

## Введение

Современное развитие науки и техники ставит перед оптической промышленностью принципиально новые задачи, для решения которых необходимо существенно улучшить параметры и характеристики современных оптоэлектронных систем и создавать принципиально новую оптическую элементную базу. С точки зрения дальнейшего повышения качества оптических приборов и их эксплуатационных характеристик возможности использования традиционных оптических элементов практически исчерпаны. Дальнейшее расширение функциональных и точностных возможностей создаваемых оптических систем требует качественно нового подхода к проектированию оптических систем, предполагающего применение новой элементной базы, содержащей как традиционные элементы, выполненные на новом точностном уровне, так и принципиально новые оптические элементы. Это, в свою очередь, требует новых технологических разработок. Оптическая промышленность нуждается в надежной технологии получения различных оптических элементов, способной обеспечить гарантированный выход годных деталей с требуемыми точностными характеристиками.

В современной технологии обработки материалов большое внимание уделяется методам квантовой технологии, предполагающей использование для целей формирования поверхностей заданного рельефа управляемых пучков частиц, позволяющей создавать управляемые технологические комплексы.

Наиболее перспективным и качественно новым методом обработки является ионная обработка оптических материалов, получившая наиболее систематическое и всестороннее развитие в работах ГОИ. На базе проведенного комплекса научно-исследовательских и конструкторских разработок по исследованию процесса взаимодействия ионов с поверхностью твердого тела создано принципиально новое технологическое направление – ИОННАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

В настоящее время разработаны следующие разделы этого направления:

- ионная полировка, т.е. удаление дефектного слоя с поверхности оптического элемента, что представляется принципиально важным в ряде перспективных задач оптического приборостроения;

- ионная и ионно-химическая асферизация - метод, позволяющий получать и использовать при конструировании оптических систем новый класс высокоточных асферических поверхностей высших порядков;

- ионная ретушь - метод, который в сочетании с интерферометрическим контролем и расчетом профиля волновых фронтов на ЭВМ явился эффективным средством улучшения качества оптических систем;

- высокоточная размерная ионная обработка - принципиально новый технологический прием, который позволяет проводить обработку оптических

деталей с точностью долей длины волны и создавать целый ряд уникальных оптических элементов;

-технология изготовления элементов микротроптики, обеспечивающая создание элементов с заданной микротопографией рельефа оптической поверхности для электронной, дифракционной, в том числе и киноформной оптики;

-ионная обработка оптических покрытий, использование которой позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики получаемых покрытий.

Проведенный комплекс исследований процессов взаимодействия ионов с поверхностью оптических материалов позволил выявить принципиальные особенности их распыления, которые выделяют ионную обработку оптических материалов в самостоятельное научное направление. В процессе выполнения цикла работ по ионной бомбардировке оптических материалов получен ряд экспериментальных результатов, позволяющих глубже понять механизмы физико-химических явлений, обеспечивающих эффект удаления поверхностного слоя бомбардируемого образца и создать качественные модели процесса ионного и ионно-химического распыления диэлектрических оптических материалов.

Настоящее пособие подготовлено на базе проведенных исследований под руководством А. Ф. Первеева при непосредственном участии Л. В. Вишневской, Л. А. Черезовой, Г. А. Мурановой, В. В. Ильина и многих других сотрудников ГОИ. Предназначено для студентов, изучающих технологии обработки оптических материалов и изготовления оптических элементов, а также специалистов, работающих в этой области. Пособие позволит углубить знания в области физико-химических закономерностей процессов взаимодействия элементарных частиц с поверхностью твердого тела, в частности, оптических стекол, кристаллов и полупроводников.

## Глава 1. Ионная бомбардировка твердых тел

Явление эмиссии поверхностных атомов твердого тела, сопровождающее бомбардировку его поверхности потоком энергетических частиц, известно давно. Впервые этот эффект наблюдал Гроув в 1853 г. [1] на катоде в тлеющем разряде, из-за чего явление получило название катодного распыления, и впоследствии в течение долгого времени этот процесс изучался в технике тлеющего разряда и считался нежелательным, так как приводил к разрушению катодов. Исследования явления распыления носили в основном качественный характер из-за отсутствия технических возможностей контроля условий эксперимента. Существенный прогресс в понимании физической сути процесса распыления наметился в связи с созданием автономных ионных источников, позволявших независимо контролировать большой набор характеристик энергетического пучка частиц. За последние 70 лет на базе проведенных исследований созданы теоретические модели процесса распыления, предсказывающие количественные соотношения параметров процесса. Также заметен исключительный интерес к этому явлению, связанный с возможностью использования эффекта поверхностного удаления слоя для решения важных задач в различных областях науки и техники, так как более полное понимание физики процесса позволило изменить традиционную точку зрения на практические возможности процесса распыления.

В настоящее время распыление широко используется не только в чисто исследовательских целях, но и является эффективным технологическим инструментом, например, в области тонких покрытий, в полупроводниковой и микроэлектронной технологии. С 1965 г. [2] на базе явления распыления получило право на жизнь еще одно оригинальное практическое применение явления атомной эмиссии с поверхности мишени под действием ионной бомбардировки применительно к диэлектрическим образцам - ионная полировка оптических поверхностей, с развитием которого сформировалось принципиально новое направление в оптической технологии - ионная обработка оптических поверхностей и покрытий, позволяющее создавать полностью управляемые процессы формирования поверхностей и слоев с заданными характеристиками. Это, в свою очередь, обеспечило создание новой элементной базы оптического приборостроения, в результате чего многие практические задачи решаются на качественно новом уровне.

Элементарные процессы при распылении происходят на атомарном уровне. Эффективность процесса распыления характеризуется коэффициентом распыления, который определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности твердого тела одной падающей частицей. В общем случае коэффициент распыления является функцией энергии падающей частицы, соотношения масс бомбардирующей и эмиттируемой частиц, температуры мишени, угла падения частицы на облучаемую поверхность и ряда других факторов, определяемых условиями эксперимента.

В настоящее время можно рассматривать два явления распыления - физическое и химическое. Первое связано исключительно с передачей кинетической энергии падающей частицы атомам мишени и выходом в газовую фазу атомов, обладающих энергией, достаточной для преодоления поверхностных сил связи. Очевидно, что для физического распыления существует энергетический порог. Химическое же распыление связано с образованием на поверхности мишени летучих соединений за счет химического взаимодействия падающих частиц с атомами мишени, имеющих малую энергию связи с поверхностью. Химическое распыление, очевидно, наблюдается при предельно малых энергиях. Однако резкой границы между этими двумя процессами нет, более того, они взаимосвязаны и взаимностимулирующие. Вначале рассмотрим только физическое распыление, химическому же распылению будет посвящена соответствующая часть данного пособия.

При бомбардировке твердого тела энергетическими частицами распыление поверхностных атомов не единственный процесс [3]. Наблюдается ионно-электронная эмиссия в результате передачи энергии торможения иона электронам твердого тела, а также за счет неупругих соударений. В результате неупругих соударений может наблюдаться излучение, так называемая ионнолюминисценция, характеристическое рентгеновское излучение, тормозное излучение. Упругие взаимодействия могут приводить к обратному рассеянию ионов. Часть бомбардирующих частиц может останавливаться внутри поверхностного слоя мишени и оставаться в нем в качестве имплантированной частицы. Поскольку бомбардировка поверхности - процесс энергетический, то мишень, как правило, нагревается и на процессы столкновительной эмиссии может накладываться термоэмиссия - испарение, плавление, термоэмиссия электронов, термоизлучение. Следовательно, не всякое разрушение поверхности при бомбардировке является распылением, и распыление - не единственный эффект при бомбардировке.

Множество процессов усложняет изучение собственно распыления и, очевидно, что преобладающая роль того или иного процесса, и его вклад в общую эффективность разрушения поверхности твердого тела при ее бомбардировке определяется энергией падающих частиц.

Определение процесса распыления было дано Зигмундом в работе [4]. По мнению автора, распыление - это некий класс разрушений поверхности твердых тел под действием бомбардировки частицами, который может наблюдаться при предельно малых потоках частиц (исключая испарение), при предельно малых дозах (исключая блистеринг) и на мишенях однородного состава (исключая десорбцию). Результаты, полученные при исследовании распыления монокристаллов [5], указывали на столкновительную природу процесса. На базе модели каскадных столкновений, генерируемых внутри мишени бомбардирующим ионом, развиты различные теоретические модели процесса, предсказывающие количественные соотношения между эффективностью распыления и характеристиками сталкивающихся частиц. Эти модели разработаны для случая поликристаллических и аморфных мишеней как более простого случая по сравнению с монокристаллами, где регулярная струк-

тура усложняет процесс эффектами каналирования, фокусировки столкновений, анизотропии коэффициента распыления.

Итак, падающий ион попадает в приповерхностный слой мишени и сталкивается с ее атомом, вызывая его смещение. Как правило, этот смещенный атом распыляется не сам, а в свою очередь вызывает вторичные смещения, сталкиваясь с соседними атомами решетки. Эти вторичные смещенные атомы имеют возможность рассеяться в направлении из поверхности с энергией, достаточной для преодоления сил поверхностной связи. Падающий ион описывает случайную траекторию в твердом теле, отдавая свою начальную энергию путем атомных столкновений и электронных возбуждений, и, наконец, либо успокаивается либо покидает поверхность как распыленная частица.

Таким образом, распыление является типичным процессом многократных столкновений, содержащим каскад движущихся атомов мишени. Этот каскад может занимать значительную область внутри мишени, но для процесса распыления представляют интерес пересечения каскадов с поверхностью мишени. Одной из основных задач теории распыления является определение вида функции  $(E)$ , где  $E$  - энергия падающей на мишень частицы. Различные столкновительные теории распыления имеют значительные различия в оценке вклада того или иного процесса. Некоторые авторы [6] считают, что большая часть атомов эжектируется в результате случайных столкновений, даже в кристаллах, другие [7] предполагают, что регулярная структура мишени вызывает иной вид столкновений. В некоторых работах [8] предполагается, что основную долю вносят поверхностные атомы, в то время как в работе [9], например, считается, что распыленные атомы появляются из некоторого протяженного слоя вблизи поверхности.

Большой экспериментальный материал по определению вида функции  $(E)$  для многих комбинаций ион - мишень, исследование характеристик углового и энергетического распределения распыленных частиц хорошо объясняется и согласуется с теориями Томпсона [10], Брандта и Лауберта [6] и Зигмунда [11]. Все три теории предсказывают независимость  $S$  (коэффициент распыления) от  $E$  в области энергии  $10^3 - 10^5$  эВ, дают угловую зависимость  $S$  как  $\sec^2 \theta$ , а также определяют  $S$  как некоторую функцию масс и атомных чисел сталкивающихся частиц. Указанные теории отличаются допущениями, принятыми за исходные.

Наиболее универсальной и детально разработанной является модель Зигмунда [11], который попытался систематизировать все, что было известно, в некоторую транспортную теорию распыления при минимальном числе допущений, связывающих характеристики единичного столкновения (дифференциальное сечение столкновений, неупругое торможение), большой структуры мишени (аморфная либо упорядоченная) и энергии связи поверхности.

Выбор в качестве предмета исследования случайной мишени позволил Зигмунду использовать для описания каскада столкновений уравнения переноса. Для определения потока частиц, участвующих в каскаде, он использо-

вал систему интегро-дифференциальных уравнений Больцмана и дал аналитическое решение системы.

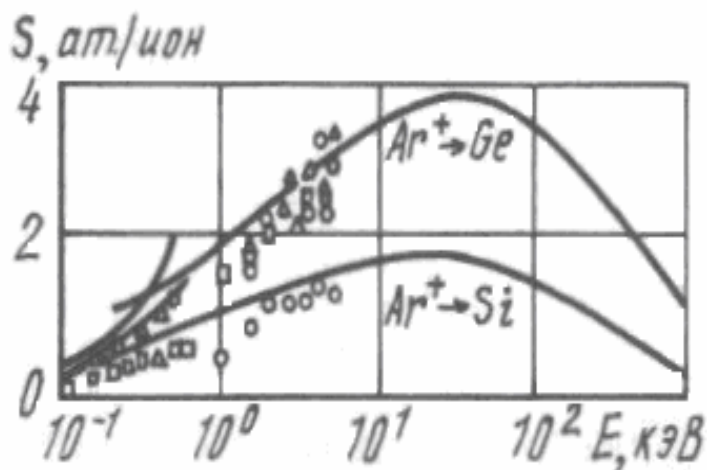
Вычисление состоит из нескольких этапов:

-определяется количество энергии, освобожденной энергетическими частицами вблизи поверхности;

-определяется поток низкоэнергетических смещенных атомов;

-определяется поток смещенных атомов, приходящих на поверхность мишени;

-определяется количество атомов, которые имеют достаточную энергию для преодоления поверхностных сил связи.



**Рис. 1. Энергетическая зависимость коэффициента распыления  $S$  для различных комбинаций ион - мишень:**  
— расчет;  $\square, \Delta, \diamond, \circ$  - эксперимент

Для аналитического решения уравнения Зигмунд использовал значение сечений столкновений атомов и ионов в области энергии порядка килоэлектронвольт [12], используя потенциал Томаса - Ферми и получил пробег ионов в слое, сечения столкновений для низкоэнергетических частиц и силы поверхности связи. Полученные аналитические результаты для большого количества пар мишень-ион с учетом сделанных допущений хорошо согласуются с экспериментальными данными [11] (Рис.1).

Большой экспериментальный материал, накопленный за многие годы исследований процесса распыления, в основном, относится к бомбардировке металлов. При анализе результатов будем обращать внимание на коэффициент распыления как функцию:

-энергии иона  $E$ ;

- угла падения  $\theta$ ;

-масс иона и атомов мишени  $M_1, M_2$ .

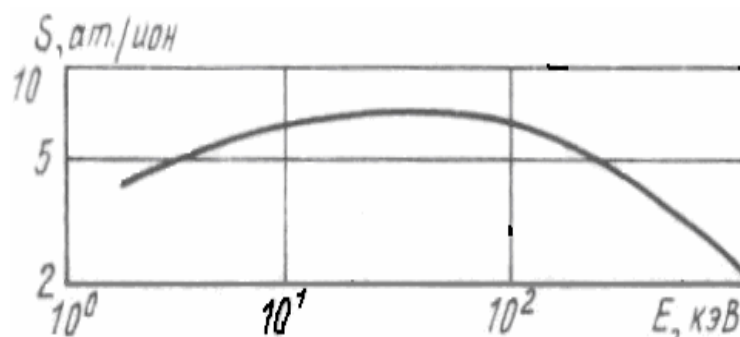
Были изучены многие комбинации ион - мишень. Типичная кривая  $S(E)$  представлена на рис.2 [4]. Видно, что коэффициент распыления увеличивается с ростом энергии иона от некоторого порогового значения  $E$ , которое характеризуется комбинацией ион - мишень. Затем рост  $S$  замедляется, в области 10 - 100 кэВ  $S$  приблизительно постоянно и при дальнейшем возрастании

энергии  $S$  начинает уменьшаться из-за более глубокого проникновения ионов в поверхность. Из результатов многочисленных измерений  $S$  в припороговой области распыления [13] следует, что  $E$  практически не зависит от  $E_{пор}$ , соотношения масс иона и атома мишени и связана с энергиями смещения в твердых телах (20 - 25 эВ).

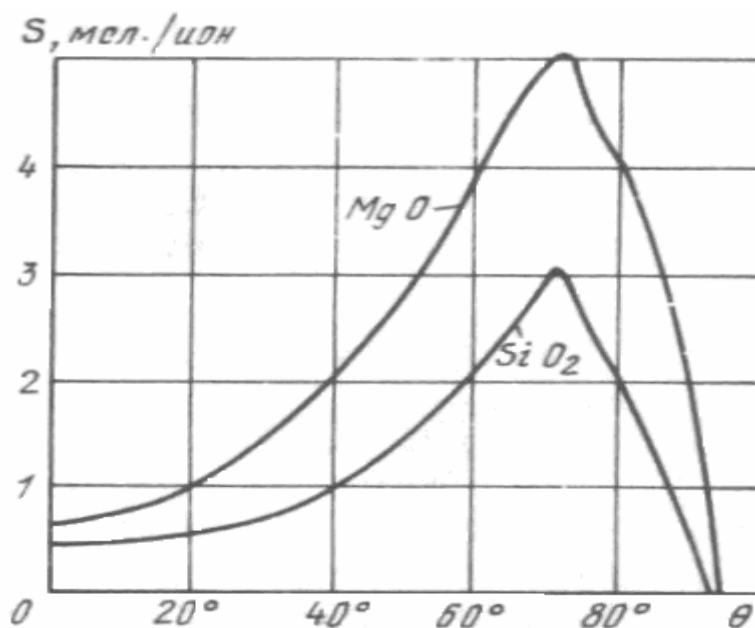
Вблизи порога распыления  $S$  растет как  $E^2$  [8], затем по линейному закону [14]. В области энергии больше 1 кэВ, как правило,  $S$  насыщается для многих комбинаций ион - мишень, и наблюдается спад  $S$  при энергиях, приближенных к 100 кэВ. Однако для различных комбинаций  $E$  насыщения сильно различается. Как общую тенденцию можно отметить, что для более легких ионов затухание  $S(E)$  наблюдается при более низкой  $E$  как результат большей проникающей способности легких частиц.

Почти все кривые зависимости коэффициента распыления от угла падения иона ( $\theta$ ) подобны представленным на рис. 3. [15].  $S$  увеличивается медленно до  $30^\circ$ , затем наблюдается быстрый рост с достижением  $S_{max}$  при скользящем падении и последующий спад  $S = 0$  при  $\theta = \pi/2$ . Максимум на кривой  $S(\theta)$  и дальнейший спад связан с увеличением вероятности отражения иона от поверхности без прохождения эффективного поверхностного слоя. Формула для вычисления критического угла для случая кристаллических мишеней дана в работе [16].

В работе [17] показано, что эта же формула может быть использована и для аморфных мишеней при определенных условиях.



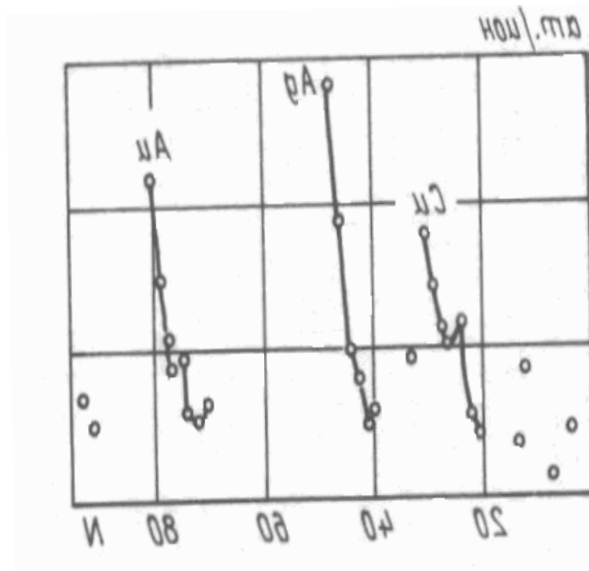
**Рис.2. Энергетическая зависимость коэффициента распыления для образца из меди, бомбардируемого ионами аргона**



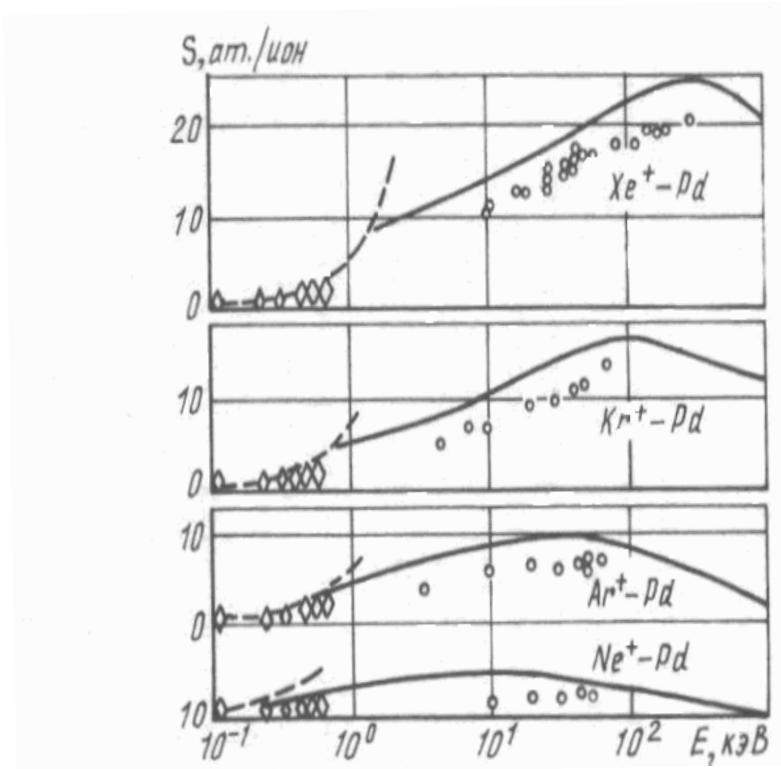
**Рис.3. Угловая зависимость коэффициента распыления для мишеней из MgO и кварцевого стекла**

Аналитический вид  $S(\theta)$  приводится в работе [11]. Зависимость  $S(\theta) = \sec \theta$ , описываемая из простого рассмотрения длины пути прохождения иона в твердом теле, не соответствует экспериментальным данным за исключением случая  $M_1 \ll M_2$ , где  $M_1$  - масса иона;  $M_2$  - масса атома мишени. Хорошее соответствие эксперимента и теории для многих комбинаций ион - мишень наблюдается при аналитическом учете пространственного распределения энергии, передаваемой бомбардирующим ионам. Теория Зигмунда предсказывает сложную зависимость от масс и атомных чисел падающего иона и атома мишени.  $S$  имеет общую тенденцию увеличиваться с увеличением массы мишени для одного и того же падающего иона. Однако наблюдается интересная закономерность: если рассматривать  $S$  как функцию атомного номера, то в пределах данного периода таблицы Менделеева растет по мере заполнения  $d$  - оболочки и достигает максимального значения для Cu, Au, Ag (рис. 4) [13]. При бомбардировке одной и той же мишени различными ионами также наблюдается рост  $S$  с ростом массы иона (рис. 5) [11]. Однако бывают и исключения [18]. С точки зрения эффективности практического использования процесса распыления интересен тот энергетический интервал, в котором  $S$  имеет достаточно высокое значение, т. е. энергии ионов  $E \geq 1 \text{ кэВ}$ . Со стороны высоких энергий ограничение диктуется допустимым разогревом мишени и температурной зависимостью.





**Рис.4. Зависимость коэффициента распыления от атомного номера N материала мишени в таблице Менделеева**



**Рис.5. Зависимость коэффициента распыления от энергии для ионов различной массы:  
- - -, - расчёт;  $\diamond, \circ$ , - эксперимент**

На эффективность процесса распыления, кроме вышеуказанных параметров, во многом влияют условия эксперимента - плотность потока ионов на поверхность, температура мишени, состав атмосферы, в которой находится мишень, предыстория поверхности образца и другие. Поскольку в общем виде учесть влияние этих параметров на  $S$  для любой пары ион - мишень не

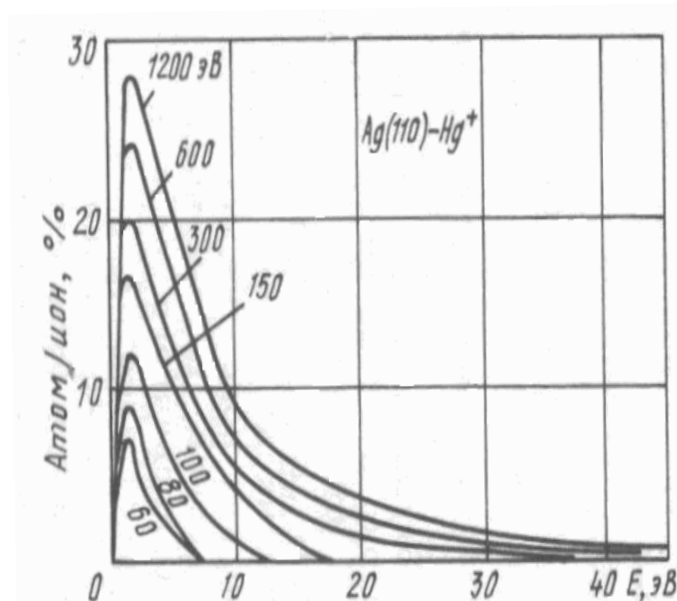
представляется возможным, то это влияние будет рассматриваться применительно к конкретным экспериментам и мишеням.

Для понимания физики процесса распыления важное значение имеет исследование эмиттируемых частиц. Из работ, посвященных этому вопросу, следует, что основная масса вещества распыляется в виде нейтральных атомов, имеются сложные молекулярные соединения, порой встречаются скопления молекул типа кластеров, а также ионы положительные и отрицательные. Так, при бомбардировке мишени из меди [19] среди распыленных частиц были обнаружены только нейтральные атомы Cu и молекулы  $Cu_2$ . Методом массанализа при бомбардировке меди Ar (2 кэВ) [20] зафиксированы изотопы Cu. Здесь же было обнаружено, что наиболее вероятная энергия распыленных ионов составляет 10 эВ, хотя около 1% Cu имеет энергию до 350 эВ. При фундаментальном исследовании вторичной ионной эмиссии при бомбардировке [21] было выяснено, что энергия вторичных ионов, выбитых из объема мишени, приблизительно на 100 эВ выше, чем для ионов из поверхности. Причем, распределение энергии ионов, распыленных с поверхности, не зависит от энергии первичного иона и его массы, а зависит только от энергии адсорбции, в то время как распределение энергии распыленных объемных ионов зависит от энергии первичного иона и при этом сдвигается в сторону больших значений с увеличением энергии бомбардирующего иона. При бомбардировке мишени из Al [22] ионами Ar ( $E = 12$  кВ) были обнаружены целые скопления атомов.

Предполагается, что эти кластеры выбиваются поверхности при распылении, а не образуются в газовой фазе. Аналогичные результаты получены в работе [23]. Также при бомбардировке арсенида галлия Ag с низкой энергией (менее 150 эВ) [24] около 99 %, частиц составляли атомы галлия и мышьяка и около 1% нейтральные молекулы арсенида галлия. Ни ионов, ни молекул не было замечено. Предполагается, что эти кластеры выбиваются поверхности при распылении, а не образуются в газовой фазе. Аналогичные результаты получены в работе [23]. Также при бомбардировке арсенида галлия Ag с низкой энергией (менее 150 эВ) [24] около 99 %, частиц составляли атомы галлия и мышьяка и около 1% нейтральные молекулы арсенида галлия. молекул не было замечено.

Средняя энергия эжектируемых частиц 10 эВ, но энергетический спектр частиц может простираться до 100 - 200 эВ. Из результатов работ, посвященных энергетическому анализу распыленных частиц, следует, что средняя энергия частиц не зависит от энергии первичного иона, начиная с 1 кэВ. И только в области высокой энергий влияние становится более заметным. В то же время энергия эмиттируемых атомов зависит от угла падения бомбардирующего иона и возрастает с уменьшением угла падения. Можно также проследить тенденцию уменьшения энергии распыленных частиц с уменьшением атомного номера первичного иона [25]. Что касается энергетического состояния частиц, распыляемых с мишени в виде ионов, то все вышеизложенное справедливо и для них с той лишь разницей, что максимум их

энергетического спектра смещен в сторону больших энергий [26]. В качестве иллюстрации на служит рис.6. [25].



**Рис.6. энергетический спектр распыления атомов серебра для различных энергий ионов ртути**

Представляет интерес угловое распределение распыленных частиц, так как оно позволяет понять механизм, лежащий в основе распыления. В случае справедливости теории теплового пика [26] угловое распределение частиц должно подчиниться закону Кнудсена. Такой результат получен [27] при изучении распыления серебра ионами Ar (10 кэВ), где также сообщалось, что вид распределения не зависит от угла падения первичного иона. Однако при более тщательном изучении этого вопроса [28] обнаружено, что вид углового распределения зависит от энергии и угла падения бомбардирующих частиц.

При низких энергиях ионов наблюдается подкосинусное распределение, т.е. в направлении нормали к поверхности мишени распыляется меньше частиц, чем следует из косинусного закона. При увеличении энергии иона угловое распределение переходит через косинусный закон к надкосинусному, т.е. больше частиц распыляется в направлении нормали к поверхности. При исследовании влияния угла падения иона на мишень обнаружено [28], что при наклонном падении ионов большее число распыляется в направлении зеркального отражения падающего ионного пучка. Наиболее ярко проявляется направление преимущественного распыления при исследовании монокристаллов [20], когда наблюдаются определенные кристаллографические направления преимущественной эмиссии атомов ("пятна Венеры"). Замеченная впоследствии температурная зависимость [29] углового распределения распыленных частиц, когда эффект преимущественного распыления атомов наблюдался только при температуре мишени, превышающей некоторую критическую для условий данного эксперимента вместе с "пятнами Венеры", явилась полнейшим доказательством импульсной теории распыления. Действи-

тельно, при бомбардировке монокристаллов при низкой температуре происходит аморфизация поверхностного слоя как результат радиационного повреждения. В случае повышения температуры мишени одновременно с образованием дефектов смещения происходит их релаксация путем отжига и последующий ион встречается с регулярной структурой монокристалла, и только при температуре, выше критической, наблюдается анизотропия атомной эмиссии.

Поверхность мишени, подвергаемая ионной бомбардировке, изменяет в общем случае как свою структуру, так и состав. При ионном травлении поликристаллических мишеней [30] наблюдается проявление границ зерен, могут образовываться бугорки [31] травления, конусы, что связано с наличием направлений преимущественного распыления. Ионная бомбардировка может приводить к разупорядочиванию поверхностного слоя путем его аморфизации. При распылении многокомпонентных мишеней наблюдается изменение состава поверхностного слоя. За счет различий в коэффициентах распыления компонент происходит обеднение поверхностного слоя легкораспыляемой компонентой. Затем скорости распыления обеих компонент выравниваются вследствие обогащения поверхности компонентой с малым коэффициентом распыления и более глубоким залеганием компоненты с высоким  $S$  и, начиная с некоторого момента, состав распыленного материала соответствует составу объема мишени, т. е. на поверхности наблюдается слой отличного от объема состава. Глубина этого слоя, как правило, сравнима с длиной пробега иона в твердом теле. Особенно заметны изменения поверхностного слоя при распылении окислов [32]. Разрыв химических связей может приводить к преимущественному удалению компоненты с низкой энергией связи (кислорода), и тогда наблюдается восстановление окислов до более низкого и затем до чистого металла, например,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Si}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}$ .

Замечено, что толщина измененного слоя уменьшается с увеличением угла падения иона на мишень, что также указывает однозначно на связь с глубиной проникновения первичной частицы в поверхность.

Однако надо отметить, что часто наблюдаемые результаты не согласуются с общепринятыми взглядами на механизм распыления. Особенно часто это бывает в случае распыления многокомпонентных мишеней. В частности, не всегда происходит обогащение поверхности компонентами с низким коэффициентом распыления. Важное значение может иметь соотношение масс компонент и иона, различие в энергиях связи. Коэффициенты распыления компонент в многокомпонентной мишени, как правило, не соответствуют таковым однофазных компонент. Как уже указывалось, изменения в составе поверхностного слоя порождают структурные изменения и наоборот.

Таким образом, вопрос состояния поверхности, подвергаемой бомбардировке, сложен, результат зависит от условий эксперимента, и при практическом использовании явления распыления необходимо анализировать возможность изменений поверхностного слоя и влияние этого эффекта при решении конкретных задач с помощью ионной бомбардировки.

## **Глава 2. Основные методы ионной обработки оптических материалов**

Предметом нашего исследования являются оптические материалы, основная часть которых представляет собой оптические стекла. Особенность изучения этого класса материалов определяется их физико-химическими характеристиками, прежде всего, это диэлектрические и многокомпонентные материалы. Поскольку при бомбардировке используются пучки заряженных частиц, так как их легко ускорить до требуемой энергии, то, естественно, при бомбардировке диэлектриков встает вопрос о нейтрализации поверхностного заряда, накапливающегося на мишени. Способы нейтрализации связаны с методами получения ионного пучка.

В случае использования автономных ионных источников задача нейтрализации решается либо введением дополнительных электронных источников, согласованных с ионными, либо делаются попытки получения в источнике нейтрализованного пучка [33]. При использовании в качестве источника ионов газоразрядной плазмы существует несколько способов нейтрализации поверхности, например, за счет использования электрически смещенной металлической сетки, находящейся перед поверхностью образца [34], либо нагревом образца [13]. Оригинальный метод нейтрализации заряда поверхности диэлектрической мишени в технике тлеющего разряда предложил Андерсен в 1962 г. [35]. В качестве источника ионов он предложил использовать плазму тлеющего разряда, возбуждаемого ВЧ напряжением. Диэлектрическая мишень устанавливается непосредственно на электрод, к которому прикладывается ВЧ напряжение. При изменении полярности напряжения на электроде мишень подвергается попеременно ионной и электронной бомбардировке, в результате чего осуществляется эффективное распыление диэлектрической мишени.

В настоящее время методика ВЧ распыления очень широко используется в технологических процессах в области полупроводниковой техники, микроэлектроники, тонкопленочных покрытий и представляет большой интерес для оптической технологии.

Рассмотрим более подробно указанные выше способы ионной обработки оптических материалов.

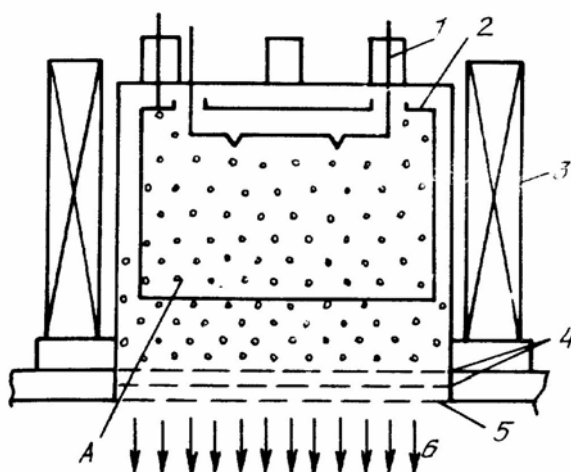
### **2.1 Автономные источники ионов**

Первые работы по ионной обработке велись с использованием сфокусированных ионных пучков диаметром до нескольких миллиметров. Сканирование ионного пучка по поверхности детали осуществлялось либо за счет механического перемещения образца [36], либо электростатически с помощью отклоняющей по заданному закону системы [37, 38]. Управление глубиной съема происходило за счет модуляции времени обработки. В начале 70-х

годов фирма Alkatel благодаря международной кооперации создала экспериментальную установку "Дуаплазмотрон". Установка состояла из ионного источника типа дуаплазмотрон, сканирующей системы, управляемой ЭВМ, и лазерного интерферометра для контроля процесса обработки. Однако установка не нашла спроса из-за сложности и низкой производительности. Скорость съема сфокусированными ионными пучками инертных газов составляла единицы микрон в час с 1 см поверхности, и значительно повысить ее не представлялось возможным не только из-за сложности конструирования источников с большей плотностью ионного тока, но и из-за недопустимого повышения термического воздействия на обрабатываемую деталь, которое влечет за собой невозможность оптического контроля процесса обработки.

Вместе с тем, ионные пучки со сфокусированными пучками и заданным профилем распределения плотности тока в пучке или с автоматическим управлением представляют значительный интерес для создания элементов микротропники и для решения ряда специальных задач, требующих небольших по глубине съемов материала.

Большую перспективу для обработки поверхностей оптических деталей имеют широкие ионные пучки. Однако до 70-тых годов 20 столетия не было ионных источников, которые давали бы пучок большого диаметра с равномерным распределением плотности ионов, высокой стабильностью и эффективностью. Теоретические и экспериментальные исследования многих авторов показали, что энергия ионов пучка не должна превышать 500 эВ, так как при более высоких энергиях наблюдается разогрев детали и появление радиационных дефектов в поверхностном слое. Для обеспечения производительности процесса необходимо иметь при этих энергиях высокие плотности ионного тока. В наибольшей степени этим требованиям отвечает источник типа "Кауфман", которым оснащаются промышленные установки фирмы Technic (США). Эти источники создают ионные пучки диаметром до 350 мм и равномерностью  $\pm 5\%$ . Схема источника приведена на (рис.7.)



**Рис.7. Схема источника типа «Кауфман»:**

- 1 - термокатод; 2 - анод; 3 - магнит; 4 - ионно-оптические сетки;  
5 - ускоряющая сетка; 6 - ионный пучок; А - область плазмы разряда**

Эмиттированные катодом первичные электроны ускоряются по спиральным траекториям вдоль магнитного поля и, осциллируя в потенциальной яме между катодом и отражательным электродом, ионизируют рабочий газ. Плазма образуется в камере ионизации даже при низком давлении. Магнитное поле увеличивает длину траекторий электрона. Ионный пучок через эмиссионные отверстия отражательного электрода и экстрактора вводится в рабочую камеру.

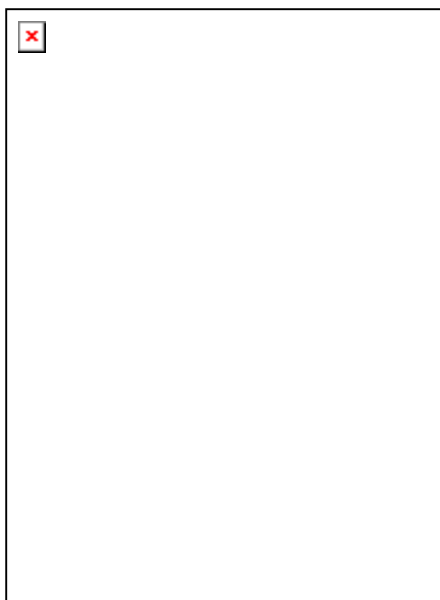
Источники типа "Кауфман" обладают рядом достоинств в случае их применения в оптической технологии. Низкое напряжение, при котором зажигается разряд ( $\sim 20$  В), ограничивает возникновение многозарядных ионов, уменьшает возможность распыления стенок рабочей камеры, находящихся под потенциалом катода и тем самым обеспечивает возможность получения ионного пучка с малым разбросом по энергиям и относительно малым ( $\sim 10$  %) количеством примесей. Механизм зажигания разряда позволяет получать однородный многолучевой ионный пучок с достаточно равномерным распределением плотности плазмы. В системе "Кауфман" предусмотрена также возможность фокусировки ионного пучка с его последующим электростатическим отклонением, что позволяет сканировать сфокусированный пучок по поверхности обрабатываемой детали.

Однако описанный тип ионных источников имеет и ряд недостатков, ограничивающих область их применения. Так, наличие термокатода не позволяет использовать источник для формирования ионных пучков химически активных газов. Сложная многоапертурная оптика, ограниченная плотность ионного тока также делают источник "Кауфман" не универсальным.

Большими возможностями обладает ионный источник с холодным катодом, в котором, наряду с инертными газами, могут использоваться химически активные. Срок службы источников этого типа практически не ограничен, однако им присущи все остальные недостатки источника "Кауфман".

Широко известны в настоящее время источники с холодным катодом магнетронного типа, позволяющие получать трубчатые пучки. Однако из-за большой неравномерности пучка они могут применяться только в вакуумных системах с планетарным вращением обрабатываемых деталей. Применение подобных источников для обработки крупногабаритных оптических деталей малоэффективно.

Наиболее широкое распространение получил как в микроэлектронике, так и в оптической технологии ионный источник с холодным катодом типа "Радикал". В этих источниках применен замкнутый дрейф электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях в промежутке анод - катод. Ионизация рабочего газа обеспечивается высокоэнергетическими электронами (рис. 8).



**Рис.8. Схема источника типа «Радикал»:**  
**1 - магнит; 2 - катод; 3 - анод; 4 - ионный пучок;**  
**А - область плазмы разряда**

Источник состоит из кольцевого анода, который располагается в зазоре электромагнита или постоянного магнита с радиальным магнитным полем.

Полюса магнита одновременно выполняют функцию ускорителя и катода и выполнены из магнитомягкого материала, что обеспечивает в зазоре высокую (более 400 Э) напряженность магнитного поля. Положительный потенциал прикладывается к аноду, а катод заземляется. Электроны совершают замкнутый азимутальный дрейф, ионы ускоряются вдоль оси.

Несомненным достоинством ионных источников этого типа является монохроматизм ионного потока с малым углом расходимости ( $\sim 7^\circ$ ). Источник стабильно работает в химически активных средах и остаточном давлении ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Па). К недостаткам источников "Радикал" следует отнести относительно небольшие плотности ионного тока ( $\sim 0,1$  мА/см<sup>2</sup>) и ограниченный диаметр формируемого трубчатого пучка ионов ( $\sim 100$  мм).

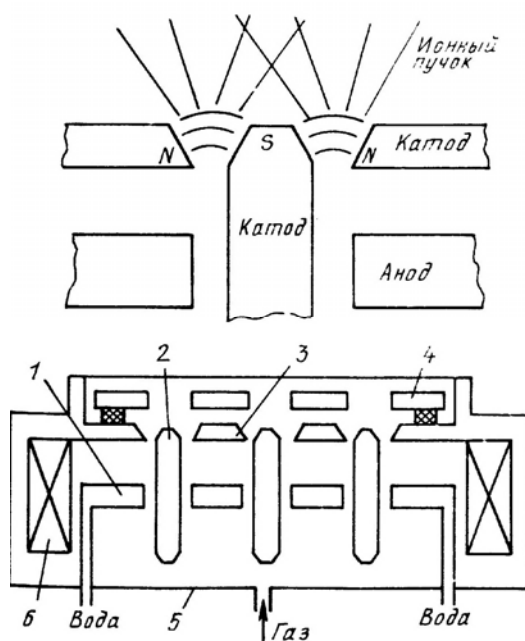
В настоящее время для оптической технологии разработана серия ионных источников типа ИОН [39], генерирующих ионный пучок диаметром до 100 мм и неравномерностью обработки поверхности  $\pm 15\%$ . Эти источники (ИОН-2, ИОН-3) имеют два кольцевых канала для формирования ионного пучка, расположенные коаксиально друг к другу. Источники предназначены для обработки оптических деталей как в инертных, так и химически активных средах и могут быть установлены на отечественных вакуумных установках типа ВУ-1; ВК-1.5; ВУАЗ-1,5.

Принципиально новым является источник ИОН-4 (рис.9).

При его разработке использован принцип мультиплицирования разрядных промежутков на большой площади. Источник содержит 61 ячейку диаметром 12 мм, каждая из которых генерирует ионный пучок. В итоге формируемый ионный пучок имеет диаметр 200 мм. Водоохлаждаемый анод явля-



ется общим для всех ячеек, а катод образуется многоштырьковой матрицей с гексагональным расположением штырей и многоячейстым катодом, выполненным из магнитомягкого материала. Магнитное поле между катодом и штырем в каждой ячейке создается общим соленоидом и составляет 0,05 - 0,1 Тл. Рабочий газ попадает в зону ионизации через промежуточную камеру между анодом и корпусом источника, что обеспечивает равномерное поступление газа в разрядные промежутки и, следовательно, идентичные условия для образования ионных пучков в каждой ячейке. Каждая ячейка генерирует ионный ток  $\sim 10$  мА, плотность ионного тока на расстоянии 200 мм составляет  $2 \text{ мА/см}^2$  при ускоряющем напряжении от 1 до 4 кВ. Неравномерность обработки поверхности неподвижных оптических деталей не превышает  $\pm 10$  %.



**Рис.9. Схема источника ИОН-4:**  
**1 - анод, 2 - матрица (катод), 3 - катод,**  
**4 - экран, 5 - корпус, 6 - соленоид.**

Ионный источник ИОН-4 содержит нейтрализатор заряда пучка, позволяющий полностью нейтрализовать заряженные частицы плазмы.

В качестве автономных источников ионов могут использоваться также источник Пеннинга [40], "Каллютрон" [41], источник с "седловидным" электрическим полем [42] и др. Однако в оптической технологии они могут применяться только для решения узких специальных задач, и останавливаться подробно на них не будем.

## 2.2. Ионно-плазменные методы обработки оптических материалов

Основным отличием методов ионно-плазменной обработки от ионно-лучевой является местоположение обрабатываемой детали относительно среды, в которой создаются ионы рабочего газа. При обработке ионными пучками, создаваемыми автономными ионными источниками, обрабатываемая деталь отделена от области газоразрядной плазмы. При ионно-плазменной обработке деталь помещается непосредственно в газоразрядную плазму, являющуюся источником бомбардирующих ионов.

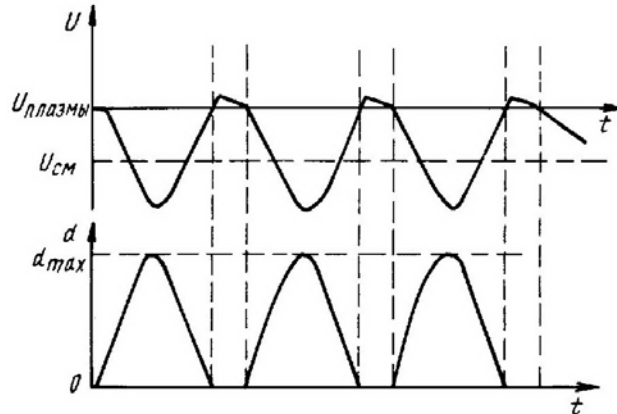
В свою очередь, ионно-плазменные методы можно разделить по способу возбуждения и поддержания электрического разряда на следующие группы: системы с самостоятельными (самоподдерживающимися) разрядами постоянного тока [43], высокочастотными разрядами (ВЧ) [44] и системы с искусственным поддержанием разряда, в которых разряд поддерживается с помощью вспомогательных средств (термоэлектронной эмиссии [45], ВЧ [46] и магнитных полей [47]).

Наибольший интерес для ионной обработки оптических диэлектрических мишеней представляет метод высокочастотного распыления. Андерсон [35] показал, что в трехэлектродной распылительной трубке с помощью внешнего ВЧ электромагнитного поля можно осуществлять чистку внутренних поверхностей стенок кварцевой трубки, т.е. проводить распыление диэлектриков. Позднее [47] Девидс и Мейселл определили, что такой же процесс можно реализовать и в диодной системе.

Итак, в вакуумную камеру непосредственно на металлическую пластину, служащую электродом, помещается диэлектрическая мишень. При подаче рабочего газа в камеру и ВЧ напряжения на электрод и промежутке между ВЧ электродом и вторым (земляным) электродом возбуждается самостоятельный газовый разряд низкого давления, плазма которого служит источником ионов. Разряд, возбуждаемый ВЧ полем, поддерживается за счет вторичных электронов, эмитируемых из электрода. Кроме того, при частотах выше 450 кГц [25] появляется еще один механизм генерации дополнительных электронов, обладающих энергией, достаточной для ионизации газа. Известно, что в ВЧ поле электрон колеблется со скоростью, сдвинутой по фазе на  $\Pi/2$  относительно напряженности поля и поэтому в среднем не может поглощать энергию. Но если за счет столкновения с атомами газа его движение становится хаотичным, то он может поглощать энергию поля, причем, двигаясь как по полю, так и против него. Благодаря этому ВЧ разряд может быть самостоятельным при давлении рабочего газа гораздо ниже, чем на постоянном токе, и с увеличением частоты поля это минимальное давление уменьшается. Так, при  $f = 13,56$  МГц,  $p_{\min} = 0,27$  Па использование дополнительного магнитного поля, параллельного ВЧ, позволяет еще более снизить  $p_{\min}$  за счет уменьшения концентрации электронов, уходящих на стенки из межэлектродного пространства.

В зависимости от знака ВЧ напряжения на электроде мишень подвергается либо ионной бомбардировке и соответственно, распыляется, либо электронной, в результате которой нейтрализуется поверхностный положительный заряд, накопленный за предыдущий полупериод.

С учетом того, что полный ток за период ВЧ поля через диэлектрик должен быть равен нулю, и за счет большей подвижности электронов по сравнению с ионами поверхность диэлектрической мишени смещается отрицательно относительно плазмы на некоторую величину  $U_{см}$ . Во времени потенциал поверхности изменяется как показано на (рис. 10.)



**Рис.10. Потенциал диэлектрической мишени и толщина ионной оболочки как функции времени**

Как результат этого смещения вокруг электрода образуется темное катодное пространство (ТКП), в котором имеется ионная оболочка, изменение толщины  $d$  которой во времени доказано на этом же рисунке. Потенциал смещения равен  $\frac{1}{2}U_{вч}\varepsilon$  [48], где  $U_{вч}$  пиковое значение ВЧ напряжения  $\varepsilon$  - безразмерный коэффициент который определяется из решения уравнений движения электронов и ионов в ВЧ поле, предполагая, что на частицы действуют две силы – постоянная, обусловленная  $U_{см}$ , и переменная, представляющая собой малые отклонения с частотой ВЧ поля.

Для одномерной модели ВЧ распыления которая характеризуется линейным распределением поля в ТКП и, соответственно, изменением потенциала по параболическому закону (рис.11), коэффициент  $\varepsilon = 0,9999 \approx 1$  для области давлений 0,2 - 2,7 Па.

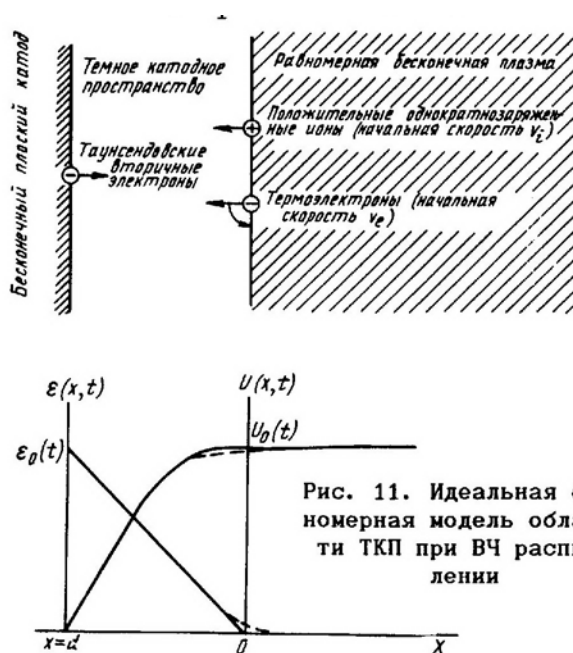


Рис. 11. Идеальная одномерная модель области ТКП при ВЧ распылении

С учетом  $U_{см}$  следует ожидать, что максимальное значение энергии ионов в ВЧ поле будет равно  $E = \frac{1}{2} e U_0$ , где  $e$  - заряд электрона;  $U_0$  - пиковое напряжение. Следует отметить, что  $U_{см}$  может служить приблизительной оценкой величины  $E$  иона, так как имеется некоторое распределение ионов по энергиям, которое зависит от многих факторов. Рассмотрим, как изменяется потенциал поверхности мишени [35]. Если предположить, что ионный ток не зависит от времени  $t$ , то потенциал поверхности за время, когда он отрицателен, будет уменьшаться по абсолютной величине со скоростью

$$dU/dt = i_i/C_i, \text{ где } i_i - \text{ ионный ток;}$$

$C_i$  - емкость мишени.

Типичные значения для этой скорости: для  $i_i = 20 \text{ мА/см}^2$ ;  $C_i = 20 \text{ мкФ/см}^2$ ;  $dU/dt = 10^9 \text{ В/с}$ , т.е. если уменьшение потенциала мишени из-за аккумуляции положительного заряда будет приблизительно 100 В за цикл, то частота  $f$  поля должна быть 10 МГц. Минимальная частота, при которой имеет место образование ТКП, составляет 10 кГц. В зависимости от частоты изменяется эффективность распыления из-за изменения средней энергии ионов. В целом иону требуется несколько циклов ВЧ поля для прохождения  $d$ , с увеличением частоты растет число этих циклов и соответственно увеличивается  $U_{см}$  ионов. С увеличением частоты также увеличивается число ионов, имеющих энергию, соответствующую  $U_{см}$ . Если же ион входит в ТКП, когда напряженность ВЧ поля близка к нулю, то его энергия при достижении мишени будет меньше, чем соответствующая напряжению смещения.

В промышленных ВЧ системах используют ВЧ генераторы, работающие на частотах 1,76; 5,28 и 13,56 МГц. Необходимо отметить, что для эффективной работы ВЧ генератора необходимо согласование ВЧ генератора с рабочей камерой [49, 50]. Ионную обработку можно осуществлять и при частоте 440 кГц. Некоторая потеря мощности системы компенсируется просто-

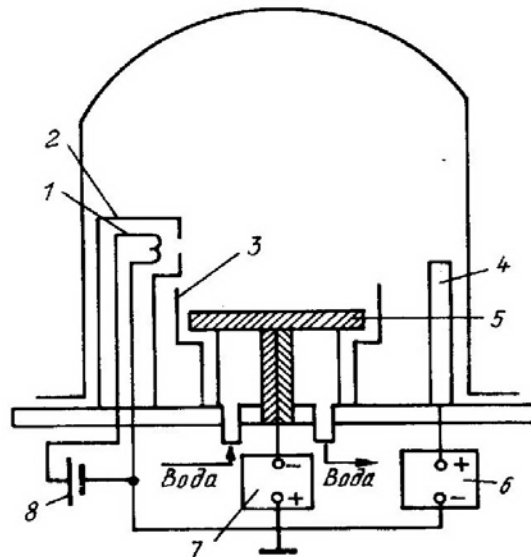
той согласования ВЧ генератора с рабочей камерой и безопасностью работы. В ВЧ диодной системе ( $f = 440$  кГц,  $p = 0,133$  Па):

Достоинством метода ВЧ диодного распыления является возможность обработки достаточно большой площади. Так, в установках фирмы Leybold Heraeus реализована площадь приблизительно 1 м. По поверхности обрабатываемой детали в ВЧ диодных системах наблюдается высокая однородность потока ионов.

В диодных системах электрод выполняет двойную функцию: с одной стороны он служит для поддержания разряда, с другой - местом, где располагаются обрабатываемые детали. Такое совмещение функций существенно снижает возможности самого процесса и его управления

Во-первых, ионной обработке можно подвергать только плоские диэлектрические образцы небольшой толщины ( $\leq 5$  мм). Во-вторых, попытка изменения скорости обработки ограничена областью существования разряда и связана с изменением его характеристик. В диодных ВЧ системах нельзя независимо регулировать энергию ионов, ионный ток и давление, проводить обработки при энергиях ионов менее 300 эВ, прекращать обработку без выключения разряда, контролировать и регулировать угол падения ионов на поверхность образцов. Но, с другой стороны, ВЧ диодные системы привлекают простотой, доступностью в реализации, имея в своем распоряжении ВЧ генератор (мощность несколько кВт) в указанном диапазоне частот, экспериментатор может самостоятельно создать распылительную установку, отвечающую специфическим требованиям, диктуемым конкретно решаемой задачей. Поскольку метод ВЧ распыления, конструкции установок и режимы работы подробно описаны в ряде работ, например [51], то здесь эти вопросы обсуждаться не будут.

Триодная система ионного распыления состоит из трех независимо управляемых электродов: термокатода, анода и мишени, на которой размещаются обрабатываемые образцы (рис.12). Разряд зажигается между термокатодом и анодом. При подаче на мишень постоянного или ВЧ напряжения из разряда экстрагируются ионы, бомбардирующие мишень. Поскольку в триодной системе процессы образования плазмы и распыления разделены, появляется возможность управлять энергией ионов в более широких пределах, чем в диодных системах с помощью напряжения, подаваемого на мишень. Если в диодных системах максимальная плотность ионного тока на мишень составляет  $1 - 5$  мА/см<sup>2</sup>, то в триодных системах  $15 - 20$  мА/см<sup>2</sup>, и это позволяет получать более высокие скорости травления материалов. Однако из-за малого размера термокатода трудно получить однородную плазму, что приводит к неравномерности травления образцов на поверхности. Кроме того, наличие накаливаемого термокатода не позволяет использовать при обработке оптических материалов химически активных газов.



**Рис.12. Схема триодной системы ионного распыления:**  
**1 - термокатод; 2,3 - экраны; 4 - анод; 5 - мишень;**  
**6,7,8 - источники питания**

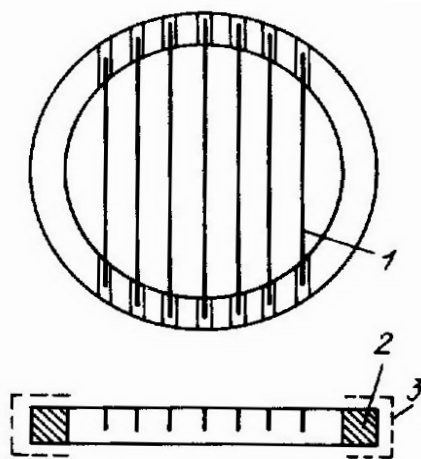
### **2.3 Ионная обработка оптических материалов с помощью ВЧ сеточного электрода**

В начале 70-х годов в ГОИ был разработан принципиально новый простой метод ионной обработки с помощью ВЧ сеточного электрода [33]. Метод сочетает простоту и надежность ВЧ распыления с возможностью обработки деталей сложной конфигурации и размеров. Схема установки для ионной обработки диэлектриков с помощью ВЧ сеточного электрода показана на рис. 16. В отличие от ВЧ распыления в данной схеме ВЧ напряжение подается не на деталь, а на сеточный электрод из проводящего материала, который подключен к ВЧ генератору через емкость. Обрабатываемая деталь устанавливается непосредственно за электродом. При определенном давлении рабочего газа между ВЧ электродом и заземленным анодом  $З$  возникает газовый разряд. При отрицательном напряжении на электроде ионы вытягиваются из плазмы разряда и бомбардируют электрод и диэлектрическую деталь, пролетая сквозь сетку. При положительном напряжении электрод и деталь бомбардируются электронами, которые снимают наведенный положительный заряд. Также как и при обычном ВЧ распылении, благодаря высокой подвижности электронов, положительное напряжение на электроде практически близко к нулю.

Важнейшим элементом данной схемы ВЧ распыления является сеточный электрод. Конструкция электрода, как показали эксперименты, определяет не только эффективность, но и возможность ионной обработки диэлектрической детали. В процессе работы сетка подвергается ионной и электронной бомбардировке, в результате чего происходит ее распыление и нагрев. Следовательно, материал сетки должен иметь небольшой коэффициент распыле-

ния, быть термостойким, а конструкция электрода должна обеспечить сохранение его формы при нагреве.

Эксперименты показали, что наиболее удачной оказалась сетка, составленная из металлических пластин шириной 2 - 4 мм и толщиной 0,3 - 0,5 мм (рис. 13).



**Рис.13. Конструкция ВЧ сеточного электрода:**

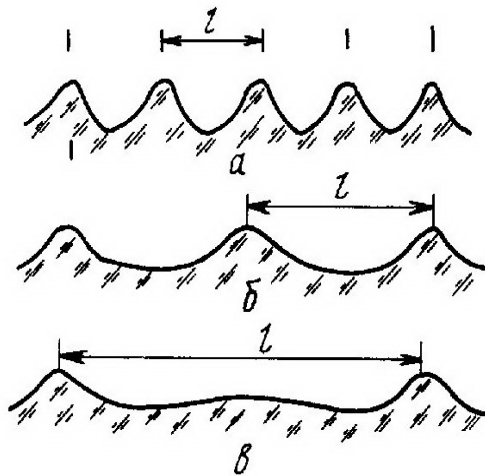
**1 - пластины электрода; 2 - обойма электрода; 3 - заземлённый экран.**

В качестве материала сетки использовался никель, молибден, тантал. Пластины свободно крепились в пазах держателя, что обеспечило полное сохранение формы электрода при нагреве и его жесткость. Кроме того, такая конструкция обеспечивает хороший теплоотвод от пластин, на массивный держатель сетки.

При использовании ВЧ электрода, состоящего из пластин, установлено, что скорость распыления электрода относительно мала. Распыляется, в основном, торцовая грань пластин, в то время как боковые грани распыляются незначительно. Как показали измерения размеров пластин после 1000 ч работы, боковые грани распыляются на порядок медленнее торцов. Следует отметить, что сетка из напряженной металлической проволоки вообще непригодна для изготовления ВЧ электрода, так как скорость ее распыления высока, в том числе за счет угловой зависимости. В результате в процессе обработки преобладающим оказывается нанесение на деталь распыляемого материала сетки. Чтобы исключить распыление нерабочих частей электрода, держатель пластин и все токонесущие элементы заключены в заземленные экраны.

Поскольку газовый разряд в описываемой системе поддерживается за счет электронной эмиссии из сеточного электрода, оказалось, что разряд обладает большей стабильностью, чем при ВЧ распылении диэлектриков. Эффективность обработки диэлектрической детали при этом зависит от расстояния между пластинами. На (рис.14) показан профиль съема поверхности стекла К8 между пластинами ВЧ электрода (толщина пластин - 0,5 мм, ширина - 4 мм, длина - 120 мм, рабочий газ - аргон, напряжение - 1,5 кВ, плот-

ность ионного тока -  $2 \text{ mA/cm}^2$ ) в зависимости от расстояния между пластинами. Максимальный съём при всех расстояниях оставался одинаковым при равном времени обработки.



**Рис.14. Распределение съёма материала образца между пластинами электрода при различных расстояниях между пластинами:**  
**а - менее 3 мм; б - 3 мм; в - более 3 мм.**

При малых (до 3 мм) расстояниях между пластинами имеет место значительная экранировка ионного потока элементами электрода. С увеличением расстояния между пластинами "прозрачность" ВЧ электрода растет при неизменной скорости распыления образца. Однако при расстоянии более 3 мм начинается уменьшение скорости распыления центральной части образца, при дальнейшем увеличении расстояния между пластинами участок детали в центре вообще бомбардироваться не будет. Для эффективности работы ВЧ электрода следует выбирать оптимальное расстояние между пластинами. В рассматриваемом случае оно составляет 3 мм. Эффективность работы электрода в плане оптимизации конструкции не зависит от напряжения в пределах 1-4 кВ, плотности тока  $1 - 4 \text{ mA/cm}^2$ , массы ионов от 20 до 130 а. е. Ширина пластин в пределах 2 - 4 мм не влияет на "прозрачность" электрода, т.е. не изменяет плотность ионного тока. Увеличение толщины пластин приводит к уменьшению "прозрачности" электрода, что можно использовать для управления съемом поверхности обрабатываемой детали.

Таким образом, оптимальные конструктивные параметры ВЧ сеточного электрода: ширина пластин - 4 мм, расстояние между пластинами - 3 мм, толщина пластин - 0,5 мм, материал пластин - молибден. Электрод такой конструкции, в основном, использовался при разработке технологии высокоточной размерной обработки и ионной ретуши.

Для проведения процессов ионной обработки в системе ВЧ сеточного электрода в ГОИ была спроектирована промышленная установка ПИОН-300 (рис.15) для обработки оптических деталей диаметром до 300 мм. Достоинством установок этой серии является их многофункциональность, т.е. на этих установках могут быть реализованы все процессы на базе методов ионной и



ионно-химической обработки - размерная обработка, формообразование, модификация поверхностных слоев, ретушь и др. В основе установки - вакуумный пост УВН-70 А1. Система откачки включает форвакуумный насос 2НВР-5ДМ и паромасляный насос Н-250/2500, совместное действие которых обеспечивает остаточное давление в рабочей камере  $(3 - 5) \cdot 10^{-3}$  Па.

Камера представляет собой вертикальный колпак диаметром 500 и высотой 700 мм с гидравлическим подъемником.

Система напуска рабочего газа в камеру состоит из смесительного баллона, соединенного с одной стороны через редуктор с газовым баллоном, а с другой через натекаТЕЛЬ с камерой. НатекаТЕЛЬ позволяет регулировать давление в камере в пределах  $10 - 10^{-3}$  Па. Вместимость смесительной колбы 20 л. К колбе возможно одновременное подключение трех газовых баллонов, что позволяет использовать газовые смеси. Колба снабжена моновакууметром и выдерживает максимальное давление 1 МПа.

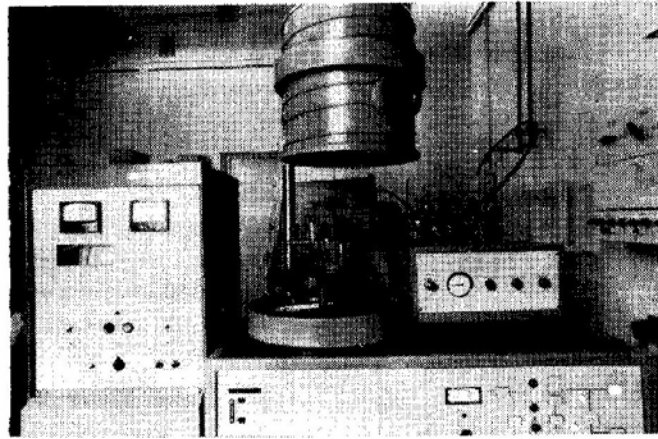
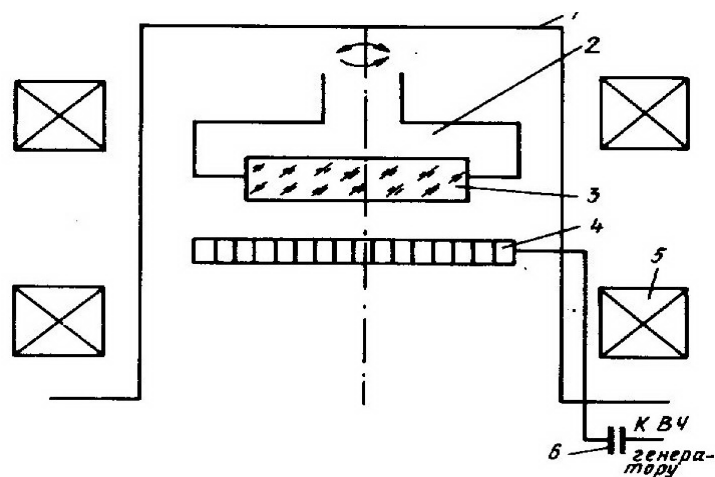


Рис.15. Установка ПИОН-300

Обрабатываемая деталь расположена над ВЧ электродом, что позволяет избежать экранирования ее поверхности частицами металла электрода. Расстояние между поверхностью детали и ВЧ электродом регулируется в пределах 1- 20 мм.



**Рис.16. Схема подколпачной арматуры:**  
**1 - вакуумная камера; 2 - держатель образца; 3 - образец;**  
**4 - ВЧ сеточный электрод; 5 - катушки Гельмгольца;**  
**6 - разделительный конденсатор**

Обрабатываемая деталь расположена над ВЧ электродом, что позволяет избежать экранирования ее поверхности частицами металла электрода. Расстояние между поверхностью детали и ВЧ электродом регулируется в пределах 1- 20 мм.

Для крепления деталей имеется набор оправ диаметров 300, 250, 200 и 150 мм для обработки одиночных деталей и оправы для одновременной обработки трех деталей диаметром 100 мм и 6 деталей диаметром 60 мм. Для групповой асферизации деталей подколпачное устройство представляет собой общий токопроводящий диск, содержащий посадочные гнезда, в которые вставляются самостоятельные сеточные электроды с масками, а детали закрепляются на едином держателе каждая соосно соответствующему электроду с возможностью вращения с постоянной скоростью от единого привода. Токопроводящий диск вставляется в заземленный экран и соединен с ним через три кварцевых изолятора, расположенных под углом  $120^\circ$ . Диск может перемещаться в своей плоскости относительно заземленного экрана и относительно держателя деталей с помощью котировочных винтов, которые обеспечивают совмещение оси окружности центров электродов с осью вращения центрального шпинделя держателя деталей с погрешностью 0,01 - 0,05 мм. Перемещение деталей осуществляется от электромотора через систему шестерен. При этом возможно вращение образцов и возвратно-поступательное перемещение в зависимости от характера требуемой обработки.

ВЧ сеточный электрод представляет собой сетку, состоящую из плоскопараллельных пластин толщиной 1 и шириной 6 мм, изготовленных из углеродистой стали (сталь 20). Пластины свободно вставляются в прорези держателя обоймы, что предотвращает от деформации в процессе обработки вследствие перегрева. Электрод выполнен в двух вариантах: в виде радиальной сетки с переменным по радиусу угловым расстоянием ( $a = 6^\circ$  для  $r \leq 100$  мм и  $a = 3$  для  $r > 100$  мм) и в виде прямой сетки, состоящей из равноотстоящих друг от друга пластин на расстоянии 6 мм. В случае использования радиальной сетки на поверхности вращающейся детали получают заданное распределение съема.

В установке предусмотрена возможность юстировки, которая обеспечивает несоосность электрода и оси вращения детали не более 0,05 мм. Прямая сетка позволяет осуществлять равномерный съем слоя с поверхности с сохранением ее первоначальной формы. При этом деталь совершает возвратно-поступательное движение. Катушки Гельмгольца позволяют повысить плотность плазмы разряда без увеличения остаточного давления за счет дополнительного продольного магнитного поля.

Блок управления установки выполнен в виде самостоятельной стойки, в которой содержится также выносной контур ВЧ генератора типа И0.60.0153 мощностью 10 кВт. Максимальное ВЧ напряжение - 10 кВ, частота - 440 кГц, остаточное давление в камере -  $10 - 10^{-1}$  Па.

В качестве рабочего газа могут использоваться как инертные, так и химически активные газы и их смеси.

В процессе обработки для получения воспроизводимых значений скоростей съема контролируются основные параметры режима: давление в рабочей камере, ВЧ напряжение, плотность ионного тока по величине разрядного тока. Индикатор ВЧ напряжения вмонтирован в стойку управления. Контроль разрядного тока заключается в измерении сигнала, индуцируемого в катушке, с помощью пояса Роговского связанной с токоведущим кабелем

Для обработки деталей диаметром до 500 мм сконструирована установка СМ-195 (ПИОН-500). Установка состоит из ВЧ генератора, выносного ВЧ контура, системы газоподачи (баллон для рабочего газа, в котором могут смешиваться до четырех газов) и набора подколпачных устройств для вакуумной установки ВУ-1А (ВУ-2М). Установка СМ-195 монтируется на вакуумную установку ВУ-1А (ВУ-2М). Подколпачные устройства обеспечивают равномерный съем по поверхности деталей диаметром до 500 мм. Кроме того, в состав установки входит подколпачная арматура для асферизации деталей диаметром до 500 мм.

Арматура для асферизации включает радиальный электрод диаметром 500 мм с системой экранов и держатель детали диаметром 500 мм. Держатель детали устанавливается соосно ВЧ электроду и вращает деталь с биением, не превышающим 0,05 мм. Для вращения держателя используется мотор и ввод вращения в вакуумную камеру, имеющийся на установке ВУ-1. В комплект установки СМ-195 входит: грузочная тележка, на которую деталь крепится в держатель, а затем с ее помощью держатель с деталью устанавливается в вакуумной камере/52, 53/

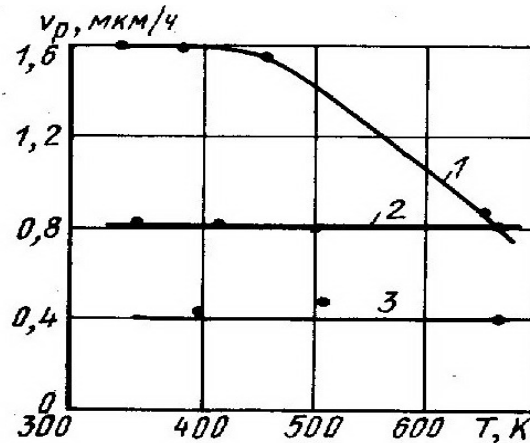
### Глава 3. Основные закономерности процесса ионного распыления диэлектриков

Поскольку эффективность процесса распыления характеризуется коэффициентом распыления  $S$ , при изучении явления физического распыления одной из главных задач исследователи считают получение корректных значений  $S$ . Однако для целей практического применения явления распыления, в частности, в оптической технологии, более удобной и информативной является другая характеристика процесса - скорость удаления поверхностного слоя (скорость съема), так как в конечном итоге практическая задача использования ионной бомбардировки сводится к получению заданных характеристик поверхности, как правило, ее топографии за счет селективного удаления поверхностного слоя на определенную глубину. Кроме того, существует ряд технологических факторов, оказывающих существенное влияние на скорость распыления материалов и не влияющих на коэффициент их распыления (например, плотность ионного тока, в некоторых энергетических интервалах температура мишени и др.).

Как уже указывалось, до 60-х годов XX века исследование процесса распыления осуществлялось, в основном, на металлических мишенях. Работы с диэлектриками были исключением [34]. Это связано с необходимостью нейтрализации поверхностного заряда диэлектрической мишени, накапливающегося после бомбардировки ее заряженными частицами. Создание системы ВЧ распыления [35] позволило осуществить легко и просто распыление и непроводящих мишеней. Кроме того, создание автономных ионных источников также позволило решить эту техническую задачу. После 1965 г. [2] заметно возрос интерес к распылению диэлектриков, преимущественно оптических материалов, с целью определения практических возможностей явления "ионной полировки". Основные закономерности процесса распыления определяются физической сущностью явления и носят универсальный характер. Однако для мишеней, относящихся к различным классам материалов, существует ряд характерных особенностей.

Поскольку ионная бомбардировка мишеней неизбежно вызывает нагрев последних, то особое внимание уделяется определению температурной зависимости характеристик процесса распыления. В работе [54] отмечалось для мишеней из кварца и сапфира увеличение скорости распыления ионами  $Ar$  (12 кэВ) при изменении температуры образцов в пределах (400 – 1200)°К. Такое поведение скорости распыления связывают с наличием механизма разрушения, состоящего в испарении из термических пиков. Однако в других работах наблюдалось совершенно противоположное влияние температуры на процесс. Например [55], при исследовании процесса распыления оптических стекол ионами  $Ar$  замечено, что при температуре образца К8 более 450°К наблюдается спад скорости распыления. В то же время для кварца и сапфира в области температур (350 – 700)°К скорость остается постоянной (

рис.17.) Аналогичный характер температурной зависимости скорости распыления сапфира и молибдена отмечен в работе [56] в области (350 – 750)°С. Авторы связывают уменьшение скорости распыления с увеличением скорости отжига дефектов решетки, образованных при бомбардировке. В зависимости от температуры изменяется скорость отжига, так как с увеличением температуры скорость отжига выше, то глубина проникновения иона в поверхностный слой мишени больше и скорость распыления меньше.

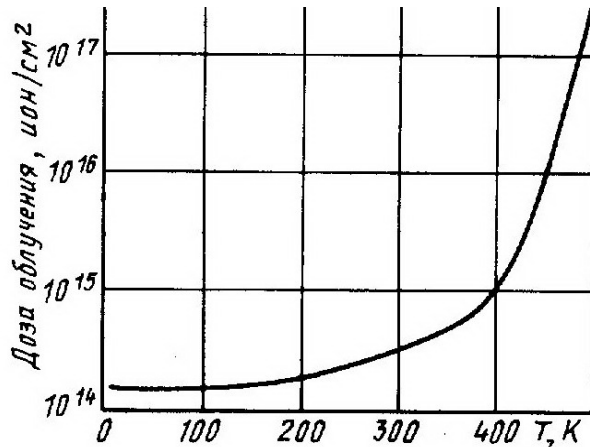


**Рис.17. Температурная зависимость скорости распыления образцов из стекла К8 (1), кварцевого стекла (2) и сапфира (3) ионами аргона**

Для относительно легкоплавких материалов, в том числе и стекла К8, достаточно быстрый отжиг имеет место при относительно низких температурах, а для тугоплавких материалов типа кварца и сапфира температура ниже 700°К недостаточна для заметной скорости отжига дефектов. Такое объяснение хорошо согласуется с общей теорией распыления. При бомбардировке поверхности мишени ионами порождается каскад смещенных атомов, которые являются дефектами решетки. Если за время, необходимое для попадания в дефектную зону следующей бомбардирующей частицы, дефекты не успевают рекомбинировать, то вся энергия последующего иона освобождается вблизи поверхности и идет на распыление. В противном случае последующий ион встречает снова упорядоченную структуру, и его энергия должна расходоваться на образование смещенных атомов. При исследовании процесса ионной бомбардировки полупроводников отмечено, что для каждой температуры образца, например Si, бомбардируемого ионами Ar существует критическая доза облучения [57], ниже которой не удастся получить аморфизированный слой. Эта критическая доза возрастает с температурой образца и, например, при температуре 500°К, становится практически бесконечной (рис.18). Этот факт является прямым подтверждением взаимосвязи процесса дефектообразования с процессом отжига дефектов.

Также при изучении радиационных дефектов и оптических свойств SiO<sub>2</sub> отмечено [58], что при бомбардировке SiO<sub>2</sub> наблюдается два наиболее существенных типа дефектов: вакансии кислорода и Si-дефекты. Методом

RBS определено, что изменение скорости отжига 0-дефектов заметно при температурах (100 – 400)°К, тогда как концентрация смещенных атомов Si заметно уменьшается при  $T > 400$  К. Эти результаты прекрасно коррелируют с приведенными выше. Необходимо отметить, что часто температурная зависимость скорости распыления может быть завуалирована другими эффектами; в частности, сложная картина возникает в области температур, в которой вероятен переход материала из одной фазовой модификации в другую, например для Fe[59].



**Рис.18. Зависимость критической дозы аморфизации кремния при его бомбардировке ионами аргона с энергией 1 кэВ от температуры образца**

Также при достаточно высоких температурах могут наблюдаться дополнительно к распыленным частицам испаренные. Однако в любом случае, поскольку ионная обработка - процесс энергетический, необходимо оценивать возможный нагрев поверхности образца и его влияние на характеристики процесса распыления.

Важным технологическим фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность процесса распыления, является состав рабочей газовой среды. На примере смеси Ar - He проведено исследование влияния присутствия более легкой инертной добавки (He) в основной газ. Оказалось, что при  $P_{He}/P_{Ar} < 1$  присутствие He практически не сказывается на скорости распыления оптических стекол. При дальнейшем повышении содержания He в смеси скорость распыления начинает падать, и при  $P_{He}/P_{Ar} \geq 4$  процесс распыления резко замедляется. При малом количестве He вследствие его более высокого потенциала ионизации ( $U_{He}^1 = 24,6$ эВ,  $U_{Ar}^1 = 15,8$  эВ) и меньшей вероятности ионизации ионный ток в основном определяется  $Ar^+$ . С ростом концентрации He плотность ионов He растет, и благодаря высокой подвижности они вносят существенный вклад в ионный ток. Эффективность же распыления этими ионами ниже из-за их малой массы.

Для определения требований к давлению остаточных газов в рабочей камере исследовалось влияние малых добавок  $O_2$ , воздуха и паров  $H_2O$  на эффективность распыления оптических стекол. При концентрациях добавок более 1% (табл.1) наблюдался резкий спад скорости распыления.

Пары воды легко диссоциируют в разряде ( $U_{дисH_2O} \approx 5$  эВ), освобождая при этом  $O_2$  и  $H_2$ . Действие  $H_2$  сводится к эффекту "отбора тока", т.е. ионы  $H_2$  вносят существенный вклад в состав ионного пучка, а распылительная способность этих ионов практически нулевая. Присутствие же кислорода способствует замещению атомов, распыленных из поверхностного слоя стекла атомами кислорода.

Аналогично. при исследовании влияния кислорода на распыление  $Al_2O_3$  ионами  $Cs^+$  [54] замечено, что при отношении скорости прихода остаточного кислорода к скорости вылета распыленных атомов (в том числе и  $O_2$ ), равном 1, скорость распыления изменяется слабо, так как, когда распыляются атомы  $O_2$ , то соседние атомы Al слабо связаны и легко удаляются. При отношении, большем 1, распыленный  $O_2$  замещается остаточным кислородом из среды, и скорость распыления резко падает. Было проведено также прямое сравнение влияния  $O_2$  на распыление Al и  $Al_2O_3$ . Оказалось, что скорость распыления резко уменьшается при добавке  $O_2$  даже при соотношении скоростей  $\ll 1$ , что объясняется образованием окисной пленки.

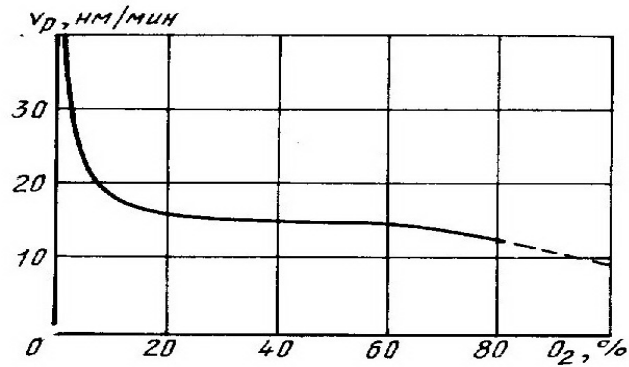
**Таблица 1**

**Влияние добавок кислорода и воды на эффективность распыления оптических стёкол**

Добавка	Содержание добавки, %	$\frac{v_{Ag+доб}}{v_{Ag}}$
$H_2O$	0,5	1
	1,25	2
	2,5	5
$O_2$	0,95	1
	0,93	0,5
	0,35	0,2

Такие же результаты влияния  $O_2$  получены в работе [60] по распылению стекла Пирекс 7740 (рис.19).

Роль  $H_2$  в распылении, например, пленок Ni - Cr в атмосфере Ag, подробно рассматривается в работе [61]. Влияние  $H_2$  объясняется эффектом отбора тока, приводя выражение скорости распыления с учетом соотношения подвижности Ag и  $H_2$  и их распылительной способности.



**Рис.19. Влияние добавок кислорода в рабочий газ на скорость распыления стекла Пирекс 7740**

Существенное влияние примесей  $O_2$  и  $H_2$  на процесс распыления отмечено в ряде работ [62], исследовавших процесс получения пленок методами распыления.

Таким образом, из приведенных результатов следует, что для получения воспроизводимых значений скоростей распыления необходимо обеспечить некий уровень чистоты рабочего газа и степень откачки рабочей камеры. Экспериментально показано, что при проведении процесса распыления при остаточном давлении  $\sim 0,133$  Па пренебречь влиянием остаточной атмосферы возможно, если предварительная откачка вакуумной камеры производится до давления не выше  $0,00133$  Па. При этом подаваемый в рабочую камеру газ следует подвергать осушке.

Одной из основных характеристик распылительной способности бомбардирующего иона является его энергия, так как именно она определяет эффективность разрушения материала мишени. Для диэлектриков типичная энергетическая зависимость коэффициента распыления приведена на (рис.20) [63], из которого следует, что зависимость имеет экстремальный характер. С увеличением энергии эффективность распыления растет, достигая максимума и затем начинает падать за счет увеличения глубины проникновения иона. В области энергий, близких к пороговым, рост  $S$  от  $E$  может быть описан квадратичным законом [64]. Численные значения, полученные различными авторами, трудно сравнивать, так как они получены в разных экспериментальных условиях.

Много экспериментальных результатов по распылению диэлектриков, в частности стекол, получены в технике тлеющего разряда. Энергия иона в этом случае понятие неоднозначное, так как в условиях тлеющего разряда имеется некоторое распределение ионов по энергиям. Ширина энергетического спектра ионов, приходящих на катод, является некоторой функцией  $F(U, M, d, f)$ , где  $U$  - пиковое значение напряжения,  $M$  - масса иона;  $d$  - величина ТКП;  $f$  - частота возбуждающего поля.



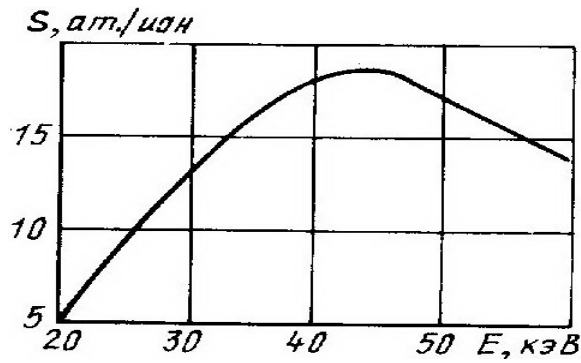


Рис.20. Энергетическая зависимость коэффициента распыления плавленного кварца

Много экспериментальных результатов по распылению диэлектриков, в частности стекол, получены в технике тлеющего разряда. Энергия иона в этом случае понятие неоднозначное, так как в условиях тлеющего разряда имеется некоторое распределение ионов по энергиям. Ширина энергетического спектра ионов, приходящих на катод, является некоторой функцией  $F(U, M, d, f)$ , где  $U$  - пиковое значение напряжения,  $M$  - масса иона;  $d$  - величина ТКП;  $f$  - частота возбуждающего поля.

Из анализа решения уравнений движения иона в ТКП следует [35], что энергетический разброс ионов, приходящих на катод, уменьшается с ростом  $M$ ,  $f$ ,  $d$  и уменьшением  $U_0$ . Однако с энергетической точки зрения ионы в тлеющем ВЧ разряде характеризуются  $E = \frac{1}{2}eU_0$ , где  $e$  - элементарный заряд.

Такую энергию приобретает ион, входящий в ТКП с нулевой скоростью, пройдя этот промежуток за время, равное  $1/4$  периода ВЧ поля, т.е. в некотором приближении можно считать зависимость скорости распыления от ( $U_0$ ) характеристикой влияния энергии иона.

На рис.21 представлена зависимость скорости распыления от  $U_0$  для стекла К8 и кварца в атмосфере Ag при плотности тока  $2 \text{ мА/см}^2$ .

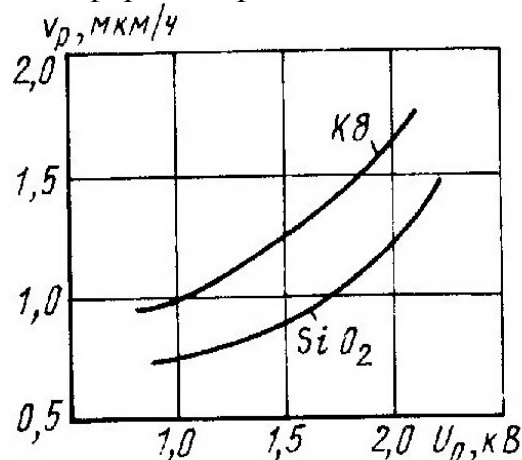
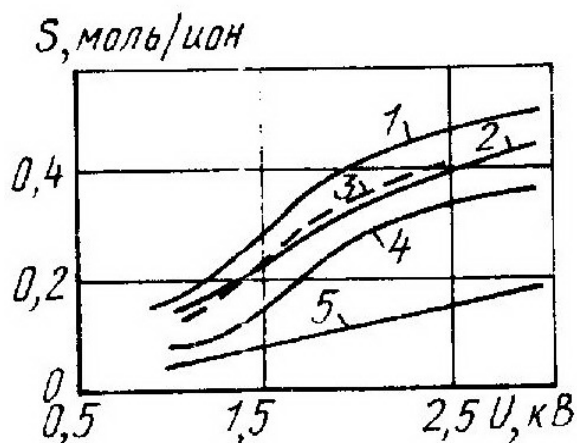


Рис.21. Зависимость скорости распыления стекла К8 и кварца от пикового ВЧ напряжения без учёта температурной зависимости

В работе [61] в качестве энергетической характеристики ионов в тлеющем разряде использовали эквивалентное напряжение постоянного тока, равное  $3/4 U_0$ . Зависимость коэффициента распыления стекла Пирекс, щелочного и кварцевого и  $Al_2O_3$  приведены на рис. 22 [63]. Результаты, представленные на рис. 21, 22, хорошо согласуются.

Уместно отметить, что повышение энергии ионов с целью интенсификации процесса распыления неизбежно ведет к увеличению разогрева бомбардируемого образца, и температурная зависимость скорости распыления может полностью сгладить энергетическую зависимость  $S$ .

Поскольку многие оптические стекла системы легкоплавки, то целесообразно выбирать для их обработки более "мягкие" режимы.



**Рис.22. Энергетическая зависимость коэффициента распыления кварца (1), стекла Пирекс 7740 (2), 7059 (3), щелочного (4), сапфира (5)**

В изыскании путей интенсификации процесса ионной полировки проведено исследование распыления материалов ионами различных газов Ne, Ne, Ar, Kr, Xe (рис.23). Так как при постоянстве плотности ионного тока в разных газах вследствие большой разницы в потенциалах ионизации (24,6 и 12,1 эВ для  $Ne^+$  и  $He^+$  соответственно) возможно отличие в распределении ионов по зарядовому состоянию, то по этим данным нельзя однозначно сказать о влиянии массы бомбардирующей частицы на скорость распыления. Из других исследований, в частности работы [65], следует, что из ряда используемых ионов Ne, Ar, Xe на кварцевой мишени максимальный коэффициент распыления дает Xe при энергии частицы 5, 6 кэВ.

Важной характеристикой процесса распыления является плотность ионного тока  $j$ . Влияние  $j$  на скорость обработки ряда оптических материалов в атмосфере Ar иллюстрируется (рис.24). Зависимость очевидная, так как с увеличением числа бомбардирующих ионов растет количество выбитых из мишени частиц вещества. При дальнейшем увеличении  $j$  рост скорости распыления замедлен, поскольку большие токи при  $U = const$  возможно реализовать лишь путем увеличения давления газа, а, следовательно, усиления роли обратной диффузии. Однако в интервале используемых плотностей тока

(1 - 4  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ), которым соответствует давление в рабочей камере 2,66 Па, величиной обратной диффузии можно пренебречь [66].

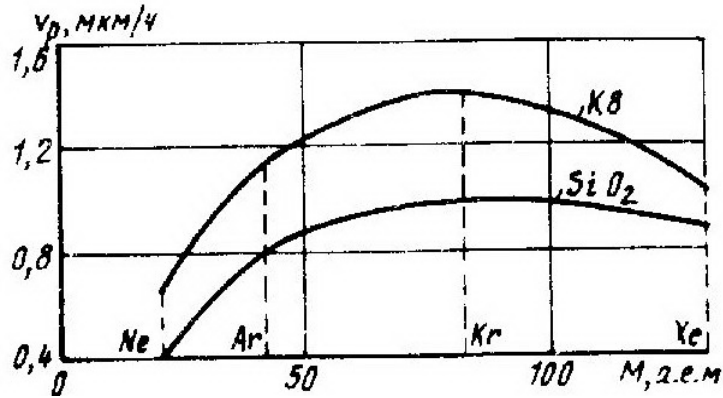


Рис.23. Зависимость скорости распыления стекла К8 и кварца от массы бомбардирующей частицы

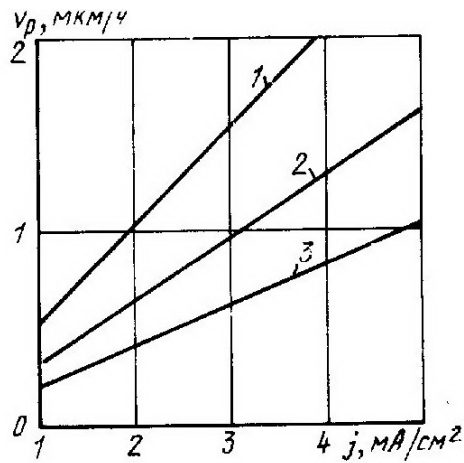


Рис.24. Зависимость скорости распыления стекла К8 (1), кварца (2) и сапфира (3) от плотности ионного тока

В табл. 2 приведены состав стекол и скорости их распыления ионами Ar с энергией 1 кэВ при плотности ионного тока  $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ .

**Таблица 2**  
**Скорости распыления стёкол разного состава в аргоне**

Состав	Марка	$v_p$ , мкм/ч
$SiO_2 - B_2O_3 - Na_2O - K_2O$	К8	1,0
$P_2O_5 - BaO$	ФК-14	1,2
$P_2O_5 - Al_2O_3 - K_2O$	ФК-1	1,8
$SiO_2 - B_2O_3 - Sb_2O_3 - K_2O$	ОФ-1	1,3
$SiO_2 - PbO$	ОФ-3	1,1
$SiO_2 - B_2O_3 - BaO$	ТФ-1	1,0

Из приведенных основных закономерностей взаимодействия инертных ионов с поверхностью диэлектрических мишеней следует, что процесс ионного распыления малоэффективен. Скорости распыления оптических материалов составляют величину порядка 1 мкм/ч, а это в свою очередь определяет диапазон возможных применений эффекта ионного распыления в технике.

## **ГЛАВА 4. Ионно-химическая обработка оптических материалов**

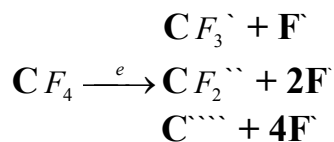
Существенным ограничением возможностей практического использования эффекта ионного распыления материалов является низкая производительность процесса, так как для оптических стекол скорость ионной обработки составляет 1 -2 мкм/ч. Из анализа основных закономерностей процесса распыления следует, что наиболее существенным фактором интенсификации ионной обработки является форсирование режимов за счет использования более высоких плотностей тока. Однако этот путь связан с дополнительным нагревом поверхности образца и, поскольку для оптических стекол эффективный теплоотвод в процессе ионной бомбардировки осуществить трудно, может привести к необратимой потере качества оптической поверхности.

Наиболее радикальный путь интенсификации процесса ионного распыления связан с использованием в качестве бомбардирующих частиц ионов, способных химически взаимодействовать с компонентами обрабатываемого материала с образованием устойчивых летучих соединений, т. е. с использованием ионно-химической обработки (ИХО). Впервые о ИХО Si и его соединений ( $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ) сообщалось в работе [67], где показано, что ВЧ газовая плазма ( $f = 13,56$  МГц) в атмосфере  $CF_4$ , т. е. содержащая активные частицы фтора, способна травить Si и его соединения. В работе отмечается,

что, хотя детали характеристик травления пока неизвестны, механизм травления является химической реакцией между Si и радикалами F. По условиям разряда ( $p_{\text{раб}} = 20 \text{ Па}$ ,  $W_{\text{вч}} = 200 \text{ Вт}$ ) можно отнести описанный процесс к плазмохимическому. Эта работа положила начало развитию принципиально нового направления в обработке материалов, однако предметом исследований являлись исключительно полупроводниковые материалы и решались задачи технологии полупроводниковой и микроэлектронной техники. Впоследствии ионно-химическое травление полупроводников развилось в мощное направление, которое позволило сделать резкий скачок в достижении предельных технических и эксплуатационных характеристик приборов и без которого в настоящее время современная микроэлектроника немислима. Имеется огромное количество оригинальных и обзорных статей, посвященных этому вопросу [4, 68]. Что же касается обработки оптических материалов с их специфическими требованиями, характеристикой поверхности, то такие исследования впервые были начаты в ГОИ в 1970 г., и до настоящего времени не имеется сообщений в печати, кроме разработок ГОИ, о практическом использовании ионно-химического полирования для решения задач оптической технологии.

Первые эксперименты по ИХО оптических стекол проводились в технике ВЧ тлеющего разряда в атмосфере смеси  $\text{Ar} + \text{Cl}$  и  $\text{SF}_6$ , в которых получено существенное увеличение скорости распыления стекол.

Максимальный эффект увеличения скорости обработки ожидается при использовании ионов, обеспечивающих образование устойчивых летучих соединений с возможно большим количеством компонентов обрабатываемого материала. Поскольку оптические стекла - системы многокомпонентные, то обеспечить условие летучести всех возможных продуктов химического взаимодействия практически нереально. Но, с другой стороны, все стекла, как правило, содержат  $\text{SiO}_2$ , поэтому естественно использовать для их обработки фторсодержащие газы, которые в разряде легко диссоциируют с образованием активных частиц. Например, молекула широко используемого газа в ИХО - фреон 14 ( $\text{CF}_4$ ), в плазме разряда диссоциирует по схеме



и суммарную реакцию травления  $\text{SiO}_2$  можно представить в виде  $\text{SiO}_2 + 4\text{F} \longrightarrow \text{SiF}_4 + \text{O}_2 \uparrow$ . Для стекол, содержащих окислы фосфора, бора летучими продуктами являются также фториды -  $\text{PF}_3$ ,  $\text{BF}_3$ ,  $\text{PF}_5$ . Анализ большого объема исследований в микроэлектронной и полупроводниковой технологии с фторсодержащими газами позволяет понять общие принципы ИХО и использовать опыт работы для правильной ориентации направлений исследования по ИХО оптических стекол применительно к специфике экспериментальной техники.

Простейшая модель ИХО стекол сводится к следующей. При бомбардировке поверхности материала химически активными ионами одновременно протекают два взаимосвязанных и взаимостимулирующих процесса: физическое распыление материала под действием бомбардировки ионами как частицами, обладающими определенной массой и энергией, и химическое взаимодействие компонентов материала с активными частицами. В результате совместного действия указанных механизмов взаимодействия скорость удаления поверхностного слоя резко возрастает по сравнению со случаем обработки инертными ионами, причем, наибольший эффект распыления наблюдается при оптимальном соотношении механизмов ударного и химического взаимодействия. Ионная бомбардировка, кроме физического распыления, способствует активизации поверхности образца за счет создания дефектов смещения, являющихся элементарным актом взаимодействия движущейся частицы с энергией выше пороговой, с атомами вещества, которые (дефекты смещения) служат центрами химической связи с активными частицами. Образование же летучих продуктов в процессе химических реакций на поверхности образца уменьшает энергию связи атома с объемом вещества, тем самым способствуя более интенсивному физическому распылению. Поэтому для эффективного протекания процесса ионно-химического распыления необходимо реализовать два условия: обеспечить достаточную концентрацию центров активности, т. е. обеспечить интенсивную бомбардировку поверхности ионами, а также создать достаточное количество химически активных частиц для заполнения генерируемых центров взаимодействия.

Стимулирующее действие ионной бомбардировки подтверждается экспериментально (табл. 3).

**Таблица 3**  
**Влияние ионной бомбардировки на скорость**  
**ионно-химического распыления кремния.**

Газ	$v_p$ , нм/мин
Ar	12
CF <sub>4</sub>	10
CF <sub>4</sub> + бомб.	90

Аналогично вклад химического взаимодействия может быть проиллюстрирован табл. 4 [69]. Химически инертное золото обрабатывается с приблизительно постоянной скоростью независимо от газа.

Естественно, что стимулировать поверхностные химические процессы возможно не только за счет ионной бомбардировки [70], но в химически активной плазме условия стимуляции реализуются автоматически. Оптимальные режимы обработки в условиях ВЧ тлеющего разряда во фторсо-

держающих газах выбираются из оптимизации соотношений физических и химических механизмов взаимодействия. В рабочем интервале давлений 0,13 - 1,33 Па длина свободного пробега основной частицы разряда в  $CF_4 - CF_3^+$  составляет 5 - 20 мм, а длина ТКП - 10 мм, поэтому приобретенная в ТКП энергия ионов практически не рассеивается, что гарантирует направленность ионного потока и его энергоемкость.

Выбранный интервал ВЧ напряжений (1,5 - 2,5 кВ) также неслучаен. Поскольку существенный вклад в скорость ИХО вносит химическое взаимодействие, то очевидно, что весьма значительную роль играют собственно поверхностные процессы, по сравнению с которыми физическое распыление является процессом объемным, хотя и захватывает слой менее сотых долей мкм. Если придерживаться принятой классификации дефектов твердого тела [71] на поверхностные и объемные, то поверхностные дефекты определяют абсолютное значение скорости ИХО, а объемные - ее относительное изменение.

**Таблица 4**  
**Влияние химического взаимодействия на скорость распыления материалов, нм/мин**

Материал	Ag	CF <sub>4</sub> + бомбардировка	CF <sub>4</sub>
Si	1	20	20
SiO <sub>2</sub>	1	29	22
Au	11	9	7,5

Поэтому для более интенсивного протекания процесса ИХО целесообразно подобрать такие характеристики ионов, чтобы их энергия освобождалась на глубине 1 - 10 ат. слоев, иными словами, ограничить глубину проникновения ионов 0,5 - 5 нм, что обеспечивается энергией 0,5 - 1,5 кэВ, т.е. при  $U_{вч} = 1,5 - 2,5$  кВ.

Токовый интервал 1-2  $mA/cm^2$  обеспечивает интенсивную бомбардировку поверхности, создавая поток ионов  $10^{-16} cm^{-2} c^{-1}$ . Учитывая, что время взаимодействия иона с атомом вещества составляет  $10^{-10} - 10^{-15}$  с [73], реализуемый ионный поток не насыщает всех связей поверхности, однако дальнейшее форсирование режима в условиях разряда связано со снижением общего давления в камере, что в свою очередь приведет к рассеянию пучка, т.е. к обратному эффекту.

Из ряда работ по исследованию механизмов ИХО следует, что основной активной частицей, обуславливающей высокие скорости обработки, является F. Из анализа скоростей обработки в гомологическом ряду [75] видно, что скорость травления коррелирует с фторемкостью молекулы (табл.5).

**Таблица 5**  
**Зависимость скорости травления кварца от**  
**фторёмкости молекулы плазмообразующего газа.**

Газ	F/C	$v_{тр}$ , нм/мин
$CF_4$	4,00	24,1
$C_2F_6$	3,00	14,7
$C_3F_8$	2,67	4,6

Аналогичные результаты получены и при ИХО стекла К8.

Зависимость скорости травления стекла К8 от состава плазмообразующего газа, мкм/ч:

$CF_4$  ..... 3,0

$CF_3$   $Cl$  ..... 2,2

$CHF_2$   $Cl$  ..... 1,3

Известный факт увеличения скорости травления Si при добавлении  $O_2$  связывается с увеличением концентрации атомов F в смеси  $CF + O$  при увеличении содержания кислорода. В частности, в работе [76] замечено непрерывное возрастание интенсивности характеристических линий F (704 нм) при добавлении  $O_2$  в пределах 15 % и последующий спад. Аналогичный вид имеет зависимость скорости травления от содержания  $O_2$  в смеси  $CF_4 + O_2$ , т.е. скорость травления Si коррелирует с концентрацией F.

В связи с этим целесообразно использовать газ с фторёмкими молекулами, например  $SF_6$  для получения более высоких скоростей обработки. В табл.6 приведены скорости съема поверхностного слоя для ряда стекол в атмосфере Ar,  $CF_4$ ,  $SF_6$ .



**Таблица 6**  
**Скорости ИХО стекол в среде различных газов, мкм/ч**

Стек- ло	Ar	CF <sub>4</sub>	SF <sub>6</sub>
кварц	1,0	3,6	3,5
К8	1,2	5,4	4,0
ФК-14	1,2	4,2	4,3
ФК-1	4,0	4,6	4,6
ОФ-1	2,0	3,6	3,6
ОФ-3	1,2	3,6	4,0
ТФ-10	1,5	3,6	4,5
ТФ-1	1,2	3,0	3,5
СТКЗ	1,1	3,0	3,0
ЛКБ	1,2	4,0	4,2

Интересен вопрос о том, какой фтор играет преобладающую роль в процессе ИХО: приходящий в ионном пучке или электрически нейтральный, находящийся в газовой фазе. Для выяснения этого проведен ряд экспериментов с ионами различной фторемкости (табл.7). Эксперименты проводились в технике тлеющего разряда. Количество свободного электрически нейтрального фтора в камере изменялось за счет присутствия либо отсутствия дополнительного магнитного поля. Прочие параметры режима оставались неизменными.

**Таблица 7**  
**Зависимость скорости распыления стекла К8 и кварца от состава плазмообразующего газа, мкм/ч**

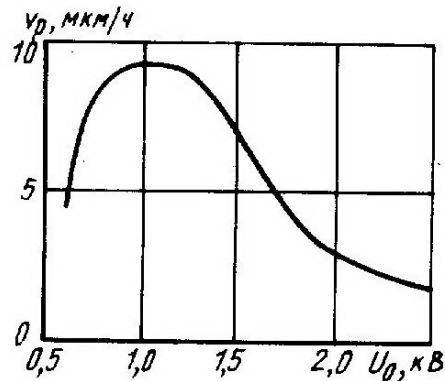
Газ	С магнитным полем		Без магнитного поля	
	К8	SiO <sub>2</sub>	К8	SiO <sub>2</sub>
Ar	0,6	0,5	-	-
CF <sub>4</sub>	2,6	2,0	3,5	4,1
SF <sub>6</sub>	3,0	2,6	4,4	7,0
C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> CF <sub>3</sub>	1,5	-	4,2	6,0

Из таблицы 7 следует, что в присутствии магнитного поля во всех газах скорость съема стекла К8 выше чем SiO<sub>2</sub>, т.е. здесь соблюдаются законы физического распыления, доминирующей является структура приповерхностного слоя. Совершенно противоположная картина наблюдается в отсутствие магнитного поля. Более легкоплавкий К8 имеет скорость, меньшую чем SiO<sub>2</sub>, причем различие в скоростях возрастает с увеличением F в молекуле

газа, т.е. с увеличением вклада химического взаимодействия. Следовательно, в этих условиях эксперимента определяющим является химический состав мишени. Однако при переходе к более фторнасыщенной молекуле  $SF_6$  скорости обработки несколько уменьшаются, по-видимому, здесь уже образуется слишком много легких фторсодержащих ионов, которые вносят существенный вклад в ионный ток, но их распылительная способность ниже, и они не в состоянии создать достаточно активную поверхность. Таким образом, еще раз подтверждается предположение о необходимости выполнения оптимального соотношения ударного и химического механизмов взаимодействия.

Исследовались основные закономерности процесса ИХО оптических стекол в системе ВЧ диодного распыления и в системе ВЧ сеточного электрода. Характер зависимостей одинаков в обоих случаях. В варианте ВЧ сеточного электрода наличие металлической сетки вносит особенности в процесс ИХО, в частности, необходимость анализировать возможность переосаждения нелетучих продуктов распыления и снижения за счет экранирующего действия осадка скоростей обработки. Подробно влияние сеточного электрода будет рассматриваться в главах, посвященных конкретным применениям ИХО для технологических целей.

Исследовалось влияние ВЧ напряжения на скорость процесса ионно-химической полировки на примере кварцевой мишени при сохранении постоянной плотности тока (рис.25).



**Рис.25. Зависимость скорости ионно-химического распыления кварца от пикового ВЧ напряжения**

При малых значениях ВЧ напряжения скорость распыления образца, подвергаемого ионной бомбардировке, и образца, помещенного непосредственно в плазму, практически равны (6,0 и 5,3 мкм/ч соответственно). Следовательно, при этих условиях ( $p = 1,33$  Па) превалирует химическое взаимодействие активных частиц плазмы, концентрация которых достаточно высока, с бомбардируемой поверхностью. С ростом ВЧ напряжения увеличивается доля материала, распыленного за счет физического механизма, и соответственно растет общая скорость ионно-химической обработки. При дальнейшем увеличении ВЧ напряжения скорость распыления образца падает, так как, во-первых, условие  $j = \text{const}$  при больших значениях ВЧ напряжения

реализуется с меньшим общим количеством газа в рабочей камере и соответственно свободного фтора, и, во-вторых, растет количество ионов с меньшей массой, т.е.  $CF_2^{++}$  ( $M = 50$  а.е.),  $CF^{+++}$  ( $M = 31$  а.е.), эффективность распыления которыми ниже по сравнению с ионами  $CF_3^+$  ( $M = 69$  а.е.).

Кроме того, с увеличением энергии ионов растет глубина их проникновения в поверхностный слой мишени, что также может привести к снижению скорости распыления.

**Таблица 8**  
**Зависимость скорости распыления кварца и стекла К8**  
**от времени обработки, мкм/ч**

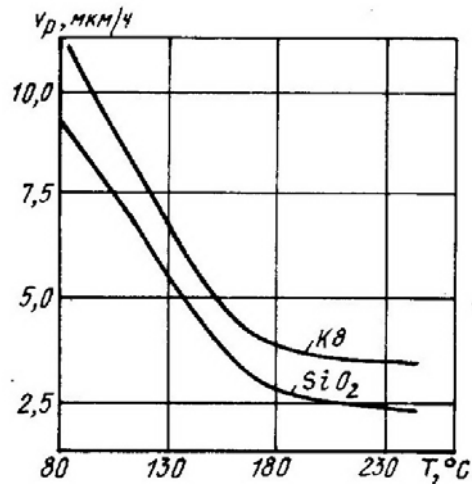
Время обработки, мин	К8	Кварц
1	10,8	9,0
5	7,2	6,3
10	3,6	3,0
15	3,6	3,0

Таким образом, варьируя значением ВЧ напряжения, можно изменять скорость процесса ИХО в широком диапазоне.

В работе [67] сообщалось об экспоненциальной зависимости скорости травления образцов из  $Si$ ,  $SiO_2$  от времени обработки в атмосфере  $CF_4$ . При проверке этого факта в системе ВЧ электрода получены данные, приведенные в таблице 8.

Из таблицы следует зависимость скорости распыления от времени обработки. Для того, чтобы исключить влияние на величину определяемой скорости поверхностного разрушенного слоя, опыт был повторен с мишенью, у которой предварительно ионной обработкой был полностью удален трещиноватый слой (2 мкм), оставшийся после абразивной обработки по методу глубокой шлифовки и полировки. И в этом случае характер зависимости сохранился.

Из анализа данных табл. 8 следует, что для стабилизации процесса необходимо некоторое время, которое в данном режиме ( $U_{ВЧ} = 2$  кВ,  $J = 2$  мА/см<sup>2</sup>) составляет 10 мин. В течение этого времени температура поверхности изменялась от 20 до 145°C и затем оставалась постоянной независимо от продолжительности обработки. Следовательно, влияние времени обработки на скорость процесса ионно-химического распыления связано с чисто температурным эффектом. Высказанное предположение подтверждается результатами серии опытов, посвященных определению скоростей обработки образцов из кварца и стекла К8 при различной температуре их поверхности, но одинаковом общем времени бомбардировки, равном 15 мин (рис. 26).



**Рис.26. Температурная зависимость скорости распыления стекла К8 и кварца в атмосфере фреона 14**

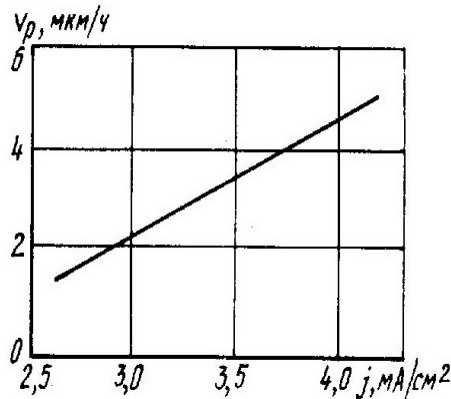
Как следует из анализа приведенной зависимости, влияние температуры при ИХО сказывается уже при малых значениях времени, причем и для стекол и для кварца. Очевидно, что в случае ИХО наличие дефектов в поверхностном слое материала еще более критично, чем при ионном распылении. Как отмечалось в работе [58], при ионной бомбардировке кварца заметный отжиг точечных дефектов типа 0-вакансий наблюдается при температурах менее 100 С. Именно это существенное изменение скорости отжига радиационных дефектов определяет температурную зависимость скорости ИХО. Интересно отметить, что характер зависимости  $v(T)$  для кварца и К8 совершенно одинаков независимо от их физических свойств. Это говорит о доминирующей роли поверхностных частиц, что характерно для химических процессов, т.е. при ИХО основной вклад в эффективность процесса вносят поверхностные явления в отличие от ионного распыления, которое является процессом объемным, и интенсивность которого, в основном, зависит от структуры поверхностного слоя.

Скорость ИХО весьма чувствительна к чистоте рабочего газа. Как и при ионной бомбардировке небольшие примеси воды (более 0,5%) приводят к резкому снижению скорости ИХО. Кроме участия в отборе тока, продукты диссоциации воды взаимодействуют с продуктами диссоциации рабочего газа, создавая дефицит химически активных частиц. Так как остаточный газ в вакуумных камерах при давлении  $1 \div 1,5 \cdot 10^{-2}$  Па состоит, в основном, из паров Н О, степень предварительной откачки может существенно влиять на процесс ИХО. Так, при остаточном давлении  $1,5 \cdot 10^{-2}$  Па скорость распыления  $SiO_2$   $V_p = 3,6$  мкм/ч, а при давлении  $3 \cdot 10^{-2}$  Па  $V_p = 2,4$  мкм/ч.

Скорость ИХО оптических стекол линейно растет с увеличением плотности ионного тока (рис.27).

Важным моментом при ИХО оптических материалов является вопрос сохранения качества исходной полированной поверхности мишени.

При распылении материалов под действием ионной бомбардировки в системе ВЧ электрода наблюдаемый эффект удаления поверхностного слоя образца представляет собой результат действия двух конкурирующих процессов - собственно распыления обрабатываемой поверхности и переосаждения на ней продуктов распыления электрода и детали. Поэтому для получения максимальной производительности процесса необходимо подбирать материал электрода из ряда слабораспыляющихся. В случае использования химически активных ионов, т.е. при ИХО, эта проблема становится еще актуальней. Необходимо анализировать возможные соединения материала электрода с компонентами газовой фазы. Например, традиционные материалы, используемые в технике ионной бомбардировки инертными газами (W, Mo, Ti), совершенно непригодны для ИХО, так как все они образуют летучие фториды и в результате электрод распыляется очень интенсивно. Поэтому для электрода желателен материал, образующий тугоплавкие фториды и карбиды (в атмосфере  $CF_4$ ), либо вообще инертный к активной плазме.



**Рис.27. Зависимость скорости распыления стекла К8 в атмосфере  $CF_4$  от плотности ионного тока**

С другой стороны, так как оптические стекла, как правило, системы многокомпонентные, то обеспечить условие образования летучих продуктов взаимодействия активных частиц плазмы со всеми компонентами не представляется возможным. В связи с этим существует селективность травления. Более того, тугоплавкие продукты распыления электрода могут, переосаждаясь на поверхности стекла, образовывать с его составляющими труднорастворимые комплексы, удаление которых возможно только за счет физического распыления. В результате, прежде всего, снижается скорость ИХО и, что особенно важно, ухудшается качество полированной поверхности.

Таким образом, для сохранения оптического качества поверхности обрабатываемой детали необходимо подбирать тройную комбинацию: рабочий газ - материал сетки - стекло, в которой нет условий для локальной пассивации бомбардируемой поверхности.

В атмосфере  $CF_4$  с использованием электрода из углеродистой стали-20 возможна ИХО стекол, в состав которых не входят окислы щелочных метал-

лов, с сохранением качества полированной поверхности. При этом скорость обработки кварцевого стекла составляет приблизительно 3 мкм/ч.

Электрод из стали достаточно устойчив к фторсодержащей среде, так как фториды железа трудно образуются. Кроме того, из-за того, что С и Si, входящие в состав стали -20, образуют летучие продукты, эффект переосаждения на детали слабо выражен при использовании стального электрода. Попытки использовались в качестве материала электрода Ni не показали его заметного преимущества по сравнению со сталью-20. Это связано с тем, что хотя Ni и не дает фторидов, скорость его физического распыления достаточно высока, так как он подвергается бомбардировке ионами значительной массы ( $CF_3^+$ ).

Таким образом, система  $CF_4$  - сталь 20 рекомендована для обработки деталей из безщелочных стекол [76].

При ИХО стекол, содержащих основные окислы  $Na_2O$ ,  $K_2O$  в системе ВЧ электрода, выполненного из стали 20 в атмосфере  $CF_4$ , происходит ухудшение качества оптической поверхности. При взаимодействии с фтором на поверхности образуются нелетучие фториды NaF ( $T_{пл} = 992^\circ C$ ) и KF ( $T_{пл} = 857^\circ C$ ). В результате этого появляется слой, вызывающий рассеяние света. С изменением режима обработки степень потери оптического качества различна. Так, при переходе к более мягким режимам, т.е. при обработке при низких плотностях тока, можно сохранить качество поверхности и таких стекол, но при этом скорость обработки низка настолько (1,5 мкм/ч), что нецелесообразно использование ИХО. Также при повышении ВЧ напряжения с сохранением неизменной плотности тока полированная поверхность в меньшей степени теряет качество, однако, и такой подход ведет к снижению скорости обработки. Таким образом, качество поверхности улучшается по мере уменьшения химического воздействия на поверхность. Однако даже в одном режиме обработки качество поверхности зависит от геометрии электрода, в частности, от расстояния между пластинами, образующими электрод. Очень хорошо эта зависимость просматривается при исследовании ИХО на радиальном сеточном электроде, который имеет переменное расстояние между пластинами вдоль радиуса.

При анализе распределения осадка при обработке неподвижной детали на радиальном электроде замечено, что потеря качества на некотором конкретном радиусе происходит не по всей поверхности и не в равной степени. Вблизи пластин поверхность полированная, а с удалением от пластины электрода в сторону следующей плотность осадка растет, достигает некоторого максимума и затем падает до полированной поверхности вблизи следующей пластины, т. е. качество поверхности зависит от интенсивности бомбардировки. Образующиеся нелетучие продукты взаимодействия NaF и KF и их возможные комплексы с компонентами электрода, в частности  $NaF \cdot MnF_4 \cdot H_2O$ ,  $KF \cdot MnF_4 \cdot H_2O$ , могут быть удалены только за счет физического распыления. Если же доля ударного воздействия недостаточна, указанные продукты взаимодействия накапливаются, образуя налет.

При анализе осадка, получаемого на неподвижной детали, вдоль радиуса видно, что положение максимума плотности осадка между пластинами изменяется и с увеличением линейного расстояния между последними. Начиная с 5 мм, появляется зона с менее плотным осадком, которая увеличивается по площади с дальнейшим удалением от центра электрода.

После проведенного анализа понятна картина радиального распределения осадка на вращающейся детали, которая очень хорошо коррелирует с радиальным распределением скорости ИХО.

Вблизи центра электрода, где максимальная концентрация ионов, интенсивность бомбардировки наибольшая, и, следовательно, достаточная для распыления нелетучих  $NaF$  и  $KF$ . Скорость же обработки в этой зоне невелика из-за малой прозрачности электрода. С удалением от центра прозрачность электрода увеличивается, интенсивность бомбардировки уменьшается, однако общая скорость растет за счет возрастающего вклада взаимодействия активных частиц, в особенности электрически нейтральных, т.е. из газовой фазы, с компонентами стекла. Таким образом, в зоне наибольшей скорости съема реализуются оптимальные условия взаимного стимулирования процессов физического и химического взаимодействия. С последующим удалением от центра доля химического воздействия резко падает из-за снижения интенсивности бомбардировки, вследствие чего снижается плотность осадка и наблюдается спад скорости ИХО. Следовательно, в различных зонах электрода соотношение ударного и химического механизмов распыления изменяется и, очевидно, изменяя геометрию электрода, возможно воздействовать на качество поверхности образца. Однако при процессе формообразования асферических поверхностей за счет маскирования пучка химически активных ионов неизбежно появляются зоны минимального раскрытия, где интенсивность бомбардировки низкая и, следовательно, возможно появление налета.

В связи с этим выбран иной подход для решения проблемы качества щелочесодержащих стекол. Исследовались смеси  $CF_4$  с инертным газом значительной массы ( $Xe$ ) для усиления ударного воздействия. Очевидно, что с увеличением содержания инертной добавки скорость ИХО в смеси  $CF_4 + Xe$  будет падать по сравнению с чистым  $CF_4$ , а качество поверхности улучшаться.

Поэтому существует оптимальный состав смеси, при котором качество удовлетворительное и скорость ИХО достаточно высокая, что экспериментально подтверждено. В табл.9 представлены значения скорости ИХО для стекла К8 в различных смесях и коэффициент светорассеяния обработанных поверхностей. Режим обработки:  $U_{вч} = 2$  Кв,  $j = 1$  мА/см<sup>2</sup>.

Из таблицы 9 следует, что оптимальным составом рабочего газа является смесь 80%  $CF_4 + 20\% Xe$ .

Необходимо отметить, что замена  $Xe$  на другой инертный газ, например  $Ag$ , не дает желаемого результата. Это связано с более высоким потенциалом ионизации  $Ag$  (15,6 эВ) по сравнению с  $CF_4$  (10 эВ). Поэтому при добавлении будет происходить разбавление рабочей газовой среды, т.е. объ-

емное соотношение газов в смеси не будет соответствовать соотношению ионов  $Ar^+$  и  $CF_3^+$  в ионном пучке, что приведет лишь к общей потере плотности тока.

**Таблица 9**  
**Скорости ИХО стекла К8 в разных газовых смесях**

Параметр	$CF_4$	$CF_4 + 10\% Xe$	$CF_4 + 20\% Xe$	$CF_4 + 40\% Xe$	100% Xe
Скорость ИХО, мкм/ч	3,5	3,0	2,8	2,1	1,3
Коэффициент светорассеяния, %	0,1	0,03	0,005	0,005	0,005

В случае же Хе из-за близких значений потенциалов ионизации (12,1 и 10 эВ) с  $CF_4$  состав сталь- 20; 80%  $CF_4 + 20\% Xe$  рекомендуется для ИХО деталей щелочесодержащих стекол.

Из анализа результатов проведенных исследований процесса взаимодействия химически активных ионов с поверхностью оптических материалов следует, что пути дальнейшей интенсификации процесса ИХО стекол лежат в использовании газовых сред, все ингредиенты которых летучи и которые образуют летучие соединения с компонентами обрабатываемого материала. Далее с учетом двоякого механизма эрозии поверхности и существенной роли химически активных, электрически нейтральных частиц, приходящих на поверхность образца из газовой фазы, очевидно, требуется индивидуальный подход в выборе режимов обработки для конкретного материала и среды с точки зрения максимально достижимых скоростей.

Таким образом, необходимо анализировать при выборе условий ИХО оптических материалов тройную систему: обрабатываемый материал - газовая среда - материал управляющих элементов (маски) и элементов источника с точки зрения сохранения оптического качества обрабатываемой исходной полированной поверхности.

В связи с интересом конструкторов оптических систем к ИК диапазону появляется необходимость разработки прогрессивных методов формообразования различных поверхностей на деталях из материалов, используемых в ИК области спектра, в частности, Si и Ge. Поэтому исследовался процесс ИХО Si и Ge в системе ВЧ сеточного электрода в атмосфере  $SF_6$ , Ar,  $CF_4$ .

По сравнению со случаем обработки в инертном Ar скорости травления указанных материалов возрастают при переходе к фторсодержащим газам (табл.10).



Из анализа результатов табл. 10 следует, что использование  $SF_4$  в данной системе для ИХО Si и Ge нецелесообразно. Известный прием повышения скорости за счет добавления  $O_2$  применять также нецелесообразно, так как продукты распыления сетки образуют тугоплавкие окислы, которые переосаждаются на поверхности полупроводников и тем самым затрудняют доступ ионов к поверхностным атомам и вызывают снижение скорости обработки.

**Таблица 10**  
**Скорости обработки кремния и германия в плазме разных газов, мкм/ч**

Газ	Si	Ge
Ar	0,8	1,5
$CF_4$	1,0	1,8
$SF_6$	7,5	10

В качестве рабочего газа также был испробован  $SF_6$ . Первоначальные эксперименты с 100%  $SF_6$  показали скорости обработки Ge до 20 мкм/ч, а Si до 12 мкм/ч. Однако качество поверхности заметно ухудшилось по сравнению с исходной полированной. Поэтому с целью улучшения качества исследовалась обработка полупроводников на примере Ge в смесях  $SF_6 + Ar$ . Качество поверхности оценивалось по коэффициенту светорассеяния. В табл. 11 представлены скорости обработки Ge в различных смесях и соответствующие коэффициенты светорассеяния.

**Таблица 11**  
**Скорости обработки германия в различных газовых смесях и коэффициенты рассеяния поверхностей**

Параметр	100% Ar	96%Ar+ 4% $SF_6$	94%Ar+ 6% $SF_6$	93%Ar+ 7% $SF_6$	92%Ar+ 8% $SF_6$	85%Ar+ 15% $SF_6$	80%Ar+ 20% $SF_6$
Скорость обработки, мкм/ч	2,6	4,9	6,7	6,9	7,1	9,5	8,3
Коэффициент рассеяния, %	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07	0,15	0,15

В присутствии химически активных фторсодержащих ионов, которые являются продуктами диссоциации  $SF_6$ , германий образует устойчивые лету-

чие фториды  $GeF_4$ . Для наиболее интенсивного протекания процесса ИХО необходимо обеспечить достаточно высокую концентрацию активных частиц и достаточно интенсивную бомбардировку поверхности ионами. При бомбардировке поверхности химически активными частицами происходит одновременно два взаимостимулирующих процесса - химическое взаимодействие с образованием летучих фторидов и физическое распыление продуктов взаимодействия ионами. Ударное воздействие, кроме того, активирует поверхность за счет образования центров активности, которыми служат дефекты смещения. Однако вследствие низкой энергии диссоциации  $SF_6$  в плазме разряда присутствует много легких фторсодержащих частиц. Поэтому для усиления ударного воздействия используется смесь  $SF_6$  с  $Ar$ . Оптимальное соотношение двух механизмов взаимодействия (физическое и химическое) реализуется при соотношении компонентов смеси 85%  $Ar$  + 15%  $SF_6$ . Однако из табл.11 видно, что при содержании  $SF_6 > 8\%$  коэффициент светорассеяния растет, что свидетельствует о потере оптического качества поверхности. Потеря качества при обработке Ge в атмосфере  $SF_6$  происходит из-за того, что наряду с летучими фторидами на поверхности образуются нелетучие сульфиды Ge, которые экранируют поверхность, что, в свою очередь, приводит к образованию рассеивающего слоя на поверхности образца.

Обеспечить условие эффективного удаления нелетучих продуктов взаимодействия из зоны обработки возможно за счет усиления доли ударного воздействия ионов. Поэтому, несмотря на то, что оптимальным с точки зрения максимально достижимой скорости обработки является смесь 15%  $SF_6$  + 85%  $Ar$ , для ИХО можно использовать смеси с  $SF_6$  с содержанием этого компонента не более 8 % .

## **Глава 5. Ионная полировка и ионно-химическая модернизация поверхности оптических материалов**

### **5.1. Методы исследования оптических поверхностей**

В 1965 г. было обнаружено, что при бомбардировке полированной поверхности плавленого кварца ионами ксенона с энергией 1 мэВ качество поверхности кварца улучшилось, уменьшилась высота микронеровностей поверхности и рассеяние [2]. Этот процесс был назван ионной полировкой. В период с 1965 г. по 1970 г. появилось несколько работ по исследованию и применению данного процесса, которые не вышли за рамки лабораторных исследований. Подавляющее большинство исследователей работало с ионными пучками с энергией ионов в десятки и сотни кэВ.

В тот же период в ГОИ были начаты исследования процесса ионной полировки важнейших оптических материалов, прежде всего, используемых в квантовой электронике [79]. При этом использовались ионы с энергией не более 5 кэВ. Уже первые результаты показали, что ионная обработка является эффективным способом улучшения поверхностных свойств оптических материалов и открывает перспективы целенаправленного изменения свойств поверхности стекла, кристаллов, полупроводниковых материалов и оптической керамики.

Поверхность оптической детали характеризуется следующими основными параметрами: формой, шероховатостью, чистотой, микрорельефом.

Основные методы контроля формы поверхностей, получаемых ионной обработкой интерферометрические. Анализируется интерференционная картина, возникающая в клиновом воздушном промежутке, образованном контролируемым образцом плоским свидетелем. Как правило, измерительная схема реализуется на базе микроскопа УИМ-23.

Чистота поверхности, т.е. наличие царапин, точек и их размеры оцениваются согласно ГОСТ11141 - 84.

Шероховатость поверхности измеряется на интерферометре МИИ-4, МИИ-11 и на профилографах по стандартным методикам [80]. Последний метод в настоящее время хорошо развит и широко используется в оптической технологии. Для описания реальных поверхностей разработано большое количество параметров шероховатости, которые можно разделить на три группы: амплитудные - результат изменения профиля в горизонтальном направлении, интервальные - результат изменения профиля в вертикальном направлении и смешанные параметры, характеризующие как амплитуду, так и интервал отклонений формы поверхности. Современные профилометры, лучшими образцами которых являются Talystep и Talysurf фирмы Rank Taylor Hobson (Великобритания) позволяют регламентировать поверхности с разрешением 100 нм.

Многочисленные исследования поверхностей, подвергнутых ионной бомбардировке, показали, что при взаимодействии ионов с твердым телом наблюдается изменение микрорельефа поверхности [4]. Подобные изменения интересны не только с точки зрения физики, но имеют важное техническое значение, особенно в тех случаях, когда используются поверхностные свойства материала (фотоэмиссионные, катодолюминесцентные и т.п.), или, например, при создании элементов интегральной оптики. Если не контролировать изменение морфологии и не анализировать причины их порождающие, то при интерпретации данных о свойствах поверхности могут возникнуть серьезные ошибки.

Первые исследования морфологических изменений поверхности оптических материалов при ионной обработке проводились путем прямых визуальных наблюдений, основанных на том, что ионное распыление часто приводит к изменениям оптического отражения (релеевского рассеяния). Светорассеяние можно измерить на приборах ЮС-36, ИФ-136 и на специальном стенде, позволяющем снимать индикатрисы рассеяния [81].

Наиболее полную информацию о морфологическом состоянии поверхности может дать метод просвечивающей электронной микроскопии, главным образом, метод реплик.

Возникновение при ионной обработке геометрического рельефа существенным способом влияет на оптические свойства поверхности, механическую и лучевую прочность, электрооптические характеристики.

Одним из наиболее тонких и чувствительных методов исследования поверхности является эллипсометрия [82]. Метод основан на анализе изменения поляризации света в результате его взаимодействия с поверхностью. Изменение поляризации описывается двумя параметрами  $\psi$  и  $\Delta$ , которые связаны в основное уравнение эллипсометрии  $tg \psi e^{-i\Delta} = p$ , где  $p$  - относительный коэффициент отражения поляризованного света, который рассчитывается с учетом многих параметров (граничащие среды, шероховатость и т.д.);  $\psi$  и  $\Delta$  обычно называют поляризационными углами и они могут быть определены экспериментально.

Поскольку  $\psi$  и  $\Delta$  являются функциями оптических и геометрических параметров исследуемого слоя, определение их дает возможность оценки его толщины и показателя преломления.

Необходимо подчеркнуть, что эллипсометрические измерения не являются прямыми, поскольку связь между измерениями и расчетными величинами зависит от конкретного вида отражающей системы. Поэтому при проведении исследований эллипсометрическим методом в общем случае необходимо решить три взаимосвязанные задачи:

- выбрать несколько вариантов моделей отражающих систем, наиболее близких к реальному объекту исследования, и вычислить теоретическое значение  $p$  при заданных параметрах выбранных моделей;

- экспериментально определить значения поляризационных углов  $\psi$ ,  $\Delta$  и  $p$  при изменении одного или нескольких условий измерения, например, при нескольких углах падения;

- сравнить вычисленные и экспериментальные значения  $\psi$  и  $\Delta$ .

Совпадение с заданной точностью измеренных и вычисленных значений поляризационных углов  $\psi$  и  $\Delta$  при изменении, например, угла падения светового пучка будет свидетельствовать о правильности выбора модели этой системы. Адекватность модели и реальной поверхности можно считать доказанной только в том диапазоне изменений параметров, в котором они проверялись экспериментально.

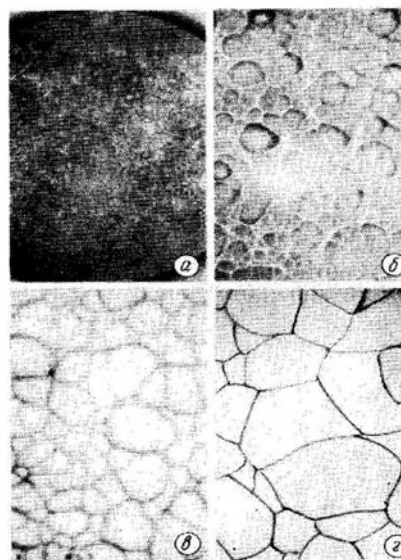
Эллипсометрия в явной форме дает информацию только об оптических свойствах и толщине поверхностных слоев. Однако с помощью характеристик, полученных при эллипсометрических измерениях, можно косвенно ответить и на вопросы, касающиеся как состава, так и структуры поверхностных слоев, образующихся при обработке на поверхности оптических материалов.

Наиболее совершенными и широко применяемыми в настоящее время являются эллипсометры типа ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3М с предельной погрешностью определения параметров  $\psi$  и  $\Delta$  не более 1-2'.

В ряде случаев при исследовании поверхности после ионной обработки проводят рентгеноскопические, электрографические и другие специальные исследования.

## 5.2. Ионная обработка шлифованных поверхностей

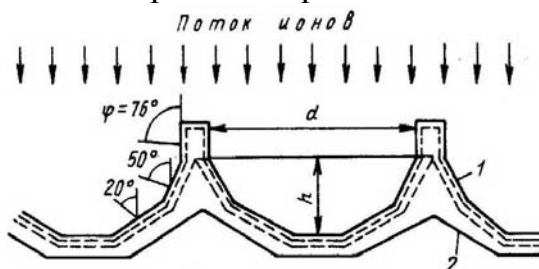
Ионная обработка шлифованных поверхностей изучалась с целью выяснения возможности получения из них полированной поверхности. Оказалось, что под действием ионной бомбардировки шлифованная поверхность несколько осветляется, высота микронеровностей уменьшается, на поверхности появляются характерные образования типа сегментов, сфер, лунок. По мере увеличения длительности ионной обработки, диаметр сегментов, лунок растет. Однако при достижении съема поверхностного слоя определенной глубины состояние поверхности стабилизируется, и дальнейшая обработка не ведет к существенным изменениям качества поверхности. Изменение состояния поверхности стекла от длительности обработки показано на рис.28 (стекло К8, предварительная обработка шлифовальным порошком М10, рабочий газ Ar, энергия ионов 1,5 кэВ, средняя высота микронеровностей 1 мкм). Такое изменение шлифованной поверхности под действием ионной бомбардировки объясняется тем, что коэффициент распыления материала зависит от угла падения ионов (см.рис.3).



**Рис.28. Шлифованные поверхности стекла К8 (увеличение  $200^x$ ):**  
**а - исходная поверхность; б - съем материала ионной обработкой 5 мкм;**  
**в - 13 мкм; г - 20 мкм**

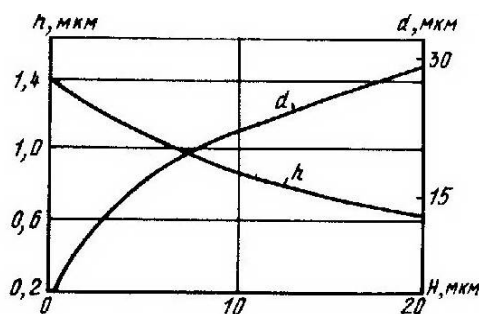
При ионной бомбардировке шлифованных поверхностей определяющим является угол падения иона не на поверхность образца, а на поверхность отдельной микронеровности. На рис.29 показана схема распыления микронеровности на поверхности [79].

Поскольку коэффициент распыления растет с увеличением угла падения, с наибольшей скоростью будут распыляться боковые грани микронеровностей, причем скорость съема вещества будет тем больше, чем больше угол падения ионов  $\theta$  на поверхность грани.



**Рис.29. Распыление микронеровностей при ионной бомбардировке:**  
**1,2 – профили микронеровностей до и после ионной обработки;**  
**--- промежуточные стадии**

При  $\theta = 70^\circ$  скорость распыления будет превосходить скорость распыления при нормальном падении в 6 – 9 раз, а при  $\theta = 30^\circ$  всего на 30 – 40 %. Таким образом, при длительной ионной бомбардировке микронеровности полностью не исчезают, а приобретают вид (рис.38), соответствующий поверхностным дефектам, полученным экспериментально. Зависимость средней глубины и среднего размера сегментов (лунок) от глубины съема при ионной обработке даны на рис.30.



**Рис.30. Зависимость средней глубины h и среднего размера d сегментов, лунок от глубины съема материала при ионной обработке**

Таким образом, под действием ионной бомбардировки состояние шлифованной поверхности существенно меняется, однако получить полированную поверхность путем бомбардировки шлифованной не удастся. В работе [83] исследована возможность полировки шлифованных поверхностей ионными пучками с энергией 50 кэВ при скользких углах падения. Обнаружено, что из-за экранировки части поверхности образца микронеровностями и

неравномерности распыления самих микронеровностей образуются борозды в направлении ионного пучка. Сканированием ионного пучка или вращением образца также не удастся получить полированную поверхность. Изменение режимов ионной обработки, использование ионов различной массы не изменит окончательного вида поверхности, поскольку определяющим фактором, влияющим на рельеф поверхности при ионной бомбардировке, является угол падения ионов, от которого зависит скорость распыления.

### **5.3. Ионная обработка полированных поверхностей**

Ионная бомбардировка полированных поверхностей стекла К8 со средней высотой микронеровностей 5 - 10 нм при съеме поверхностного слоя глубиной до 20 мкм не приводит к ухудшению качества оптических поверхностей [79, 84]. Высота микронеровностей не возрастает. Измерение светорассеяния на приборах ЮС-36 и ИФ-13 с применением лазерного пучка и другими методами показали, что светорассеяние полированной поверхности после ионной обработки не увеличивается. Появление новых дефектов типа царапин, точек, что характерно для химического травления, при ионной обработке не наблюдалось при съемах поверхностного слоя до 20 мкм. Однако имеющиеся на полированной поверхности дефекты типа царапин, ямок и т.д. не удаляются, а только сглаживаются, расширяются. Несмотря на увеличение размеров дефектов, светорассеяние поверхности снижается в результате сглаживания профиля дефектов.

Исследования полированной поверхности с помощью электронной микроскопии [84] показали, что микрорельеф поверхности стекла К8, кварца и кристаллов (граната, сапфира, ниобата  $Li, Ba F_2$  и др.) при ионной обработке улучшается. Единственный вид микродефектов, который возникает на поверхности при ионной обработке, это дефекты, связанные с ее экранировкой. При попадании на обрабатываемую поверхность твердых частиц после ионной обработки на их месте образуются дефекты типа бугорков. Для устранения этих дефектов необходимо тщательно очищать исходные поверхности от пыли и содержать в чистоте вакуумную камеру, т. е. соблюдать вакуумную гигиену.

На поверхности оптических элементов после механической обработки (шлифовки и полировки) всегда имеется дефектный слой, глубина которого соответствует размеру зерна абразива и подповерхностного трещиноватого, глубина которого в 5 - 10 раз больше. Согласно работе [85] глубина трещиноватого слоя стекла К8 после глубокой шлифовки и полировки составляет 1-2 мкм, средняя высота микронеровностей на поверхности  $\sim 5$  нм. Трещиноватый слой хорошо выявляется химическим травлением. После удаления поверхностного слоя глубиной 0,1 мкм на поверхности проявляются характерные дефекты: царапины, точки и т.д., что свидетельствует о наличии трещиноватого слоя.

Удаление дефектного слоя методом ионной обработки позволяет получать поверхности, близкие по составу, структуре и свойствам материала в объеме.

Особое значение приобретает ионная полировка при обработке поликристаллических оптических материалов, прежде всего, тех, которые используются в качестве активных сред при создании лазеров (сапфир, рубин, гранат и др.). Удаление трещиноватого слоя позволяет значительно повысить стойкость этих материалов к лазерному излучению.

В то же время ионная бомбардировка создает в поверхностном слое так называемый "измененный" слой. Толщина этого слоя по данным исследований, проводимых на "идеальных" образцах, т. е. на образцах, свойства которых идентичны свойствам в объеме, соответствует при энергиях ионов до 5 кэВ двукратной глубине проникновения ионов (2- 10 нм). На реальных оптических поверхностях, прошедших механическую обработку, слой, наведенный ионной бомбардировкой, значительно больше.

В настоящее время существует очень мало методов прямого наблюдения изменения поверхности, в частности, рельефа на атомном уровне. Это спектроскопия рассеяния медленных ионов (РМИ) [86], дифракция медленных электронов (ДМЭ) [87]. Так, исследования методом ДМЭ мишеней из германия, обработанных ионами инертных газов с энергией 1кэВ, показали полное разупорядочение поверхностей. Этими же методами установлено, что повышение температуры обрабатываемой детали в процессе ионной бомбардировки ведет к отжигу наведенных дефектов.

Для различных материалов можно подобрать такой режим обработки, при котором глубина измененного слоя будет минимальной. Создание таких практически бездефектных поверхностей необходимо при изготовлении элементов силовой оптики, интегральной оптики, при исследовании поверхностей твердых тел оптическими методами и для целого ряда других применений.

#### ***5.4. Изменение свойств поверхностей под действием ионной бомбардировки***

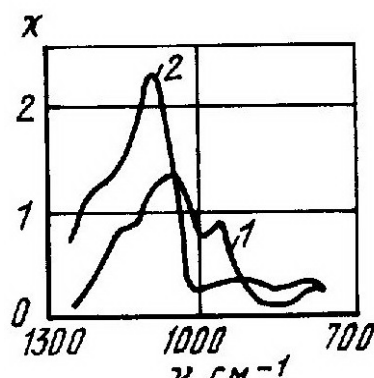
Бомбардировка поверхности твердого тела ионами сопровождается распылением обрабатываемого материала. Скорость распыления зависит от условий обработки и свойств обрабатываемой поверхности. Бомбардировка стекла имеет свои особенности. Прежде всего, оптическое стекло, как правило, является многокомпонентной системой. В поверхностном слое компоненты имеют различную скорость распыления, поскольку разные атомы имеют различную энергию связи с поверхностью твердого тела. В результате в поверхностном слое происходит преимущественное распыление компонентов, имеющих меньшую энергию связи и меньшую массу. Кроме того, в микрорегионах бомбардируемого образца, где температуры на короткое время



( $10^{-11}$  с) достигают  $10^3 - 10^4$  К, может произойти диссоциация химических соединений.

Многие, сравнительно неустойчивые окислы, которые могут входить в состав стекла, в условиях бомбардировки теряют кислород ( $F_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $PbO$  и др.) [32].

При обработке свинцовосодержащего стекла марок ТФ, 6Ба4 в поверхностном слое происходит диссоциация окисла свинца, определяющая появление поглощения и электрической проводимости стекла [88]. Исследование поверхности методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) [89] показало, что бомбардировка ионами аргона с энергией 1 кэВ приводит к повышению показателя преломления с 1,48 до 1,73, что, очевидно, связано с восстановлением свинца из окисла при ионной обработке. Увеличивается поглощение и щелочносиликатного стекла NaAl-2704 (рис.31).



**Рис.31. Изменение поглощения щелочно-силикатного стекла при ионной бомбардировке ионами Ar с энергией 1 кэВ: 1, 2 - исходная и обработанная поверхности**

Дополнительная обработка поверхности ионами кислорода восстанавливает оптические свойства стекла, сохраняя при этом свойства модифицированной инертными ионами поверхности. Исследование поверхностного слоя щелочно-силикатного стекла NaAl-2704 после ионной обработки в аргоне с энергией ионов 1-2 кэВ показали, что поверхностный слой обедняется натрием, и на поверхности образуется пленка кремнезема, образованная конденсированными мостиками  $\equiv Si - O - Si \equiv$

Аналогичное обеднение поверхности щелочными компонентами и углеродом наблюдалось и на свинцовосодержащих стеклах, что приводило к увеличению эмиссии электронов с поверхности этих стекол и было использовано для повышения ионной обработкой коэффициента вторичной электронной эмиссии стекла 6Ba4 [86].

Образование на поверхности твердых тел в результате ионной обработки измененного слоя существенно влияет на химическую активность поверхности. Так, ионную бомбардировку в атмосфере инертных газов используют для повышения коррозионной стойкости металлов. Ионная обработка в атмосфере химически активных ионов (азот, кислород) приводит к образованию

пассивирующих пленок, на поверхности кремния в атмосфере азота образуется пленка  $Si_3N_4$  [87].

При ионной бомбардировке полупроводников в атмосфере инертных газов в поверхностном слое из-за низкой радиационной стойкости образуется большое число разорванных связей, структура нарушается, и в некоторых случаях поверхность аморфизуется, что наблюдалось при обработке кремния и германия. Это способствует высокой химической активности поверхности. Было замечено, что подвергнутые ионной обработке образцы кремния, германия, антимонида индия и др. при соприкосновении с воздушной средой покрываются матовой пленкой, поэтому их необходимо после ионной обработки некоторое время выдерживать в вакууме и при вскрытии вакуумной камеры напускать осушенный воздух или инертный газ. Это же необходимо при ионной обработке нестойких стекол.

Создание радиационных дефектов, структурные и химические превращения, происходящие в результате ионной бомбардировки, сопровождаются изменением оптических свойств материалов. Как указывалось выше, у свинцовосодержащих стекол появляется поглощение. Поглощение наблюдается и при ионной обработке  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $Ba F_2$  и др. Полупроводниковые кристаллы кремния и германия при определенных режимах обработки покрываются "молочной" пленкой.

Ионная бомбардировка влияет также и на отражение от поверхности твердого тела. Во-первых, коэффициент отражения света изменяется из-за изменения коэффициента преломления среды, во-вторых, при ионной обработке происходит изменение геометрического рельефа. В зависимости от дозы и режима травления можно использовать ионный пучок либо для полировки поверхности (низкие энергии ионов), либо для создания шероховатых поверхностей (высокие энергии ионов, химически активные ионы, когда избирательно вытравливаются границы зерна или отдельные компоненты обрабатываемого материала).

При отражении света от поверхности раздела двух сред изменяется поляризация электромагнитной волны. Эти изменения очень чувствительны к наличию вблизи поверхности раздела тонкого переходного слоя (третьей оптической среды), созданного ионной бомбардировкой. Оценка толщины и показателя преломления этого слоя возможно с использованием метода эллипсометрии проводилась на оптических поверхностях К8 и плавленного кварца, обработанных по методу глубокого шлифования и полирования плюс ионная обработка до снятия дефектного слоя на глубину  $\sim 2$  мкм. Ионная обработка осуществлялась на установках для ионного травления в диодном режиме. Источником ионов Ag служила плазма ВЧ разряда,  $p = 0,4$  Па,  $1$  мА/см<sup>2</sup>.

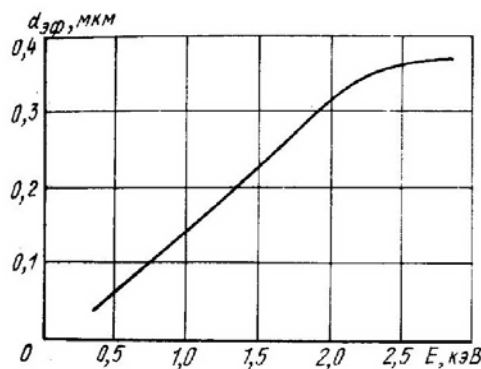
В качестве характеристики поверхностного слоя обычно используют эффективную толщину  $d_{эф}$  поверхностного слоя, физический смысл которой состоит в том, что ее значение определяет поверхностный слой, где оптические свойства существенно отличаются от свойств материала в объеме, а за

пределами этой области свойства слоя считать близкими к свойствам в объеме.

Эллипсометрические исследования поверхности после ионной обработки показали, что в поверхностном слое наблюдается некоторый градиент показателя преломления. Так, для стекла К8 при обработке ионами Ag с энергией 0,5 кэВ наблюдается повышение показателя преломления, затем показатель преломления уменьшается и на глубине 30-50 нм приближается к объемному. Значения  $n$  получены при послойном химическом травлении ионно-обработанных поверхностей в 1% HF. Эллипсометрические измерения показали, что наиболее существенное отличие оптических свойств поверхностного слоя от свойств материала в объеме имеет место в поверхностной области на глубине до 10 нм.

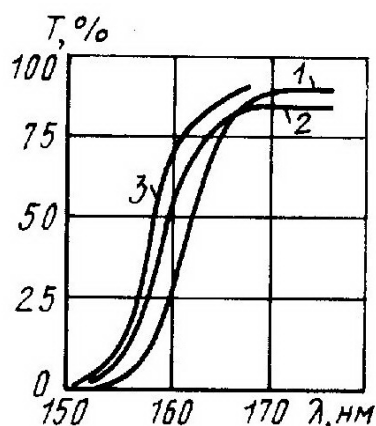
При ионном травлении плавленого кварца наблюдается такая же картина, однако из-за более высокой радиационной стойкости глубина измененного слоя на поверхности кварца при тех же энергиях бомбардируемых ионов меньше и составляет величину  $\sim 10$  нм.

Исследование зависимости оптических характеристик поверхностного слоя стекла К8 от энергии бомбардирующих ионов, что с увеличением энергии более 0,5 кэВ толщина поверхностного измененного слоя возрастает (рис.32). Однако в интервале энергий 2,0 - 2,5 кэВ значение  $d_{эф}$  стабилизируется вследствие температурных нагрузок на поверхность, приводящих к отжигу дефектов, наводимых ионной бомбардировкой. Опыт показал, что минимальная толщина измененного поверхностного слоя наблюдается на оптических материалах при обработке поверхностей ионным пучком с энергией ионов  $\sim 0,5$  кэВ. Однако при этих энергиях ионов скорости съема оптических материалов невелики поэтому в случае необходимости больших съемов ионную обработку проводят при высоких энергиях ( $\sim 1,5 - 2$ кэВ}, а на последней стадии обрабатывают поверхность ионами с энергией  $\sim 0,5$  кэВ.



**Рис. 32. Зависимость толщины измененного поверхностного слоя от энергии ионов**

Ионная обработка поверхности плавленого кварца (КУ), полированной по методу ГШП приводит к расширению области прозрачности в УФ области спектра на 10 нм (рис.33).



**Рис.33. Спектр пропускания плавленого кварца:**

**1 - до ионной обработки; 2 - после ионной обработки ионами Ag с энергией 1,5 кэВ; 3 - после ионной обработки и термообработки при 600°C**

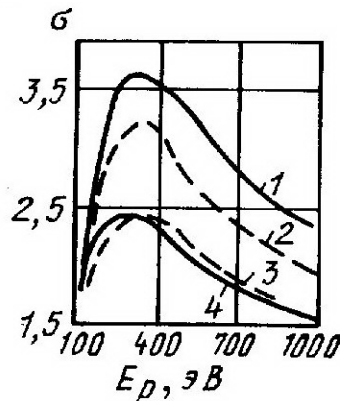
В ИК области спектра при ионной обработке поверхности плавленого кварца также наблюдается увеличение показателя преломления до 1,621 в максимуме фундаментальной колебательной полосы поглощения ( $1100 \text{ см}^{-1} = \text{Si} - \text{O} - \text{Si} =$ , что связано с наведением в поверхностном слое радиационных дефектов, обеднением поверхности кислородом с преобладанием в поверхностном слое монооксида кремния.

Прогрев образцов при  $t = 600^\circ\text{C}$  восстанавливает пропускание до исходного значения, ширина полосы пропускания сохраняется. Сочетание ионной обработки и термообработки широко применяется для получения совершенных поверхностей за счет удаления дефектного слоя с поверхности и, соответственно, снижения светорассеяния. В то же время образование на поверхности измененного слоя с более высоким показателем преломления приводит к некоторому уменьшению коэффициента пропускания в области  $\lambda > 170 \text{ нм}$ . Как уже упоминалось, ионная обработка приводит к изменению эмиссионных свойств оптических материалов. Приведем некоторые примеры. Для изготовления электронных умножителей и других приборов со вторично-эмиссионным усилением регистрируемого сигнала используются восстановленные в водороде свинцово-силикатные стекла.

В результате многочисленных исследований установлено, что эмиссионные свойства этих стекол существенно зависят от способа их обработки и определяются прежде всего соотношением окислов свинца и кремния в эмиттирующем слое глубиной в несколько десятков нм [90, 91]. Было показано, что ионная обработка приводит к изменению оптических свойств свинцово-содержащих стекол вследствие изменения элементного состава поверхности. Это изменение влечет за собой изменение эмиссионных свойств поверхности. Коэффициент вторичной электронной эмиссии  $\sigma$  для невосстановленных стекол после ионной обработки изменяется незначительно. На рис.34 приведены зависимости  $\sigma$  (в относительных единицах) от энергии первичных электронов для обработанных ионами образцов и для контрольных, поверх-

ность которых предварительно обработана обычным шлифованием и полированием.

На рис. 34 видно, что повышение  $\sigma$  весьма слабое, наблюдается лишь некоторое смещение максимума  $\sigma$  в сторону меньших энергий первичных электронов. Такое смещение максимума свидетельствует об уменьшении глубины выхода вторичных электронов и изменении состава приповерхностного слоя на глубине выхода вторичных электронов, происходящем в результате ионной бомбардировки. По данным работы [91] глубина выхода вторичных электронов составляет для невосстановленного стекла 15 - 30 нм.



**Рис. 34. Зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии электронов для стекол 6Ba4 до восстановления (3, 4) и после (1, 2): - - - контрольные образцы; — образцы, обработанные ионами аргона**

После восстановления свойства стекол, прошедших ионную обработку, резко отличаются от исходных, не ионнообработанных. После восстановления свойства стекол, прошедших ионную обработку, резко отличаются от исходных, не ионнообработанных  $\sigma$  становится заметно выше, особенно при малых значениях первичных электронов. При этом смещение максимума сохраняется.

Известно, что в процессе термоводородного восстановления идет интенсивная диффузия из объема к поверхности различных элементов стекла (углерода, щелочных металлов и др.), присутствие которых в поверхностном слое снижает его  $\sigma$ . В результате ионной обработки при энергии ионов аргона  $\sim 0,5$  кэВ поверхность стекла приобретает более совершенную структуру за счет сглаживания микронеровностей, удаления микровключений абразива и других продуктов, оставшихся на поверхности после механической обработки. Как было показано выше, показатель преломления стекла возрастает; что свидетельствует об образовании более плотных слоев, в связи с чем диффузия из объема в поверхностный слой затруднена. Анализ Оже-спектров, полученных с поверхностей контрольных и ионнообработанных образцов; показывает, что поверхностный слой обеднен щелочными металлами, углеродом и другими элементами, которые появляются на исходных образцах в результате диффузии из объема при термоводородном восстановлении.

Таким образом, формирование эмиттирующего слоя на поверхности ионнообработанных стекол при последующем восстановлении происходит в более благоприятных условиях, как в качественном, так и в количественном отношении, в результате чего  $\sigma$  стекла возрастает на 20 - 30%.

Свинцовосодержащие стекла применяются, в частности, для изготовления усилителей электронного изображения - микроканальных пластин (МКП) представляет собой пучок параллельно уложенных стеклянных каналов диаметром 10 -20 мкм. Внутренняя поверхность каналов имеет высокое сопротивление и  $\sigma = 3 - 5$ . Таким образом, каждый из каналов является миниатюрным электронным множителем. МКП используется, например, в электронно-оптических преобразователях, т.е. в приборах, предназначенных для усиления яркости изображения и спектрального преобразования излучения. Принцип действия такого усилителя заключается в следующем: электронное изображение с электрода фокусируется электронной линзой или переносится однородным электростатическим полем на МКП, к торцам которой прикладывается напряжение 2-3 кэВ. Электроны, попадая внутри каналов МКП, ударяются об их стенки, вызывая эмиссию вторичных электронов, которые увлекаются полем внутри каждого канала и совершают по мере прохождения многочисленные акты вторичной эмиссии, в результате чего электронный поток на выходе канала во много раз выше, чем на входе.

Основными характеристиками МКП являются коэффициент вторичной электронной эмиссии, линейная область работы пластины, разрешающая способность и фактор шума. Разрешающая способность электронно-оптических преобразователей с МКП, в основном, определяется диаметром каналов, в которые попадает электронный поток. В современных МКП единичные каналы отделены друг от друга перегородками, имеющими определенную толщину, торцовая поверхность которой является нерабочей. В зависимости от толщины перегородок 30% общей поверхности торца оказывается нерабочей и коэффициент прозрачности МКП ( коэффициент пропускания электронного потока) составляет не более 0,7.

Ионная обработка позволяет повысить прозрачность МКП за счет травливания и расширения входного торца канала. Степень увеличения диаметра канала зависит от энергии бомбардирующих ионов и времени обработки. Так, при обработке МКП с исходным диаметром канала 9,5 - 10 мкм при толщине перегородки 2,5 мкм после двухчасовой обработки ионами Ar с энергией 1 кэВ диаметр канала расширится на 2 мкм. Исследование торца МКП на растровом электронном микроскопе показало, что уменьшение толщины перегородок между единичными каналами происходит на глубину не более половины диаметра канала. В продольном разрезе обработанные каналы имеют вид воронки (расширение в сторону падающего потока).

Было показано, что  $\sigma$  свинцовосодержащих стекол в результате ионной обработки возрастает на 30%. Естественно, что и в МКП, изготовленных из этих стекол, в результате ионной обработки перед термоводородным восстановлением коэффициент усиления потока электронов также увеличивается. МКП, обработанные ионами с энергией 0,5-1 кэВ, имеют коэффициент уси-

ления первичного потока электронов в 2-3 раза выше, а фактор шума в 1,5 - 2 меньше, чем у пластин, не подверженных до термоводородного восстановления ионной обработке. Улучшение характеристик МКП после ионной обработки объясняется ее положительным воздействием на поверхность так же, как и в случае со свинцовосодержащим стеклом. Повысить  $\sigma$  МКП можно также путем нанесения на ее поверхность пленки эффективного эмиттера (CsCl, SiO и др.). Опыт показывает, что эффективность эмиттера, нанесенного на предварительно обработанную ионами аргона поверхность в 2 раза выше, чем у МКП без предварительной ионной обработки.

Кроме того, ионная обработка с целью очистки поверхности оказывает свое положительное действие и при нанесении на МКП металлических пленок, служащих электродами. Пленки, в частности, хрома обладают лучшей адгезией, более равномерные, и пробой в них наблюдается значительно реже, чем на пленках, нанесенных без ионной обработки.

В настоящее время для реализации электронного изображения в электронно-оптических схемах используются монолитные люминесцентные экраны, изготовленные из люминесцентной керамики, например, на основе сульфида цинка. Светоотдача люминесцентной цинкосульфидной керамики в несколько раз больше, чем у экранов на основе оптических стекол [92]. На люминесцентные свойства оптической керамики существенное влияние оказывает состояние поверхности. Наличие нарушенного слоя, который образуется в результате механической обработки приводит к образованию центров безызлучательной рекомбинации, которые гасят люминесценцию. В работе [93] показано, что основной причиной снижения яркости свечения является деформация решетки при механическом воздействии. Ионная обработка позволяет убрать деформированный слой полностью или частично. В результате яркость свечения экранов повышается. В табл.12 приведены относительные значения яркости свечения экранов при разных пусковых напряжениях и разной глубине съема поверхностного слоя материала при обработке ионами аргона с энергией 1 кэВ .

По-видимому, яркость свечения экранов возрастает не только за счет снятия ионной бомбардировкой нарушенного слоя, но и за счет наведения радиационных дефектов, обеспечивающих излучательную рекомбинацию. Об этом свидетельствует значительное повышение яркости при низких значениях первичных электронов, глубина проникновения которых соизмерима с глубиной "измененного" ионной бомбардировкой слоя.

Ионная бомбардировка повышает чувствительность оптической катодхромной керамики к электронному потоку. Так, эффективность окрашивания экранов электронным пучком изготовленной из галогенсодалитовой керамики после ионной обработки ионами Ar с энергией 1 кэВ возрастает на порядок.

**Таблица 12**  
**Влияние ионной обработки на относительную яркость свечения**  
**катодоллюминесцентных экранов**

Образец	Напряжение первичного потока электронов, кВ	
	15	5
Без ионной обработки	30	8
Съем 0,5 мкм	45	30
Съем 1,5 мкм	50	40
Съем 2,0 мкм	50	72

## **ГЛАВА 6. Высокоточная размерная ионная обработка оптических элементов**

Ионная обработка позволяет проводить равномерный съем материала со всей поверхности детали, фиксируя его глубину с точностью  $\pm 1\%$  при съемах от 100 до 1000 нм и с точностью  $\pm 5\%$  при съемах от 10 до 50 нм без контроля глубины в процессе обработки [101, 102]. С применением системы оптического контроля за глубиной проработки в технике ВЧ диодного распыления обеспечивается точность фиксации заданной глубины выше 1% при съемах от десятых долей мкм до 50 мкм [103]. Это позволило использовать ионную обработку для доводки пластин из оптических материалов до строго заданной толщины или толщины, кратной длине волны. Таким образом, например, были изготовлены четвертьволновые пластины. В том случае, когда для создания оптического элемента необходимо произвести ионную обработку части поверхности образца, применяют маскирование поверхности. В качестве маски можно использовать лак Ф-32Л, который наносится на всю поверхность образца поливом или на центрифуге. Лак сушится в течение 5 ч при комнатной температуре, а затем 2 ч в термостате при 500°C. Затем металлическим резцом вручную или на делительной машине на поверхность лака наносят заданный рисунок, после чего лак легко удаляется с части поверхности, подлежащей обработке. Такая методика позволяет получать заданные рисунки с погрешностью границ 0,1 - 0,2 мм.

Для получения более точных рисунков следует применять маски, сформированные на делительных машинах, или использовать методы фотолитографии. В качестве защитных масок для ионной обработки из материалов, используемых в делительном деле, можно применять металлы (алюминий, хром) или сирийский асфальт. Сочетая технику фотолитографии и ион-



ной обработки, можно получать заданные рисунки с минимальным размером элемента до 1,0 мкм.

Путем частичного маскирования поверхности лаком Ф-32Л можно получать фазовые фильтры для коррекции изображений, фазосдвигающие элементы различного назначения, устройства для исправления нерегулярных искажений волновых фронтов лазерных систем и т.д. Например, для института метрологии изготовлены эталоны глубины для аттестации различных оптических приборов, которые представляли собой набор ступенек на поверхности кварцевой пластины глубиной от 10 до 300 нм. Эталоны имели погрешность  $+ 5\%$  для ступенек глубиной 10 - 50 нм и  $\pm 1\%$  для ступенек  $> 50$  нм.

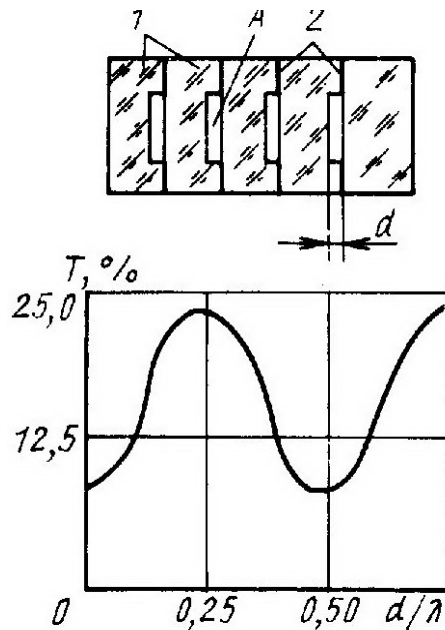
С помощью высокоточной размерной ионной обработки (ВРИО) в сочетании с техникой оптического контакта создан новый класс оптических устройств, главным элементом которых является воздушный промежуток между двумя оптическими средами, выполненный с точностью до долей длины волны [104].

Остановимся на некоторых элементах, полученных ВРИО.

*Светоделительные системы.* Стопа состоит из набора пластин, соединенных друг с другом с помощью оптического контакта. В каждой пластине ионной обработкой создано углубление толщиной  $h = (2n + 1) \lambda_0 / 4$ , где  $\lambda_0$  - длина волны лазера. По сравнению со стопами обычной конструкции созданная стопа проще в изготовлении, более эффективна, так как зазор в стопе, кратный  $\lambda/4$ , получен методом ВРИО с высокой точностью. В этой стопе используется явление интерференции (рис.35). Отражение одного элемента такой стопой из стекла К8 - 45%. Обычная конструкция стопы дает отражение 16%.

Следует отметить, что независимо от числа элементов для  $\lambda = 2 \lambda_0$  стопа будет пропускать излучение как монолитная пластинка, т.е. для стекла К8 отражение  $\sim 8\%$ , а при просветлении входной и выходной поверхности отражение составит десятые доли процента. Это свойство интерференционной стопы интерес для лазерных систем с удвоением частоты.

Ориентируя стопу под углом Брюстера к падающему излучению, можно использовать стопу как поляризатор. При изготовлении стопы можно получать промежутки толщиной несколько  $\lambda_0 / 4$ , что позволяет сужать спектральную полосу пропускания стопы и в ряде случаев использовать стопы как частотный селектор лазерного излучения.



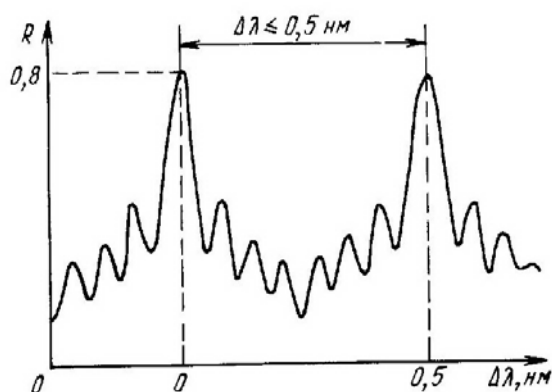
**Рис.35. Светоделительная стопа на НПВО и зависимость пропускания элемента стопы ( две пластины) от отношения толщины воздушного промежутка  $d$  к длине волны  $\lambda$  : 1 - стеклянная пластина; 2 - зоны оптического контакта; А - воздушный промежуток**

*Периодический интерференционный резонансный отражатель.* Периодические резонансные рефлекторы (ПРР) состоят из последовательности идентичных оптических пластин без покрытий, размещенных с равными промежутками между собой, и применяются в лазерах с модуляцией добротности из-за большой надежности при высоких спектральных распределениях плотности энергии по сравнению с металлическими зеркалами и многослойными диэлектрическими покрытиями.

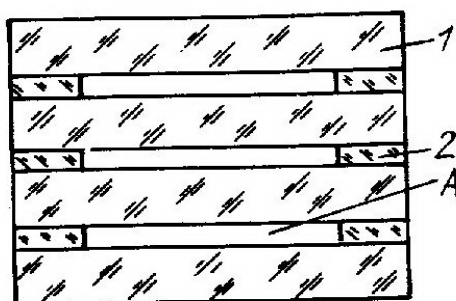
Для рубинового лазера ( $\lambda_0 = 0,694$ ) был проведен синтез ПРР с коэффициентом отражения порядка 85% и полушириной 0,5 нм. Кривая отражательной способности рефлектора, состоящего из трех равноудаленных пластин толщиной 0,281262 мм (показатель преломления  $n = 1,71$ , величина воздушного промежутка равна 0,482035 мм) приведена на рис.36.

Изменение толщины пластины и промежутка на четверть длины волны дает сдвиг отражательной способности на 0,25 нм, т.е. максимум отражения, совпадающий с центром линии флуоресценции, смещается к ее скату. Поэтому пластины нужно делать с погрешностью  $\sim \lambda / 8$  с допуском 1/10 мкм. В настоящее время это можно выполнить с помощью настраиваемого резонансного рефлектора. Толщину пластины можно менять посредством нагревания, а оптическую толщину промежутка - изменением атмосферного давления.

На рис.37. представлен ПРР, выполненный из трех стеклянных пластин (1), соединенных глубоким оптическим контактом через кольцевые прокладки (2) с образованием воздушного промежутка (А).



**Рис.36. Спектральная отражательная способность трёхпластинчатого периодического резонансного рефлектора для твёрдотельного излучателя**



**Рис.37. Периодический резонансный рефлектор с кольцевыми прокладками: 1 - плоскопараллельная стеклянная пластина; 2 - кольцевая прокладка; А - воздушный промежуток**

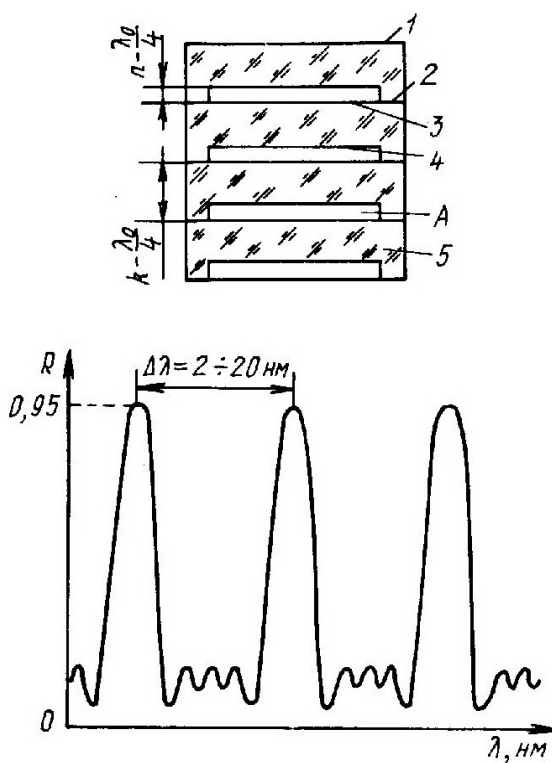
Частотный интервал между максимумами отражения рефлектора определяется наименьшей в сборке оптической толщиной пластины или промежутка. Технологически целесообразное уменьшение толщины кольцевых прокладок, связанное со значительным увеличением трудоемкости, до 0,2 - 0,3 мм дает частотный интервал между максимумами отражения менее 0,6 нм, что в целом ряде случаев недостаточно при селекции мод лазера. Ввиду технологических трудностей в настоящее время широкое распространение получил резонатор, точность изготовления пластин и прокладок которого больше  $\lambda/4$ , и отражение такой системы равно сумме френелевских коэффициентов отражения всех поверхностей. Такой рефлектор (стопа Френеля) используется в качестве выходного отражателя лазера, при этом возможность селекции мод отсутствует.

Используя метод ВРИО, на установке ВЧ распыления с активным контролем был изготовлен ПРР, воздушный промежуток которого равен 3-10 порядкам интерференции, а точность выполнения промежутка рефлектора равна точности нанесения диэлектрических интерференционных слоев. Этот элемент назвали периодическим интерференционным резонансным рефлек-

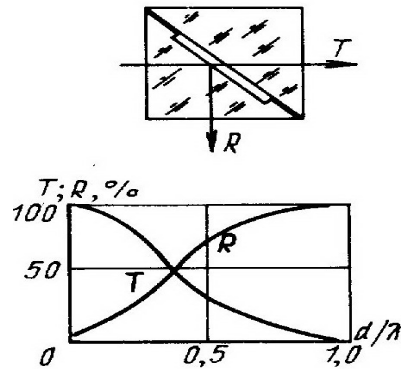
тором (ПНИР). Предложенная конструкция рефлектора (рис.38), содержит прозрачные подложки (5) с углублением (А), плоскость которых параллельна исходной поверхности (3.) Плоскости подложек отполированы с высокой точностью и соединены на оптическом контакте по кольцевой зоне (2). Интерференционные явления в устройстве имеют место вследствие плоскопараллельности оснований углублений (4) к исходным поверхностям (3) и к плоской поверхности (1) подложки.

Для твердотельного лазера на стекле ГЛС-1  $\lambda_0 = 1,06$  мкм с эффективной шириной полосы люминесценции около 35 нм выполнен интерференционный селектор с отражением 65% при полуширине зеркала 2 нм из стекла КИ ( $n = 1,44$ ).

*Оптические элементы, на основе НПВО.* В призмных светоделителях (рис.39) на диагональной грани призмы создается выемка глубиной доли рабочей длины волны  $\lambda$ . Затем с помощью оптического контакта призма соединяется с такой же призмой. Такие делители излучения можно использовать так же, как ослабители лазерного излучения, лучевая прочность которых выше, чем у обычно используемых нейтральных светофильтров.



**Рис.38. Периодический интерференционный рефлектор и его спектральная отражательная способность; 1 - плоская поверхность подложки; 2 - кольцевая зона оптического контакта; 3 - исходная поверхность; 4 - основание углубления; 5 - плоскопараллельная стеклянная пластина; А - плоскопараллельное углубление**



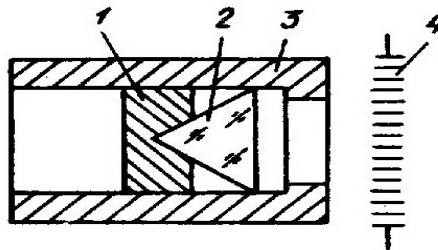
**Рис.39.** Делитель излучения на НПВО и зависимость отражения и пропускания делителя от отношения  $d/\lambda$

Для получения ступенчатых делителей излучения на призму наносят последовательно полосы разной глубины для получения переменного делителя углубления с плавно меняющейся глубиной.

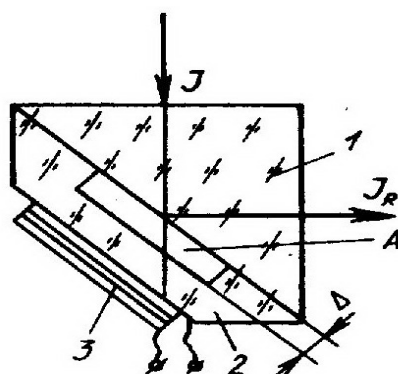
Призмные делители излучения можно изготавливать из материалов для работы с ИК излучением. Были изготовлены "мягкие диафрагмы". В этом случае зазор призмного делителя излучения делается несколько больше  $\lambda_0$ , что обеспечивает, полное внутреннее отражение от зазора.

Мягкость диафрагмы обеспечивает нерезкий профиль края зазора, который можно получить, установив между обрабатываемой деталью и ВЧ электродом металлическую диафрагму (рис.40). Меняя положение диафрагмы, можно менять профиль края зазора или пропускания "мягкой диафрагмы" в области края.

На рис.41 представлена схема модулятора на основе НПВО. На гипотенузной грани призмы полного внутреннего отражения (1) методом ВРИО выполнено плоское углубление, соизмеримое с длиной волны излучателя. Кварцевая подложка (2) с помощью оптического контакта крепится к призме. На внешнюю поверхность подложки прикреплен пьезокерамический элемент (3). При возбуждении пьезокерамики ультразвуковые волны, проходя через подложку, вызывают упругие акустические волны, изменяющие величину зазора  $\Delta$ , что приводит к модуляции пучка лазера



**Рис.40.** Схема изготовления «мягких» диафрагм на НПВО: 1 - держатель призмы; 2 - призма; 3 - экран-маска; 4 - сеточный электрод.



**Рис.41. Схема модулятора на основе НПВО:**

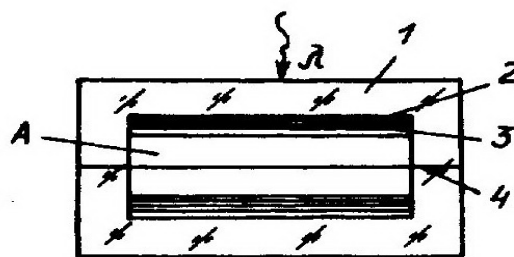
**1 - призма; 2 - подложка с углублением; 3 - пьезокерамический элемент;  
А - воздушный промежуток**

Предложенная конструкция модулятора отличается высокой воспроизводимостью основных характеристик и их практически полной независимостью от температуры. Экспериментальное исследование модулятора НПВО обнаружило заметное увеличение скорости переключения, что делает возможным получение многоимпульсного режима твердотельного лазера. В отличие от широко используемых модуляторов электрооптического типа, механических модуляторов добротности, модуляторы НПВО просты в управлении, изготовлении, характеризуются высокими эксплуатационными характеристиками.

*Интерференционный фильтр с воздушным промежутком.* Известные в настоящее время интерференционные фильтры высокого порядка интерференции, напыленные на прозрачную подложку, технологически выполнимы только для порядка интерференции  $K = 10$ , поскольку толстому напыленному разделительному слою присуще значительное светорассеяние и пониженные механические характеристики.

Возможно выполнение фильтров высокого порядка с использованием в качестве разделительного слоя прозрачной и механически прочной пластины слюды, на которую с обеих сторон напыляются зеркала. Пластины слюды получают отщипыванием от больших кусков, и минимальная толщина пластины, пригодная для использования более 20 мкм. Таким образом, напыленные на слюде фильтры получают только с очень высоким порядком интерференции в видимой области ( $K > 120$ ), что в ряде случаев ограничивает их применение.

Разработанная конструкция интерференционного фильтра (рис.42), выполняемая с ВРИО, позволяет получать  $K = 1-120$  в видимой области спектра. Устройство содержит прозрачные подложки (1), на основании которых нанесены зеркала (3), предварительно методом ВРИО на подложках выполняется углубление (2), основание которого плоскопараллельно исходной поверхности (4). Подложки соединены оптическим контактом по кольцевой зоне.



**Рис.42. Интерференционный фильтр с воздушным промежутком:**  
**1 - плоскопараллельная подложка; 2 - цилиндрическое углубление;**  
**3 - интерференционное зеркало; 4 - зона оптического контакта;**  
**А - воздушный промежуток**

Изготовление фильтра на заданную длину волны обеспечивается активным контролем в процессе ВРИО, в случае перетравливания возможно подпыление на основание одного из углублений вещества с показателем преломления, совпадающим с материалом подложки.

Такое выполнение фильтра позволяет - изготавливать интерференционные узкополосные фильтры в широкой области спектра, причем в дальней ИК области ликвидируется проблема напыления толстых и непрочных разделительных слоев, а в коротковолновых фильтрах разделительный слой становится непоглощающим;

- активный контроль процесса ВРИО позволяет выполнить фильтр на любую заданную длину волны;

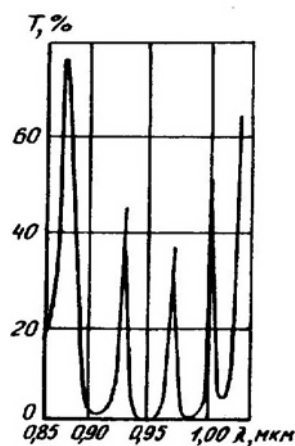
- использовать для изготовления зеркал фильтра вещества, механически и климатически нестойкие, так как зеркала изолированы от воздействия внешней среды;

- проводить исследования интерференционных фильтров при введении в разделительный слой различных оптических сред.

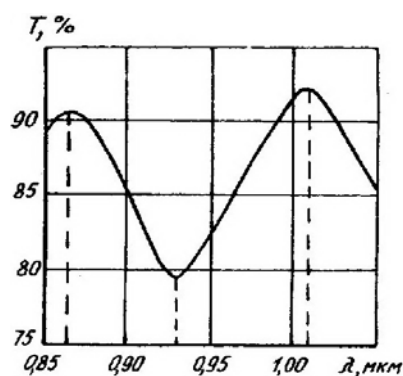
На рис.43 представлены спектральные характеристики фильтра, выполненного из двух полированных подложек стекла К8, соединенных на оптическом контакте по кольцевой зоне, причем на поверхности одной из подложек выполнено ВРИО углубление 1,35 мкм и на обеих подложках нанесено трехслойное зеркало из криолита и сернистого цинка.

На рис.44 показана запись интерференционной кривой пропускания двух соединенных подложек без зеркал. Наличие хорошо выраженных экстремумов свидетельствует о плоскопараллельности основания углубления с контактирующими поверхностями подложек.

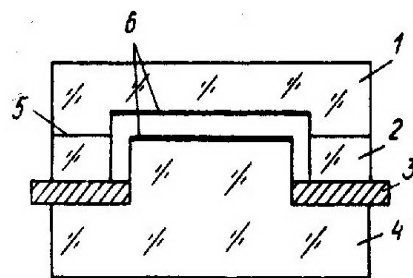
На основе интерференционного фильтра с воздушным промежутком предложена конструкция управляемого фильтра (рис.45). К стеклянной детали (4) приклеено оптическим клеем кольцо из пьезокерамики, либо три пьезокерамических элемента (угловое расстояние между ними 120). К пьезокерамике приклеивается стеклянное кольцо (2). Деталь (4) с приклеенным кольцом (2) шлифуется и тщательно полируется (местные погрешности < 0,1 полосы). Деталь (1) обрабатывается с такой же точностью.



**Рис.43. Спектр пропускания интерференционного фильтра с воздушным промежутком**



**Рис.44. Спектр пропускания фильтра с воздушным промежутком без диэлектрических зеркал**



**Рис.45. Управляемый фильтр с воздушным промежутком:**  
**1 - деталь из стекла с углублением полученным ионной обработкой; 2 -**  
**стеклянное кольцо; 3 - пьезокерамический элемент; 4 - деталь из стекла;**  
**5 - зона оптического контакта; 6 - частично прозрачные зеркала**

На детали (1) ионной обработкой создается углубление величины, соответствующей рабочему спектральному диапазону. На детали (1, 4) наносятся частично прозрачные зеркала (металлические или диэлектрические). Фильтр работает как обычный фильтр Фабри - Перо с воздушным промежутком, при подаче электрического напряжения на пьезоэлементы



толщина промежутка меняется и полоса пропускания фильтра сдвигается по спектру. Управляемый фильтр с воздушным промежутком, равным 1 мкм, с пьезоэлементом из УТС-23 может изменять промежуток в пределах 0,1 мкм.

*Электрооптический затвор на жидких кристаллах для ИК области спектра (1,5 - 6,5 мкм}*. Для устройства ввода и вывода информации ИК систем необходимы высокоапертурные электрооптические затворы (ЭОЗ), работающие в широком диапазоне ИК спектра. Переключающее напряжение затворов, созданных на основе электрооптических кристаллов, широко используемых в настоящее время, составляет десятки киловольт, что ограничивает их применение.

Наиболее радикальным решением проблемы является применение в ЭОЗ жидкокристаллических электрооптических материалов, меняющих оптическую активность под действием электрического напряжения (так называемый твист-эффект).

Спектрометрический анализ различных жидких кристаллов в диапазоне 1,5 - 6,5 мкм показал, что наиболее целесообразно использовать в ЭОЗ пентилтианобифенил. Его пропускание при толщине слоя 20 мкм в рассматриваемом диапазоне составляет около 85% за исключением участков поглощения 3,35 - 3,55 мкм, 4,35 мкм и 6,25 мкм.

В ЭОЗ твист-структура помещается между скрещенными или параллельными поляризаторами ИК излучения. Эффективным поляризатором в диапазоне 1,5 - 6,5 мкм является дифракционная решетка с металлическими штрихами, период которой значительно меньше длины волны. На основании спектров пропускания решетки-поляризатора с периодом 2400, выполненной на подложке из фторопласта 32Л толщиной 30 мкм, определялся коэффициент поляризации.

На рис.46. представлена конструкция разработанного устройства. Жидкий кристалл заключен между пластинами германия 4, 7. В одной из них методом ВРИО выполнено углубление 20 мкм. Для посадки на оптический контакт Ge-пластины предварительно обрабатывались ионной полировкой со съемом 0,2 - 0,3 мкм. Ориентация пристенных слоев жидкого кристалла для получения твист-структуры осуществлялась диэлектрическим слоем  $MgF_2$ , наносимым электронно-лучевым испарением на наклонно расположенные Ge-пластины.

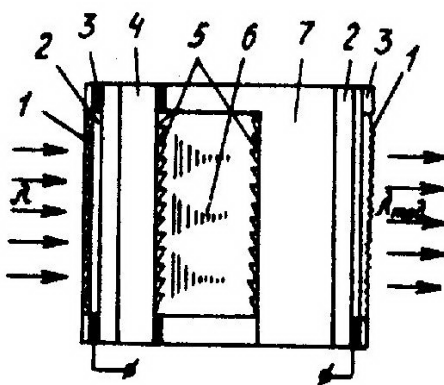


Рис.46. Электрооптический затвор на жидких кристаллах для ИК области спектра: 1 - прозрачное проводящее покрытие; 2 - просветляющее покрытие; 3 - медный электрод; 4,7 - германиевые подложки; 5 - слой, ориентирующий жидкий кристалл; 6 - жидкий кристалл

Для подачи на ячейку переключающего напряжения на предварительно очищенную ионной полировкой Ge-пластину ВЧ распылением наносился кольцевой медный электрод (3). Для повышения пропускания ячейки на наружные поверхности пластин электронно-лучевым испарением нанесено просветляющее покрытие ZnS (2).

Спектральные электрооптические характеристики ЭОЗ представлены на рис.47.

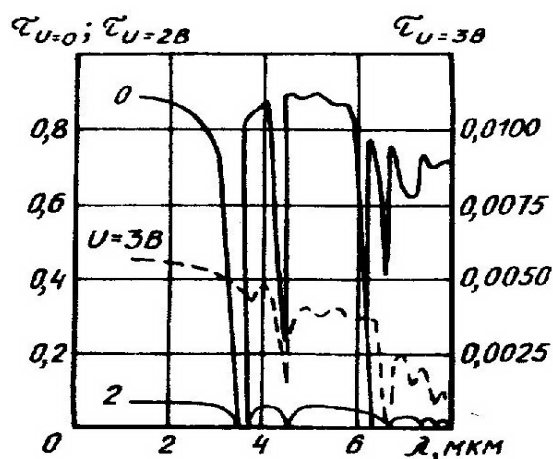
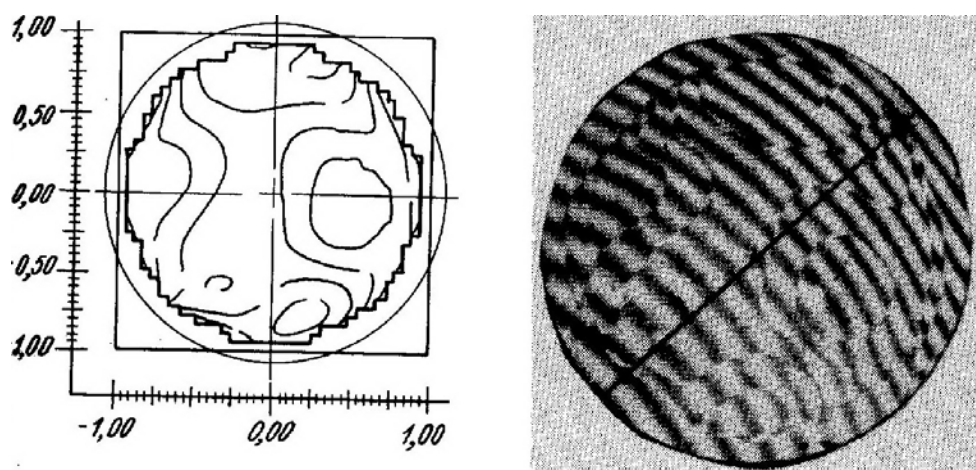


Рис.47. Спектральные и электрооптические характеристики ЭОЗ

Приведенные примеры наглядно иллюстрируют большие возможности, которые открывает высокоточная ионная обработка для создания принципиально новых оптических элементов. Реализовать ВРИО можно на том же вакуумном оборудовании, что и ионную полировку с применением в качестве источника ионов как автономных ионных источников, так и системы ВЧ распыления.

## ГЛАВА 7. Ионная зональная ретушь

В настоящее время рассчитаны оптические системы, которые практически являются безабберационными с разрешением, близким к дифракционному пределу. Однако реализовать подобные системы оказывается чрезвычайно трудно, так как при изготовлении оптических элементов системы и их сборке возникают ошибки, которые существенно искажают волновой фронт системы. Наиболее трудными для исправления оказываются нерегулярные зональные ошибки, вызванные неточной обработкой поверхности детали и неоднородностью массы стекла. Для исправления зональных ошибок, как правило, применяется ручная ретушь, эффективность которой зависит от искусства оптика. Процесс этот чрезвычайно трудоемкий, длительный и не имеет гарантированного выхода.



**Рис.48. Топография фазовой коррекционной пластины, полученная расчетом на ЭВМ, и интерферограмма ФКП, полученная ионной обработкой**

На базе высокостабильного процесса ионной обработки в ГОИ создан метод ионной зональной ретуши [101, 105].

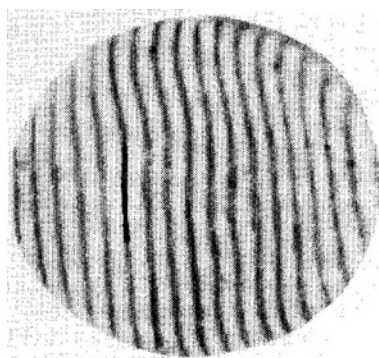
Для исправления ошибок волнового фронта оптических систем изготавливаются фазовые коррекционные пластинки (ФКП). Чтобы создать такую пластинку, прежде всего, необходимо точно знать топографию искажений волнового фронта оптической системы. Разработанные в ГОИ методы интерференционного контроля и обработки полученных интерферограмм с помощью комплекса программ INTERF-ГОИ [106] позволили успешно решить эту задачу.

Для получения коррекционных пластин применяется метод последовательного маскирования. Перед ионной обработкой поверхность пластинки покрывается защитной маской, например, из лака Ф-32Л. В соответствии с топографией съема, полученной по расшифровке интерферограммы по программе INTERF-ГОИ, сначала вскрываются те участки поверхности, которые

требуют максимальной глубины проработки, равной  $n \lambda/l$ , где  $n$  - число зон,  $\lambda/l$  - глубина шага. Затем пластинка подвергается ионной обработке до нужной глубины съема. После этого вскрываются те области пластины, на поверхности которых необходимо провести съем на глубину  $(n - 1) \cdot \lambda/l$ , и проводят ионную обработку как вновь вскрытых областей, так и областей вскрытых ранее. Общее технологическое время изготовления ФКП из стекла К8 диаметром 100 мм с 10 зонами ( $n = 10$ ,  $l = 10$ ) на установке ионного травления составляет 4 ч при скорости съема  $\sim 1$  мкм/ч. На рис.48 показан рассчитанный профиль ФКП и интерферограмма экспериментально полученной ФКП. Интерференция за счет небольшой клиновидности пластины позволяет четко фиксировать границы зон ФКП.

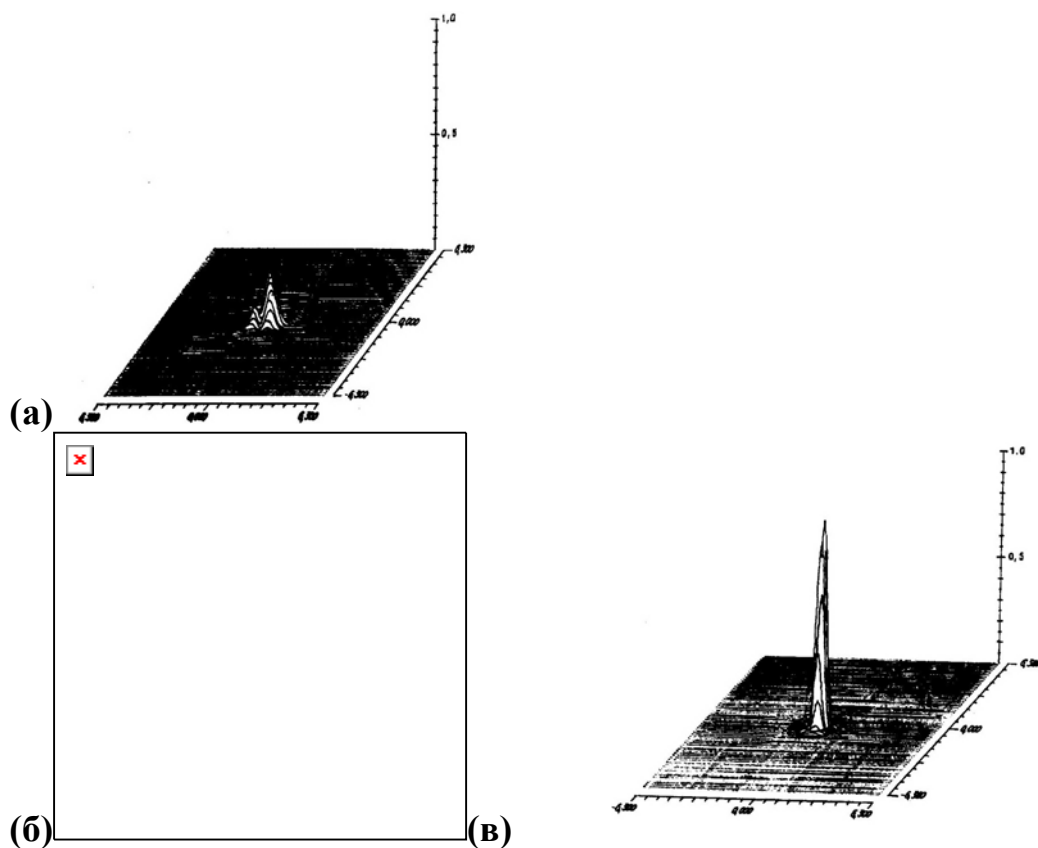
Следует отметить, что ошибки, допущенные при механической обработке пластины для получения ФКП могут быть легко учтены, если интерферограмма волнового фронта корректируемой оптической системы записывается вместе с пластиной, на которой будет изготовлена ФКП.

Количество зон и глубина шага профиля зависит от оптической схемы и зональных ошибок. Однако, как показали специально выполненные исследования, глубина шага 0,05 - 0,1 обеспечивает практически дифракционное качество изображения оптической системы. Например, на рис.49 представлена интерферограмма волнового фронта многолинзового объектива, полученная с помощью интерферометра ИТ-172 в автоколлимационной схеме.



**Рис.49. Интерферограмма волнового фронта объектива**

На рис.50 показана функция рассеяния точки (ФРТ) в автоколлимационной схеме, рассчитанная по топографии волнового фронта, восстановленной с интерферограммы на ЭВМ БЭСМ-6 по программе INTERF.

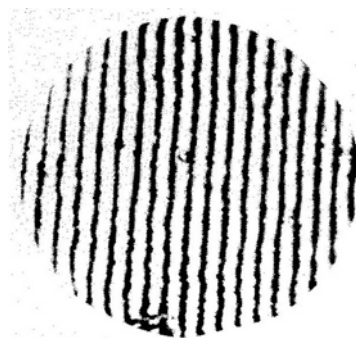


**Рис.50. ФРТ до (а) и после (б) коррекции волнового фронта и топография ФКП, рассчитанные на ЭВМ (в)**

Средняя квадратическая ошибка волнового фронта объектива в автоколлимационной схеме составила  $0,19 \lambda$ , число Штреля -  $0,24$ , в коллимационной схеме -  $0,095 \lambda$  и  $0,73$  соответственно. Конфигурация зон рассчитывалась на ЭВМ по результатам обработки интерферограмм, а корректирующий профиль построен с помощью графопостроителя. Шаг профиля выбирался оптимальным путем математического моделирования таким образом, чтобы количество переходов было минимальным, но достаточным для получения высокого качества изображения, близкого к дифракционному пределу. Оценка проводилась по распределению энергии в точке, числу Штреля и оптической передаточной функции.

Для выбора оптимального шага квантования по глубине при изготовлении ФКП проведено моделирование работы ФКП с шагом  $0,2 \lambda$ ,  $0,1 \lambda$  и  $0,05 \lambda$  в автоколлимационной схеме. При этом показано, что шаг  $0,1 \lambda$  для данного волнового фронта должен обеспечить получение практически дифракционного качества изображения (число Штреля -  $0,96$ ).

Интерферограмма волнового фронта объектива с ФКП показана на рис.51. Обработка интерферограммы показала, что средняя квадратическая деформация волнового фронта уменьшилась до  $0,05 \lambda$ , число Штреля увеличилось до  $0,92$  в автоколлимационной схеме, до  $0,96$  - в коллимационной. ФРТ при этом практически совпадает с показанной на рис.50, б.



**Рис.51. Интерферограмма волнового фронта объектива с ФКП.**

Таким образом, метод ионной ретуши позволяет изготавливать коррекционный профиль заданной микро топографии за 2 - 4 ч практически со 100% выходом и обеспечивает компенсацию ошибок волнового фронта оптических систем с точностью до сотых долей  $\lambda$ .

Следует отметить, что фазовый корректирующий профиль, исправляющий искажения волнового фронта оптической системы, может наноситься не на ФКП, а непосредственно на одну или несколько поверхностей оптической системы.

Методика ионной ретуши также может быть использована для устранения искажений волнового фронта оптических систем, работающих с когерентным светом, например, в устройствах оптической обработки информации и фокусировки излучения лазера.

Недостатком методики последовательного маскирования является необходимость вскрытия вакуумной камеры после обработки зон данного уровня. Более эффективной является обработка поверхности без вскрытия камеры, особенно в случае крупногабаритных деталей.

Решить эту задачу можно путем создания ионного пучка с управляемым распределением плотности ионного тока.

В работе [52] описано устройство, в котором заданное распределение плотности ионного тока по всей площади сеточного электрода диаметром до 500 мм создается за счет введения в разрядный промежуток перед электродом цилиндров, расположенных на заданном расстоянии от электрода.

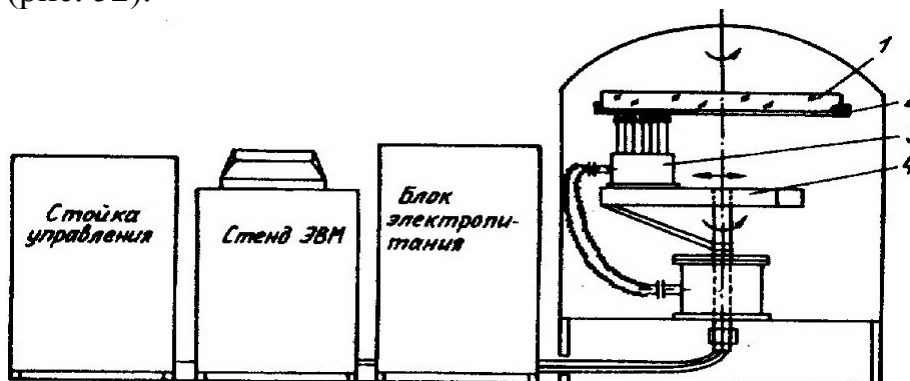
Варьируя площадь цилиндров и их расстояние от сеточного электрода, можно изменять распределение плотности ионного тока по всей площади сеточного электрода.

Устройство создано на базе установки СМ-195 и позволяет проводить ретушь деталей диаметром до 500 мм.

Для деталей большого размера [39] создан автоматизированный комплекс ИОН-3 для ретуши деталей диаметром до 1,5 м, который может устанавливаться на установках ВУАЗ-1,5 или других установках с достаточно большой вакуумной камерой.

Автоматизированный комплекс включает в себя ионный источник, блок электропитания, механизм перемещения ионного источника и автома-

тическую систему управления выведения ионного источника в заданные координаты (рис. 52).



**Рис.52. Автоматический комплекс для точной ионной обработки крупногабаритных оптических деталей: 1 - оптическая деталь; 2 - держатель; 3 - ионный источник; 4 - механизм перемещения**

Оптическая деталь 1 закрепляется на столе 2 и может вращаться в горизонтальной плоскости. Ионный источник 3 и механизм перемещения 5 размещаются внутри вакуумной камеры. Управление перемещением ионного источника в полярных координатах осуществляется по заданной программе от автоматической системы управления, которая обеспечивает задание любой траектории движения ионного источника со скоростью от 0 до 5 см/с в радиальном направлении и поворот на любой угол с частотой вращения 0-2 мин<sup>-1</sup>.

Автоматизированный комплекс может работать в ручном и автоматическом режиме. Ручной режим предусматривает последовательное включение от пульта управления комплекса параметров движения ионного источника и параметров ионного пучка. Автоматический режим проводится по заданной программе по сигналу от пульта управления АСУ.

Для проведения процесса локальной ретуши программа технологического процесса обработки поверхности оптической детали, топология которой заранее просчитана на ЭВМ, вводится в АСУ.

В программе задается величина и последовательность исполнения движения ионного источника в радиальном направлении и поворот по окружности, т. е. по координатам, определяющим положение центра ионного пучка на поверхности обрабатываемой детали, время обработки в стационарном состоянии, перевод ионного источника в последующие координаты, время обработки и т. д. до конечных координат. По сигналам, поступающим со стойки управления, ионный источник, установленный на каретке привода механизма радиального перемещения, с помощью приводов радиального и углового перемещения ориентируется так, что ось ионного пучка совпадает с начальными координатами, определенными программой перемещений относительно вертикальной оси вакуумной камеры и по радиальной координате. Затем со стойки управления последовательно посылаются сигналы на включение ионного источника и нейтрализатора заряда, а также приводов радиального и уг-

лового перемещения. В результате ионный пучок с заданной плотностью тока и энергией с нейтрализованным зарядом попадает на определенный участок обрабатываемой детали. Диаметр пучка регулируется от пульта управления ионным источником, расположенным в блоке питания ионного источника, последовательной подачей напряжения на анод и катод. Это позволяет получать на поверхности обрабатываемой детали, расположенной на расстоянии 200 мм от катода источника, ионные пучки диаметром 50 и 100 мм. Получение промежуточных значений между 50 и 100 мм осуществляется регулировкой магнитного поля в кольцевых щелях источника ионов. В процессе обработки поддерживаются постоянными основные параметры: плотность тока ионов на образце, ускоряющее напряжение, давление газа и ток магнитной катушки.

## **ГЛАВА 8. Формообразование асферических поверхностей**

Использование асферических поверхностей (АП) в оптических приборах позволяет достичь высоких эксплуатационных характеристик при простейшей конструкции систем. До недавнего времени использование АП в оптике было желательным, но не обязательным, так как в принципе сферическая оптика, имеющая в арсенале большой выбор оптических сред (стекло) в целом обеспечивает точностные и абберрационные требования, предъявляемые к приборам. Тем более, что точность АП, достигнутая в промышленных условиях, была низкой, и поверхности, как правило, использовались в осветительных каналах приборов.

В настоящее время ситуация изменилась, так как возможности сферической оптики на данный момент исчерпаны и дальнейшее повышение эксплуатационных и технических характеристик оптических устройств, требования к которым постоянно растут, требует качественно нового подхода к конструированию систем. Необходимо создать новую элементную базу оптического приборостроения, одним из важных элементов которой являются АП высших порядков. Характерная особенность новых приборов заключается в использовании АП оптической точности, поскольку эти элементы участвуют в каналах, создающих оптическое изображение. В связи с этим возникла необходимость создания прогрессивной технологии формообразования АП, способной удовлетворить запросы конструкторов. Известно, что абразивная традиционная обработка не может обеспечить получение произвольных АП оптической точности. Это связано с тем, что при формировании АП из-за их переменной кривизны нельзя реализовать процесс притира, который обеспечивает получение поверхностей высокой точности при взаимном притире двух относительно грубых поверхностей. Поэтому проблема создания промышленной технологии формирования АП высокой точности с гарантированным выходом годных деталей остается открытой. Ее решение идет как по пути усовершенствования существующих методов формообразования, так и за счет создания принципиально новых способов асферизации. Одним из



таковых является методика формирования АП управляемыми пучками инертных и химически активных ионов.

Понятие АП объединяет широкий класс поверхностей. Если классифицировать АП, то можно выделить следующие общие критерии:

- асферичность - может изменяться от долей микрометров до десятков миллиметров;
- градиент асферичности - изменение асферичности на 1 мм радиуса;
- крутизна поверхности - от практически плоской до полусферической;
- форма образующей от кривых второго порядка до произвольного осесимметричного профиля.

Очевидно, что универсального метода формообразования, обеспечивающего получение АП всех видов, нет и не может быть. Каждый из существующего многообразия способов формирования АП имеет предмет свой класс поверхностей, характеризующийся определенным набором характеристик [107 - 111].

Наиболее универсальным способом формообразования в настоящее время является метод абразивной обработки, для АП с малой асферичностью используется способ вакуумной асферизации, весьма перспективным методом является метод прессования и моллирования.

Класс АП, для формообразования которых целесообразно использовать эффект распыления, определяется возможностями и особенностями метода ионной обработки. Уникальная возможность создания полностью управляемого процесса формирования профиля за счет использования управляемых пучков с хорошо определенными параметрами позволяет формировать поверхности высокой точности произвольного профиля. С другой стороны, относительно низкая производительность процесса распыления ограничивает асферичность получаемых АП.

Таким образом, ионное формообразование целесообразно использовать при асферизации высокоточных АП, в том числе и высших порядков с малыми отступлениями от ближайшей поверхности сравнения (несколько десятков микрометров).

### **8.1. Формообразование поверхностей оптических деталей ионной обработкой**

Из анализа работ, посвященных исследованию процесса формирования поверхностей асферического профиля, следует, что возможно два варианта схемы формообразования:

- с использованием управляемых тонких ионных пучков, формирующих поверхность последовательно по зонам;
- с использованием широкого ионного пучка, облучающего всю поверхность одновременно. Управление распределением величины съема по поверхности в этом случае осуществляется либо модуляцией плотности тока либо модуляцией времени обработки.

Большую перспективу имеет способ формообразования оптических поверхностей с помощью широкого ионного пучка, облучающего всю обрабатываемую поверхность в сочетании с системой маскирования [112].

В начале 80-х годов появилась вакуумная установка ВУ-1 [113, 114] для размерной обработки, доводки формы и асферизации поверхностей оптических деталей. Обработка осуществлялась ионным источником и диаметром пучка 100 мм, который устанавливался вне вакуумной камеры на вакуумном шарнире, с помощью которого источник перемещался (колебался) для увеличения зоны обработки. Путем маскирования ионного пучка аргона можно получать асферические поверхности на деталях диаметром до 30 мм с погрешностью 1 - 5% при асферичности поверхностей до 15 мкм и градиенте асферичности до 5 мкм/мм.

Предельные точностные возможности способа формирования АП с помощью ионных пучков определяется эффективностью используемой системы управления пучком и стабильностью параметров ионного источника, прежде всего, стабильностью распределения плотности тока. Сложность создания ионных источников большого размера со стабильными характеристиками, необходимыми для реализации метода ионного формообразования, и является объективной причиной того, что многие работы по ионной асферизации не были доведены до уровня промышленных технологий и остались на уровне лабораторных исследований. Сложные комплексы типа установки "Дуоплазмотрон", содержащие ЭВМ и лазерный интерферометр для активного контроля формы поверхности не нашли спроса. Как показывает опыт работы по ионной обработке оптических материалов, активный контроль процесса обработки в принципе невозможен из-за неизбежного нагрева поверхности детали под действием бомбардировки энергетическими ионами. Поэтому системы с оптическим контролем поверхности образца и обратной связью с системой управления для корректировки процесса вряд ли удастся создать.

В ГОИ работы по применению ионной обработки для формообразования поверхностей оптических деталей, в том числе и асферических, начаты в 1968 г. , причем сразу же был взят курс на создание высокостабильных ионных источников большого диаметра, которые позволили бы обрабатывать всю поверхность детали одновременно, а высокая стабильность характеристик источника, а следовательно, и процесса ионной обработки, исключала бы необходимость контроля величины съема непосредственно в технологических установках. Поставленная задача была успешно решена, благодаря разработанному способу ионной обработки оптических материалов с помощью сеточного электрода. Система сеточного электрода позволяет получать ионные пучки практически неограниченного размера и характеризуется высокой стабильностью параметров пучка и воспроизводимостью во времени. Это свойство системы сеточного электрода основано на характерной особенности, заключающейся в том, что малые флуктуации параметров режима (ВЧ напряжение, плотность тока) слабо влияют на характеристики пучка ионов, т.е. на их распределение по площади электрода. Как следствие, при воспроизведении геометрических параметров электрода наблюдается строгое вос-

произведение распределения плотности ионного тока, и система отличается высокой стабильностью в работе в течение практически неограниченного времени. Причем это свойство сохраняется при изменении размеров электрода в широком диапазоне (диаметр 10- 600 мм), что связано с механизмом создания плазмы в системе сеточного электрода и формирования пучка. Разработка системы сеточного электрода позволила провести всестороннее исследование закономерностей процесса ионного формообразования и разработать пригодный для промышленного применения метод формообразования. Возможность получения пучка химически активных ионов в системе сеточного электрода позволило провести аналогичные исследования для случая ионно-химической обработки и впервые реализовать и разработать метод ионнохимического формообразования. По мере исследования процесса формирования профиля решен ряд принципиальных вопросов контроля АП, полученных методами ионной обработки, и определены критерии эффективности использования АП в оптических приборах различного назначения с учетом особенностей и преимуществ разработанных методик формообразования.

Методы ионной асферизации позволяют получать АП любой заданной осесимметричной формы на деталях из оптических стекол и кристаллов диаметром до 250 мм при асферичности до 30 мкм и градиенте асферичности до 5 мкм/мм с точностью профиля десятые доли микрометров.

Для реализации процессов создано промышленное оборудование (установка ПИОН-300, ПИОН-500), разработан замкнутый технологический комплекс получения АП, включающий в себя процессы ионной обработки, автоматизированного контроля и корректировки процесса на основании результатов измерений.

## **8.2. Ионное формообразование**

Для решения задач точного формообразования система ВЧ сеточного электрода обладает рядом преимуществ. В частности, наиболее важное свойство системы, позволяющее строить управляемые процессы формирования точных АП - высокая стабильность во времени распределения плотности ионного потока, формируемого электродом, и воспроизводимость этого распределения при воспроизводимости геометрических параметров электрода. Для формообразования осесимметричных АП используется радиальный сеточный электрод. При такой конструкции за счет круговой симметрии возможно достаточно просто получать любые осесимметричные поверхности как монотонные, так и с точками перегиба. В зависимости от формы исходной поверхности, подвергаемой обработке, электрод может быть различным образом ориентирован относительно оси формируемой поверхности. В частности, получение асферичных поверхностей с малыми отступлениями от плоскости и сферы малой крутизны обеспечивается использованием плоского радиального сеточного электрода, расположенного перпендикулярно оси

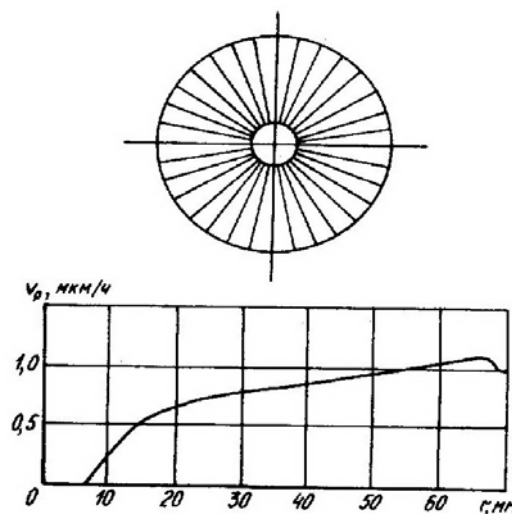
обрабатываемой детали. При таком относительном положении электрода и поверхности детали последняя подвергается действию параллельного пучка ионов, бомбардирующих ее под прямым углом. Плоский радиальный электрод однозначно определяется углом раскрытия  $\alpha$  - углом между соседними пластинами, образующими электрод.

В данной системе источником ионов служит плазма ВЧ газового разряда, поддерживаемого за счет вторичной электронной эмиссии из сеточного электрода. Поскольку электронное облако локализовано над пластинами, образующими электрод, то средняя плотность электронов, измеренная между пластинами, изменяется вдоль его радиуса.

В связи с этим существует некоторое радиальное распределение концентрации ионов в положительном столбе разряда. Кроме того, в зависимости от радиуса за счет переменного линейного расстояния между пластинами изменяется пропускание электрода по отношению к ионному пучку.

В конечном счете, в результате совместного действия этих двух факторов плотность ионного потока, приходящего на поверхность бомбардируемой детали, переменна по ее радиусу, а, соответственно, переменна скорость съема материала обрабатываемого образца.

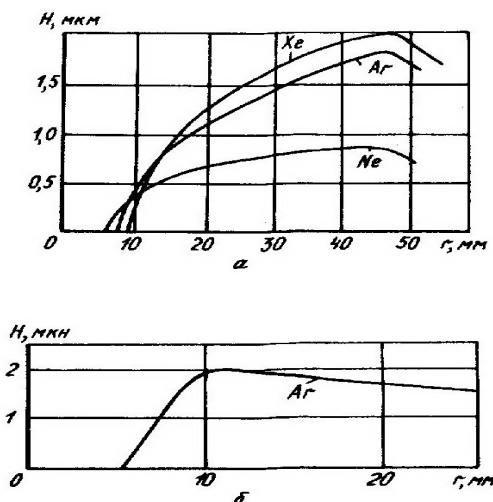
На рис.53 приведено радиальное распределение скорости съема, полученное при обработке плоской поверхности в атмосфере Ag для электрода с углом раскрытия  $\alpha = 6^\circ$ .



**Рис.53. Радиальный сеточный электрод и радиальное распределение скорости съема материала по поверхности плоского образца для электрода с углом раскрытия  $6^\circ$**

С увеличением линейного расстояния между пластинами электрода его пропускание растет, а, следовательно, растет скорость обработки. Однако, начиная с некоторого расстояния при дальнейшем его увеличении, скорость съема будет падать.

При увеличении расстояния из-за того, что ионы концентрируются вокруг пластин, между последними появляется область, которая подвергается бомбардировке всё меньшей, а затем и нулевой интенсивности. В результате интегральная скорость съема, т.е. на вращающейся мишени, падает от максимального значения до нулевого.



**Рис.54. Радиальные кривые съема материала электродом, полученные при бомбардировке ионами инертных газов при  $\alpha$ , равном  $6^\circ$  (а) и  $12^\circ$  (б)**

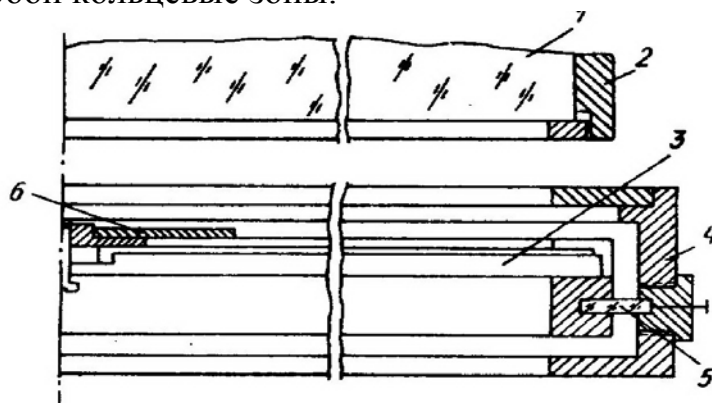
Исследование влияние параметров бомбардирующей частицы (ее массы и энергии), а также угла раскрытия электрода на закон изменения скорости съема вдоль радиуса обрабатываемой поверхности показало, что при фиксированном угле раскрытия  $\alpha = 6^\circ$ , ВЧ напряжении  $U_{вч} = 2$  кВ, изменении массы бомбардируемого иона в пределах 20 а.е. (Ne) - 130 а.е. (Xe), форма кривой радиального распределения съема оставалась неизменной с погрешностью до 0,1 мм (см. рис.54 а).

Аналогично при том же угле раскрытия, варьируя ВЧ напряжением в диапазоне 1,5 - 2,5 кВ, не наблюдалось изменений формы кривой. В качестве рабочего газа использовался аргон.

При работе с электродами различного раскрытия замечено, что угол раскрытия существенно сказывается на характере зависимости скорости обработки от радиуса. Так, радиальное распределение съема для электрода с  $\alpha = 12^\circ$  при бомбардировке ионами Ar (см. рис.54 б) начиная с некоторого радиуса  $r = 11$  мм (расстояние между пластинами 2,4 мм) скорость падает, в то время как при  $\alpha = 6^\circ$  скорость возрастает до  $r = 80$  мм (расстояние между пластинами 8,4 мм). Это связано с тем, что в зависимости от раскрытия изменяется распределение плотности ионов в плазме разряда.

Оптимальным раскрытием радиального сеточного электрода с точки зрения формообразования является  $\alpha = 6^\circ$ , так как при этом угле электрод представляет собой систему, воспроизводящую с высокой точностью радиальное распределение в съеме поверхностного слоя в широком диапазоне изменения параметров режима обработки.

Как указывалось ранее, ВЧ сеточный электрод является системой, позволяющей получать ионный пучок большого размера, в котором с высокой точностью воспроизводится распределение плотности тока. Как результат при осесимметричной конструкции электрода получается воспроизводимое радиальное распределение съема материала образца, подвергаемого действию ионного пучка. В связи с этим появляется возможность управлять пучком, получая любое заданное распределение съема по поверхности, т.е. осуществлять формообразование поверхностей, в частности, асферических. Эта задача в данной системе решается - путем маскирования пучка с помощью плоского непрозрачного экрана - маски, который программирует время обработки для каждой точки формируемой поверхности. Профиль маски рассчитывается для каждой конкретной поверхности на основании схемы расположения припуска, предполагая, что на образец ионы падают параллельным пучком. Так как при выбранной конструкции электрода (радиальный плоский электрод с углом раскрытия  $\alpha = 6^\circ$ ) центральная часть ионного пучка диаметром 16 мм экранируется, то формируемые в данной системе поверхности представляют собой кольцевые зоны.



**Рис.55. Расположение элементов подколпачной арматуры при формообразовании осесимметричных поверхностей: 1 - образец; 2 - держатель образца; 3 - пластины электрода; 4 - заземлённый экран; 5 - кварцевый изолятор; 6 - маска**

Экспериментально показано, что форма радиальной кривой съема материала образца не зависит от массы бомбардирующей частицы. Однако, учитывая зависимость скорости распыления от массы иона, из изученного ряда инертных газов в качестве рабочего выбран Ar, как наиболее распространенный газ.

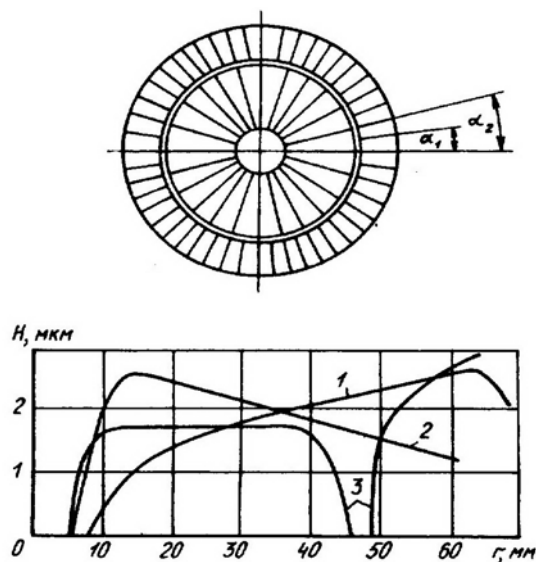
Маска-экран, задающая программу обработки формируемой поверхности, располагается непосредственно на сеточном электроде. При этом возможны два принципиально различных варианта формообразования:

- маска находится в электрическом контакте с электродом, т.е. ее потенциал соответствует потенциалу электрода;
- маска изолирована от электрода и заземлена.

Экспериментально опробованы оба варианта. Рассмотрим вариант с маской, находящейся под потенциалом (рис.55). Все данные по формообра-

зованию получены в этой схеме при использовании плоского радиального электрода с углом раскрытия  $\alpha = 6^\circ$  в атмосфере Ag. При изучении закономерностей формообразования оптических поверхностей ионным пучком все эксперименты проводились в одинаковом режиме: ВЧ напряжение -2,2 кВ, средняя плотность ионного тока - 2 мА/см<sup>2</sup>, расстояние образец-электрод - 3 мм.

В качестве образцов при изучении принципа формообразования использовались плоско-параллельные пластины из стекла К8 и плавленного кварца диаметром  $D \leq 140$  мм с поверхностями, отполированными с точностью  $N = 1$  полосы  $\Delta N = 0,2$  полосы. Отступлениями формируемых АП от исходной (плоскости) в данных условиях являются десятки микрометра. Максимальный градиент асферичности  $dH/dR$  получаемых поверхностей определяется крутизной кривой радиального съема материала образцом электродом без маски, и при указанных абсолютных величинах съемов для сетки с раскрытием  $\alpha = 6^\circ$  находится на уровне 0,3-1 мкм/мм. Для получения более крутых АП возможно видоизменять электрод, в частности, использовать комбинированное раскрытие (рис.56).



**Рис.56. Конструкция электрода с комбинированным раскрытием и радиальные кривые съема материала электродами с  $\alpha$ , равным  $6^\circ$  (1),  $12^\circ$  (2), и комбинированным раскрытием (3)**

При такой конструкции радиальная кривая съема вблизи центра электрода за счет большого раскрытия ( $\alpha = 12^\circ$ ) имеет большую крутизну. Внешняя часть сеточного электрода с  $\alpha = 6^\circ$  предотвращает спад на радиальной кривой, который наблюдается при полном электроде с  $\alpha = 12^\circ$ . Очевидно, что кривая 3 дает возможность формировать более крутые АП на диаметре  $D < 80$  мм с градиентами асферичности до 2 мкм/мм по сравнению с кривыми 1 и 2.

Для получения воспроизводимых результатов по форме образующей меридионального сечения заданной поверхности необходимо обеспечить совпадение оси вращения формируемой поверхности с центром электрода. Несоосность 0,1 мм позволяет получать стабильное положение границы начала обработки с погрешностью 0,2 мм, что при отступлении от исходной плоскости 10 мкм дает максимальную погрешность в профиле менее 0,5% при градиенте асферичности 0,3 мкм/мм.

Основным инструментом, обеспечивающим заданное распределение отступления формируемой поверхности от исходной в процессе формообразования ионным пучком, служит маска. Очевидно, что при обработке образца маска также подвергается ионной бомбардировке и, соответственно, распыляется. В результате этого снижается скорость удаления материала мишени за счет переосаждения продуктов распыления маски на обрабатываемую поверхность, т.е. происходит увеличение эффективного размера маски. В связи с этим при выборе материала маски предпочтение отдавалось материалам с низким коэффициентом распыления в атмосфере инертного газа.

Первоначальные опыты по формообразованию проводились с использованием масок Ta, Ti, Ni. Однако было замечено, что существенного различия в скоростях обработки исследуемых материалов при использовании масок из тугоплавких металлов и наиболее часто употребляемой углеродистой стали в данных режимах практически нет. Поскольку сталь-20 дешевый, легко доступный материал, свободно поддающийся механической и химической обработке, то в конечном варианте из исследованного ряда возможных материалов для маски предпочтение было отдано углеродистой стали. Толщина маски равнялась 0,5 мм и выбиралась из условия упрощения процесса ее изготовления с одновременным обеспечением достаточной жесткости для выполнения требования сохранения постоянства формы маски под действием ионной бомбардировки. Маска ориентируется соосно относительно электрода за счет сопряжения по посадочному диаметру.

Попадание ионов за границу геометрической тени экрана и соответственно, переосаждение материала маски служит количественной характеристикой эффективности маскирования. Исследовалась степень переосаждения от диаметра диафрагмы при некотором значении ВЧ напряжения ( $U_{ВЧ} = 2,5$  кВ). Ожидалось, что степень влияния переосажденного материала маски на размеры образующегося осадка должна увеличиваться с ростом площади маски по отношению к площади поперечного сечения ионного пучка. Однако такой зависимости не было замечено.

Очевидно, это связано с тем, что на обрабатываемую поверхность распыленные частицы материала маски могут попасть лишь за счет диффузии, поэтому в переосаждении участвуют те из них, которые распыляются из краевой зоны маски.

Для определения требований к стабилизации ВЧ напряжения с целью обеспечения постоянства границы обработки при формообразовании исследовалось влияние ВЧ напряжения на величину залета ионов. Оказалось, что для электрода с углом раскрытия  $\alpha = 6^\circ$  изменение ВЧ напряжения в преде-

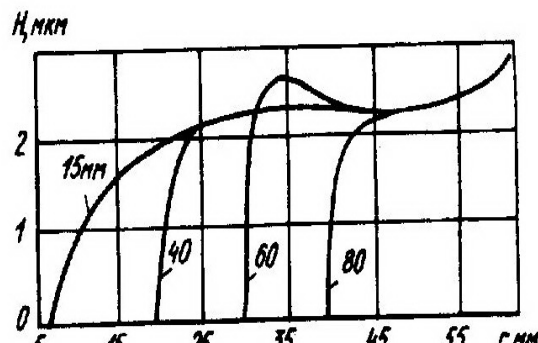


лах 1,6 - 2,5 кВ не сказывается на величине залета, и при использовании маски, например диафрагмы диаметром 60 мм, величина залета равна 0,9 мм.

Экспериментально установлено, что положение границы обработки остается постоянным при изменении расстояния маска - образец в пределах 3 - 5 мм для выбранной произвольной диафрагмы, причем это постоянство наблюдалось при двух значениях ВЧ напряжения 1,6 и 2,2 кВ. Однако величина залета ионов в область геометрической тени диафрагмы существенным образом зависит от угла раскрытия электрода. Так, при экранировании ионного пучка, полученного электродом  $\alpha = 6^\circ$ , диафрагмой диаметром 16 мм, указанная величина равнялась 0,85, в то время как при использовании электрода с  $\alpha = 12^\circ$  величина залета ионов возросла до 2,6 мм при прочих равных условиях.

Таким образом, при использовании экранирующих элементов в виде круглых диафрагм положение начала обработки формируемой поверхности с погрешностью 0,1 мм не зависит от положения экрана на электроде, нечувствительно к колебаниям ВЧ напряжения, а также к непостоянству расстояния образец - экран.

Для формообразования, кроме положения границы формирования поверхности, важно знать кривые радиального распределения съема материала образца при экранировке пучка диафрагмой. В связи с этим экспериментально получены такие кривые для диафрагм различного диаметра (рис.57), из которых следует, что эффект присутствия экрана сказывается лишь в непосредственной близости к нему, а затем радиальная кривая сливается с кривой для неэкранированного электрода. В зависимости от расстояния до экрана размер зоны поверхности, которая формируется краем экрана, различен и с увеличением диаметра диафрагмы уменьшается. Кроме того, из приведенных кривых видно, что вблизи диаметра диафрагмы 60 мм существует кольцевая зона, в пределах которой плотность ионного тока на электроде имеет локальный максимум. Соответственно на формируемой поверхности вследствие этого вырабатывается кольцевая "яма", которая при переходе к диафрагме диаметром 80 мм полностью исчезает. Посредством зондовых измерений не удалось зафиксировать этот локальный выброс плотности тока, однако следует отметить, что при расчете профиля маски для получения конкретной АП в указанной зоне этот провал на радиальной кривой необходимо учитывать.

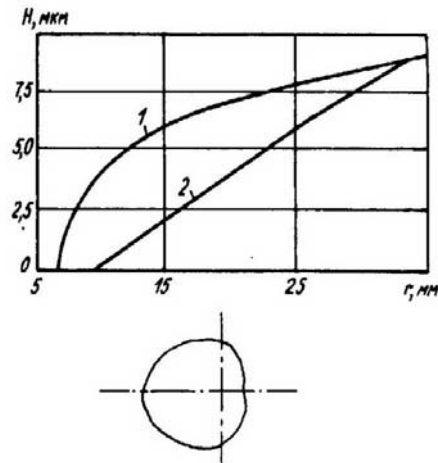


**Рис.57. Зависимость эффективности маскирования от диаметра маски  
(модельное рассмотрение)**

Заданный профиль конкретной АП получается за счет программирования времени обработки каждой зоны формируемой поверхности посредством непрозрачного экрана-маски, имеющего профильный вырез. Из сравнения профиля меридионального сечения требуемой АП и кривой радиального распределения съема материала образца неэкранированным электродом для каждой зоны поверхности определяется коэффициент экранирования ионного пучка  $K$  - отношение необходимого съема материала с исходной плоской поверхности заготовки к съему в этой же точке, обеспечиваемой электродом. Очевидно, что время обработки каждой зоны для обеспечения требуемого отступления от исходной поверхности должно быть пропорциональным значению коэффициента  $K$  для каждой этой зоны и задается угловым размером выреза маски  $\varphi_r$ . Учитывая, что значение  $K = 1$  соответствует углу выреза маски, равному  $360^\circ$ , для заданной зоны с радиусом  $R$ :

$$\varphi_r = 2 \pi K_r$$

Таким образом, получаем для каждого значения радиуса соответствующее значение углового размера выреза маски, т.е. ее профиль в полярных координатах. В случае, если формируемая поверхность представляет собой кольцевую зону, внутренний диаметр которой больше размера центрального экранирования пучка, вырез маски рассчитывается из сравнения профиля желаемой АП с радиальной кривой электрода, экранированного круглой диафрагмой диаметра, равного внутреннему размеру обрабатываемой зоны (рис.58).

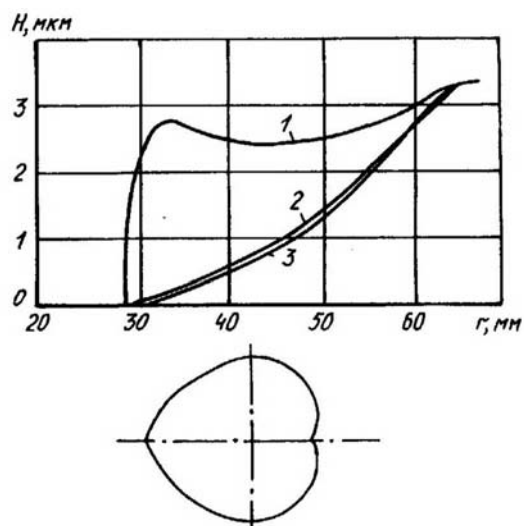


**Рис.58. Радиальная кривая съема материала электродом (1), теоретический профиль поверхности (2) и профиль маски**

Для уменьшения градиента напряженности электрического поля, искаженного маской, последняя делается симметричной относительно одного из диаметров.

При модельном рассмотрении процесса формообразования оптических поверхностей за счет маскирования параллельного ионного пучка выяснено, что положение границы обработки не зависит от размера маскирующей диафрагмы, т. е. от ее положения на электроде. Однако такой подход допускает одно существенное упрощение - маска-экран в виде круглой диафрагмы меняет свое раскрытие от 0 до  $360^\circ$  скачком. Поэтому профиль, полученный с ее помощью, представляет собой краевой эффект, и так как для любого размера диафрагмы сохраняется симметричность искажения ионного пучка относительно его оси, то характер маскирования практически не зависит от положения диафрагмы на электроде. При переходе к реальной маске картина усложняется. Вследствие плавного и для каждой конкретной маски индивидуального изменения ее угла раскрытия от 0 до  $360^\circ$  контур маски будет искажать пучок по-своему. Кроме того, из-за увеличения длины линии контакта маски с ионным пучком растет количество распыленного материала маски, участвующее в образовании осадка. Очевидно, что эффект увеличения действующего размера маски зависит от ее положения на электроде, а также от конкретного профиля, т.е. соотношения размеров открытой и закрытой частей пучка для каждой зоны  $\varphi_r / (2\pi - \varphi_r)$ .

Влияние положения маски на электроде на увеличение ее эффективного размера прослеживается из сравнения соответствия экспериментальных и теоретических профилей. Максимальное отступление образованной поверхности от плоскости 3 мкм, градиент асферичности 0,2 мкм/мм. При  $r_{\min} = 7,1$  мм ошибка профиля из-за переосаждения материала маски  $\delta H = 0,8$  мкм (см. рис.58); при  $r_{\min} = 29,2$  мм  $\delta H = 0,1$  мкм (рис.59).

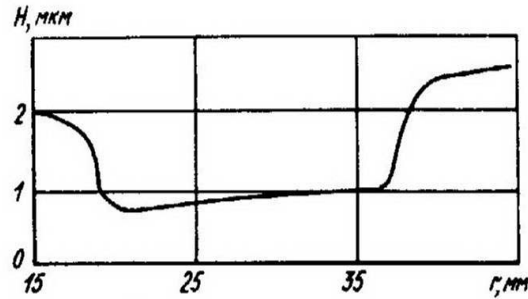


**Рис.59. Радиальная кривая съёма материала электродом (1), экранированным диафрагмой диаметром 60 мм, теоретический (2) и экспериментальный (3) профили поверхности и профиль маски**

Предпринята попытка аналитически учесть влияние эффекта распыления маски на изменение ее действующего размера в некотором интервале радиусов  $r = r_2 - r_1$  путем определения закона изменения  $\Delta\varphi_r$ . Значения  $r_1$  и  $r_2$  выбирались произвольно и равнялись 30 и 50 мм соответственно. При этом маска иммитировалась кольцевой диафрагмой 60 x 100 мм, из которой вырезан сектор с углом  $150^\circ$ . Из сравнения кривой электрода, маскированного такой диафрагмой (рис.60), с радиальной кривой незранированного электрода следует  $\frac{H_{1r}}{2\pi} \varphi_r = \frac{g_r}{2\pi} (2\pi - \varphi_r) + H_{2r}$ , где  $H_{1r}$ ,  $H_{2r}$  - съём материала бомбардируемого образца на радиусе  $r$  незранированным электродом и с экраном-диафрагмой, соответственно, мкм;  $g_r$  - величина осадка, образованного на поверхности, из-за присутствия маски, мкм;  $\varphi_r$  - угловой размер выреза маски для радиуса  $r$ , рад.

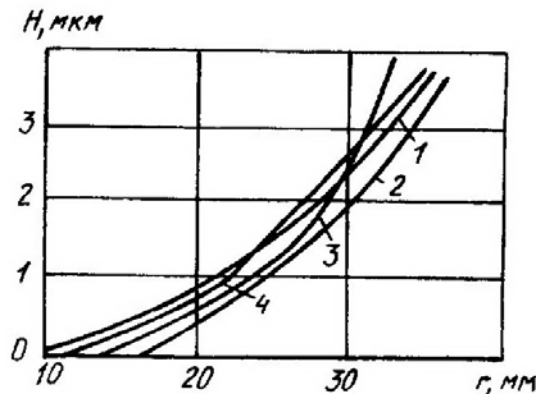
Из этого уравнения легко находится приведенное напыление,  $g_r / 2\pi$ , на основании которого определяется дополнительное раскрытие маски  $\varphi_r$ , компенсирующее увеличение ее эффективного размера на радиусе  $r$ . Для указанных значений  $r_1$  и  $r_2$   $\Delta\varphi_r = 0,73$  рад,  $\Delta\varphi_{2r} = 0,21$  рад. Так как в интервале  $\Delta r$  профиль поверхности, полученной при использовании диафрагмы, практически прямая линия, то при увеличении от  $r_1$  до  $r_2$   $\Delta\varphi_r$  уменьшается от  $\Delta\varphi_{r_1}$  до  $\Delta\varphi_{r_2}$  пропорционально, т.е.

$$\Delta\varphi_r = \varphi_r + \left[ \Delta\varphi_{r_1} - \frac{(\Delta\varphi_{r_1} - \Delta\varphi_{r_2})}{\Delta r} (r_2 - r_1) \right]. \quad (4)$$



**Рис.60. Радиальная кривая съёма материала электродом, маскированным кольцевой диафрагмой с угловым вырезом  $150^\circ$**

Изложенная методика использовалась при расчете профиля маски, необходимой для формообразования АП, теоретический профиль которой приведен на рис.61. Там же дан профиль поверхности, полученной с помощью маски, в которой не учтен эффект распыления (кривая 2) и скорректированный в соответствии с формулой (4) (кривая 3). При этом в первом случае максимальное отступление экспериментального профиля от теоретического наблюдается вблизи границы обработки и равно 0,25 мкм, а во втором случае максимальное отступление переместилось в область края формируемой детали и возросло до 0,4 мкм.



**Рис.61. Профили поверхности: 1 - теоретический; 2 - полученный с маской с учётом переосаждения; 4 - полученный с маской, скорректированный методом проб**

Таким образом, из приведенных данных следует, что расчет дополнительного раскрытия маски при малых углах раскрытия дает заниженное значение  $\Delta\varphi_r$ , а при большом раскрытии - завышенное. Отсюда очевидно, что эффект изменения действующего размера маски в результате распыления ее поверхности под действием ионной бомбардировки зависит от отношения  $\varphi_r / (2\pi - \varphi_r)$ . Поскольку при переходе от одной конкретной маски к следующей значение  $\varphi_r / (2\pi - \varphi_r)$  может изменяться, то для того, чтобы учесть с достаточной точностью изменение эффективного размера маски аналитически, следует набрать необходимую статистику, т.е. провести определенное количество экспериментов, имитируя маски с различным соотношением  $\varphi_r$  и

$(2\pi - \varphi_r)$ . Считая такой подход к решению повышения точности формообразования поверхностей трудоемким и поэтому нецелесообразным, можно пользоваться более простым методом проб. Дополнительное раскрытие  $\Delta\varphi_r$  для каждой зоны  $R$  определяется следующим образом.

Производится обработка поверхности исходной заготовки, используя маску, некорректированную на распыление. Затем, сравнивая полученный профиль с теоретическим, определяется для каждого значения  $r$  коэффициент дополнительного экранирования пучка  $\Delta K_r$ , вызванного распылением маски

$$\Delta K = \frac{H_{TP} - H_D}{H_D}$$

где  $H_D$  - сьем материала на радиусе  $r$  при использовании нескорректированной маски;  $H_{TP}$  - сьем материала на этом же радиусе, необходимый для получения заданного профиля, и соответственно требуемое дополнительное раскрытие  $\Delta\varphi_r$  для компенсации  $\Delta K_r$

$$\Delta\varphi_r = \varphi_r \Delta K_r.$$

Тогда действительный угол раскрытия для зоны  $r$ :

$$\varphi_{RD} = (\varphi_r + \Delta\varphi_r) = \varphi_r \left( 1 + \frac{H_{TP} - H_D}{H_D} \right)$$

Таким образом, получаем новый профиль маски, который учитывает увеличение ее эффективного размера из-за распыления самой маски. В соответствии с скорректированными координатами изготавливается второй вариант маски, с которым затем производится обработка. При таком подходе первая же коррекция уменьшила погрешность профиля полученной поверхности до 0,1 мкм. При необходимости дальнейшего повышения точности формообразования описанная процедура может повторяться.

Предложенная методика формообразования АП маскированным пучком ионов инертных газов позволяет получать любые осесимметричные АП с асферичностью до 10 мкм и градиентом асферичности 0,3-1 мкм/мм с точностью 1 %.

### **8.3. Особенности метода формообразования маскированным пучком ионов**

Характерной особенностью методов формообразования маскированным широким ионным пучком является то, что управляющий элемент-маска рассчитывается и корректируется на основании данных о реальной форме поверхности образца.

При расчете маски используют в качестве исходной поверхность, полученную неэкранированным пучком на заготовке конкретной формы. Очевидно, что погрешности измерения формы этой поверхности неизбежно закла-

дываются в профиль маски и, следовательно, являются источником погрешностей, формируемых впоследствии этой маской АП. В отличие от других методов формообразования, в том числе с использованием тонких пучков, где контроль АП осуществляется после полного формирования поверхности и играет аттестационную роль (определение не формы АП, а ее отступления от требуемого профиля), в разработанной методике асферизации контроль формы поверхности является частью технологического процесса, и предельные возможности метода асферизации во многом определяются возможностями используемых методик контроля. При этом существенным является использование методов, способных дать количественную оценку формы поверхности, причем оценку именно формы поверхности, т.е. распределение отступлений полученной поверхности от исходной поверхности заготовки, а не отступление полученной формы от заданной. Поскольку речь идет о высокоточных АП, то задача контроля решается использованием интерференционного метода контроля. Этот количественный способ, позволяющий по распределению интерференционных полос определить форму поверхности с точностью до сотых долей мкм. В связи с особенностями методики контроля, которые определяются особенностями схемы формообразования, пересмотрены критерии оценки качества АП, задаваемые на чертеже детали. Традиционный допуск на угловые аберрации заменен допуском на две характеристики точности изготовления АП: несоответствие асферичности полученной АП расчетной и отступление формы образующей АП от требуемой.

Особенностью предлагаемой схемы формообразования является то, что с первого момента обработки осуществляется формирование профиля по всей поверхности заготовки одновременно, т.е. с первого же момента обработки реализуется требуемый закон распределения съема материала по поверхности заготовки, задаваемый маской, и в дальнейшем этот закон сохраняется.

Таким образом, с увеличением времени обработки происходит пропорциональная трансформация образующей АП без ее деформации. Благодаря этому свойству ионной асферизации, удастся прогнозировать форму АП при контроле ее на промежуточной стадии формирования, т.е. по промежуточному съему, удобному с точки зрения контроля. Получение же АП с требуемой асферичностью достигается обработкой заготовки через маску, профиль которой рассчитан и откорректирован по данным контроля по промежуточному съему в течение времени, необходимого для получения заданной глубины обработки.

В схеме интерференционного контроля формы поверхности по промежуточному съему для сравнения используется поверхность исходной заготовки, т.е. в общем случае сферическая поверхность. Следовательно, наблюдается картина, возникающая при интерференции двух волновых фронтов - сферического и асферического, и число наблюдаемых полос будет определяться асферичностью контролируемой АП.

Наблюдаемая картина фиксируется и обрабатывается по стандартным программам на ЭВМ. Конечным результатом математической обработки ин-

терференционной картины является профиль АП. Точность измерения, которая определяется достоверностью интерпретации картины, зависит от контраста картины и количества наблюдаемых полос. Причем высокую точность измерений можно получить при отступлении контролируемой АП от поверхности сравнения не более 1,5 мкм (с учетом этого, промежуточный съем в разработанной методике асферизации находится в пределах 0,8 - 1,5 мкм.). Нижний предел обусловлен тем, что при меньших съемах трудно количественно определить форму поверхности с требуемой точностью, так как мало информации и могут быть упущены некоторые детали профиля, особенно если профиль имеет точки перегиба.

Профиль полученной АП оценивается по интерференционной картине, возникающей между асферическим фронтом и сферическим, создаваемым исходной сферой этой же заготовки, т. е. обрабатываемая поверхность формируется таким образом, что остаются необработанными три участка ( три точки) исходной поверхности. Эти точки (участки) расположены одна в центре заготовки и две за пределами световой зоны, т.е. заготовка должна иметь диаметр, превосходящий световой на несколько мм.

Таким образом, при наблюдении в интерферометре обработанной поверхности видны участки исходной сферы, и при обработке интерферограммы для сравнения используется исходная сфера в отличие от традиционной оценки интерферограммы, когда для сравнения используется ближайшая сфера. В этом состоит существенное отличие используемой схемы интерференционного контроля.

При контроле АП по промежуточному съему процесс формообразования сводится к следующему:

- из сравнения кривой радиального распределения съема материала неэкранированным электродом и меридионального сечения АП рассчитывается и изготавливается маска, обеспечивающая требуемый профиль поверхности с необработанным центром (диаметр 0,5-1 мм) и зоной за световым диаметром;

- производится предварительная обработка сферической заготовки через маску на глубину 0,8 - 1,5 мкм;

- производится контроль полученного профиля по сравнению с требуемыми, приведенными к полученной асферичности;

- из сравнения профилей рассчитывается коррекция маски и изготавливается скорректированная маска;

- производится предварительная обработка новой сферической заготовки через откорректированную маску на глубину асферичности 0,8 - 1,5 мкм;

- при удовлетворительной точности полученного профиля последняя обработанная заготовка с профилем на глубину асферичности 0,8 - 1,5 мм дообрабатывается через эту же откорректированную маску до требуемой полной асферичности. При этом контролируется время доработки.

Для повышения точности формообразования АП с асферичностью более 10 мкм и поверхностей со сложным профилем используется дополнительно к контролю по промежуточному съему компенсационные методы контроля сформированной АП.



Схема контроля традиционная. В качестве компенсаторов используются либо синтезированные голограммы, либо плоскопараллельные пластины с учетом их остаточных aberrаций.

По данным компенсационного контроля может проводиться дополнительная коррекция маски для обеспечения требуемой точности АП. Схема контроля может быть осуществлена на любом интерферометре. Выбор прибора обусловлен типом и размером детали, ее крутизной и др. Схема же контроля остается одной и той же - контроль из центра кривизны [115]

В случае формирования АП на заготовках с большим радиусом кривизны (стрелка прогиба 1 - 3 мм) можно осуществлять контроль формы АП по плоскому свидетелю, т. е. обработка профиля маски осуществляется по профилю поверхности, полученной на плоской исходной поверхности, обработанной через эту маску.

Контроль формы поверхности осуществляется интерференционным методом в схеме Физо, т.е. анализируется картина, возникающая в клине, образованном плоским эталоном и контролируемой поверхностью. При такой схеме измерений форма интерференционной полосы в направлении, параллельном ребру клина, дает профиль контролируемой поверхности. С учетом осевой симметрии профиля, полученного на плоском свидетеле, критерием правильности настройки интерференционной картины является ее симметризация. Такая схема контроля может быть реализована на любом инструментальном микроскопе. Расшифровка интерферограммы - традиционная: измеряются координаты полос, по которым затем строится профиль поверхности.

Такой технологический метод контроля легко может быть реализован на рабочем месте и не требует специальных интерферометров. Более того, при использовании, например, УИМ-23 на образцах диаметром ~ 100 мм можно проконтролировать АП с асферичностью до 50 мкм непосредственно по полному съему. Для АП на детали с большей крутизной и, в частности, для АП с апертурой, превосходящей апертуру измерительных интерферометров, разработан технологический метод контроля формы АП по набору плоских свидетелей. Метод заключается в том, что анализируется профиль поверхности на плоских свидетелях, расположенных на разных расстояниях от плоскости маски в пределах стрелки прогиба сферической заготовки, т. е. набор плоскостей имитирует сферу заданной крутизны. По результатам анализа профилей плоских образцов синтезируется гипотетический профиль АП, который ожидается на сфере данной крутизны. Метод прост и надежен. Предложенные методы контроля формы АП являются подходящими только для данной технологии, так как она основана на стабильном и воспроизводимом процессе удаления материала с поверхности заготовки.

#### 8.4. Ионно-химическое формообразование асферических поверхностей

Сочетая возможность ИХО оптических стекол и способ управления ионным пучком путем его маскирования, разработана методика ионно-химической асферизации оптических поверхностей, которая позволяет существенно расширить функциональные возможности метода ионной обработки как способа формообразования АП.

Из исследований процесса ИХО стекол следует, что достаточно высокие скорости обработки оптических стекол могут быть достигнуты в атмосфере  $CF_4$ ,  $CF_4 + Xe$  в системе ВЧ радиального сеточного электрода. В среднем на оптических стеклах при ИХО реализуются 2,5 - 3,5 мкм/ч, т.е. в 2-3 раза выше, чем в инертной среде. Благодаря этому появляется возможность получения АП с асферичностью до 30 мкм и градиентом до 5 мкм/мм

На рис.62 представлены радиальные кривые электрода при различных углах раскрытия. Из сравнений кривых рис.62 и 56 видно, что при ИХО характер зависимости  $H(r)$  от угла раскрытия сеточного электрода более сложный, что связано с большей чувствительностью процесса ИХО к радиальным флуктуациям плотности частиц в плазме, которые наблюдаются при изменении  $\alpha$ .

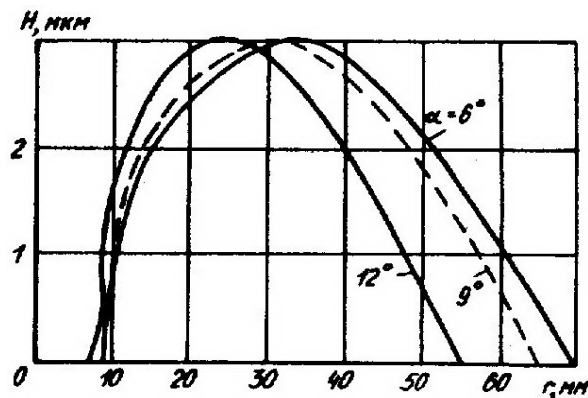
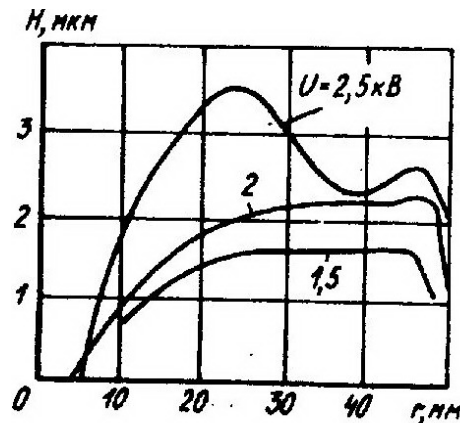


Рис.62. Радиальная кривая съёма материала электродом в атмосфере  $CF_4$  при различных углах раскрытия

Из рис.62 следует, что для формообразования наиболее подходящим является электрод с  $\alpha = 6^\circ$ , так как позволяет получать наиболее крутые АП. Поэтому в дальнейшем за основу взят такой электрод. С целью оптимизации режимов обработки в атмосфере  $CF_4$  исследовано влияние параметров режима на скорость обработки и форму радиальной кривой.

Из представленных на рис.63 кривых видно, что в отличие от ИХО в Ar изменение  $U$  в атмосфере  $CF_4$  сказывается не только на скорости, но и на форме радиальной кривой, что связано с перераспределением вклада физического и химического механизмов взаимодействия. Однако более предпоч-

тительна форма радиальной кривой, характеризуемая кривыми при  $U = 2,5$  и  $2$  кВ.



**Рис.63. Влияние ВЧ напряжения на радиальную кривую съёма материала электродом с  $\alpha = 6^\circ$  в атмосфере  $CF_4$**

При изменении плотности ионного тока в диапазоне  $1-2 \text{ мА/см}^2$  форма радиальной кривой оставалась неизменной, наблюдалась лишь трансформация радиальной кривой за счет изменения скорости обработки без ее существенной деформации.

Характер зависимости скорости обработки К8 от расстояния электрод - образец (рис.64) связан в основном с рассеянием ионного пучка на молекулах рабочего газа. При исследовании процесса формообразования исследован эффект маскирования пучка простейшими масками (рис.65). Показано, что степень попадания (залет) бомбардирующих частиц в область геометрической тени диафрагмы также зависит от диаметра последней. Однако в случае ИХО влияние переосажденных продуктов распыления маски и электрода на формируемый профиль меньше, чем в случае ионной обработки в Аг. Это связано с тем, что при ИХО компоненты образца (основа  $SiO_2$ ) полностью, а маски частично летучи, и кроме того, продукты переосаждения (в основном фториды Fe) имеют большую энергию связи по сравнению с керметными пленками, образующимися в области тени при обработке стекол в атмосфере Аг. Положение границы обрабатываемая - необрабатываемая область зависит от  $U_{ВЧ}$ . Это требует стабильности  $U_{ВЧ}$  на уровне 5 % при необходимости получения воспроизводимости положения границы обработки не хуже  $\pm 0,1$  мм.

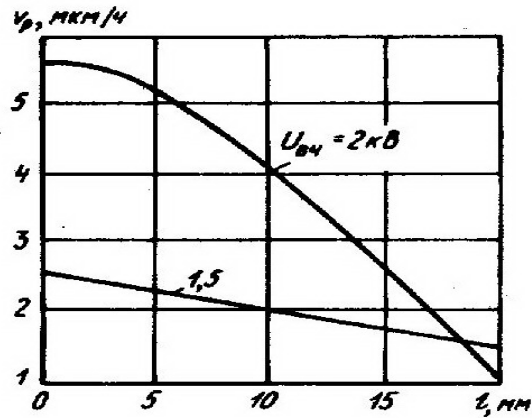


Рис.64. Зависимость скорости ионно-химического распыления К8 от расстояния электрод-образец для разных  $U_{BЧ}$

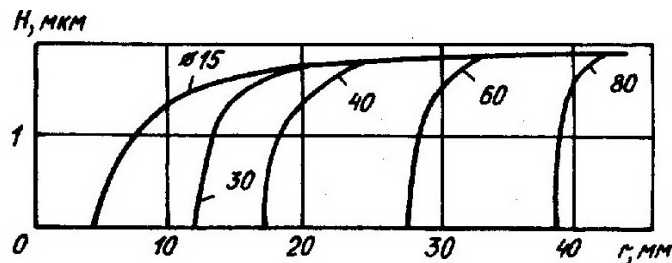


Рис.65. Эффективность маскирования пучка химически активных ионов диафрагмами различного диаметра

За счет уменьшения влияния эффекта переосаждения на форму радиальной кривой при ИХО наблюдается гораздо лучшее соответствие между геометрическим и эффективным размерами маски, поэтому точность формообразования при использовании химически активных ионов более высокая, чем в случае ионной асферизации, и требуется меньшее число коррекций маски для получения одной и той же точности формообразования.

При соблюдении требований к взаимному расположению маски, электрода, детали, заданными в разделе 8.1, и использовании маски, рассчитанной по предложенной методике, погрешность получаемых поверхностей не выходит за пределы 5% даже при формировании АП с немонотонным профилем. Для монотонных АП погрешность формообразования 2%. Понижение точности получаемых немонотонных поверхностей связано с увеличением линии контакта маски с плазмой, в результате чего увеличивается доля материала маски, распыленного с пограничной зоны, который, переосаждаясь на поверхности, увеличивает действующий размер маски. Это связано с тем, что продукты распыления маски частично летучи, а детали практически полностью летучи, поэтому переосажденные продукты не образуют прочных пленок типа керметных как в случае ионной обработки.

Слабое влияние эффекта переосаждения материала маски, электрода, детали на точность формируемых поверхностей является весьма существен-

ным преимуществом ИХО наряду с возможностью получения высокой интенсивности обработки. Поэтому даже при формировании АП с асферичностью до 10 мкм целесообразно использовать ИХО, особенно в случае поверхностей сложного немонотонного профиля.

С целью дальнейшего повышения точности формообразования АП ИХО возможно проводить коррекцию профиля маски по результатам эксперимента методом проб, описанном в разделе 7.2. Необходимо отметить высокую воспроизводимость получаемых АП. При тиражировании АП с одной и той же маской повторяемость получаемых поверхностей находится на уровне 1 %, что подтверждает высокую стабильность параметров пучка химически активных ионов, получаемого в системе ВЧ радиального сеточного электрода. Указанные точность и воспроизводимость при формировании осесимметричных АП произвольного сечения реализуются в случае фиксированных значений ВЧ напряжения (1%) и плотности тока (5%).

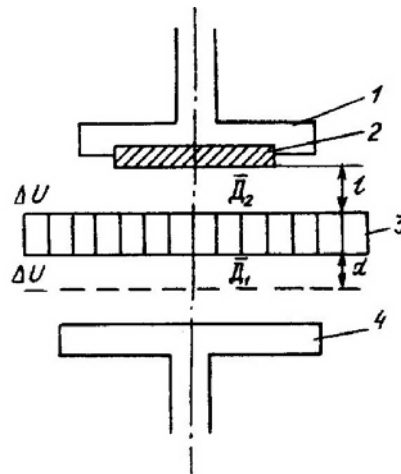
### **8.5. Особенности формирования асферических поверхностей на образцах из полупроводниковых материалов**

Повышенный интерес к использованию АП в приборах, используемых в ИК области спектра, связано с тем, что применяемые в этом спектральном диапазоне материалы обладают значительным поглощением, поэтому реальный путь повышения пропускания ИК систем в уменьшении общего количества элементов систем.

При выяснении областей наиболее эффективного применения АП в приборах различного назначения определено, что в ИК приборах АП с асферичностью даже менее длины волны  $\lambda$  позволяют резко повысить технические характеристики за счет эффективного исправления аберраций, и именно класс АП высших порядков с асферичностью до 20 - 30 мкм обеспечивает получение практически дифракционного предела разрешения приборов. В связи с этим исследовалась возможность создания технологии ионного и ионно-химического формообразования материалов, используемых в ИК-диапазоне, в частности, Si и Ge. Экспериментально определено, что эти материалы могут быть успешно обработаны ионным пучком в системе сеточного электрода, но в отличие от случая обработки диэлектриков обработка полупроводниковых деталей имеет свои особенности, связанные с их физическими свойствами.

При ионной обработке диэлектрических деталей в системе ВЧ сеточного электрода поверхность образца находится под плавающим потенциалом, т.е. ее потенциал меняется от отрицательного амплитудного значения  $U_{ВЧ}$  до нуля. При обработке полупроводниковой мишени картина резко меняется. Поскольку полупроводники имеют конечную проводимость, которая с увеличением температуры растет, то можно считать, что при обработке таких поверхностей образец постоянно находится под земляным потенциалом. Поэтому при бомбардировке такого образца ионы, выходя из плоскости сеточ-

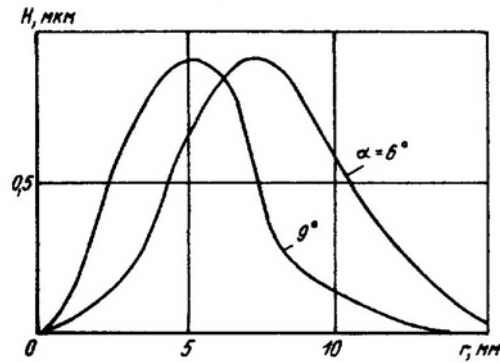
ного электрода, будут испытывать торможение в области сетка - образец из-за влияния более отрицательной сетки (рис.66).



**Рис.66. Схема ионной обработки полупроводников в системе ВЧ сеточного электрода: 1 - держатель образца; 2 - образец; 3 - ВЧ сеточный электрод; 4 - заземленный электрод;  $D_1, D_2$  - напряженности ускоряющего и тормозящего полей**

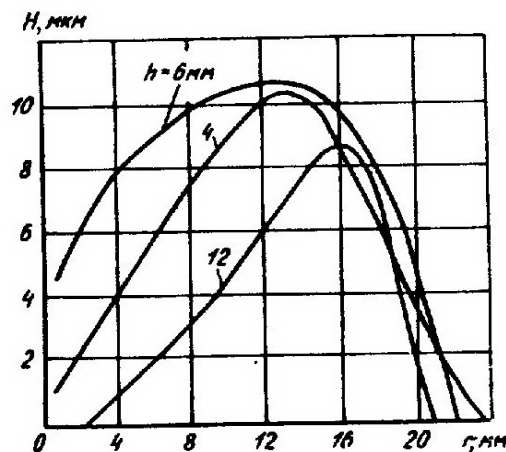
Падение напряжения, приходящееся на ТКП -  $\Delta U$ . Напряженность поля, ускоряющего ионы,  $\sim \frac{\Delta U}{d}$ . Но с другой стороны образца также существует электрическое поле, направленное в противоположную сторону. Напряженность этого поля выше, чем ускоряющего ( $|D_2| > |D_1|$ ), так как расстояние электрод-образец меньше толщины ТКП ( $1 < d$ ). Следовательно, ионы будут тормозиться этим полем и эффективность обработки ионами будет низкой, так как значительная часть их энергии будет уходить на преодоление тормозящего влияния электрода. Очевидно, что для эффективной обработки полупроводниковых образцов необходимо создать условия по возможности более полной нейтрализации проходящего ионного пучка. С этой целью исследовалось влияние геометрии электрода на скорость обработки Si и Ge.

На рис.67 представлены радиальные кривые электрода с различным углом раскрытия. Следует отметить, что при обработке полупроводников неэкранированным электродом наблюдается затухание интегральной радиальной кривой при линейном расстоянии между пластинами  $\sim 2,5$  мм, в то время как при обработке диэлектриков на таких электродах затухание кривой незаметно даже при расстоянии 8 мм. Такой вид радиальной кривой полностью коррелирует с распределением плотности вторичных электронов, эмиттируемых из электрода.



**Рис.67. Радиальные кривые съема материала электродом, используемым при обработке полупроводниковых образцов, с различным раскрытием**

В связи с сильной зависимостью скорости обработки от плотности вторичных электронов (от степени нейтрализации пучка) роль маски при формировании АП на полупроводниковых образцах не сводится только к экранированию пучка как в случае диэлектрических мишеней. Маска является также источником вторичных электронов и, следовательно, участвует в процессе формирования нейтрального пучка, поэтому ее влияние на степень нейтрализации существенно.



**Рис. 68. Радиальные кривые съема материала электродом с различной шириной пластин электрода**

Известно, что степень нейтрализации зависит от ширины пластин, образующих электрод, т.е. от глубины канала, который проходят ионы. С увеличением ширины пластин вероятность нейтрализации растет, но, с другой стороны, уменьшается качество частиц, выходящих из плоскости электрода под углом к пластинам за счет прилипания к последним. Поэтому для достижения максимальной скорости обработки должен существовать оптимальный размер пластин электрода. Поскольку маска играет существенную роль в формировании пучка, то эксперименты по выбору оптимальных геометрических размеров электрода проводились на электродах с одной и той же маской (рис.68). На рисунке представлены кривые, полученные при различной ши-

рине пластин электрода. Из анализа кривых видно, что максимальную скорость дает электрод с  $h = 6$  мм.

Так как предпочтительнее электрод с  $\alpha = 6^\circ$  (см.рис.81), то в качестве рабочего варианта выбран электрод с  $\alpha = 6^\circ$  и  $h = 6$  мм. На таком электроде при стандартных условиях обработки ( $Ar$ ,  $U_{вч} = 2$  кВ,  $j = 1$  мА/см<sup>2</sup>) скорость обработки, например, Ge составляет 2 мкм/ч. С целью повышения скорости распыления Ge исследована возможность ионно-химической обработки с использованием фторсодержащих ионов, так как Ge образует устойчивый летучий фторид  $GeF_4$ . В качестве рабочих газов исследовались  $CF_4$ ,  $SF_6$  и смеси  $SF_6$  с  $Ar$ . В атмосфере чистого  $CF_4$  скорость обработки Ge составляет 1,8 мкм/ч.

При использовании электродов с различной шириной пластин  $h$  скорость не удалось заметно увеличить:

$h$ , мм .....	4	6	12
$v_p$ , мкм/ч.....	1,2	1,8	1,4

Очевидно, что использование  $CF_4$  не эффективно для ИХО Ge, так как при диссоциации молекул  $CF_4$  освобождается C, который экранирует поверхность Ge. В этом же режиме образец из стекла К8, например, имеет скорость обработки 4,5 мкм/ч. Это объясняется тем, что освобождающийся C взаимодействует с кислородом, распыленным из стекла, и образует  $CO$ ,  $CO_2$ . В качестве рабочего газа испробован  $SF_6$ . В экспериментах с 100%-ным  $SF_6$  получены скорости обработки Ge до 20 мкм/ч, однако качество поверхности заметно ухудшалось по сравнению с исходной полированной. Поэтому с целью улучшения качества предложена обработка в смесях  $SF_6 + Ar$ . Результаты, полученные при исследовании процессов ионного и ИХ распыления Ge, использованы при создании методики формообразования АП на деталях из Ge.

Все приведенные результаты по формообразованию получены при использовании плоского радиального электрода и плоской маски, находящейся непосредственно на электроде, т.е. электрически заряженной. Такая схема обеспечивает обработку деталей со стрелкой прогиба до 10 мм. Кроме того, при осесимметричной радиальной сетке центральная часть формируемой поверхности не обрабатывается, т.е. фактически формируемые АП представляют собой кольцевые поверхности. С целью уменьшения центрального экранирования до минимального допустимого размера, диктуемого возможностями контроля (см. раздел 7.3), можно использовать радиальные электроды со смещенным вдоль одного из диаметров центром, т.е. электроды, имеющие плоскость симметрии. Такие электроды использованы для асферизации деталей диаметром до 80 мм (диаметр электрода до 90 мм), так как при большем диаметре световой зоны электрода пластины электрода, закрепленные только по одному концу, могут провиснуть в центре. При использовании электродов со сдвинутым центром исходными данными для расчета профиля маски служит радиальное распределение скорости съема по поверхности об-

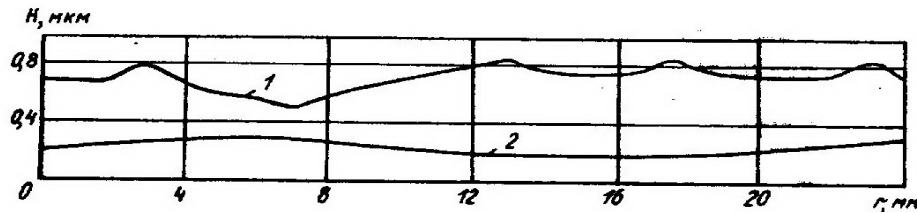


разца электродом, экранированным некоторой исходной маской, и фактически сводится к коррекции профиля этой исходной маски. При использовании неосимметричных электродов следует обратить внимание на необходимость строгого воспроизведения взаимной ориентации маски относительно электрода в его плоскости. Такая схема обработки была использована при формировании ряда АП, в частности, на Ge, и полученные результаты подтверждают ее жизнеспособность. При обработке крутых деталей со стрелкой прогиба более 10 мм как вогнутых, так и выпуклых в схеме с плоским электродом и плоской сеткой появляется еще одна проблема. В системе ВЧ сеточного электрода источником ионов служит плазма положительного столба ВЧ разряда низкого давления, которая локализована в промежутке ВЧ электрод - земляной электрод. Формируемая поверхность находится вне зоны разряда, так как расстояние между ВЧ электродом и обрабатываемой деталью не превосходит длины ТКП и, соответственно, разряд со стороны детали не может реализоваться. При обработке деталей с большой стрелкой прогиба расстояние между ВЧ электродом и некоторыми зонами детали может превосходить длину ТКП, и со стороны детали в указанных зонах в этом случае формируется разряд. Наличие такого разряда существенно затрудняет расчет профиля маски, так как в зонах, где реализованы условия зажигания разряда, возрастает скорость обработки. Кроме того, скорость обработки может изменяться в различные моменты времени, что снижает эффективность маскирования и управления пучка.

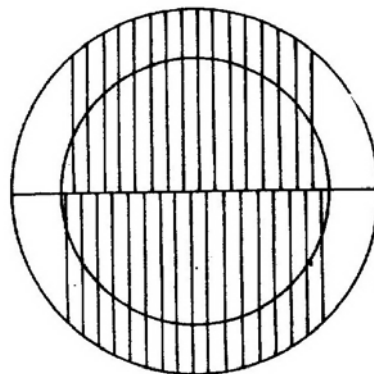
Поэтому при обработке таких поверхностей следует использовать двойную маску. Управляющая (основная) маска располагается непосредственно на электроде и дополнительно к ней на металлическом стержне крепится вторая маска, причем вторая маска экранирует только ту часть АП, у которой стрелка прогиба более ТКП. Размер второй маски должен быть меньше размера основной в этой зоне. Расстояние между масками такое, чтобы предотвратить зажигание разряда со стороны детали. С двойной маской получены АП на вогнутых сферических заготовках со стрелкой прогиба до 25 мм.

В установках с ВЧ сеточным электродом для формообразования осесимметричных АП используется также электрод, состоящий из равностоящих плоскопараллельных пластин. При возвратно-поступательном перемещении образца в направлении, перпендикулярном пластинам электрода, процесс ионной обработки характеризуется равномерным распределением съема материала по поверхности образца. В случае вращающегося образца происходит равномерный сьем материала и образуется рельеф на фоне этого съема, который представляет собой кольцевые бугры, расположенные на радиусах, соответствующих расстоянию пластины от центра вращения детали в направлении, перпендикулярном пластинам, и в количестве, соответствующем количеству пластин. С удалением от центра вращения эти зональные бугры сглаживаются. Такой характер рельефа связан с тем, что для различных зон вращающегося образца условия экранирования пучка ионов самим электродом различны, в связи с чем разные точки образца имеют скорости

обработки, отличающиеся от случая радиального электрода, где любая точка поверхности экранируется одинаковым количеством пластин электрода.



**Рис.69.** Распределение съема материала на вращающемся образце с использованием «прямого» электрода (1) и «прямого» электрода со смещением (2)



**Рис.70.** Сеточный электрод со смещением пластин

На рис.69 представлено радиальное распределение съема материала на поверхности образца с использованием "прямого" сеточного электрода ( кривая 1). С целью сглаживания зональных бугров использован электрод, у которого пластины смещены вдоль одного из диаметров, например 1/2 расстояния между пластинами (рис.70). Такой смещенный электрод характеризуется равномерным распределением съема материала на поверхности вращающегося образца (см. рис.69, кривая 2) и может быть успешно использован для целей формообразования.

Математически показано, что наиболее близкий к равномерному съему наблюдается при использовании электрода со следующим расположением пластин:

$$0 < y \leq +\infty; x = an; x = -\frac{3}{4}a - an; n = 0,1,2,\dots;$$

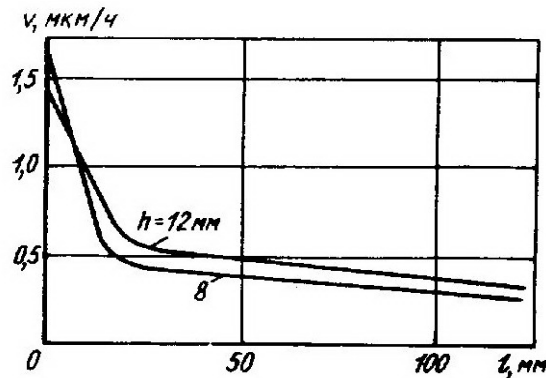
$$-\infty \leq y \leq 0; x = \frac{a}{4} + an; x = -\frac{a}{2} - an; n = 0,1,2,\dots;$$

где  $a$  - расстояние между пластинами.

Предпочтительность "прямого" электрода в схемах формообразования осесимметричных АП по сравнению с радиальным определяется простотой его конструкции, отсутствием центрального экранирования и, главное, уп-

рошением процесса получения АП на стадии расчета профиля маски. В этом случае нет необходимости вводить в программу расчета характеристику радиального электрода, смоделированной для обработки АП данного типоразмера и зависящую от конструкции электрода.

Основным принципиальным отличием условий ионной обработки полупроводниковых деталей по сравнению с обработкой диэлектриков является то, что распыление полупроводников в системе ВЧ сеточного электрода производят, в основном, нейтральные частицы, в связи, с чем возникает проблема нейтрализации проходящего ионного пучка. Нейтрализация ионов обеспечивается их взаимодействием со вторичными медленными электронами, эмиттируемыми из сеточного электрода под действием ионной бомбардировки. Таким образом, для осуществления ионной обработки полупроводников необходимо обеспечить два условия: иметь плазму как источник ионов и электронное облако как условие для нейтрализации. Поэтому для данной цели может быть использован разряд на постоянном токе, т.е. с использованием источника постоянного напряжения, отрицательный полюс которого подключается к сеточному электроду. В связи с этим геометрические размеры сеточного электрода выбираются такими, чтобы обеспечить достаточную плотность электронного облака. Для этого электроны сеточного электрода должны образовывать каналы необходимой протяженности, в которых локализовалось бы электронное облако.



**Рис.71. Зависимость скорости обработки кварца от расстояния электрод-образец при использовании электрода с разной шириной пластин**

Экспериментально показано, что использование более широких пластин целесообразнее (рис.71), поскольку увеличивается скорость обработки образца на расстояниях, сравнимых с размерами ТКП, а это связано с увеличением степени нейтрализации проходящего ионного пучка.

Но, с другой стороны, увеличение глубины канала приводит к уменьшению скорости обработки. С учетом одновременного действия этих двух конкурирующих процессов существует оптимальное значение глубины канала сеточного электрода.

Эффективность нейтрализации зависит не только от глубины канала, но и от расстояния между пластинами, образующими канал. Максимальная

эффективность достигается при расстоянии между пластинами, близком по величине глубине канала. Это связано с характерной геометрией поля в зоне электрода. При равенстве геометрических размеров каналов электрода и длины катодной части разряда на краях канала реализуются условия осцилляции вторичных электронов, что значительно увеличивает степень нейтрализации проходящего пучка. Зависимость скорости обработки SiO от расстояния между пластинами:

$l$ мм .....	6	10	13
$V$ мкм/ч .....	1.2	2.6	1.7

При этом  $U_{вч} = 6$  кВ; глубина канала - 12 мм; газ - Ar;  $p = 0,133$  Па; образец находится на расстоянии 20 мм от сетки.

Из приведенных результатов очевидно, что реализовать процесс ионной обработки при  $U_{вч} = \text{const}$ , используя радиальный электрод, невозможно, так как в этом случае расстояние между пластинами электрода переменное, а приведенное выше условие может быть выполнено только для одного значения  $r$ . В случае же использования "прямого" электрода можно подобрать оптимальную геометрию, обеспечивающую приемлемую скорость обработки с использованием источника  $U_{вч} = \text{const}$ , причем в такой схеме эффективно обрабатываются и диэлектрические детали.

В работе [53] приведена зависимость скорости обработки  $SiO_2$  с использованием "прямого" сеточного электрода с оптимальными геометрическими параметрами от расстояния электрод - образец:

$l$ мм .....	0	20	60
$V$ мкм/ч .....	2.6	2,6	2,2

Эта скорость постоянна в большом интервале значений  $l$ . Вследствие этого появилась еще одна возможность расширить функциональные возможности формообразования с использованием сеточного электрода за счет отрыва детали от электрода на значительном расстоянии, которая успешно реализована на установке ПИОН. При этом используемая маска располагается вблизи (2 - 4 мм) формируемой поверхности на значительном расстоянии от электрода, что приближает схему асферизации к схеме формообразования с использованием автономных источников. В этом варианте маска не участвует в процессе формирования разряда и ее роль сводится исключительно к маскированию. Такая схема получения АП обладает рядом существенных преимуществ и представляет большой практический интерес.

### **8.6. Формообразование асферических поверхностей с использованием автономных ионных источников**

Схема формообразования осесимметричных АП методом маскирования несфокусированного ионного пучка опробована на установках с автономны-

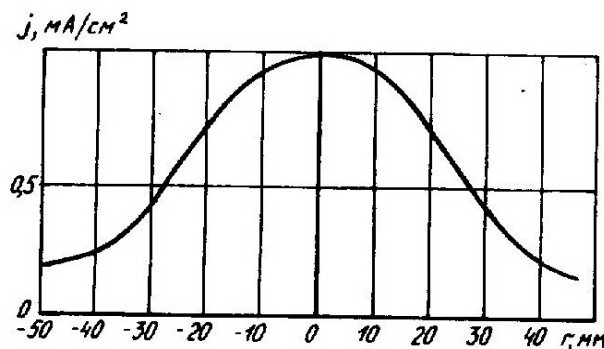
ми ионными источниками. Как показали исследования, основные закономерности процесса формирования АП сохраняются. Точность получаемых поверхностей зависит от стабильности распределения плотности ионного тока в пучке. С использованием источников с равномерным распределением плотности тока упрощается процесс изготовления АП на стадии подготовки производства за счет упрощения расчета профиля маски, т.е. нет необходимости вводить в программу расчета радиальное распределение съема материала (как в случае радиального сеточного электрода), которое бывает сложным и не может быть достаточно точно описано аналитически.

Достоинством схемы формообразования с использованием автономных ионных источников является возможность обработки крутых поверхностей с углом охвата до 45°, формирование которых на плоском радиальном сеточном электроде с плоской маской порождает много проблем.

Асферизацию поверхности можно проводить на установке LPA с источником типа Кауфман с диаметром пучка 100 мм. Типичные режимы обработки оптических материалов:  $p_{Ar} = 0,03 - 0,04$  Па; остаточное давление –  $0,7 \cdot 10^{-3}$  Па;  $U_{BЧ} = 0,8 \div 1,0$  кВ;

$$j = 1 - 1,2 \text{ мА} / \text{см}^2.$$

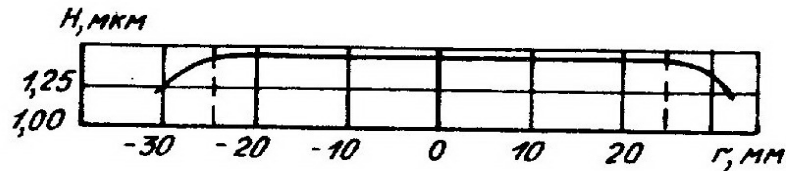
При ионной обработке диэлектрических мишеней для нейтрализации пучка используется термокатод (40 В; 2А). При этих режимах скорость распыления, мкм/ч: К8, кварц - 3; сапфир, гранат - 1; Ge -  $8 \div 9$ .



**Рис.72. Распределение плотности ионного тока в пучке источника «Кауфман»**

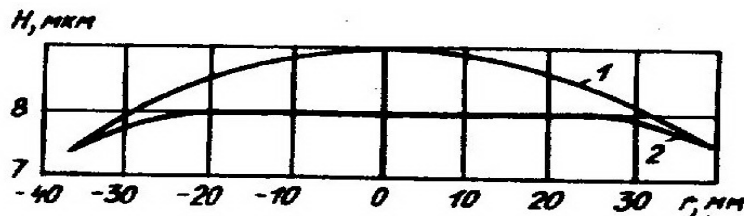
На рис.72 представлено распределение плотности тока в пучке, измеренного с помощью зонда по результатам обработки поверхности мишени (рис.73) [116]. Распыление плотности частиц в пучке сохранялось при работе источника в течение 3 ч при эксплуатации до 12 ч в сутки. Из рис.72 видно, что приемлемое для асферизации распределение занимает область приблизительно диаметром 70 мм, по краям же пучка имеется “завал”. Эта область использована для асферизации, т.е. формированию подвергались АП диаметром до 70 мм. С использованием источника «Кауфман» изготовлены мелкие серии деталей с АП, в том числе высших порядков, с асферичностью до 25 мкм, градиентом асферичности до 4 мкм/мм, диаметром до 70 мм из оптических стекол и Ge, которые успешно эксплуатируются в конкретных прибо-

рах. Точность профиля полученных АП - десятые доли микрометра. Существенным недостатком источника является необходимость его периодической переборки. Это связано с тем, что в процессе длительной работы на обрабатываемую поверхность мишени могут попадать частицы металла из источника, которые экранируют бомбардируемую поверхность, и в результате образуют дефекты качества поверхности типа "апельсиновой корки", что недопустимо для оптических поверхностей. В связи с этим необходимо проводить чистку установки, в том числе и источника.



**Рис.73. Распределение съема материала по поверхности образца, обработанного с использованием источника «Кауфман»**

При переборке источника велика вероятность того, что непредсказуемым образом изменится распределение плотности тока. Это делает невозможным после переборки и чистки тиражирование ранее полученных поверхностей (рис.74). Очевидно, что при создании промышленной технологии ориентироваться на источник данного типа нецелесообразно.



**Рис.74. Распределение съема материала по поверхности образца до (1) и после (2) переборки источника «Кауфман»**

С использованием источника типа дуоплазматрона имеется возможность формообразования деталей микрооптики (поверхностей диаметром 5 мм). Для этих целей создана ионнооптическая система [111], формирующая ионный пучок с малой расходимостью и небольшим разбросом ионов по энергиям.

В ионной оптической системе использован модифицированный дуоплазматрон разработки ЛЭТИ [117], в котором вместо накаливаемого термокатада использован магнитно-плазменный холодный катод. Диаметр пучка на мишени изменяется от 5 мм и более при ускоряющем напряжении 7 кВ. Для снижения энергии ионов до 0,5 - 1 кэВ использована ускоряюще - замедляющая система, состоящая из одиночной электростатической линзы и иммерсионной линзы, замедляющей ионы. Таким образом, вытягивание ионно-

го пучка из зоны плазмы производится при высоком напряжении, а бомбардировка мишени осуществляется ионами низкой энергии. Малая расходимость пучка достигается за счет компенсации объемного заряда пучка вторичными электронами, эмиттируемыми из металлической маски, экранирующей пучок. Мишень устанавливается на подвижном центрирующем столике и в процессе обработки закрепляется. Маска неподвижна. Для получения равномерного съема неэкранированным пучком в систему введена развертка ионного пучка. Скорость распыления стекла К8 на установке при перпендикулярном падении пучка и плотности тока  $1 \text{ mA/cm}^2$  составляет  $\sim 3$  мкм/ч.

Для Ge скорость обработки возрастает до 4 - 5 мкм/ч. На деталях из Ge диаметром 5 мм получены АП (парабола третьего порядка, асферичность - 3 мкм).

Маска выполнялась из Mo толщиной 0,03 мм методом жидкостного травления по фотошаблону. В качестве защитного слоя использовался фоторезист ФП-383. Контроль полученных поверхностей показал полное соответствие расчетным характеристикам.

Таким образом, схема формообразования АП маскированным ионным пучком является универсальной и может быть использована применительно к любому источнику ионов при условии стабильности распределения плотности частиц в пучке.

Формирование осесимметричных АП возможно также с использованием источника ИОН-4 с диаметром пучка 200 мм. Применение этого источника открывает перспективы создания методики высокопроизводительной асферизации на деталях малых диаметров, в частности, элементов микрооптики, так как появляется возможность обрабатывать одновременно десятки деталей.

Весьма перспективным является процесс формообразования поверхностей оптических деталей с применением автономных источников, работающих на химически активных газах [116]. Использование таких источников позволит увеличить скорость ИХО оптических материалов и тем самым существенно расширить функциональные возможности методов формирования прецизионных оптических элементов, в том числе и АП, на основе ионной и ионно-химической обработки.

Таким образом, основной класс формируемых АП с использованием вышеописанной технологии формообразования, представляет собой осесимметричные поверхности. Такие поверхности наиболее широко используются при конструировании оптических систем. Ионная обработка позволяет формировать и другие классы поверхностей, в частности, внеосевые АП, цилиндрические поверхности и др.

Поверхности, полученные этим методом, всегда строго осесимметричны, что значительно облегчает юстировку контрольных схем.

При ионной асферизации возможно сохранить центр и края детали (вне светового диаметра) нетронутыми, что позволяет иметь при контроле и обработке результатов базовую сферу сравнения. Благодаря этим свойствам кон-

тролируемых поверхностей удалось разработать новые методики контроля формы поверхности деталей большой крутизны:

- метод интерферометрического контроля АП с голографическими компенсаторами без юстировочных голограмм с автоматическим расчетом профиля на ЭВМ СМ-4 (программа INTERF);
- метод интерферометрического контроля АП с простейшими компенсаторами (например, в виде плоскопараллельных пластин) с последующим математическим вычетом остаточных (нескомпенсированных аберраций).

Для расчета и коррекции профиля масок как по малому съему, так и по результатам аттестационного контроля разработаны программы ПИОН для ЭВМ типа БЭСМ и СМ. Программа ПИОН обеспечивает расчет и коррекцию профиля маски, ЭВМ может выдавать как численные значения координат маски, так и чертеж маски на графопостроителе в заданном масштабе, пригодном для получения маски на электроэрозсионном станке. Такая технология изготовления маски обеспечивает погрешность изготовления профиля маски 0,02 - 0,04 мм.

## **Глава 9. Применение ионной обработки при создании элементов с заданной микротопографией рельефа поверхности**

В настоящее время все большее применение в оптическом приборостроении находят элементы с заданной микротопографией рельефа оптической поверхности (так называемые элементы микротроптики). Это прежде всего элементы оптоэлектроники, интегральный и дифракционный, в том числе киноформной оптики (растры, модуляторы, элементы ввода и вывода излучения в волноводы, элементы управления распространением излучения в волноводах, дифракционные оптические элементы, киноформы, различные синтезированные голографические элементы и др.).

Хотя применение таких элементов достаточно широко и многообразно и охватывает различные разделы оптики, с точки зрения путей и методов их создания они являются элементами одного класса. Причем ионная обработка является одним из наиболее важных и общих методов создания элементов микротроптики в сочетании с методом фотолитографии и голографии. Микротроптика имеет много общих проблем с микроэлектроникой, однако оптическая технология выдвигает целый ряд принципиально новых требований (разнообразие составов оптических материалов, размеров деталей от долей миллиметра до нескольких метров, разнообразие форм оптических деталей). Поэтому опыт микроэлектроники может использоваться только частично.

По вопросам ионного и ионно-химического травления микросхем существует обширная литература [51, 68, 121].



При создании элементов микротроптики использовались методы точной фотографии, фотолитографии и голографии в сочетании с ионной обработкой [102, 122, 123].

В рамках настоящего пособия нет возможности осветить все проблемы, связанные с разработкой таких элементов (выбор светочувствительных слоев, их экспонирование, проявление, подготовка к ионному и ионно-химическому травлению, процесс определения границ элементов рельефа и т.д.). Поэтому ограничимся тем, что рассмотрим вопросы применения ионной обработки для создания элементов микротроптики.

### **9.1. Классификация элементов микротроптики и методы изготовления масок**

По сложности изготовления элементы микротроптики можно разбить на три группы. Первая - "двумерные рельефы" на поверхности оптической детали: элементы рельефа образуются из тонкослойных покрытий и обычно различаются по своим оптическим свойствам (отражению или пропусканию излучения). Это шкалы, сетки, миры, элементы микроэлектроники (растры), фотошаблоны. Как правило, элементы первой группы изготавливаются методами фотолитографии с химическим травлением или обратной фотолитографией.

Ионная обработка применяется при изготовлении элементов из химически стойких покрытий, при создании элементов на химически нестойких поверхностях и получении высокоточных систем с субмикронными размерами элементов, например, в сочетании с электронной литографией.

Вторая группа - трехмерный рельеф на поверхности оптической детали: элементы рельефа имеют вертикальные границы и заданную высоту. К ним относятся элементы интегральной оптики, фазосдвигающие системы, фазовые фильтры и синтезированные голографические элементы. В этом случае ионная обработка необходима для формирования рельефа на поверхности оптических материалов, так как она позволяет создать рельеф со строго заданной глубиной.

Третья группа - трехмерный рельеф на поверхности оптической детали заданной микрофотографии: элементы рельефа могут иметь любой заданный профиль. К ним относятся различные дифракционные оптические элементы, например, дифракционные решетки для концентрации энергии, корректоры волновых фронтов оптических систем, киноформные элементы.

Перед ионной обработкой (ионным травлением) на поверхность детали наносят маску. При ионном травлении можно использовать четыре вида масок.

*Накладные маски.* В этом случае изготавливается сквозная маска из металла или другого материала. Маска плотно прижимается к поверхности детали специальным держателем, а затем производят ионное или ионно-химическое травление поверхности детали. Методы изготовления масок мо-

гут быть различными: химическое травление в сочетании с методами фотолитографии, обработкой лазером или сфокусированным пучком. Отметим, что накладные маски неприменимы в технике химического травления. Главный недостаток накладных масок - относительно грубые размеры рисунка. Минимальные размеры элементов порядка 10 мкм.

Разработаны специальные методы гальванического наращивания свободной металлической маски, полученной с помощью химического травления по фотолитографической маске. Методы позволяют получать свободные металлические маски с минимальным размером элемента до 3 мкм [124].

Неоспоримым преимуществом накладных масок является простота получения рельефа ионным травлением и высокая производительность: маска может служить многие сотни часов, а все вспомогательные операции по созданию маски исключаются.

*Контактные маски*, получаемые методом механического нарезания. На обрабатываемую поверхность наносят слой металла, полимера или другого материала, и заданный рисунок вырезают резцом на делительных машинах. В качестве слоев для нарезания рисунков в оптической технологии наиболее часто используют Al и сирийский асфальт, на Al минимальный размер получаемых штрихов менее 1 мкм, на сирийском асфальте - 243 мкм. Недостатком метода нарезания является его большая трудоемкость.

*Контактные маски из светочувствительных материалов.* На поверхность детали наносится слой светочувствительного материала, например, фоторезиста. Контактным или проекционным способом, через фотошаблон на обрабатываемую поверхность проектируется заданный рисунок, проводится экспонирование светочувствительного слоя, проявлением удаляются засвеченные участки слоя. В результате формируется контактная маска, через которую проводится ионное или ионно-химическое травление. В качестве светочувствительных слоев можно использовать различные типы фоторезистов (позитивные и негативные), шеллак, поливиниловый спирт с хромовокислыми солями, хромированная желатина и др.) Минимальный размер элемента, получаемый ионным или ионно-химическим травлением по контактным маскам с фоточувствительным материалом, порядка 1 мкм.

Для получения элементов субмикронных размеров используют электронную литографию. На обрабатываемую поверхность наносят слой, чувствительный к электронному облучению, затем поверхность облучают электронным пучком, сфокусированным до диаметра в десятые доли мкм. Запись заданного рисунка ведется электронным лучом, управляемым от ЭВМ с помощью электростатических или магнитных систем. Установки для электронной литографии - сложные оптоэлектронные системы большой стоимости. После получения заданного рисунка непосредственно электронным пучком или после химического проявления проводится ионное или ионно-химическое травление по полученной контактной маске. В сочетании с электронной литографией другие методы травления, как правило, не используются.

*Многослойные контактные маски.* Такие маски обычно используют для получения высокой селективности ионного травления. Многослойные контактные маски характеризуются малой скоростью ионного и ионно-химического распыления. Маски получают следующим образом: на обрабатываемую поверхность наносят нечувствительный к излучению слой металла, окисла, полупроводника или полимера, затем наносят светочувствительный слой и проводят процесс фотолитографии.

Методом химического или ионного травления на первом слое получают заданный рисунок, служащий контактной маской при создании рельефа на поверхности детали. Окончательное получение заданного рельефа на поверхности детали проводится ионным или ионно-химическим травлением.

Контактную маску из нечувствительного к излучению материала можно получать и методом обратной литографии, т.е. сначала на поверхности детали получают контактную маску из светочувствительного материала методом фотолитографии, затем на полученный рельефный слой наносят (обычно испарением в вакууме) материал контактной маски (металл, окислы и др.) и химически удаляют ранее сформированный рельефный слой. После этого проводят ионное или ионно-химическое травление по контактной маске, например, из металлического слоя [125].

Общие требования к маскам:

- материал маски должен иметь достаточно хорошую адгезию к поверхности детали, выдерживать процесс проявления (или нарезания) и ионно-химическое травление;

- при записи рисунка и последующем проявлении границы элементов маски должны быть как можно ближе к вертикальным;

- чем меньше скорость ионного или ионно-химического распыления маски, тем она эффективнее;

- маска после ионно-химического травления должна легко удаляться с поверхности детали.

В конкретных задачах создания элементов микротропники важнейшим фактором является материал подложки. Принимая во внимание материал подложки и требования к микроструктуре, которую требуется нанести, выбирают тот или иной метод маскирования, материал контактной маски, состав рабочего газа и режимы ионно-химического проявления. Органические светочувствительные материалы, как правило, перед ионным травлением подвергают различного рода обработкам - химическое дублирование, прогрев и т. д. с тем, чтобы повысить их устойчивость к ионному распылению.

Выбор и подготовку контактных масок производят для каждого конкретного случая (таблица 13).

Рассмотрим примеры изготовления конкретных элементов микротропники трех вышеуказанных классов.

**Таблица 13**  
**Скорости травления маскирующих материалов в аргоне и фторсодержащих газах**

Материал	Вид обработки	Скорость травления, мкм/ч			
		Ar	CF <sub>4</sub>	CHF <sub>2</sub> Cl	SF <sub>6</sub>
SiO <sub>2</sub> (кварц)	-	1,2	2,5	3,2	5,6
Al (слой 0,5 мкм)	-	0,35	0,8	0,8	2,0
Cr (слой 0,2 мкм)	-	0,3	0,3	0,4	0,2
Ti (слой 0,1 мкм)	-	0,3	1,5	1,5	5,0
Фоторезист ФП-383 (слой 2 мкм)	Прогрев 145 °С	1	3	0,8	16
ФН-ИЦГД (слой 2 мкм)	Прогрев 200 °С	1	1,5	-	-
Сирийский асфальт (слой 0,5 мкм)	-	1,8	3,0	0,6	5,4
Шеллак (слой 0,2 мкм)	Химическая	1,0	1,6	3,2	-
	Прогрев 130 °С	1,0	1,6	2,8	-
Поливиниловый спирт (слой 0,5 мкм)	Химическая	2,0	6,0	1,6	11
(слой 0,8 мкм)	Прогрев 250 °С	0,81	4,9	0,5	16

### **9.2. Создание двумерных рельефов на поверхности оптических деталей с помощью ионного и ионно-химического травления**

При получении рисунков на тонких пленках, нанесенных на поверхность детали, не требуется проводить травление на большую глубину, так как покрытия для шкал, сеток, растров, элементов оптоэлектроники, фотошаблонов, как правило, имеют малые толщины.

Ионное и ионно-химическое травление применяется в том случае, когда нет возможности подобрать химический травитель в комбинации пленка - подложка и для получения субмикронных структур в сочетании с электронной литографией.

Для ионного и ионно-химического травления могут использоваться установки типа ПИОН, установка УРМ. 3.279.029 с источником "Радикал" или ИОН-2. Можно использовать источник ИОН, которым оснащают установки ВУ-1 и ВУ-1А.

Контактные маски должны иметь достаточную толщину, чтобы после полного удаления слоя толщина маски составляла 15 - 20% от первоначальной. Если при травлении контактная маска будет стравлена, то возможно ухудшение чистоты поверхности детали, так как поверхность контактной маски может быть более дефектной, а при полном удалении маски поверхностные дефекты маски будут перенесены на поверхность детали.

Ионное травление может быть использовано для получения безбликовых элементов (шкал, сеток, микр и т.д.) первого типа на основе керметных пленок. В качестве поглощающих слоев применялись пленки керметов на основе смесей  $Cr - SiO_2$  различных соотношений, получаемых электронно-лучевым испарением заранее приготовленных таблеток.

Оптические свойства керметов подробно исследованы в работе [126]. Для спектральной области 0,4 - 1,5 мкм выбрано трехслойное покрытие - керметная пленка 0,45  $Cr - 0,55 SiO_2$  и двухслойное просветляющее покрытие  $ZrO_2 - SiO_2$ . Отражение от такого покрытия не превосходит 3% в области 0,4 - 1,5 мкм. Поскольку химическое травление этой трехслойной пленки на оптическом стекле практически невозможно, использовалось ионное травление. Общая толщина покрытия 0,7 - 0,8 мкм, слой фоторезиста ФП-383 1,2 - 1,4 мкм, при энергии ионов  $E = 1$  кэВ и плотности ионного тока  $j_2 = 2$  мА/см, время удаления покрытий составляло 50 мин. Остаток фоторезиста (0,4 - 0,6 мкм) удалялся на той же установке ионного травления в среде кислорода, скорость распыления резиста ФП-383 пучком кислорода  $\sim 10$  мкм/ч ( $E = 1$  кэВ,  $j = 2,0$  мА/см<sup>2</sup>).

Этот метод получения безбликовых элементов с успехом использовался для получения элементов с минимальным размером штриха 5 мкм. Получены также элементы для спектральной области 0,2 - 0,4 мкм. Элементы микротроптики на многослойных керметных пленках изготавливались методом обратной фотолитографии [125]. Получены безбликовые элементы микротроптики для спектральных диапазонов 0,4 - 1,5 мкм и 1,5 - 6,0 мкм на основе керметных пленок [123].

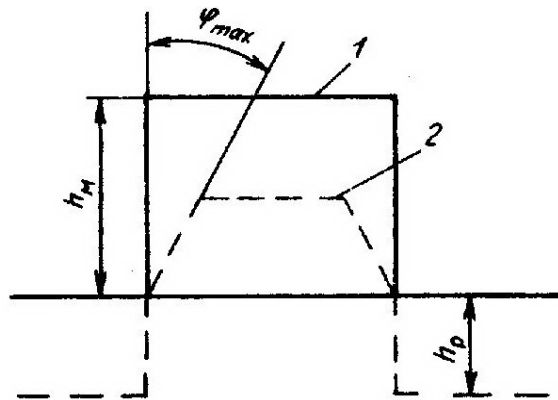
Ионное травление применяется также для получения механически прочных элементов на основе металлических пленок. В этом случае на поверхность детали наносится слой фоторезиста толщиной 0,6 - 1,0 мкм, затем проводится ионное травление по фоторезистивной контактной маске на глубину 0,2 - 0,3 мкм. После этого на деталь наносится слой металла (Cr, Al) на вакуумной установке для напыления, и слой резиста со слоем металла удаляется химической обработкой в ацетоне (обратная фотолитография).

В результате элемент представляет собой поверхность, на которой рисунок из слоя металла расположен в углублении, т. е. каждый штрих металла лежит в стеклянной канавке. Такие элементы обладают повышенной механической прочностью и могут работать, например, в условиях постоянного контакта с фотопленкой.

### 9.3. Создание трехмерных рельефов на поверхности оптической детали

К трехмерным рельефам можно отнести элементы интегральной оптики (полосковые волноводы, элементы полного внутреннего отражения, призмы и т.д.), голографические компенсаторы для контроля асферических поверхностей, фазосдвигающие фильтры, структуры для полупроводниковых приборов.

В отличие от элементов первой группы элементы второй требуют высокой точности ионной обработки оптической поверхности на заданную глубину. Ионное и ионно-химическое травление является главным технологическим приемом для их изготовления, поскольку необходимая точность вполне достижима, если скорость распыления маски достаточно низкая по сравнению со скоростью распыления материала детали, а высота маски достаточно велика.



**Рис.75. Схема распыления контактной маски: 1- первоначальный профиль маски; 2 - профиль маски после обработки.**

Механизм распыления контактной маски несколько отличается от распыления плоской детали и в случае изготовления элементов микротропники второй группы. Это нужно учитывать.

На рис.75 показана схема распыления контактной маски с вертикальными стенками. Верхний край маски будет распыляться под углом  $\varphi_{\max}$  (угол между направлением ионного пучка и плоскостью материала маски), для которого реализуется максимальная скорость распыления маски, с учетом уменьшения плотности ионного тока при бомбардировке поверхности под углом за счет увеличения площади обработки. Вертикальный край маски будет формироваться в оптическом материале, пока плоскость распыления края не достигнет поверхности детали, что и определит возможное время обработки:

$$t_{\text{обр}} = \frac{h_m \sin \varphi_{\max}}{V_{M\varphi_{\max}}}$$

Где  $t_{обp}$  - время ионной обработки;  $h_m$  - высота маски;  $V_{M\varphi_{max}}$  - скорость ионного распыления материала маски для угла  $\varphi_{max}$ .

Максимально возможная глубина рельефа

$$h_{p\max} = V_{M\varphi_{max}} t_{обp} = h_m \sin \varphi_{max} = \frac{V_p}{V_{M\varphi_{max}}};$$

где  $V_p$  - скорость ионного распыления материала детали ( $\varphi = 90^\circ$ ).

Глубина создаваемого рельефа  $h$  должна быть меньше  $h_p$ . Для получения больших значений  $h_{p\max}$  необходимо либо иметь маски большой толщины, либо скорость травления материала детали должна быть много больше скорости травления материала маски  $V_p \gg V_{M\varphi_{max}}$ .

Большие значения  $h_m$  могут быть реализованы при использовании накладных масок. Для получения реальных структур в полупроводниковом материале можно использовать маски, изготовленные из кварцевых пластин толщиной 0,2 мм автоматизированной обработкой электронным лучом на установке ЭЛУРС. С такими масками могут быть получены структуры с минимальным размером элемента 150 мкм. По контактным маскам можно осуществлять ионно-химическое травление кристаллов, стекол, полупроводников на глубину 3-4 мкм (рабочий газ  $SF_6$ ).

При изготовлении многоэлементных приемников для глубинного ионно-химического травления полупроводниковой группы  $A_3B_5$  и  $A_4B_6$  используют смесь рабочих газов  $Xe - H_2O$ . В этой смеси скорость травления за счет образования летучих гидридов составляет: для  $JnSb \sim 15$  мкм/ч, для стекол 20 - 30 мкм/ч [127]. В качестве масок для этой смеси очень эффективно использовать металлические слои, наносимые обычно методом обратной литографии. Металлы реагируют с кислородом смеси, образуя окислы, что еще более снижает скорость распыления масок. Например, используя в качестве маски слой Al, удалось получить при травлении  $JnSb$  в смеси  $Xe - H_2O$  отношение  $V_p / V_{M\varphi_{max}} - 100$ . На  $JnSb$  получены рельефы глубиной 30 мкм с минимальным размером элемента 5 мкм. На  $GaAs$  в смеси  $Xe - H_2O$  получены решетки ввода и вывода излучения в волновод с параметрами: частота штрихов 100 лин/мм, глубина  $\sim 3$  мкм.

Когда требуемая глубина рельефа невелика ( $\sim 1$  мкм), с успехом используется ионное или ионно-химическое травление по маске из фоторезиста, главным образом ФП-383, и другие маски третьего типа. По предложенной технологии изготовлено большое число элементов микротроптики второго типа, особенно голографических компенсаторов для контроля асферических поверхностей высших порядков различного типа, от микрооптики до крупногабаритных зеркал. Получены различные фазосдвигающие системы, фазовые фильтры для камер цветного телевидения, различные фазовые устройства для лазерной техники.

Фотошаблоны для изготовления компенсаторов обычно изготавливаются нарезанием на КПА-1200 с последующим засвечиванием на репро-

дукционной камере [128]. Фотошаблоны также могут быть изготовлены на лазерном графопостроителе [129]. Важным преимуществом синтезированных компенсаторов является возможность их аттестации. Глубина рельефа измеряется на интерферометрах типа МИИ-4, а топография на установках типа УИМ или ДИП-2.

#### **9.4. Создание трехмерных рельефов заданной микротопографии на поверхности оптических деталей**

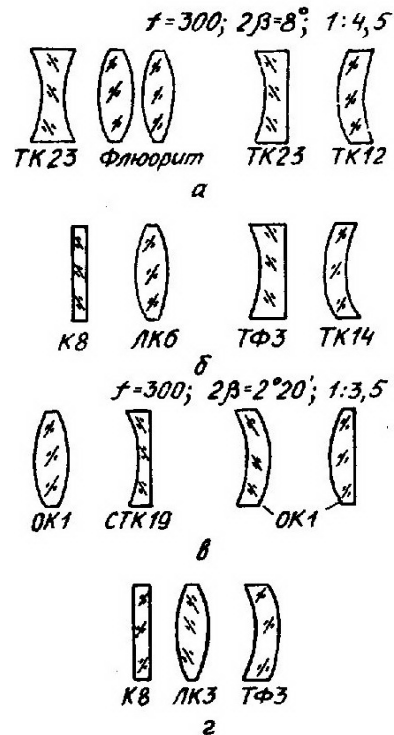
Элементы рельефа могут иметь произвольный заданный профиль. Это, прежде всего, различные дифракционные оптические элементы, например, дифракционные решетки со сложным профилем штрихов, фокусаторов лазерного излучения, киноформные элементы. Одним из основных направлений работ является создание киноформных оптических элементов.

В 1957 г. Г.Г.Слюсаревым предложен корректор хроматических аберраций объективов, который представлял собой фазовую структуру на поверхности стекла, выполненную в виде кольцевых зон с заданным профилем глубиной  $\sim 2\text{\AA}$  (типа фазовой пластины Френеля). Корректор формировал изображение за счет явлений дифракции в одном дифракционном порядке [130]. Подобные структуры получили название киноформ [131].

Была развита теория применения киноформных корректоров хроматических аберраций и выполнены расчеты соответствующих объективов. С помощью высокоточной ионной обработки были изготовлены киноформные корректоры хроматических и сферохроматических аберраций и сферохроматических аберраций в ахроматических оптических системах с высокой эффективностью.

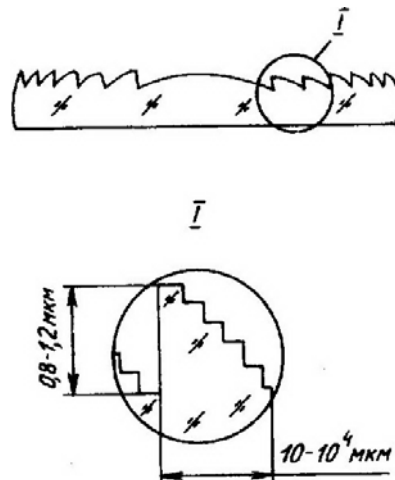
Были рассмотрены оптические системы, в которых киноформные корректоры полностью заменили элементы из оптических материалов с обратным ходом дисперсии. На рис.76 показан линзовый состав двух объективов с киноформными корректорами (б, г) и объективов-аналогов (а, б), оптические свойства объективов идентичны [122].





**Рис.76. Линзовый состав объективов с киноформными корректорами хроматических aberrаций (б, г) и объективов-аналогов (а, в)**

Профиль поверхности киноформного элемента (КЭ) показан на рис.77. В виду того, что до настоящего времени надежных методов создания рельефов с непрерывным заданным профилем не существует, КЭ изготавливают методом последовательного совмещения и экспонирования, который позволяет формировать ступенчатый профиль элементов киноформной структуры. Дифракционная эффективность КЭ растет с ростом числа уровней: для шестиуровневого КЭ - 91,2%, для восьмиуровневого - 95%, для десятиуровневого - 97%. Изготовление КЭ - сложный, многоступенчатый процесс создания контактной маски и заключительный этап ионного или ионно-химического травления.



**Рис.77. Киноформный элемент**

Процесс создания контактной маски:

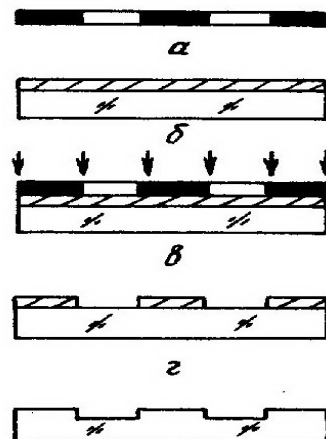
1. Изготовление контактных фотошаблонов. Фотошаблон - система непрозрачных колец на прозрачной подложке. При простом последовательном совмещении число шаблонов  $n$  соответствует числу ступенек (уровней)  $(n + 1)$ . Фотошаблоны изготавливаются методом нарезания (установка МДАУ) [132], на лазерном координатографе, на координатографе типа КПА-1200 с последующим уменьшением на фотографической машине типа ЭМ-513 [128].

2. Нанесение светочувствительного слоя (например, фоторезиста ФП-383) на поверхность оптической детали методом центрофугирования (например, на станках СП-150),

вытягивания или слива [133], вытягивания из мениска [134] и прогрев слоя (для ФП-383 до 80). 3. Совмещение фотошаблона относительно центра детали (при первом экспонировании) или относительно части киноформной структуры (при последующих совмещениях) и экспонирование фоточувствительного слоя через фотошаблон (установка ЭМ-56, ЭВ-5006, СМ-197) [135].

4. Проявление контактной маски в ваннах со щелочным проявителем. Термообработка.

5. Ионное или ионно-химическое травление детали по контактной маске на любой из установок для ионной обработки. Удаление остатков маски.



**Схема технологического процесса получения контактной маски:**

**а - изготовление фотошаблона; б - нанесение светочувствительного слоя; в - экспонирование; г - получение контактной маски; д - рельефная структура в стекле.**

Для получения многоуровневого КЭ все процессы повторяются соответствующее число раз.

При ионном или ионно-химическом травлении киноформных структур возникает проблема, связанная с тем, что структура КЭ резко меняет размеры от центра к краю (от долей мм до 10 мкм). В ряде случаев наблюдалась при

ионном и ионно-химическом травлении разная скорость травления материала (стекла) в широких и узких (крайних) элементах контакта маски из ФП-383.

Это происходит из-за неполного удаления ФП-383 из узких каналов при проявлении. Эта проблема может быть решена за счет увеличения ионной стойкости маски при следующем способе ионного или ионно-химического травления КЭ. После помещения детали в установку для ионного травления проводят:

- обработку поверхности ионами кислорода 2-3 мин. Поскольку скорость распыления фоторезистов в кислороде, велика, удастся удалить остатки фоторезиста из узких каналов;

- ионное задублирование контактной маски, обработка ионами рабочего газа в режимах с пониженной плотностью ионного тока (0,2 - 0,5 мА/см<sup>2</sup>). Плотность ионного тока и время обработки выбираются в зависимости от материала и высоты контактной маски;

- ионное или ионно-химическое травление в среде  $Ag$ ,  $CF_4$ ,  $CF_3Cl$  при энергии ионов 0,5 - 2,0 кэВ и плотности ионного тока 0,5 - 2,0 мА/см<sup>2</sup> до выхода на заданную глубину с заданной точностью;

- заключительная обработка деталей ионами кислорода с целью удаления остатков контактной маски.

Используя данную технологию можно изготавливать КЭ для конкретных объективов диаметром от 20 до 500 мм.

## ГЛАВА 10. Ионная обработка оптических покрытий

Ионная обработка покрытий может существенным образом усовершенствовать технологию изготовления покрытий и улучшить их оптические и эксплуатационные характеристики. Наиболее важные направления ионной обработки при нанесении оптических покрытий:

- ионная полировка подложек в вакуумных камерах для нанесения покрытий;

- ионная полировка покрытий (ионная обработка поверхности полученной пленки);

- ионная подполировка покрытий (послойная ионная полировка пленки в процессе нанесения);

- ионная бомбардировка растущей пленки в процессе ее нанесения;

- получение покрытий распылением мишени ионным пучком;

- получение покрытий распылением мишени ионным пучком с ионной бомбардировкой растущей пленки;

- нанесение покрытий из ионного пучка, падающего на подложку, однако этот метод подробно рассматриваться не будет, так как он едва ли найдет широкое применение в нанесении оптических покрытий.

### **10.1. Ионная обработка подложек**

Ионная бомбардировка подложки перед нанесением покрытий - наиболее важное и общее применение ионной обработки в технологии изготовления оптических покрытий. Ионная обработка подложек, во-первых, снижает требования к предварительной подготовке (чистке) подложек, во-вторых, существенно влияет на процессы роста покрытий, особенно на первые фазы. Положительный эффект ионной обработки подложек, проводимый в камерах нанесения пленок, сохраняется независимо от способа нанесения покрытий (испарение в вакууме, различные методы ионно-плазменного нанесения, распыление мишени ионным пучком).

Рассмотрим рост пленки на ионно-обработанных подложках на примере металлических покрытий.

Известно, что состояние поверхности, на которую наносится покрытие, определяет характеристики покрытий и даже возможность создания покрытия на данной поверхности. Поэтому в оптической технологии очистке подложек уделяется большое внимание. Существуют разнообразные способы очистки подложек: органическими растворителями, водными растворами кислот и щелочей, в парах дистиллированной воды с использованием ультразвука, отжиг в вакууме и т.д. [136].

Наибольшее распространение в технике нанесения покрытий получила очистка тлеющим разрядом [137 - 140]. В этом случае подложка не является частью цепи разряда и подвергается бомбардировке электронами и ионами малых энергий из положительного столба газового разряда, обычно энергии этих частиц хватает для удаления адсорбированных газов, но не достаточно для распыления поверхности. Из других методов вакуумной чистки подложек следует отметить электронную бомбардировку подложек с помощью электронных пушек [141 - 145], которая оказывает влияние на процесс роста пленок. Однако наиболее эффективным и рациональным является метод ионного распыления, так как в процессе распыления удаляются не только загрязнения и адсорбированные вещества, но и поверхностный слой материала [146]. Ионная обработка не только очищает, но и активизирует поверхность подложки, что сильно сказывается на начальных процессах роста пленок и приводит к улучшению адгезии покрытия к подложке, а также сказывается на других характеристиках покрытия.

Ионное распыление активизирует поверхность стекла, создает свободные поверхностные связи, которые при последующем напылении пленок становятся как бы искусственными центрами зародышеобразования. Это обуславливает получение на таких поверхностях мелкозернистых пленок с незначительным разбросом размеров зерен и устойчивыми связями последних с подложкой. За две секунды напыления поверхность сплошь покрывается мелкими зародышами, а в дальнейшем происходит лишь их укрупнение. Зародыши, образующиеся при напылении пленок на подложки без ионного распыления поверхности, характеризуются большим разбросом по величине и закрепляются, в основном, на дефектах подложки. В одинаковых условиях

за 60 с напыления на необработанной подложке не образуется сплошная пленка, а после ионного распыления за это же время получается сплошная пленка, снижающая коэффициент пропускания подложки при  $\lambda = 650$  нм до 17,8% что, по приближенным оценкам согласно работе [146] соответствует толщине пленок 8 нм.

Следует отметить, что при малых скоростях нанесения металлических пленок, реализованных в данном примере ионно-плазменным напылением, увеличивается вероятность миграции молекул наносимого вещества по подложке, их слияния, что приводит к нежелательному увеличению и разбросу размеров зародышей. Кроме того, возможно повышение газонасыщения пленок. Однако даже при таких неблагоприятных условиях на ионно-полированных поверхностях образуются исключительно равномерные по форме и размерам зародыши, что подтверждает огромное влияние ионной обработки подложек на начальные стадии роста слоев. Аналогичные результаты получены при различных режимах термического и ионно-плазменного напыления металлических пленок в вакууме. Это свидетельствует о том, что механизм зародышеобразования пленок на ионно-полированных поверхностях носит общий характер, связан с активацией поверхности подложек ионной бомбардировкой и не зависит от метода напыления слоев, материала подложки и напыляемого вещества.

Влияние ионного распыления на характер зародышеобразования пленок сказывается и при кратковременном распылении. Изучался рост пленок на подложках, подвергнутых ионному распылению в течение трех минут (съем стекла составляет 50 нм). Этот факт имеет большое практическое значение, так как значительно сокращает время очистки подложек. Следует учесть, что в процессе кратковременного ионного распыления (съем стекла 50 нм) может произойти вскрытие дефектного слоя, оставшегося после неудовлетворительной механической полировки стекла, при этом растет шероховатость поверхности. После 15-минутного распыления (съем стекла равен 0,25 мкм) качество поверхности восстанавливается или улучшается. Как правило, подобное увеличение шероховатости поверхности подложек не сказывается на оптических характеристиках покрытий. При изготовлении покрытий особо высокого качества (волноводы для интегральной оптики, оптические покрытия с малыми потерями излучения для лазеров) следует проводить подполировку подложек до снятия слоя толщиной 0,25 мкм или использовать подложки, обработанные методом глубокой шлифовки и полировки, на которых указанный эффект не обнаружен.

Известно, что при ионном распылении подложка разогревается, что в ряде случаев нежелательно, так как при нагревании возможно укрупнение зародышей и уменьшение их плотности за счет усиления процессов миграции молекул испаряемого вещества по подложке. Следовательно, после длительной ионной обработки в установках для ВЧ распыления перед нанесением покрытий необходимо сделать перерыв для остывания подложек. При этом надо учитывать, что пребывание подложек после ионной обработки в вакууме даже в течение 30 - 60 мин на 30 - 40% снижает степень влияния об-

работки на процессы роста пленок из-за взаимодействия активной поверхности с молекулами остаточного газа. Поэтому после относительно длительной ионной обработки подложек непосредственно перед нанесением покрытий следует проводить кратковременную ионную обработку подложек (в течение 3 мин).

Рассмотрение начальных стадий зародышеобразования объясняет высокую адгезию пленок, нанесенных на ионно-полированные подложки, независимо от метода напыления. Адгезия пленок обычно оценивается методами отслаивания с помощью липкой ленты или по качеству деления при нарезании пленок на граверноделительных машинах. Установлено, что очистка ионным распылением увеличивает адгезию металлических пленок не только к стеклянным подложкам (ровная четкая граница при снятии слоя резцом на длительной машине!), но и к подложкам из органического стекла и металла (с помощью липкой ленты не удастся оторвать слой от подложки). Значительное увеличение адгезии и повышение качества слоев наблюдалось при термическом напылении алюминия на подложки из сегнетокерамики. Слои использовались в качестве электродов определенной конфигурации, создаваемой методами фотолитографии. Качество выделения рисунка на металлических слоях, полученных без ионной обработки подложек, значительно ниже, особенно на толстых слоях, из-за частичного их отслаивания в процессе химического травления. Увеличение адгезии наблюдается также при напылении диэлектрических пленок на обработанные ионным пучком подложки.

Таким образом, используя ионную обработку ионной подложек можно управлять процессами зародышеобразования пленок, получать пленки, равномерные по толщине и структуре, обладающие малым светорассеянием и высокой адгезией к подложке. Операция тщательной предварительной очистки подложек при этом значительно упрощается.

## **10.2. Ионная полировка оптических покрытий**

Ионная полировка используется в основном для получения тонких пленок с малым коэффициентом светорассеяния [147]. Такие пленки необходимы, в частности, при создании элементов интегральной оптики и многослойных зеркал для лазеров непрерывного действия. Электронномикроскопические исследования тонких пленок, изготовленных напылением в вакууме, показывают, что они имеют шероховатую поверхность с микронеровностями размером от 0,005 до 0,5 мкм [148, 149]. Наличие шероховатости приводит к рассеянию света на границе пленка - воздух, а в многослойных покрытиях светорассеяние значительно увеличивается вследствие дополнительного рассеяния на границах между слоями и большей шероховатости верхних слоев.

Была изучена возможность уменьшения шероховатости пленок путем их ионной полировки. Ионная полировка сглаживает поверхность оптиче-

ских стекол и улучшает ее качество [84]. Согласно литературным данным при ионном облучении пленок их структура ухудшается, происходит растравливание поверхности [150]. Однако, как показывают исследования, можно подобрать такие режимы ионной обработки, которые способствуют сглаживанию шероховатой поверхности пленок. Оказалось, что микроструктура поверхности пленок зависит от массы и энергии ионов, времени облучения и плотности ионного пучка.

Исследовались пленки окислов и смесей окислов, изготовленные электронно-лучевым испарением и высокочастотным ионно-плазменным распылением с напряжением смещения. Пленки смесей окислов  $SiO_2 - MgO$  получены электронно-лучевым испарением таблеток  $SiO_2 - MgO$ , изготовленных методом керамической технологии (табл.15). Метод позволяет в зависимости от объемного содержания компонентов получать пленки хорошо воспроизводимого состава с показателем преломления, плавно изменяющемся от 1,5 до 1,65. Напыление производилось на установке УРМ.3.279.011, оборудованной высокочастотным электродом, что позволило в едином технологическом цикле осуществлять нанесение пленок электронно-лучевым испарением и ионную полировку их поверхности. Высокочастотное напряжение ( $f = 440$  кГц) подавалось от генератора ИО.60.0057. Напуск рабочего газа производился через натекатель, прилагаемый к установке. Толщина слоев и величина съема контролировалась фотометрическим способом по отражению.

Для оценки качества поверхности до и после ионной полировки сделаны их микрофотографии с увеличением 20000 и измерено затухание излучения  $He - Ne$  - лазеру ( $\lambda = 632,8$  нм) в пленке.

Затухание в пленках, показатель преломления которых больше показателя преломления подложки, можно измерять с малой погрешностью ( $\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ) методами, разработанными в интегральной оптике [151, 152]. Ввиду достаточно высокого светорассеяния в пленках  $SiO_2 - MgO$  использовался модифицированный вариант этих методов, основанный на измерениях длины треков излучения лазера в пленке при двух значениях его мощности.

Затухание определялось по формуле:

$$\beta = \frac{1}{z_2 - z_1} \ln \frac{P_2}{P_1},$$

где  $z_i$  ( $i = 1, 2$ ) - длина трека излучения  $He - Ne$  - лазера в пленке, соответствующая мощности излучения  $p_i$  ( $i = 1, 2$ ). Ослабление мощности осуществлялось калиброванным светофильтром с пропусканием  $T = 0,01$ . Для ввода излучения в пленку использовалось призмное устройство связи [147].

Наблюдается хорошее согласование между затуханием и средними размерами шероховатостей на поверхности пленки, которые определялись по фотографиям, полученным с помощью электронного микроскопа. Затухание в пленке после ионной полировки резко снизилось и, по-видимому, возможно дальнейшее снижение потерь, если принять меры для улучшения качества обработки поверхности подложек.

Влияние ионной полировки изучалось на пленках  $SiO_2 - MgO$ . Размер неоднородностей на поверхности пленок до ионной полировки составляет 30 - 60 нм.

После полировки ионами кислорода с энергией 3 кэВ в течение 5 мин размер микронеровностей уменьшается до значения менее 10 нм. Повышение времени обработки приводит к некоторому ухудшению качества поверхности пленок. Замена ионов кислорода более тяжелыми ионами аргона при прочих равных условиях также снижает качество поверхности пленок. Например, на поверхности пленки  $SiO_2 - MgO$  после обработки в высокочастотной плазме ионами аргона на общем фоне с размерами микронеровностей менее 15 нм выявляется значительное число регулярных образований  $\sim 100$  нм.

Аналогичные результаты получены для пленок  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ , изготовленных методом электронно-лучевого испарения. До ионной обработки размер микронеровностей составлял 15 - 30 нм с отдельными частицами до 60 - 100 нм, а после полировки ионами аргона с энергией 1,5 кэВ в течение 20 мин 5-6 нм.

Особенно наглядно тенденция к уменьшению шероховатости пленок после ионной полировки проявляется у толстых пленок с крупными кристаллитами. Например, размер кристаллитов пленки  $ZrO_2$  толщиной 0,7 мкм до ионной полировки 50 - 80 нм. После полировки ионами аргона с энергией 1,6 кэВ в течение 18 мин поверхность пленки значительно сглаживается, образуя фон на уровне менее 15 нм. Исследованы также пленки  $SiO_2 - Ta_2O_5$ , полученные методом высокочастотного ионно-плазменного распыления с напряжением смещения. Пленки изготавливались на высокочастотных лабораторных установках, описанных в работе [153]. Установки можно использовать как для изготовления пленок, так и для ионной полировки подложек и пленок. Ионная полировка поверхности пленок осуществлялась в атмосфере кислорода.

Значение коэффициента рассеяния пленок  $SiO_2 - \hat{O}_2 \hat{I}_5$  толщиной 0,1 - 0,2 мкм, измеренного на приборе ЮС-36 [154], составляет 0,015 - 0,02%. Микрофотографии показывают, что поверхность пленок неоднородная: на общем фоне частиц размером 7 - 10 нм имеется значительное количество образований размером 25 - 60 нм, а также крупных соединений до 200 нм.

После ионной полировки поверхность пленок становится однородной, размер кристаллитов составляет 5-10 нм. Значение коэффициента светорассеяния после ионной полировки ионами кислорода с энергией 3 кэВ в течение 5 мин уменьшается до 0,005 - 0,008%. Микрофотографии поверхности пленок, обработанных ионами аргона, показали, что увеличение массы ионов приводит к ухудшению качества поверхности пленок, к ее растравливанию. Светорассеяние также увеличивается до 0,06 - 0,08%.

Таким образом, при соответствующем выборе режимов ионной бомбардировки ионная полировка оптических покрытий возможна. Она улучшает микроструктуру поверхности и уменьшает светорассеяние. Полученные результаты представляют практический интерес при создании оптических



интерференционных систем с малыми светопотерями и элементов интегральной оптики.

### **10.3. Ионная подполировка покрытий**

Ионная подполировка покрытий - это послойная ионная полировка каждого слоя многослойных интерференционных систем, а также послойная ионная полировка относительно толстой пленки в процессе формирования. Ионная подполировка покрытий может использоваться как для покрытий, получаемых методом испарения, так и для покрытий, наносимых различными методами ионно-плазменного распыления. Цель ионной подполировки - создание совершенных многослойных систем или толстых (толщиной до нескольких десятков микрометров) оптических покрытий с малым светорассеянием. Например, ионная полировка покрытий может быть использована для получения многослойных систем с малыми светопотерями. Ионная полировка поверхности многослойных зеркал показала, что полировка только верхнего слоя мало влияет на их качество, так как основной причиной светорассеяния является рассеяние на границах слоев из-за поверхностных неоднородностей. Поэтому для получения зеркал с малым светорассеянием требуется полировка каждого слоя после напыления. На установке УРМ 3.279.011 в едином технологическом цикле изготовлено девятислойное зеркало  $ZrO_2 - SiO_2$  ( $\lambda_0 = 0,8$  мкм) с подполировкой каждого слоя после напыления. При этом съем материала для пленок из  $SiO_2$  35 нм. Коэффициент светорассеяния зеркала не отличается от коэффициента светорассеяния подложки.

При увеличении толщины оптического покрытия возрастает светорассеяние покрытия за счет увеличения размеров образующих пленку кристаллитов и росту шероховатости поверхности пленки. Особенно сильно этот процесс проявляется при нанесении покрытий ионно-плазменным методом. Эти методы нанесения покрытий за счет интенсивного разогрева подложек характеризуются образованием кристаллитов, формирующих пленку, больших размеров, чем при нанесении покрытий испарением в вакууме. Например, покрытие меди, наносимое ионно-плазменным распылением со скоростью 10 нм/мин, толщиной 0,1 мкм имеет светорассеяние 0,002 - 0,003% (измерение на приборе ЮС-36). Покрытие меди толщиной 0,25 мкм дает светорассеяние 0,02 - 0,05%. Оказалось, что светорассеяние пленок можно уменьшить, проводя ионную подполировку слоя в процессе роста. Если после нанесения слоя толщиной 0,15 мкм процесс нанесения прерывался и проводилась ионная полировка слоя со снятием слоя толщиной 30 - 50 нм, а затем нанесение слоя общей толщиной 0,25 мкм, светорассеяние такого слоя составляло 0,008 - 0,01%. Лучший результат дала двукратная полировка слоя после нанесения слоя толщиной 0,1 и 0,28 мкм. В этом случае слой меди общей толщиной 0,25 мкм имел светорассеяние 0,002 - 0,003%.

Ионная подполировка прерывает рост кристаллитов, образующих пленку, на поверхности, подвергнутой ионной обработке, начинается как бы новый рост микрокристаллитов, что обеспечивает получение мелкодисперсного плотного слоя вещества.

Полученные слои меди обладали и повышенной адгезией, что позволило использовать их для получения шкал, сеток, растров методом нарезания. Ионная подполировка позволяет получать качественные слои металлов и диэлектриков толщиной в десятки микрометров методом испарения в вакууме (в том числе и методом электронного испарения).

Такие слои могут найти применение, например, в качестве изолирующих прокладок в оптоэлектронных устройствах с высоким напряжением, а также при производстве АП в тех случаях, когда ионная обработка материала детали невозможна.

Известно, что пленки металлов и диэлектриков, наносимые испарением в вакууме, при увеличении толщины до нескольких микрометров существенно ухудшают свои свойства: растут светорассеяние, напряжения в слоях, которые в конечном счете приводят к разрушению слоя при достижении критической толщины. Для получения слоев большой толщины разрабатывают специальные технологические процессы. Например, с успехом использовался способ нанесения прослоек из другого вещества [103]. Ионная подполировка слоя является эффективным технологическим приемом для получения слоев вещества большой толщины. Например, были получены пленки  $SiO_2$  толщиной 50 мкм со стабильным показателем преломления 1,45 и светорассеяния, соизмеримым со светорассеянием от чистой подложки ( $\sim 0,002\%$ ). Испарение  $SiO_2$  на подложки из К8, кварца,  $BaF_2$  проводилось электронным испарением при разрежении 0,004 Па со скоростью 0,5 - 1,5 мкм/мин, ионная подполировка осуществлялась с помощью сеточного электрода в атмосфере кислорода (давление 0,7 - 1,1 Па) после нанесения слоя толщиной 1,5 - 2,0 мкм с удалением слоя толщиной  $\sim 0,2$  мкм.

При получении слоя  $SiO_2$  толщиной 50 мкм проведено 25 циклов подполировки.

Испарением в вакууме также получены слои  $Al$  с подполировкой слоев толщиной 1 мкм (снятие слоя толщиной  $\sim 0,05$  мкм), общей толщиной 20 мкм со следующими параметрами: коэффициент отражения - 88% для  $\lambda = 0,75$  мкм; светорассеяние - 0,05%. Аналогичные результаты при нанесении большой толщины слоев с ионной подполировкой получены для ряда металлов ( $Cu$ ,  $Ag$ ) и диэлектриков ( $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ ).

Таким образом, эффективность ионной полировки при нанесении оптических покрытий очевидна. Осуществить процессы ионной обработки подложек и покрытий можно следующим образом: при нанесении покрытий методом ионно-плазменного распыления необходимо, чтобы на подложку подавалось высокочастотное напряжение, однако в этом случае наносить покрытия можно только на плоскопараллельные подложки небольшой толщины. Для расширения функциональных возможностей установок для обработ-

ки подложек сложной формы, например, лазерных элементов, призм и т.д. установки диодного ВЧ распыления могут быть усовершенствованы. Обработку подложек, полировку или подполировку слоев следует проводить с помощью ВЧ электрода, конструкция которого аналогична конструкции электрода установок ЭВ-156 и ПИОН-300. Однако для реализации метода ВЧ распыления со смещением напряжения материал электрода должен совпадать с материалом мишени. На установке ПИОН-300 предусмотрена возможность размещения в нижней части камеры мишени для реализации процессов нанесения покрытий методом ВЧ распыления.

Рассмотрим методы ионной обработки подложек и покрытий на вакуумных установках для термического и электронно-лучевого испарения.

В вакуумную камеру устанавливался неподвижный ВЧ электрод в зоне держателя подложек аналогично электродам ионно-плазменных установок для ВЧ распыления. Электрод представляет собой металлическую пластину, на которую подается ВЧ напряжение ( $f = 440$  кГц), пластина с трех сторон защищена заземленным металлическим экраном, расстояние экран - электрод меньше темного катодного пространства (5 - 7 мм). К нижней части электрода приклеена кварцевая пластина, а на нее наклеивались подложки. Перед нанесением покрытий в вакуумную камеру подавался рабочий газ, при давлении 0,5 - 1,1 Па в камере возникает газовый разряд и происходит ВЧ распыление подложки. С помощью такого электрода проведены исследования по влиянию ионной обработки покрытий. Однако неподвижный электрод не может использоваться для технологических целей. Разработана конструкция подвижного вращающегося ВЧ электрода, держателя подложки. Но эта конструкция достаточно громоздка и дает возможность наносить покрытия на плоские детали толщиной не более 10 мм.

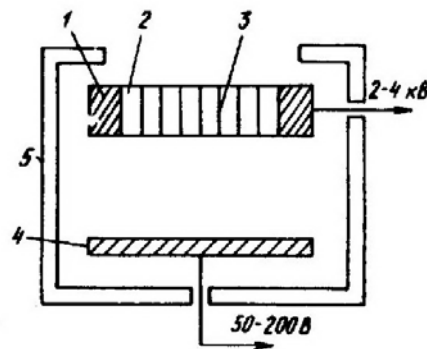
Для того, чтобы избежать загрязнения подложки или покрытия продуктами распыления электрода, пластины электрода изготавливались из *Ta* и предварительно окислялись прогревом на воздухе при 600°C в течение 15 мин. Подколпачную арматуру установки перед первой загрузкой подложек следует запылить слоем  $SiO_2$  толщиной ~ 0,5 мкм. Однако для питания ВЧ электрода требуется мощный ВЧ генератор. Для широкого использования устройств для ионной обработки в промышленных установках для нанесения покрытий требовалось простое устройство с электропитанием от источника постоянного тока.

Создано устройство для ионной обработки подложек и покрытий ИОП-1, которое представляло собой электрод типа ВЧ электрода установки ЭВ-156 с размером пластин 120x12x0,5 мм (ширина пластины увеличена с 4 до 12 мм, расстояние между пластинами 3 мм, пластины из *Ta*, рабочий размер электрода 120x120 нм). При подключении к источнику постоянного напряжения, такой электрод может производить обработку диэлектриков, так как при прохождении узких каналов между пластинами часть ионов нейтрализуется. Электрод устанавливается на расстоянии 5 - 10 мм от держателя подложки, чтобы исключить возникновение газового разряда со стороны подложек. Например, при напряжении на электроде 3 кВ, токе разряда 100 мА,

давлении 6,7 Па скорость съема стекла К8 составляла 1 мкм/ч. Устройство может питаться от высоковольтных трансформаторов очистки газовым разрядом, имеющих на всех установках для нанесения покрытий. Недостатком устройства ИОП-1 является необходимость располагать устройство непосредственно под держателем подложек, в результате чего закрывается ~ 1/6 часть держателя подложки, что затрудняет получение равномерных по толщине покрытий.

Создано более совершенное устройство ИОП-2 (рис.78), которое с успехом используется в установках для промышленного выпуска оптических покрытий [53].

Сеточный электрод типа обычного ВЧ электрода, ширина пластин 12 мм, расстояние между пластинами зависит от режима работы устройства и должно приблизительно совпадать с протяженностью темного катодного пространства (~ 10 мм).



**Рис. 78. Устройство ИОП-2: 1 - держатель пластин; 2 - сеточный электрод; 3 - пластины; 4 - плоский электрод; 5 - заземленный металлический экран**

На электрод 4 подается отрицательное напряжение 50 -200 В. Когда в вакуумной камере возникает газовый разряд, часть ионов положительного столба производит бомбардировку электрода, выбивая из него электроны, которые увеличивают степень ионизации, что дает возможность снижать давление рабочего газа. При правильном выборе расстояния между пластинами (чуть меньше ТКП) между пластинами происходит осцилляция электронов, в результате при прохождении канала между пластинами ионы нейтрализуются. Подложки бомбардируются потоком нейтрализованных частиц, при этом устройство может располагаться на расстоянии 150 -400 мм от держателя подложки.

Для исключения влияния распыляемого материала электрода на покрытия пластины выполняются из полиборидных композиций или из металлов с покрытием нитридами титана, циркония и др.

Режим работы устройства ИОП-2: напряжение 3,5 кВ, ток 200 мА (электрод 150x150 мм), давление 1,1 Па, на расстоянии электрод - подложка

150 мм скорость распыления стекла К8 - 1,5 мкм/ч, на расстоянии 300 мм - 0,8 мкм/ч (распыляемый материал - кварц).

Опыт эксплуатации устройства ИОП-2 в условиях производства показал его большую эффективность. Резко снизились требования к предварительной чистке подложек. Достаточно протиркой салфеткой, смоченной спиртом, удалить пыль и твердые частицы с поверхности подложки.

Применение ионной обработки подложек полностью исключает мазки, вуаль, серость. Например, при просветлении деталей микрооптики (диаметром 4-8 мм) брак снизился с 30% до 2%, так как был вызван в основном некачественной очисткой деталей. Резко улучшено качество покрытий, наносимых на нестойкие оптические материалы (стекло СТК, 0Ф-4, 0К-1, кристаллы КДП, ДКДП). Качественные покрытия наносились на оптические стекла, на которых имелись налеты, удаляемые ионной обработкой перед нанесением покрытий. Получены слои А1 толщиной до 1,5 мкм без подслоев, пригодные для нарезания дифракционных решеток, получены качественные покрытия на органических подложках. Светорассеяние ахроматических просветляющих покрытий, наносимых на ионнополированные подложки, остается на уровне светорассеяния чистой подложки.

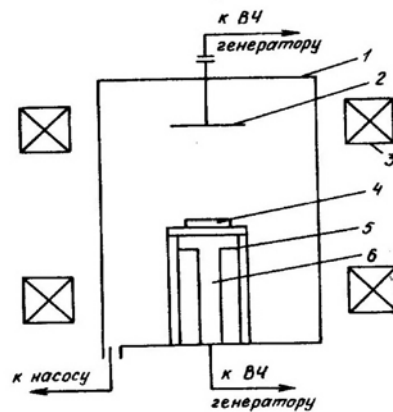
Таким образом, устройство ИОП-2 просто в эксплуатации, надежно и позволяет эффективно проводить ионную обработку подложек, ионную полировку и подполировку покрытий. Устройство не требует дополнительных высоковольтных источников питания, так как подключается к трансформатору для газового разряда. Подобные устройства следует применять на всех установках для получения оптических покрытий.

#### **10.4. Нанесение покрытий с ионной бомбардировкой растущей пленки**

Метод дает возможность воздействовать ионами на пленку в процессе роста, и в ряде случаев дает хорошие результаты. При бомбардировке ионами инертных газов происходит уплотнение структуры пленок, по свойствам пленки приближаются к свойствам самого материала. Бомбардировка ионами инертных газов применяется, главным образом, для получения металлических и полупроводниковых пленок. Для получения окислов, нитридов и других соединений обычно используют бомбардировку ионами кислорода, азота или другого газа, входящего в соединение. Тогда, кроме улучшения структуры покрытия, происходит дополнительное химическое взаимодействие пленки с ионами газа, что улучшает стехиометрический состав пленки.

Наиболее эффективно ионная бомбардировка растущей пленки может происходить при ионно-плазменных методах ее нанесения. На подложку подают некоторое напряжение смещения  $U_{см}$ , что обеспечивает, наряду с распылением мишени, ионную бомбардировку подложки в процессе всего нанесения пленки.

Процесс можно проводить на установке (рис.79), при этом ВЧ напряжение смещения прикладывается либо к держателю подложек, либо к сеточному электроду. В качестве примера рассмотрим процесс роста пленок  $TiO_2$ , наносимой методом ВЧ распыления с напряжением смещения [155]. Показатель преломления  $n$  и толщина пленок  $d$  определялись спектрофотометрическим методом [156], показатель поглощения  $K$  рассчитывался по методу, предложенному в работе [157]. При напряжении на мишени  $U = 1,8$  кВ и давлении  $p = 0,5$  Па скорость нанесения пленок  $TiO_2$  составила  $1,8$  нм/мин. Пленки имели заметное поглощение в области  $0,4 - 0,5$  мкм ( $K = 0,04$  при  $\lambda = 0,42$  мкм), относительно малый показатель преломления ( $n = 2,45$  при  $\lambda = 0,55$  мкм) и значительное рассеяние (у пленок толщиной  $0,22$  мкм интегральное рассеяние в видимой области составило  $\sim 0,3\%$ ).



**Рис.79. Установка для ВЧ распыления: 1 - вакуумная камера; 2 - мишень; 3 - катушки Гельмгольца; 4 - образец (подложка); 5 - кварцевый экран; 6 - медный водоохлаждаемый шлиф**

Поглощение в данном случае связано с недоокислением пленки. При относительно малом давлении кислорода и большом свободном пробеге молекул окисление  $Ti$  происходит не полностью. Действительно, увеличение давления кислорода до  $1,33$  Па приводит к увеличению скорости осаждения ( $5$  нм/мин), повышению  $n$  ( $n = 2,63$  при  $\lambda = 0,55$  мкм), снижению  $K$  ( $K = 0,015$  при  $\lambda = 0,42$  мкм) пленок.

Предполагалось, что окисление пленок можно улучшить, используя ВЧ распыление с напряжением смещения. Исследование воздействия смещения на оптические свойства пленок  $TiO_2$  проводилось в следующем режиме:  $U = 1,6 - 1,8$  кВ;  $p = 0,4 - 0,5$  Па. Данные о свойствах пленок (толщина  $\sim 0,22$  мкм), полученных при различных значениях напряжения смещения, приведены в табл.14.

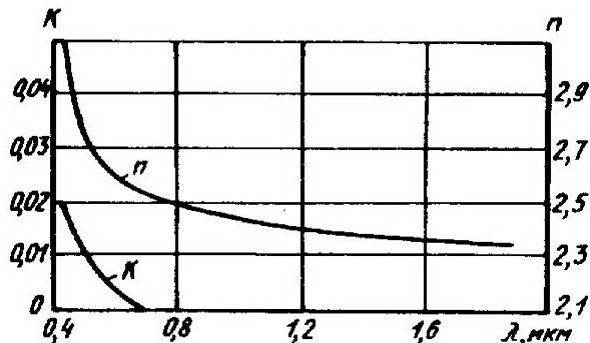
**Таблица 14**  
**Параметры плёнок  $TiO_2$**

$\frac{U_{см}}{U}$	Скорость напыле- ния, нм/мин	$n$ ( $\lambda=0,55$ мкм)	$K$ ( $\lambda=0,42$ мкм)	Свето- рассея- ние, %
0	1,8	2,45	0,040	0,30
0,3	11,0	2,57	0,026	0,35
0,4	13,0	2,60	0,016	0,40
0,5	12,0	2,63	0,013	0,30
0,6	11,0	2,63	0,016	0,12
0,8	10,0	2,60	0,018	0,04

Оказалось, что подача на подложку ВЧ напряжения смещения приводит к значительному росту скорости напыления пленок, причем с повышением напряжения скорость напыления сначала увеличивается, а затем начинает снижаться. Увеличение скорости связано с тем, что подложки в процессе образования пленки направлены, бомбардируются ионами кислорода, что повышает вероятность попадания на подложку и атомов металла.

Снижение скорости нанесения пленок с ростом напряжения смещения легко объяснить тем, что с увеличением энергии ионов, бомбардирующих подложку, часть образующейся пленки распыляется. Большие напряжения смещения, вызывающие частичное распыление пленок, должны наиболее сильно влиять на их структуру.

Пленки  $TiO_2$ , полученные реактивным ВЧ распылением с напряжением смещения, по сравнению с пленками, нанесенными в тех же условиях без смещения, имеют меньшее поглощение, больший показатель преломления при существенно меньшем рассеянии. Значения оптических постоянных пленки  $TiO_2$  толщиной 0,22 мкм, изготовленной при  $U = 1,8$  кВ,  $U_{см}/U = 0,6$ ,  $p = 0,53$  Па (рис.80) близки к оптическим постоянным рутила;  $n$  и  $K$  пленок  $TiO_2$  не зависят от их толщины в диапазоне  $\lambda = 0,7 - 2,2$  мкм.



**Рис.80. Зависимости  $n$  и  $K$  плёнок  $TiO_2$  от длины волны**

Микропористость пленок, оцениваемая спектроскопическим способом [158, 159], не обнаружена.

Таким образом, методом ВЧ реактивного распыления с напряжением смещения позволяет получить плотные пленки  $TiO_2$  с оптическими постоянными, близки к оптическим постоянным рутила. Ионная бомбардировка подложек при этом резко повышает скорость распыления, обеспечивает полное окисление пленок и улучшает их оптические свойства, в частности, может существенно снизить светорассеяние.

Аналогичные результаты получены при нанесении пленок  $Ta_2O_5$ ;  $Al_2O_3$ ;  $SiO_2$  (табл.15). Покрытия получены на подложках из плавленого кварца, сапфира, стекл К8, ТК16, 0Ф4 [160].

**Таблица 15**  
**Характеристики плёнок окислов, полученных в различных режимах ВЧ реактивного распыления**

$\frac{U_{см}}{U}$	n			Скорость напыления, нм/мин			Светорассеяние, %		
	$Ta_2O_5$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Ta_2O_5$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Ta_2O_5$	$Al_2O_3$	$SiO_2$
0	2.03	1.72	1.44	5	6	18	0.05	0.08	0.08
0.2	2.04	1.73	1.45	18	11	25	0.04	0.08	0.02
0.3	2.04	1.74	1.46	25	18	40	0.03	0.07	0.03
0.35	2.06	1.74	1.46	47	19	35	0.03	0.06	0.03
0.45	2.02	1.74	-	40	145	-	0.05	0.05	-

Примечание. Толщина слоев 0,2 мкм.

Воздействие напряжения смещения  $U_{см}$  на оптические свойства и скорость осаждения пленок исследовалось при  $U = 1,6 \div 1,8$  кВ,  $p = 0,4 \div 0,5$  Па, где  $U$  - напряжение на мишени.

Из данных таблицы видно, что скорость осаждения слоев заметно возрастает при приложении к подложке ВЧ напряжения смещения. Кроме того, ионы кислорода, интенсивно бомбардирующие подложку, усиливают окисление осаждаемой пленки, что позволяет получать покрытия с оптическими свойствами, близкими к свойствам массивного образца.

Исследования показали [161], что пленки, наносимые методом ВЧ распыления с напряжением смещения обладают, хорошими защитными свойствами и пригодны для защиты оптических деталей из нестойких стекол. При этом перед нанесением покрытий необходимо полностью удалить с помощью ионной обработки дефектный слой, который образуется на поверхности нестойких стекол. Как показали эллипсометрические измерения, даже на свежеполированных поверхностях нестойких стекол имеется дефектный слой толщиной 70 -100 нм, который сильно снижает защитные свойства наносимых покрытий.

При нанесении покрытий на поверхности нестойких стекол, обработанных ионной бомбардировкой методом ВЧ распыления с напряжением



смещения ( в том числе и с помощью ВЧ сеточного электрода) удается получить пленки, обладающие хорошими защитными свойствами. Так, пленка  $Ta_2O_5$  толщиной не менее 80 нм, нанесенная на ионно-полированные подложки методом ВЧ распыления с помощью ВЧ сеточного электрода, защищает детали из стекол марок ОФ, ТК, ТФ, СТК, ФК в течение 3-4 месяцев при 25 С° и 100% относительной влажности.

Гораздо сложнее обеспечить интенсивную ионную обработку растущей пленки при нанесении пленок методом испарения в вакууме. В последнее время такие методы разрабатываются, главным образом, при получении окисных пленок. Для ионной обработки используют ионные пушки, размещенные непосредственно в вакуумных камерах для нанесения покрытий [162].

При этом ионный источник, с одной стороны, должен обеспечить достаточно интенсивную ионную бомбардировку подложек, а с другой стороны, работа источника не должна ухудшать вакуум, необходимый для нанесения пленок методом испарения в вакууме.

Поскольку на установках для нанесения покрытий держатель подложек, как правило, имеет большую площадь (диаметр держателя обычно на 10 - 15 см меньше диаметра вакуумной камеры) с помощью ионного источника ограниченного диаметра трудно обеспечить обработку всего держателя подложек. Например, на установке с диаметром вакуумной камеры 500 - 600 мм удастся разместить ионный источник типа "Кауфман" диаметром 100 мм. Источник с большим сечением пучка для нормальной работы требует увеличения давления в вакуумной камере. Однако для хорошей конденсации пленки необходимо давление менее 0,013 Па. В силу этого обстоятельства, методом испарения с ионной бомбардировкой растущей пленки на установках с диаметром камеры 500 -600 мм можно наносить покрытие на подложку диаметром ~ 100 мм либо обрабатывать всю площадь держателя, как это делается для ионной полировки подложек. В последнем случае ионная обработка будет происходить не постоянно, а по мере прохождения подложек над зоной обработки. Это снижает интенсивность ионной обработки.

Механизм роста пленки под действием ионной обработки и характер изменения свойств пленок аналогичны описанным выше при рассмотрении нанесения пленок методом распыления с напряжением смещения. Обработка пленок окислов ионами кислорода приводит к лучшему окислению пленок и получению более плотной структуры, что, в свою очередь, уменьшает поглощение и увеличивает показатель преломления пленок. Эти изменения находятся в зависимости от интенсивности ионной обработки. В работе [163] получены пленки  $ZrO_2$  с показателем преломления 2,09 при обработке слоя в процессе напыления ионами кислорода с  $E = 1$  кэВ,  $j = 0,15$  мА/см<sup>2</sup>, на установке ВУ-1 с ионным источником типа "Кауфман" с холодным катодом (диаметр пучка 60 мм).

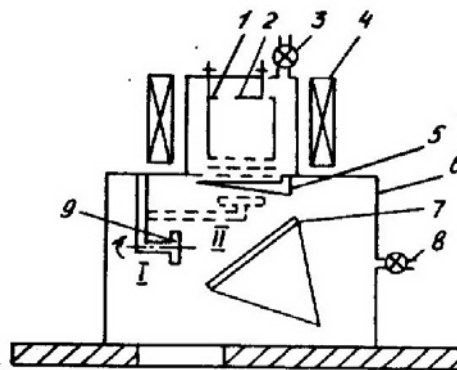
Тем не менее, в ряде случаев ионная бомбардировка растущей пленки, наносимой испарением, дает хорошие результаты, например, для силовых покрытий [164 - 166].

### **10.5. Нанесение покрытий распылением мишени нейтральзованным ионным пучком**

Этот метод позволяет получить весьма совершенные пленки, в том числе из материалов сложного состава. Качество покрытий можно повысить за счет ионной обработки подложек и ионной полировки и подполировки самих покрытий. Наиболее жесткие требования к качеству покрытий предъявляются в случае использования их в качестве волноводов. Используя ионную обработку, не удастся получить волноводные пленки с затуханием менее  $1 \text{ см}^{-1}$ , нанося пленки методами термического, электронно-лучевого испарения или ионно-плазменного распыления. Как показал анализ потерь в волноводах, полученных испарением в вакууме с ионной обработкой, затухание порядка  $1 \text{ см}^{-1}$  связано с потерями излучения в толщине пленки и вызвано наличием в пленке микрочастиц испаряемого вещества, неизбежно попадающих в пленку при испарении материала.

Существенное улучшение структуры покрытий и уменьшение в них потерь наблюдается при изготовлении покрытий распылением мишеней нейтральзованным ионным пучком с помощью ионного источника [167].

На рис.81 представлена схема установки с автономным ионным источником типа "Кауфман". Распыляемые мишени 7 устанавливаются на водоохлаждаемый вращающийся столик под некоторым углом к ионному пучку (30 - 43).



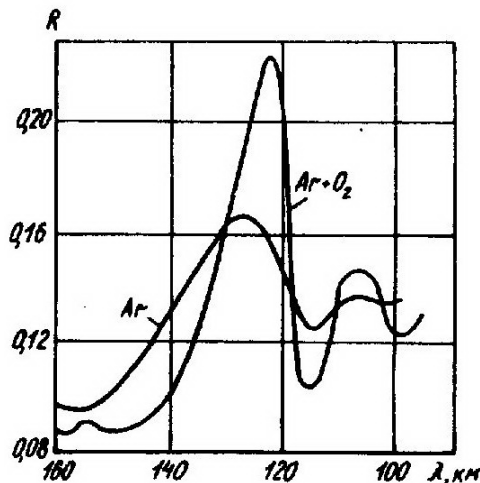
**Рис.81. Схема установки для изготовления плёнок распылением мишени нейтральзованным ионным пучком: 1 - анод; 2 - термокатод; 3, 8 - натекатели; 4 - электромагнит; 5 -нейтральзатор; 6 - вакуумная камера; 7 - водоохлаждаемая мишень; 9 – подложка**

Перед нанесением покрытий подложка подвергалась ионной обработке (положение II). Нанесение пленки осуществлялось на подложку в положении I, режим работы источника обеспечивает  $E = 1,5 \text{ кэВ}$ ,  $j = 1,2 \text{ мА/см}^2$ , ско-

рость распыления мишени из кварца составляла 3-4 мкм/ч, скорость конденсации пленки в 3 раза меньше (1 - 1,3 мкм/ч).

В качестве мишеней использовались оптические стекла КУ-2, К8.К-108, ЛКЗ, ДВ1, УТ49, БС12 и др. Спектральный анализ полученных пленок и измерение отражения пленок в вакуумном ультрафиолете показало, что состав полученных пленок близок к составу распыленного стекла. Следовательно, метод нанесения дает возможность получать пленки сложного состава, причем в отличие от метода испарения в вакууме в пленке отсутствуют микрочастицы испаряемого материала, так как мишень под действием ионного пучка распыляется на молекулярном уровне. Кроме того, в отличие от ионно-плазменных методов распыления, подложка находится вне зоны разряда, что исключает термическое, электрическое, механическое воздействие плазмы на растущую пленку.

Путем распыления мишени ионным пучком (ионный пучок нейтрализован обычным накальным нейтрализатором) удалось получить совершенные пленки. Установлено, что пленки стекол имеют более высокий показатель преломления, чем исходный материал. На рис.82 представлена спектральная зависимость коэффициента отражения пленок  $SiO_2$  в области вакуумного ультрафиолета.



**Рис.82. Спектральная зависимость коэффициента отражения плёнок  $SiO_2$  в области вакуумного ультрафиолета**

Известно, что кварцевое стекло состоит из сетки атомов  $Si$ , тетраэдрально окруженных четырьмя атомами кислорода. При конденсации образуются слои  $SiO_x$ , состоящие из тетраэдров типа  $Si - (Si_4O_{4-y})$ , т.е. из смеси связей  $Si - Si$  и  $Si - O$  по атомной шкале [168]. Сравнение значений коэффициента отражения пленок, полученных при распылении кварцевых мишеней в  $Ar$ , с данными работы [168] показывает, что изготовленные слои по составу близки к слоям  $SiO_x$ , где  $x = 1,5$ . Спектр отражения  $SiO_{1,5}$  похож на спектр отражения  $SiO_2$ . Пики менее острые, но наблюдаются примерно при

тех же значениях длин волн. Это означает, что оптические свойства  $SiO_{1,5}$  определяются связью  $Si - O$ , характерной для кварца.

Таким образом, потери в пленках, полученных методом распыления нейтрализованным ионным пучком, обусловлены, в основном, поглощением внутри объема пленки. Действительно, по фотографиям поверхности пленок, полученным с помощью электронного микроскопа при увеличении 20000, можно определить, что шероховатость поверхности пленок, оцененная по методу многократно нарушенного полного внутреннего отражения, менее 2%, т.е. полученные пленки имеют мелкозернистую структуру с малым разбросом зерен и малым светорассеянием. Для того, чтобы уменьшить поглощение, заменить нежелательные в структуре напыляемых слоев связи  $Si - Si$  на  $Si - O$  в состав газовой среды в вакуумной камере добавляется кислород.

Коэффициент затухания пленок определялся методами, разработанными в интегральной оптике для измерения потерь в волноводах. Для измерения потерь более  $1 \text{ см}^{-1}$  использовался метод, основанный на измерениях длин треков излучения  $He - Ne$  - лазера в пленке при двух значениях его мощности [155]. Для измерения коэффициента потерь пленок менее  $1 \text{ см}^{-1}$  использовался метод фотометрирования светового пучка с помощью двух выводящих призм.

Таким образом, при распылении мишени ионным пучком в образующихся пленках наблюдается дефицит кислорода. Получить волноводные пленки с малыми потерями удастся путем введения кислорода в вакуумную камеру в процессе распыления.

Разработанный метод получения пленочных волноводов с малыми потерями имеет общий характер и пригоден для получения качественных оптических покрытий и из других окислов. В частности, этим методом получены оптические слои из алюмосиликатных, фосфатных стекол, из окиси алюминия, стекол, активированных европием.

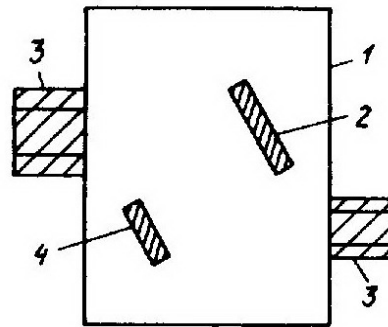
Данные, полученные при исследовании люминесцентных пленок, активированных европием, свидетельствуют о том, что в пленке европий существует в трехвалентной форме, как и в исходном стекле.

Следует учесть, что поскольку качественные слои получают при реактивном распылении, использование источника с термокатодом нежелательно. Для реализации метода наиболее подходящим будет источник с "холодным" катодом, что позволит использовать при изготовлении пленок ионно-химические процессы.

### **10.6. Нанесение покрытий распылением мишени нейтрализованным ионным пучком с ионной бомбардировкой растущей пленки**

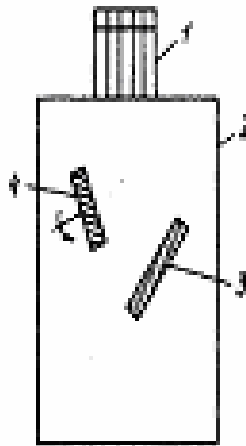
В этом случае нанесение пленок распылением мишени ионным пучком сопровождается ионной бомбардировкой растущей пленки с помощью второго источника ионов (рис.83). Воздействие ионной бомбардировки на

растущую пленку аналогично воздействию ионной обработки растущей пленки при других методах нанесения. Метод выделен в самостоятельный из-за необходимости для его реализации специального сложного оборудования. При ионной бомбардировке, например, окисных пленок, наносимых распылением мишени ионным пучком, пленки уплотняются и ликвидируется дефицит кислорода в пленке (если обработка проводилась ионами кислорода). Уплотнение структуры при нанесении пленок распылением мишени ионным пучком под действием ионной бомбардировки не очень существенно, так как сам метод дает достаточно плотные слои (микропористость порядка 2%), однако происходит эффективное доокисление пленок.



**Рис.83. Вакуумная камера для нанесения плёнки распылением мишени ионным пучком с ионной бомбардировкой растущей плёнки:**  
**1 - вакуумная камера; 2 - мишень; 3 - ионные источники; 4 - подложка**

Реализовать процесс нанесения покрытия распылением мишени пучком с бомбардировкой растущей пленки удалось, используя один ионный источник (рис.84). Процесс проводился на установке УРМ 32.В9.011 с ионным источником ИОН-2, распыление мишени осуществлялось ионным пучком, состоящим из смеси ионов  $Ar$  и  $O_2$  (доля ионов кислорода менялась от 15 до 40%),  $E = 1,5$  кэВ,  $j = 0,7$  мА/см<sup>2</sup>. Подложка подвергалась бомбардировке ионами под углом падения  $\sim 70$  градусов. Получены пленки  $ZrO_2$ , которые имели показатель преломления 2,14, коэффициент поглощения пленок, полученных на подложках с ионной бомбардировкой растущей пленки, оказался в 3 раза меньше, чем на подложках без ионной бомбардировки.



**Рис.84. Вакуумная камера для нанесения покрытий ионным пучком с ионной бомбардировкой растущей плёнки (с одним ионным источником): 1 - ионный источник; 2 - вакуумная камера; 3 - мишень; 4 – вращающаяся подложка**

Описанный метод нанесения пленок с двумя ионными источниками сложен, трудоемок и может применяться для получения специальных видов покрытий, например, для получения волноводов из материалов сложного состава. В большинстве случаев, используя источники ионов с "холодным" катодом, можно подобрать соответствующий состав ионного пучка в сочетании с обязательной предварительной ионной обработкой подложек и получить качественные пленки непосредственно методом распыления мишени нейтрализованным ионным пучком без ионной бомбардировки растущей пленки.

Таким образом, ионная обработка подложек и покрытий при создании оптических слоев является весьма эффективной. Ионная обработка может существенным образом упростить технологию изготовления и улучшить оптические и эксплуатационные свойства покрытий. Особенно проста и эффективна ионная обработка подложек. Этот процесс необходим при нанесении любых оптических покрытий, так как снижает трудоемкость предварительной чистки деталей и существенно влияет на процессы роста и свойства пленок. Разработаны простые устройства для ионной обработки подложек и покрытий ИОП-2 с питанием от трансформаторов газового разряда, что дает возможность реализовать ионную обработку на всех установках нанесения оптических покрытий.

## **Заключение**

Изложенный в предлагаемом пособии материал по практическому использованию явления ионного распыления свидетельствует о том, что в настоящее время ионная обработка оптических материалов является эффективным инструментом в оптической технологии. На базе ионной обработки создан целый ряд принципиально новых технологических процессов, позволяющих существенно расширить предельные точностные и эксплуатационные возможности оптического приборостроения.

Создание оригинальной системы ВЧ сеточного электрода, позволившей получать ионные пучки, практически, неограниченного размера с высокой стабильностью основных параметров, применение автономных ионных источников открывает перспективы получения высокоточных, подчас уникальных оптических элементов, изготовление которых другими методами невозможно.

В настоящее время существует много "белых пятен" в процессах распыления различных материалов, особенно ионно-химического, без знания которых трудно в дальнейшем оптимизировать процессы ионной обработки оптических материалов. В дальнейшем следует вести работы в данном направлении как по пути исследований особенностей процессов распыления, так и по совершенствованию разработанных технологических процессов получения различных поверхностей и созданию новых методик с целью их дальнейшего внедрения в условиях промышленного производства.

## Список литературы

- 1 Crowe H.R.//Phil.Mag. - 1853. - Vol.5. - P. 203.
- 2 Mainel A.B., Bashkin S., Loomis D.H.//Appl.Opt. - 1965. - Vol. 4.-P. 1674.
- 3 Kayama A., Shikaba T., Sanairi H., Yagi F.//Jap. J. Appl. Phys. - 1982. - Vol.21. - P. 586.
- 4 Зигмунд П. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой - М. : Мир. 1984.
- 5 Wehner G.K.//Phys.Rev. - 1956. -Vol. 102. - P.690.
- 6 Brandt W., Laubert R.//Nucl.Instr.Mesods. - 1967. - Vol. 47. - P. 201.
- 7 Harrison D.E., Levy U.S. Sohnson J.P., Effron H.H.//Journ. AppZ.Phys. - 1968. - Vol. 39.- P. 3742.
- 8 Landbert E.//Phys.Rev. - 1958. - Vol. 111. - P. 91.
- 9 Keywell D.//Phys.Rev. - 1955. - Vol.97. - P. 1611.
- 10 Thompson M.W.//Phi I.Mag. - 1968. - Vol. 18. - P. 377.
- 11 Sigmund P.//Phys. Rev. - 1969. - Vol. 184. - P. 383.
- 12 Lindhart S., Nielson V., Schartt M.//K. Danske Videnskab. Selsskab. Mat, Fys. Medd. - 1968. - Vol. 36. - P. 10.
- 13 Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. - М.:Мир. 1967.
- 14 Koedam M.//Physika. - 1959. - Vol. 25. - P. 742.
- 15 Holland L., Priestland C.R.D.//Vacuum. - 1972. - Vol. 22. - P. 133.
- 16 Bayly A.R.//Journ.Mater.Sci. - 1972. - Vol. 7. - P. 404.
- 17 Witcomb M.S.//Journ.Appl.Phys. - 1977. - Vol. 48. - P. 434.
- 18 Carter G., Colligon S.S. Ion Bombardment of Solids. - London, 1968.
- 19 Woodyard S.R., Cooper C.B.//Journ. Appl. Phys. - 1964. - Vol. 35. - P. 1107.
- 20 Hoodyard S.R.//Mat. of 15-th Annual Conf. of Mass Spectrometry. Denver. Colo. - 1967.
- 21 Ishltanl T., Taraura H., Shinmiyo T.//Surf.Sol. - 1976. - Vol. 55. - P. 179.
- 22 Herzog R.F.K., Poschenleder H.P., Ruedenaues F.G.//Ibidem. - P. 320.
- 23 Jurela Z., Perovlc B.//Mat. 8-th Intern. Conf. of Phenomena in Ionized Gases, - Vienna, - 1967.
- 24 Comas J., Cooper C.B.//Journ.Appl.Phys. - 1957. - Vol. 38. - P. 2956.
- 25 Технология тонких пленок/Под.ред. Л. Майселла и Р. Глэнга.- П.:Сов.радио. - 1977. - Т. 1.
- 26 Stark J//Die Elecktrizttat in Gazen. - Berth Leipzig, - 1902.
- 27 Seeliger R., Sommermeyer K.//Z.Phys. - 1935. - Vol. 93. - P. 692.
- 28 Wehner G.K., Rosenberg D.//Journ. Appl. Phys. - 1960. - Vol. 31. - P. 77.
- 29 Cobic B., Perovic B.//Proceeding 4-th Intern. Symp. Ionization Phenomena in Gases. - Amsterdam, - 1960. - Vol. 1. - P. 26.
- 30 Haymann P., Trillat S.S.//Compt. Rend. - 1960. - Vol. 251. - P. 85.
- 31 Wehner G.K.//Phys.Rev. - 1956. - Vol. 102. - P. 690.
- 32 Wehner G.K., KenKnight C.E., Rosenberg D.//Planet Spase Sci. - 1963. - Vol. 11. - P. 1257.
- 33 Габович М.Д. Плазменные источники ионов - Киев:Наук, думка, 1964.



- 34 Спивак Г.В., Крохина Л.И.//Изв. АН СССР. Сер.Физика. - 1964. - Т.28. С.1183.
- 35 Anderson G.S., Mayer M., Wehner G.K.//Journ. Appl. Phys. - 1962. - Vol. 33. - P. 2991.
- 36 Kanekama N., Miyazaki T.//Sci.Papers I.P.C.R. - 1976. - Vol. 70. - P. 1.
- 37 Jasuda H.//Journ. Appl. Phys. - 1974. - Vol. 45. - P. 484.
- 38 Jasuda H.//Jap.J.Appl.Phys. - 1973. - Vol. 12. - P. 1139.
- 39 Волчков В.И, и др.//Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов. - М.:ЦНИИ информ., - 1983.
- 40 Heshuhg R., АБеггге L.//Vacuum Techn1c. - 197S. - Vol. 24. - P. 217.
- 41 Gerlach-Meyer U., Coburn J.H., Kay E.//Journ. Appl. Phys. - 1980. - Vol. 51. - P. 3362.
- 42 Габович Н. Д.: Физика и техника плазменных источников ионов. - М.:Атомиздат, -1972.
- 43 Плешивцев Н. В.: Катодное распыление. - У. :Атомиздат. - 1968.
- 44 Norstron H.//Vacuum. - 1980. - Vol.30. - P. 225.
- 45 Грановский В.Л.: Электрический ток в газах. Установившийся ток/Под.ред. Л.А.Сена и З.Е.Галанта. - М.: Наука, - 1971.
- 46 Penning S.M., Moubles J. H.A.//Proceeding Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap. - 1940. -Vol. 43. - P. 41.
- 47 Davidse P.D., Halsell L.J.//Journ. Appl. Phys. - 1966. - Vol. 37. - P. 574.
- 48 Tsui T.C.//Phys. Rev. - 1968. - Vol. 168. - P. 107.
- 49 Данилин В.С., Логунов В.И.//Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. - 1971. - Гл. 8. - С. 121.
- 50 Данилин Б.С., Качурин Ю.Е., Логунов В.И.//Там же. - 1973. - Гл. 1. - С. 76.
- 51 Данилин Б.С., Киреев В.Ю.: Ионное травление микроструктур. - Н.:Сов. радио. - 1979.
- 52 Миллер В.Т., Михайлов А.В.: Технология изготовления прецизионных оптических элементов -М.:ЦНИИ информ, - 1986. - С. 10.
- 53 Миллер В.Т.//Там же. - С. 42.
- 54 Dugdale R.A., Ford S.O.//Trans. Br. Ceram. Soc. - 1965. - Vol. 65. - P. 165.
- 55 Взаимодействие атомных частиц с твердым телом/ Л.В. Вишневецкая, В.В. Ильин, А.Ф. Первеев, Л. А. Черезова, - Минск: Радиотехн.ин-т. - 1981. - С. 58.
- 56 Journ. Appl. Phys./ E.H. Haselltim, T.S. Hullbut, N. Olson, H.P. Smith. - 1967. - Vol. 38. - P. 4313.
- 57 Denis S.D., Hall E.B.: Journ. Appl. Phys. - 1978. - Vol. 49. - P. 1119.
- 58 Katenkamp U. , Karge H., Prager R.//Proceeding 1-st Conf. of Ion Beam Modification Materials. - Budapest. - 1978. - Vol. 11. - P. 1333.
- 59 Welner O.K., Zaegreid N.//Journ. Appl. Phys. - 1961. - Vol. 32. - P. 365.
- 60 Davldse P.D.//Journ. Solid State Techn. - 1966. - Vol. 9. - P. 30.
- 61 Jones R.E., Winters H.F., Haisell L.J.//Journ. Vac. Sci. Techn. - 1968. - Vol. 5. - P. 84.
- 62 Stern E., Caswell H.L.//Journ. Vac. Sci. Techn. - 1967. - Vol. 4. - P. 128.
- 63 Wilson R.G.//Opt. Techn. - 1970. - Vol. 2. - P. 19.

- 64 Werner G.K., Jorgerson G.V.//Journ. Appl. Phys. - 1965. - Vol. 35. - P. 2672.
- 65 Bach H.//Z.: Naturforschung. - 1972. - Vol. 27. - P. 333.
- 66 Wehner G.K.//Journ. Advances In Electronics. - 1955. - Vol. 71. - P. 239.
- 67 Abbe H., Sonobe J., Enomoto T.//Jap. J. Appl. Phys. - 1973. - Vol. 22. - P. 154.
- 68 Данилин Б.С., Киреев В.Ю., Кузнецов В.И.: Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. - М.: Радио и связь., - 1983.
- 69 Lehman H.W., Widmer R.//Appl. Phys. Lett. - 1978. - Vol. 32. - P. 163.
- 70 Gerlach-Heyer U., Coburn S.W., Kay E.//Surf. Sci. - 1981. - Vol. 103. - P. 177.
- 71 Sehvars S.A., Helms C.R.//Surf. Sci. - 1981. - Vol. 102. - P. 578.
- 72 Bohr N.//Dan. Vid. Selsk. Mat. Fys. Mettel. - 1948. - Vol. 18. - P. 1.
- 73 Пранявичус Л., Дудонис Ю.: Модификация свойств твердых тел ионными пучками. - Вильнюс: Москлас. - 1980.
- 74 Coburn W., Winters H.F., Chuang T.J.//Journ. Appl. Phys. - 1977. - Vol. 48. - P. 3532.
- 75 Bruce A.//Journ. Vac. Sci. Techn. - 1978. - Vol.15. - P. 205.
- 76 Harshbarger W.R., Porter P.A.//Solid State Technology. - 1978. - Vol. 21. - P. 99.
- 77 Вишневская Л.В.,Первеев А.Ф., Черезова Л.А., Шакалова Т. К.//Оптико-мех. пром-сть. - 1980. -С. 30.
- 78 Вишневская Л.В., Лысенко В. А.: Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов - Н.:ЦНИИ информ., - 1983. - С. 53.
- 79 Клейменов Л.С., Ильин В.В., Первеев А.Ф.//Оптико-мех.пром-сть. - 1972. - С. 53.
- 80 Дудин-Барновский И.В., Карташова А.И.: Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. - М.:Машиностроение - 1978.
- 81 Топорец А.С., Мазуренко М.Л.//Оптико-мех. пром-сть. - 1968. - Гл 2. - С. 11.
- 82 Крылова Т.Н., Бохонская И.Ф., Карапетян Г. А.// Оптика и спектроскопия. - 1980. - Т. 49, - С. 802 .
- 83 Tarasevich M.//Appl. Opt. - 1970. - Vol. 9. - P. 173.
- 84 Первеев А.Ф., Ильин В.В, Михайлов А.В.//Оптико-мех. пром-сть . - 1972.- С. 40.
- 85 Качкин С.С., Орлова Л.А.//Оптико-мех. пром-сть - 1968. - С. 69.
- 86 Леонов Н. Б. , Черезова Л. А. , и др. //Физика и химия стекла. – 1984. - С. 104.
- 87 Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии. - М.:Высш. шк. - 1984.
- 88 Александрова И.И., Золотарев В.М., Черезова Л.А.: Диагностика поверхности ионными пучками. - Ужгород:УГУ. - 1985. - С. 113.
- 89 Пшеницын В.И.. Абаев м.И. Эллипсометрия в физико-химических исследованиях. - Л.:Химия. - 1986.
- 90 Артамонов О.М. и др.//Физика и химия стекла. – 1981. - С. 470.
- 91 Тютиков А.М.//Оптико-мех. пром-сть. -1974. - С. 41; 1980. - С. 11.

- 92 Кулревич В.В., Лунтер С. Г.//Оптико-мех.пром-сть - 1969. - С. 31.
- 93 Волянец Ф.К.//Там же. - 1974. - С. 29.
- 94 Ephrath Z.M.//Journ. Electrochem. Soc. - 1979. - Vol. 126. - P. 1419.
- 95 Minot M.J.//Journ. Opt. Soc. Am. - 1976. - Vol. 66. - P. 515.
- 96 Lowolermilk W.H., Milan D.//Laser Focus. - 1980. - Vol. 16. - P. 64.
- 97 Claphorn P.B., Hurlty M. C.//Nature. - 1973. - Vol. 244, - P. 281.
- 98 Wilson R.G., Hurlty M.C.//Opt.Acta. - 1982. - Vol. 29. - P. 27.
- 99 Черезова Л.А., Бигильдинская М.Г., Егоров П.П.: Технология изготовления прецизионных оптических элементов. - М.гЦНИИ информ. - 1986.
- 100 Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия, - Л. : Машиностроение, 1973.
- 101 Первеев А.Ф.//Тез.докл. II Всесоюзн.конф. "Оптика лазеров", - Л.:ГОИ; - 1979. - С. 337.
- 102 Первеев А.Ф., Ильин В.В., Фролова Я.П.: Технология изготовления шкал, сеток, фотошаблонов и других аналогичных оптических деталей приборов, -М.:ЦНИИ информ., - 1979. - С. 26.
- 103 Степура А. В. и др.//Ионная обработка материалов, применяемых в квантовой электронике. - п.:ЦНИИ информ. , - 1979.
- 104 Первеев А.Ф. Ионная обработка оптических материалов, применяемых в квантовой электронике. - М.:ЦНИИ информ., - 1978. - С. 3.
- 105 Ган М.А. и др.//Тез.док. II Всесоюзн.конф. "Оптика лазеров". - Л.:ГОИ, - 1979.
- 106 Ган М.А. и др.//Оптико-мех.пром-сть. – 1978.
- 107 Marloge J.P.//Journ. Optics. - 1984. - Vol. 5. - P. 119.
- 108 Marloge J.P.//Journ. Optics. - 1984. - Vol. 5. - P. 250.
- 109 Заказнов Н.П., Горелик В.В. Изготовление асферической оптики. - М.:Машиностроение , - 1978.
- 110 Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. Расчет, изготовление и контроль - М.:Недра , 1972.
- 111 Tarasevich M., Narodny L.//Appl.Opt.- 1967. - Vol. 6. - P. 2010.
- 112 Karger A.M.//Appl.Opt. - 1973. - Vol.12. - P.453.
- 113 Бунин И. Г. и др.//Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов.- М.:ЦНИИ информ., - 1983.
- 114 Бунин И.Г.//Там же. - С. 17.
- 115 Пуряев Д. Т. Контроль асферических поверхностей - М. .- Машиностроение. ,- 1979.
- 116 Богдановский Г.А. Повышение эффективности производства путем применения методов электронно-ионной обработки материалов. - Л.:ЛДНТП , - 1987.
- 117 Барченко В.Г. и др.//Изв. ЛЭТИ. - 1982. - Вып. 303. - С.47.
- 118 Вишневская Л.В.//Оптико-мех.пром-сть. - 1985.
- 119 Бородин В.Г. и др.// Оптико-мех.пром-сть. - 1986.
- 120 Вишневская Л.В., Дмитриев А.С. и др.//Тез.УІ Всесоюзн.шк.-семинара по оптической обраб. информ.-Фрунзе: КГУ, 1986.-Т. 1. - С. 82.

- 121 Плазменная технология в производстве СБИС/Под. ред. Н.Айнспрука и Д.Брауна. - М.:Мир. - 1987.
- 122 Ган М.А. и др.//Тез. докл. III Всесоюзн. конф."Оптика лазеров". - Л.: ГОИ, - 1981.
- 123 Фролова Н.П., Иванова В.М., Травникова Н.Л.//Оптико-мех. пром-сть. - 1978.
- 124 Вейденбах В.А., Медведева И.Е., Пospelов Б. А.//Там же. - 1978.
- 125 Иванова В.Ы., Любавская Л.А., Большакова Т.В.: Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов.- М.:ЦНИИ информ.. -1983. - С. 97.
- 126 Фролова Н.П. и др.//Получение и свойства тонких пленок. - Киев.:Ин-т прикл. математики АН УССР . - 1976. - Вып. 3. - С. 92.
- 127 Лысенко В.А., Вишневская Л.В.//Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов. - М.:ЦНИИ информ., - 1983. - С. 53.
- 128 Степаков В.Н. и др. Технология изготовления прецизионных оптических элементов. - М.:ЦНИИ информ. - 1986. - С. 23.
- 129 Коронкевич В. П.//Автометрия. - 1985.
- 130 Слюсарев Г.Г.//Доклады АН СССР. -1957.
- 131 Lisem L.V., Hinth P.M., London T. A.//IBM. J. Res. Dev. - 1969. - Vol. 13. - P. 150.
- 132 Лукин А. В., Мустафин К. С.//Оптико-мех. пром-сть, - 1979.
- 133 Бобро В. В. и др. Новое делительное оборудование и техпроцессы для изготовления оптических элементов.-М.:ЦНИИ информ. - 1980. - С. 47.
- 134 Иванова В.М. Технология изготовления прецизионных оптических элементов.- М.:ЦНИИ информ.. - 1986. - С. 69.
- 135 Первеев А.ф.//Тез.докл. V Всесоюзн. конф. "Оптика лазеров". - Л.:ГОИ, - 1986. - С. 283.
- 136 Молчанова О. С. Чистка оптических деталей. - Л.: Оборонгиз. 1947.
- 137 Холленд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме. -М.:Энергоиздат. - 1963.
- 138 Mattax D.M. //Journ. Appl. Phys. - 1966. -Vol.37. - P. 3613.
- 139 Florescu N. A.//Vacuum. - 1955. - Vol.78. -P.46.
- 140 Holland L., Laurenson L., Priestland C.//Rev. Sci. Istr. - 1963. - Vol. 34. - P. 357.
- 141 Palmberg P.W., Todds J., Phodin T.H.//Journ. Phys. - 1968. - Vol. 39. - P. 4650.
- 142 SUrland D.J.//Appl. Phys. Lett. - 1966. - Vol.8. - P. 326.
- 143 Chamber A., Prutton M.//Thin Solid Films. - 1967. - Vol. 1. - P. 235.
- 144 Chopra H.L.//Appl. Phys. Lett. - 1965. - Vol.7. - P. 140.
- 145 Обухов В.Б. и др.//Кристаллография. - 1979.
- 146 Степура А.В. и др.//Оптико-мех. пром-сть. - 1983.
- 147 Муранова Г.А. и др.//Там же. - 1979.
- 148 Hitter E.//Appl.Opt. - 1976. - Vol.15. - P.2318.

- 149 Allen J.A. et al//Structure and Properties of Thin Films/John Wiley and Sons,- New York, 1959. - P. 46.
- 150 Редько В.П., Штейнгардт Л.М.//Зарубежная радиоэлектроника. - 1977.
- 151 Tien P. K.//Appl. Opt. - 1972. -Vol. 10. - P. 2395.
- 152 Weler H.P. et al//Appl.Opt. - 1973. - Vol.12. - P. 755.
- 153 Золотов Е.Н., Плехатыи В.П.//Квантовая электроника. - 1975. - Т. 1.
- 154 Войшвило И.А., Лазарев Б.П.//оптико-мех. пром-сть. - 1956.
- 155 Муранова Г. А. и др.//Там же. - 1975.
- 156 Физика тонких пленок/Под.ред. Г.Хасса и Р.Туна - М.:Мир.. - 1967. - Т. 2.
- 157 Валеев А.С.//Оптика и спектроскопия. - 1963. - Т. 15.
- 158 Первеев А.Ф. и др.//Там же. - 1972. - Т. 32.
- 159 Первеев А.Ф. и др.//Физика твердого тела. - 1972. - Т. 14.
- 160 Первеев А.Ф., Черезова Л.А., Михайлов А.В.//Оптико-мех. пром-сть. - 1977.
- 161 Первеев А.Ф., Черезова Л.А., Михайлов А.В.//Там же. - 1978.
- 162 Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н.: Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. - М.:Энергоиздат, 1986.
- 163 Фадеева Э.И. и др.//Состояние и развитие работ в области оптических покрытий, пленкообразующих материалов и оборудования - М. :ЦНИИ информ., - 1987. - С. 45.
- 164 Cautherln J., Weissmantel C.//Thin Solid Films. - 1978. - Vol. 50. - P. 135.
- 165 Martin F.J. et al//Appl. Opt. - 1978. - Vol. 22. - P. 184.
- 166 Martin P.J. et al//Journ. Appl. Phys. - 1984. - Vol. 55. - P. 235.
- 167 Первеев А.Ф., Муранова Г.А.//Оптико-мех. пром-сть. - 1987.
- 168 Philipp H.R.//Journ. Phys. Chem. Solids. - 1972. - Vol. 32. - P. 1935.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Ионная бомбардировка твердых тел .....	5
Глава 2. Основные методы ионной обработки оптических материалов .....	15
2.1 Автономные источники ионов .....	15
2.2. Ионно-плазменные методы обработки оптических материалов .....	20
2.3 Ионная обработка оптических материалов с помощью ВЧ сеточного электрода.....	24
Глава 3. Основные закономерности процесса ионного распыления диэлектриков.....	30
ГЛАВА 4. Ионно-химическая обработка оптических материалов.....	38
Глава 5. Ионная полировка и ионно-химическая модернизация поверхности оптических материалов.....	52
5.1. Методы исследования оптических поверхностей.....	52
5.2. Ионная обработка шлифованных поверхностей .....	55
5.3. Ионная обработка полированных поверхностей.....	57
5.4. Изменение свойств поверхностей под действием ионной бомбардировки.....	58
ГЛАВА 6. Высокоточная размерная ионная обработка оптических элементов	66
ГЛАВА 7. Ионная зональная ретушь.....	77
ГЛАВА 8. Формообразование асферических поверхностей.....	82
8.1. Формообразование поверхностей оптических деталей ионной обработкой.....	83
8.2. Ионное формообразование .....	85
8.3. Особенности метода формообразования маскированным пучком ионов .....	96
8.4. Ионно-химическое формообразование асферических поверхностей .	100
8.5. Особенности формирования асферических поверхностей на образцах из полупроводниковых материалов .....	103
8.6. Формообразование асферических поверхностей с использованием автономных ионных источников .....	110
ГЛАВА 9. Применение ионной обработки при создании элементов с заданной микротопографией рельефа поверхности.....	114
9.1. Классификация элементов микротроптики и методы изготовления масок.....	115
9.2. Создание двумерных рельефов на поверхности оптических деталей с помощью ионного и ионно-химического травления .....	118
9.3. Создание трехмерных рельефов на поверхности оптической детали.	120
9.4. Создание трехмерных рельефов заданной микротопографии на поверхности оптических деталей.....	122
ГЛАВА 10. Ионная обработка оптических покрытий .....	125
10.1. Ионная обработка подложек.....	126
10.2. Ионная полировка оптических покрытий .....	128
10.3. Ионная подполировка покрытий.....	131

10.4. Нанесение покрытий с ионной бомбардировкой растущей пленки..	135
10.5. Нанесение покрытий распылением мишени нейтрализованным ионным пучком .....	140
10.6. Нанесение покрытий распылением мишени нейтрализованным ионным пучком с ионной бомбардировкой растущей пленки .....	142
Заключение .....	145
Список литературы .....	146