

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Л.Б. Беграмбеков

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ИОННОМ
И ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Москва 2001

Беграмбеков Л.Б. **Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии.** Учебное пособие. М: МИФИ, 2001. - с.

В учебном пособии описываются условия и излагаются основные закономерности развития наиболее значительных изменений рельефа поверхности твердых тел при ионном и плазменном облучении. Рассмотрены различные виды рельефа, которые формируются при подобном воздействии. Приводятся модели явлений.

При составлении пособия привлечена информация из многих тематических журналов, сборников, обзоров и монографий, которые практически недоступны студентам.

Пособие будет полезно студентам, изучающим физику, технику и технологию термоядерных реакторов, радиационную физику поверхности, методы ионной и плазменной технологии.

© *Московский государственный
инженерно-физический институт
(технический университет), 2001*

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	4
2. Развитие или сглаживание рельефа поверхности за счет неоднородности распыления различных ее участков.....	4
2.1. Развитие рельефа.....	4
2.2. Сглаживание рельефа.....	8
3. Развитие рельефа как следствие радиационно-стимулированных процессов в объеме твердых тел.....	9
3.1. Развитие кристаллических новообразований.....	9
3.2. Рост конических структур.....	13
3.3. Формирование конических структур на сплавах и соединениях.....	17
3.4. Образование поверхностных пор.....	19
Список литературы.....	22

1. Введение

Облучение поверхности твердых тел ионными и плазменными потоками вызывает те или иные изменения рельефа. В зависимости от параметров облучающего потока и условий на поверхности эти изменения проявляются как в развитии, так и в сглаживании рельефа. Модификация поверхности может быть непосредственным результатом ионного или плазменного воздействия, например, результатом неоднородного травления поликристаллической металлической поверхности. В других случаях изменения рельефа оказываются следствием явлений, инициированных в приповерхностных слоях ионным или плазменным воздействием. К таким явлениям относятся ионно-индуцированные напряжения, дислокационная подвижность, рекристаллизация, изменение состава приповерхностных слоев.

В этом разделе описываются условия и закономерности развития наиболее значительных изменений рельефа при ионном и плазменном облучении. Приводятся модели явлений. Вместе с тем, не рассматриваются случаи, когда при облучении поверхности мощными потоками ионов или плазмы, стационарными или импульсными, модификация поверхности происходит как последовательность процессов оплавления и затвердевания поверхностного слоя макроскопической толщины. При таких воздействиях принципиальным обстоятельством для трансформации поверхности является не участие в поверхностных процессах атомных частиц, а воздействие на поверхность интенсивных потоков энергии.

2. Развитие или сглаживание рельефа поверхности за счет неоднородности распыления различных ее участков

2.1. Развитие рельефа

Развитие рельефа за счет разных скоростей эрозии соседних участков поверхности (рельеф травления) реализуется на поверхностях самых различных типов. В случае плазменного облучения, создание рельефа травления на поверхностях металлов и сплавов определяется ионной компонентой. При облучении плазмой неметаллов и неметаллических соединений (диэлектриков и полупроводников) электроны плазмы могут существенно ускорить эрозию поверхности, а в некоторых условиях даже играть основную роль в эрозионном процессе.

Механизмы эрозии оказываются различными в зависимости от природы твердого тела и условий облучения. В случае облучения металлов и сплавов ионами и плазмой

инертных газов при температурах выше температуры отжига элементарных дефектов, созданных облучением, формирование рельефа происходит, в основном, благодаря распылению поверхности за счет кинетической энергии ионов по каскадному механизму. Для большинства металлов эта температура не превышает $T \approx 100^\circ\text{C}$.

При облучении металлов с низким содержанием структурных дефектов (плотность дислокаций $10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-3}$) распыление остается основным рельефообразующим механизмом вплоть до температур $T \approx 0,7T_{\text{пл}}$, где $T_{\text{пл}}$ - температура плавления металла. При высокой концентрации структурных дефектов (плотность дислокаций $10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$) верхняя температурная граница опускается до $T = (0,3 \div 0,4)T_{\text{пл}}$. Эти же температуры оказываются предельными при облучении поверхности металла в присутствии на ней атомов более тугоплавкого металла, а также при облучении сплавов.

В рассматриваемом температурном диапазоне на **однофазных поликристаллических поверхностях** наиболее крупномасштабные элементы рельефа образуются благодаря тому, что различным образом ориентированные поверхностные кристаллиты, области, примыкающие к их границам, участки, содержащие структурные дефекты и т.п. характеризуются различными коэффициентами распыления. Образующийся рельеф состоит из хаотически расположенных *выступов и впадин* различных форм. В некоторых случаях их формы могут согласовываться с кристаллографической ориентацией кристаллитов (*рис. 1*) Глубина рельефа не превосходит средние размеры поверхностных кристаллитов. Время его развития соответствует времени удаления с поверхности слоя в несколько раз большей глубины.

Причиной появления рельефа травления на **многофазных сплавах** кроме рассмотренных выше могут быть также и различия в величинах коэффициентов распыления фаз.

В некоторых условиях на облучаемой поверхности образуется рельеф, элементы которого имеют правильные геометрические формы. Чаще всего это *конические выступы или пирамиды, ямки и углубления правильной геометрической формы, периодические и квазипериодические структуры, состоящие из канавок и гребней*. Причины их появлений самые различные и в ряде случаев выяснены недостаточно.

Конусы и пирамиды появляются на поверхностях в широком диапазоне режимов облучения. Их наблюдали в случаях, когда имеющиеся на поверхности микроскопические частички препятствуют распылению находящихся под ними участков поверхности. Такими частичками могли быть инородные включения или слабо распыляемые преципитаты новых фаз, сформировавшихся в процессе ионной бомбардировки. Конические образования развивались в силу неоднородного распыления участков

поверхности с различной плотностью дислокаций или различно ориентированных зерен кристаллической поверхности. Конические фигуры появлялись также в результате растравливания выступающих участков на облучаемой поверхности, сформированных в результате предварительной ее обработки или при предшествующем ионном воздействии, например, вследствие образования и разрушения *блистеров*. Чаще всего такие конусы имели высоту, не превышающую несколько микрон. При определенных условиях облучения склоны конусов, развивавшихся по указанным выше причинам на монокристаллических поверхностях, приобретали кристаллическую огранку, и конусы развивались дальше в виде пирамид.

Причиной формирования конусов из поверхностных выступов являлась зависимость коэффициента распыления от угла падения. В результате различных скоростей распыления участков выступов, неодинаково ориентированных относительно направления бомбардировки, выступы любой формы постепенно трансформировались в конусы или пирамиды с вершиной, направленной навстречу ионному пучку с углом при вершине $\theta_{\max} = 180^\circ - 2\varphi_{\max}$, где $\varphi_{\max}$ – угол, соответствующий максимальному значению коэффициента распыления $S_{\max} = S(\varphi_{\max})$. Такой угол при вершине вырабатывался у всех выступов и пирамид, образовавшихся в перечисленных случаях, в том числе и у тех, которые образовались в тени трудно распыляемых частиц микроскопических размеров. В последнем случае элементы рельефа с углом при вершине $\theta_{\max}$ появлялись после распыления затеняющих частиц. Скорость распыления конусов с углом $\theta = \theta_{\max}$ больше скорости распыления плоской поверхности, поэтому такие конусы оказываются неустойчивыми и со временем распыляются.

Формирование рельефа на поверхности сплавов при этих температурах сопровождается изменением концентрации поверхностных слоев за счет селективного распыления компонент. При облучении ионами низких и средних энергий эти изменения распространяются на глубину от нескольких атомных слоев до глубины внедрения ионов. Для двухкомпонентного сплава с объемной концентрацией компонент C_{1v} и C_{2v} примерные значения поверхностных концентраций компонент в режиме стационарного распыления, соответственно C_{1s} и C_{2s} могут быть найдены из соотношений:

$$\frac{C_{1s}}{C_{2s}} = \frac{C_{1v}}{C_{2v}} \frac{S_2}{S_1};$$

$$C_{1s} + C_{2s} = 1,$$

где S_1 и S_2 – коэффициенты распыления компонент.

Выше температуры $T \approx 0.7T_{пл}$ активизирующаяся поверхностная диффузия и радиационно-ускоренная сублимация предотвращает появление рельефа распыления на чистых металлах. В этих условиях радиационно-ускоренная сублимация становится причиной появления на поверхности рельефа, состоящего из *углублений в виде опрокинутых конусов и пирамид*, канавок с клинообразным поперечным сечением. Углубления появляются на местах выхода дислокаций, по границам кристаллических зерен и т.п. Их глубина на поверхности меди, облучаемой ионами Hg^+ ($E = 50$ эВ, $j = 3$ $mA \times cm^{-2}$) при температуре $T = 820^\circ C$ достигала $5 \div 7$ μm (рис. 2).

Переход к формированию рельефа преимущественно за счет радиационно-ускоренной сублимации на поверхности металлических образцов с высокой концентрацией структурных дефектов или содержащих на поверхности атомы более тугоплавких металлов, а также на поверхностях металлических сплавов смещался в область более высоких температур вплоть до $T \approx 0.9T_{пл}$. Формирование рельефа в диапазоне температур $(0.3 \div 0.4)T_{пл} < T < 0.9T_{пл}$ определялось активизацией ионно-стимулированных транспортных и рекристаллизационных процессов как на облучаемой поверхности, так и, главным образом, в приповерхностном слое. Формы рельефа, образующегося в этом диапазоне температур, описаны в разделе 3.

В образовании рельефа травления на поверхности *неметаллических веществ* и соединений кроме механизмов каскадного распыления могут принимать участие и другие механизмы эрозии, в частности, механизм ионно стимулированной десорбции (ИСД), активно проявляющийся на диэлектриках с ионной и ковалентной типами связи (SiO_2 , BN, TiO_2), графитах. В случае облучения соединений, имеющих в своем составе атомы газов (гидриды, нитриды, оксиды) происходит, как правило, преимущественное удаление именно таких атомов с поверхности. Поэтому формирование рельефа травления сопряжено с изменением стехиометрического состава и, возможно, химическими и структурными изменениями.

При облучении твердых тел ионами или плазмой активных газов упомянутые выше механизмы формирования рельефа могут протекать одновременно с образованием химических соединений с участием бомбардирующих атомов. Образующиеся соединения могут формировать поверхностные слои. В этом случае развитие рельефа, например за счет каскадного распыления, затормаживается.

Если в процессе облучения образуются газообразные соединения бомбардирующих частиц с атомами мишени, то их удаление с поверхности ускоряет ее эрозию. За счет неравномерности эрозии различных участков размеры элементов рельефа могут достигать десятков микрон. Такая картина наблюдается при облучении ионами водорода, кислорода

или плазмой соответствующего состава поверхности графита, углеграфитовых композитов, а также поверхности соединений на основе углерода.

Как правило, при облучении химически активными ионами или плазмой даже при энергиях бомбардирующих частиц, не превышающих нескольких электронвольт, приповерхностный слой модифицируется на значительную глубину. Поэтому формирование рельефа травления бывает сопряжено с изменениями топографии поверхности, вызванными ионно-стимулированными структурными и химическими превращениями в приповерхностных слоях.

2.2. Сглаживание рельефа

Сглаживание рельефа или предотвращение его развития в процессе ионного или плазменного облучения (*ионная полировка*) наблюдается в тех условиях, когда ускоренное распыление выступающих элементов рельефа и замедление распыления (залечивание) поверхностных впадин не сопровождается неравномерной эрозией участков поверхности с различной структурой, составом, разной кристаллической ориентацией. Кроме того, необходимо, чтобы в приповерхностных слоях не происходило развития тех ионно-стимулированных явлений, которые способны вызвать, в конечном итоге, рост поверхностного рельефа.

Ускоренное растравливание поверхностных выступов реализуется несколькими известными механизмами эрозии. В рамках каскадного механизма распыления при нормальном облучении однородной по составу и структуре поверхности устойчивой формой рельефа является ровная поверхность. Выступы и впадины нивелируются в процессе распыления. Ускоренное распыление поверхностных выступов реализуется также в режимах “химического” распыления ионами низких энергий ($E \leq 100$ эВ) и ионно-стимулированной десорбции.

Приведенные выше условия соблюдались при нормальном облучении поверхности аморфных твердых тел ионами инертных газов. Так, полировка поверхности плавленного кварца (аморфная структура) наблюдалась при его распылении ионами Ar^+ ($E = 7 \div 10$ кэВ, $j \leq 1.5$ мА×см⁻²).

Сглаживание поверхностного рельефа поликристаллических металлических поверхностей обеспечивается при бомбардировке ионами с энергиями, меньшими порога распыления. Эффект полировки отмечался, в частности при бомбардировке поверхности меди по нормали ионами Ar^+ ($E = 10$ эВ, $j \approx 0.1$ мА×см⁻²). Эффект достигался за счет того, что при столь низких энергиях ионов преимущественно распылялись имеющие меньшие

энергии связи с поверхностью атомы с выступов, а возмущающее воздействие ионов на приповерхностный слой отсутствовало. В области надпороговых энергий “полировка” поверхности металлов реализовалось в случае наклонного облучения и при температурах ниже температур перестройки и отжига дислокационной структуры и рекристаллизации ($T < (0.3 \div 0.4)T_{пл}$). Угол падения ионов выбирали таким, чтобы коэффициент распыления плоских участков был как можно более низким и меньшим, чем при нормальном падении ($S(\varphi) < S(0)$). В этом случае поверхностные выступы, облучаемые под углами, близкими к нормальному, эффективно распылялись, а углубления сглаживались за счет поверхностной диффузии. При этом глубина внедрения ионов и плотность энергии, передаваемой ими поверхности, уменьшается, и процессы в приповерхностном слое, способные вызвать рост рельефа все еще остаются “замороженными”. Например, для ионной “полировки” медных и никелевых сплавов использовались ионы He^+ ($E = 10 \div 20$ кэВ, $\varphi = 75 \div 88^\circ$). Плотность тока ионов в поперечном сечении пучка составляла $j \approx 1 \text{ мА} \times \text{см}^{-2}$. Эффект полировки возрастал при увеличении угла падения до 88° и уменьшении температуры поверхности до 300 К и ниже.

3. Развитие рельефа как следствие радиационно-стимулированных процессов в объеме твердого тела

Ионные и плазменные потоки способны инициировать ряд процессов в приповерхностных слоях твердого тела. В этой связи можно назвать появления поверхностных напряжений, активизацию диффузии, развитие и (или) отжиг дислокационной структуры, изменение структуры, фазового и компонентного состава. Развитие этих процессов само по себе приводит, как правило, к модификациям рельефа. В ряде случаев рельеф формируется как результат взаимодействия перечисленных выше процессов в приповерхностных слоях с процессами, инициированными ионной бомбардировкой непосредственно на поверхности: распылением, ионно-стимулированной десорбцией и т.п. В этом разделе рассматриваются случаи наиболее значительных модификаций рельефа под действием ионно-стимулированных процессов в приповерхностных слоях твердого тела.

3.1. Развитие кристаллических новообразований

Рост кристаллов при ионной бомбардировке наблюдался на поверхности массивных металлических, диэлектрических и полупроводниковых образцов, а также, на напыленных металлических пленках. Кристаллы росли в тех случаях, когда распыление поверхности

бомбардирующими ионами было незначительным в виду их низкой энергии или слабой интенсивности ионного потока. На поверхности появлялись кристаллы в виде многогранников различных конфигураций, не имеющих сильно выраженных неоднородностей развития граней, а также в форме *вискер*ов – монокристаллов с резко неоднородным развитием граней, развивающихся как цилиндры, пластины, параллелепипеды и т.п.

На **металлах** кристаллы росли при температурах $T \geq (0.3 \div 0.4)T_{пл.}$. Необходимым условием их появления была высокая дефектность кристаллической структуры поверхности. Они, например, росли с высокой плотностью на поверхности неотожженной проволоки, полученной методом волочения, на поверхностях, подвергавшихся наклепу и т.п. (*рис. 3*) Образование кристаллов стимулировалось присутствием на облучаемой поверхности примеси более тугоплавкого металла, способствующей генерации и поддержанию в процессе облучения высокой концентрации структурных дефектов в приповерхностном слое. Присутствие атомов тугоплавких металлов способствовало также появлению вискер*ов* на диэлектриках (*рис. 4*).

Наблюдения за развитием кристаллов **на поверхности меди** с высоким уровнем структурных дефектов, но в отсутствии тугоплавкой примеси, показали, что вискеры и пологие выступы, развивающиеся впоследствии в многогранники, появлялись при бомбардировке ионами ртути уже при энергиях составляющих примерно 10 эВ. В диапазоне 40÷60 эВ (400÷500°С) наблюдалась наиболее полная картина вискeroобразования. После первых 15 минут облучения ионами Hg^+ ($E = 50$ эВ, $j = 7 \text{ мА} \times \text{см}^{-2}$) на поверхности появлялись редкие цилиндрические вискеры до 6÷8 мкм в длину и диаметром до 0.5 мкм, а также многочисленные выступы. Во второй период (примерно 0.5÷1 ч) вискеры увеличивались до 20÷30 мкм и 1÷1.5 мкм в диаметре, их плотность достигала $5 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$, средняя за период скорость роста в осевом направлении составляла 0.01 мкм/с. Выступы превращались в многогранники, число которых доходило до 10^7 см^{-2} . Их формы и ориентации были самыми разнообразными и не зависели от ориентации поверхностных кристаллов. В третий период (1.5÷3 ч) вискеры достигали максимальных размеров 30÷40 мкм и превращались в четырех- и шестигранные призмы и прямоугольные пластины (*рис. 5*). Появлялись кристаллы, состоящие из нескольких перечисленных выше фигур (*рис. 6*). Зарождение новых вискер*ов* на поверхности постепенно прекращалось, но увеличивалось число «вторичных» вискер*ов*, развивающихся на элементах рельефа, возникших уже в процессе ионной бомбардировки (*рис. 7*). Размеры выросших многогранников зачастую достигали 1 мкм. Выступы и

немногочисленные вис커ры появлялись также на участках поверхности, примыкающих к облучаемой области, но непосредственно не подвергающихся облучению.

В процессе ионного облучения кристаллы предотвращали распыление расположенных под ними участков поверхности и к окончанию периода оказывались расположенными на вершинах небольших конусов. В последующем поверхностную картину, в основном, составляли композиции из конусов и кристаллов самых различных форм и сочетаний. Поверхностная диффузия и перенапыление препятствовали их быстрому распылению. В результате через 47 часов непрерывного облучения (доза 7×10^{21} ион $\times$ см $^{-2}$) средние размеры и плотность характерных элементов рельефа уменьшались не более чем на порядок величины относительно максимальных значений.

Если во время ионной бомбардировки на поверхность меди направлялись атомы более тугоплавкого металла (Fe, Ni, Mo, W и т.п.) появление новых вискероидов не прекращалось даже через несколько часов облучения. Плотность вискероидов на поверхности и их максимальная высота были в 1.5÷2 раза выше, чем без дополнительного потока атомов Fe, Ni и т.д.

При увеличении энергии бомбардирующих ионов выше, примерно, 100эВ плотность и размеры кристаллических образований уменьшались, ускорялось и видоизменялось их развитие. Уже в случае ионов с энергией 300 эВ интенсивный рост вискероидов продолжался не более 2÷2.5 мин., и они дорастали по высоте лишь до 3÷5 мкм. Многогранники за это же время не достигали размеров более 0.3÷0.4 мкм. Вискероиды сложных форм практически не появлялись, и уже через 5 мин облучения на поверхности видны были только конусы, образовавшиеся в тени вискероидов (*рис. 8*). При энергии выше 500÷600 эВ распыление становилось подавляющим, и монокристаллы и конусы вообще не образовывались.

Повышение температуры облучения вплоть до 700°C разнообразило и ускоряло развитие поверхностной картины. Вискероиды достигали больших размеров (до 40÷60 мкм), возрастали поперечные размеры многогранников, больше становилось вискероидов сложных форм и сочленений монокристаллов. Вместе с тем, при температурах выше 500°C формирующиеся под вискерами конусы разрастались и наплывали на кристаллы, частично поглощая их (*рис. 9*). Начиная с 800°C, действие сил поверхностного натяжения и активизирующееся испарение приводило к уменьшению средних размеров элементов рельефа до 6-8мкм. Наконец, выше 900°C формирование кристаллов прекращалось.

В развитии **вискероидов на вольфраме**, наблюдавшихся при облучении поверхности ионами Ag^+ ($E_i = 500 \div 2000$ эВ, $T \approx 1000^\circ C$), также можно было выделить периоды интенсивного роста в длину, трансформации формы и затем превращение в конусы

(рис. 10, 11). За период роста (15÷30 мин) вис커ры зачастую достигали 150÷200 мкм в высоту и 10÷20 мкм в диаметре. Появлялись вис커ры, не имеющие определенных геометрических форм (рис. 11). Вокруг наиболее крупных из них заметны были кольцевые углубления, сформировавшиеся в процессе роста в результате диффузионного оттока материала от окружающих участков к основанию растущего вискера (рис. 12).

Основные закономерности появления и развития кристаллов к настоящему времени выявлены и объяснены. Показано, что появление кристаллических новообразований в процессе ионной бомбардировки происходит в период отжига поверхности с высоким содержанием структурных дефектов и является одним из элементов процесса отжига приповерхностных слоев. Принятый механизм роста кристаллов базируется на том, что, как было доказано теоретически и экспериментально, при высокой концентрации структурных дефектов ионно-стимулированные напряжения в приповерхностных слоях достигают величин, превышающих предел текучести. При бомбардировке поверхности ионами средних и больших масс (Ar^+ , Kr^+ , Hg^+) с энергиями в диапазоне от нескольких десятков до нескольких тысяч электронвольт причиной возникновения напряжений можно считать междоузельные атомы. Они появляются в приповерхностных слоях твердого тела по механизму замещающих столкновений в результате взаимодействия налетающих ионов с атомами поверхности. Сток таких атомов на структурные дефекты и генерация новых способствует росту и поддержанию высокого уровня напряжений в процессе ионной бомбардировки. Напряжения вызывают интенсивные транспортные и рекристаллизационные процессы, обеспечивающие потоки материала к центрам зарождения и затем рост кристаллов. Рост вискероидов объясняется массопереносом через поверхность за счет скольжения в поле напряжений дислокационных петель, формирующихся приповерхностным дислокационным источником.

Существующие представления позволяют объяснить основные закономерности развития кристаллов. В частности, качественно объяснены наблюдающиеся скорости роста выступов и вискероидов. Выяснено, что причиной образования кольцевых углублений вокруг вискероидов является выходящий на поверхность интенсивный поток вакансий, генерируемых дислокационным источником. Показано, что прекращение зарождения новых вискероидов и выступов через некоторое время после начала облучения связано с отжигом поверхности и соответствующим уменьшением уровня приповерхностных напряжений. Причиной прекращения линейного роста до завершения отжига оказывается распыление мишени на глубину дислокационного источника или развитие на эту же

глубину кольцевых углублений. В обоих случаях в районе дислокационного источника уменьшаются напряжения, необходимые для его работы.

Присутствие атомов более тугоплавкого металла затрудняет отжиг дислокаций. Концентрация дислокаций в приповерхностных слоях и, как следствие, уровень ионно-стимулированных напряжений остается достаточно высоким в течение всего периода облучения независимо от характера предварительной обработки. В результате, постоянно поддерживаются условия для образования и роста вискеро́в. Трансформация формы и размеров вискеро́в после прекращения их роста в высоту, в частности, развитие вискеро́в правильных геометрических форм, сращивание вискеро́в объясняется осаждением на вискер атомов, распыленных с окружающих участков поверхности и вторичной кристаллизацией с участием сил поверхностного натяжения. Появление вискеро́в и монокристаллов на поверхностях, примыкающих к облучаемым участкам, рассматривается как следствие распространения ионно-индуцированных напряжений за пределы зоны облучения.

3.2. Рост конических структур

Конические структуры являются формой развития рельефа в тех условиях, когда такое развитие происходит в результате совместного действия распыления и ионно-индуцированных процессов в приповерхностных слоях твердого тела. Конусы появлялись на поверхности металлов и полупроводников в диапазоне энергий ионов от нескольких сотен электрон вольт до десятков килоэлектронвольт. Конусы развивались как под ионными пучками, так и при облучении непосредственно в плазме. На металлах они образовывались в температурном диапазоне $(0.3 \div 0.4)T_{пл} \leq T \leq (0.7 \div 0.8)T_{пл}$. Их высота над облучаемой поверхностью достигала десятков микрометров, но они всегда оставались ниже уровня первоначальной поверхности (*рис. 13*).

На поверхностях чистых металлов конусы росли на участках с высоким уровнем структурных дефектов. Рост конусов стимулировался, и они появлялись также и на участках с совершенной структурой, если на поверхность в процессе облучения направлялся поток атомов более тугоплавких металлов. Поток атомов примеси, стимулирующий появление конусов, мог быть весьма мал – всего 0.2% от потока распыления (в случае осаждения атомов молибдена на поверхность меди, бомбардируемую ионами ртути с $E = 500$ эВ, $j = 1 \text{ мА} \times \text{см}^{-2}$).

Рост конусов начинался с образования цилиндрических выступов, диаметр которых иногда не превышал 0.01 мкм, а высота – 0.1÷1.0 мкм. Они не превышали толщину

распыленного слоя и всегда были направлены навстречу облучающему пучку. Этим они отличались от вискерров, однако, так же как вискеры, являлись продуктом кристаллического роста, обеспеченного поверхностной диффузией. Под действием сил поверхностного натяжения выступы со временем превращались в фигуры, напоминающие «грибы» или «шарик на ножке» (рис. 14). Отмечались выступы, имеющие несколько «шариков». В процессе длительного облучения ножки приобретали конические формы, и по мере распыления шарика в вершинах завершалось формирование конуса. Причиной этого была совокупность нескольких явлений, среди которых: уменьшение со временем по мере распыления шарика в вершине выступа области экранировки; понижение в процессе расширения уровня исходной поверхности; накопление диффундирующего вещества на боковых сторонах выступов.

Угол при вершине θ_t независимо от первоначальной формы «экранирующего» элемента стремится к значению $\theta_{\max} = \pi - 2\varphi_{\max}$. Если, благодаря наличию атомов тугоплавкой примеси, средний уровень напряжений на облучаемой поверхности поддерживался постоянным, формы конусов и скорости их роста оставались стабильными в течение длительного времени. При облучении меди потоками атомов вольфрама (затравка) и ионов аргона ($j_W = 1.5 \cdot 10^{14} \text{ ат} \times \text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$; $j_{\text{Ar}} = 3 \times 10^{16} \text{ ион} \times \text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, $E = 600 \text{ эВ}$ соответственно) период стабилизации продолжался 2÷2.5 ч. За это время с поверхности было распылено 80÷90 мкм, а средняя высота конусов увеличивалась с 17 до 40 мкм, т.е. составляющий конусы материал сменился несколько раз. Скорость роста конусов над распыляемой поверхностью варьировалась в пределах $(25 \pm 5) \times 10^{-8} \text{ см} \times \text{с}^{-1}$ (рис. 15).

Модель, объясняющая существование периода стабильной формы и других закономерностей развития конусов, основывается на представлении о том, что ионная бомбардировка не только создает, благодаря распылению, конические формы, но и способствует развитию на их поверхностях при определенных углах наклона (θ_s) склонов конусов сжимающих напряжений. Вершина конуса размером $R \approx L$, где L – глубина напряженной приповерхностной зоны, остается свободной от напряжений. Поэтому по склонам конуса в вершину устанавливается диффузионный поток, компенсирующий ее распыление. Таким образом, развитие конуса есть результат того, что, благодаря ионно-стимулированным процессам на поверхности и в приповерхностных слоях его распыление происходит медленнее, чем распыление окружающей плоской поверхности. В результате, высота конуса увеличивается в процессе развития, хотя его вершина всегда ниже уровня первоначальной поверхности.

Напряжения по склонам конусов возникают при выполнении условия $\theta_s > \pi - 2\varphi_{кр}$. За величину $\varphi_{кр}$ принимается угол падения ионов, при котором атомы поверхности склона при столкновении с налетающим ионом получают энергию E_m , достаточную для образования междоузельного атома в глубине мишени по механизму замещающих столкновений:

$$E_m = E_i \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cos^2 \varphi_{кр}, \quad (1)$$

где M_1 и M_2 – массы иона и атома поверхности соответственно. В большинстве случаев вместо E_m можно использовать энергию смещения E_d . Оценка представляется оправданной для ионов средних и тяжелых масс с энергиями $E_i \leq 1$ кэВ, когда можно пренебречь их внедрением в поверхность при наклонном падении.

Если $\varphi_{кр} < \varphi_{мах}$, то диффузионный поток заостряет вершину, но не приводит к изменению угла между склонами и скорости распыления конуса в целом. Если же $\varphi_{кр} > \varphi_{мах}$, то в этом случае диффузионный поток в вершину в совокупности с распылением приводит к установлению такого угла θ_s между склонами, что скорости разрушения склонов и вершины сравниваются ($\dot{h}_s = \dot{h}_t$). В предположении конической формы вершины конуса условие равновесия

$$\frac{\overline{D_s} \sigma \cos \varphi_t}{kTL \sin \varphi_s} = j_i [S(\theta_t) - S(\theta_s)] \quad (2)$$

Эта конфигурация оказывается относительно стабильной. При увеличении по какой-либо причине скорости разрушения вершины (увеличение коэффициента распыления, уменьшение диффузионного потока), уменьшается наклон склонов конуса в верхней его части, и, в результате, усиливается диффузионный поток в вершину. Процесс развивается до тех пор, пока скорость разрушения склонов и вершины вновь не сравниваются уже при несколько большем значении угла θ_s . При замедлении разрушения вершины картина будет обратной. Если условие (2) выполняется при углах $\varphi_s > \varphi_{мах}$, таких, что $S(\varphi) < S(0)$, то высота конуса будет увеличиваться со скоростью:

$$\dot{h} = j_i a^3 [S(0) - S(\varphi_s)] \quad (3)$$

Подобным же образом напряжения на облучаемых склонах влияют на развитие кольцевой канавки конического сечения вокруг конуса. Под их влиянием формируется поток вакансий в область дна углубления, где уровень напряжений оказывается повышенным. В результате предотвращается образование плоского дна, стабилизируется

его форма и скорость роста глубины. Часть материала из углубления благодаря диффузии поступает на склоны конуса. Материал поступает на склоны конуса также благодаря перенапылению со склонов канавки и с окружающих его участков плоской поверхности.

Используя формулу (3) и зависимость $S(\varphi)$, можно оценить возможность роста конусов при данных энергии и типе ионов, виде мишени. При $E \leq 1$ кэВ величина $[S(0)-S(\varphi_{кр})] > 0$ для пар $Ne^+ \rightarrow Cu$, $Ar^+ \rightarrow Cu$, $Ar^+ \rightarrow Au$, $Hg^+ \rightarrow Ta$. Это условие не выполняется, т.е. конусы не будут расти в случае $Ne^+ \rightarrow Mo$, $Ar^+ \rightarrow Ta$, $Ar^+ \rightarrow W$. Конусы могут образовываться в тени затеняющего элемента, например вискера (рис. 11), но не будут расти после его распыления.

Последовательный учет роли напряжений и формируемых ими диффузионных потоков по склонам конусов позволяет объяснить не только причины роста конусов, но и специфические особенности конусообразования, отмечаемые в различных экспериментальных условиях.

Изменение формы вершины конусов – округление, заострение, образование наплывов, иногда напоминавших своеобразные покрытия, образование «шариков», смещение вершины, появление нескольких микровершин – определялось колебаниями скорости распыления, величины диффузионного потока по склонам или нарушением его симметрии. В результате действия механизма стабилизации эти изменения формы вершины не оказывали влияния на рост и форму конусов в целом.

Если в результате флуктуации перечисленных выше параметров или, благодаря внешнему воздействию, вершина «затуплялась» таким образом, что ее диаметр существенно превышал толщину напряженного слоя, то диффузионный поток по склонам уже не мог восстанавливать вершину. В результате формировался своеобразный кольцевой гребень по периферии вершинной области или вырастала новая вершина вдоль одного из склонов, если ионная бомбардировка происходила не по нормали к плоской поверхности.

Появление изогнутых конусов объясняется тем, что при развитии конусов у поверхностных ступенек, на краю образцов или при близком расположении конусов потоки перенапыляющихся атомов и отраженных ионов на стороны конусов оказывались несимметричными. Это вызывало асимметрию напряжений и диффузии на сторонах конусов и их изгиб. Возрастающая плотность ионного облучения изогнутой части конуса интенсифицировала диффузионные потоки, и, в результате, она удлинялась и утончалась.

При отсутствии тугоплавкой примеси из-за идущего под облучением отжига материала, уровень напряжений на склонах и, соответственно, диффузионный поток в вершину со временем уменьшались. При этом равновесный угол θ_s увеличивался, начиная

с вершинной области, и постепенно распространялся на весь конус. Рост конуса замедлялся, а затем после достижения условия $S(\varphi_s) > S(0)$ начиналось его распыление. Глубина окружающего конус углубления также переставала увеличиваться, у него появлялось и росло плоское дно между отступающими во время распыления склонами (рис. 16).

При тесном расположении конусов их развитие определяется некоторыми дополнительными аспектами. В частности, значительная часть атомов, распыленных со склонов, осаждается на соседние конусы, способствуя замедлению распыления всей структуры. Кроме того, при интенсивном перенапылении увеличиваются напряжения на склонах конусов и, соответственно, интенсифицируются процессы роста. В результате, при тесном расположении равновесный угол при вершине оказывается меньшим, чем у одиночных конусов. Следует также отметить, что бомбардировка распыленными со склонов атомами соседних участков поверхности способствует росту напряжений и появлению там новых конусов. Это, предположительно, является одной из причин самовосстановления структуры тесно расположенных конусов.

На определенных кристаллических гранях и при не слишком высоких температурах и потоках облучения конусы приобретали пирамидальную огранку. Условия такого развития выявлены недостаточно.

Процессы, связанные с ионно-стимулированными напряжениями, и перенапыление играли основную роль в образовании конусов и пирамид на выступах и гребнях или в углублениях, ямках травления и т.п. В первом случае выпуклая форма рельефа способствовала формированию диффузионных потоков в их вершины, во втором – бомбардировка дна углублений атомными частицами, рассеянными и распыленными с их склонов, инициировала рост напряжений и формирование первоначальных выступов.

3.3. Формирование конических структур на сплавах и соединениях

Рассмотренные выше механизмы приводили к развитию рельефа, состоящего из конических выступов, при облучении сплавов и соединений. При определенных концентрациях более тугоплавкая из компонент **двухфазных сплавов и соединений** играла роль затравки, стимулирующей появление в приповерхностных слоях под действием облучения сжимающих напряжений, достаточно больших для стимуляции процессов роста на облучаемой поверхности (например, на поверхности однофазных сплавов Cu-Ni и двухфазных Cu-Fe конический рельеф интенсивно развивался в диапазоне концентраций тугоплавких компонент от 5 до 50%). Также как на монокристаллической поверхности, конусы росли в области температур

$(0.3 \div 0.4)T_{пл.} < T < (0.7 \div 0.8)T_{пл.}$. На поверхности **сплава Cu-Ni 20 ат%**, облучаемой ионами аргона ($E = 600$ эВ) при дозе облучения 10^{20} ион $\times$ см $^{-2}$ образовывалась структура из конусов, собранных в отдельные группы. Размеры конусов составляли $1 \div 3$ мкм (*рис. 17а*). Рельеф стабилизировался при увеличении дозы облучения до 6×10^{20} ион $\times$ см $^{-2}$. Конусы, тесно расположенные на поверхности, достигали $10 \div 20$ мкм (*рис. 17б*). Конусы, их скопления, гребни имели сглаженные вершины и очень малые величины углов наклона склонов, что является результатом интенсивного перенапыления с соседних конусов. В дальнейшем рельеф не менялся при практически десятикратном увеличении дозы облучения, несмотря на то, что за это время из-за распыления неоднократно менялся материал, составляющий элементы рельефа.

Аналогия с процессами роста на моноэлементной металлической поверхности прослеживалась и при облучении потоками ионов Ar^+ низкой интенсивности ($E = 600$ эВ, $j = 0.08$ мА). Распыляющее воздействие ионов было теперь незначительным и на поверхности росли кристаллы. Поверхностные выступы состояли из большого числа по-разному ориентированных микрокристаллов с характерными размерами не превышающими $1 \div 2$ мкм.

В процессе развития конического рельефа менялось распределение компонент в приповерхностном слое. Стимулированные ионной бомбардировкой диффузионные потоки по склонам «выносят» в вершины конусов более легко диффундирующую легкоплавкую компоненту. Поэтому ею обогащаются вершинные области, дающие наибольший вклад в распыление, и вместе с тем, в углубленных участках, распыление которых затруднено, повышается концентрация второй, более тугоплавкой компоненты. В результате, в распыленном потоке повышается концентрация легкоплавкой компоненты, а поверхность в целом обогащается тугоплавкой компонентой. Это, в свою очередь, стимулирует диффузию к поверхности легкоплавкой составляющей и обеднение ею приповерхностного слоя.

При распылении ионами Ar^+ **сплава Cu-Ni 52 ат%** при температуре 300°C концентрация меди в потоке распыления достигала 64%, в то время как на распыляемой поверхности упала до 25%. Обедненный медью приповерхностный слой составлял несколько сот ангстрем при 200°C , тысячи ангстрем при 300°C и возрастал до нескольких микрон при 400°C . При облучении в этом же температурном интервале двухфазных сплавов Cu-Fe картина оказывалась более сложной. При концентрации Fe равной 20 ат% конусы росли на поверхности меди, и в этом случае перенапыляемые на ее поверхность атомы Fe играли роль тугоплавкой затравки. При 5 ат% Fe происходила интенсивная

диффузия меди на поверхность зерен железа. Теперь уже конусы, состоящие также из меди, появлялись на поверхности зерен железа.

Закономерности, проявляющиеся при облучении двухфазных металлических сплавов, были во многом характерны для **графитов модифицированных карбидами**. При облучении рекристаллизованного графита РГ-Т (С + 3÷4 ат% TiC) ионами He^+ ($E = 800$ эВ, $j \approx 1\div 2$ $\text{мА}\times\text{см}^{-2}$) при температуре $T = 500^\circ\text{C}$ на облучаемой поверхности появлялась структура тесно расположенных конусов (*рис. 18*). Атомы титана, распыленные с поверхности преципитатов карбида титана, имеющих средние размеры 1 мкм, попадали на поверхность графитовой матрицы. Там они образовывали молекулы TiC, выполняющие роль тугоплавкой затравки, стимулирующей рост конусов. При повышении температуры до 1300°C рост конусов уже не наблюдался, поскольку при таких температурах атомы титана, достигшие поверхность графита, испарялись и связи Ti–C не образовывались.

3.4. Образование поверхностных пор

В этом разделе рассматриваются условия появления и закономерности развития открытых поверхностных пор (углублений), которые образуются на облучаемой поверхности твердого тела как специфические, самостоятельные формирования. Такие поры появлялись на поверхности твердых тел при их бомбардировке ионами легких газов в условиях высоких температур. Отмечалось, что поры уже в первый момент их регистрации после начала облучения имели значительные размеры (*рис. 22*).

На поверхности плотного мелкозернистого **графита МГТ-8** при облучении ионами гелия He^+ ($E = 800$ эВ, $j = 1.2$ $\text{мА}\times\text{см}^{-2}$) поверхностные поры наблюдались в диапазоне температур $500\div 1300^\circ\text{C}$. Они появлялись при дозах примерно 0.4×10^{20} $\text{ион}\times\text{см}^{-2}$. Средние размеры пор составляли около 5 мкм и были сравнимы с толщиной распыленного слоя. В диапазоне доз $(0.4\div 2.2)\times 10^{20}$ $\text{ион}\times\text{см}^{-2}$ концентрация пор увеличивалась в 5÷7 раз и достигала величины 3×10^6 см^{-2} (*рис. 19*). Количество пор росло экспоненциально с дозой облучения (*рис. 20*).

При облучении медно-никелевого сплава **Cu-Ni 50 ат%** ионами гелия He^+ ($E = 600$ эВ, $j = 1$ $\text{мА}\times\text{см}^{-2}$) при температуре 550°C появление пор было зарегистрировано при дозах облучения $(5\div 10)\times 10^{19}$ $\text{ион}\times\text{см}^{-2}$ (*рис. 21*). Поры имели примерно одинаковые

размеры и концентрацию, как в облучаемой зоне, так и на прилегающих необлученных участках поверхности¹.

Предполагается, что газ, внедряемый в твердое тело, заполняет микроскопические полости, имеющиеся или формирующиеся в процессе ионно стимулированных диффузионных и рекомбинационных процессов в приповерхностных слоях. Диффузионная трансформация таких газонаполненных полостей и их выход на поверхность в поле ионно-индуцированных напряжений приводит к появлению открытых пор.²

В первый период после появления поры имели форму, близкую к цилиндрической, и были окружены кольцевым выступом, значительно выступавшим над поверхностью. В дальнейшем их размеры увеличивались и достигали $7\div 8$ мкм (*рис. 22*). При этом их форма почти не менялась (*рис. 23*), однако постепенно увеличивался наклон боковых стенок. На определенном этапе развития на дне пор начинали расти конические выступы. По-видимому, в это же время прекращался рост общих размеров пор, разрушался окружающий их выступ и, в целом, происходило их разрушение.

Закономерности изменений размеров и форм пор, появление кольцевого выступа вокруг них показывают, что процессы, определяющие их развитие, во многом схожи с процессами, ответственными за рост конических выступов на облучаемой ионами поверхности. На этом основании в качестве основной причины развития пор, так же как и конусов рассматриваются процессы, порожденные ионно индуцированными напряжениями и связанные с перемещением материала в поверхностном слое. Такими процессами могут быть ионно-ускоренная диффузия, перемещение дислокаций, рекристаллизация.

¹ Появление газовых полостей и затем развитие поверхностных пор следует отличать от образования блистеров, которое происходило непосредственно в зоне внедрения ионов или на ее внутренней границе, при более низких дозах и не проходили стадию развития после своего появления.

² Следует отметить, что по схожим причинам открытая пористость может появиться на поверхности металла при его отжиге и без ионной бомбардировки. Предпосылками их появления является определенная дефектность структуры и присутствие в металле после технологической обработки значительных количеств растворенных газов. Пores в этих случаях появляются, как правило, на границах зерен и дефектах структуры. Их размеры и количество существенно меньше, чем в случае ионной бомбардировки, и они не развиваются после своего появления.

Развитие образовавшейся поры представляется следующим образом. В процессе распыления наклон боковых стенок поры увеличивается, и она приобретает форму усеченного конуса. Этому же способствует осаждение на боковых стенках части материала, распыленного со дна конуса. Внедренные ионы гелия и вбиваемые ими в материал поверхностные атомы создают напряжения как на дне, так и на склонах пор. Поскольку в районе дна формируется область с концентрацией напряжения, создаются условия для диффузии материала со дна поры по ее склонам к основанию. Кольцевая область у основания поры является областью пониженных напряжений, поэтому в эту область устремляется диффузионный поток, как по склонам пор, так и по плоской поверхности. Эти потоки формируют кольцевой выступ и обеспечивают его стабильность, компенсируя распыление. В то же время отток материала из глубины поры способствует ее углублению и сохранению ее формы.

В процессе ионной бомбардировки перенапыление материала со склонов поры на ее дно и другие случайные причины способствуют появлению неоднородностей рельефа на дне поры и, соответственно, появлению локальных участков с пониженным уровнем напряжений. Это приводит к появлению в области дна поры локальных диффузионных стоков и, таким образом, к развитию конусов. После появления в поре конусов уровень напряжений на дне в целом понижается и, соответственно, поток материала из поры на поверхность замедляется. Пора начинает уменьшаться и постепенно распыляется.



Рис. 1 Рельеф поверхности, полученный в результате облучения сплава ЭП-125 ионами дейтерия с энергией 3 кэВ. Доза облучения 10^{20} см^{-2} .

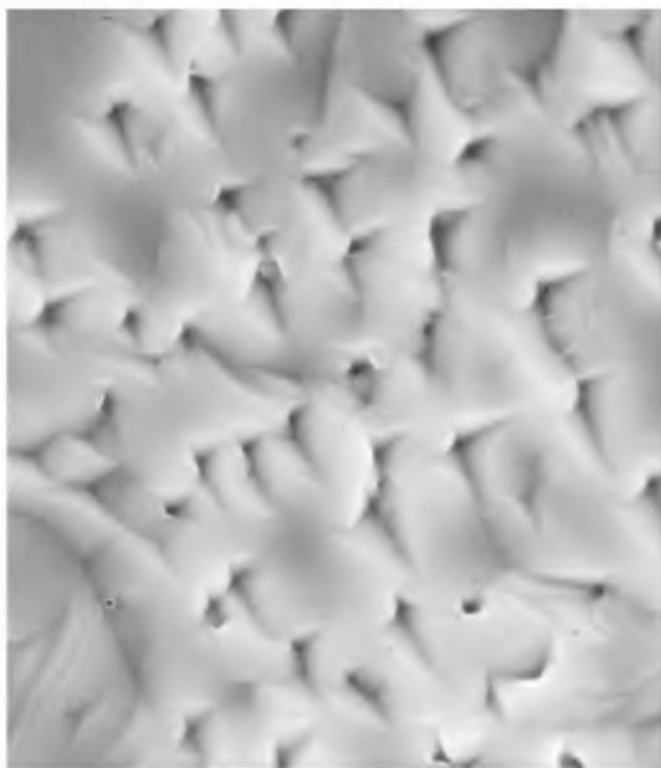


Рис. 2 Рельеф «испарения». Медь, Hg^+ , 50 эВ, $T = 820^\circ\text{C}$. Увеличение –1500

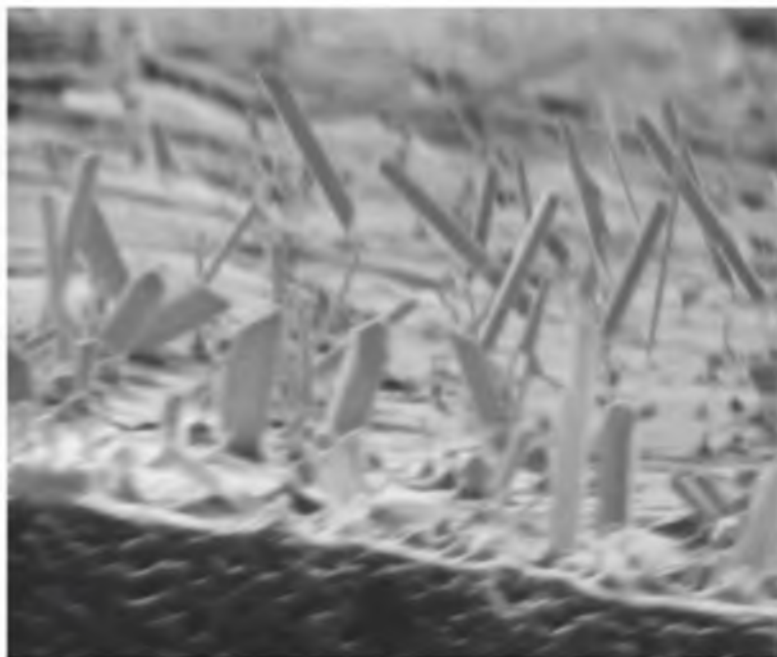


Рис. 3 Панорама покрытой вискерами поверхности медного образца после облучения в течение 1,5 часов ионами Hg^+ с энергией 50 эВ. Увеличение –1500.

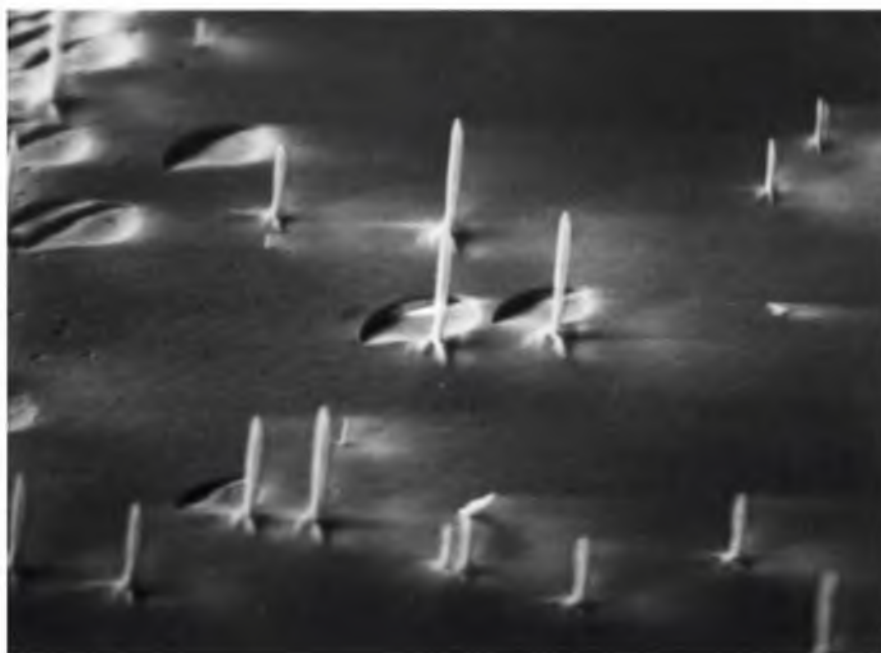


Рис. 4 Рост вискеро́в на поверхности плавленого кварца в присутствии на поверхности атомов тантала. Ионы He^+ , 1000 эВ. Увеличение –1000.



Рис. 5 Вискеры правильных геометрических форм (призмы, пластины). Медь, ионы Hg^+ , 50 эВ. Увеличение –3000.

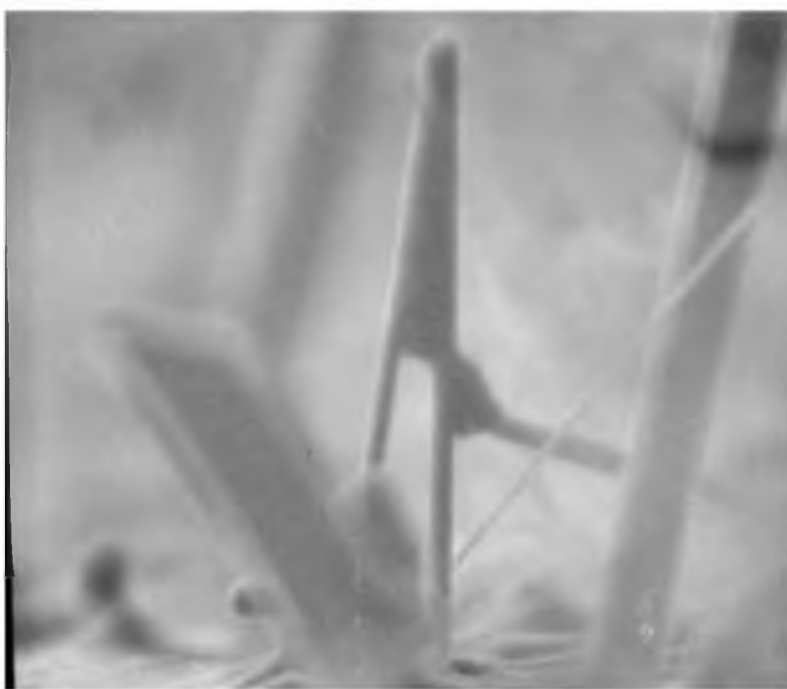


Рис. 6 Вискеры сложных форм. Медь, ионы Hg^+ , 50 эВ. Увеличение –4000.

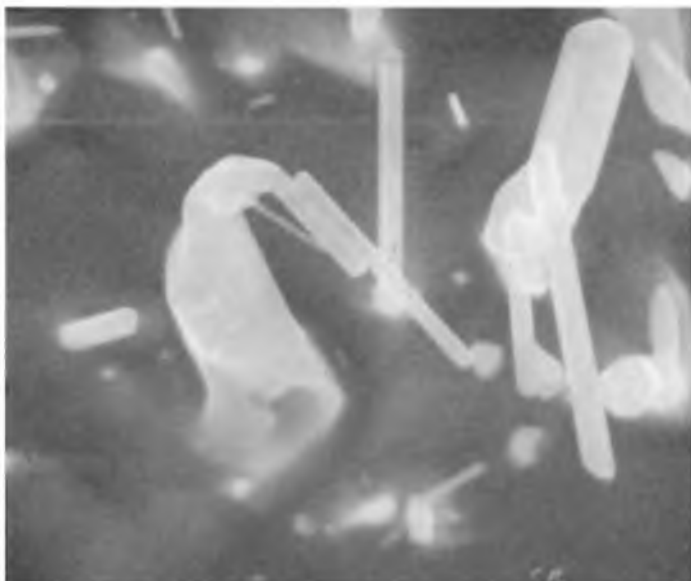


Рис. 7 Сросшиеся вис커ры. Медь, ионы Hg^+ , 50 эВ.
Увеличение –6000

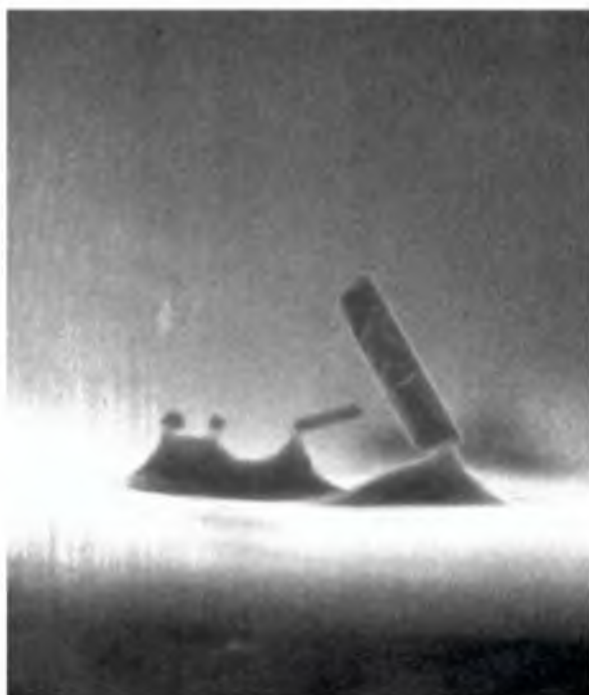


Рис. 8 Формирование конусов в «тени» вискеро́в и выступов. Медь, Hg^+ , 200 эВ. Увеличение –6000.

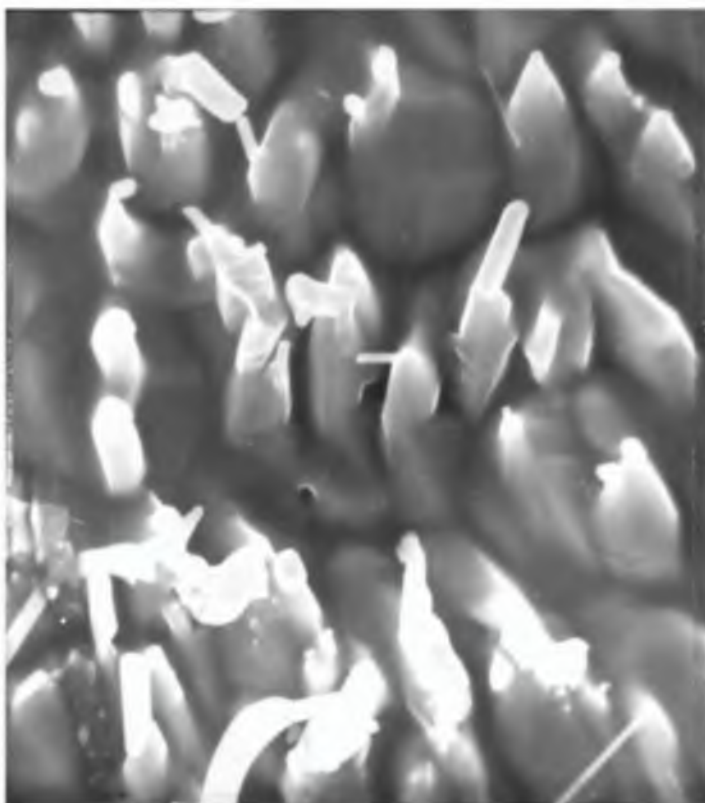


Рис 9. Конусы, наплывающие на кристаллы. Медь, Hg^+ , 50 эВ. Увеличение –1500.

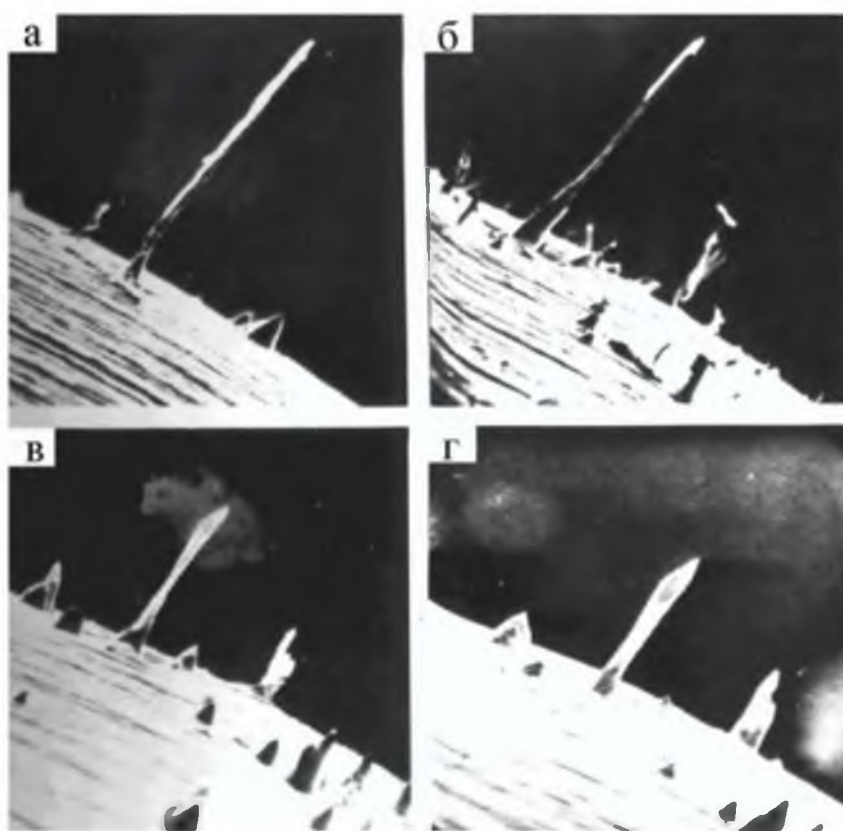


Рис. 10 Динамика развития вискера на поверхности вольфрама. Ионы Ar^+ , 1000 эВ. Увеличение –270. Доза облучения: а- $3,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$; б- $4,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$; в- $5,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$; г- $6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$.

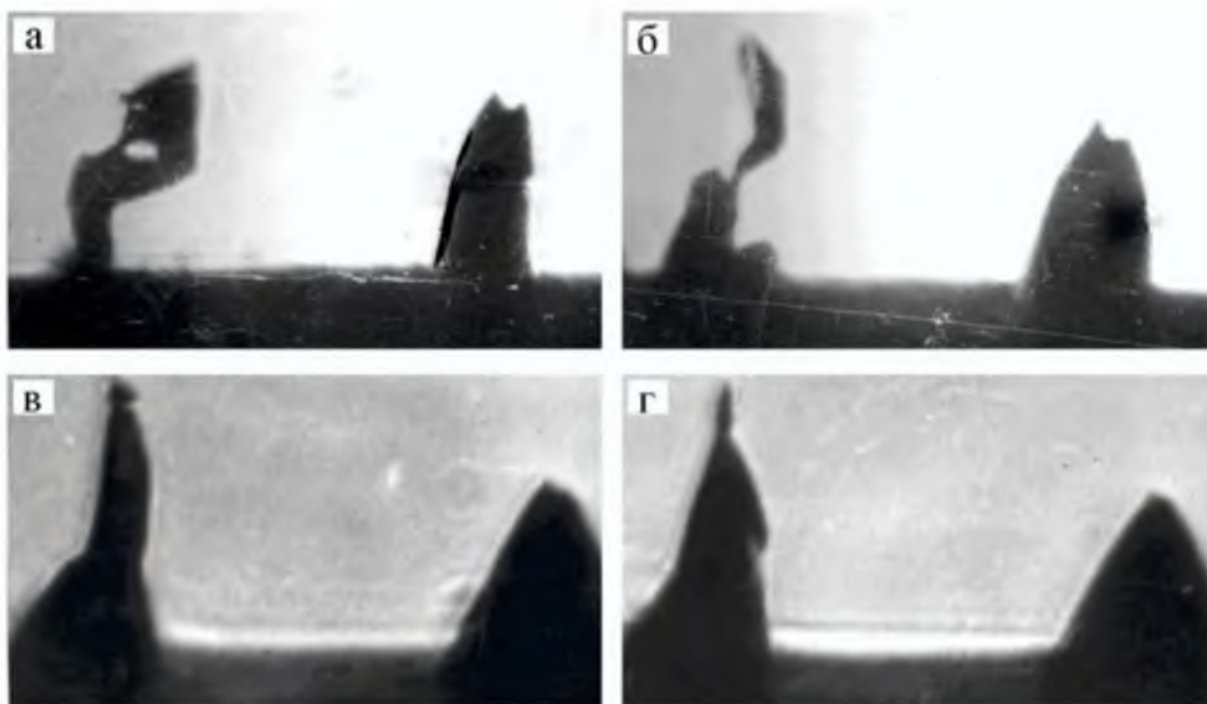


Рис. 11 Трансформация «бесформенного» вискера. Вольфрам, Ar^+ , 1000 эВ.
Увеличение –500. Доза облучения: а- $2,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$; б- $3,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$; в- $4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$; г- $4,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$.



Рис. 12 Кольцевое углубление вокруг вискера. Вольфрам, Ar^+ , 1000 эВ.
Увеличение-1000.

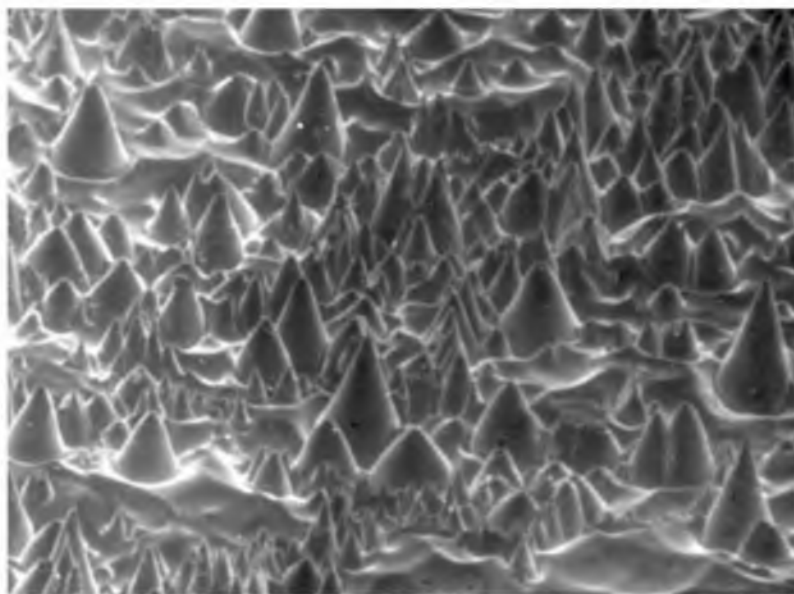


Рис. 13 Панорама покрытой конусами поверхности медного образца. Ar^+ , 600 эВ. Увеличение –1000.

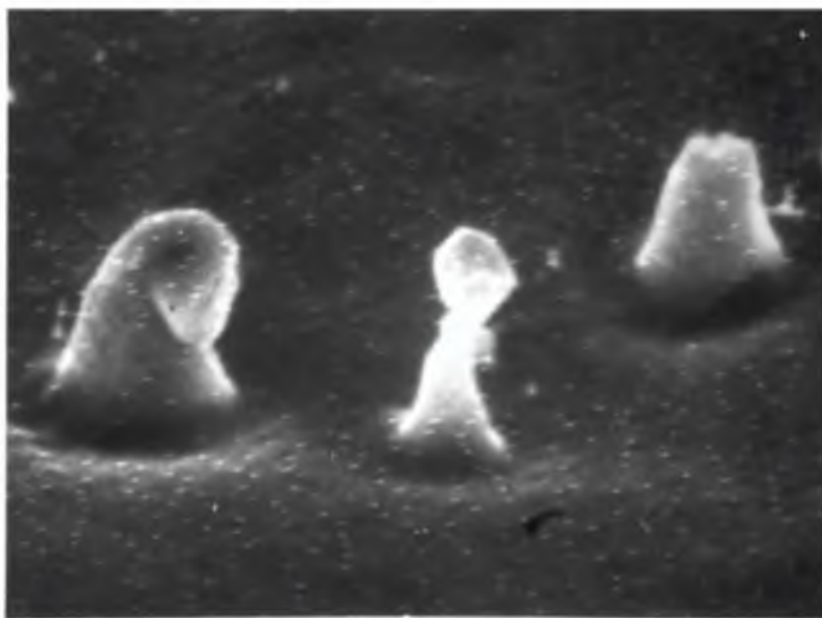


Рис. 14 «Шарик-на-ножке». Медь, Ar^+ , 600 эВ. Увеличение –6000.

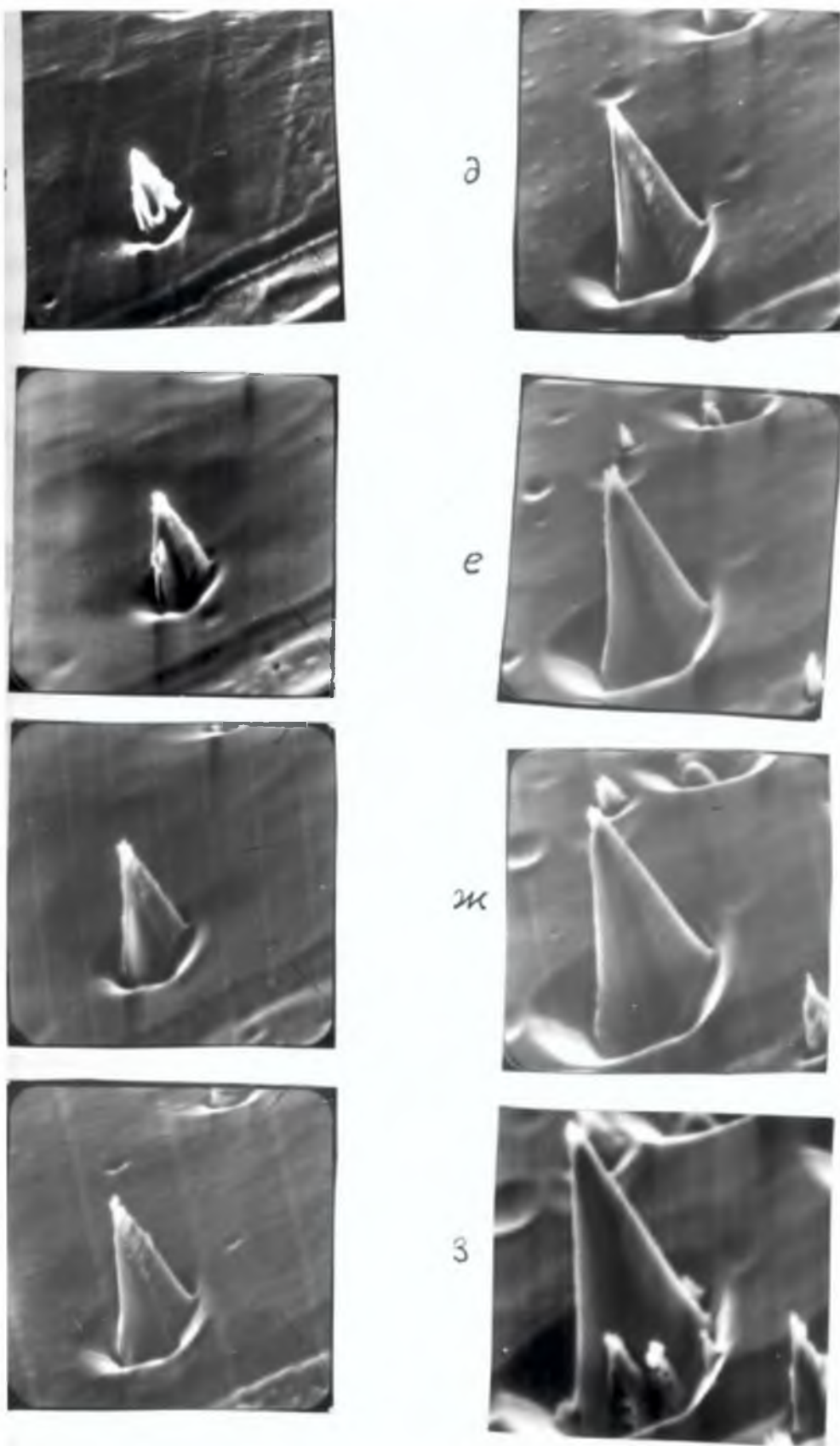


Рис 15. Развитие конуса в период стабилизации. Медь, Ag^+ , 600 эВ.
Увеличение –1000. Время облучения (мин.): а-90; б-110; в-130; г-150;
д-170; е-200; ж-230; з-250.

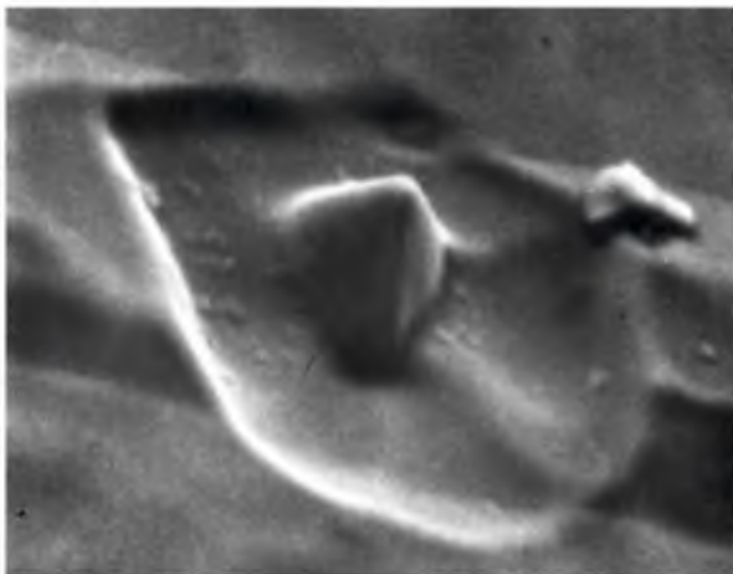


Рис 16. Конус на стадии разрушения. Медь, Ar^+ , 600 эВ. Увеличение –1500.

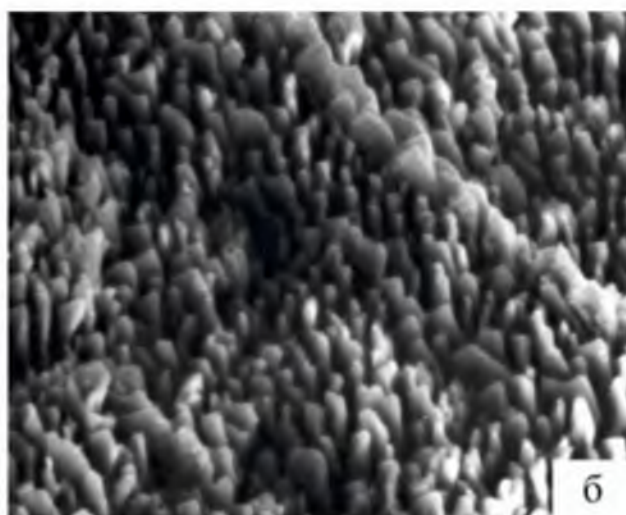
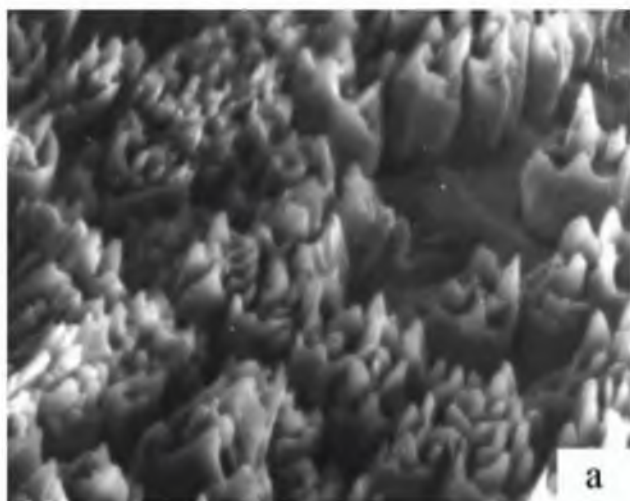


Рис. 17 Рельеф поверхности сплава Cu-Ni20at% после облучения ионами Ar^+ с энергией 600 эВ. Увеличение –7000. Доза облучения: а- $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$; б- $6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$.

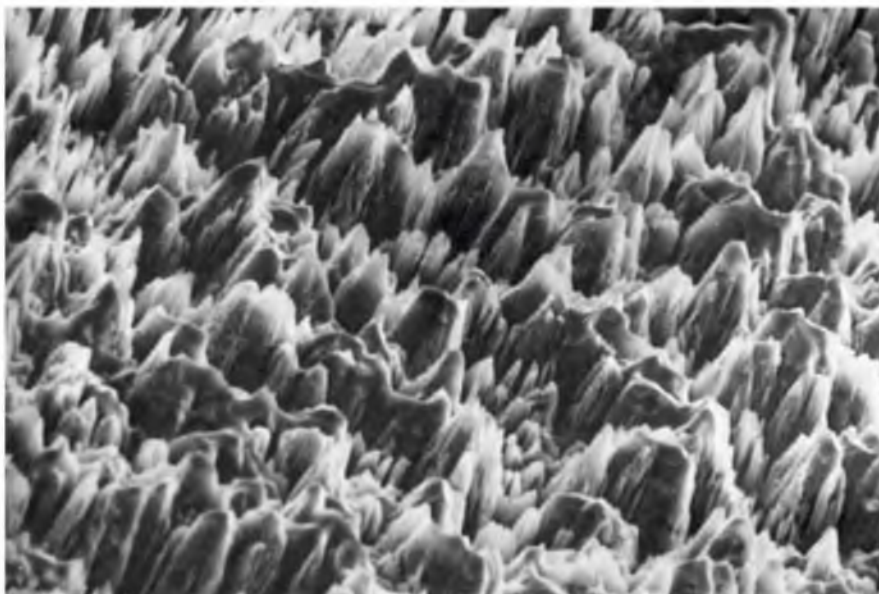


Рис. 18 Конусы на поверхности графита РГТ. He^+ , 800 эВ. Увеличение –1000.

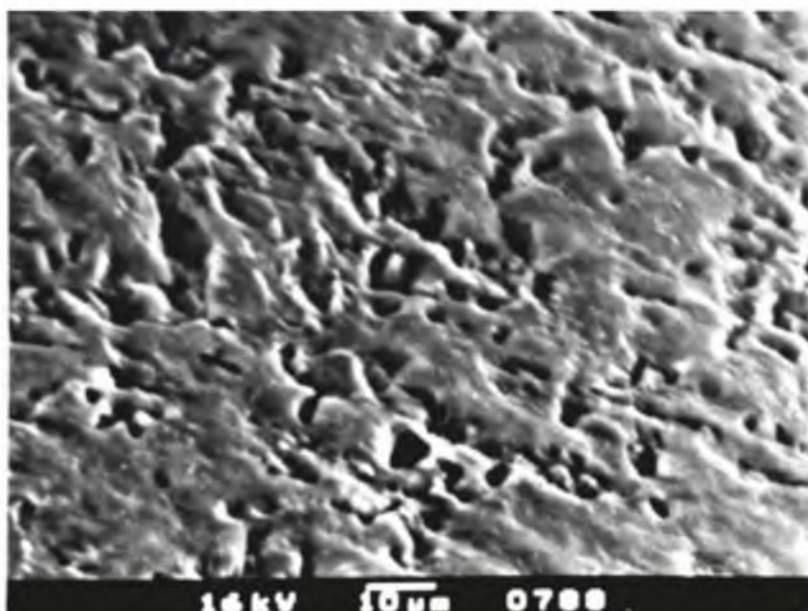


Рис. 19 Поры на поверхности графита МПГ-8. He^+ , 800 эВ. Увеличение – 1000.

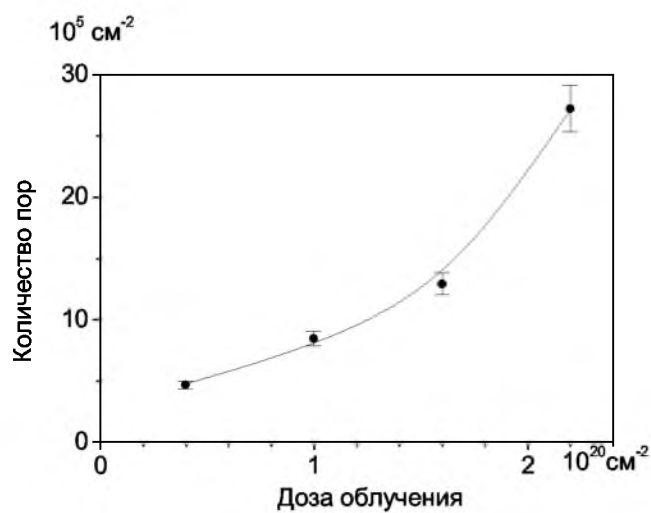


Рис. 20 Зависимость концентрации пор на поверхности графита МПГ-8 от дозы облучения ионами He^+ с энергией 800 эВ.

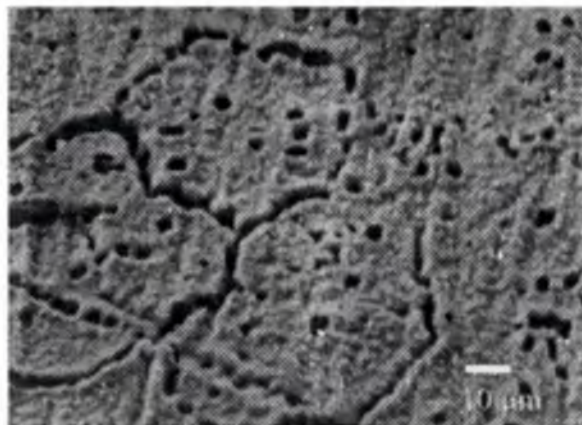


Рис. 21 Поры на поверхности сплава Cu-Ni50at%. He^+ , 600 эВ. Увеличение $\times 1000$.

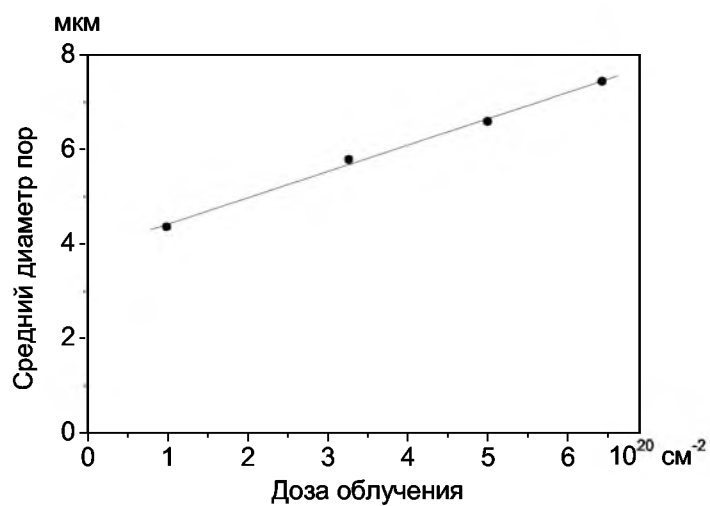


Рис. 22 Зависимость поперечного размера пор на поверхности сплава Cu-Ni50at% от дозы облучения ионами He^+ с энергией 600 эВ.

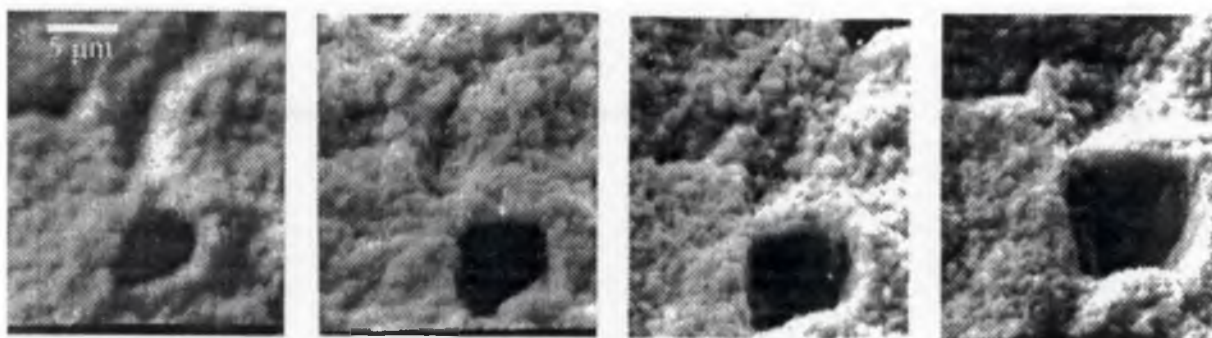


Рис. 23 Развитие поры на поверхности сплава Cu-Ni50at%. He^+ , 600 эВ. Увеличение $\times 4000$.

Список литературы.

1. Wehner G.K. Cone formation as a result of whisker growth on ion bombarded metal surface. J.Vac.Sci.Technol., 1985, A3(4), p. 1821-1835.
2. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Под ред. Бериша Р., вып. 2. Мир, 1986.
3. Беграмбеков Л.Б. . Эрозия и трансформация поверхности при ионной бомбардировке. Итоги науки и техники, сер. Пучки заряженных частиц, т. 7, 1993, стр. 4-57.