быть вызвана термическими эффектами в катоде, даже если в течение наблюдаемого интервала времени на фотокатод не падают сигнальные и шумовые фотоны.

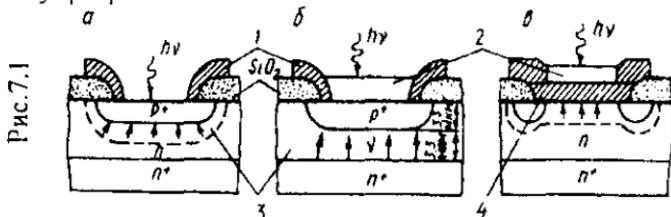
Это явление носит название *темнового тока*, который можно измерить экспериментально, исключив попадание на катод сигнальных фотонов. *Частотной характеристикой* фотопреобразователей называют зависимость

чувствительности фотодетектора от частоты сигнала, модулирующего световое излучение.

Наиболее широкое распространение в качестве фотодетекторов нашли фотоэлектронные умножители (ФЭУ), работающие на основе внешнего фотоэффекта. Они обеспечивают высокий коэффициент усиления (до 60 дБ) и имеют низкий коэффициент шума, однако чувствительность их ограничена полосой 100 - 300 МГц, определяемой временем пролета электронов. Кроме того, они могут быть использованы практически только в видимой части спектра излучения ОКГ. Квантовая эффективность ФЭУ составляет единицы процентов.

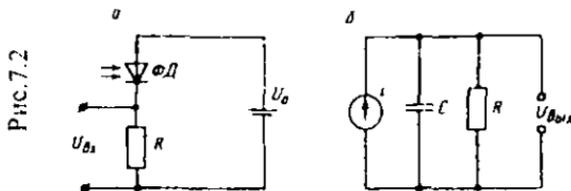
Твердотельные фотодиоды обладают квантовой эффективностью, близкой к единице для излучения, энергия фотонов которого превышает ширину запрещенной зоны. Их малые размеры, хорошая совместимость и потенциально низкая стоимость могут удовлетворить почти всем требованиям, предъявляемым к детекторам оптических систем передачи информации. Благодаря малым размерам фотодиодов согласование их с волоконными световодами и электронными устройствами не вызывает затруднений, кроме того, они требуют достаточно низких напряжений питания.

Фотодиоды изготавливаются на основе специальных р-п-переходов, р-і-р-структур или перехода металл - полупроводник (рис. 7.1). На рисунке 1 - металлический контакт; 2 - просветляющее покрытие; 3 - обедненный слой; 4 - полупрозрачный металлический слой.



Эти диоды обычно работают при обратном смещении. Фотовозбужденные электроны и дырки, которые генерируются внутри области перехода, где существует сильное поле, и в объеме диода, а затем диффундируют к р-п-переходу, разделяются областью сильного поля, образуя фототок. Однако процессы диффузии протекают медленно по сравнению с дрейфом носителей в области сильного поля. Поэтому в быстродействующих фотодиодах носители должны возбуждаться внутри области р-п-перехода, где существует сильное поле, или так близко к переходу, чтобы время диффузии было меньше или сравнимо с временем дрейфа носителей. Затем носители диффундируют через переход со скоростью, ограниченной рассеянием и равной  $10^6 - 10^7$  см/с.

На рис. 7.2, а показана функциональная схема фотодетектора, работающего при наличии постоянного напряжения, на рис. 7.2, б - эквивалентная схема. Она включает источник сигнального тока  $i$ , шунтированный емкостью  $C$  и эквивалентным сопротивлением детектора  $R$ .



Соотношение между сигнальным током и мощностью оптического излучения зависит от модулирующей частоты излучения. Если несущее излучение промодулировано по интенсивности синусоидальным колебанием частотой  $\omega_{\max}$  со 100%-ным коэффициентом глубины модуляции, сигнальный ток на выходе фотодетектора

$$i_s = \frac{\eta q \tau_{np}}{h\nu\tau_t} \cdot \frac{1}{(1 + \omega_{\max}^2 \tau_{np}^2)^{1/2}} \cdot \frac{P_{\text{нм}}}{2} (1 + \cos(\omega_{\max} t + \varphi)), \quad (7.1)$$

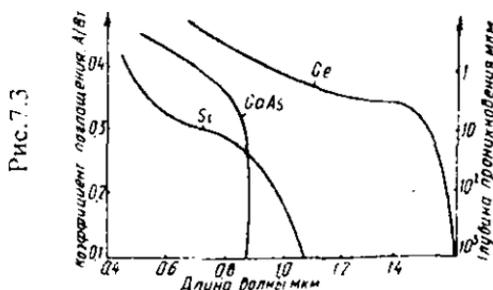
где  $\eta$  - квантовая эффективность;  $q$  - заряд электрона;  $h$  - постоянная Планка;  $\nu$  - несущая частота;  $\tau_{np}$  - среднее время жизни электрона в энергетической зоне проводимости;  $\tau_t$  - время перехода электрона при движении через толщину материала детектора;  $P_{\text{нм}}$  - средняя мощность немодулированной несущей;  $\varphi$  - фазовый сдвиг сигнального тока. Отношение  $\tau_{np}/\tau_t$

$G$  называем *усилением фотодетектора*.

Время перехода носителя определяется выражением

$$\tau_t = l^2 / (U_0 + \mu U), \quad (7.2)$$

где  $l$  - расстояние между электродами;  $U_0$  - постоянное напряжение



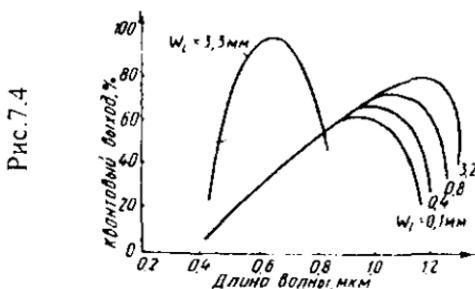
смещения;  $\mu$  - степень подвижности электронов.

Подставив выражение (7.2) в формулу (7.1), увидим, что фототок увеличивается по линейному закону в соответствии с приложенным напряжением. Увеличение сигнального тока ограничивается пространственным зарядом. При достижении условий образования пространственного заряда переходное время  $\tau_t$  ограничивается значением междуэлектродной емкости и становится равным времени диэлектрической релаксации фотодетектора  $\tau_p$ . Тогда максимальное усиление фотодетектора

$$G_{\max} = \tau_{np} / \tau_p \quad (7.3)$$

Выбор фотодиода зависит главным образом от рабочей длины волны.

В коротковолновой области спектра, когда свет поглощается близко к поверхности полупроводника, используются фотодиоды на основе перехода металл — полупроводник с тонкими полупрозрачными металлическими слоями. В этом случае носители разделяются в области сильного поля, близкой к поверхности, при этом обеспечивается большой квантовый выход. Для видимой области спектра, когда свет проникает на несколько микрометров в глубь кремния, используются диффузионные  $p-n$  и  $p-i-n$ -переходы (см. рис. 7.1, а и б). На рис. 7.3 показаны зависимости коэффициента поглощения  $\alpha$  и глубины проникновения  $\beta$  фотонов от длины волны для кремниевых, германиевых и GaAs фотодиодов. Как видно из рисунка, кремниевые и GaAs фотодиоды пригодны для детектирования в диапазоне 0,85 — 0,9 мкм, а германиевые — при длинах волн более 1 мкм.



В длинноволновой области спектра, близкой к ширине запрещенной зоны материала диода, свет проникает глубоко в материал. Поэтому для получения высокого квантового выхода необходима большая ширина слоя объемного заряда. Из рис. 7.4 видно, что квантовый выход на длинах волн около 1 мкм для кремниевых  $p-i-n$ -диодов зависит от ширины слоя объемного заряда. Германиевые диоды используются в диапазоне от 1 до 1,5 мкм. В диапазоне от 1,5 до 3,6 мкм и от 3,6 до 5,6 мкм используются InAs и InSb фотодиоды соответственно. На рис. 7.4 приведены спектральные характеристики кремниевых фотодетекторов в зависимости от ширины  $W_l$  слоя объемного заряда, а на рис. 7.5. — значения коэффициента поглощения InGaAs фотодиодов в зависимости от длины волны и от количественного состава компонентов. В фотодетекторах ширина полосы частот ограничивается временем жизни носителей  $\tau_{np}$ :

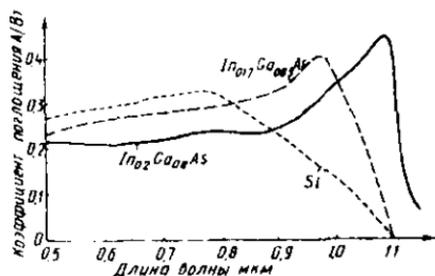


Рис. 7.5

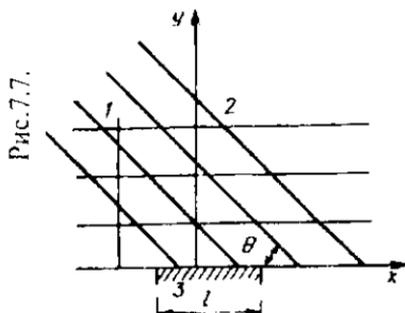
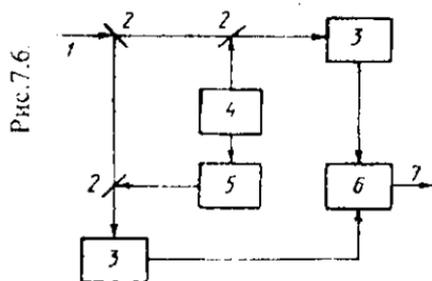
$$\Delta\nu < 1/(2\pi\tau_{np}) \quad (7.4)$$

### §7.3. Гетеродинное фотосмещение

Принципиальная возможность построения гетеродинного приемного устройства следует из условия достаточно малой ширины спектральной линии излучения ОКГ. В качестве гетеродина может быть использован ОКГ, работающий на одной из мод, например соседней с модой передающего ОКГ. В зависимости от размеров оптического резонатора эти моды могут быть разнесены на сотни мегагерц.

Вместе с тем гетеродинное фотосмещение не дает такого выигрыша в чувствительности, как при использовании супергетеродинного приема в радиодиапазоне. Объясняется это наличием ряда принципиальных трудностей, к числу которых можно отнести сопряжение волновых фронтов сигнального и гетеродинного потоков излучения, требования одномодовости и даже одностотного режима работы местного гетеродина и передающего ОКГ. Не менее важным является требование высокой стабильности излучения для местного гетеродина и передатчика. Практически все известные в настоящее время лазеры излучают слишком широкий спектр. Например, спектр, генерируемый диодом из арсенида галлия без охлаждения, занимает около  $0,8 \cdot 10^{11}$  мкм, что соответствует полюсе частот  $3 \cdot 10^{11}$  Гц.

Упрощенная структурная схема гетеродинного фотосмещения с использованием балансного фотодетектора для уменьшения влияния шумов гетеродина показана на рис. 7.6. Входной сигнал 1 через полупрозрачные зеркала 2 направляется на фотосмесители 3. Сигнал лазерного местного гетеродина 4 также поступает на эти смесители. Поскольку на одном из смесителей необходимо получить сумму входного сигнала и сигнала гетеродина, а на другом — их разность, на пути луча ко второму смесителю установлен фазовращатель 5, сдвигающий фазу сигнала на  $180^\circ$ . Результирующий сигнал промежуточной частоты 7 образуется на выходе вычитающего устройства 6.



Рассмотрим требования к сопряжению волновых фронтов сигнального и гетеродинного световых потоков при поступлении их на фоточувствительную поверхность. Отметим, что основной причиной жесткости этих требо-

ваний является то, что длина световой волны намного меньше размеров фоточувствительной области, на которой осуществляется фотосмещение (рис. 7.7). Здесь условно показаны волновые фронты сигнала 1 и гетеродина 2, а также фотокатод 3.

Запишем выражения для принимаемого сигнала и сигнала гетеродина:

$$\left. \begin{aligned} u_c &= U_c \sin \omega_c t \\ u_f &= U_f \cos(\omega_f t - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

где  $\beta = 2\pi f_s \sin \theta / c = 2\pi \sin \theta / \lambda_s$ .

Плотность тока  $di/dx = (u_c + u_f)^2$ . Подставив в эту формулу значения из выражения (7.5), раскрыв скобки и опустив члены, содержащие частоты, превышающие  $\omega_s$ , а также приняв, что  $\omega_{op} = \omega_c - \omega_f$ , получим

$$di/dx = (U_c^2 + U_f^2)/2 + U_c U_f \cos(\omega_{op} t + \beta).$$

Проинтегрировав по области, на которой осуществляется фотосмещение (от  $-l/2$  до  $+l/2$ ), найдем

$$i = \int_{-l/2}^{+l/2} \left( \frac{U_c^2 + U_f^2}{2} \right) dx + \int_{-l/2}^{+l/2} U_c U_f \cos(\omega_{op} t + \beta) dx$$

Произведя тригонометрические подстановки, выполнив интегрирование с учетом пределов и некоторые преобразования, получим

$$i = l \left( \frac{U_c^2 + U_f^2}{2} + U_c U_f \cos \omega_{op} t \frac{\sin(\beta l / 2)}{\beta l / 2} \right)$$

Отсюда видно, что если  $\beta l \gg 1$ , то член, включающий промежуточную частоту  $\omega_{op}$ , будет мал по сравнению с постоянной составляющей. Он будет максимальным, если  $\sin(\beta l / 2) / (\beta l / 2) = 1$ . Вместе с тем легко заметить, что, поскольку  $\beta l = 2\pi l / \sin \theta / \lambda_s$ . Для малых значений  $\beta l \leq 2 \sin \theta < \lambda_s / (\pi l)$ . Так как  $\lambda_s = 10^{-4}$  см, а  $l \geq 1$  см, то  $\lambda_s / (\pi l) < 10^{-4}$ .

Следовательно, поскольку для малых углов  $\sin \theta \approx \theta$ , то, чтобы член, содержащий промежуточную частоту, оставался близким к своему максимальному значению, угол  $\theta$  должен быть меньше  $10^{-4}$  рад.

Эти жесткие геометрические требования приводят к серьезным практическим проблемам при проектировании систем оптической связи с использованием супергетеродинного метода приема. Однако этот метод отличается высокой чувствительностью и обеспечивает малые шумы, что облегчает задачу фильтрации, поскольку она осуществляется на микроволновых, а не оптических частотах. Супергетеродинный прием обеспечивает высокую избирательность, что в свою очередь позволяет снизить помехи теплового излучения и паразитных засветок.

В практике разработок лазерных систем передачи информации может применяться как прямое фотодетектирование, так и гетеродинный прием. Выбор метода зависит от конкретных условий.

Сравним гетеродинный и фотодетекторный режимы приема. Так как зависимость пороговой чувствительности  $P_{пор}$  от полосы частот в этих режимах различна, то сравнение будем вести для полос частот  $\Delta f_1 = 1$  Гц и  $\Delta f_2 =$

10 МГц.

Будем считать, что в видимом диапазоне на длине волны  $\lambda=0,5$  мкм в качестве фотодетектора используется ФЭУ с площадью чувствительной поверхности  $S = 1 \text{ см}^2$  и обнаружительной способностью  $D = 5 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ , а в ИК диапазоне на длине волны  $\lambda = 10,6$  мкм используется фотодиод на основе GeSi с площадью  $S = 10^{-4} \text{ см}^2$ , величина обнаружительной способности которого  $D = 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ .

Пороговое значение чувствительности для фотодетекторного приема  $P_{\text{пор ф}} = \sqrt{S \Delta f / D}$ ; для гетеродинного приема  $P_{\text{пор ф}} = (F / \eta)(h \nu \Delta f)$ , где  $F$  — коэффициент избыточного шума: для ФЭУ его величина находится в пределах 3–7, примем  $F = 5$ ;  $\eta$  — квантовая эффективность фотодетектора, которую для простоты примем равной 1. Результаты сравнительных расчетов сведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

$\lambda$ , мкм	$\Delta f$ , Гц	$P_{\text{пор ф}}$ , Вт	$P_{\text{пор}}$ , Вт
0,5	1	$10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-18}$
0,5	$10^7$	$7 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-11}$
10,6	1	$3 \cdot 10^{-14}$	$10^{-19}$
10,6	$10^7$	$10^{-14}$	$10^{-12}$

Из табл. 7.1 видно, что гетеродинный прием в узкой полосе ( $\Delta f = 1$  Гц) дает выигрыш чувствительности в видимом диапазоне в  $5 \cdot 10^3$  раз, в ИК диапазоне — в  $3 \cdot 10^7$  раз. При переходе к относительно широкополосной системе ( $\Delta f = 10$  МГц) в видимом диапазоне выигрыша практически нет, а в ИК диапазоне выигрыш получается в  $10^4$  раз.

Таким образом, использование гетеродинного метода имеет смысл при широкополосных сигналах только в ИК диапазоне. Гетеродинный метод приема в видимом и ближнем ИК диапазоне нецелесообразно применять и по следующим соображениям: лазеры на алюминиттриевом гранате при работе в непрерывном режиме на нескольких модах имеют широкий спектр излучения (порядка 15–30 ГГц), и всякая модуляция частотой, меньшей этих величин, потеряется в биениях спектральных компонентов гетеродинного лазера друг с другом и со спектральными составляющими сигнала. Следует также отметить, что гетеродинный метод приема целесообразно применять в случае, когда чувствительность фотоприемника в целом ограничивается фоновыми или внутренними шумами, а чувствительность ФЭУ — квантовыми шумами.

#### Контрольные вопросы:

1. Расскажите об особенностях прямого детектирования.
2. Достоинства прямого детектирования.
3. Что такое “гетеродинное фотосмещение”?
4. Когда применяют фотоэлектронный умножитель?

5. Как классифицируют фотопреобразователи?
6. Чем характеризуются твердотельные фотодиоды?
7. Объясните принцип действия фотодиодов.
8. Как выбирают фотодиоды?
9. Нарисуйте структурную схему гетеродинного фотосмещения.
10. Сравните гетеродинный и фотодетекторный режим приема.

## Глава 8

### Принципы построения лазерных многоканальных систем космической связи

#### §8.1. Особенности лазерных многоканальных систем космической связи

Исследование космического пространства с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ), успешно начатое запуском 4 октября 1957 г. (бывшим Советским Союзом) первого в мире спутника, выдвинуло проблему резкого увеличения скорости передачи информации (до величин порядка единиц гигабит в секунду). Решение этой проблемы возможно только при использовании очень широкополосных каналов и соответствующем увеличении частоты несущей. Создание таких систем передачи радиотехническими средствами является весьма сложной проблемой, и более просто она может быть решена при использовании лазерной техники.

Такие достоинства лазерных систем связи, как огромная информационная емкость и высокая направленность излучения (при малых габаритах излучающих устройств), побуждают специалистов ко все более интенсивным исследованиям теоретических и практических возможностей применения их в космосе.

Первый эксперимент, подтверждающий возможность создания космической лазерной системы связи (КЛСС), был выполнен специалистами НАСА (США) в 1968 г. Во время полета космического корабля «Джемини» космонавты установили связь с Землей с помощью лазерного луча. Эта связь была осуществлена по двухступенчатой схеме: сначала сигналы с космического корабля передавались на самолет, находящийся на высоте 3—12 км, а с него — на наземную станцию. Хотя эта связь длилась всего 120 с, она дала толчок к выполнению долгосрочных программ по разработке КЛСС для обеспечения оперативной передачи многоканальной информации в реальном масштабе времени. Для этого могут быть использованы низкоорбитальные спутники, совершающие быстрый облет Земли (сбор информации), синхронные спутники с высокой стационарной орбитой (ретрансляторы) и ряд наземных приемопередающих станций.

В настоящее время разработкой отдельных узлов и систем лазерной связи в целом занимаются научные учреждения и промышленность всех раз-

витых стран, в частности многие фирмы США, Англии, Франции, Японии и ФРГ. Теоретические исследования ведутся в высших учебных заведениях, широкие программы реализуются в многочисленных организациях НАСА и ВВС США.

Одной из основных особенностей КЛСС является необходимость использования в них устройств поиска и обнаружения корреспондента, слежения за ним и удержание луча на линии визирования в течение всего времени передачи и приема информации. При разработке КЛСС проблеме поиска, обнаружения и слежения уделяется большое внимание.

## §8.2. Основные требования к лазерным многоканальным системам космической связи

### *Скорость передачи информации*

Требования к лазерным многоканальным системам космической связи в отношении скорости передачи информации зависят от задач, для которых предназначена система связи. Одной из наиболее сложных задач, требующих очень высокой скорости передачи информации, является передача с низкоорбитального спутника (НС) через синхронные спутники (СС) - регреляторы - на наземную станцию изображения земной поверхности с достаточно высоким разрешением и в реальном масштабе времени (другие задачи, которые могут решаться с помощью КЛСС, требуют значительно меньшей скорости передачи информации).

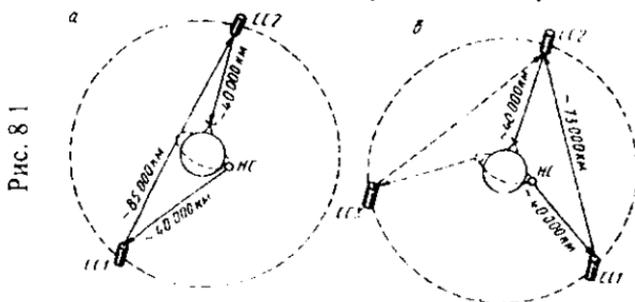
Скорость передачи информации, требуемая для данного случая, может быть найдена из выражения

$$R_{\text{инф}} = (vB/a^2) gb, \quad (8.1)$$

где  $v$  - первая космическая скорость полета НС ( $7,8 \cdot 10^3$  м/с);  $B$  - ширина полосы наблюдения;  $a$  - размер разрешаемого элемента;  $g$  - количество бит на выборку (соответствует числу воспроизводимых градаций яркости);  $b$  - количество спектральных полос.

### *Максимальная протяженность линий КЛСС*

На современном этапе развития оптической и электронной техники лазерные системы связи наиболее целесообразно использовать в ближнем космосе, так как именно на линиях связи между ИСЗ и между ИСЗ и наземными



станциями преимущества КЛСС по сравнению с радиочастотными системами (широкополосность и скрытность передачи) проявляются в наибольшей степени. Следует учитывать и основной недостаток таких линий — сильное затухание в слоях аэрозолей (облака, туман, дымка). Преодоление этого недостатка возможно путем размещения нескольких дублирующих наземных станций в малооблачных районах на значительных расстояниях друг от друга.

Для передачи большого объема информации с ИС, вращающегося на высотах  $H=200-2000$  км, на наземную станцию слежения могут быть использованы ретрансляторы на геостационарных или синхронных ИСЗ (СС). Благодаря 2-3 таким ретрансляторам возможно получение информации в реальном масштабе времени от ИС, находящихся практически над любой точкой Земли, с помощью цепи ИС — СС1 — СС2 — Земля. Поскольку синхронные спутники находятся на высоте порядка 36 000 км над земной поверхностью, максимальные дальности передачи при этом (рис. 8.1): ИС — СС1 и СС2 — Земля — до 40000 км (включая атмосферу); СС1 — СС2 — до 85000 км при двух СС (рис. 8.1. а); до 73000 км при трех СС (рис. 8.1.б).

### §8.3. Рабочая длина волны

На линиях, проходящих вне атмосферы (ИС — СС и т. п.), могут быть использованы любые рабочие волны, генерируемые лазером, поскольку в космическом пространстве на околоземных трассах затухание пренебрежимо мало.

На линиях, проходящих через атмосферу (СС — Земля), рабочие длины волн должны находиться в пределах "окон прозрачности" атмосферы для видимого и ИК диапазонов. Недопустимо применение волн, лежащих в узких интервалах с сильным молекулярным поглощением: 0,94; 1,13; 1,38; 1,90; 2,70; 4,30; 6,0; 15,0 мкм и т. д. Кроме того, диапазон используемых волн ограничивается сильным поглощением в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне ( $\lambda < 0,4$  мкм) и недостаточной шириной полосы пропускания, которая может быть обеспечена на более длинных волнах ( $\lambda > 100$  мкм). Следовательно, выбор рабочих волн в пределах  $\lambda = 0,4-100$  мкм определяется достаточной эффективностью, быстродействием, экономичностью и приемлемыми конструктивными особенностями лазеров, а также удовлетворительным соотношением сигнал/шум в приемном устройстве. Помимо этого, в бортовых устройствах большое значение имеют такие параметры лазеров, как масса, энергоемкость (желательны минимальные), механическая прочность, виброустойчивость, радиационная стойкость.

Таким образом, выбор рабочей длины волны затрагивает конструктивное решение всего бортового комплекса и требует анализа большого количества вариантов. Результаты такого анализа показывают, что наиболее перспективными являются рабочие волны и соответствующие лазеры, представленные в табл. 8.1.

Таблица 8.1

$\lambda$ , мкм	Тип лазера
0,53	Твердотельный на АИГ: Nd (вторая гармоника)
0,85 - 0,90	Полупроводниковые на GaAs и GaAlAs
1,06	Твердотельный на АИГ: Nd (основная гармоника)
10,6	Газовый на CO <sub>2</sub>

*Минимально необходимая мощность сигнала на входе фотоприемника*

В настоящее время наиболее распространены два основных метода приема сигналов в оптическом диапазоне: прямое детектирование и гетеродинный.

*Гетеродинный* метод приема обладает значительно большей чувствительностью, однако предъявляет более жесткие требования к когерентности принимаемого сигнала, которые удается удовлетворить только на относительно длинных волнах ( $\lambda > 10$  мкм).

В видимой части оптического диапазона и в коротковолновой части ИК диапазона обычно используется метод *прямого детектирования*. Чувствительность приемника и соответственно необходимая мощность принимаемого сигнала  $P_{\text{мин}}$  в этих двух случаях определяются разными факторами и отличаются на несколько порядков. Общим требованием к фотоприемникам является согласование полосы пропускания с шириной спектра сигнала.

При прямом детектировании *оптический приемник состоит из полосового фильтра, ослабляющего фоновое излучение, фотодетектора и электрического фильтра*. Мощность сигнала на выходе фотодетектора пропорциональна квадрату мощности входного сигнала (квадратичное детектирование) и не зависит от частоты, фазы и поляризации несущей. Таким образом, метод прямого детектирования требует модуляции сигнала по интенсивности.

Как известно, чувствительность приемника определяется уровнем шумов на его входе. В оптическом диапазоне уровень шумов на входе фотоприемника прямого детектирования определяется дробовым шумом фотонов самого сигнала (следствие флуктуаций скорости поступления фотонов на фотодетектор), принимаемым фоновым излучением, темновым током фотодетектора, тепловыми шумами детектора и усилителя. Наиболее эффективно использование ФЭУ с большим умножением ( $M \gg 1$ ), для которых реализуется максимально высокая чувствительность, ограничиваемая практически только дробовым (квантовым) шумом сигнала.

#### *Требования к передающему устройству*

Передающее устройство состоит из трех основных частей: ОКП; модулятора; устройства питания (накачки).

К бортовому передающему устройству предъявляются следующие требования: минимальные масса и габариты; максимальный КПД (отсюда минимальное потребление энергии и минимальное выделение теплоты, облегчающее охлаждение лазера); механическая прочность, виброустойчивость; надежность и достаточно большой ресурс безотказной работы (общее время безотказной работы на орбите должно составлять не менее нескольких лет,

что требует обеспечения длительности рабочего времени порядка  $10^4 - 10^5$  ч); желательны односторонность и достаточно высокая монохроматичность (следовательно, и когерентность) для улучшения коллимации луча и помехоустойчивости канала связи; достаточная мощность излучения в непрерывном режиме для обеспечения уверенной связи при высокой скорости передачи информации; высокое быстродействие модулятора и лазера, обеспечивающее требуемую информационную емкость канала ( $R_{инф} = 10$  бит/с).

В табл. 8.2 даны некоторые ориентировочные данные лазеров (в непрерывном режиме), наиболее подходящих для КЛСС (приведены максимальные показатели).

Таблица 8.2

Тип лазера	$\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda/\lambda$	КПД, %	$P_{испр}$ , Вт ( $T = 300$ К)
АИГ: Nd (II-гармоника)	0,53	$10^{-5}$	0,01-0,1	1-2
GaAs, GaAlAs АИГ: Nd	0,85-0,90	$10^{-3}-10^{-5}$	20-40	0,01-0,2
(I-гармоника)	1,06	$10^{-5}$	1-3	$1 \cdot 10^3$
CO <sub>2</sub>	10,6	$10^{-9}$	2-20	$1 \cdot 10^3$

Выбор лазера для КЛСС должен производиться по результатам оценки оптимальности всей совокупности параметров как самого лазера, так и системы в целом.

#### §8.4. Требования к антенным устройствам

Передающая оптическая антенна преобразует световой пучок, канализованный тем или иным способом внутри передатчика, в световой пучок, распространяющийся в открытом пространстве, и направляет его в сторону приемной антенны корреспондента.

Приемная оптическая антенна осуществляет обратное преобразование светового пучка, распространявшегося в открытом пространстве, в канализованный световой пучок внутри приемного устройства.

Требования к передающим и приемным бортовым и наземным антеннам несколько отличаются, хотя благодаря свойству обратимости функции передающих и приемных антенн могут быть совмещены (приемопередающие антенны).

В настоящее время в оптическом диапазоне применяются главным образом антенны апертурного типа — линзовые (для антенн малых размеров) и зеркальные (для относительно больших антенн).

Рассмотрим требования, предъявляемые к *передающей антенне*. Для создания в месте приема достаточной интенсивности сигнала при небольшой мощности передатчика желательно получение максимально возможной усиления  $G_{прд}$  передающей антенны (минимальной расходимости светового пучка  $\theta_{прд}$ ). Чтобы выполнить это, требуется максимально возможное увеличение излучающей апертуры антенны (выходного отверстия линзы или зер-

кала), поскольку для круглых синфазных апертур диаметром  $D$  с однододовым распределением поля  $G_{\text{прж}} \approx \lambda (D/\lambda)^2$  и  $\theta_{\text{прж}} \approx \lambda/D$ . Однако реализация этого требования наталкивается на два основных ограничения:

1. При увеличении размеров апертуры растет величина случайных фазовых ошибок апертурного поля, обусловленных ограниченной точностью изготовления зеркала (линзы).

2. Уменьшение расходимости светового пучка увеличивает время поиска и вхождения в связь.

Требования к *приемной антенне* вытекают из ее функционального назначения и места установки. Задачей приемной антенны является фокусировка принимаемого светового пучка на входном отверстии фотоприемника. Размер сфокусированного пятна в фокальной плоскости приемной антенны не должен превышать площади отверстия фотоприемника.

Требования к размерам апертуры приемной антенны определяются размерами и амплитудно-фазовой структурой сечения светового пучка в месте приема. Для околоземных космических трасс длиной  $(4-8)10^4$  км и расходимости светового пучка передающей антенны порядка  $1-10$  мкрад размер освещенной области  $d_{\text{п}} \approx 40-800$  м. Кроме того, амплитуда и фаза поля в сечении пучка, падающего на наземную приемную антенну, испытывают сильные флуктуации вследствие турбулентности атмосферы. При этом амплитуда поля в сечении пучка изменяется от нуля до максимальных значений, а радиус корреляции имеет величину порядка десятых долей метра.

При *прямом детектировании* чувствительность приемника растет при увеличении размеров апертуры, а флуктуации принятого сигнала при этом уменьшаются. Ограничение — площадь поперечного сечения пучка  $d_{\text{п}}$ . Однако поскольку обычно размер апертуры  $D_{\text{прж}} \ll d_{\text{п}}$  более важно минимальное значение  $D_{\text{прж}}$ , при котором флуктуации сигнала не слишком велики. Для выполнения этого условия достаточно, чтобы апертура наземной приемной антенны охватывала несколько областей корреляции амплитуды, т. е. чтобы  $D_{\text{прж}} \approx 1-2$  м. Для бортовых приемных антенн это требование снимается и размер приемной антенны ограничивается допустимой массой и условиями размещения на борту, а также теми же ограничениями, что и для передающих антенн.

При *гетеродинном методе приема* размер приемной апертуры наземной антенны не должен превышать размеров области фазовой когерентности в сечении пучка  $r_0$ , в противном случае увеличивается дисперсия тока сигнала ( $D_{\text{прж}} \approx r_0$ ).

По данным исследований, эта величина составляет от 0,1 м для видимого света до  $1-2$  м в ИК. Диапазоне ( $\lambda \approx 10$  мкм). Для бортовых антенн эти ограничения несутся.

#### *Конструктивные и эксплуатационные требования*

Помимо требований к параметрам отдельных систем, входящих в КЛСС, ко всему бортовому комплексу предъявляется ряд общих требований, вытекающих из условий эксплуатации:

1) бортовой комплект аппаратуры должен быть рассчитан на длитель-

ную работу на орбите (обычно не менее нескольких лет). При выводе на орбиту аппаратура испытывает перегрузки и вибрацию, отсюда следуют жесткие требования к механической прочности, вибростойкости и надежности аппаратуры;

2) бортовая аппаратура подвергается воздействию космической радиации, которая может достигать в некоторые периоды значительного уровня. Поэтому все элементы аппаратуры должны обладать высокой радиационной стойкостью;

3) аппаратура КЛСС обычно является уникальной или мелкосерийной, поэтому стоимость отдельных узлов (особенно оптических) весьма высока, кроме того, высока удельная стоимость вывода на орбиту. Поэтому при проектировании необходима оптимизация всех элементов, заключающаяся в минимизации стоимости, массы, габаритов и энергоемкости при заданной эффективности.

Контрольные вопросы:

1. Какие существуют требования к многоканальным системам?
2. Как преодолевается недостаток линии КЛСС?
3. Как выбирается длина рабочей волны?
4. Как производится подбор антенных устройств?
5. Какие требования предъявляют к передающим устройствам?
6. Перечислите конструкционные требования в КЛСС.
7. Перечислите требования к размерам апертуры приемной антенны.
8. Чем определяется чувствительность приемника?
9. Перечислите ориентировочные параметры лазеров, подходящих для КЛСС.
10. Укажите особенности лазерных систем космической связи.

### §9.1. Общие сведения

Управление излучением — основная задача, возникающая при освоении нового диапазона электромагнитного спектра. Устройства, осуществляющие управление оптическим излучением в соответствии с передаваемым многоканальным сигналом, называются *модуляторами*.

Возможность использования принципиальных преимуществ оптического диапазона волн во многом зависит от создания достаточно эффективных и сравнительно несложных схем модуляции. Для видимого и ближнего ИК участков оптического диапазона  $(1-8)10^{14}$  Гц принципиально возможны полосы частот модуляции  $10^{11}$ — $10^{12}$  Гц, а имеющиеся в настоящее время образцы модуляторов позволяют передавать информацию в полосе частот до 200 МГц. Поэтому в настоящее время затрачивается много усилий на поиски устройств модуляции, обладающих более эффективными характеристиками.

К модуляторам оптического диапазона предъявляются следующие требования:

- широкополосность, обеспечивающая необходимую информационную емкость;
- линейность модуляционной характеристики;
- большой динамический диапазон;
- простота реализации, минимальные масса и габариты;
- высокая эффективность, экономичность, низкая стоимость;
- эксплуатационная надежность (стабильность работы при изменениях температуры, давления и влажности окружающей среды).

Модуляция оптического излучения информационным сигналом может осуществляться либо в процессе генерации (*внутренняя модуляция*), либо специальным модулятором, установленным на выходе источника излучения (*внешняя модуляция*).

Выбор того или иного метода модуляции зависит от типа используемого лазера и от требуемой полосы частот модуляции. Например, при работе с полупроводниковым лазером удобно применять внутреннюю модуляцию. У других лазеров, таких, как газовые и твердотельные, изменять с большой скоростью энергию накачки трудно, и поэтому для них более подходит внешняя модуляция.

В общем случае внутренняя модуляция, основанная на изменении мощности накачки, более экономична, чем внешняя, в отношении средней потребляемой мощности. При внешней модуляции вначале необходимо получить от источника полную световую мощность, а затем для формирования сигнала большую ее часть погасить. При внутренней модуляции излучаемую мощность можно регулировать от малых значений до максимальных в соответствии с передаваемым сообщением.

Виды модуляции, как и в радиодиапазоне, удобнее классифицировать

по изменяемому параметру модулируемого сигнала. В оптических системах в принципе возможны все виды модуляции (по изменяемому параметру модулируемого сигнала): амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), фазовая (ФМ), поляризационная (ПМ). По этой классификации мы и будем рассматривать различные виды модуляции. Однако вначале рассмотрим физические основы модуляции в оптическом диапазоне.

## §9.2. Физические основы модуляции излучения

Выражение для плоской монохроматической волны в изотропной среде имеет вид

$$E = E_{\max} e^{-\alpha l} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} nl\right),$$

где  $E$  — электрический вектор электромагнитной волны;  $E_{\max}$  — амплитуда электрического вектора в момент вхождения волны в среду;  $l$  — длина пути луча в среде;  $\omega, \lambda$  — частота и длина волны излучения;  $\alpha, n$  — коэффициенты поглощения и преломления среды. Модуляция может быть осуществлена, если возможно управление хотя бы одним из параметров  $\alpha, l, n$ .

В оптических системах наиболее целесообразна модуляция с изменением  $n$ . Существует ряд физических эффектов, благодаря которым это можно сделать. Наибольшее значение среди них имеют электрооптические эффекты, т. е. эффекты, связанные с зависимостью коэффициента преломления от напряженности приложенного к среде электрического поля  $E$ .

Характерной особенностью некоторых веществ является различие в величинах  $n$  для разных направлений (так называемая *анизотропия*). Это определяет зависимость фазовой скорости света в среде. В некоторых веществах можно искусственно создавать анизотропию, т. е. неравенство показателя преломления в различных направлениях распространения света. Например, изотропия нарушается при деформации оптически изотропных кристаллов, приложении сильных электрических или магнитных полей к оптически изотропным веществам.

В результате неодинаковых свойств оптических сред в них возникает двойное лучепреломление, т. е. имеется такое направление в веществе, по которому плоскополяризованный луч света, входящий в эту среду, превращается в два распространяющихся в том же направлении плоскополяризованных луча, у которых плоскости поляризации взаимно перпендикулярны и в общем случае не совпадают с плоскостью поляризации входившего луча. Скорости распространения этих лучей в активной среде неодинаковы. Один из лучей имеет постоянную скорость распространения, не зависящую от внешнего воздействия на вещество, скорость другого луча изменяется в зависимости от степени воздействия. Первый луч называется *обыкновенным*, второй — *необыкновенным*. Меняя степень воздействия на вещество, можно изменять скорость распространения второго луча:  $v_0 = v/n_0, v_1 = v/n_1$ , где  $v_0,$

$v_0$  — скорости распространения обыкновенного и необыкновенного лучей;  $n_o$ ,  $n_e$  — показатели преломления этих лучей;  $v$  — скорость распространения света в среде, окружающей вещество (кристалл, жидкость).

Таким образом, после прохождения через слой оптически активного вещества плоскополяризованный луч превращается в два когерентных плоскополяризованных луча, имеющих сдвиг по фазе световых колебаний. При сложении колебаний этих лучей за пределами активной среды образуется луч света, у которого характер поляризации отличается от линейной поляризации исходного луча и зависит от сдвига фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами. Поэтому, если модулирующим сигналом воздействовать на активное вещество и тем самым изменять скорость распространения необыкновенного луча, на выходе будет соответственно изменяться характер поляризации света.

В зависимости от того, каким преобразованиям подвергается луч света в оптически активном веществе, можно получить практически все виды модуляции: АМ, ЧМ, ФМ и ПМ.

Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний с различными амплитудами и разностью фаз приводит к образованию эллиптического колебания, т. е. колебания, при котором концы результирующего вектора описывает эллипс с той же угловой частотой колебаний  $\omega$ , с которой совершаются исходные колебания. Такой свет называется *эллиптически поляризованным*.

### §9.3. Амплитудная модуляция

Амплитудная модуляция может быть осуществлена при использовании двойного лучепреломления в жидкостях (эффект Керра) или кристаллах (эффект Погккельса), если при сложении обыкновенного и необыкновенного лучей использовать анализатор с линейной поляризацией. При этом через анализатор будет проходить только одна составляющая суммарного эллиптического колебания, амплитуда которой зависит от модулирующего сигнала. Для определения амплитуды необходимо около эллипса поляризации построить прямоугольник, одна из сторон которого должна быть параллельной плоскости поляризации анализатора. Амплитуда будет равна половине этой стороны (это проекция вектора  $E$ , описывающего эллипс поляризации на плоскость поляризации).

Экспериментальные исследования показали, что максимальным электрооптическим эффектом (эффект Керра) обладает нитробензол. Поэтому он нашел наибольшее применение в технике в качестве рабочего вещества оптических модуляторов. Предельная частота модуляции при использовании нитробензола определяется временем молекулярной релаксации, примерно равным  $10^{-9}$  с, т. е. частотная характеристика модулятора будет линейна до  $10^9$  Гц.

К основным недостаткам модуляторов, в которых используется эффект Керра, относятся следующие:

- необходимость значительной мощности модулирующего сигнала;
- нелинейность модуляционной характеристики;
- сравнительно малая предельная частота (теоретически 10 Гц, но на больших частотах диэлектрические потери резко возрастают, ячейки разогреваются, нитробензол разлагается, поэтому  $\Delta f = 20\text{—}30$  МГц); значительные (до 60%) потери света;
- необходимость обеспечения герметизации (из-за токсичности нитробензола);
- малая (примерно 30%) глубина модуляции.

По этим причинам чаще для модуляции применяется эффект Поккельса — явление двойного лучепреломления в кристаллах, т. е. твердых веществах. В отличие от эффекта Керра здесь разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами в большинстве случаев прямо пропорциональна приложенной к кристаллу напряженности. Это так называемый линейный электрооптический эффект (возможен и квадратичный эффект):

$$\Delta\varphi = b_n n_0^3 E,$$

где  $b_n$  — электрооптический коэффициент;  $E$  — напряженность электрического поля, приложенного к кристаллу;  $n_0$  — показатель преломления активной среды для обыкновенного луча.

В модуляторах наиболее широко в настоящее время применяются искусственные кристаллы дигидрофосфата аммония (АДР), дигидрофосфата калия (КДР), ниобата лития, танталата лития.

*Основное достоинство* модуляторов, в которых используется эффект Поккельса, — меньшая необходимая мощность модуляции, чем в ячейке Керра, широкая полоса рабочих частот (от нуля до нескольких десятков гигагерц);

*к недостаткам относятся:* довольно большая необходимая мощность модуляции (для кристаллов АДР и КДР), хотя и меньше, чем в ячейках Керра; гигро-копичность и значительные (до 30 %) потери света.

Кристаллы ниобата лития и танталата лития обладают достаточно высокой прозрачностью в широких участках видимого и ближнего ИК диапазона. В них существенно снижены и необходимые модулирующие напряжения.

Повышение эффективности модуляторов, основанных на эффекте Поккельса, достигается несколькими путями. Известно, что максимальная длина кристалла ограничивается расстоянием, которое проходит излучение в кристалле за половину периода модулирующего напряжения. При длинах, больших этого расстояния, накопление задержки по оптической фазе уже не происходит. Это ограничение можно преодолеть использованием нескольких кристаллов в резонаторе. Оптическая ось каждого кристалла параллельна оси резонатора, а оси наведенного двойного лучепреломления у каждого последующего кристалла должны быть повернуты на  $90^\circ$  по отношению к соответствующим осям предыдущего. При такой ориентации отдельных кристаллов накопление фазовой задержки будет происходить по всей длине об-

разумемого ими многоэлементного кристалла. Это приводит к увеличению глубины модуляции.

Уменьшение требуемой модулирующей мощности практически вдвое происходит при использовании интерферометра Майкельсона в модуляторах АМ.

Одним из недостатков модуляторов АМ при использовании эффекта Погкельса в кристаллах АДР и КДР является ограничение спектра рабочих частот практически видимым диапазоном волн.

## §9.4. Частотная и фазовая модуляции

Амплитудная модуляция имеет существенные недостатки (низкая помехоустойчивость, малая эффективность в смысле использования мощности передающего устройства).

Частоту лазера можно изменять, используя ее зависимость от температуры активного вещества. Этот способ, называемый *термическим*, основан на изменении энергетических уровней с изменением температуры. Так как разница между энергетическими уровнями определяет частоту излучаемых колебаний, то, изменяя температуру активного вещества лазера, можно перестраивать его по частоте.

Изменение частоты излучения возможно под действием магнитного поля (эффект Зеемана). Это явление можно рассматривать как следствие изменения движения электрона (микрочастиц) под влиянием внешней силы, с которой магнитное поле действует на движущийся заряд.

Величина этой силы может быть выражена зависимостью  $F = evH\sin[\nu, H]$ , где  $e$  — величина заряда;  $\nu$  — скорость его движения;  $H$  — напряженность магнитного поля.

Под действием магнитного поля спектральная линия излучения лазера расщепляется на три составляющие. Изменение частоты ОКГ при наличии магнитных полей можно объяснить с точки зрения взаимодействия орбитального и спинового магнитного моментов с внешним магнитным полем.

Основной недостаток модуляции с использованием эффекта Зеемана заключается в том, что для широкополосной модуляции требуются относительно сильные магнитные поля, т. е. необходимы громоздкие и мощные модулирующие устройства.

Аналогично для внутренней модуляции может быть использован эффект Штарка, заключающийся в расщеплении и смещении энергетических уровней атома при наложении сильного электрического поля. Точный расчет напряженности поля, необходимый для получения определенного изменения частоты, — задача очень сложная. Ориентировочные оценки показывают, что для частотной модуляции с отклонением частоты порядка нескольких гигагерц требуется напряженность поля  $E = 10^5$ — $10^6$  В/см.

По-видимому, этот способ модуляции, так же как и эффект Зеемана, для практической цели является мало перспективным (из-за необходимости огромных величин напряженности электрического поля, т. е. громоздкости модулирующих уст-

роЙств).

Частотная модуляция осуществляется также изменением параметров оптического резонатора. Поскольку частота излучения ОКГ определяется не только резонансной характеристикой активного вещества, но и частотой настройки оптического резонатора, то, изменяя параметры последнего, можно управлять частотой излучения ОКГ. Например, одно из внешних зеркал резонатора закрепляется на магнитострикционном стержне, на обмотку которого подается управляющее напряжение. Величина частотного сдвига определяется зависимостью  $\Delta\nu = \nu_0 \Delta l / l$ , где  $l$  — длина резонатора (расстояние между зеркалами);  $\Delta l$  — максимальное изменение длины;  $\nu_0$  — несущая оптическая частота. В эксперименте при  $l = 1$  м диапазон перестройки составил примерно 150 МГц, что соответствует  $\Delta l / l = 0,75 \cdot 10^{-6}$ .

Частотная модуляция может быть осуществлена при использовании пьезоэффекта. В этом случае одно из зеркал закрепляется на кварцевой пластине. При изменении модулирующей функции изменяются положение зеркала резонатора и средняя генерируемая частота.

Фазовую модуляцию можно осуществить, если пропустить луч ОКГ через электрооптическую среду, например через кристаллы АДР или КДР. Однако фазовые модуляторы такого типа являются узкополосными, а демодуляция фазомодулированных колебаний сильно затрудняется. Поэтому в настоящее время фазовая модуляция в системах передачи оптического диапазона не применяется.

Контрольные вопросы:

1. Что такое “модуляция оптического излучения” и какие виды модуляции существуют?
2. Какие требования предъявляют к модуляторам?
3. Расскажите о физических основах модуляции.
4. Расскажите подробнее об амплитудной модуляции.
5. Расскажите о плюсах и минусах того или иного вида модуляции.
6. Посредством чего происходит управление оптическим излучением?
7. Расскажите подробнее о частотной и фазовой модуляциях.
8. Как классифицируют вид модуляции?
9. Как влияет различие в величинах коэффициента преломления?
10. Что такое эффект Керри и эффект Погкельса?

## §10.1. Пространственное управление излучением

Одной из основных особенностей космических лазерных систем связи (КЛСС) является необходимость использования в них устройств пространственного управления излучением. Эта особенность их — следствие высокой направленности излучения лазеров. Расходимость луча передатчика (поля зрения приемника) при передаче информации имеет порядок  $\theta_{\text{про}} \approx \sqrt{(1-2)\lambda / D}$ . При  $\lambda = 1$  мкм,  $D = 0,25$  м,  $\theta_{\text{про}} = 4 \cdot 8$  мкрад.

Для реализации такого преимущества требуется обеспечить высокую точность взаимного наведения лучей лазерных приемопередатчиков двух корреспондентов. Для полного использования энергии, посылаемой передатчиком, оптические системы связи требуют точности слежения, оцениваемой ошибками в доли микроградан. Поэтому работа системы должна строиться на принципе слежения за взаимосвязанным маяком, что позволяет достичь максимально возможной точности слежения. Проблема поиска корреспондента осложняется еще и тем, что в большинстве случаев имеются лишь приближенные данные о месте нахождения приемного и передающего устройств, т. е. существует угловая неопределенность положения искусственного спутника Земли (ИСЗ), известного из траекторных измерений, которая составляет в настоящее время  $\pm 2 \text{--} 10$  мрад, т. е. на 2—3 порядка больше  $\theta_{\text{про}}$ . Кроме того, в процессе связи приемное и передающее устройства могут взаимно перемещаться. Эти обстоятельства приводят к необходимости введения нескольких этапов поиска корреспондента: обнаружения; “взаимозахвата” приемопередающих станций, т. е. процесса вхождения в связь; обеспечения слежения в период ведения связи.

Результате этого для полной реализации потенциальных возможностей КЛСС возникает необходимость создания устройств поиска, обнаружения и слежения. Такое устройство должно обеспечить поиск объекта в кратчайший промежуток времени, а обнаружив его, сопровождать, осуществляя непрерывное совмещение оптических осей передатчика и приемника в течение сеанса связи.

Различают устройства *регулярного* и *случайного* поиска. В связи с тем что реализация устройств случайного поиска чрезвычайно сложна, наибольшее распространение получили устройства регулярного поиска. Их в свою очередь можно разделить на следующие: *устройства без сканирования*, в которых используется маяк с большой импульсной мощностью, главный лепесток диаграммы направленности которого охватывает всю область неопределенности (метод широкого луча) и *устройства со сканированием* на одном или двух объектах. При этом обзор области неопределенности осуществляется лучом с малым углом расхождения (метод узкого луча).

Из этих двух методов предпочтителен метод узкого луча, так как при

одинаковой мощности передатчика и диаметре апертуры поле зрения приемника  $\theta_{\text{прм}}$  при использовании метода широкого луча должно быть примерно в 5 раз больше, чем при методе узкого луча. Высокая частота импульсов при сканировании позволяет получить более широкую частотную характеристику устройства слежения, что в свою очередь ведет к уменьшению ошибки сопровождения. Для определенности будем считать, что связь должна быть осуществлена между двумя корреспондентами, находящимися соответственно на синхронном (СС) и низкоорбитальном (НС) спутниках.

Процесс взаимной ориентации НС и СС состоит из следующих этапов: вначале вспомогательные системы устанавливают антенны приемопередатчиков с точностью целеуказания ( $\pm 0,2^\circ$  для СС и  $\pm 0,5^\circ$  для НС). Затем включаются системы лазерного маяка обоих спутников.

## §10.2. Этапы работы лазерного маяка

*Первый этап работы лазерного маяка - обнаружение и грубое наведение.* Оно достигается с помощью сканирования луча маякового лазера СС в зоне начальной ошибки ориентации антенн  $\theta_{н1}^2$  ( $\theta_{н1}$  — угловая неопределенность НС). Луч маяка СС имеет расходимость  $\theta_{\text{прмСС}} \ll \theta_{н1}$  и сканирует зону  $\theta_{н1}^2$  за время  $T$ . НС принимает сигналы этого луча и разворачивает свою оптическую антенну в направлении СС.

Приемная антенна НС с высокой направленностью  $\theta_{\text{прмНС}} \ll \theta_{н2}$  ( $\theta_{н2}$  — угловая неопределенность СС) используется совместно с четырехквadrатным детектором с широким полем зрения (примерно  $\theta_{н2}$ ), что позволяет сочетать высокую направленность приемника (определяемую величиной  $\theta_{\text{прмНС}}$ ) с одновременным обзором широкого поля зрения  $\theta_{н2}$ . В этом случае максимальное время обнаружения сигнала СС определяется полным временем сканирования  $T$ :  $T = t (\theta_{н1} / \theta_{\text{прмСС}})^2$ , где  $t$  — время задержки луча передатчика на каждом элементе сектора сканирования  $\theta_{н1}^2$ .

После обнаружения сигнального маяка НС прекращает сканирование сектора угловой неопределенности и с помощью устройства наведения совмещает центральное направление своего сектора сканирования с направлением на маяк СС. В этом же направлении ориентируется луч передатчика НС. Такие же операции выполняются приемником СС после обнаружения луча передатчика НС. В результате происходит "захват" корреспондента — лучи передатчиков НС и СС и поля зрения приемников СС и НС оказываются взаимно ориентированными с точностью, которую в состоянии обеспечить пеленгационные устройства при расходимости лучей  $\theta_{\text{прмНС}}$ ,  $\theta_{\text{прмСС}}$  передатчиков и поля зрения  $\theta_{\text{прмНС}}$ ,  $\theta_{\text{прмСС}}$  приемников НС и СС.

*Второй этап - точное наведение.* На этом этапе расходимость лучей передатчиков  $\theta_{\text{прмНС}}$ ,  $\theta_{\text{прмСС}}$  и угловые поля зрения приемников уменьшаются до минимальных величин, необходимых для устойчивой передачи информации с требуемой скоростью. Устройства наведения корректируют взаимные направления лучей с учетом упреждения, соответствующего взаимному пе-

ремещению объектов, и переводят приемопередающие устройства в режим слежения.

*Третий этап — точное слежение и передача информации.* Полное время поиска и захвата складывается из времени первичного поиска  $T$  и времени точного поиска и перехода к сопровождению  $T_c$ . Поскольку обычно  $T \gg T_c$ , и поиск носит взаимный характер, то  $T_{\text{вк}} \approx T$ . Для уменьшения времени поиска желательно увеличить  $\theta_{\text{прл}}$  вплоть до перекрытия полной зоны неопределенности положения спутника. С другой стороны, увеличение расходимости луча передатчика по сравнению с минимальной величиной  $\theta_{\text{прл}}$ , необходимой в режиме передачи информации, требует в режиме поиска соответствующего увеличения мощности передатчика:

$$(P_{\text{прл}}/P_{\text{прл}})_{\text{сл.ж}} = (P_{\text{прл}}/P_{\text{прл}})_{\text{инф}} (\theta_{\text{прл}}/\theta_{\text{прл}})^2.$$

Так, при  $\lambda=0,53$  мкм,  $\theta_{\text{прл}}=12$  мкрад,  $(P_{\text{прл}}/P_{\text{прл}})_{\text{инф}}=5 \cdot 10^5$  и  $(P_{\text{прл}}/P_{\text{прл}})_{\text{сл.ж}}=10^{14}$  допустимое расширение луча маяка

$$\left(\frac{\theta_{\text{прл}}}{\theta_{\text{прл}}}\right) = \sqrt{\left(\frac{P_{\text{прл}}}{P_{\text{прл}}}\right)_{\text{сл.ж}} \left(\frac{P_{\text{прл}}}{P_{\text{прл}}}\right)^{-1}} \approx 10^4$$

т. е. вместо  $\theta=2$  мкрад можно использовать луч с расходимостью до  $\theta_{\text{прл}}=20$  мрад ( $\approx 1^\circ$ ). Это значение превышает величину сектора угловой неопределенности, и так как мы используем более узкий луч и сканирование, то КЛСС будет обладать значительным запасом потенциала (10—20 дБ).

### §10.3. Устройства для управления оптическим лучом (дефлекторы)

#### *Классификация и основные параметры дефлекторов*

Задача поиска сигналов корреспондента, наведения луча и слежения за лучом корреспондента в процессе передачи информации требует достаточно быстрого изменения направления луча по некоторому периодическому (поиск) или аperiodическому (слежение) закону. Эта задача выполняется оптическими устройствами — дефлекторами.

По характеру движения луча различают методы управления *непрерывные* и *дискретные*; по физическим принципам отклонения луча — *механические* и *электрические*.

Механические методы отклонения луча осуществляются путем механического перемещения управляющего элемента (зеркала, призмы и т. п.). Для этого используются электромагнитные, магнитоэлектрические и пьезоэлектрические дефлекторы.

Электрические методы отклонения луча реализуются путем изменения коэффициента преломления среды, через которую проходит луч при воздействии электрических (или магнитных) полей. В настоящее время используются ультразвуковые (акустооптические), электрооптические, поляризационные (в том числе магнитооптические) и дисперсионные (инжекционные) дефлекторы.

Для оценки возможности и целесообразности применения тех или

нных типов дефлекторов служит система их характеристик и параметров. Рассмотрим важнейшие из них.

*Амплитуда угла отклонения*  $\Delta\alpha$  — это максимальное угловое смещение луча, определяющее полный размер сектора сканирования.

*Разрешающая способность* дефлектора определяется числом  $N$  различных направлений луча в пределах  $\Delta\alpha$ . В соответствии с критерием Рэлея предел разрешения двух светящихся “точек” достигается при условии, что центральный максимум одной из них совпадает с первым кольцевым минимумом другой. Если  $D_n$  — ширина пучка, выходящего из дефлектора, то его угловая расходимость  $\theta_n \approx \xi\lambda/(nD_n)$ , где  $\xi = 1,2, \dots, 1,3$  (для равномерного распределения интенсивности в пучке  $\xi = 1,22$ , для гауссова распределения  $\xi = 1,27$ );  $n$  — коэффициент преломления среды.

Разрешающая способность дефлектора

$$N = \Delta\alpha/\theta_n, \quad (2.1)$$

Подставив значение  $\theta_n$  в выражение (2.1), получим  $N = \Delta\alpha D_n n / (\xi\lambda)$ . Если в качестве условия разрешения принимается полное отсутствие перекрытия центральных максимумов, то  $N = \Delta\alpha / (2\theta_n)$ .

Разрешающая способность дефлектора  $N$  — наиболее важный параметр: при увеличении (или уменьшении)  $\Delta\alpha$  с помощью оптической системы величина  $N$  остается неизменной, так как при этом соответственно изменяется величина  $\theta_n$ .

*Быстродействие* дефлектора  $t_d$  определяется временем перехода луча с одного элемента разрешения на соседний. Для непрерывных дефлекторов  $t_d = 1/(\Delta f)$ , где  $\Delta f$  — полоса пропускания дефлектора:  $\Delta f = Nf_c$ ;  $f_c$  — частота сканирования (число периодов сканирования за 1 с).

*Оптические потери* дефлектора  $\tau = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$ , где  $I_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{вх}}$  — интенсивности излучения на выходе и входе дефлектора.

*Чувствительность по отклонению*  $S$  определяется отношением  $\Delta\alpha$  или  $N$  к величине отклоняющего воздействия, например напряжению  $u$ . В этом случае  $S = \Delta\alpha/u$  или  $S = N/u$ .

Контрольные вопросы:

1. Что необходимо для полного использования энергии, посылаемой передатчиком?
2. На какие виды разделяются устройства поиска?
3. Когда устройство поиска считается без сканирования?
4. Когда устройство поиска считается со сканированием?
5. Какие этапы маяка знаете?
6. Что такое дефлектор?
7. Перечислите параметры дефлекторов.
8. Какие методы управления различают по характеру движения луча?
9. Когда происходит «захват» корреспондента?
10. Что необходимо для уменьшения времени поиска?

### §11.1. Волоконно-оптические системы многоканальной связи

#### *Возможные области использования волоконно-оптических систем многоканальной связи*

В настоящее время потенциальные преимущества волоконно-оптических линий связи по сравнению с существующими кабельными линиями традиционного диапазона выявлены достаточно убедительно. К ним относятся огромная информационная емкость, возможность применения недефицитных материалов, малые размеры основных узлов, в том числе оптических волокон, отсутствие электрической проводимости, небольшие потери. Все это дает основание полагать, что волоконно-оптические линии смогут занять значительное место в технике многоканальной связи.

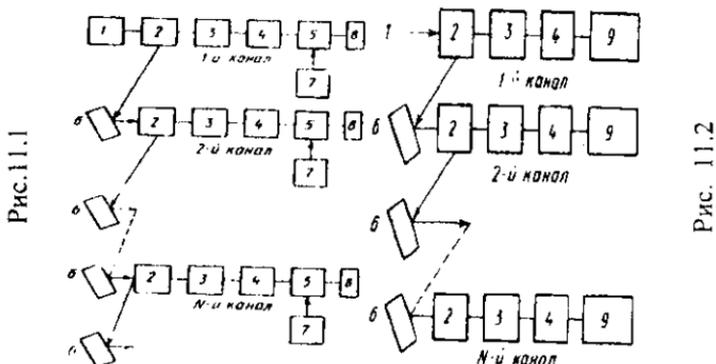
Возможными областями использования волоконно-оптических систем многоканальной связи являются: внутриучрежденческая телефонная и видеотелефонная связь, разветвленная телевизионная связь репортажных камер с мобильными аппаратными, бортовые (на морских судах, самолетах, ИСЗ и т. п.) информационные линии и другие в пределах расстояний до нескольких десятков и сотен метров; внутригородские соединительные линии для связи автоматических телефонных станций (АТС) с абонентами и между собой (протяженность таких линий — единицы километров); магистральные линии многоканальной связи значительной протяженности с огромной информационной емкостью и большим числом усилительных (регенерационных) участков (через 8—10 км).

Многоканальные волоконно-оптические системы связи могут быть использованы для передачи как аналоговых, так и цифровых сигналов. Однако из-за огромной пропускной способности разработчики предпочитают использовать их преимущественно в цифровых трактах. В связи с этим актуальными становятся вопросы разработки специальных интегральных полупроводниковых схем для управления источником излучения и обработки быстрых двоичных сигналов. Из зарубежной печати известно, что в первую очередь оптические системы могут быть использованы для разделения каналов с помощью аппаратуры ИКМ, в которой скорость передачи информации не превышает 8 Мбит/с. Схемы управления с таким быстродействием в настоящее время уже существуют. При вполне приемлемых затратах могут быть обработаны потоки до 250 Мбит/с, хотя для эффективного использования возможностей стекловолоконных линий связи необходимо обеспечить обработку потоков со скоростями до единиц гигабит в секунду. Нет сомнений, что эта задача будет решена в ближайшем будущем.

## §11.2. Частотное разделение каналов в системах волоконно-оптической связи

При частотном разделении каналов многоканальный сигнал образуется на передающем конце с помощью соответствующим образом подобранных несущих частот. В качестве этих частот могут быть использованы моды, большое число которых одновременно генерирует ОКГ. Если в качестве генератора поднесущих частот взять ОКГ на алюмоиттриевом гранате с примесью неодима, резонатор которого имеет длину 15 см, то на выходе такого лазера будет по крайней мере 15 оптических несущих, расположенных по оси частот через 1 ГГц. Разнесение по частоте между поднесущими определяется длиной резонатора ОКГ и может регулироваться в соответствии с другими заданными параметрами (например, полосой пропускания оптического модулятора, фотоприемника или характеристиками фильтров).

На рис. 11.1 представлена структурная схема передающей части системы многоканальной связи с частотным уплотнением по оптическим несущим. Многочастотное излучение ОКГ 1 проходит через анализатор 2 и четвертьволновую пластину 3, поворачивающую плоскость поляризации излучения на  $\pi/4$ , после чего оно поступает на полосовой фильтр 4, пропускающий полосу частот со средней частотой  $\nu_1$ . Сигнал первой поднесущей  $\nu_1$  проходит через фильтр на оптический модулятор 5 1-го канала, а сигналы остальных поднесущих, отражаясь, возвращаются к анализатору 2. Так как при отражении поляризации этих сигналов оказываются ортогональными по отношению к исходным, то они выводятся анализатором через боковую грань призмы и с помощью зеркала б направляются во вторую ветвь устройства уплотнения.



Оптический сигнал частотой  $\nu_1$ , проходящий через первый фильтр, модулируется информацией, поступающей от источника информации 7 1-го канала и отражается зеркалом модулятора 8 в обратном направлении. Модулированный сигнал проходит через фильтр 4 второй раз и возвращается к анализатору, а затем выводится через боковую грань призмы и суммируется с остальными поднесущими.

В дальнейшем каждая из поднесущих поочередно отделяется от других, модулируется информацией соответствующего канала и суммируется с сигналами других каналов для передачи. Двойное прохождение сигналов в оптическом модуляторе дает возможность снизить модулирующее напряжение в два раза.

На приемной стороне (рис. 11.2) групповой сигнал  $I$  поступает на анализатор 2 и далее, через четвертьволновую пластину 3 на выход фильтра 4, пропускающего поднесущую и боковые полосы первого канала. Остальные сигналы отражаются от зеркала фильтра обратно к анализатору 2 и через его боковую грань на зеркало 6, с помощью которого подаются ко второму анализатору 2. Сигналы 1-го канала после фильтра 4 поступают на фотоприемник 9, который может быть построен как по принципу прямого детектирования, так и по супергетеродинной схеме. В последнем случае в качестве гетеродинного ОКГ может быть использован лазер, работающий в многомодовом режиме. Одинаковое разнесение по частоте на передающей и приемной сторонах обеспечивается синхронизацией (передачей синхронизирующих сигналов).

Рассмотренные системы частотного разделения каналов могут быть использованы в аппаратуре магистральных линий оптической связи большой протяженности.

### §11.3. Временное разделение каналов в системах волоконно-оптической связи

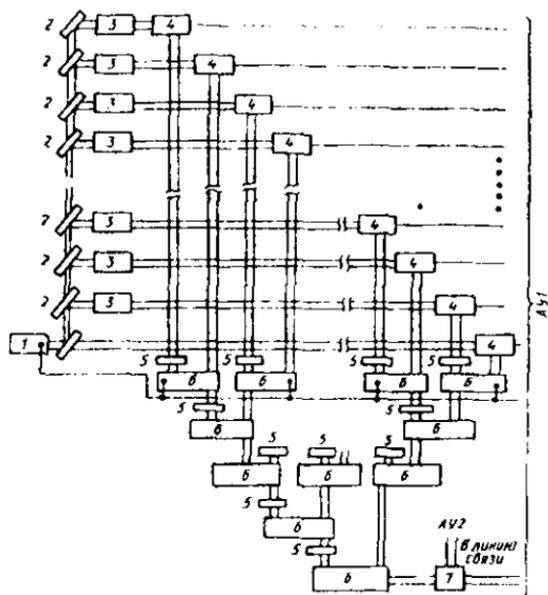
Временное разделение каналов может быть реализовано при работе лазера в режиме синхронизации мод. В этом режиме лазер генерирует регулярную последовательность коротких оптических импульсов. Длительность импульсов пропорциональна обратной величине ширины полосы генерации активной среды лазера. Так, длительность импульсов  $\tau_n$  гелий-неонового лазера может составить примерно 0,5 нс, аргонового — 0,2 нс, лазера на алюмоиттриевом гранате — 0,05 нс.

В качестве примера рассмотрим 24-канальную систему с временным разделением каналов. В этой системе (рис. 11.3) выходной луч лазера  $I$  с помощью набора калиброванных зеркал 2 разделяется на 24 луча с одинаковой интенсивностью. Затем каждый из этих лучей, задерживаясь в зависимости от длины пути, модулируется в оптическом модуляторе 4 информационным сигналом соответствующего канала, поступающим из аппаратуры уплотнения (АУП). Оптическая задержка, определяемая длиной пути светового луча, условно представлена сосредоточенными элементами 3. Длина пути выбирается таким образом, чтобы задержка в любом канале относительно соседнего была кратна  $T_k/24$ , что позволяет осуществить разделение каналов.

В каждом втором канале луч, выходящий из модулятора, пропускается через полуволновую пластину 5, в результате чего направление поляризации в этом канале изменится на  $\pi/2$ . Это в свою очередь позволяет осуществлять

суммирование сигналов каждой пары каналов с помощью поляризационных переключателей 6. В следующей ступени объединяются выходы каждого четырех каналов, и процесс суммирования продолжается до объединения выходов всех 24 каналов. Для обеспечения синхронной работы поляризационных переключателей используются электрические управляющие сигналы, частота которых в каждой последующей ступени удваивается.

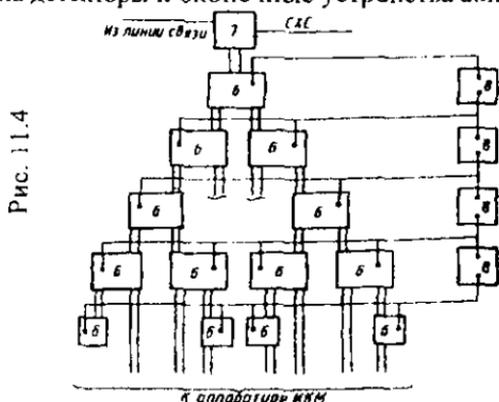
Рис. 11.3



Выходное излучение системы представляет линейно поляризованный луч, в котором содержится информация 24 независимых каналов с применением импульсно-кодовой модуляции в каждом канале. Используя на выходе системы поляризационный селектор 7, можно увеличить информационную емкость вдвое. Для этого на поляризационный селектор 7 подается последовательность информационных сигналов 24-канальной группы от второго комплекта аппаратуры уплотнения (АУ2). Передача информации еще по 24 каналам может осуществляться с помощью луча с ортогональной поляризацией, который затем суммируется с первым лучом.

Таким образом, рассмотренная система оптической связи позволяет передавать информацию по 48 оптическим каналам, первая половина которых использует, например, вертикальную поляризацию луча, а вторая - горизонтальную. Так как информационная емкость каждого такого канала составляет 224 Мбит/с, общая емкость системы равна 537, 2 Мбит/с (10,752 Гбит/с).

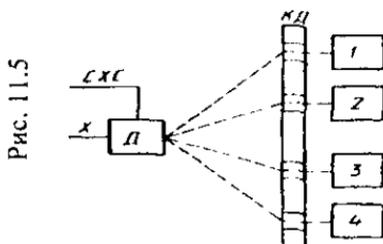
На приемной стороне (рис. 11.4) разделение вертикальной и горизонтальной составляющих луча осуществляется поляризационным селектором 7 и далее, с помощью поляризационных переключателей 6, управляемых электрическими сигналами, выполняется последовательное выделение информации поканально соответствующими ступенями. Затем информационные сигналы поступают на детекторы и оконечные устройства аппаратуры ИКМ.



Для управления поляризационными переключателями в приемную часть поступает синхросигнал (СХС), являющийся субгармоникой частоты передачи многоканальной информации. Этот сигнал получается путем детектирования самих оптических импульсов с помощью резонансного детектора либо передается отдельно от несущего сигнала. Таким образом, при информационной емкости 5376 Мбит/с частота синхросигнала на субгармонике составляет 2688 МГц. Для остальных ступеней частота управляющего сигнала может быть получена последовательным делением на 4 указанной частоты синхросигнала.

Описанная система в двухканальном варианте исследовалась экспериментально. Основными параметрами, характеризующими работу системы, являются уровень перекрестных помех и вносимые потери кристаллов поляризационного разделителя. Перекрестные помехи определяют эффективность разделения каналов, а величина вносимых потерь характеризует оптические потери сигнала, прошедшего через кристалл разделителя. Результаты экспериментов показали, что описанная система обладает вполне удовлетворительными характеристиками.

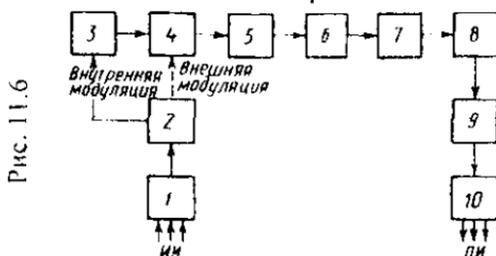
Достоинством такой системы является и то, что предельная информационная емкость определяется не полосой оптического модулятора, а шириной линии излучения активной среды ОКГ. В рассмотренной системе на пути каждого луча (см. рис. 11.3) помещается свой модулятор с шириной полосы, достаточной для одного канала. В результате такая система с временным разделением может предложить передачу информации со скоростью, значительно превышающей ту, которую может обеспечить один модулятор.



Оптическое временное разделение может быть осуществлено и при использовании пространственного метода, который основывается на том, что в какой-то момент времени лучи различных каналов по-разному распределяются в пространстве (рис. 11.5). В такой системе входная уплотненная последовательность импульсов (X) стробируется синхросигналом (СХС) с частотой одиночного канала  $\nu_k = 1/T_k$ , а значит, периодически отклоняется с помощью дефлектора (Д). Из этой последовательности импульсов сигналы канала 1 будут направляться к приемнику первого канала, импульсы канала 2 - к приемнику второго канала и т. д. При использовании круговой диафрагмы (КД) канал N может быть расположен за каналом 1, а дефлектор может управляться синусоидальным сигналом с частотой  $\nu_k = 1/T_k$ . Такая система является взаимной в том смысле, что она может работать и в обратном режиме, т. е. осуществлять временное уплотнение каналов.

#### §11.4. Принципы построения волоконно-оптических систем многоканальной связи

Структурные схемы систем многоканальной волоконно-оптической связи несущественно отличаются от общепринятых систем традиционного диапазона. Групповой сигнал может быть образован частотным или временным разделением сигналов. В принципе возможны и другие методы разделения (например, пространственный). Выбор конкретного метода разделения зависит от вида передаваемой информации. Она может быть аналоговой или цифровой, от нескольких абонентов или огромного числа их.



Существенно и то, какой вид сигналов (телефонный, телеграфный, передачи изображений и т. п.) необходимо передать по линии связи.

На рис. 11.6 представлена типовая структурная схема многоканальной волоконно-оптической связи.

Передаваемые сообщения от источников информации (ИИ) через аппаратуру уплотнения 1 и усилитель 2 модулируют источник излучения 3 непосредственно при внутренней модуляции или с использованием оптического модулятора 4 при внешней модуляции. Далее многоканальный сигнал через оптический кабель 6 и согласующие устройства 5 и 7 поступает на фотоприемник 8, где преобразуется в электрический сигнал, усиливается в усилителе 9 и через аппаратуру разделения каналов 10 поступает к получателям информации (ПИ).

Для увеличения дальности связи могут быть использованы усилительные (регенерационные) пункты. Рассмотрим принципы построения некоторых конкретных систем многоканальной оптической связи.

В настоящее время в США две крупные фирмы («Белл систем» и GTE) проводят опытную эксплуатацию волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Кроме того, разработкой ВОЛС для военных целей занимается фирма JTT. Ряд других фирм занимается реализацией проектов ВОЛС на скорость 6,3 Мбит/с. В системе использовались стандартные 24-канальные стойки ИКМ. Сигнал каждой из них через блок объединения со скоростью 6,3 Мбит/с поступает на модуляционное устройство источника излучения. Принятый сигнал попадает на фотодетектор, усилитель и через аппаратуру разделения, стойку ИКМ и кросс — на телефонные аппараты. Видеотелефон работает в полосе частот 1 МГц. Выборки сигнала с частотой 2,1 Мбит/с передают изображение по строчкам, кодируя его трехзначным кодом с дельта-модуляцией. В результате скорость передачи также составляет 6,3 Мбит/с. Для определения качества системы используется генератор псевдослучайной последовательности, сигналы которого после прохождения тракта сравниваются с исходными в блоке выделения ошибок.

Использование оптического кабеля между регенератором и оконечным устройством длиной 200 м (два отрезка по 100 м с разьемами) и ЛФД на приеме позволили осуществить безошибочную передачу импульсного потока со скоростью  $10^8$  бит/с.

Фирма «Белл систем» ведет разработку ВОЛС на скорости 6,3; 50; 100 и 274 Мбит/с. Первая из них предназначена для работы на городской сети совместно с оконечной аппаратурой T2 (на 96 телефонных каналов). Экспериментальные регенераторы разработаны для магистральных систем на 274 Мбит/с. В них применяются лазеры с двойной гетероструктурой и градиентные волокна типа «Селфок». Фирма разработала также волоконно-оптическую цифровую систему FT3 со скоростью передачи 44,7 Мбит/с, предназначенную для магистральных линий связи между телефонными станциями крупных городов. Система содержит передатчик на лазере с двойной гетероструктурой (длина волны 0,825 мкм), приемник на кремниевом ЛФД, оптические кабели ленточной структуры диаметром 12 мм, имеющие по 12 волокон в каждой ленте и до 12 лент на кабель. Наружный диаметр многомодовых градиентных оптических волокон 125 мкм. Промежуточные ретрансляторы (регенераторы), в которых используются лазерные передатчики и приемники на ЛФД, располагаются на центральных телефонных

станциях с интервалом около 6,5 км и питаются от местного источника. Система FTЗ обеспечивает максимальную информационную емкость, равную примерно 40 тыс. речевых каналов.

Исследование многоканальных оптических систем волоконной связи ведут и японские фирмы. Наиболее крупной разработкой является проект создания городской сети кабельного телевидения с использованием волоконно-оптических систем. Фирма NEC разрабатывает многоканальные оптические кабельные системы ИКМ на 40 и 400 Мбит/с.

#### Контрольные вопросы:

1. Где используются волоконно-оптические системы многоканальной связи?
2. Расскажите о разделении каналов?
3. Как происходит временное разделение канала связи?
4. По какому принципу происходит частотное разделение канала связи?
5. Представьте типовую структурную схему многоканальной волоконно-оптической связи?
6. Расскажите о принципах построения многоканальной волоконно-оптической связи?
7. Что используется в качестве гетеродинного оптического генератора в системе многоканальной связи?
8. Что представляет собой выходное излучение системы при временном разделении?
9. Что является достоинством системы в двухканальном варианте?
10. Что необходимо для увеличения дальности системы связи?

## Глава 12 Помехоустойчивость систем связи

### §12.1. Помехоустойчивость многоканальных систем связи

#### *Помехоустойчивость лазерных многоканальных систем связи с поляризационной модуляцией и ЧМ поднесущей*

Реализация огромной информационной емкости лазерных многоканальных систем связи потребует использования поднесущих частот. При этом целесообразно применение ЧМ поднесущей, имеющей форму последовательности прямоугольных импульсов. Сочетание такого режима работы с ПМ лазерного излучения позволит значительно повысить отношение сигнал/шум, а значит, и помехозащищенность в целом.

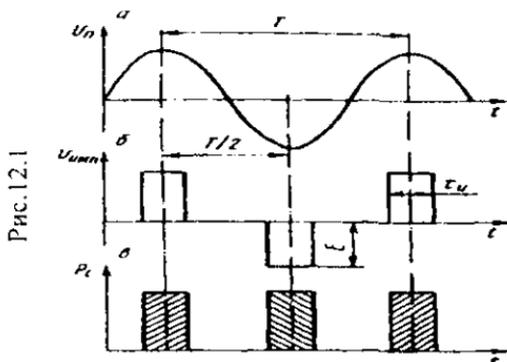


Рис. 12.1

Рассмотрим случай, когда на передающей стороне гармоническое напряжение поднесущей частоты преобразуется в импульсное со скважностью  $Q$ , затем из этого же гармонического колебания поднесущей формируется аналогичная импульсная последовательность, сдвинутая по отношению к первой на  $T/2$  и имеющая обратную полярность. После суммирования образованная последовательность разнополярных импульсов подается на поляризационный модулятор лазерного устройства. На рис. 12.1 изображены исходные напряжения поднесущей (а), суммарная импульсная последовательность (б) и временная зависимость лазерного излучения (в).

При модуляции положительным импульсам соответствует, например, правая круговая поляризация, а отрицательным — левая. Нетрудно показать, что в данном случае условия работы системы связи аналогичны системе НКМ — ПМ, где решение о приеме символа 1 или 0 принимается в соответствии с знаком напряжения на выходе дифференциального усилителя. Поэтому структурная схема приемного устройства может быть с добавлением фильтра поднесущей частоты и частотного детектора на выходе. Полагая, что индексы правой  $M_{np}$  и левой  $M_l$  круговой поляризации равны, т. е.  $M_{np} = M_l = M_n$ , определим амплитуду импульсов тока на выходе дифференциального каскада приемного устройства для случая правой круговой поляризации:

$$I' = GDP_c M_n; \quad I'' = GDP_c (1 - M_n). \quad \text{Суммарная амплитуда} \\ I_{np} = I' - I'' = GDP_c (2M_n - 1). \quad (12.1)$$

Аналогично для левой круговой поляризации  $I_l = GDP_c (2M_n - 1)$ . Здесь  $G$  — коэффициент усиления по току фотодетектора ( $G = G_1 = G_2$ );  $D$  — коэффициент преобразования интенсивности излучения в ток фотодетектора (полагая, что  $D = D_1 = D_2$ );  $P_c$  — мощность оптического сигнала в импульсе.

Поскольку на выходе дифференциального каскада имеется сумма двух разнополярных и сдвинутых на  $T/2$  импульсных последовательностей, выходной сигнал можно представить в виде суммы двух рядов Фурье:

$$e(t) = \frac{E}{Q} + \frac{2E}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\Omega_1 \tau_n}{2} \cos n\Omega_1 t;$$

$$e_2(t) = \frac{E}{Q} + \frac{2E}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\Omega_1 \tau_n}{2} \cos(n\Omega_1 + \pi)t;$$

$$e(t) = e_1(t) + e_2(t) = \frac{4E}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\Omega_1 \tau_n}{2} \cos n\Omega_1 t,$$

где  $E$  — амплитуда напряжения.

Коэффициент первой гармоники в этом случае равен

$$k_1 = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{Q}$$

Напряжение первой гармоники поднесущей частоты на выходе фильтра (при сопротивлении нагрузки  $R_n = 1$ ) равно

$$U_1 = |I_{np}| R_n k_1 = |I_n| R_n k_1 = \frac{4GD P_c (2M_n - 1)}{\pi} \sin \frac{\pi}{Q}$$

Мощность сигнала поднесущей, усредненная за период,

$$S_1 = P_{cp} = \frac{U_1^2}{2} = \frac{8G^2 D^2 P_c^2}{\pi^2} \sin^2 \frac{\pi}{Q} \quad (12.2)$$

Средняя мощность оптического излучения, обуславливающая дробовой шум сигнала, составляет

$P_{cp} = 2(P_c M_n / Q + P_c (1 - M_n) / Q) = 2P_c / Q$ . Тогда мощность дробового шума на выходе фильтра поднесущей

$$N_c = 4qG^2 DP_c B_{ш} (1/Q) \quad (12.3)$$

где  $q$  — заряд электрона;  $B_{ш}$  — полоса пропускания фильтра поднесущей частоты.

Отношение сигнал / шум по мощности на поднесущей при ограничении дробовыми шумами определяется из выражений (12.2) и (12.3) при учете, что  $D = q\eta / (hf_c)$ :

$$\frac{S_1}{N_c} = \frac{2\eta P_c (2M_n - 1)^2 Q}{\pi^2 hf_c B_{ш}} \sin^2 \frac{\pi}{Q} \quad (12.4)$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $\eta$  — квантовая эффективность фотодетектора.

Для случая с линейной модуляцией по интенсивности ЧМ поднесущей отношение сигнал/шум по мощности на поднесущей составляет

$$S/N_c = \eta P_c / (8hf_c B_{ш}) \quad (12.5)$$

Однако с учетом реальных параметров системы выражение (12.4) принимает вид

$$S/N_c = \eta P_c F(M) / (8hf_c B_{ш} m^2) \quad (12.6)$$

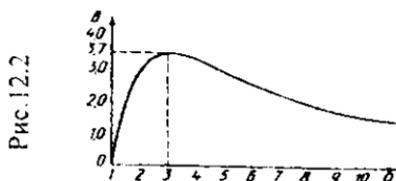
где  $F(M) = I-2$  — коэффициент избыточного шума, зависящий от типа фотодетектора;  $m$  — индекс линейной модуляции по интенсивности.

В выражении (12.4)  $F(M)$  не учитывается, так как имеется возможность подавить этот шум, применив ограничение импульсов. Определим выигрыш, даваемый выражением (12.4) по сравнению с выражениями (12.5) и (12.6). Разделив соотношение (12.4) на (12.5), получим

$$B = \frac{16(2M_n - 1)Q}{\pi^2} \sin^2 \frac{\pi}{Q}$$

или при  $M_n = 1$

$$B = \frac{16Q}{\pi^2} \sin^2 \frac{\pi}{Q} \quad (12.7)$$



Зависимость (1.7) протабулирована и показана на рис. 12.2, из которого видно, что максимальное значение выигрыша  $B_{\max} = 3,7$ . Из выражений (12.4) и (12.6) получим значение выигрыша при учете реальных условий:

$$V \cdot B = 0$$

Если, например,  $M_n = 1$ ,  $F(M) = 1,5$ ,  $m = 0,7$ ,  $Q = 3$ , то  $B = 11,3$ .

С учетом дробовых шумов сигнала, фона и темнового тока выражение (12.3) можно записать в виде

$$N_{\Sigma} = 2qG^2 B_m \left( D \frac{2P_c}{Q} + DP_{\phi} + 2I_T \right)$$

где  $P_{\phi}$  — мощность фонового излучения;  $I_T$  — темновой ток фотодетектора.

Тогда отношение сигнал/шум на поднесущей будет равно

$$\frac{S_1}{N_{\Sigma}} = \frac{4D^2 P_c^2 (2M_n - 1)^2 \sin^2 \pi/Q}{\pi^2 q B_m (D \cdot 2P_c/Q + DP_{\phi} + 2I_T)} \quad (12.8)$$

Учитывая импульсный характер модуляции, рассмотрим применение оптического стробирования по входу приемного устройства. Из рис. 1.1 следует, что скважность следования поляризованных посылок, так же как и скважность предполагаемого стробирования, равна  $Q_{\text{стр}} = Q/2$ . Тогда выражение (1.8) можно записать так:

$$\frac{S_1}{N_{\Sigma}} = \frac{4D^2 P_c^2 (2M_n - 1)^2 \sin^2 \pi/Q}{\pi^2 q B_m (D \cdot 2P_c/Q + D^2 P_{\phi}/Q + 2I_T)} \quad (12.9)$$

Очевидно, что при малых  $Q$  снижение фона незначительно. Таким образом, благодаря десятикратному выигрышу в соотношении сигнал/шум системы с поляризационной импульсной модуляцией и ЧМ поднесущей применение фотодетекторного приема не уступает гетеродинному.

## §12.2 Помехоустойчивость лазерных систем связи с низким уровнем помех

Вследствие чрезвычайно малого числа фотонов на входе приемного устройства системы связи и статистической независимости поступления их в

различные моменты времени в этом случае предполагается, что сигнальные и шумовые фотоны распределяются по закону Пуассона.

Рассмотрим двоичную систему с ПМ, в которой символу 1 соответствует циркулярно поляризованная волна с направлением вращения вправо, а символу 0 — волна с направлением вращения влево. Такой принцип передачи информации может быть применен в системе связи, использующей кодово-импульсную модуляцию в сочетании с поляризационной. Кодовая группа содержит соответствующее число импульсов, длительность которых равна  $\tau$ . Положительной и отрицательной совокупностям импульсов соответствует ПМ вращением вектора напряженности электрического поля вправо и влево.

Для приема таких сигналов структурная схема приемного устройства системы связи может быть аналогичной показанной на рис. 11.2. Среднее число фотоэлектронов сигнала, которые эмиттируются за интервал  $\tau$ ,  $\mu = \eta P_c \tau / (h\nu)$ , где  $\eta$  — квантовая эффективность фотодетектора;  $\nu$  — оптическая частота.

Полагая, что оба фотозлемента одинаково детектируют шумы из окружающего пространства, запишем общее выражение для шумовых фотоэлектронов:  $2\mu_0 = \eta P_{ш} \tau / (h\nu) + 2\eta P_{\phi} / (h\nu)$ , где  $P_{ш}$  — мощность поляризованных фоновых шумов;  $P_{\phi}$  — эквивалентная шумовая мощность каждого фотодетектора.

В качестве фотодетекторов (фотон-электронных преобразователей) будем рассматривать счетчик фотонов, квантовый выход которого  $\eta \leq 1$ . За интервал  $\tau$  на выходе одного из квантовых счетчиков примем  $\mu_0$ , а на выходе другого —  $\mu_0 + \mu$ . Далее, записав выражения для апостериорных вероятностей на выходе сигнального и шумового фотодетекторов, можно найти коэффициент правдоподобия как отношение логарифмов апостериорных вероятностей. Затем вычисляется порог, с которым сравнивается коэффициент правдоподобия, и в соответствии с определенным правилом принимается решение.

На практике реален случай низкого уровня фона, когда ограничения определяются квантовым характером излучения оптических устройств. В этом случае вероятность ошибки

$$P_{ош} = P(m_0 > m_1) + 0,5P(m_0 = m_1), \quad (12.10)$$

где  $m_1$  — число электронов на выходе фотодетектора при наличии сигнала;  $m_0$  — число электронов при наличии только шума.

Выражение для вероятности ошибки с учетом различных условий можно записать в следующем виде:

$$P_{ош} = \frac{1}{2} e^{-(\mu_0 + \mu)} \left( I_0 \left( 2\sqrt{\mu_0 \mu_1} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_k \left( 2\sqrt{\mu_0 \mu_1} \right) \right) \left( \frac{\mu_0}{\mu_1} \right)^k \right)$$

На рис.12.3 приведены вычисленные с помощью ЭВМ графики вероятности ошибки  $P_{ош}$  в зависимости от величины сигнала и шума.

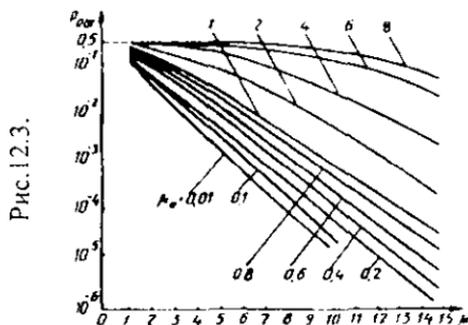


Рис. 12.3.

### §12.3. Повышение помехоустойчивости систем передачи при использовании в них фазированных решеток лазеров

Увеличения мощности излучения, а следовательно, и помехоустойчивости систем передачи можно добиться при использовании фазированных решеток, в которых осуществляется сложение полей  $N$  лазеров. Методы сложения полей (интерференции) для увеличения интенсивности поля в дальней зоне ( $R > L^2/\lambda$ , где  $R$  — расстояние до точки наблюдения;  $L$  — размеры источника излучения) достаточно подробно разработаны для антенных решеток радиодиапазона ( $\lambda > 10^{-1}$  м), когда длина когерентности оказывается достаточно большой, благодаря чему можно вести все расчеты (для практических случаев), считая источники излучения приближенно монохроматическими. Для систем оптического диапазона такой подход во многих случаях оказывается недостаточным, и возникает необходимость оценки ограничений, связанных с частичной когерентностью источников, а также тех отклонений от идеального случая сложения монохроматических полей, которые возникают при создании фазированных решеток оптического диапазона.

Обычно для лазерных источников степень когерентности оценивается таким интегральным параметром, как относительная ширина линии излучения  $\Delta\lambda/\lambda_0$  (или  $\Delta\nu/\nu_0$ ). Для различных типов лазеров этот параметр колеблется в весьма широких пределах: от  $10^{-1}$  (лазеры на жидких средах — растворах красителей) до  $10^{-7}$  (газовые лазеры). Ширина линии излучения  $\Delta\lambda$  (или  $\Delta\nu$ ) связана с временем когерентности  $\Delta t$  соотношением, аналогичным условию неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta t \Delta\nu \geq (4\pi)^{-1}.$$

Так, если за время когерентности  $\Delta t$  принять длину волнового пути лазерного излучения на средней частоте  $\nu_0$ , то

$$\Delta\nu \sim (\Delta t)^{-1} \quad (12.11)$$

представляет ширину области главного максимума спектральной функции (с центром на частоте  $\nu_0$ ) на уровне интенсивности  $I \approx 0,4 I_{\max}$ .

Результирующее поле в дальней зоне двух идентичных частично когерентных излучателей 1 и 2, расстояние между которыми равно  $d$  (рис. 12.4), при разности хода  $\Delta S \ll \Delta l$  ( $\Delta l$  — длина когерентности) и выполнении условия

(12.11) может быть записано так:

$$I(\theta) \cong 2I_1(\theta)(1 + (1 - \chi\psi)/(2\pi)\cos\psi), \quad (12.12)$$

где  $I_1(\theta)$  — интенсивность поля одного источника в точке наблюдения;  $\chi = \Delta\lambda/\lambda_0$  — относительная ширина линии излучения;  $\psi = (2\pi d/\lambda_0)\sin\theta$

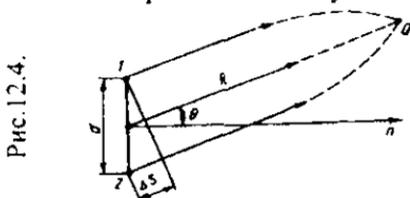


Рис.12.4.

Рассмотрим характеристики излучения фазированных решеток из  $N$  излучателей. Интенсивность излучения линейной эквидистантной решетки из  $N$  идентичных частично когерентных источников (рис. 12.5) может быть найдена способом для системы двух источников. При этом также полагается, что сфазированные излучатели (не уменьшая общности анализа, решетку можно считать синфазной) излучают импульсы с постоянной амплитудой длительностью  $\Delta t$ , средней частотой  $\nu_0$  и периодом повторения  $T \gg \Delta t$ .

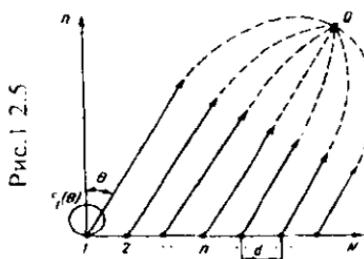


Рис.12.5

Тогда аналогично формуле (12.12) получим выражение для интенсивности поля решетки в дальней зоне:

$$I(\theta) = NI_1(\theta) \left( 1 + \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N-1} (N-n) (1 - n\chi\psi)/(2\pi) \right) \cos n\psi. \quad (12.13)$$

где  $n_m = N-1$ .

Выражение (12.13) удобно для расчетов при небольшом числе излучателей. При большом числе излучателей целесообразно преобразовать сумму в формуле (12.13), представив ее в свернутом виде:

$$I(\theta) \cong NI_1(\theta) \left( 1 + \frac{2}{N} \sigma \right),$$

$$\text{где } \sigma = \sum_{n=1}^{N-1} (N-n) \left( (1 - n\chi\psi)/(2\pi) \right) \cos n\psi = \sigma_1 - \frac{\chi\psi}{2\pi} \sigma_2;$$

$$\sigma_1 = N\sigma_2; \quad \sigma_1 \cdot \sigma_2 = N\sigma_1 - \sigma_2; \quad \sigma_3 = \sum_{n=1}^{N-1} \cos n\psi.$$

$$\sigma_1 = \sum_{n=1}^{N-1} n \cos n\psi; \quad \sigma_2 = \sum_{n=1}^{N-1} n^2 \cos n\psi.$$

Используя аналитические выражения для конечных сумм  $\delta_3$ ,  $\delta_4$ ,  $\delta_5$ , находим

$$I(\theta) = I_1(\theta) \left( N + 2\sigma_1 \frac{\chi \Psi}{\pi} \sigma_2 \right)$$

На рис. 12.6 приведены нормированные ДН системы излучателей при следующих значениях параметров:  $N = 4$ ;  $\chi$  равна 0,01 (кривая 1); 0,1 (кривая 2); 0,5 (кривая 3) (рис. 12.6, а) и  $N = 10$ ;  $\chi = 0,01$  (рис. 12.6, б). В обоих случаях  $l/\lambda_0 = 5$ ,  $d/\lambda_0 = 10$ .

Для линейных фазированных решеток при  $N > 2$  остаются в силе все выводы для  $N = 2$ . Очевидно, что частично когерентные излучатели при  $\chi \ll 1$  пригодны для создания фазированных решеток, причем их ДН отличается от ДН решеток при  $\chi = 0$  главным образом уровнем минимумов, что в большинстве случаев несущественно.

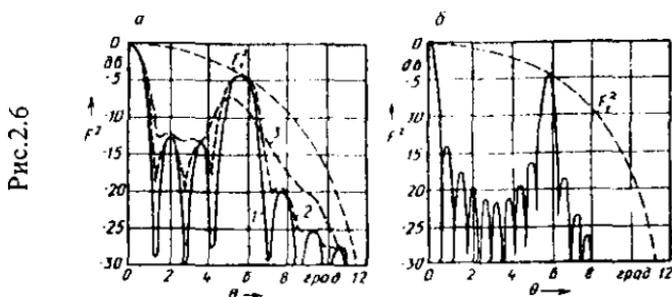


Рис.2.6

Контрольные вопросы:

1. Для чего нужна помехоустойчивость систем связи?
2. Расскажите коротко о помехоустойчивости квантовых систем.
3. Какие еще виды помехоустойчивости вы знаете?
4. Расскажите о помехоустойчивости при низком уровне помех.
5. Как определяется амплитуда импульсов тока на выходе дифференциального каскада приемного устройства?
6. Как определяется средняя мощность излучения?
7. Как определяется коэффициент избыточного шума?
8. Как оценивается степень когерентности лазерных источников?
9. Как связана ширина линии излучения с временем когерентности?
10. Как определяется результирующее поле в дальней зоне двух идентичных когерентных излучателей?

### §13.1. Изготовление оптических жил и кабелей

Для нормальной эксплуатации оптических волокон и работы с ними необходимы наносимые после их выхода из вытягивающей машины дополнительные защитные слои. В зависимости от предполагаемого использования волокон они могут быть оформлены в виде кабеля, содержащего много волокон, или упакованы индивидуально. В последнем случае достаточно просто протянуть покрытое полимерным слоем волокно из машины для вытяжки прямо в установку для нанесения защитной оболочки методом выдавливания для получения готового продукта – покрытого полимерным слоем и защитной оболочкой волокна общим диаметром около 0,5 ... 1 мм.

Такое волокно остается восприимчивым к чрезмерно резким изгибам, вызывающим микротрещины, и внешним механическим воздействиям, которые создадут потери на микроизгибах. Целью тщательно разработанного процесса укладки волокон в кабели и является сведение к минимуму указанных эффектов, а также защита волокон от химических и физических воздействий в условиях агрессивной окружающей среды. Это достигается включением в состав кабеля механически прочных элементов в виде нитей из стали, полимера (типа *Kevlar*) или углерода. Благодаря этому длинные отрезки кабеля можно протягивать через трубы без повреждения волокна вследствие сильного натяжения. Кроме того, в состав оптического кабеля можно также включить и медные провода для обеспечения электропитанием удаленных ретрансляторов.

Естественно, что конструкции оптических кабелей очень разнообразны (рис. 13.1). Оптическое волокно может быть уложено внутри трубки вдоль ее оси или по спирали вокруг центральной прочной жилы. Оно может лежать свободно внутри своей трубки в кабеле или может фиксироваться. В последнем случае кабель должен быть достаточно прочным и полностью заполнен эластичным материалом для сведения к минимуму поперечных и продольных напряжений в волокне. Часто отмечалось, что операция укладки волокон в кабель увеличивает потери в волокне из-за появления микроизгибов. Первоначально эти дополнительные потери могут составлять 0,5 ... 2 дБ/км, однако имеются данные о том, что впоследствии при уменьшении механических напряжений, созданных при изготовлении кабеля, они уменьшаются. Улучшение технологии изготовления кабелей привело к значительному уменьшению создаваемых при этом дополнительных потерь.

Здесь может быть уместным следующий комментарий о стоимости оптических кабелей. Стоимость изготовления оптического кабеля намного больше стоимости входящего в его состав волокна за исключением его простейших конструкций, таких как одиночное волокно и возможно той, которая изображена на рис. 13.1, а. Кроме того, она почти такая же, что и стоимость изготовления электрического кабеля сравнимой сложности, и составляет, например, около 1 ... 10 долларов за метр. Таким образом, преимущество оптических кабелей по сравнению с электрическими состоит в большей пропускной способности при меньшей стоимости оптических ретрансляторов. При этом дополнительная пропускная способность должна быть реализована без дополнительного усложнения оконечной аппаратуры системы пе-

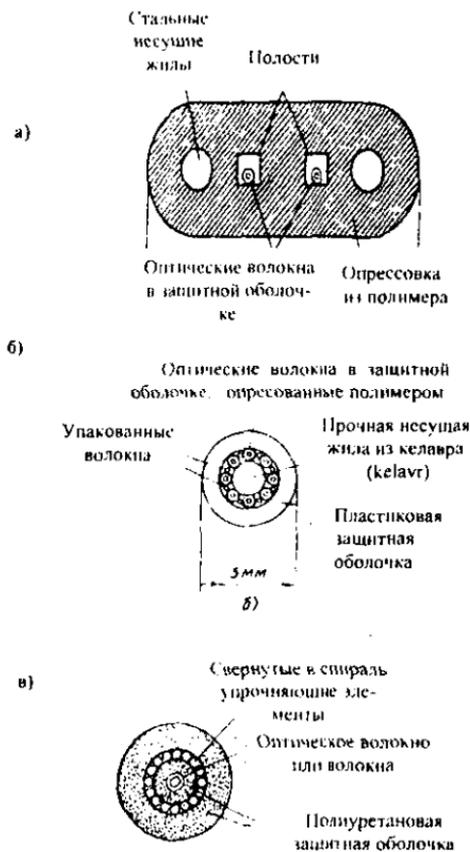


Рис. 13.1. Некоторые типичные конструкции волоконно-оптических кабелей.

а -- поперечное сечение кабеля из двух волокон, изготовленного ВСС р/с с использованием волокон фирмы Корнинг

б -- поперечное сечение кабеля из девяти волокон, не имеющего никаких металлических компонент;

в -- поперечное сечение возможной конструкции кабеля, в которой оптическое волокно находится на оси кабеля, а повышающие его механическую прочность элементы располагаются снаружи.

передачи и увеличения ее стоимости. Например, пусть двадцать или тридцать графических терминалов соединены с центральной ЭВМ, находящейся на расстоянии нескольких сот метров. Максимальная скорость передачи информации к каждому терминалу и от него равна 9,6 кбит/с. Задача состоит в выборе между прокладкой к каждому терминалу обычного кабеля, состоящего из пары витых медных проводов, или оптического кабеля из двух волокон с использованием устройств разделения каналов на каждом конце. В настоящее время, исходя из соображений стоимости, следует отдать полное предпочтение традиционному решению с использованием обычного кабеля, и только дополнительные требования, такие как защита от электромагнитных помех, могли бы поставить вопрос о применении оптического волокна. Если же увеличить скорость передачи данных или расстояние, то предпочтительным становится использование оптического волокна.

### §13.2. Соединение оптических волокон и соединительные устройства

Каким бы длинным ни был отрезок отдельного волокна, никакая система связи не может обойтись без необходимости соединения волокон между собой и использования для этой цели специальных устройств. Сразу определим различия между постоянным соединением или сростком, и разъемным соединительным устройством, или оптическим разъемом. Сращивание волокон потребуется при прокладке кабеля или при его эксплуатации, если кабель окажется поврежденным, а его волокна сломанными. Разъемные соединительные устройства обычно используются в оконечной аппаратуре. По-видимому, источники излучения и фотодетекторы будут постоянно соединены с коротким отрезком волокна и, таким образом, могут подключаться к ВОЛС с помощью стандартного соединительного устройства. Это позволяет раздельно испытывать источники излучения и фотодетекторы и в случае необходимости производить их замену. Сростки и оптические разъемы могут потребоваться как для соединения отдельных волокон, так и одновременного соединения многих волокон, уложенных в кабель. Каждый сросток или разъем будет вносить дополнительные потери, и необходимость минимизации этих потерь приводит к жестким допускам на рассогласование волокон при их соединении. Рассогласование волокон возникает из-за имеющихся в соединяемых волокнах различий в числовой апертуре ( $NA$ ), профиле показателя преломления, диаметре сердцевинки или ошибок во взаимной ориентации волокон при их соединении. Эти допуски в самом деле очень жесткие, особенно для одномодовых волокон, у которых диаметр сердцевинки составляет 5 ... 10 мкм. Обычно сдвиг соединяемых волокон относительно друг друга приводит к значительно более серьезным последствиям, чем их рассогласование по углу или (в случае разъемов) наличие зазора между торцами. Это хорошо видно на рис. 13.2, где приведены виды рассогласования.

Сростки могут быть получены как сплавлением (сваркой) концов двух соединяемых волокон, так и их склеиванием с помощью прозрачного свя-

зующего вещества, имеющего согласованный с волокном показатель преломления. Для удержания концов соединяемых волокон в требуемом положении необходимы специальные зажимные устройства, хотя для этого и используются полимеризующиеся клеи, или концы волокон предварительно расплавляются и затем соединяются. Было описано много конструкций таких устройств. Те из них, которые предназначены для работы в условиях лаборатории или предприятия, могут быть достаточно сложными, однако другие, предназначенные для выполнения соединений в полевых условиях, должны быть безопасными, надежными и простыми в использовании. В одном из наиболее удачных способов сварки волокон между концами соединяемых волокон осуществляют электрический разряд, в результате чего они расплавляются выделяющимся при этом теплом. Когда затем эти концы приводятся в контакт, силы поверхностного натяжения стремятся совместить оба волокна требуемым образом. Было разработано соответствующее оборудование, позволяющее неквалифицированному персоналу производить соединение волокон в полевых условиях. Результирующие потери при этом составили около 0,2 дБ/соединение для многомодовых волокон и менее 0,5 дБ/соединение для одномодовых.

Классические и разборные соединения волокон обеспечивают малые потери только тогда, когда их торцевые поверхности чистые, гладкие и перпендикулярны оси волокна.

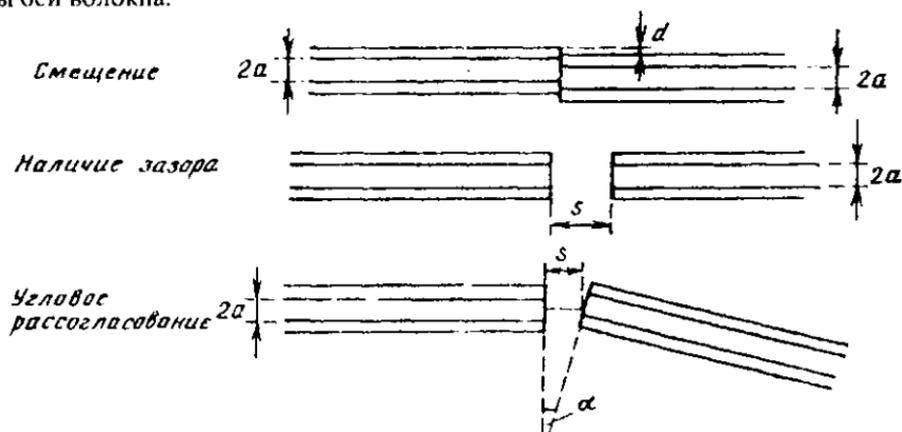


Рис. 13.2. Виды рассогласования при соединении волокон.

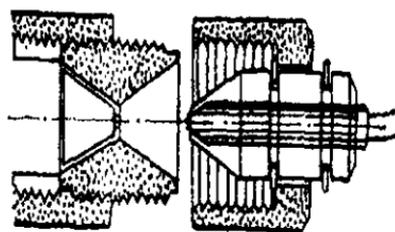


Рис.13.3. Оптический разъем с центрирующим конусом для одноволоконного оптического кабеля

Надежный и хорошо контролируемый способ разрезки волокон состоит в их намотке с натяжением на закругленную оправку и нанесении царапин на его внешней поверхности. Затем волокно ломается требуемым образом в результате распространения трещины под действием напряженного состояния. Этот способ хорошо знаком каждому, кто работал со стеклом.

Конструкция оптических разъемов, показанных на рис. 13.3 зависит от требований к точности механического соединения волокон (рис. 13.4). Первоначально вносимые разъемом потери не превышают  $0,5 \text{ дБ/разъемное соединение}$ . Однако впоследствии механический износ, а также вероятность загрязнения и повреждения торцевых поверхностей соединяемых волокон в процессе эксплуатации приводят к существенному увеличению этих потерь. Разработчики ВОЛС не едины в вопросе о допустимом запасе мощности на компенсацию данных потерь, однако наиболее консервативные из них утверждают, что при неблагоприятных условиях эксплуатации потребуется принять величину, равную —  $3 \text{ дБ/разъемное соединение}$ .

Контрольные вопросы:

1. Какие типичные конструкции оптических кабелей вы знаете?
2. Расскажите о процессе изготовления оптических кабелей.
3. При помощи чего соединяют оптические кабели?
4. Назовите основные методы определения параметров оптических систем связи.
5. Каким преимуществом обладает оптический кабель перед электрическим?
6. Для чего используют оптические сростки?
7. Как получают сростки в оптических кабелях?
8. От чего зависит конструкция оптических кабелей?
9. В чем состоит контролируемый способ разрезки волокон?
10. Почему в состав кабеля включают нити сталей, полимера, углерода?

## Глава 14

### Методы измерения основных параметров и характеристик волоконно-оптических систем связи

#### §14.1. Измерение дисперсионных искажений в волоконно-оптических кабелях

Величина дисперсионных искажений определяет максимально возможную скорость передачи информации и является поэтому одной из важнейших характеристик ВОЛС.

Искажения за счет дисперсии можно измерить одним из существующих методов либо во временной области (измерение импульсной характеристики), либо в частотной области (измерение передаточной функции). Вре-

меньшие и частотные представления сигналов связаны известными преобразованиями Фурье:

$$V(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \theta(t) \exp(-j \cdot 2\pi \nu t) dt;$$

$$\theta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V(\nu) \exp(j \cdot 2\pi \nu t) d\nu.$$

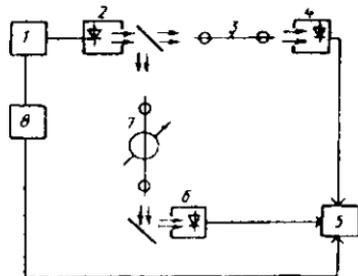
При этом всегда  $\theta(t)$  — действительная функция, а  $V(\nu)$  — комплексная.

В случае использования анализаторов спектра для определения передаточной функции под спектральной амплитудой  $S(\nu)$  будем понимать удвоенное значение модуля преобразования Фурье временной функции  $\theta(t)$ :

$$S(\nu) = 2 |V(\nu)|. \quad (14.1)$$

Измерения во временной области наиболее целесообразно проводить в режиме прохождения через волоконный световод короткого импульса, частотный спектр которого шире полосы пропускания исследуемого тракта. Измерительная установка должна содержать генератор импульсов, чувствительный линейный фотоприемник с малой постоянной времени и устройство для измерения основных характеристик принятого импульса. На рис. 14.1 показана структурная схема установки для измерения импульсной характеристики. Импульсный сигнал генератора 1 подается на излучатель 2, в качестве которого может использоваться ПШЛ, и линию задержки 3 для запуска осциллографа 5. С помощью осциллографа производится сравнение импульсов, прошедших через волоконно-оптический кабель 4 и через контрольный фотоприемник 6. Разность их полуширин определяет величину дисперсии в волокне.

Рис. 14.1



Данный метод позволяет определить длину кабеля и величину затухания в нем. Изменяя период следования импульсов генератора 1, добиваются совпадения временного положения импульсов с выходов фотоприемников 4 и 6 на экране осциллографа. При этом время распространения сигнала в исследуемом кабеле будет равно периоду следования и может быть просто определено по калиброванной шкале генератора. Измерение затухания проводится с помощью аттенюатора 7. Внося затухание в контрольный тракт, добиваются равенства амплитуд сигналов на выходах фотоприемников 4 и 6.

Исследования показали, что применение описанного метода позволяет проводить измерения величины дисперсионных искажений с точностью до

десятих долей наносекунды. Погрешность измерения длины кабеля и величины затухания зависит от точности калибровки генератора и оптического аттенуатора.

При использовании данного метода некоторое влияние на результат измерения оказывают условия ввода излучения в световолокно, так как это характеризует распределение энергии между модами. Обеспечение различных условий ввода, однако, связано с большими трудностями. Наилучшим из имеющихся в настоящее время методов, позволяющих получать реальные и воспроизводимые результаты и устраняющих влияние оператора, является использование на передающей стороне смесителя мод, благодаря чему получается строго определенная апертура вводимого излучения. В простейшем случае он может представлять отрезок световолокна определенной длины.

Известен метод, позволяющий отдельно определять расширение импульса за счет задержки мод и дисперсии материала. Для этого в световолокно одновременно вводятся импульсы с двумя различными длинами волн в интересующей спектральной области и измеряется разница в задержке их распространения. Проведение подобных измерений требует использования волоконно-оптического кабеля большой длины. Измерение искажений на меньших отрезках может проводиться в режиме многократного прохождения импульсов. В этом случае установка, представленная на рис.14.1, дополняется полупрозрачными отражателями, расположенными на торцах исследуемого волокна. При этом возможна регистрация импульсов после прохождения их через световолокно нечетное число раз.

Оптический сигнал, модулированный по амплитуде с определенной частотой, при распространении по исследуемому волокну будет уменьшать глубину модуляции, что соответствует спаду передаточной функции на частоте модуляции. Значит, измерение передаточной функции позволит оценить дисперсионные искажения. Такой метод измерения обладает следующими достоинствами:

- передаточная функция получается непосредственно, без преобразования Фурье во временной области;
- нелинейные искажения играют меньшую роль, так как глубина модуляции может быть небольшой;
- на высоких частотах проще осуществить синусоидальную модуляцию, чем модуляцию в режиме коротких импульсов;
- отношение сигнал/шум регистрируемого сигнала выше, так как может использоваться перестраиваемый избирательный приемник.

При использовании некогерентного источника света, узкополосных оптических фильтров и внешней модуляции возможно измерение передаточной функции на различных длинах волн. Такие методы позволяют определять как амплитудную, так и фазовую характеристики передаточной функции.

Модуль передаточной функции [см. выражение (14.1)] может быть

определен с помощью анализатора спектра. Для этого регистрируется спектр источника излучения до и после прохождения исследуемого волокна. При использовании приборов с логарифмическим отсчетом логарифм модуля функции передачи находится как разность этих двух измерений.

Недостатками методов измерения в частотной области являются: сложность автоматизации процесса измерения:

высокая стоимость используемых приборов; трудность обеспечения приемлемой линейности амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта.

В описанных выше случаях характеристика световолокна находится по данным о прохождении широкополосного сигнала. Такие методы измерения (их целесообразно называть *прямыми*) требуют использования широкополосных излучателей и приемников. Вместе с тем измерение дисперсионных искажений возможно, например, путем исследования структуры поля излучения на выходе световолокна.

Можно определить дисперсионные свойства оптического кабеля при наблюдении когерентности поля на выходе оптического волокна и ее зависимости от характеристик входного излучения. Автокорреляционная функция поля излучения содержит информацию о пространственной и временной когерентности. Высокая разрешающая способность (порядка нескольких пикосекунд) позволяет выполнять измерения на коротких образцах. Однако реализация этого преимущества ведет к снижению точности измерения, поскольку в этом случае не учитывается преобразование мод.

## §14.2. Измерение затухания в волоконно-оптических кабелях

Для определения затухания в многомодовых оптических волокнах используются два метода. Наиболее широко распространен метод, основанный на измерении плотности потока оптической энергии, передаваемой по двум отрезкам волокна различной длины, при обеспечении постоянства потерь в элементах ввода и вывода. Второй метод базируется на использовании оптического рефлектометра во временной области.

Плотность потока оптической энергии, передаваемой в волоконном световоде на расстояние  $x$ , можно выразить в виде

$$P(x) = P(x_1) \exp \left[ - \int_{x_1}^x \alpha(x) dx \right],$$

где  $P(x_1)$  — плотность потока в световоде в точке  $x_1$ ;  $\alpha(x)$  — коэффициент потерь, зависящий как от координаты точки измерения, так и от условий ввода излучения в оптическое волокно. При постоянном коэффициенте потерь затухание представляет результат усреднения:

$$\alpha(x_1, x_2) = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx.$$

где  $x_1, x_2$  — длины участков волокна, использованных при измерении.

Рассмотренный метод позволяет определить вносимые потери для участка волокна заданной длины, но не дает информации относительно зависимости потерь от длины оптического волокна. Если величина потерь зависит от длины волокна, то затухание, вычисленное по результатам измерения вносимых потерь, выражать в децибелах на километр не имеет смысла.

Новый метод измерения затухания основан на использовании оптического рефлектометра в временной области. Он позволяет определить зависимость затухания в волокне от его длины. Этот метод, базирующийся на анализе обратнорассеянного света, не требует ни резки волокна, ни доступа к обоим его торцам. В данном случае импульс света вводится в волокно с помощью направленного ответвителя. Сигнал обратного рассеяния, наблюдаемый фотоприемником, состоит из трех четко выраженных участков:

начального импульса, появляющегося в результате обратного рассеяния от входного ответвителя;

длинного "хвоста", связанного с рэлеевским рассеянием, которое возникает при распространении входного импульса вдоль световода;

импульсов, обусловленных дискретными отражениями, возникающими вдоль световода вследствие дефектов волокна, наличия разъемов и френелевского отражения от конца волокна.

Сигнал, обусловленный обратным рэлеевским рассеянием, можно использовать для определения коэффициента затухания. Временную зависимость принятого обратнорассеянного сигнала можно преобразовать в зависимость от длины волокна, умножив его на скорость света в материале сердцевины. Мощность продетектированного обратнорассеянного сигнала имеет вид

$$P(x) = kP(0)\exp(-2\alpha(x)x),$$

где  $k$  — постоянная величина;  $P(0)$  — световой поток, введенный в волокно;  $\bar{\alpha}(x)$  — среднее значение коэффициента суммарного затухания прямого и обратнорассеянного сигналов;  $x$  — координата точки вдоль волокна.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что по измерению обратного рассеяния можно определить затухание в волокне. Анализируя форму обратнорассеянного сигнала, можно установить местоположение соединительных элементов и дефектов, а также величину вносимых ими потерь.

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные методы измерения параметров оптических систем.
2. В каком режиме целесообразно проводить измерения во временной области?
3. Начертите структурную схему установки измерения импульсной характеристики.
4. От чего зависит погрешность измерения?
5. Какими достоинствами обладает метод измерения?

6. В каком случае возможно измерение передаточной функции?
7. Перечислите недостатки методов измерения в частотной области?
8. Как измеряются затухания в оптических кабелях?
9. Как определяется плотность потока оптической энергии?
10. Что можно использовать для определения коэффициента затухания?

## Глава 15

### Проектирование, расчет и измерение основных параметров и характеристик многоканальных систем передачи оптического диапазона

#### §15.1. Основные требования к проектированию

Разработке проектов новых систем многоканальной связи всегда должно предшествовать проведение научно-исследовательских работ (НИР) для определения возможности и целесообразности применения новых решений. В зависимости от поставленной задачи НИР может заканчиваться представлением научного отчета или эскизного проекта системы. Как правило, такая работа подкрепляется экспериментальными исследованиями, разработкой лабораторных макетов нестандартных узлов, а иногда и системы в целом. Этими материалами определяются основные направления и способы создания новых систем: разработка конструкторской документации, опытное производство (изготовление опытного образца или нескольких образцов) и, наконец, серийное или массовое производство.

При проектировании многоканальных систем передачи оптического диапазона необходимо учитывать следующие основные требования:

- скорость передачи информации или ширину полосы частот;
- протяженность линий связи;
- требуемую достоверность передачи информации (или отношение сигнал/шум);
- вид передаваемой информации (цифровая или аналоговая).

Кроме того, следует учитывать также ряд дополнительных факторов, таких, как:

- среда распространения излучения,
- число ретрансляторов (регенераторов),
- особенности оконечных устройств,
- габариты и масса аппаратуры,
- условия эксплуатации,
- надежность и стоимость.

Многие из перечисленных факторов в процессе проектирования системы оказываются взаимосвязанными, и процедура расчета их требует оптимизации как отдельных параметров, так и систем в целом.

## §15.2. Проектирование многоканальных волоконно-оптических систем связи

Внедрение многоканальных волоконно-оптических систем связи (ВОСС) в народное хозяйство будет осуществляться в несколько этапов. *На первом, переходном, этапе* будут разрабатываться новые системы и быстро изменяться стоимость отдельных элементов (источников излучения, оптического кабеля, фотоприемников и т. п.). *На втором этапе* будет создано множество систем с лазерами, отличающимися достаточно низкой стоимостью, и волоконно-оптическими кабелями с малым затуханием. *На следующем этапе* наиболее вероятно широкое использование элементов интегральной оптики, конструкций, приспособленных к изменению элементной базы в условиях появления недорогих оптических кабелей, соединительных устройств, передатчиков и приемников излучения.

Проектирование многоканальных ВОСС целесообразно начинать с оценки возможностей волоконно-оптического кабеля (ВОК) с точки зрения информационной емкости при данной длине линий связи: обеспечит ли имеющийся ВОК заданное число каналов (ширину полосы группового сигнала) без ретрансляции или необходимо использовать ретрансляторы? Определению числа ретрансляторов должен предшествовать расчет длины ретрансляционного участка. При этом необходимо учесть, что если каждый участок обладает допустимой вероятностью ошибки  $P_{\text{ом}}$ , полная вероятность ошибки при  $N$  ретрансляционных участках будет  $NP_{\text{ом}}$ .

Проведем расчет длины ретрансляционного участка. Длина его  $L$  ограничивается либо затуханием, либо дисперсией (расширением) импульса в ВОК. Пусть на входе ВОК действует световой импульс мощностью  $P_{\text{в}}$  и длительностью  $\tau_{\text{в}}$ . Длительность его на выходе ВОК

$$\tau_{\text{н}} = (\tau_{\text{в}}^2 + \Delta\tau_{\text{гп}}^2 L^2 + \Delta\tau_{\text{д}}^2 L^2)^{1/2}, \quad (15.1)$$

где  $\Delta\tau_{\text{гп}}$  — расширение импульса из-за разброса значений группового времени пробега на единицу длины в многомодовом ВОК;  $\Delta\tau_{\text{д}}$  — расширение импульса на единицу длины из-за дисперсии в материале ВОК.

Для безошибочного приема необходимо и достаточно выполнение условия

$$\tau_{\text{н}} < T_{\text{п}} \quad (15.2)$$

где  $T_{\text{п}}$  — период повторения импульсов. До тех пор, пока длительность импульса удовлетворяет этому условию, длина ретрансляционного участка ограничивается затуханием в ВОК. Тогда в зависимости от энергии передатчика и затухания в волокне длина ВОК может иметь величину не более чем

$$L_{\alpha} = (1/(2\alpha)) \ln(W_0/W) \quad (15.3)$$

Где  $W_0 = P_{\text{в}}\tau_{\text{в}}$  и  $W$  — энергия светового импульса соответственно на входе и выходе ВОК, Дж;  $\alpha$  — затухание, дБ/км.

Если при этом получаются более длинные ретрансляционные участки, чем допускает условие расширения импульса (15.2), длина ВОК определяется по выражению (15.1) совместно с условием (15.2). В формуле (15.1) учтено, что различные моды распространяются в ВОК независимо друг от друга.

При переключении мод на неоднородностях волокна импульс на конце ВОК расширяется до

$$\tau_n = (\tau_0^2 + \Delta\tau_{\text{гр}}^2 L_c^2 + \Delta\tau_m^2 L_c L)^{1/2},$$

где длина связи  $L_c$ , т. е. длина ВОК, на которой в среднем происходит полный обмен энергией между модами, определяется по выражению  $\tau_m = \Delta\tau_{\text{гр}}(L_c)^{1/2}$ ;  $\tau_m$  — длительность импульсного отклика, который образуется в результате перехода энергии в среднем поровну с каждой из мод. Тогда ВОК может иметь длину

$$L_c = \left( \frac{\tau_n - \tau_0}{\Delta\tau_{\text{гр}}} \right)^2 + \frac{\Delta\tau_m^2 L_c^2}{4\Delta\tau_{\text{гр}}^2} = \frac{\Delta\tau_m^2 L_c}{2\Delta\tau_{\text{гр}}},$$

где  $\tau_n$  — время пробега  $n$ -й моды.

Если в многоканальной ВОСС используется ППЛ с двойной гетероструктурой, который создаст практически когерентное излучение с очень малой полосой частот  $\Delta\nu$ , световой импульс из-за дисперсии материала практически не расширяется. Основную моду такого ППЛ можно передать с высокой эффективностью в одномодовое волокно. При этом отсутствуют разброс значений времени пробега и заметное расширение импульсов. Тогда длина ретрансляционного участка определяется только затуханием в ВОК [см. формулу (15.3)]. В табл. 15.1 приведены типичные параметры такой системы при  $\lambda=0,9$  мкм,  $\alpha = 5$  дБ/км,  $L_c = 1$  км,  $n = 1,451$ .

Таблица 15.1

Параметр	Источник излучения				
	Лазер		СИД		
	одномодовое	Градиентное	Волокно Двухслойное	Градиентное	двухслойное
Ширина линии, дм	1	1	1	40	40
Разброс групповых значений времени пробега, нс	-	2,42	24,2	4,48	48,40
Длительность импульса, нс	2,5	5	30	10	30
Мощность передатчика в импульсе, мВт	10	10	10	3	3
Минимальная энергия импульса у приемника, $10^{-3}$ дБк	2,3	1,9	1,4	1,6	1,4
Расстояние между ретрансляторами (км) при ограничении: Затуханием ВОК	9,4	10,7	12,5	6,8	8,8
Расширением импульсов с переключением мод	-	12,8	15,5	10,4	3,8

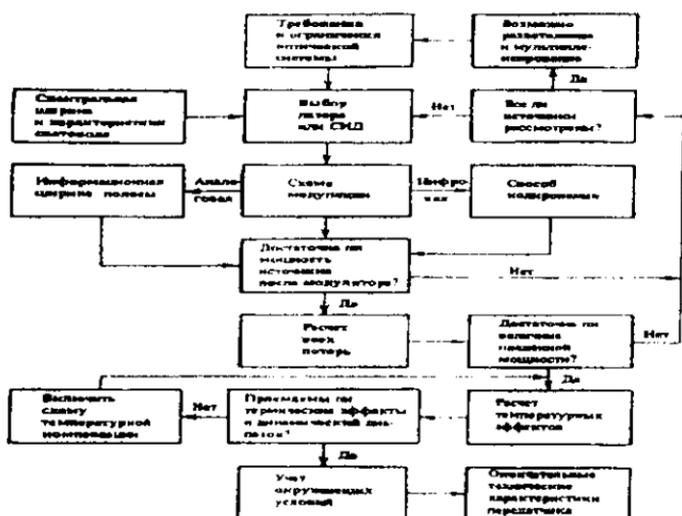


Рис 15.1 Алгоритм расчета передатчика

При частоте повторения импульсов 300 Мбит/с и интервале между ними 3,3 нс, длительности 2,5 нс для регенерирования импульсов с вероятностью ошибки 10 достаточно, чтобы при затухании 5 дБ/км и длине ВОК 10 км лазер имел мощность 10 мВт. При очень высокой частоте повторения импульсов либо большом расстоянии между ретрансляторами расширение импульсов из-за дисперсии в материале делается заметным, так как ширина линии излучения  $\Delta\nu$  частично когерентного ППЛ хотя и достаточно мала, но все же конечна. В пределах такой узкой полосы  $\Delta\nu$  характеристика времени пробега основной волны в хорошем приближении линейна:

$\tau = \tau_0 + (d\tau / d\nu)\Delta\nu$ . При удовлетворении условия (15.2) предельное значение для произведения расстояния между ретрансляторами  $L$  и частоты повторения импульсов  $F_n = 1/T_n$

$$LF_n = \frac{1}{\Delta\tau_n} = \frac{L}{(d\tau/d\nu)\Delta\nu_0}$$

При длине волны  $\lambda=0,9$  мкм и ширине линии 1 нм ширина полосы  $\Delta\nu=371$  Гц. Дисперсионные свойства материала кварцевых волокон характеризуются величиной  $18 \cdot 10^{-26}$  с<sup>2</sup>/м. При этих условиях расстояние между ретрансляторами определяется не затуханием в ВОК, а расширением импульса из-за дисперсии материала:

$$L \leq (T_n^2 \cdot \tau_0^2)^{1/2} \frac{L_0}{(d\tau_n/d\nu)\Delta\nu_0}$$

После определения длины ВОК необходимо выбрать источник излучения и схему его модуляции, которые удовлетворяли бы требованиям скорости передачи информации и необходимой достоверности. При выборе источника излучения нужно учитывать величину оптической мощности, длину

волны излучения и спектральную ширину, скорость и линейность отклика, возможности температурной компенсации.

Требуемая величина оптической мощности на выходе передатчика определяется чувствительностью приемника, при этом следует учитывать все потери на прохождение сигнала и стыковку элементов. Длина волны источника излучения обычно выбирается в пределах 0,84--0,9 мкм или в области 1,06 мкм, при которой затухание в ВОК минимально. В перспективе возможен диапазон волн 1,3--1,5 мкм, при котором потери в ВОК составляют менее 1 дБ/км.

Выбор схемы модуляции осуществляется с учетом вида передаваемой информации. При аналоговой модуляции мощность источника и информационная емкость канала должны рассматриваться в зависимости от уровня искажений сигналов. При использовании цифровой модуляции необходимо учитывать быстродействие источника и выбор способа кодирования.

Далее следует подсчитать все потери в соединениях и определить, является ли вводимая в линию мощность достаточной, а также сильно ли влияет изменение температуры на излучаемую мощность. Если мощность сигнала недостаточна, то можно рассмотреть другие способы кодирования, возможность использования суммирования мощностей  $N$  источников излучения или применения более мощных лазеров. Если изменение температуры сильно влияет на излучаемую мощность, необходимо применять температурную компенсацию изменений тока возбуждения с помощью схемы обратной связи.

На рис. 15.1 приведен алгоритм расчета передатчика, который может быть использован для перевода на язык ЭВМ.

При проектировании приемника необходимо произвести расчет шума в полосе частот сигнала, выбрать конкретный тип фотодетектора, затем определить схему предварительного усилителя. Исходными данными при проектировании фотопреобразовательной части приемника являются скорость передачи информации и чувствительность. Так, при малых скоростях (единицы мегабит в секунду) в качестве фотодетектора могут быть использованы фотодиоды и предусилители на полевых транзисторах; при высоких скоростях передачи (десятки мегабит в секунду) ---  $p-i-n$ -диоды или ЛФД и предусилители на биполярных транзисторах.

На рис. 15.2 представлен алгоритм расчета приемника. Основные данные, касающиеся выбора различных компонентов для ВОСС различной пропускной способности и скорости передачи информации, даны в табл. 15.2.

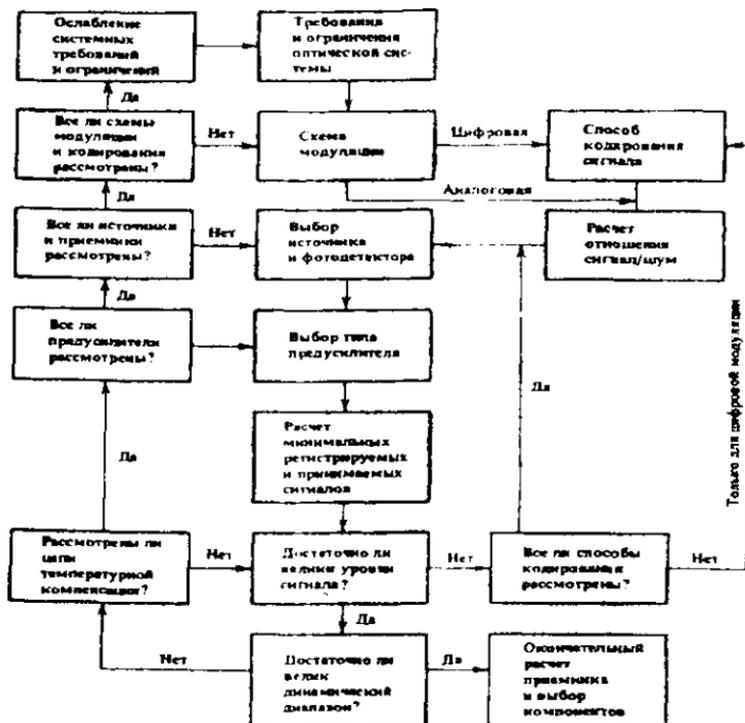


рис 15.2 Алгоритм расчета приёмника

Таблица 15.2

Тип элемента	Короткие линии (менее 40 м). низкие скорости передачи (около 2Мбит/с)	Средние линии (менее 400 м). средние скорости передачи (менее 25Мбит/с)	Длинные линии (более 1 км). Высокие скорости передачи (более 30 Мбит/с)
Источник излучения	СИД(GaAs)	(GaAlAs,GaInAs)	Лазер на двойной гетероструктуре
ВОК	Пластиковые или стеклянные жгуты с высокими потерями	Пластиковые Жгуты со ступенчатым профилем	Градиентные волокна с низкими потерями
Фотодетектор	ФД. р-і-п	Кремниевый. р-і-п	Si-ЛФД,GaAs-ЛФД
Усилитель	На полевом транзисторе с частотной коррекцией	Постоянного тока с отрицательной обратной связью	На биполярных транзисторах со схемой противозумовой коррекции

### §15.3. Проектирование многоканальных космических лазерных систем связи

Перед разработчиками многоканальных космических лазерных систем связи ставятся явно противоречивые требования: увеличение объема передаваемой информации и снижение вероятности ошибки при уменьшении полосы пропускания системы; увеличение надежности системы при снижении стоимости; уменьшение массы и габаритов при повышении эффективности и т. п. Взаимозависимые параметры и характеристики требуют оптимизации их, принятия компромиссных решений.

Так, высокая стоимость создания и эксплуатации многоканальных космических лазерных систем связи требует использования при проектировании методов стоимостной оптимизации. При этом возможны две постановки задачи:

1) обеспечение минимальной стоимости системы при условии получения заданных показателей качества (качества воспроизведения информации, дальности действия, скорости передачи информации и др.);

2) получение оптимальных показателей качества (наилучшего качества воспроизведения информации, максимальной дальности действия, максимальной скорости передачи данных) при заданной максимально допустимой стоимости. В обоих случаях вводится ряд дополнительных ограничений оптимизируемых параметров, зависящих от технологических возможностей и условий эксплуатации.

Основными параметрами системы связи, подлежащими оптимизации и наиболее сильно влияющими как на показатели качества, так и на ее стоимость, являются: диаметр передающей антенны  $D_{\text{прд}}$ ; мощность передатчика  $P_{\text{прд}}$ ; диаметр приемной антенны  $D_{\text{прм}}$ ; поле зрения приемной антенны  $\theta_{\text{прм}}$ .

Задача оптимизации параметров представляет задачу нелинейного программирования определения условного экстремума функции нескольких переменных при ряде ограничений типа равенств и неравенств. Задачи такого типа обычно решаются в два этапа.

На первом этапе производится анализ зависимости показателей качества системы (в том числе стоимости, которая также считается одним из показателей качества) от параметров передатчика, приемника и канала связи, в результате которого выявляются функции связи показателей качества с параметрами. Функция связи показателя качества, подлежащего оптимизации, с параметрами системы называется *целевой функцией*, остальные — *функциями ограничений*. Как правило, эти зависимости являются монотонными (возрастающими или убывающими).

На втором этапе осуществляется оптимизация основных параметров системы для конкретных условий, определяемых рядом зависимостей и ограничений (функции связи, а также ограничения на параметры типа равенств и неравенств).

### Контрольные вопросы:

1. Каким направлениям развития и каким компонентам отдается предпочтение?
2. Какие существуют основные требования к проектированию многоканальных систем?
3. Какова последовательность проектирования многоканальных систем?
4. Какие дополнительные факторы следует учитывать при проектировании?
5. С чего целесообразнее начинать проектирование ВОСС?
6. Как рассчитывается длина ретрансляционного участка?
7. Как выбирают источник излучения?
8. Как выбирается схема модуляции?
9. Приведите алгоритм расчета передатчика.
10. Приведите алгоритм расчета приемника.

## Глава 16 Направления развития систем связи

### §16.1. Применение лазерных систем передачи информации

#### *Направление развития основных компонентов лазерных информационных систем*

**Источники излучения.** В качестве источников излучения в лазерных информационных системах используются газовые и полупроводниковые лазеры, а также твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате. В волоконно-оптических линиях связи в ряде случаев могут быть использованы также источники некогерентного излучения — светодиоды.

Совершенствование полупроводниковых лазеров в последние годы идет в направлении разработки более длинноволновых, более мощных источников излучения. Такие лазеры разработаны, в частности, фирмами “Белл телефон” (США), “Ниппон телеграф и телефон” (Япония) и др.

В настоящего время созданы и исследованы гетеролазеры с использованием четверных структур с очень узкой полосковой структурой (примерно 2,5 мкм). Основным достоинством их является возможность работы в диапазоне длин волн 1,2—1,3 мкм, соответствующих наименьшим потерям (менее 1 дБ/км), в волоконно-оптических кабелях. Пороговый ток при комнатной температуре в этих лазерах составляет 25—30 мА при длине волны  $\lambda = 1,24—1,28$  мкм. Кроме того, в них снижен модовый шум, повышен динамический диапазон, увеличены срок службы и быстродействие.

**Фотодетекторы.** В качестве фотодетекторов используются фотоэлектронные умножители, фотодиод и лавинные фотодиоды, изготавливаемые из полупроводников и так называемых соединений  $A^{III}-B^V$ .

Кремниевые ЛФД отличаются низкой стоимостью, простой технологии

ей изготовления, очень малыми темновыми токами. К сожалению, они не пригодны в ИК диапазоне (более 1 мкм). В интервале 1—1,6 мкм используются ЛФД, имеющие большие темновые токи (100—300 нА). Предполагается, что ЛФД на основе тройных и четверных растворов соединений  $A^{III}-B^V$  вытеснят германиевые ЛФД, поскольку при сравнимой чувствительности и лучшем быстродействии они имеют темновые токи, на несколько порядков более низкие.

Оптические модуляторы. В лазерных космических системах связи при использовании  $CO_2$ -лазеров или АИГ лазеров предполагается применение оптических модуляторов на ниобате лития или танталате лития, обеспечивающих фазоимпульсную модуляцию со скоростью до 1 Гбит/с. Это ограничение можно преодолеть, разделив многоканальный сигнал на подгруппы. Тогда, используя, например, 10 оптических модуляторов (по одному на каждую подгруппу каналов), можно реализовать скорость передачи до 10 Гбит/с. Результаты исследований последних лет показывают, что такая информационная емкость удовлетворит все потребности на ближайшую перспективу.

В волоконно-оптических линиях связи для модуляции ППЛ короткими импульсами могут быть использованы твердотельные устройства СВЧ диапазона — лавинно-пролетные диоды, диоды Ганна, а также транзисторы в режиме лавинного пробоя.

Волоконно-оптические кабели. Выпускаемые промышленностью оптические кабели на основе стеклянных двухступенчатых многокомпонентных многомодовых волокон имеют затухание 3-4 дБ/км при  $\lambda=0,8-0,9$  мкм. Наиболее типичные поперечные размеры таких световолокон: диаметр сердцевины — 50 мкм, диаметр внешней оболочки — 125 мкм. Полоса пропускания их ограничивается явлением внутримодовой и межмодовой дисперсии и составляет несколько десятков мегагерц на километр.

Увеличение пропускной способности достигается при использовании многомодовых световолокон с градиентным профилем показателя преломления. Полоса пропускания их благодаря уменьшению дисперсии достигает нескольких сотен мегагерц на километр.

Наибольшей полосой пропускания обладают одномодовые оптические волокна. Диаметр сердцевины их составляет 5-8 мкм. Полоса пропускания определяется только дисперсией материала и не превышает 100 ГГц/км.

## **§16.2. Перспективы использования лазеров в системах передачи информации**

Наиболее перспективны в настоящее время лазерная многоканальная связь в космическом пространстве и лазерная многоканальная телефонная связь с использованием световодов в широко разветвленной городской сети, а также широкополосные цифровые системы лазерной связи между крупными вычислительными центрами. Такие системы могут обеспечить огромную информационную емкость и высокое быстродействие, что в условиях ком-

плексной автоматизации управления предприятиями позволит резко повысить эффективность производства.

Практически во всех экономически развитых странах ведется интенсивная разработка ВОЛС, предназначенных для передачи информации. Уже первые работы со световодными системами в Англии, Японии и США показали, что они функционируют почти безотказно и могут быть внедрены относительно легко. В США, например, эти линии развиваются на базе мощной сети связи, включающей около 40 % всех телефонных аппаратов земного шара.

Внутри объектами ВОЛС могут быть самолетные и корабельные линии связи, линии между центральной ЭВМ терминалами, линии управления различными технологическими процессами, например в химической, ядерной и нефтехимической промышленности. Основными преимуществами ВОЛС при использовании их в системах управления приборами промышленной автоматизации являются невосприимчивость к электромагнитным помехам, отсутствие электрических проводов во взрывоопасных и огнеопасных условиях, улучшенное качество сигнала. Не менее важным является уменьшение массы и габаритов линии связи. Так, например, по зарубежным данным, экономия, связанная с уменьшением массы самолетного оборудования, составляет примерно 2500 долларов на килограмм. За счет перехода на ВОЛС масса тяжелого самолета может быть уменьшена на 4000 кг, а стоимость — более чем на 10 млн. долларов; масса легкого самолета — на 400 кг, а стоимость — более чем на 1 млн. долларов.

В космическом корабле «Шаттл» предусмотрено использование ВОЛС, поскольку объем информации, поступающей от спутников, так велик, что только ВОЛС могут обеспечить ее передачу.

На американском самолете А-7 применяется всего 13 волоконно-оптических кабелей вместо 302 обычной проводки, т. е. происходит уплотнение. Главное преимущество состоит в отсутствии электромагнитных помех и как следствие в экономии массы за счет возможности использования легких материалов при изготовлении корпуса самолета. На подводной лодке военно-морских сил США была создана 52-канальная ВОЛС для передачи аналоговых сигналов гидролокатора, обеспечивающая резкое уменьшение массы всей системы.

Множество зарубежных фирм выпускают в продажу готовые комплекты цифровых и аналоговых линий связи. Активная разработка ВОЛС ведется в США, Англии, Японии, Франции, ФРГ, Канаде, Голландии. Проектирование ВОЛС ведется таким образом, чтобы они были совместимы с существующим оборудованием, а также соответствовали принятым стандартам передачи данных. В связи с этим многие зарубежные фирмы построили испытательные центры для решения проблем надежности, монтажа и улучшения характеристик ВОЛС. В одном из таких центров передача сигналов осуществляется по ВОЛС длиной 1 км (из них 300 м на открытом воздухе). В центре работают аналоговая система передачи сигналов цветного телевидения с полосой пропускания 8 МГц и цифровая система передачи сигналов цветного телевидения со скоростью передачи данных 100 Мбит/с.

Для отработки ВОЛС в полевых условиях, испытания различных их компонентов и обучения технического персонала проводились эксперименты в городах Атланта и Чикаго. В Атланте использовался кабель, состоящий из 144 градиентных волокон. Результаты измерений показали, что 138 волокон из 144 имели потери не более 6 дБ/км. Скорость передачи информации в системе (44,7 Мбит/с) соответствовала третичному уровню цифровой иерархии, принятой в Северной Америке. Эксперимент в Чикаго должен был выявить возможности прокладки ВОЛС в условиях города с высокой плотностью застройки. Были проложены две ВОЛС: одна — длиной 1,6 км и вторая — длиной 2,6 км. Использовался ленточный 12-волоконный кабель со средним уровнем потерь излучения 5,1 дБ/км. Эксперимент показал, что монтаж ВОЛС в условиях города возможен, причем для простоты обслуживания ретрансляторы можно устанавливать не в колодцах, а прямо в зданиях.

Больших успехов в применениях ВОЛС для телефонной связи добились японские фирмы. Лаборатория связи корпорации NTT провела испытания трех типов систем связи по оптическому кабелю, связывающему четыре телефонные станции Токио. Общая длина трассы составила 20 км. Две системы предназначались для передачи цифровой информации со скоростями 100 и 32 Мбит/с, третья позволяла осуществлять передачу как цифровой информации со скоростью 32 Мбит/с, так и сигналов цветного телевидения с полосой 4 МГц. Во всех системах использовался 48-волоконный кабель со средними потерями 5 дБ/км. Длина участков регенерации составляла 5 - 8 км. Эти линии связи предназначались для создания многоцелевой кабельной сети, включающей абонентские линии телефонной и видеотелефонной связи, кабельное телевидение и линии передачи данных. С помощью такой кабельной сети абоненты могут быть соединены с телевизионной сетью, другими абонентами и ЭВМ.

В Великобритании действуют несколько экспериментальных ВОЛС. Британское почтовое ведомство построило линию телефонной связи длиной 12 км в Восточной Англии. Потери в оптическом кабеле составляют 5 дБ/км, источником излучения служит гетеролазер, приемником — лавинный фотодиод. Скорость передачи данных 8 Мбит/с. Фирма STI построила ВОЛС длиной 9 км при скорости передачи данных 140 Мбит/с. Фирма «Редифьюшн» создала ВОЛС на 34 тыс. абонентов.

Начальный этап разработок ВОЛС во Франции завершился созданием экспериментальной линии связи. Сейчас ведущие французские фирмы принимают участие в разработке телефонной ВОЛС протяженностью 7 км между двумя парижскими регионами. Предполагается использование 60-волоконного оптического кабеля без ретрансляторов. Скорость передачи данных 34 Мбит/с.

В Канаде также разрабатываются ВОЛС. В Монреале построена линия длиной 2 км со скоростью передачи данных 6,3 Мбит/с. В Ванкувере проводились испытания экспериментальной ВОЛС длиной 1,7 км, позволявшей вести разговоры по 672 телефонным каналам. Сейчас начинаются испытания ВОЛС длиной 400 км в транс канадской телефонной системе.

В ФРГ испытывается телефонная ВОЛС протяженностью 18 км. Передача цифровой информации ведется по 6-волоконному кабелю со скоростью 34 Мбит/с. Фирма «Телефункен» самостоятельно разработала цифровую ВОЛС, передающую данные со скоростью до 100 Мбит/с. Эта линия связи позволяет осуществлять передачу информации 1000 телефонных каналов или одного канала цветного телевидения. Для передачи использовался 8-волоконный кабель с затуханием 8 дБ/км.

Исследования показали, что ВОЛС могут с успехом применяться для телефонной связи различного назначения. В подавляющем большинстве случаев оптический кабель укладывался под землей: это не требует значительных капиталовложений, так как из-за малых размеров и гибкости кабеля его монтаж возможен прямо в существующих подземных кабельных магистралях. Однако имеются сообщения о создании ВОЛС, в которой оптический кабель подвешивался на телеграфных столбах. В Далласе (США) была построена такая линия связи длиной 21 км. По ней осуществлялась передача информации 672 телефонных каналов со скоростью 44,7 Мбит/с.

В настоящее время широко исследуются возможности использования ВОЛС в системах кабельного телевидения. Успешные испытания телевизионной системы студийного качества проведены в США. Была построена линия связи наземной антенны с распределительным центром длиной 1 км. Здесь оптический кабель использовался параллельно с обычным коаксиальным кабелем. Оптический кабель состоял из 12 волокон (длина волны излучения 0,83 мкм). Испытания показали, что видеосигнал по каналу цветности можно передавать с отношением сигнал шум 68 дБ. Это намного превосходит требования к коэффициенту шума для обеспечения студийного качества телевизионного приема. Приемники, излучатели и разъемы в процессе эксперимента работали хорошо. Оптический кабель по сравнению с коаксиальным более приемлем для использования в телевизионных системах, поскольку он не требует корректирующих цепей, нечувствителен к электромагнитным помехам и допускает укладку в уже существующий и практически заполненный кабеле провод.

В США уже эксплуатируется магистральная ВОЛС длиной около 1100 км между Бостоном и Вашингтоном (скорость передачи 45 Мбит/с) и предполагается в конце 80-х годов сдать в эксплуатацию трансатлантическую кабельную ВОЛС. Аналогичные разработки ведутся и в других странах. Перспективными здесь являются одномодовые волоконно-оптические кабели, работающие в диапазоне 1,1—1,7 мкм, при которых потери в оптических волокнах минимальны (до 0,1—0,2 дБ/км). Такой низкий уровень потерь позволяет создавать системы связи оптического диапазона с меньшим количеством ретрансляторов, расстояние между которыми может достигать нескольких десятков километров. Рекордная длина передачи без ретрансляции 100 км при скорости 32 Мбит/с достигнута в Японии. Здесь были использованы одномодовые волокна с затуханием 0,22 дБ/км при длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм. Лазеры в этой системе имеют рабочий ресурс до 400 тыс. ч.

Обзор современного состояния лазерных систем передачи информации показывает, что за короткий срок эта область техники шагнула от простей-

ших лабораторных разработок до многочисленных опытных образцов и ряда промышленных систем.

Аналогичные работы по созданию оптических линий связи ведутся и в нашей стране.

Перспективность использования лазерных систем связи в линиях спутниковой связи в условиях космоса уже не вызывает сомнений. Здесь они смогут обеспечить передачу огромного объема различного рода информации: многоканальной телефонии, телевидения, телеграфии, передачи данных и т. п.

Опыт эксплуатации волоконно-оптических линий связи позволяет сделать некоторые выводы.

С точки зрения передачи информации, ВОЛС весьма эффективны. В первых экспериментальных системах использовались в основном лазеры на арсениде галлия с пороговым током 150–200 мА и мощностью излучения 3–5 мВт или светодиоды, кремниевые фотодиоды и двухслойные волоконно-оптические кабели с затуханием 5–10 дБ/км. Длина ретрансляционного участка при этом составляла 3–5 км.

В последующих экспериментах использовались лазеры на гетеропереходах с меньшими пороговыми токами, имеющие возможность работать в более длинноволновом диапазоне и отличающиеся большей долговечностью. В качестве фотодетекторов применялись лавинные фотодиоды, обеспечивающие усиление более единицы, а оптические волокна — с градиентным сечением показателя преломления, при котором достигается большая скорость передачи информации.

Основное направление дальнейших разработок — увеличение срока службы источников излучения, переход на более длинноволновой участок ИК диапазона (1,3—1,7 мкм) для использования волоконно-оптических кабелей с меньшими потерями и как следствие этого увеличение длины регенерационного участка ВОЛС.

Особый интерес представляют ВОЛС, имеющие параметры, близкие к оптимальным. Так, реализация пропускной способности порядка нескольких единиц гигабит в секунду возможна при использовании одномодовых волоконно-оптических кабелей. Срок службы источников излучения резко увеличивается при внедрении лазеров с низким пороговым током (порядка единиц и десятков миллиампер).

Темпы развития ВОЛС продолжают нарастать, что связано с совершенствованием элементной базы. Важнейшим фактором, определяющим скорость внедрения ВОЛС в практику, является рентабельность волоконной оптики в сравнении с рентабельностью других систем связи. Эксперименты показывают, что оптическое волокно экономически выгоднее коаксиального кабеля при скорости передачи информации более 8–15 Мбит/с. Другие параметры ВОЛС, привлекающие к ним внимание, — это широкая полоса пропускания и значительное расстояние между ретрансляторами.

В заключение следует сказать, что достигнутые к середине 80-х годов технико-экономические показатели ВОЛС позволят перейти к активному

внедрению волоконных линий связи во многих отраслях народного хозяйства. ВОЛС найдут применение для связи между наземными станциями, в автомобильных системах, бортовой аппаратуре, силовых электростанциях и распределительных подстанциях, в подводной кабельной связи, системах скрытой связи, нефтяной и химической промышленности. Перспективными могут стать ВОЛС в системах распределенной обработки данных в спутниковых системах связи, в сфере медицинского обслуживания, для передачи энергии и т. д.

#### Контрольные вопросы:

1. Перечислите достоинства гетеролазеров с узкой полосковой структурой.
2. Какие электронные приборы используют в качестве фотодетектора?
3. Как можно увеличить пропускную способность световолокон?
4. Какие системы связи перспективны в настоящее время?
5. Каковы показатели затухания градиентных волокон?
6. Какова эффективность ВОЛС при передаче информации?
7. Каково основное направление дальнейших разработок систем связи?
8. Чем характеризуются лазеры на гетеропереходах с меньшими пороговыми токами?
9. Перечислите достигнутые технико - экономические показатели ВОЛС.
10. Какое значение имеет максимальная длина передачи без ретранслятора?

#### Литература

1. Алишев Я. В. Многоканальные системы передачи оптического диапазона М., 1986.
2. Шереметьев А. Г. Когерентные ВОЛС, М., 1991.
3. Мосягин Г. М. Теория оптико-электронных систем. М., 1990.
4. Оптические кабели связи зарубежного производства// Радио, № 2, 1998.
5. Элион Г., Элион Х. Волоконная оптика в системах связи: Пер. с англ./Под. ред. Е.М. Дианова. М. :Мир., 1984 198 с.

# О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение

<b>Глава 1: Оптические линии связи и системы</b>	<b>3</b>
§1.1. Общие сведения	4
§1.2. Структурная схема оптической системы связи и основные виды оптических систем связи	6
§1.3. Отношение сигнал-шум в системах связи	8
<b>Глава 2: Квантовые системы</b>	
§2.1. Основное свойство и характеристика квантовых систем	9
§2.2. Характеристики квантовых систем	11
§2.3. Взаимодействие квантовых систем с электро магнитным полем	11
§2.4. Влияние переходов в системе на плотность энергии внешнего поля	14
<b>Глава 3: Световоды</b>	<b>15</b>
§3.1. Оптическое волокно (световоды)	17
§3.2. Типы световодов	19
§3.3. Ступенчатые волоконные световоды	21
§3.4. Градиентные и другие виды световодов	
<b>Глава 4: Электромагнитная теория распространения излучения в оптических волноводах</b>	
§4.1. Уравнения Максвелла.	23
§4.2. Волновое уравнение	25
§4.3. Дисперсия в световодах	26
§4.4. Межмодовая дисперсия	26
<b>Глава 5: Оптические квантовые генераторы</b>	
§5.1. Генераторы оптического излучения	29
§5.2. Требования к источникам излучения для волоконно-оптических систем	33
§5.3. Полупроводниковые лазеры	33
<b>Глава 6: Распространение оптического излучения в атмосфере и направляющих средах</b>	
§6.1. Принципы распространения оптического излучения	38
§6.2. Ослабление оптического излучения в атмосфере	39
§6.3. Физические принципы распространения излучения в направляющих средах	40
<b>Глава 7: Приемники оптического излучения</b>	<b>39</b>
§7.1. Общая характеристика фотодетекторов	44
§7.2. Прямое фотодетектирование	44
§7.3. Гетеродинамное фотосмещение	49
<b>Глава 8: Принципы построения многоканальных лазерных систем оптического излучения</b>	
§8.1. Особенности лазерных многоканальных систем космической связи	52
§8.2. Основные требования к лазерным многоканальным системам космической связи	53

§8.3. Рабочая длина волны	54
§8.4. Требования к антенным устройствам	56
<b>Глава 9: Модуляция оптического излучения</b>	
§9.1. Общие сведения	59
§9.2. Физические основы модуляции излучения	60
§9.3. Амплитудная модуляция	61
§9.4. Частотная и фазовая модуляции	63
<b>Глава 10: Управление направлением оптического излучения</b>	
§10.1. Пространственное управление излучением	65
§10.2. Этапы работы лазерного маяка	66
§10.3. Устройства для управления оптическим лучом (дефлекторы)	67
<b>Глава 11: Система многоканальной связи</b>	
§11.1. Волоконно-оптические системы многоканальной связи	69
§11.2. Частотное разделение каналов в системах волоконно-оптической связи	70
§11.3. Временное разделение каналов в системах волоконно-оптической связи	71
§11.4. Принципы построения волоконно-оптических систем многоканальной связи	74
<b>Глава 12: Помехоустойчивость систем связи</b>	
§12.1. Помехоустойчивость многоканальных систем связи	76
§12.2. Помехоустойчивость лазерных систем связи с низким уровнем помех	79
§12.3. Повышение помехоустойчивости систем передачи при использовании в них фазированных решеток лазеров	81
<b>Глава 13: Изготовления световодов</b>	
§13.1. Изготовление оптических жил и кабелей	84
§13.2. Соединение оптических волокон и соединительные устройства	86
<b>Глава 14: Методы измерения параметров волоконно-оптических систем связи</b>	
§14.1. Измерение дисперсионных искажений в волоконно- оптических кабелях	88
§14.2. Измерение затухания в волоконно-оптических кабелях	
<b>Глава 15: Проектирование многоканальных систем связи</b>	91
§15.1. Основные требования к проектированию	
§15.2. Проектирование многоканальных волоконно-оптических систем связи	93
§15.3. Проектирование многоканальных космических лазерных систем связи	94
<b>Глава 16: Направления развития систем связи</b>	99
§16.1. Применение лазерных систем передачи информации	
§16.2. Перспективы использования лазеров в системах передачи информации	100 101

Редактор Н.С. Покачалова