

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

для студентов направления подготовки

11.04.04 - «Электроника и наноэлектроника»

12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Автор и составитель: Аксенов Александр Иванович.

Процессы лазерной и электронно-ионной технологии: Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения, обучающихся по направлению 11.04.04 - «Электроника и наноэлектроника», 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика.

Задачей дисциплины «Процессы лазерной и электронно-ионной технологии» является ознакомление студентов с физическими явлениями, происходящими при лазерной и электронно-ионной обработке, режимами обработки, а также конструкциями устройств с описанием их принципов действия. Все это необходимо современному специалисту, работающему в области лазерной и электронно-ионной технологии для понимания физической сущности процессов и выполнения инженерных расчетов режимов операций на конкретном типе технологического оборудования.

Томск: ТУСУР, 2018. – 123с.

Содержание

1. Введение.....	6
2. Торможение и пробег электронов в твердом теле.....	8
3. Отражение электронов и вторичная эмиссия. Эмиссия электронов из твердого тела.....	14
4. Свечение твердого тела, возбуждаемое воздействием потока электронов.	17
5. Рентгеновское излучение при электронной бомбардировке.	20
Характеристическое излучение	23
6. Физико-химические превращения при облучении электронами	27
7. Тепловые процессы при облучении пучком электронов	31
7.1. Изменение свойств материалов под действием электронной бомбардировки.....	35
8. Процессы торможения ионов в веществе	37
8.1 Потери энергии при торможении ионов в веществе.....	38
8.2 Пробег ионов.....	39
9. Процессы ионного (катодного) распыления	42
10. Вторичная ионно-электронная эмиссия.....	49
11. Химическое действие ионов	52
12. Корпускулярно-лучевые установки	54
12.1. Классификация корпускулярно-лучевых установок.....	54
13. Принцип устройства корпускулярно-лучевых установок	58
14. Корпускулярно-оптические системы.....	59
14.1. Электронно-оптические системы.....	62
14.2. Ионно-оптические системы.....	67
15. Извлечение ионов из плазмы и первичное формирование ионного пучка	70

16. Источники ионов	75
16.1. Общие требования и классификация ионных источников.....	75
16.2 Источники ионов газов	82
16.3 Источники ионов металлов и твердых веществ.....	85
16.4 Источники ионов с поверхностной ионизацией и электронным ударом	86
16.5 Плазменные источники ионов с использованием испарения чистых веществ.....	88
16.6 Плазменные источники ионов тугоплавких элементов с катодным распылением рабочего вещества.....	93
16.7 Источники ионов с использованием процессов диссоциации химических соединений твердых веществ.....	98
16.8 Источники ионов на основе вакуумного дугового разряда с расходуемым катодом	99
16.8.1 Широкоапертурный источник ионов металлов.....	99
16.8.2 Технологический источник для ионной имплантации “Радуга”. 103	
16.8.3 Источник MEVVA.....	104
16.8.4 Тип ионов	106
16.8.5 Универсальный ионно – плазменный источник	107
17. Взаимодействие лазерного излучения с веществом.....	111
17.1 Классификация процессов взаимодействия излучения с веществом. 112	
17.2 Классическое описание линейных оптических эффектов взаимодействия излучения с веществом	114
17.3 Структуро– и фазопреобразование лазерно-имплантированных слоев	115

17.3.1 Структурные изменения в металлах при наносекундном лазерном воздействии.....	115
17.3.2 Кристаллизация расплава в условиях кипения.....	117
17.3.3 Создание аморфных поверхностных слоев.....	117
17.4 Лазерная имплантация.....	118
17.5 Внедрение и массоперенос в зоне лазерного воздействия.....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122

1. Введение

Процессами взаимодействия электронов и ионов с веществом ученые физики интересовались уже несколько веков с XVII века со времен изучения разряда в трубках Крукса. Катодные лучи (потоки электронов) нагревают положительный электрод, попадая на стенку из стекла вызывают его свечение. Наибольшее число открытий в этом плане было сделано в XIX веке. В конце века была создана «катодная» трубка, подобие современной электронно-лучевой трубки, в которой катодные лучи использовались для возбуждения свечения на экране. В 1897 году Дж. Томсон открыл электрон. В период 1895-1897 год Вильям Рентген опубликовал статьи о «новом виде лучей», в которых описал способы получения рентгеновских лучей и их необыкновенных свойствах. В экспериментах с трубками Крукса были открыты эффекты распада молекул с образованием катионов и анионов, т.е. положительно и отрицательно заряженных «осколков» молекул, которые впоследствии были названы ионами, были получены первые пучки ионов. К концу XIX и началу XX столетий были изучены основные процессы взаимодействия электронов и ионов с веществом: люминесценция некоторых материалов под действием электронов и ионов, возбуждение рентгеновского излучения при бомбардировке металла электронами, вторичная электронная и электронно-ионная эмиссия, тепловое действие электронного луча, изменение свойств поверхности твердого тела при облучении ионами и т.д.

Начало и середина XX столетия характеризуются появлением и развитием применений электронных и ионных пучков для технологических целей. В 30-е годы во Всесоюзном электротехническом институте в Москве были получены первые образцы железа, полученные электронно-лучевой плавкой и разработаны электронные пушки, генерирующие луч мощностью до десятков кВт. В институте электросварки имени Патона созданы сварочные электронные пушки, в физико-техническом институте в Харькове разработана серия источников ионов для ускорителей, на которых

проводились эксперименты по изучению влияния ионов на поверхностные свойства твердого тела. В Германии, Англии, Японии и США были созданы электронно-лучевые и ионно-лучевые установки для электронной промышленности. В процессе освоения космоса и атомной энергетики потребовались материалы с повышенной тепловой и радиационной стойкостью, для получения которых начали применять электронно-лучевую плавку и сварку металлов в вакууме. Для управления космическими объектами были разработаны ионные двигатели, генерирующие потоки ионов в десятки ампер.

В эти годы установили, что интенсивным импульсным электронным лучом удается испарять вещество из точки касания луча, минуя стадию расплавления или создавать большие термоупругие напряжения вокруг указанной точки, приводящие к растрескиванию вещества.

В Московском институте электронного машиностроения была разработана электронно-лучевая установка для сверления отверстий в пластине из молибдена; в Томском институте автоматизированных систем управления и радиоэлектроники были разработаны электронно-лучевые установки для сверления алмаза.

Электронно- и ионно-лучевые методы обработки, обладая целым рядом достоинств перед другими электрофизическими способами, широко используются в технике при выполнении разнообразных технологических операций.

Особенно широко электронно-ионная технология используется в электронной промышленности при изготовлении приборов в микроминиатюрном исполнении, в производстве гибридных и интегральных микросхем.

В России и за рубежом разработано большое количество различных по назначению и параметрам технологических установок, эксплуатируемых на предприятиях и в научно-исследовательских центрах.

Разработка технологического электронно-ионного оборудования и изучение процессов взаимодействия заряженных частиц с веществом связано с трудностями, обусловленными отсутствием систематизированных обзоров и учебников. Имеющиеся переводные сборники докладов международных и отечественных конференций мало доступны студентам и в большинстве случаев стали библиографической редкостью.

В данном пособии описаны основные закономерности процессов взаимодействия электронов и ионов с твердым телом, приведены главные способы получения потоков электронов и ионов, а также варианты формирования и управления пучками заряженных частиц, вопросы разработки источников электронов и ионов, причем отдельно рассматриваются источники ионов газов и твердых веществ, в частности ионов металлов. Приводятся возможные варианты классификаций оборудования, электронных пушек и ионных источников по характеру процессов, взятых за основу при их конструировании.

2. Торможение и пробег электронов в твердом теле

Процессы взаимодействия электронов с твердым телом начинаются с торможения первых в веществе и передачи их энергии последнему. При этом протекают процессы воздействия как каждого электрона в отдельности, так и коллективное воздействие потоков электронов.

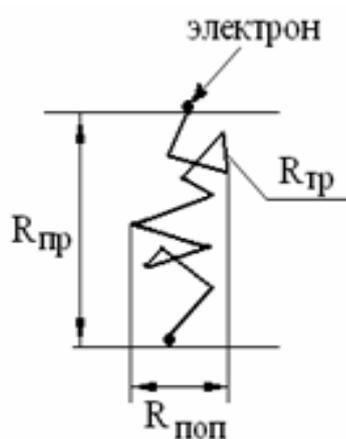
В зависимости от строения вещества электроны теряют свою энергию в результате взаимодействия с кристаллической решеткой в целом, с атомами и молекулами вещества, с электронами атомных оболочек и со свободными электронами (электронным газом), причем последние два канала потерь практически неразделимы.

Пространство кристаллической решетки пронизано электрическими полями отдельных атомов и молекул. Под действием электронов возникает возмущение этих полей, приводящее к смещению атомов со своих мест и образованию радиационных дефектов, увеличивается амплитуда колебаний

атомов, проявляющееся как нагрев вещества, изменяются параметры кристаллической решетки. При достаточно больших энергиях электронов происходит ослабление и далее разрыв связей между атомами молекул, приводящий к диссоциации сложных молекул.

Взаимодействие электронов с атомами и молекулами вещества базируется на законах упругих и неупругих столкновений. В результате упругих столкновений электронов с энергиями большими энергии орбитальных электронов происходит их рассеяние на малые углы. Доля энергии электронов, передаваемая атому, оцененная с учетом дифференциального сечения упругого рассеяния, описанной Резерфордской функцией с экранированием пренебрежимо мала. Мала эта доля и для электронов с энергией меньшей орбитальной энергии атомов и не зависит от угла рассеяния. Следовательно, доля энергии, теряемая в результате упругих столкновений незначительна.

Процессы взаимодействия и потери энергии электронов с электронами атомных оболочек и свободными электронами протекают в результате неупругих столкновений, составляющих основную долю потерь их энергии. К этим процессам относятся возбуждение атомов, ионизация атомов и молекул, диссоциация молекул, образование новых связей, возбуждение коллективных колебаний в электронной плазме, образованной свободными электронами (возбуждение плазмонов).



$R_{тр}$ - траекторный пробег
 $R_{пр}$ - проекционный пробег
 $R_{поп}$ - поперечный пробег

Рисунок 2.1 – пробег электрона

Потеряв всю энергию электрон «застревает» на определенной глубине в твердом теле. Весь пройденный путь электрона оценивается как *траекторный пробег*, т.е. длина ломанной в результате столкновений с атомами траектории, *проекционный пробег* (проекция траектории на прямую, перпендикулярную поверхности) и *поперечный пробег* (проекция траектории на прямую, параллельную поверхности).

При столкновении с атомами внутри твердого тела не только теряется часть энергии электрона, но и изменяется направление его движения. Продвигаясь вглубь твердого тела, электрон совершает путь по сложной ломаной траектории. Длина этой ломаной называется *траекторным пробегом*. Для технологии представляет интерес *глубина пробега*, т.е. проекция траекторного пробега на прямую, перпендикулярную поверхности твердого тела, и *поперечный пробег*, т.е. ширина канала, в рамках которого укладывается траекторный пробег, или проекция траектории на прямую, параллельную поверхности. Учеными разных стран проводились экспериментальные и теоретические исследования пробега электронов, было предложено много картин процессов торможения и формул для расчетов пробега электронов, связывающих пробег с энергией последних.

Можно встретить в печати модели и формулы Ленарда, Видингтона-Томсона, Юнге, Фирсова, Махова, Рыкалина и др.

При разном подходе к построению моделей торможения и потерь энергии электронов были получены различные результаты, особенно для потерь по длине пробега. По Махову основная часть потерь энергии приходится на первую четверть пробега. По Видингтону-Томсону – основные потери приходятся на первую часть пробега. По Юнге потери энергии распределяются равномерно по всему пути пробега электронов.

Величина проекционного пробега согласно гипотезе Видингтона-Томсона прямо пропорциональна квадрату энергии электронов и обратно пропорциональна плотности вещества и некоторой константе торможения. Для оценки пробега в интервале энергий электронов от 0,3 – 10 кэВ применяют полуэмпирическую формулу

$$R_{\text{ПР}} = E^n, \quad (2.1)$$

где $n = 1,3 - 1,5$.

На рисунке 2.2 показан «приведенный» пробег R , рассчитанный по полуэмпирической формуле

$$R = D \cdot E^n, \quad (2.2)$$

где

Е, кэВ	D	n
1 – 20	$1.3 \cdot 10^{-3}$	1.4
5 – 80	$2.2 \cdot 10^{-3}$	2
50 – 150	$6.7 \cdot 10^{-3}$	5/3

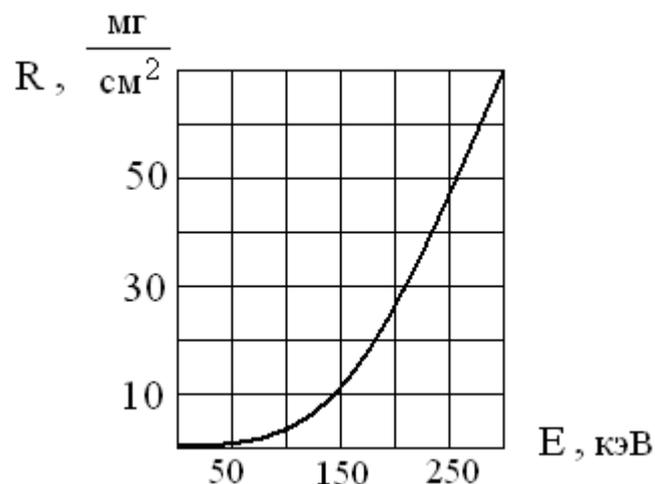


Рисунок 2.2 – «приведенный» пробег R

Поперечный пробег электронов определяется через траекторный пробег для пучка электронов с учетом индивидуальных столкновений. Наиболее точным методом расчета индивидуальных траекторий электронов в веществе является статистический метод Монте-Карло, основанный на моделировании на ЭВМ реального случайного процесса с применением генератора случайных чисел. Эта процедура включает разбивку траекторий на равные интервалы (шаги), определение угла рассеяния и потерь энергии на единице длины в соответствии со случайным законом соударений, набор «статистики» (300 раз).

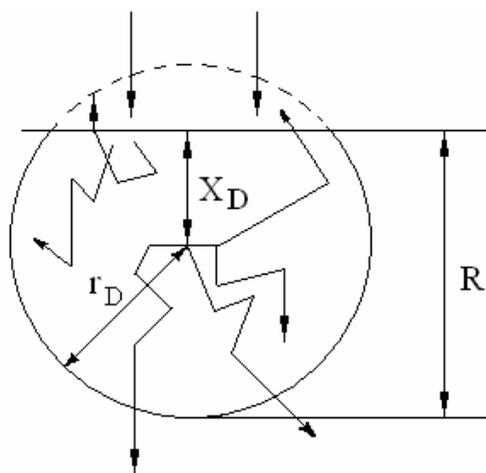


Рисунок 2.3 – «Диффузная» сфера

Более простая феноменологическая модель проникновения электронов предполагает, что электроны проходят некоторый путь X_D , меньший проекционного пробега без рассеяния, затем изотропно (диффузно) рассеиваются в сфере радиусом $r_D = R - X_D$, с центром сферы на глубине $X_D \approx \frac{12}{z+8} \cdot R$, при этом $r_D \approx \frac{z-4}{z+8} \cdot R$, где z – атомный номер вещества, R – проекционный пробег электронов.

На рис. 2.3 показана «диффузная» сфера, часть которой выходит за пределы твердого тела, это значит, что часть рассеянных электронов будет выходить за пределы твердого тела и образовывать поток истинно вторичных электронов. Радиус «диффузной» сферы r_D можно считать поперечным пробегом $R_{\text{поп}}$.

При больших плотностях электронов в пучке (коллективное взаимодействие) много энергии выделяется в твердом теле в виде тепла. В некоторых экспериментах наблюдается выход электронов через металлические пластины, толщина которых в несколько раз превышает длину проекционного пробега. Это явление можно объяснить расплавлением металла в зоне воздействия луча с образованием канала с малой плотностью, через который проходят электроны, претерпевая меньшее количество столкновений и соответственно с меньшими потерями энергии.

В практике электроннолучевой сварки используется способ проплавления и сварки пластин, расположенных в нескольких плоскостях, когда по мере перемещения луча все пластины свариваются, а образовавшиеся отверстия затягиваются расплавленным металлом. Например, тепловыделяющие элементы для атомных реакторов, размещенные в алюминиевых трубах, свариваются электронным лучом сквозь алюминиевую оболочку, отверстие в которой образовано электронным лучом «затягивается» расплавом.

3. Отражение электронов и вторичная эмиссия. Эмиссия электронов из твердого тела

При облучении поверхности твердого тела потоком электронов имеет место отражение части электронов от поверхности и возбуждение эмиссии электронов из поверхностного слоя. Этот процесс называется *вторичной электронной эмиссией*. В составе потока вторичных электронов различают истинно-вторичные электроны, упругоотраженные и неупругоотраженные электроны. Упруго отраженные электроны выходят в результате рассеяния на атомах из глубины, не превышающей единиц постоянных решетки, т.е. из поверхностного слоя (см. рис.3). Истинно-вторичные электроны связаны с шириной запрещенной зоны и работой выхода облучаемого вещества. Они имеют различную природу в зависимости от типа вещества.

В металлах истинно-вторичные электроны выходят в основном в результате передачи энергии, превышающей работу выхода, которая отсчитывается от уровня Ферми.

В полупроводниках и диэлектриках электроны эмитируются из валентной зоны и связаны с уходом валентных электронов из атомов. Средняя энергия, необходимая для преодоления потенциального барьера поверхность – вакуум, будет равна сумме энергии запрещенной зоны и энергии, соответствующей ширине зоны проводимости. В случае наличия дефектов (ловушки электронов, Ф-центры, загрязнения) вторичные электроны появляются за счет рассеяния электронов на этих дефектах.

В группу неупругоотраженных электронов входят электроны первичного потока, вышедшие из глубины вещества в результате рассеяния на большие углы, а так же электроны, генерируемые за счет Оже-переходов и возбуждения электронной плазмы.

Вторичная эмиссия характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии σ , учитывающим все три составляющие:

$$\sigma = \delta + \eta + r, \quad (3.1)$$

где δ – коэффициент истинно вторичной эмиссии;
 η – коэффициент неупругоотраженной эмиссии;
 r – коэффициент упругоотраженной эмиссии.

Эти составляющие зависят от энергии первичных электронов, от материала и состояния его поверхности (загрязнения, примеси, ловушки). На вторичные электроны оказывает влияние магнитное поле, внешнее электрическое поле, поверхностный заряд и другие факторы. Величина коэффициента вторичной эмиссии колеблется в пределах 0,5 – 1,8 для чистых элементов и может достигать до 10 и более для некоторых соединений (окислы, стекло и т.д.).

С точки зрения практических применений вторичных электронов представляет интерес то, под каким углом выходят вторичные электроны – угловое распределение вторичных электронов и энергетический спектр этих электронов для различных материалов.

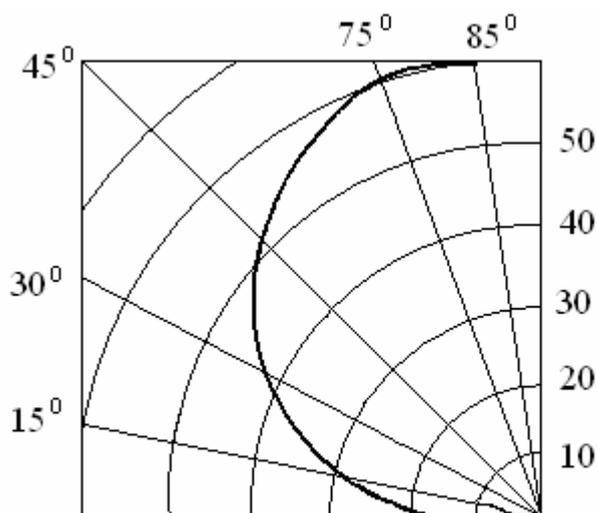


Рисунок 3.1 – Угловое распределение вторичных электронов

Представление об угловом распределении вторичных электронов – это зависимость относительного количества вторичных электронов от угла вылета к нормали поверхности материала, показанная на рис. 3.1. Угловое распределение подчиняется «закону косинуса», т.е. количество электронов,

вылетающих под углом к нормали облучаемой поверхности пропорционально косинусу этого угла.

Коэффициент неупругоотраженных электронов зависит также от угла падения первичных электронов. Он возрастает с увеличением угла падения, поскольку электроны углубляются на меньшую глубину, что приводит к увеличению выхода как упругоотраженных, так и неупругоотраженных электронов, при этом возрастает и скорость вторичных электронов.

Энергетическое распределение вторичных электронов показано на рисунке 3.2. Кривая распределения количества электронов от их энергии имеет два максимума. Один максимум в интервале энергий от 10 до 50 эВ соответствует истинно-вторичным электронам, второй (более узкий) максимум создают в основном отраженные электроны, энергия которых близка к энергии первичных (бомбардирующих) электронов. Данная кривая позволяет оценить долю энергии первичного потока, уносимую вторичными и отраженными электронами. Приближенную оценку этой доли энергии можно оценить по методике, изложенной в предыдущем параграфе и рис. 3.2. Часть сферы рассеяния электронов в твердом теле, выходящая за его пределы соответствует уносимой вторичными электронами энергии.

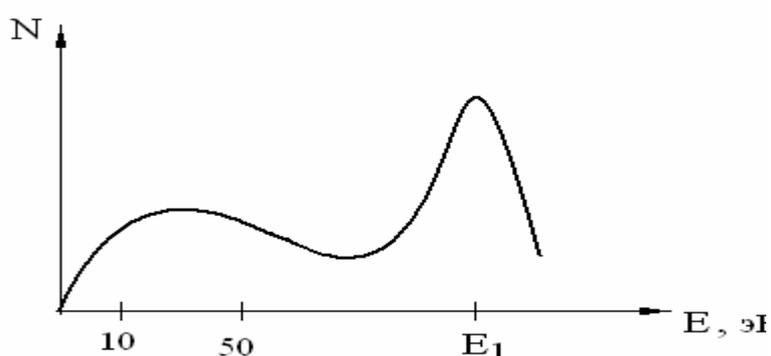


Рисунок 3.2 – Зависимость количества вторичных электронов от энергии первичных электронов

Вторичная эмиссия полупроводников и диэлектриков несколько выше, чем у металлов. Для этих веществ характерна зависимость вторичной

эмиссии от поверхностного заряда, накапливающегося при осаждении первичных электронов, и наличия загрязнения. При использовании вторичных электронов в измерительных целях и при их излучении возникает задача отвода зарядов с поверхности. Эту задачу можно решить путем нагрева диэлектриков до температуры, при которой возникает достаточная проводимость, путем применения математических сеток или путем компенсации отрицательного заряда положительно заряженными токами, а также путем нанесения тонких металлических пленок и подачи на них высокочастотного напряжения.

Наличие примесей в материалах влияет на коэффициент вторичной эмиссии, который возрастает за счет увеличения упругорассеянных электронов с увеличением примеси.

Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от температуры материала в интервалах температур ниже точки Кюри и ниже температуры плавления незначительна.

В практической растровой электронной микроскопии используются как истинно-вторичные электроны, так и упруго и неупругоотраженные электроны. Если используются истинно-вторичные, то датчик (коллектор) располагается сбоку первичного потока, а при использовании отраженных электронов – вблизи оси зондирующего луча и на коллектор подают небольшой отрицательный потенциал, полем которого отталкиваются истинно-вторичные электроны. При измерениях параметров пучков электронов вторичная эмиссия может исказить картину распределения плотности тока в измеряемом пучке. Для устранения влияния вторичной эмиссии коллектор тока изготавливают в виде цилиндра Фарадея, на боковые стенки которого улавливают вторичные электроны и устраняют таким образом ошибки в измерении тока пучка первичных электронов.

4. Свечение твердого тела, возбуждаемое воздействием потока электронов

Явление свечения твердого тела под действием электронной бомбардировки было обнаружено в XIX веке при излучении разрядных трубок (светилось стекло за анодом трубки) и получило название *люминесценции* или катодлюминесценции.

Это явление присуще многим веществам: металлам, диэлектрикам, полупроводникам, искусственно синтезируемым неорганическим и органическим соединениям.

Теория катодлюминесценции разработана в 30 – 40-х годах XX столетия. Большой вклад в развитие теории внесли С.И. Вавилов и его ученики.

Явление свечения люминофора объясняется переходом электронов с более высокого энергетического уровня на один из разрешенных низших уровней (рис.4.1).

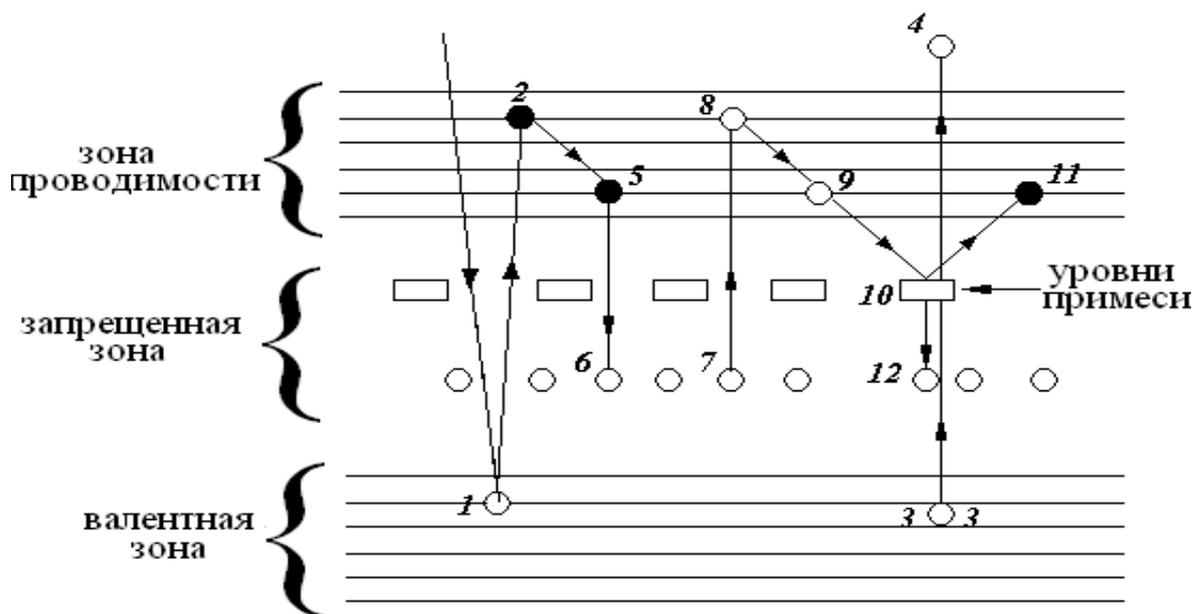


Рисунок 4.1 – Энергетическая диаграмма люминофора

Внутри достаточно широкой запрещенной зоны имеются локальные разрешенные уровни за счет примесей и дефектов кристаллической решетки. Часть электронов из валентной зоны (1,3) под действием электронной бомбардировки могут быть переброшены в зону проводимости (переходы 1-2, 3-4, 7-8). В результате таких переходов электроны окажутся в зоне проводимости (1-2, 7-8) или за пределами потенциального барьера (в

вакууме) (3-4). Оставшиеся в зоне проводимости электроны увеличивают проводимость (возбужденная или наведенная проводимость). Электроны, переброшенные в зону проводимости, быстро переходят на свободные низшие уровни (2-5, 8-9).

У этих электронов два пути – либо рекомбинировать с дырками с выделением энергии в виде кванта света $h \cdot \nu_0 = W_0$, либо, что более вероятно, он переходит на один из локальных уровней (5-6, 11-12) с выделением $h \cdot \nu_1 = W_1 < W_0$.

Спектр излучения занимает узкую полосу. Рассмотренный механизм предполагает, что спектр излучения зависит только от свойств твердого тела, но не от параметров луча. Однако опыт показывает, что изменение параметров пучка в некоторых случаях влияет на цвет свечения, особенно если спектр содержит несколько полос. Коротковолновое излучение возбуждается быстрыми электронами, длинноволновое – медленными (вторичными) или третичными. Поэтому при увеличении ускоряющего напряжения наблюдается некоторое изменение цвета излучения.

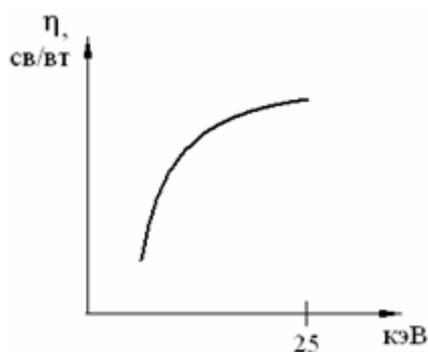


Рисунок 4.2 – Спектр излучения

Переходы типа 1-2-5-6 протекают быстро ($10^{-8} - 10^{-9}$ с), поэтому разгорание и затухание свечения должны были быть мгновенными. Однако затухание протекает медленно (после свечения), объясняется это задержкой электронов в ловушках, локальных дефектах кристаллической решетки, захватывающих электроны из зоны проводимости и удерживающих их

длительное время (7-8-9-10-11-12), где переход в зону проводимости (10-11) обусловлен тепловыми колебаниями решетки.

Световая отдача, определяемая как отношение силы света к мощности луча.

$$\eta = \frac{J_{CB}}{P_l}, \quad \left[\frac{св}{вт} \right], \quad (4.1)$$

где η - зависит от ускоряющего напряжения.

Яркость свечения:

$$B = A \cdot J \cdot (U_a - U_0)^n, \quad (4.2)$$

где A - коэффициент, характеризующий люминофор;

U_0 - начальное напряжение, при котором начинается свечение;

n - показатель степени 1 – 2,5.

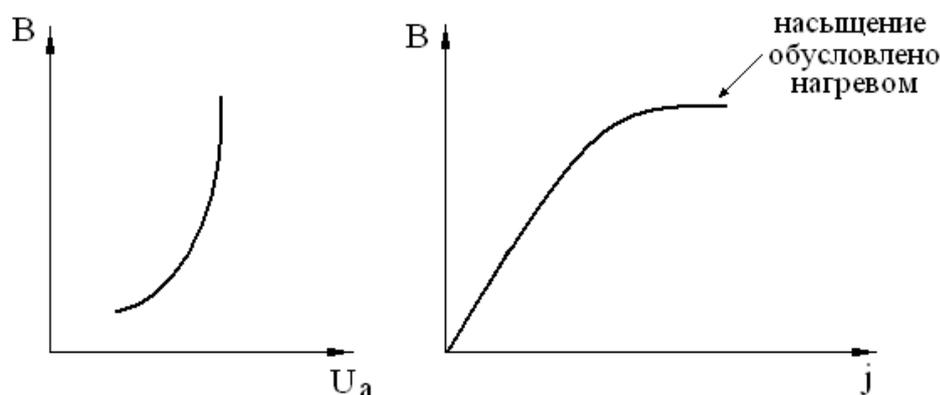


Рисунок 4.3 – Зависимость яркости свечения от ускоряющего напряжения и плотности электронного тока

В ряде случаев люминесценция носит вторичный характер, когда в результате электронной бомбардировки возникает рентгеновское излучение, под действием которого возникает свечение, люминесценция.

5. Рентгеновское излучение при электронной бомбардировке.

При бомбардировке поверхности твердого тела электронами достаточно большой энергии возникает рентгеновское излучение двух видов: тормозное и характеристическое.

Тормозное излучение – излучение с непрерывным спектром, возникающее при торможении электронов в поле атомных ядер (решетки).

Из электродинамики известно, что заряды (электроны), движущиеся с изменением скорости, излучают электромагнитные волны в окружающее пространство. Следовательно, электроны, движущиеся с торможением, должны излучать электромагнитные волны. Данное излучение называют тормозным рентгеновским излучением.

Спектр рентгеновского излучения простирается от λ_{\min} до λ_{∞} , т.е. спектр непрерывный.

Существование коротковолновой границы объясняется тем, что кинетическая энергия электрона $W = e \cdot U$ должна перейти в энергию одного фотона

$$e \cdot U = h \cdot \nu_{\max}, \quad (5.1)$$

или

$$h \cdot \frac{c}{\lambda_{\min}} = e \cdot U, \quad (5.2)$$

т.е.

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}. \quad (5.3)$$

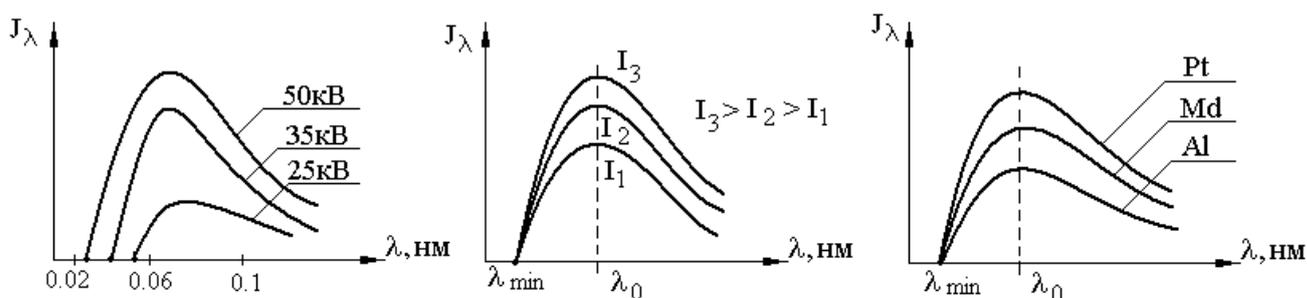


Рисунок 5.1 – Распределение интенсивности излучения от длины волны

Распределение интенсивности излучения от длины волны неравномерное и максимум смещается в сторону коротких волн. Увеличивается жесткость излучения. При изменении тока пучка при одинаковом ускоряющем напряжении практически линейно возрастает; максимум остается на одном уровне, соответствующем λ_0 .

Интенсивность излучения возрастает с увеличением атомного номера Z . Экспериментально установлено, что интенсивность тормозного излучения пропорциональна атомному номеру материала мишени, току луча и квадрату ускоряющего напряжения: $J \approx I \cdot Z \cdot U_0^2$. Для точечного источника интенсивность излучения падает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

КПД η -рентгеновского излучения.

$$\eta = \frac{P}{P_э}, \quad (5.4)$$

где P – мощность полного потока рентгеновского излучения;

$P_э$ - мощность электронного луча.

$$P_{из} = \oint_S J \cdot dS = k_0 \cdot I \cdot Z \cdot U_0^2, \quad (5.5)$$

где k_0 - коэффициент, который по экспериментальным данным для 200 кВ от $(0.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-9}$

Так как подводимая мощность $P_э = I \cdot U$, то $\eta = k_0 \cdot Z \cdot U$.

Таблица 5.1 – КПД η -рентгеновского излучения

U, кВ	η , %	
	Расчет	Эксперимент
43	0,33	0,46
100	0,74	1,11
150	1,01	1,64
200	1,48	2,2
1000	7,5	9,0
10 000	-	60

Численные значения для ускоряющего напряжения приведены в таблице 5.1 для вольфрама. Видно, что КПД для средних ускоряющих напряжений не превышает долей и единиц процентов.

Угловое распределение рентгеновского излучения подчинено закону косинуса. Зависимость интенсивности от угла падающего луча имеет максимум при угле 45° .

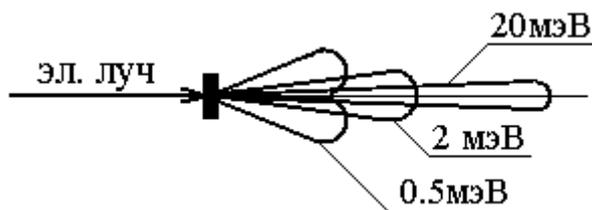


Рисунок 5.2 – угловое распределение рентгеновского излучения

Пространственное распределение (направленность) увеличивается с ростом энергии электронов.

Характеристическое излучение

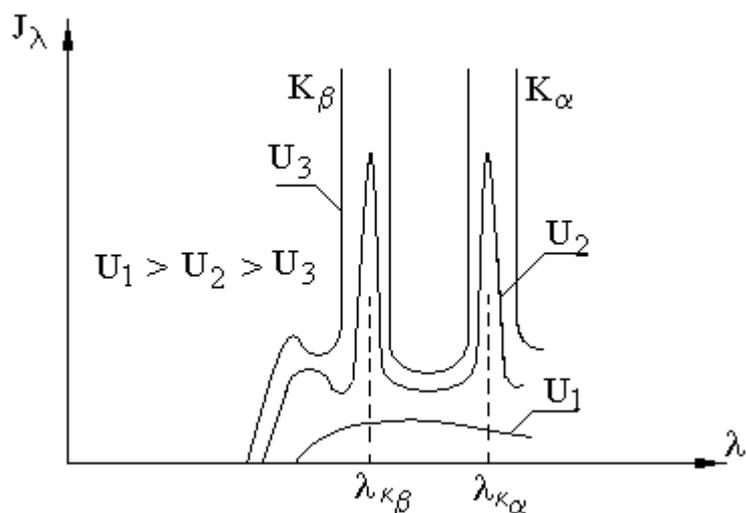


Рисунок 5.3 – Спектр рентгеновского излучения

При изменении ускоряющего напряжения происходит изменение спектра рентгеновского излучения. Излучение с непрерывным спектром наблюдается при малых U_a (кривая U_1). При больших напряжениях (U_2, U_3) на фоне непрерывного спектра появляются острые максимумы с длинами λ_{α} и λ_{β} . λ_{α} и λ_{β} не зависят от ускоряющего напряжения, которое влияет только на интенсивность токов. λ_{α} и λ_{β} определяются только атомным номером Z , т.е. характеризует именно данный материал. Данное излучение называют характеристическим.

Сущность характеристического рентгеновского излучения заключается в передаче энергии электрона с высокой скоростью, электронам оболочки атомов, находящихся на внутренних оболочках. Эти электроны покидают свои уровни и на их место переходят электроны с более высоких уровней, излучая при этом квант рентгеновского излучения.

Характеристическое излучение имеет линейчатый спектр. Линии K_α и K_β - часть спектра (более длинноволновые на рисунке не показаны). Линии спектра группируются в ряд серий у тяжелых элементов. Установлено пять серий К, L, M, N, O. Жесткость излучения серий существенно различаются. К – линии – самые коротковолновые; линии L, M, N, O – соответствуют возрастающим длинам волн.

Излучение каждой серии возникает при определенном напряжении – потенциале возбуждения U_K , U_L и т.д.

Например, U_K для хрома ≈ 6 кВ, для меди ≈ 9 кВ, для молибдена ≈ 20 кВ. при $U > U_K$ появляются возможные для данного материала линии.

Закономерности в характеристических рентгеновских спектрах обусловлены строением электронных оболочек атома (только атомов, но не молекул, не кристаллических решеток).

Из квантовой механики известно: состояние любого электрона в атоме характеризуется квантовыми числами: n, l, j, m_j .

n – главное квантовое число, определяет основное значение энергии электрона в атоме. Может принимать только целочисленные значения 1, 2, 3, 4, 5 ...;

l – орбитальное квантовое число – мера момента количества движения по орбите, может иметь значения от 0 до $(n-1)$;

j – внутреннее квантовое число, характеризует полный момент количества движения электрона, складывается из l и собственного количества движения (спина). $j = (l \pm \frac{1}{2}) > 0$;

m_j – магнитное квантовое число, определяет величину проекции полного момента электрона на заданное направление. m_j изменяется в пределах от $-j$ до $+j$. $-j, -(j-1), -(j-2), +(j-1), +j$.

Принцип Паули – в атоме в стационарном состоянии, определяющемся квантовыми числами, может находиться один электрон.

Совокупность электронов с одинаковым квантовым числом n образуют электронную оболочку. Число электронов в оболочке определяется соотношением $g = 2 \cdot n^2$. Оболочки, соответствующие главным квантовым числам имеют следующие значения:

$$K (n=1); R (n=2); M (n=3); \dots, \quad (5.6)$$

где K – оболочка, ближайшая к ядру атома.

Энергия электронов в атоме (W) определяется тремя квантовыми числами:

$$W = f(n, l, j).$$

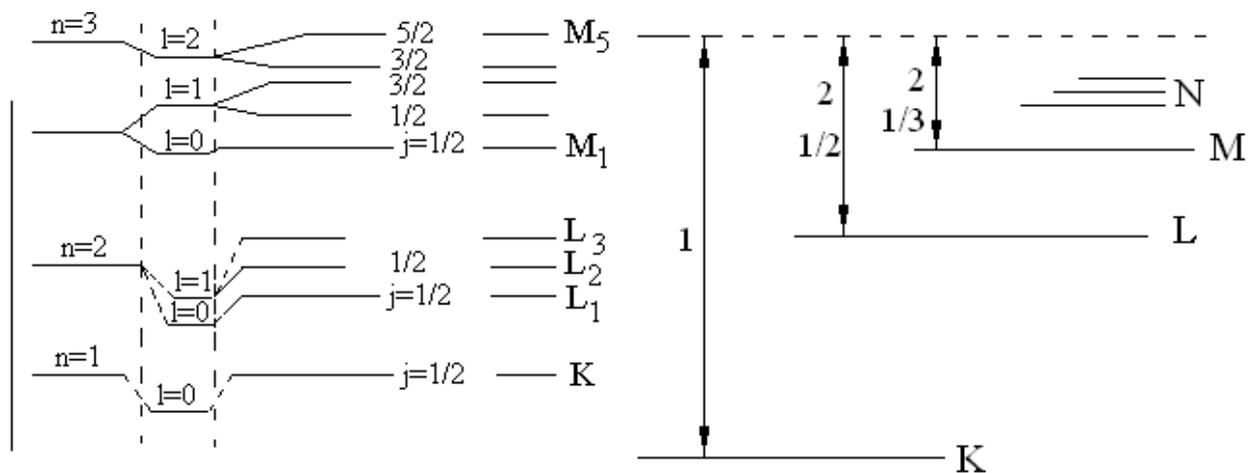


Рисунок 5.4 – Схема образования уровней различных атомов

Для K -оболочки число электронов $g = 2 \cdot 1^2 = 2$. Энергия электронов одинаковая, но отличается только магнитным $m_j = 1/2$ и $-1/2$;

Для L -оболочки $g_L = 8$, и три уровня L , L_{II} , L_{III} ;

Электроны M -оболочки занимают пять уровней.

Из расчетов видно, что энергия электронов сильно зависит от главного квантового числа n и мало от других чисел l и j . Поэтому для простоты, оболочки часто характеризуют одиночными уравнениями.

Если с какого-либо уровня удаляется электрон, на его место переходит электрон с одного из более высоких уровней, избыток энергии при этом выделяется в виде кванта излучения: $h \cdot \nu = \Delta W$.

Процесс возбуждения характеристического излучения показан на рисунке 5.5.

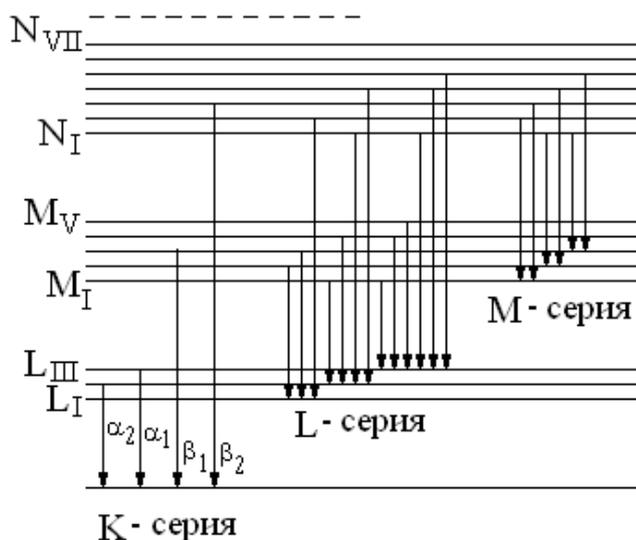


Рисунок 5.5 – Процесс возбуждения характеристического излучения

При высоких энергиях могут быть выбиты электроны из любой оболочки, включая K-слой. В результате в атомах будет происходить целый каскад переходов: K-серии, h-серии, m-серии и т.д.

Вероятность различных переходов неодинакова. Для некоторых переходов равна 0.

Чем больше вероятность, тем выше интенсивность излучения (яркость) данной линии.

При увеличении атомного номера спектры смещаются в область коротких длин волн – закон Мозли. Математически:

$$\nu = C \cdot R \cdot (Z - S)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (5.7)$$

где C – скорость света;

$R = 109737 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$ – постоянная Ридберга;

S – экранирующая постоянная, учитывающая отталкивания электронами оболочки;

n_1, n_2 – главные квантовые числа для уровней, между которыми происходит переход.

Интенсивность линий:

$$J_{\lambda} = R \cdot I \cdot (U - U_B)^m, \quad (5.8)$$

где k и m – постоянные;

U_B – потенциал возбуждения линии.

Значения для К-серии представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Значения для К-серии

	Z	U _B , кВ	α_1	α_2	β_1	β_2
W	74	69	0.0209	0.0213	0.0184	0.0179
Fe	26	7.1	0.01932	0.01936	0.1753	0.1740

6. Физико-химические превращения при облучении электронами

В нетермических электронно-лучевых процессах используют рационально химические превращения в твердом теле, приводящие к изменению структуры или состава, изменению механических и электрофизических свойств исходных материалов.

При воздействии электронного луча возможны:

- Химические преобразования исходного материала;
- Образование радиационных дефектов;
- Появление сил растяжения и сжатия, обусловленные образованием электрически заряженных областей и др.

Наиболее широко в промышленности используются электроннолучевые процессы, связанные иницированием химических реакций:

- ✓ Электронная литография;
- ✓ Обработка электронно-чувствительных пленок для записи информации;

- ✓ Обработка коллоидальных веществ при изготовлении шаблонов;
- ✓ Разложение металлоорганических соединений;
- ✓ Синтез новых соединений в производстве многослойных пленок;
- ✓ Разложение хлоридов серебра при изготовлении резистивных слоев;
- ✓ Полимеризация высокомолекулярных соединений;
- ✓ Вулканизация натурального и искусственного каучука;
- ✓ Отверждение лаков;
- ✓ Разложение целлюлозы при изготовлении вискозного шелка;
- ✓ Стерилизация хирургических инструментов и продуктов.

В атомарных кристаллах в результате передачи ускоренными электронами энергии происходит возбуждение и ионизация атомов, возникают радиационные дефекты, нагрев решетки и возбуждение электромагнитного излучения (люминесценция, тормозное и характеристическое рентгеновское излучение).

При взаимодействии электронов с веществами, состоящими из многоатомных молекул, происходят более сложные процессы, приводящие к радиационно-химическим превращениям.

1. Возбуждение молекулы с последующей ее диссоциацией на активные частицы:



где А и В – атомы,

* - возбужденные состояния.

2. Перегруппировка атомов в структуре молекулы:

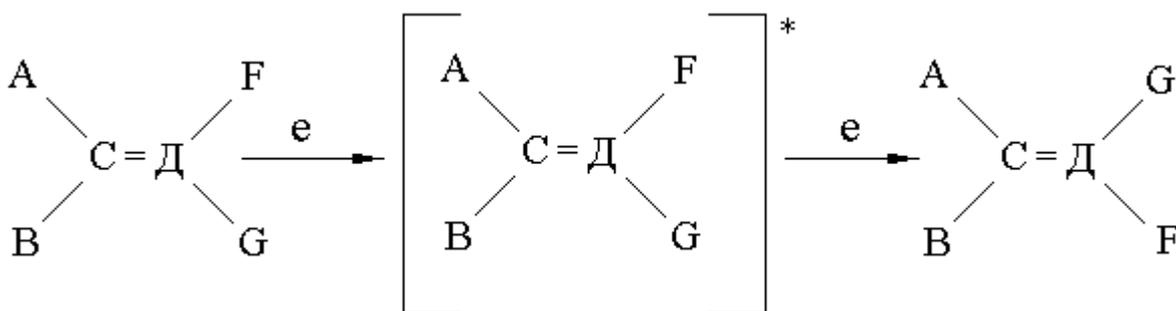


Рисунок 6.1 – Перегруппировка атомов в структуре молекулы

3. Перемещение (аутомеризация) отдельных атомов из одной части молекулы конфигурации молекулы в другую:

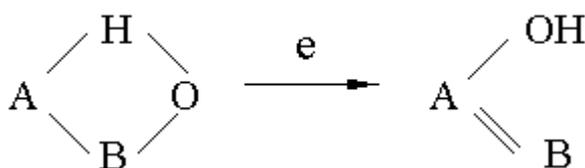
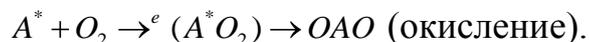
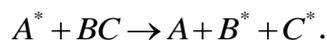


Рисунок 6.2 – Перемещение отдельных атомов

4. Присоединение к возбужденной молекуле другой молекулы:

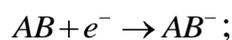


5. Передача электронной энергии возбуждения от одной молекулы к другой или от одной части молекулы к другой:



В процессе радиационно-химических превращений после осуществления первичных химических превращений возникают вторичные, или «темновые», реакции различных химических соединений:

1. Захват «тепловых» электронов с образованием иона:



2. Диссоциативный захват электрона:



3. Рекомбинация иона с электроном или иона с молекулой:



При радиационно-химических превращениях (фотолитография) вводят понятие *радиационно-химического выхода* C_{ϕ} . $C_{\phi}=1$, когда один квант способен активизировать только одну молекулу. Однако вторичные реакции существенно изменяют значение квантового выхода. Например, для процессов фотохимической полимеризации $C_{\phi} \gg 1$.

При воздействии потоков электронов или ионов радиационно-химический выход определяется как среднее число радиационно-химических превращений, приходящихся при поглощении молекулами энергии, равной 100эВ. Например, воздействие электронного луча используется при получении поликристаллических пленок кремния, германия, арсенида галлия, фосфида галлия, антимонида и фосфида индия с использованием гидридов SiH_4 , GeH_4 , GaH_3 , In_2H_6 и галогенидов SiCl_4 , SiHCl_3 , GeCl_4 , GeHCl_3 , SiBr_4 , SiI_4 , GeBr_4 . Происходит ионизация и диссоциация молекул этих газов на радикалы и атомы. При этом существует оптимальное значение энергии, обеспечивающей нужную скорость осаждения, связанное с пробегом электронов в газе. Известно, что максимальное количество энергии пучка выделяется на глубине $(0,2 - 0,4)R$ (пробега), и если расстояние от ЭОС будет равно этой величине, то практически все компоненты разложения (Si , Ge и др.) достигнут подложки, не испытывая вторичных реакций соединения (восстановления).

Электронные пучки используются для разложения металлоорганических соединений при получении чистых металлов либо соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

Электронные лучи используются для преобразования полимерных материалов. Полимеры по своей структуре подразделяются на линейные и пространственные (сетчатые). Линейные образуются последовательным присоединением мономеров в одном направлении. Такой структурой обладают термопластичные полимеры, они растворимы и могут существовать в жидком виде.

К пространственным полимерам относятся реактопласты. Их молекулы соединены между собой поперечными химическими связями – «сшивками». Не растворяется в растворителях.

При воздействии электронов на полимеры возможны два основных процесса:

- Полимеризация – реакция поперечного сшивания молекул мономера;
- Деструкция – превращение полимерных цепей на более короткие.

Оба эти процесса могут идти параллельно с преобладанием одного из них.

В электронолитографии полимерные материалы используются для изготовления электронорезистов – позитивных и негативных. У позитивных резистов при проявлении за счет растворения удаляются экспонированные электронным лучом участки, а у негативных – необлученные области резиста. В позитивных резистах происходит преимущественно деструкция полимера, а в негативных преобладает поперечное сшивание молекул – полимеризация.

Позитивные фоторезисты: полиметлметакрилат, полиметакрил-мидполивинилхлорид, полиизобутилен и др. Для негативных применяют полистирол, полиглицидилакрилат, полиэтилен, полиэферы и полиамиды. Электронные резисты характеризуются величиной, которая называется *дозой облучения*:

$$K = I \cdot t, \quad (6.1)$$

где I – плотность тока пучка, А/см²;

t – время облучения.

7. Тепловые процессы при облучении пучком электронов

Помимо рассмотренных в предыдущих параграфах процессов в твердом теле, протекающих при воздействии на него потока электронов имеют место тепловые процессы, обусловленные превращением кинетической энергии электрона в тепловую. Нагрев вещества при

электронной бомбардировке происходит за счет торможения электронов при их взаимодействии с кристаллической решеткой, с электронным газом, а также с электронной оболочкой атомов. Причем передача энергии электронов веществу происходит не через поверхность, а в определенном слое, толщина которого соответствует глубине проникновения электрона, величине его пробега в твердом теле. Наиболее интенсивное тепловыделение происходит на некоторой глубине под поверхностью. Это обстоятельство является положительным фактором, позволяющим регулировать положение слоя с максимальной температурой и перенести его из глубины на поверхность.

Тепловые процессы в твердом теле при электронной бомбардировке широко используются в технологических целях, начиная с отжига и обезгаживания деталей в электронных приборах, электронно-лучевой закалки деталей в машиностроении, сварке электронным лучом в вакууме тугоплавких металлов, электронно-лучевой плавки и заканчивая размерной обработкой интегральных схем в микроэлектронике. В этих процессах до 80 – 90 % мощности луча переходит в тепловую. В технике используются как стационарный непрерывный нагрев, так и кратковременный – импульсный.

Расчет температурного поля можно произвести, пользуясь общепринятым уравнением теплопроводности для случая точечного источника тепла внутри твердого тела. Однако такой расчет носит приближенный характер. На самом деле источником тепла является не точка, а некоторый объем, в котором теряется энергия пучка электронов. Этот объем отличается от сферы рассеяния электронов, рассмотренной в параграфе 2, поскольку там не учтено выделение энергии вдоль пути пробега. С учетом того, что большая доля энергии электронов выделяется на последней четверти пробега можно считать, что источник тепла под поверхностью имеет форму груши. Тепло от этого источника по законам теплопроводности распространяется во все стороны и достигает поверхности. Когда температура поверхности превысит точку плавления,

возникает зона расплава. При высоких температурах расплава с его поверхности начинается термоэмиссия электронов и испарение вещества. Под давлением потока электронов поверхность расплава прогибается, и расплав может растекаться. Расплавление материала электронным лучом широко используется для сварки металлов и других материалов, получивший название электроннолучевой сварки, а также для плавки тугоплавких металлов, таких как вольфрам, тантал, молибден, ниобий и др.

Тепловые процессы, вызванные электронным лучом не просто вызвали к жизни новый вид сварки – электроннолучевую –, но и позволили расширить области применения сварки, вплоть до сварки металлов с керамикой, до сварки и резки металлов больших толщин (до 60 см) за один проход. Одно из основных достоинств сварки электронным лучом является образование кинжального шва с отношением глубины к ширине 20:1. Образование такого шва, фактически зоны проплавления движущимся лучом объясняется тем, что при движении луч оставляет за собой расплавленный конус большой глубины и бомбардирует переднюю стенку, расплавляя ее. При этом глубина расплава на много превышает глубину пробега электрона. Это можно объяснить тем, что расплав частично выдавливается под давлением электронов, частично выдавливается реактивным действием испаряющегося металла, освобождая своеобразный канал для прохождения луча вглубь канала. Эта особенность электронного нагрева используется для сварки деталей, находящихся внутри металлической оболочки. Например, сварка тепловыделяющихся элементов для ядерных реакторов, находящихся внутри алюминиевых труб. Луч образует расплавленный канал в алюминии, сваривает деталь, а после окончания сварки, расплавленное отверстие вновь затягивается.

Тепловые процессы при кратковременном импульсном воздействии пучками электронов с большой плотностью мощности протекают в локализованном объеме, поскольку за короткое время (длительность импульса до десятков микросекунд) тепло не успевает распространиться на

сколь угодно значительные расстояния. Распределение температурного поля в твердом теле зависит от длительности импульса. Максимум температуры находится под поверхностью и при больших длительностях импульса может достигать последней. При коротких импульсах и высокой скорости выделения энергии в зоне торможения материал может мгновенно испаряться, минуя стадию расплавления, что подобно взрыву приводит к разрушению поверхности. К разрушению твердого тела могут привести и термические напряжения, возникающие вследствие больших градиентов температур в зоне между центром выделения энергии луча и окружающей его областью. Термические напряжения распространяются в виде сферических волн и их величина падает пропорционально квадрату радиуса. Когда значение этих напряжений достигает предела прочности материала, происходит его разрушение, которое в зависимости от свойств вещества может носить характер хрупкого разрушения.

Анализ показывает, что напряжения на поверхности действуют на «разрыв» и на «изгиб». В экспериментах по воздействию импульсных электронных пучков на тугоплавкие металлы с малой теплопроводностью (вольфрам, молибден, твердый сплав) также на алмаз, стекло и керамику наблюдалось выбрасывание из зоны действия луча мелких осколков вещества размерами от долей микрона до десятков микрон без видимых следов расплавления. Размеры зоны разрушения на много превышали диаметр луча и величину пробега электронов в исследуемых материалах. Например, диаметр лунки, образовавшейся в стекле в результате действия одиночного импульса луча диаметром 50 мкм с энергией 100 кэВ длительностью 50 мкс, составлял 1,5 мм, что было близко к расчетным значениям радиуса, на котором величина термических напряжений превышала предел прочности стекла. При этих же условиях углубление в алмазе образовалось диаметром 0,5 мм, глубиной 0,3 мм, т.е. на порядок больше чем диаметр луча и пробег электронов. Эти экспериментальные

данные хорошо согласуются с расчетными значениями термических напряжений на соответствующих радиусах.

7.1 Изменение свойств материалов под действием электронной бомбардировки

В основе изменения поверхностных свойств материалов лежат физико-химические процессы, возбуждаемые облучением электронами. Основную роль играют процессы образования радиационных дефектов в кристаллических решетках, и диссоциация сложных молекул, а так же тепловые процессы в поверхностных слоях. С точки зрения свойств конструкционных материалов в машиностроении представляет интерес влияние облучения электронами на твердость металлов, на износостойкость и коррозионную стойкость изделий.

Различают термическое и нетермическое действие электронного луча. Термическое действие электронов, рассмотренное в предыдущем параграфе, сводится к кратковременному интенсивному нагреву подповерхностного и поверхностного слоя металлов. При этом могут происходить структурные изменения кристаллической решетки, определяющие целый ряд служебных характеристик металлов, и даже расплавление поверхности с последующей кристаллизацией. В случае регулируемого нагрева до температур ниже температуры плавления с последующим быстрым охлаждением может осуществляться электроннолучевая закалка металлов. В этом случае закалке подвергается только тонкий поверхностный слой, а основной металл детали сохраняет исходные свойства, оставаясь прочным, мягким и сохраняя форму, что недостижимо при обычной закалке.

Термическое действие электронного луча, вызывающее изменение кристаллической структуры, используют для отжига листового материала после прокатки или после закалки.

При кратковременном интенсивном нагреве может наблюдаться поверхностное расплавление металла с последующей быстрой кристаллизацией металла либо восстановлением кристаллической структуры

металла, либо со своеобразным замораживанием в поверхностном слое большого количества дефектов – линейных дислокаций и их сплетений. При больших скоростях движения границы кристаллизации некоторые дефекты – вакантные места, куда не произошло внедрение атомов из расплава, могут быть сохранены под следующим слоем. В процессе кристаллизации могут захватываться (замораживаться) поверхностные тугоплавкие примеси. Как замораживание дефектов, так и захватывание примесей ведут к изменению поверхностных свойств металлов.

Кратковременная интенсивная бомбардировка материала может привести к локальному легированию материала из пленочного покрытия вглубь материала, к изменению свойств материала.

Нетермическое действие электронного луча не связано с нагревом материала, а с другими процессами, частности с радиационными дефектами, стимулированием химических реакций, с диссоциацией сложных молекул и т.д. Важную роль в изменении поверхностных свойств материалов играют процессы образования радиационных дефектов в кристаллических решетках вещества. Электроны как легкие элементарные частицы при столкновении с атомом решетки могут вызвать не только смещение атома из узла решетки. Даже незначительные смещения атомов при воздействии потока электронов с большой плотностью в пучке вызывает повышение твердости некоторых металлов. В семидесятые годы было опубликовано сообщение о повышении твердости и износостойкости режущего инструмента в десятки раз в результате импульсной электронной бомбардировки.

При большой концентрации радиационных дефектов в поверхностном слое может быть полностью разрушена кристаллическая структура этого слоя и произойдет его аморфизация. Металлическое изделие окажется покрытым аморфным слоем, обладающим большой твердостью и высокой коррозионной стойкостью.

К нетермическому действию электронного луча с точки зрения изменения свойств материалов относится синтез некоторых химических

соединений, наличие которых в материале, например нитридов титана или карбидов вольфрама, придают металлам повышенную твердость и износостойкость. Облучение потоком электронов некоторых лакокрасочных покрытий и сырой резины или каучука способствует ускорению процессов полимеризации и вулканизации, причем главное значение в этих процессах имеет не тепловое действие электронного луча, а свойство электронов способствовать «сшивке» молекул как продольной, так и поперечной, т.е. обеспечивать ускорение процессов полимеризации и вулканизации. На одном из заводов радиоэлектронной промышленности для полимеризации лаковых покрытий корпусов телевизоров вместо высокотемпературных печей начали применять электронные ускорители, что позволило облегчить условия труда и снизить опасность возникновения пожаров. В кабельной промышленности вместо громоздких и протяженных линий вулканизации резины в атмосфере перегретого пара на одном из предприятий установили «трансформаторный» ускоритель электронов на выходе из узла, в котором токонесущие жилы покрывают «жидкой резиной». Это позволило высвободить рабочие площади, повысить производительность и улучшить качество кабельной продукции.

8. Процессы торможения ионов в веществе

Процессы взаимодействия ионов с твердым телом начинаются еще при полете иона к поверхности, когда под действием электрического поля иона «вырывается» электрон с поверхности и возникает потенциальная ионно-электронная эмиссия, ионная бомбардировка поверхности приводит к распылению атомов с поверхности (катодное распыление), проникая в кристаллическую решетку ионы создают серию дефектов в ее структуре (радиационные дефекты), в процессе торможения ионы, как и электроны генерируют рентгеновское излучение, потерявшие свою энергию в результате столкновений с атомами ионы «застревают» в поверхностном

слое, являясь атомами примеси (ионное легирование), а также вызывает ряд других физико-химических процессов.

8.1 Потери энергии при торможении ионов в веществе

При описании движения иона в твердом теле используется несколько упрощающих предположений:

- рассматриваются парные столкновения ион – атом, и в первом приближении влиянием кристаллической решетки на процесс столкновений пренебрегают, поскольку передаваемая ионом атому вещества энергия (тысячи электрон-вольт) много больше энергии смещения атома из узла решетки $E_{см} \approx 30 \text{ эВ}$;
- принято считать, что ион теряет энергию непрерывно, несмотря на дискретный характер передачи энергии при столкновениях. Взаимодействие ион – атом или атом – атом носит электромагнитный характер и определяется соответствующим выбором потенциала взаимодействия;
- передача энергии от иона атому происходит в результате упругих и неупругих столкновений. При упругих столкновениях рассматривается в основном ядерный механизм торможения. Упругими столкновениями атомов с электронами пренебрегают. Неупругие столкновения в основном связаны с электронами вещества (электронный механизм торможения). Неупругими соударениями с ядрами, вызывающими тормозное излучение, возбуждение атома или ядерные реакции, пренебрегают из-за относительной малости изменения энергии ионов.

В теории потерь энергии и пробегов ионов вводится понятие электронной S_e и ядерной S_J тормозных способностей, выражающих энергетические потери на единицы длины, приходящиеся на один атом

$$\frac{dE}{dR} = N_2 [S_J(E) + S_e(E)], \quad (8.1)$$

где N_2 – плотность атомов мишени;

R – длина вдоль пробега.

Ядерная тормозная способность как результат упругих столкновений иона с атомами вещества происходит по законам классической механики. Однако ее вычисление сопряжено со сложными преобразованиями с привлечением законов кулоновского взаимодействия, Резерфордского рассеяния и модели Томаса-Ферми при различных значениях функции экранирования.

Электронная тормозная способность связана с неупругим рассеянием ионов на электронах вещества как свободных, так и связанных, составляющих оболочку атома. При этом ион теряет свою энергию как при столкновении с электронами, так и при возбуждении атома в объеме, а также при плазменных колебаниях электронного газа. Степень (величина) электронного торможения пропорциональна скорости иона или корню квадратному его энергии.

При малых энергиях ионов преобладают ядерные потери, а при высоких – преобладают потери энергии ионов в результате электронного торможения.

8.2 Пробег ионов

Как и в случае торможения и пробега электронов при оценке пути пройденного ионом в твердом теле по сложной ломаной траектории (см. рис.2.1.) различают истинный (полный) пробег, его проекцию на направление первоначального движения – проекционный пробег, и разброс пробегов – поперечный пробег.

Полный пробег, когда в результате ядерного и электронного торможения ион полностью потеряет свою энергию зависит от энергии иона, его массы и массы атомов вещества, а также кристаллической структуры последнего.

Проекционный пробег зависит от полного пробега и его величину можно оценить путем численного интегрирования сложных математических

выражений в приближении потенциала Томаса-Ферми. Среднеквадратичное отклонение пробегов зависит от проекционного пробега и энергии иона.

Поперечный пробег пропорционален полному пробегу и корню квадратному из отношения масс атомов вещества и иона.

При облучении ионами монокристаллов, у которых атомы решетки образуют каналы, ограниченные параллельными цепочками атомов, ионы, направление движения которых совпадает или незначительно отклоняется от оси канала, очень мало рассеиваются атомами и внедряются в кристалл на значительно большую глубину, чем пробег в аморфном твердом теле. Этот эффект называется *каналированием ионов*. Угол отклонения направления движения иона от оси канала не должен превышать критического значения, который для широкого класса ион – атом составляет $3^0 - 6^0$. При больших углах ионы рассеиваются и тормозятся, как в аморфном веществе. С повышением температуры пробег в канале уменьшается вследствие увеличения амплитуды колебаний атомов решетки. При больших токах ионов в пучке возрастает количество дефектов в решетке, и, следовательно, разрушаются каналы, исчезает эффект каналирования. Максимальный пробег канализованных ионов примерно на порядок превышает проекционный пробег. Так, при канализовании ионов фосфора с энергией 110 кэВ при дозе $1.5 \cdot 10^{13}$ ион/см² максимальный пробег составляет 1,4 мкм, в то время как проекционный пробег примерно 0,15 мкм.

На кривой распределения ионов по глубине имеются два максимума. Первый соответствует ионам, падающим под углом, большим критического значения и рассеивающимся, как в аморфном теле, второй максимум соответствует канализованным ионам.

Процессы торможения и пробеги ионов в твердом теле используются при введении примеси, например, при легировании полупроводниковых монокристаллов донорной или акцепторной примесями, а также при легировании деталей в машиностроении с целью изменения служебных характеристик металлов.



Рисунок 8.2.1 – Распределение ионов по глубине при наличии каналирования

Каналированные ионы образуют пик, положение которого определяется глубиной R_{max} . Среднеквадратичное отклонение для каналированной частицы оценивается

$$R = \sqrt{d \cdot R_{max}} \quad (8.2)$$

Первый максимум образован ионами, падающими под углом $\psi > \psi_{кз}$, которые рассеиваются как в аморфном веществе. На эффект каналирования влияет температура мишени, доза облучения, разориентировка и разупорядочение поверхности.

С повышением температуры снижается R_{max} вследствие увеличения амплитуды колебаний атомов.

С увеличением дозы (количества ионов) возрастает количество дефектов в решетке и, следовательно, разрушаются каналы. Зависимость распределения внедренных ионов фосфора в кремнии по глубине для различных доз показано на рисунке 8.2.2. При малых дозах видны пики каналирования, а при больших – каналирование отсутствует из-за аморфизации поверхностного слоя.

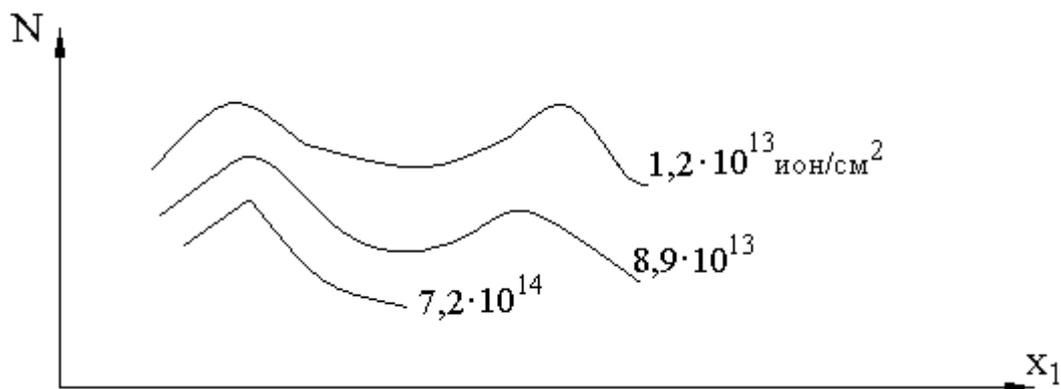


Рисунок 8.2.2 – Распределение внедренных ионов по глубине

Максимальный пробег R_{max} каналирования ионов примерно на порядок превышает проекционный пробег R_p . Так, при каналировании ионов фосфора $E_0=110$ эВ при дозе $1,5 \cdot 10^{13}$ ион/см² $R_{max} = 1,4$ мкм, в то время как $R_p = 0,15$ мкм

9. Процессы ионного (катодного) распыления

При взаимодействии высоко энергетичных ионов в веществе происходит распыление частиц с его поверхности. Это явление наблюдали, как разрушение катодов в газоразрядных приборах и назвали катодным или ионным распылением.

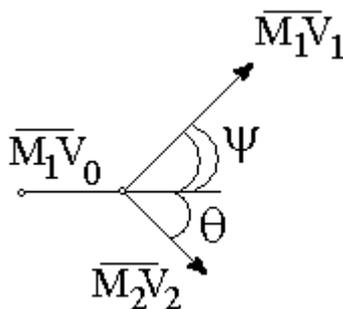


Рисунок 9.1 – Ионное распыление

Предполагалось, что происходит «локальный нагрев» в месте удара иона за счет его кинетической энергии и атомы испаряются. Однако при анализе энергетических спектров распыленных атомов оказалось, что их энергия от 1 до 10эВ, что соответствует температуре $10^4 - 10^5$ К. при такой температуре выбитые атомы должны быть ионизированы с многократной степенью ионизации. На самом деле в потоке распыленных атомов ионы составляют всего несколько процентов. Это послужило причиной отказа от

термической теории катодного распыления. Общеизвестным считается импульсный (нетермический) механизм, основанный на обмене импульсами при столкновении иона с атомами и атомов между собой. При этом учитываются парные столкновения, после которых взаимодействующие частицы разлетаются под разными углами. Связь между углами рассеяния определяется (см. рис.):

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot (\pi - \varphi - \arcsin \frac{\sin \psi}{\mu}), \quad (9.1)$$

$$\cos \psi = \frac{1}{2} \cdot (1 - \mu) \cdot \frac{V_0}{V_1} + \frac{1}{2} (1 + \mu) \cdot \frac{V_1}{V_0}, \quad (9.2)$$

где $\mu = \frac{M}{M_1}$.

Максимальная энергия, передаваемая неподвижной частице при столкновении равна:

$$E_{\max} = \frac{4 \cdot \mu}{(1 + \mu)^2} \cdot E_0, \quad \text{где } E_0 = M_1 \cdot \frac{V_0^2}{2}. \quad (9.3)$$

Для отрыва атома с поверхности ему должна быть сообщена энергия, превышающая энергию связи атома с поверхностью, т.е. существует пороговая энергия, равная энергии связи поверхностных атомов. При $E_0 > E_{\text{ПОР}}$ ионы передают атомам вещества в объеме энергию, превышающую $E_{\text{СВ}}$. Значение энергии смещения $E_{\text{СМ}}$ часто оценивают по энергии сублимации $E_{\text{СВБ}}$ материала, которая известна для большинства веществ. $E_{\text{СВБ}}$ определена для атомов поверхности, где действуют лишь половина связей. Поэтому для удаления атома из объема требуется энергия $E_0 \approx 2 \cdot E_{\text{СВБ}}$, а с учетом каскада смещений $E_0 \approx E_{\text{СВБ}}$, тогда легко определяется пороговая

$$E_{\text{ПОР}} = \frac{(1 + \mu)^2}{\mu} \cdot E_{\text{СВБ}}. \quad (9.4)$$

Одной из характеристик распыления является коэффициент распыления S , который определяется количеством атомов, выбитых одним

ионом. Являясь статистической величиной S , может выражаться дробным числом.

$$S = \frac{n_a}{n_u}, \quad (9.5)$$

где n_a – число выбитых атомов;

n_u – число ионов, бомбардирующих материал.

При расчетах коэффициента расплавления используется теория Зигмунда, согласно которой после нескольких соударений ионов с атомами вещества в объеме вещества появляются атомы, которые движутся по направлению к поверхности материала. Если расстояние наибольшего сближения иона с атомом равно радиусу экранирования, когда электронные оболочки слабо перекрываются, то при лобовом столкновении можно рассматривать как удар упругих шаров.

$$E_2 = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{0.885 \cdot a_0 \cdot (Z^{2/3} + Z_2^{2/3})^{-1/2}} \cdot \frac{M_2 + M_1}{M_2}. \quad (9.6)$$

Этим приближением можно пользоваться при расчетах коэффициента распыления, поскольку даже для системы ион – атом с наименьшим значением $E_1 \approx 10^3 - 10^4$ эВ.

При энергии ионов $E_0 > E_{CB}$ возникает целый каскад смещенных атомов $n_{12} = 2 \cdot E_0 / E_{CB}$. Число атомов, движущихся к поверхности будет составлять $n_1 = (1/2 - 1/6)n_{1\Sigma} \approx 1/3 \cdot n_1 \cdot \varepsilon$.

В общем случае число выбитых атомов, движущихся к поверхности, зависит от отношения M_2/M_1 . При $M_2/M_1 > 1$ число атомов, движущихся к поверхности, увеличивается из-за увеличения вероятности рассеяния первичного иона на большие углы, поэтому большая часть смещенных атомов сконцентрируется вблизи поверхности. Если $M_2/M_1 < 1$, то ион при столкновении рассеивается на малые углы, атомы материала, движущиеся к поверхности, зарождаются на больших глубинах и уменьшается вероятность

их выхода на поверхность. Принято считать, что $n_1 = \beta \cdot n_{1\Sigma}$, где β – функция M_2/M_1 . Если определить коэффициент распыления $S=n_1$ и $E_{CB} = 2 \cdot E_{CVB}$, то получим

$$S = \frac{\beta \cdot N_2^{2/3}}{4} \cdot \frac{S_n(E)}{E_{CVB}}, \quad (9.7)$$

Для среднего значения $N_2 = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, то:

$$S = 4 \cdot 10^{14} \cdot \beta \cdot \frac{S_n(E)}{E_{CVB}}, \quad (9.8)$$

если $E_0 \ll E_r$, тогда можно считать, что энергия передается атому при лобовом столкновении, получается простое выражение:

$$S = \frac{3 \cdot \beta \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot E_0}{\pi^2 \cdot (M_1 + M_2) \cdot 2 \cdot E_{CVB}}. \quad (9.9)$$

При малых энергиях ионов S прямо пропорциональна энергии ионов.

На практике энергия ионов $E_0 > 1$ кэВ, поэтому в процессах катодного распыления главную роль играет ядерная тормозная способность.

В таблице 9.1 приведены значение коэффициента распыления для некоторых материалов (в скобках – эксперимент)

Таблица 9.1 – Коэффициенты распыления для некоторых материалов

элемент	$a \cdot 10^{11}, \text{м}$	$E_{пор}, \text{эВ}$	S при энергии аргона E_0 , кэВ				
			0.1	0.5	1.0	2.0	5.0
Al	1.33	320	0.25(0.11)	0.5(1.0)	1.2	1.45	1.75
Si	1.29	330	0.21(0.07)	0.8(0.5)	1.0(0.6)	1.2(0.9)	1.45(1.4)
Ti	1.19	330	0.26(0.08)	0.95(0.35)	1.22	1.5(1.1)	1.83(1.7)
Ge	1.12	360	0.33(0.28)	1.3(1.05)	1.65(1.5)	2.06(2.0)	2.6(3)
Nb	1.06	380	0.18(0.07)	0.72(0.57)	0.91	1.16	1.5

На рисунке 9.2 показана зависимость коэффициента распыления S от энергии при бомбардировке меди ионами аргона. Из рисунка видно, что S полностью определяется зависимостью ядерной тормозной способности от энергии (пунктиром – экспериментальная, сплошная – расчетная).

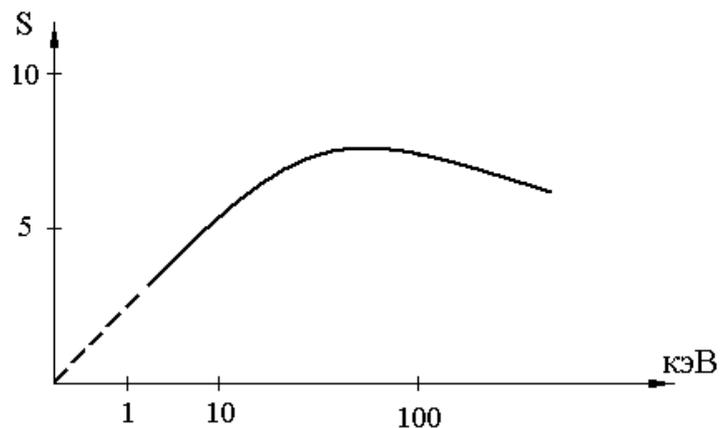


Рисунок 9.2 – Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов

Коэффициент катодного распыления сильно зависит от заряда ионов. Экспериментально установлено, что S изменяется значительно сильнее в зависимости от природы ионов (в сто раз и более), чем от материала мишени (в 10 раз).

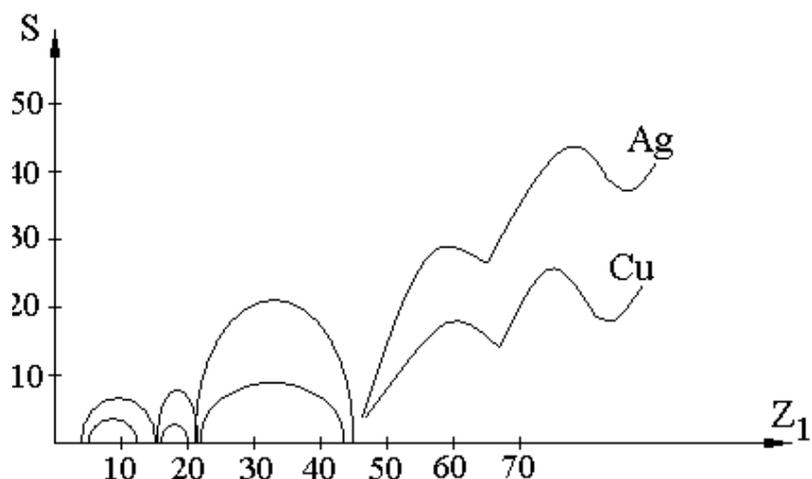


Рисунок 9.3 – Зависимость коэффициента распыления от атомного номера бомбардирующего иона

На рисунке 9.3 показана зависимость S от атомного номера бомбардирующих ионов $E_0=45$ кэВ. Коэффициент распыления максимальны для инертных газов и минимальны для элементов, расположенных в центральных столбцах таблицы Менделеева (Al, Ti, Zr, Hf и др.). Данные зависимости сняты при малых дозах облучения. При увеличении дозы S может резко изменяться вследствие накопления ионов в поверхностном слое и образования твердых растворов.

При облучении различных веществ ионами одного и того же элемента S немонотонно зависит от номера элемента мишени (рис.9.4).

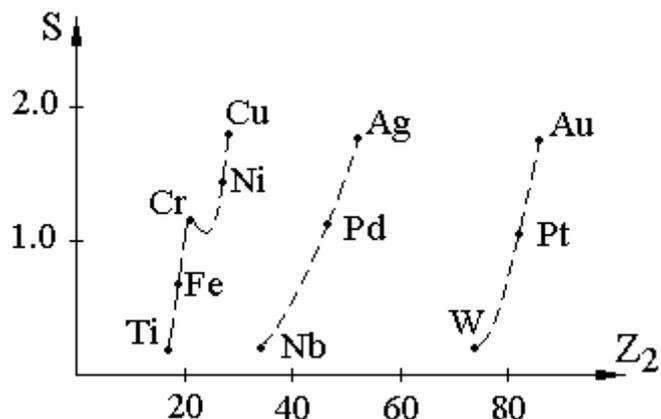


Рисунок 9.4 – Зависимость коэффициента облучения S от номера элемента.

Периодичность зависимости $S(Z_2)$ связана с периодичностью изменения энергии связи атомов. Выше приведенные зависимости сняты при нормальном падении ионов на поверхность мишени. Изменение угла падения от 0 (нормаль) до 90° вызывает значительное увеличение S в интервале углов $50 - 70^\circ$. Это объясняется тем, что выбитый из решетки ионом атом образует каскад смещений атомов из ее узлов. После трех – четырех столкновений появляются атомы, движущиеся к поверхности.

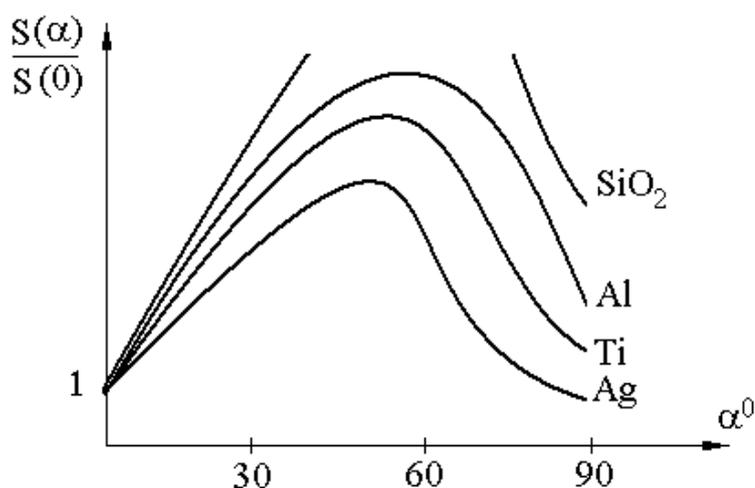


Рисунок 9.5 – Зависимость пробега от наклона

Т.к. среднее расстояние между атомами составляет 0,3 – 0,4 нм, то глубина, с которой в материале начинается движение атомов с энергией, достаточной для выбивания поверхностных атомов составляет 1,5 – 2,0 нм. Это расстояние много меньше проекционного пробега ионов в мишени. При наклонном падении эффективный пробег уменьшается, увеличивается число смещенных вблизи поверхности атомов и возрастает значение коэффициента распыления S (рис. 9.5).

При распылении монокристаллов зависимость коэффициента распыления S от угла падения появляются направления (рис. 9.6), в которых число выбитых атомов больше, чем в других. Вдоль направлений наиболее плотной упаковки существует фокусировка импульса частицы.

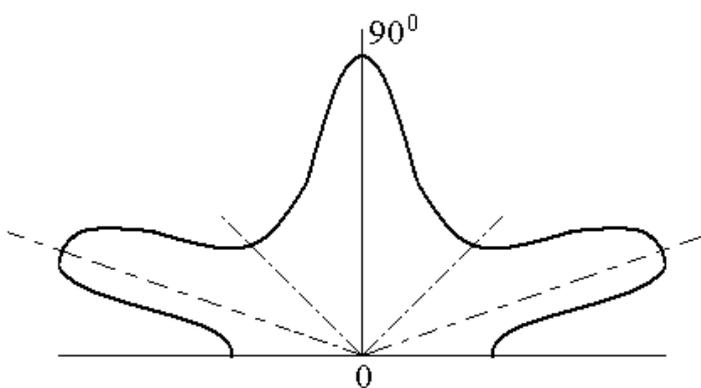


Рисунок 9.6 – Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов

Происходит поворот импульса в направлении осей цепочки атомов, что приводит к увеличению выбитых атомов. Вследствие этого эффекта в распределении плотности напыленной пленки появляются пятна Венеры.

Практический интерес представляет энергетический спектр распыленных атомов. На рис.9.6 показана кривая распределения с максимумом соответствующим $E_2 = 0.5 \cdot E_{свб} \approx 2 \text{ эВ}$.

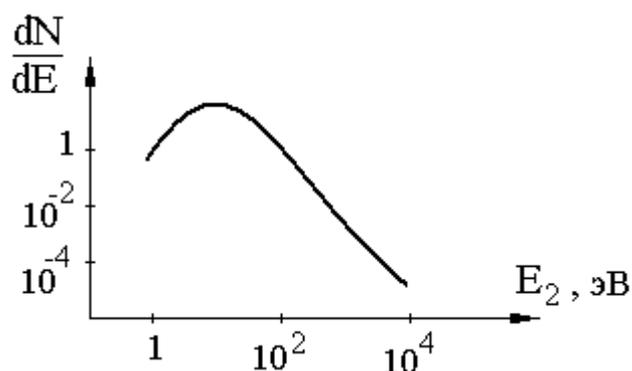


Рисунок 9.6 – Энергетический спектр распыленных атомов

Спад происходит по закону E^{-2} . Основная доля распыленных атомов сосредоточена в диапазоне энергии $E_2 \leq 10$ эВ.

10. Вторичная ионно-электронная эмиссия

При облучении металлов, полупроводников и диэлектриков ионами наблюдается испускание электронов – ионно-электронная эмиссия. Механизм такой эмиссии основан на передаче кинетической энергии иона электронам проводимости, а также за счет энергии нейтрализации ионов. В соответствии с механизмом передачи энергии различают два вида ионно-электронной эмиссии:

- кинетическая эмиссия, когда электронам сообщается энергия за счет кинетической энергии иона;
- потенциальная эмиссия, когда электронам проводимости передается энергия, выделяемая при нейтрализации иона.

Кинетическая и потенциальная эмиссии отличаются не только источниками энергии, но и способами ее передачи, а также категориями электронов, участвующих в эмиссии. В *кинетической* эмиссии участвуют связанные электроны, перебрасываемые в зону проводимости с образованием дырки в заполненной зоне проводимости и последующей Оже-рекомбинации электрона проводимости с дыркой, приводящей к выходу электронов в вакуум. При *потенциальной* эмиссии происходит выход электронов проводимости. При этом, поскольку необходима предварительная

нейтрализация иона, его энергия ионизации должна быть в два раза больше работы выхода вещества и связана с потенциалом ионизации

$$e \cdot U_i \geq 2 \cdot W_0, \quad (10.1)$$

где U_i – потенциал ионизации;

W_0 – работа выхода.

Потенциальная ионно-электронная эмиссия возможна лишь при определенных сочетаниях ион-металл и не зависит от кинетической энергии иона. В связи с небольшой вероятностью потенциального вырывания свободных электронов этот вид вторичной эмиссии наблюдается лишь для некоторых диэлектриков.

Кинетическая вторичная эмиссия наблюдается для любых сочетаний ион-металл и возрастает с увеличением энергии ионов.

Явления вторичной ионно-электронной эмиссии имеют место в газовом разряде и газоразрядных приборах (γ -процессы).

Вторичная кинетическая ионно-электронная эмиссия (ВИЭ) начинается с некоторого порогового значения энергии ионов и характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии – γ и энергетическим спектром эмитированных электронов. При бомбардировке ионами с энергией до 1 кэВ наблюдается потенциальная эмиссия, существенно не зависящая от энергии ионов. После превышения порогового значения начинает преобладать кинетическая энергия. При этом γ монотонно возрастает с увеличением энергии ионов и только при энергиях сотни кэВ достигает максимума. Для большинства ионов и материалов зависимость $\gamma(E_0)$ при малых значениях E_0 близка к линейной, а при больших энергиях переходит к параболической. Зависимость $\gamma(E_0)$ от сорта ионов связана с различиями в строении электронных оболочек, а не с разницей масс частиц.

Коэффициент распыления практически не зависит от температуры в диапазоне 300 – 2000⁰К, если не происходит изменения состояния

поверхности. Изменение давления газа на несколько порядков также не влияют на γ тугоплавких металлов при разных температурах.

Для диэлектриков ионно-электронная эмиссия имеет ряд особенностей:

1. Значения γ для них в 10 – 100 раз выше чем для металлов;
2. Потенциальная эмиссия обнаруживается лишь для некоторых сочетаний ион-материал, при этом соблюдается условие $E_0 \geq 2 \cdot W_0$, где W_0 – энергия связи электрона в диэлектрике;
3. Линейность функции $\gamma(E)$ наблюдается при меньших энергиях ионов, чем для тугоплавких металлов;
4. Пороговое значение энергий для кинетической эмиссии на порядок меньше, чем для металлов.

Энергетическое распределение вторичных электронов слабо зависит от массы и заряда иона, а также от их скорости. При изменении энергии ионов от десятков эВ на несколько порядков наиболее вероятная энергия вторичных электронов возрастает только в 2 – 3 раза. Энергетический спектр при кинетической энергии определяется распределением в заполненных зонах металла, образующихся при столкновениях ионов с атомами металла. Некоторая зависимость энергетического спектра электронов от энергии ионов объясняется тем, что с увеличением их энергии дырки образуются на большой глубине в заполненной зоне и при их Оже-нейтрализации возбуждаются электроны с большей энергией.

На вторичную эмиссию оказывает влияние состояние поверхности, в частности адсорбированные газы и всевозможные загрязнения, при этом изменяется γ и изменяется стабильность эмиссии во времени. При увеличении энергии ионов влияние адсорбции резко уменьшается и становится незначительным при $E_0 > 15 - 20$ кэВ.

Отражение ионов от поверхности твердого тела, как и отражение электронов, наблюдается в широком интервале энергий и для различных сочетаний ион-материал. Однако, в связи с тем, что коэффициент отражения

и энергетическое распределение отраженных ионов сильно зависит от состояния поверхности и наличия адсорбированных молекул газа, наиболее изученным является процесс отражения ионов щелочных металлов для тепловой обработки при использовании безинерционных методов измерений. Эксперименты показывают, что коэффициент отражения сильно зависит от энергии ионов при энергиях ионов меньше 660 эВ. При больших энергиях эта зависимость становится слабой и коэффициент отражения стремится к постоянному значению, зависящему от сочетания ион-мишень.

Закон углового распределения отраженных ионов близок к косинусоидальному, т.е. количество отраженных ионов уменьшается с увеличением угла вылета. Количество ионов, вылетающих нормально к поверхности при различных углах падения первичного пучка, практически не зависит от угла падения.

Энергетический спектр отраженных ионов при E до 1000 эВ имеет непрерывный характер от тепловых энергий до предельных, определяемых законом упругого столкновения иона с атомом.

С увеличением угла падения число ионов с большими энергиями относительно возрастает.

11. Химическое действие ионов

При взаимодействии ионов с веществами, состоящими из многоатомных молекул кроме рассмотренных выше процессов протекают более сложные физико-химические процессы, приводящие к радиационно-химическим превращениям, образованию новых химических соединений.

Кроме имеющих место при электронной бомбардировке процессов (возбуждение молекулы с последующей ее диссоциацией на активные частицы, перегруппировка атомов в структуре молекулы, перемещение (аутомеризация) отдельных атомов из одной части молекулы в другую, присоединение к возбужденной молекуле другой, передача энергии возбуждения от одной молекулы к другой) при ионной бомбардировке

наблюдаются процессы, связанные с образованием новых соединений, обусловленные реакциями синтеза иона с атомами вещества или атомами примеси.

Образование карбидов при бомбардировке углеродсодержащих сталей ионами титана.

Синтез нитрида титана на поверхности изделий при воздействии ионов титана в среде азота.

Насыщение поверхностных слоев металлов карбидами титана при облучении ионами титана поверхности, покрытой тонкой пленкой адсорбированных вакуумных масел.

На процесс образования химических соединений при имплантации могут играть остаточные газы в вакуумной камере, адсорбирующиеся на поверхности, это атомы углеродов, азота и кислорода. Под действием бомбардировки ионов даже инертных газов эти атомы, участвуя в каскадах соударений, могут образовать химические соединения с материалом. При концентрации около 5 % образуются химические соединения оксиды, нитриды и карбиды, при концентрации 3 % происходит перестройка структуры кристаллов, т.е. наблюдается радиационно-стимулированные полиморфные превращения.

При облучении в вакуумных камерах, откачиваемых паромасляными насосами, на облучаемой поверхности, адсорбируются пленки углеводородных соединений, которые могут полимеризоваться под облучением ионами, часть атомов углерода могут «заколочиваться» в поверхностный слой.

При облучении пленок хрома, тантала, никеля, ниобия, алюминия ионами аргона с энергией 60 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ за счет эффектов отдачи и диффузии адсорбированных атомов углерода, азота и кислорода, которые проникли в глубь кристаллической решетки, также образуются карбиды, нитриды, оксинитриды, оксикарбонитриды с близкими параметрами решетки.

12. Корпускулярно-лучевые установки

Устройства технологического назначения, в которых используются пучки заряженных частиц (ионов, электронов), объединяются в общую группу корпускулярно-лучевых установок. Основанием для такого объединения служит сходство физических процессов, используемых для получения и формирования пучков заряженных частиц, близкие условия, в которых осуществляются технологические операции (высокий вакуум и т.д.), одинаковые принципы конструирования отдельных узлов и деталей установок и т.д.

Интенсивное внедрение корпускулярно-лучевых методов в производство привели к созданию большого числа новых типов устройств и увеличению общего их количества.

Не смотря на существенные различия между корпускулярно-лучевыми установками по конструкции, по параметрам пучков заряженных частиц, по технологическим возможностям в их структуре обнаруживаются общие черты: вакуумная камера, источник заряженных частиц, схемы электрического питания и т.д.

Это позволяет не только объединить в общую категорию, казалось бы, разнородные установки, но и выделить основные элементы, имеющие общие черты для большинства типов установок.

12.1. Классификация корпускулярно-лучевых установок

Для классификации корпускулярно-лучевых установок в качестве основных классификационных признаков принимаются:

- 1) Вид заряженных частиц, используемых в установке в качестве основного технологического средства;
- 2) Характер взаимодействия заряженных частиц с бомбардируемым веществом, который составляет основу технологического процесса;
- 3) Назначение корпускулярно-лучевой установки.

Кроме основных признаков классификации существуют еще дополнительные признаки, подчеркивающие ту или иную особенность установки. К дополнительным классификационным признакам относятся:

- 1) Способ получения и формирования пучков заряженных частиц;
- 2) Величина ускоряющего напряжения и мощности луча.

Пользуясь дополнительными признаками классификации можно группировать установки, отнесенные к определенному классу, на более мелкие группы, в соответствии с тем или другим признаком.

По виду заряженных частиц, используемых в качестве основного технологического средства, корпускулярно-лучевые установки делятся на 3 класса:

1. Электронно-лучевые;
2. Ионно-лучевые;
3. Комбинированные.

Электронными называются установки, в которых основным технологическим инструментом является поток электронов.

Ионными установками называются устройства, предназначенные на использовании ионной бомбардировки и сопровождающих ее процессов (катодное распыление, внедрение ионов в поверхностный слой, химическое взаимодействие с бомбардируемой поверхностью и т.д.).

Комбинированными электронно-ионными установками называются такие устройства, в которых в качестве основных технологических средств используются одновременно электронные пучки и ионная бомбардировка.

Каждый из этих классов объединяет большое число типов установок, отличающихся друг от друга по параметрам пучков, по конструкции и по назначению. Поэтому установки, относящиеся к тому или иному классу, целесообразно классифицировать на отдельные группы, имеющие сходный характер взаимодействия частиц с веществом и одинаковое назначение. По характеру взаимодействия заряженных частиц с веществом, который

положен в основу того или иного технологического процесса, установки подразделяются на следующие группы:

1. Электронно-нагревательные установки, использующие нагрев вещества при бомбардировке заряженными частицами;
2. Установки катодного распыления, в которых основным процессом является распыление вещества ионной бомбардировкой;
3. Установки легирования и осаждения пленок, работающие на принципе переноса вещества в виде ионов и осаждения его на бомбардируемой поверхности или внедрения ионов в кристаллическую структуру вещества;
4. Установки, в которых используется химическое действие электронов и ионов.

Классификация корпускулярно-лучевых установок по назначению в данной книге проведена отдельно для электронно-лучевых и ионных установок. Электронно-лучевые установки в соответствии с назначением отнесены к следующим группам:

1. Электронные плавильные установки;
2. Электронно-лучевые сварочные установки;
3. Установки для размерной обработки электронным лучом;
4. Электронно-оптические устройства для контроля и наблюдения за ходом технологического процесса.

Связь между назначением и параметрами электронно-лучевых установок показана на рисунке 12.1.1.



Рисунок 12.1.1 – Связь между назначением и параметрами электронно-лучевых установок

Ионные установки по своему назначению делятся на четыре основных группы:

- 1) Установки для травления;
- 2) Установки для получения пленок;
- 3) Установки для легирования;
- 4) Установки для размерной обработки.

В соответствии с данной классификацией в последующих двух главах описываются наиболее типичные установки, относящиеся к каждой группе.

Поскольку в комбинированных электронно-ионных установках имеются электронно-лучевые и ионные устройства, рассматриваемые в соответствующих главах, отдельного описания этого типа установок не приводится.

13. Принцип устройства корпускулярно-лучевых установок

Принцип работы и устройство корпускулярно-лучевой установки определяется назначением установки и процессами, обеспечивающими получение потоков свободных заряженных частиц, ускорение и формирование пучка в луч с необходимыми параметрами, управление процессом обработки и контроль качества изделия. Любая корпускулярно-лучевая установка должна содержать источник частиц, устройство для фокусировки и управления потоком, рабочую камеру с необходимыми приспособлениями для загрузки крепления и перемещения обрабатываемого изделия, вакуумную систему, поддерживающую давление в рабочей камере на необходимом уровне, блок питания, пульт управления и систему контроля за ходом процесса обработки.

В общем случае принцип работы корпускулярно-лучевой установки рассмотрим по блок-схеме, показанной на рисунке 13.1. Поток частиц, полученный и сформированный в источнике 1, фокусируется на обрабатываемую деталь, в рабочую камеру 4. Источник частиц, системы фокусировки и управления входят в состав корпускулярно-оптической системы и конструктивно объединяются в ускорительную колонну. С помощью насосной группы 5 в рабочей камере и в ускорительной колонне поддерживается необходимое давление. Питание источника частиц и устройств формирования потока частиц осуществляется от блока питания и управления 6. Контроль за ходом обработки осуществляется блоком 7.

Существуют электронно-ионные лучевые установки с некоторыми отклонениями от рассмотренной блок-схемы, не содержащими отдельных узлов, либо с такими устройствами, которые выполняют функции нескольких

блоков. Например, установка для получения пленок катодным распылением состоит из вакуумной камеры, в которой размещены два электрода, вакуумной системы и источника питания. Для катодного распыления используются ионы, возникающие в разряде между электродами. Здесь фактически отсутствует корпускулярно-оптическая система в таком виде, как она описана выше. Из всей системы имеется только источник заряженных частиц в виде газоразрядной плазмы.

Более подробно устройство отдельных узлов корпускулярно-лучевых установок дается при описании соответствующих установок.

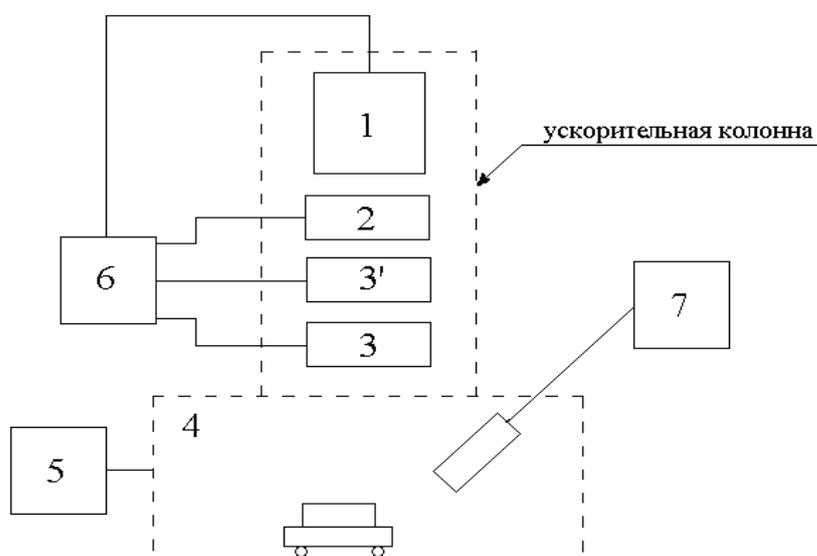


Рисунок 13.1 – Блок – схема корпускулярно-лучевой установки

1- источник заряженных частиц; 2 – ускоряющая система; 3' - система фокусировки; 3 – система отклонения луча; 4 – рабочая камера; 5 – средства откачки; 6 – блок питания; 7 – устройство контроля технологического процесса.

14. Корпускулярно-оптические системы

Основным назначением корпускулярно-оптической системы является получение, формирование, фокусировка и управление пучком заряженных частиц. В соответствии с видом заряженных частиц различают электронно-оптические и ионно-оптические системы. Структура корпускулярно-

оптической системы зависит в первую очередь от требований к форме и параметрам пучка и от назначения установки. В корпускулярно-лучевых установках, в которых для технологических целей используются широкие потоки заряженных частиц, корпускулярно-лучевые системы представляют собой простые двухэлектродные устройства с накаливаемым катодом для получения электронов или с газоразрядной плазмой для получения ионов. Для фокусировки потоков частиц в тонкий луч применяют сложные корпускулярно-оптические системы, включающие кроме источника частиц фокусирующие линзы, стигматоры, отклоняющие системы и даже массфилтеры.

Корпускулярно-лучевая система должна отвечать определенным требованиям, накладываемым ходом технологического процесса. Основные требования предъявляемые к корпускулярно-оптическим системам, сводятся к следующим:

1. система должна формировать пучок частиц заданных геометрических размеров с определенными параметрами;
2. система должна обеспечивать плавное управление определенными параметрами пучка (ток в пучке, энергия частиц) при сохранении неизменными других параметров (фокусное расстояние, кроссовер);
3. отклонение пучка в определенных пределах не должно сопровождаться изменением диаметра пучка и распределения плотности частиц по сечению;
4. система, как любое техническое устройство, должна быть достаточно долговечной, экономичной (ток на электроды должен быть минимальным), простой по конструкции, удобной в наладке и эксплуатации.

В отдельных случаях корпускулярно-оптические системы должны удовлетворять некоторым специфическим требованиям, к которым относятся моноэнергетичность пучка, спектральный состав генерируемых частиц,

разрешающая способность и т.д. методы удовлетворения этих требований рассматриваются при описании соответствующих установок.

В корпускулярно-лучевых установках технологического назначения в большинстве случаев используются пучки заряженных частиц с энергиями 1 – 200 кэВ. Для получения потока частиц с такими энергиями применяется прямое ускорение в электрических полях, создаваемых между электродами электронной пушки или ионного источника. Только в отдельных установках, когда требуется применять потоки частиц с более высокими энергиями, в корпускулярно-оптическую систему включаются устройства для дополнительного ускорения. Поток заряженных частиц с нужной энергией, сформированный в электронной пушке или в ионном источнике, направляется в фокусирующие устройства.

В электронно-лучевых установках для фокусировки луча используются преимущественно магнитные электронные линзы и только в некоторых установках можно встретить одиночные электростатические линзы. Для фокусировки ионных пучков чаще применяют электростатические линзы и магнитные квадрупольные линзы. Управление пучками заряженных частиц осуществляется как с помощью электростатических, так и магнитных отклоняющих систем.

Корпускулярно-оптическая система, конструктивно оформляемая в виде отдельной ускорительной колонны, размещается обычно непосредственно на вакуумной рабочей камере. Под рабочей камерой установки понимают герметизированный объем, снабженный устройствами для перемещения и системами наблюдения, в котором осуществляется обработка пучками заряженных частиц. Конструкция и размеры рабочих камер отличаются большим разнообразием. Встречаются установки, к которых роль рабочей камеры выполняет стеклянный колпак, и существуют установки со сложными вакуумными камерами, имеющими систему шлюзов для загрузки и выгрузки деталей. В отдельных установках размеры вакуумных камер достигают десятков метров. В некоторых случаях

электронно-оптическая система, в частности электронная сварочная пушка, перемещается в трех направлениях относительно обрабатываемого изделия.

Неотъемлемой частью корпускулярно-лучевой установки является специальная вакуумная система, в которую входят насосы, маслоотражатели и ловушки, вакуум-проводы с клапанами и кранами, а также аппаратура для измерения вакуума. В соответствии с требованиями к уровню вакуума и скорости откачки можно встретить несколько схем построения вакуумных систем в том числе простые, состоящие из двух насосов и одного клапана, обеспечивающие вакуум порядка $10^{-4} - 10^{-6}$ мм.рт.ст., и сложные системы, предназначенные для получения сверхвысокого вакуума.

14.1. Электронно-оптические системы

В электронно-лучевых установках технологического назначения для получения и фокусировки электронных пучков используются различные электронно-оптические системы, существенно отличающиеся друг от друга по своей структуре, и по конструкции отдельных узлов. Наиболее распространенные схемы электронно-оптических систем показаны на рисунке 14.1.1.

Структура электронно-оптической системы, обеспечивающая ту или иную степень фокусировки электронного пучка, определяется назначением установки. В некоторых установках электронного нагрева применяются простые нагреватели состоящие из катода и катодного электрода, в которых роль анода выполняет нагреваемая деталь. Такие системы иногда называют безанодными пушками, или безанодными кольцевыми нагревателями. Формирование пучка и ускорение электронов в такой системе осуществляется в электрическом поле между объектом и катодом с катодным электродом. Конфигурация катода и катодного электрода подбираются такими, чтобы поток электронов концентрировался на определенном участке бомбардируемой поверхности. В некоторых случаях катодный электрод выполняет функции экрана, защищающего катод от паров нагреваемого

вещества и вещество от паров материала катода. Безанодные системы выполняются, как правило, в виде кольцевых конструкций, применяемых для испарения и зонной переплавки материалов. Кольцевые безанодные системы позволяют получать сходящиеся потоки электронов, вызывающие нагрев сравнительно узкой зоны, измеряемой несколькими миллиметрами. Недостатком безанодных нагревателей является большая вероятность возникновения разряда между нагреваемым объектом и катодом при увеличении давления за счет выделения газов при нагреве. Поэтому безанодные системы, не используются при создании нагревателей большой мощности, применяемых в плавильных установках.

В нагревателях большой мощности применяется электронно-оптическая система, известная как двухэлектродная пушка, включающая прямонакальный или подогревный катод, катодный электрод и анод с отверстием для выхода электронов. Нагреваемый объект обычно находится под потенциалом анода. По такой схеме создаются радиальные нагреватели, располагаемые вокруг нагреваемого объекта и аксиальные пушки плавильных установок. Конфигурация электродов в этих системах выбирается по типу пушек Пирса.

Для получения электронных пучков малого диаметра (менее 1 мм) используются электронно-оптические системы более сложной структуры, содержащие электронные пушки, фокусирующие линзы, стигматоры, отклоняющие системы и устройства для юстировки пучка. Рассмотрим принцип устройства и конструкции некоторых электронно-лучевых систем, применяемых в технологических установках.

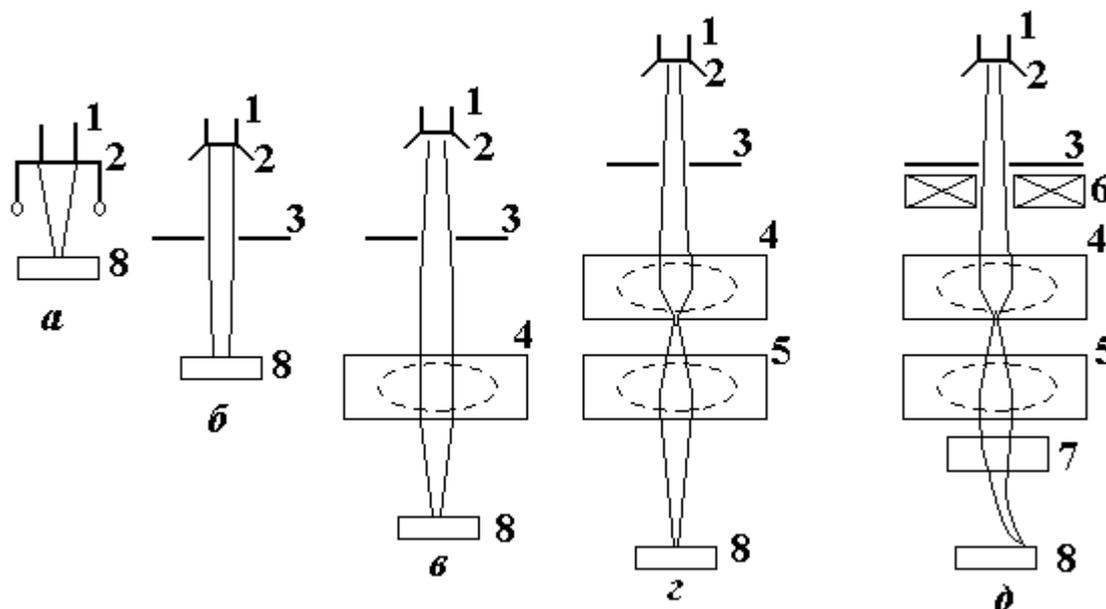


Рисунок 14.1.1 – Электронно-оптическая система

а – бездонный нагреватель; *б* – электронная пушка без линз; *в* – пушка с одной линзой; *г* – пушка с двумя линзами; *д* – пушка с двумя магнитными линзами, с отклоняющей системой и стигматорами.

1 – катод; 2 – управляющий электрод; 3 - анод; 4 – линза (1); 5 – линза (2); 6 – стигматор; 7 – отклоняющая система; 8 – мишень.

Наиболее простые системы применяются в установках для испарения вещества при напылении пленок. Простейший электронно-лучевой нагреватель состоит из катода в виде вольфрамовой спирали и тигля с испаряющимся веществом, выполняющим роль анода, такая конструкция не обеспечивает достаточно высокой чистоты пленки, т.к. пленка загрязняется металлом катода, распыляющимся при нагреве. Поэтому для испарения и зонной очистки чаще применяют нагреватели с экранированным катодом. Конструкция экрана выбирается так, чтобы стенки экрана предохраняли бомбардируемый материал и другие детали от прямого попадания паров катода. Примером двухэлектродных пушек являются радиальные нагреватели и простые аксиальные пушки для плавки и сварки. Аноды таких пушек и нагревателей в большинстве случаев как и нагреваемый объект находится под одинаковым потенциалом, чтобы после выхода из пушки электронный поток двигался в пространстве, свободном от поля. По этому

принципу созданы сварочные электронные пушки на рабочее напряжение 15, 20 и 60 кВ с током до 100 мА. Достоинством этих пушек является их простота и слабая зависимость фокусного расстояния от изменения ускоряющего напряжения. Например, отмечается, что фокусировка пушки на 60 кВ ухудшается только при напряжении 1700 В за счет расталкивающего действия пространственного заряда и рассеяния на атомах испаряющегося металла.

Благодаря слабой зависимости фокусирующих свойств двухэлектродных пушек от анодного напряжения открывается возможность запитывать их переменным напряжением. Тогда пушка, обладая вентильной проводимостью, будет генерировать пучок электронов только в течение одного полупериода, пока на катод воздействует отрицательная полуволна напряжения. Сваренные в таком режиме детали ничем не отличаются от сваренных на постоянном токе.

При необходимости облучать большие поверхности применяют многолучевые пушки. Анод такой пушки имеет большое число отверстий, против которых размещаются автономные катоды, так, что из каждого анодного отверстия выходит отдельный электронный луч. Простота конструкции и нечувствительность оптических свойств к параметрам источников питающего напряжения способствуют широкому их применению.

В установках для обработки мелких деталей, в которых не требуется перемещать луч на большое расстояние, применяются системы, состоящие из пушки и одной линзы, выполняющей роль проекционной линзы. С помощью линзы кроссовер пушки в уменьшенном виде проектируется на обрабатываемую деталь. В таких пушках применяют как прямонакальные катоды из вольфрамовой проволоки, так и подогревные катоды в виде дисков и стержней из тантала и гексаборида лантана с радиационным, либо электронным нагревом. Минимальный диаметр луча, который можно получить с помощью таких схем, определяется главным образом абберациями и астигматизмами линз и обычно составляет десятки микрон.

Когда требуется иметь большое расстояние от линзы до обрабатываемой детали и получать луч с малым сечением применяют электронно-оптические схемы со стигматорами и с двумя линзами. В некоторых схемах вторая линза переносит изображение кроссовера, уменьшенное первой линзой, на обрабатываемую деталь, расположенную сравнительно далеко от линзы, без изменения его размеров. В таких системах имеется возможность отклонять луч на относительно большие расстояния. В некоторых схемах обе линзы короткофокусные и используются для проектирования изображения катода с уменьшением. В универсальной установке, предназначенной, для изготовления микросхем, с помощью двух электростатических линз достигается уменьшение катода в 500 раз и в 357 раз при рабочих расстояниях соответственно 3 и 5 см. в конструкциях таких сложных систем предусматриваются механическая юстировка узлов системы и электрическая юстировка луча. В случае когда в электронно-оптической системе предусмотрено использование двух и более линз возможно перемещение пушки относительно первой линзы и первой линзы совместно с пушкой относительно оси луча в двух направлениях. Имеется также возможность в небольших пределах изменять положение катода относительно анода. Устройства для юстировки позволяют установить электронно-оптическую ось так, чтобы при изменении тока линзы не происходило перемещение луча по поверхности и не изменялось распределение плотности электронов по сечению луча.

В электронно-лучевых установках, работающих на постоянном напряжении, наблюдается интенсивное разрушение катода ионной бомбардировкой. Поэтому в конструкциях пушек предусматриваются специальные ионные ловушки или катодный узел смещается от вертикали, на которой размещены линзы. Благодаря этому поток положительных ионов, образовавшихся на пути движения луча не попадает на катод.

Термокатоде, применяемые в электронных пушках, имеют ряд недостатков. А именно, малый срок службы, чувствительность к атмосфере,

высокая рабочая температура, что иногда связано с необходимостью применять принудительное охлаждение катодного узла. Эти и некоторые другие недостатки термокатодов сдерживают внедрение электронно-лучевых методов в производство. В последние годы ведутся исследования возможности применения для технических целей газоразрядных источников электронов. Еще в 1947 году в электронном микроскопе была применена газоразрядная пушка на 50 кВ. пушка стабильно работала при плотности тока 1 A/cm^2 . разработана сварочная электронная пушка с полым катодом, работающая при напряжении 20 кВ с мощностью в луче до 2 кВт. На основе искрового разряда создана импульсная электронная пушка, позволяющая получать потоки электронов высокой плотности. Простая газоразрядная сварочная пушка мощностью 500 Вт создана на основе извлечения электронов из разряда с осцилляцией электронов в магнитном поле через отверстие в аноде или катоде.

В последние годы получили широкое распространение электронные пушки на основе взрывной электронной эмиссии.

Более подробные данные о конструкциях электронно-оптических систем и электронных пушек приводятся при описании соответствующих электронно-лучевых установок.

14.2 Ионно-оптические системы

Ионно-оптической системой принято называть устройство для генерирования и формирования пучков ионов, а также для управления этими пучками. В состав Ионно-оптической системы входит источник ионов, фокусирующая линза, массанализатор и отклоняющие системы.

В зависимости от требований к параметрам луча в технологических ионных установках применяют ионно-оптические системы, построенные по различным схемам. Наиболее часто встречающиеся схемы ионно-оптических систем показаны на рисунке 14.2.1. Простейшей ионной системой можно считать устройство, состоящее из двух электродов, между которыми горит

разряд, являющийся поставщиком ионов, и бомбардируемого объекта. Такая система используется для ионной обработки больших поверхностей. Для получения ионных пучков сечением несколько см² и менее используются простые ионно-оптические системы, состоящие либо из одного ионного источника, либо из источника и одной фокусирующей линзы.

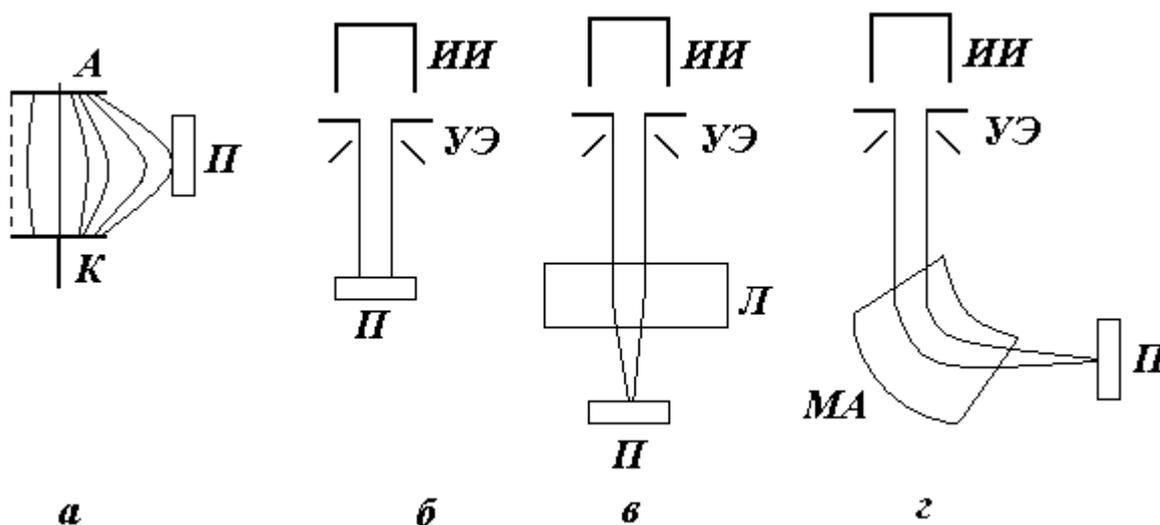


Рисунок 14.2.1. Ионно-оптические системы

а – система с отбором ионов из разряда; *б* – система с ускорением ионов; *в* – система с линзой; *г* – система с массфилтром (массанализатором)

К – катод; *УЭ* – управляющий электрод; *А* - анод; *Л* – линза; *ИИ* – источник ионов; *МА* – массанализатор.

Ионно-оптические системы, в состав которых кроме указанных элементов входят устройства для ускорения, отклонения и разделения ионов по массам, применяют в установках, предназначенных для легирования и получения спектрально-чистых пленок. В ионно-оптических системах технического назначения преимущественно применяются источники плазменного типа, называемые часто газоразрядными источниками. Плазменные источники имеют более широкие возможности в получении ионов различных веществ, имеют более высокую эффективность, чем источники с электронной бомбардировкой и с поверхностной ионизацией, более просты по конструкции и более надежны в работе. В соответствии со способом получения газоразрядной плазмы в ионных установках применяют:

- Источники с накаливаемым катодом, который служит для получения электронов, участвующих в ионизации;
- Источники с разрядом с холодным катодом;
- Источники с безэлектродным высокочастотным разрядом.

Простейшей ионно-оптической системой является двухэлектродная система, в которой горит тлеющий разряд. Из плазмы этого разряда под действием отрицательного потенциала на специальном электроде, извлекаются ионы и направляются на обрабатываемый объект. Недостатком этой системы является высокое напряжение разряда, и соответствующие ему высокие скорости ионов, вследствие чего затрудняется управление потоком и его фокусировка. Для уменьшения напряжения разряда вводится накаленный катод, эмитирующий в разрядное пространство поток электронов, вследствие чего снижается потенциал зажигания и напряжение горения разряда. Такие системы использовались в качестве устройств для катодного распыления и для очистки поверхности подложек перед нанесением пленок. Аналогичный принцип положен в основу устройства для получения ионов металлов при нанесении пленок ионным осаждением. Устройство состоит из накаливаемой спирали и плоского электрода, на который помещается подложка. При определенном давлении между электродами зажигается разряд, затем спираль нагревается и навешанные на нее металлические заготовки испаряются. Пары металла ионизируются в разряде и ионы металла под действием отрицательного потенциала плоского электрода осаждаются на подложку.

С помощью описанных устройств можно получить потоки ионов с невысокой плотностью тока, которые можно использовать для очистки и травления поверхности, для осаждения пленок и для выполнения некоторых других операций, протекающих при указанных параметрах пучков на больших поверхностях.

Для получения пучков с большей плотностью тока применяют системы с контрагированием плазмы с помощью магнитных полей и специальные

двухэлектродные системы с полым анодом. Система с полым анодом обладает фокусирующими свойствами, благодаря которым пучок ионов формируется в сравнительно тонкий луч и направляется в отверстие к катоду. На основе такой разрядной системы создано ионное устройство для прошивки отверстий в твердых диафрагмах (см. гл. VI). Благодаря высокому напряжению разряда ионы выходят из катодного отверстия с большими скоростями и используются для сверления без дополнительного ускорения.

Для получения ионных пучков большого сечения с равномерным распределением плотности можно использовать источники ячеистой конструкции с сетчатым катодом и фокусирующим электродом.

В качестве фокусирующих линз в ионно-оптических системах применяются преимущественно электростатические и квадрупольные магнитные линзы. В ионно-оптических системах, предназначенных для получения ионов строго определенного изотопного состава, применяют магнитные сепараторы. Принцип разделения ионов по массам состоит в том, что при движении в магнитном поле ионы, имеющие разные массы движутся по соответствующим круговым траекториям, радиус которых пропорционален массе иона.

Конструкция отдельных узлов ионно-оптических систем приводятся при описании ионных установок.

15. Извлечение ионов из плазмы и первичное формирование ионного пучка

Газоразрядная плазма как составляющая часть ионного источника должна удовлетворять двум основным требованиям. Во-первых, в плазме должна обеспечиваться высокая степень ионизации рабочего вещества, во-вторых, при высокой концентрации ионов должны создаваться условия для извлечения ионов с границы плазмы и создания пучка ионов с заданной энергией при максимальном отношении тока пучка к потоку выходящих атомов.

Эти требования удовлетворяются не только конструкцией деталей элементов источника ионов, но и конструкцией специальной системы электродов, служащей для извлечения и формирования ионного пучка с необходимыми ионно-оптическими свойствами и энергией. Функции одного из таких электродов выполняет граница плазмы, которая одновременно является источником ионов. Такие системы называются системами с плазменной фокусировкой. Создание системы с плазменной фокусировкой представляет собой сложную задачу, обусловленную следующими обстоятельствами:

1. поверхность эмитирующего электрода не является фиксированной, а изменяется в зависимости от внешнего электрического поля и режима работы источника;
2. газоразрядный источник ионов одновременно является источником нейтрального газа;
3. существуют трудности получения необходимого распределения плотности тока ионов.

Среди систем извлечения и предварительного формирования пучков ионов с использованием плазменной фокусировки можно выделить пять основных вариантов с различной конфигурацией границы плазмы, с которой производится отбор ионов (рис. 15.1).

В первом варианте (а) для получения широкоапертурных потоков ионов отбор ионов производится с плоской границы плазмы через плоский сетчатый электрод без какой-либо фокусировки.

Во втором варианте (б) граница плазмы «провисает» в отверстие извлекающего электрода и поток ионов приобретает форму расходящегося веерообразного пучка.

В третьем варианте (в) под действием электрического поля поверхность плазмы изгибается внутрь плазмы, приобретая полусферическую форму, что создает условия для получения сходящегося потока ионов.

В четвертом варианте (г) с помощью двух извлекающих электродов при плоской поверхности границы плазмы формируется цилиндрический не расходящийся пучок ионов.

В пятом варианте (д) с помощью специальной формы одного из извлекающих электродов плазма как бы «истекает» в специальную полость с необходимой конфигурацией поверхности, с которой производится отбор ионов.

В первом варианте (а) граница плазмы удалена от сетки на расстоянии порядка дебаевской длины экранирования и в обычных условиях ионного источника это расстояние составляет небольшую долю миллиметра.

Во втором варианте (б) при диаметре отверстия большем удвоенного значения дебаевской длины экранирования, плазма проникает из ионного источника наружу. Изменяя потенциал экстрактора можно управлять размером и конфигурацией поверхности проникающей плазмы.

В третьем варианте (в) под действием электрического поля экстрактора граница плазмы изгибается внутрь плазмы, образуя полусферическую эмиттирующую поверхность, что позволяет получать клинообразный сходящийся пучок. При этом диаметр отверстия в экстракторе меньше чем основание полусферической границы плазмы, что соответствует уменьшению натекания газа и повышению газовой экономичности источника.

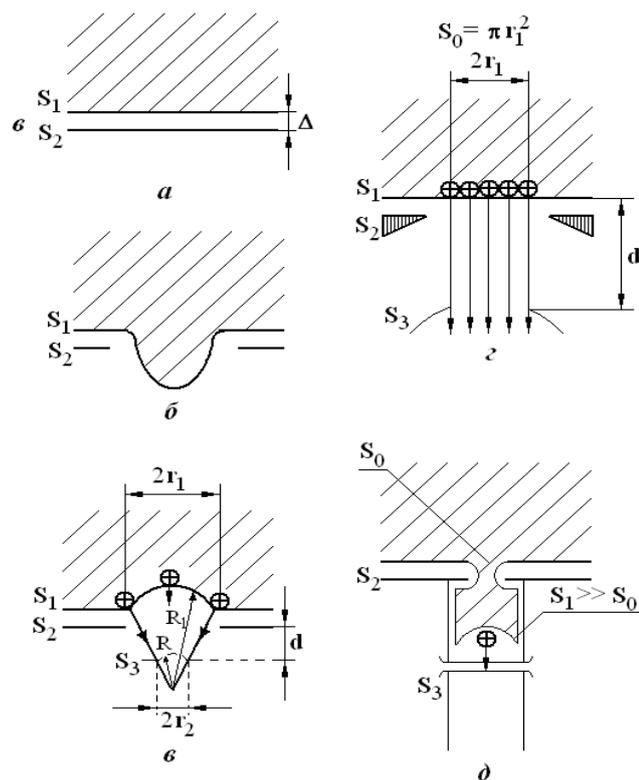


Рисунок 15.1 – Способы извлечения ионов из плазменных источников

В четвертом варианте (г) с помощью соответствующей формы извлекающих электродов граница плазмы возвращается примерно в плоскость выходного отверстия так, что она будет источником прямолинейно распространяющегося пучка ионов.

В пятом варианте (д) плазма проникает далеко за пределы ионного источника в вакуум, приобретает развитую поверхность, являющуюся источником ионов. Увеличение эмиссионной поверхности плазмы в этом варианте достигается без увеличения выходного отверстия ионного источника, т.е. без повышения расхода газа и повышается электрическая прочность системы формирования ионного пучка.

Выбор и расчет того или иного способа формирования ионных пучков начинают с решения уравнения Пуассона, позволяющего получить распределение потенциала в одномерном ионном потоке между плазмой и электродом, находящимся при отрицательном потенциале. Пирс показал как можно отыскать форму извлекающих электродов, при которой будет преодолено расталкивающее зарядов формируемого пучка ионов и он будет

распространяться прямолинейно. Для этого необходимо, чтобы на границе пучка не было градиента потенциала в перпендикулярном оси пучка направлении, а в направлении распространения потенциал изменялся бы в соответствии с потенциалом системы извлечения. В ионных источниках изменение потенциала влияет на форму и положение границы плазмы. В ряде статей, посвященных анализу систем формирования ионного пучка приведены семейства зависимостей параметров электродов систем извлечения и формирования ионных пучков.

Устойчивая работа систем с плазменной фокусировкой возможна при стабильности формы и положения границы плазмы.

При случайном увеличении плотности ионного тока в источнике нарушается условие стабильности и плазма выходит наружу. Из-за нарушения ионной оптики пучок становится расходящимся и увеличивается ток ионов на ускоряющий электрод.

В соответствии с назначением ионного источника системы плазменной фокусировки, извлечения и формирования ионного пучка конструируются с учетом требований к форме ионного пучка: аксиально-симметричный, ленточный, полый цилиндрический и т.д.

При формировании аксиально-симметричного пучка величина максимального тока не зависит от размеров выходного отверстия, а зависит только от ускоряющего напряжения.

В системах извлечения для формирования ленточного пучка часто применяют три электрода с соответствующими щелями. Стенка разрядной камеры со щелью является первым электродом. Этот электрод имеет высокий положительный потенциал по отношению ко второму. Третий электрод имеет несколько более положительный потенциал, чем второй, что способствует удержанию появляющихся в пучке электронов.

Аналогичные решения могут быть использованы при конструировании источников ионов, формирующих пучки полых, цилиндрических пучков.

16. Источники ионов

16.1 Общие требования и классификация ионных источников

Источники ионов широко используются в ионно-лучевых установках технологического назначения, ускорителях заряженных частиц, масспектрометрах, в установках для разделения изотопов, а также как самостоятельные устройства, предназначенные для травления, очистки поверхностей для осаждения пленок, изменения характеристик деталей металлообрабатывающих станков и других целей.

Получение потока свободных ионов основано на ионизации атомов на поверхности твердого тела, на извлечении ионов из плазмы разряда в газе или парах металлов и т.д.

Источники ионов появились в 19-ом веке. Однако из-за низкой их эффективности широкого распространения не получили. Начало развития эффективных ионных источников относится к 30-ым годам прошлого столетия. Быстрое развитие ионных источников стимулировалось исследованиями в области ядерной физики, изучением свойств материалов для космических аппаратов.

Плазменные источники ионов все шире используются в науке и технике. Можно указать следующие основные области их применения в настоящее время:

- в ускорителях заряженных частиц, предназначенных для исследований в области ядерной физики;
- в инжекторах заряженных частиц, служащих для заполнения магнитных ловушек быстрыми ионами;
- для создания реактивной тяги;
- в установках для электромагнитного разделения изотопов;
- для различного рода научных исследований: исследования взаимодействия ионных пучков с плазмой или с поверхностью

твердого тела, исследований в области высокотемпературной химии, микроанализа поверхности твердого тела;

- для осуществления различных технологических процессов: размерной обработки твердых тел, легирования полупроводников, пассивирования поверхности металлов, образования металлических пленок на поверхности твердого тела либо удаления пленок с этой поверхности и т.д.

Естественно, что каждое из перечисленных применений выдвигает специфические требования к ионным источникам.

В настоящее время разработано большое количество простых и сложных по конструкциям источников ионов газов и твердых веществ. В последние годы в связи с развитием электронно-ионной технологии потребовались источники ионов твердых веществ, удовлетворяющие ряду специфических требований, в частности, простота конструкции, надежность в работе и удобство в обслуживании.

Требования, предъявляемые к ионному источнику, определяются его конкретным назначением и условиями работы. Несмотря на разнообразие применений и характерных условий, в которых должен работать ионный источник, можно в общем виде сформулировать следующие основные требования к этим приборам:

1. Ионный источник с устройством для формирования ионного пучка должен дать стационарный или импульсный пучок с необходимым током и такими ионно-оптическими параметрами, которые позволили бы использовать его наилучшим образом.
2. Ионный источник должен дать пучок ионов определенного состава, т.е. должен поставлять ионы с заданной массой и зарядом. Другие компоненты в ионном пучке нежелательны, так как они «загрязняют» пучок, увеличивают нагрузку источников тока, ослабляют электрическую прочность ускорительной трубки и т.д.

3. Ионный пучок, извлекаемый из источника, должен обладать заданной средней энергией ионов и допустимой величиной разброса их скоростей.
4. Ионный источник должен работать стабильно. Модуляция тока ионного пучка, как правило, нежелательна.
5. Заданный пучок необходимо получать при минимальном расходе рабочего вещества. Это важно в первую очередь потому, что в области первичного формирования и ускорения пучка надо поддерживать высокий вакуум для повышения электрической прочности. В случае применения ценных газов (например, трития) важность этого требования определяется еще и экономическими соображениями.
6. Желательно, чтобы расходуемая мощность, в первую очередь рассеиваемая в источнике, была минимальной. В тех случаях, когда подвод энергии к ионному источнику затруднен, это требование особенно важно.
7. Источник должен быть достаточно надежным в работе, максимально простым по конструкции, питанию и управлению.
8. Источник должен иметь достаточный срок непрерывной работы, а также максимальный срок службы.

В соответствии с перечисленными требованиями ионный источник характеризуется рядом параметров, в частности следующими, наиболее важными:

- 1) величиной общего фокусируемого ионного тока I_+ и соответствующей плотностью ионного тока $j_+ = \frac{I_+}{S_0}$, где S_0 - сечение выходного отверстия ионного источника.
- 2) Экономичностью, или величиной ионного тока, приходящегося на единицу мощности, подводимой к источнику:

$$H \frac{I_+}{W} \text{ [ma / Bm]}.$$

Эту мощность входят разрядная мощность, мощность, расходуемая на накал катода, на поддержание магнитного поля и т.д. иногда представляет интерес экономичность, которая оценивается по выходу ионного тока на единицу мощности, рассеянной в самом источнике.

3) газовой экономичностью, которая представляет собой отношение числа атомов, превращаемых в ионы пучка, к числу атомов, подводимых к источнику: $\eta = \frac{v_a^+}{v_a} = \frac{I_+ \cdot 3600}{e \cdot Q_a \cdot n_0} = \frac{0.8 \cdot I_+}{Q_a} \cdot 100\%$

Здесь $n_0 = 3.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ - число частиц в 1 см^3 при давлении 1 мм.рт.ст. и температуре 0°C ; Q_a - расход рабочего газа при нормальных условиях, $\text{см}^3/\text{ч}$, а I_+ - ток пучка, ма . В случае протонных источников (молекулярный газ) правая часть умножается на коэффициент $\beta/2$, который при полной диссоциации водорода в разряде равен 0,5.

4) Относительным содержанием протонов в пучке водородных ионов (для протонных источников)

$$\beta = \frac{I_{H_1^+}}{\sum_{i=1.2.3} I_{H_i^+}} = \frac{I_{H_1^+}}{I_+} \cdot 100\%, \quad (16.1)$$

где $I_{H_1^+}, I_{H_2^+}, I_{H_3^+}$ - основные компоненты пучка водородных ионов.

5) Степенью модуляции ионного пучка

$$M = \frac{\Delta I_+}{I_+} \cdot 100\%, \quad (16.2)$$

где ΔI_+ - переменная составляющая тока ионного пучка.

Одной из важнейших характеристик источника и связанной с ним системы формирования ионного пучка является *эмиттанс*.

Для упрощения ознакомления с принципами работы и устройством ионных источников целесообразно провести их классификацию. В качестве классификационных признаков могут быть взяты вид разряда, способ

ионизации газов или паров рабочего вещества, принцип получения ионизируемых газов или паров рабочего вещества и т.д.

Одна из возможных схем классификации приведена на рисунке 16.1.1.

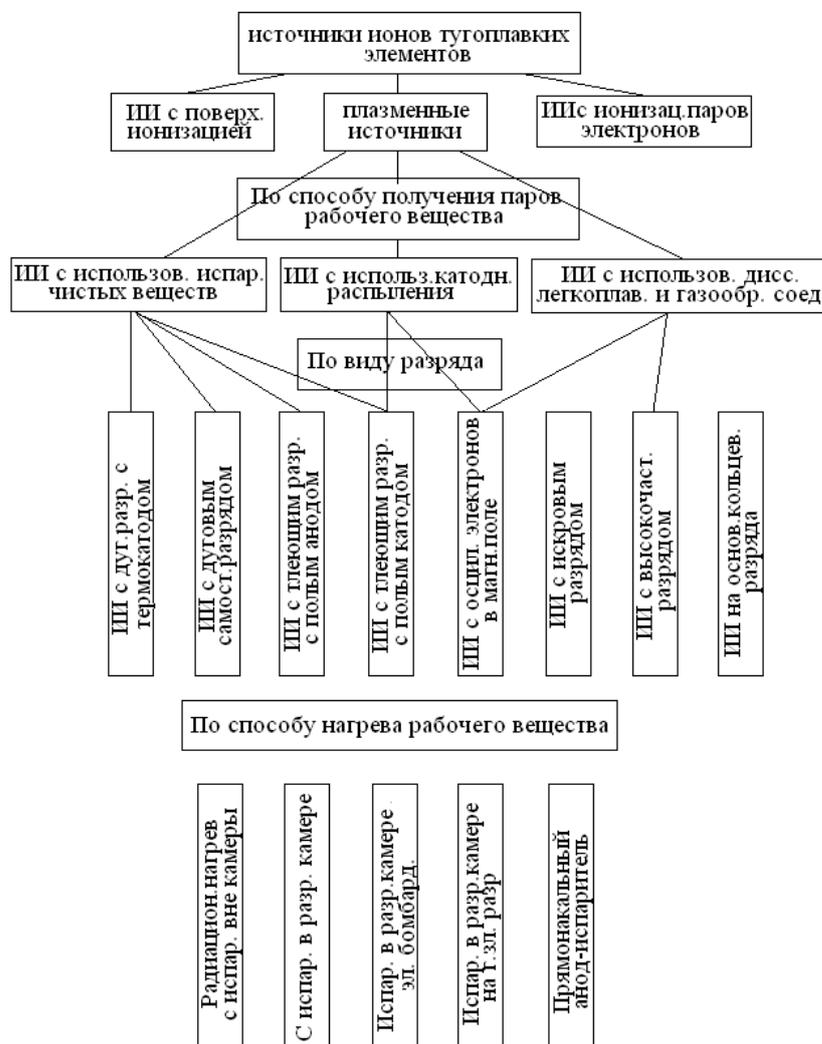


Рисунок 16.1.1 – Схема классификации источников ионов тугоплавких элементов

В данной схеме классификации более подробно представлены плазменные источники ионов как наиболее эффективные и более используемые в устройствах технологического назначения. Источники этой группы будут рассмотрены более подробно, чем источники с поверхностной ионизацией и с электронным ударом. Для общего ознакомления с устройством двух последних источников рассмотрим принцип работы и схему расположения основных элементов их конструкций.

Источники ионов как правило содержат генератор плазмы, систему извлечения ионов, систему формирования и ускорения последних.

Плазма, являясь четвертым состоянием вещества, представляет собой смесь ионов, электронов и нейтральных атомов или молекул. При разработке ионных источников необходимо решать как минимум две физико-технические задачи:

- 1) отыскание рациональных путей образования плазмы с необходимой концентрацией требуемых ионов при максимальном отношении этой концентрации к концентрации нейтральных атомов (при максимальной степени ионизации) или других ионов;
- 2) отыскание способов максимального использования (извлечения) образуемых ионов при максимальной газовой экономичности, а также оптимальных способов формирования ионного пучка с необходимыми ионно-оптическими параметрами.

Решая эти задачи, следует прежде всего обратить внимание на параметры плазмы, которую приходится создавать в источнике. В ионных источниках, где уже достигнуты плотности ионного тока $j_+ = 10 - 100 \text{ а/см}^2$, имеется плазма с концентрацией $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшего увеличения плотности ионного тока можно достигнуть за счет возрастания энергии ионов или электронной температуры и главным образом за счет дальнейшего увеличения концентрации плазмы. Создание ионных источников с максимальной до настоящего времени плотностью ионного пучка требует разработки рациональных способов получения плазмы с большой степенью ионизации и абсолютными значениями концентрации, достигающими $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Однородная плазма как источник ионов мало эффективна. Лучшее использование образующихся ионов достигается:

1. увеличением эмиссионной поверхности;
2. образованием неоднородной плазмы.

Первый способ применяется, например, в высокочастотных ионных источниках с зондовым извлечением. В этом случае внутри ионного источника имеется развитая эмиссионная граница, поверхность которой значительно превышает сечение выходного канала. Вторым способом осуществляется в капиллярной дуге и плазматроне местным сужением разрядной области, в дуоплазматроне – дополнительным контрагированием плазмы магнитным полем, в магнитных ионных источниках – образованием путем контрагирования плазмы магнитным полем «желоба», вдоль которого ионы направляются к выходному отверстию. Получение плазмы с большой концентрацией и большой степенью ионизации и увеличение доли используемых ионов часто достигаются одновременно. Например, местное сужение разрядной трубки приводит к повышению плотности ионного тока, образованию двойного слоя, ускоряющего электроны, появлению области с повышенной концентрацией плазмы, размеры которой сравнимы с размерами выходного отверстия; последнее обуславливает рост доли используемых ионов.

Плазма ионного источника обладает некоторыми характерными свойствами. В первую очередь она должна иметь высокую концентрацию положительных ионов.

При создании ионных источников плазма должна удовлетворять одновременно двум противоречивым требованиям. Во-первых, для обеспечения требуемой плотности ионного тока, извлекаемого из плазмы необходимо достижение определенной концентрации, что подразумевает создание условий для эффективной ионизации в плазме вблизи ее эмиссионной границы.

Во-вторых, для ускорения ионов до требуемых энергий необходимо приложение высокого напряжения в области извлечения и формирования ионного луча, это может привести к пробоем между электродами. В связи с этим выбор соответствующей разрядной системы способной одновременно

обеспечить условия для эффективной генерации ионов в плазме и их устойчивого отбора.

16.2 Источники ионов газов

В качестве поставщика ионов газа используется газоразрядная плазма, возбуждаемая в ограниченном объеме при электрическом разряде в газе, ионы которого требуется получить. По типу газового разряда ионные источники можно разделить на следующие группы: источники с тлеющим разрядом, источники с полым катодом, с разрядом типа Пеннинга, высокочастотные источники с емкостным и индуцированным разрядом, источники с дуговым разрядом с накаливаемым или холодным катодом, источники с электронным ударом, искровые источники, а можно встретить еще несколько типов источников, в частности каналолучевые, источники с высоковольтным тлеющим разрядом и др. В качестве параметров ионных источников дается ток ионов в пучке или плотность ионного тока, коэффициент использования рабочего газа, составляющая тока нужных ионов в пучке.

К свойствам ионного источника относятся также плотность ионного тока в эмиссионном отверстии, давление рабочего газа в газоразрядной камере, энергетический спектр ионов, выходящих из ионного источника, электрическая прочность системы извлечения и формирования ионного пучка, срок службы источника и некоторые другие свойства, определяемые назначением и условиями эксплуатации источника ионов.

Одним из первых источников ионов газов можно считать протонный источник (источник ионов водорода), применяемый в линейных ускорителях ионов.

Источник ионов водорода состоит из двух частей: системы образования ионов (газоразрядной камеры) и системы извлечения и первичного формирования ионного потока в пучок ионов. Газоразрядная и система извлечения связаны друг с другом при помощи отверстий, через которые

ионы проходят в систему извлечения. Отверстие эмиссии обеспечивает перепад давления на два – четыре порядка между разрядной камерой и системой отбора и формирования ионов водорода (протон) связана с рядом трудностей, обусловленных тем, что сечение образования молекулярных ионов водорода в двадцать раз больше сечения образования атомарных ионов водорода.

В качестве разрядных камер источника протонов используются устройства с полым анодом, представляющим собой цилиндрический катод с выходным эмиссионным отверстием и плоский анод, устройства с разрядом типа Пеннинга и высокочастотные устройства с индукционным безэлектродным разрядом.

В разрядных камерах с разрядом Пеннинга благодаря наложению продольного магнитного поля создаются условия для осцилляции электронов между катодами, что обеспечивает повышение плотности плазмы в при осевой области источника, что в свою очередь ведет к увеличению плотности ионной составляющей в эмиссионном отверстии.

Благодаря наложению магнитного поля создаются условия для зажигания и горения разряда при более низких давлениях и повышения газовой экономичности источника.

В некоторых ускорителях протонов применяют высокочастотные источники ионов с безэлектродным индукционным разрядом, возбуждаемым в диэлектрическом цилиндре, охваченном внешней катушкой, подключенной к высокочастотному генератору. При прохождении тока через катушку в полости цилиндра индуцируются электрические поля, приводящие к зажиганию безэлектродного разряда. Извлечение ионов из плазмы осуществляется с помощью электрода, вдвинутого в плазму и охваченного диэлектрической втулкой, снижающей ток ионов на внешнюю поверхность. Для увеличения выходного тока ионов на разрядную камеру накладывается поперечное и продольное магнитное поле.

В ускорительной технике и электронной технологии находят применение источники ионов на основе плазмы дугового разряда с накаливаемым и холодным катодами. Плазма дугового разряда создается между накаливаемым катодом и ферромагнитным анодом с тугоплавкой вставкой. Между катодом и анодом вводится промежуточный электрод, с потенциалом несколько меньшим потенциала анода и в разряде образуется двойной слой, в котором электроны на небольшом участке приобретают энергию 10 – 15 эВ и фокусируются по направлению к аноду, образуя область повышенной ионизации. Сильное магнитное поле между промежуточным электродом и анодом препятствует радиальной диффузии заряженных частиц из этого района.

Такой источник (известный как дуоплазмотрон) позволяет получать ионные токи, значительно превышающие токи других типов источников.

В устройстве для прошивки (сверления) микронных отверстий в алмазе и других твердых материалах применен источник ионов аргона в виде разрядной камеры с полым анодом, работающий на принципе высоковольтного тлеющего разряда. Устройство состоит из цилиндрической полости, заглушенной с одного конца, выполняющей роль анода, и полости катода с отверстием, совпадающим с осью анода. При определенном давлении на заземленном катоде на анод подается высокое напряжение порядка 20 кВ и в полости анода зажигается высоковольтный тлеющий разряд. Распределение электрического поля между цилиндрическим анодом и катодом обеспечивает удержание плазмы в при осевой области анода с повышенной концентрацией в области выходного отверстия в катоде. При этом часть ионов из плазмы выходят в это отверстие с энергией, близкой к напряжению разряда. Кристалл алмаза или деталь, в которой необходимо просверлить отверстие, устанавливались непосредственно за катодным отверстием. Под действием ионной бомбардировки вещество интенсивно распыляется, образуя отверстие или углубление с диаметром на входе близким диаметру отверстия в катоде. Данное устройство отличается

простотой конструкции, поскольку не содержит системы извлечения и формирования ионного луча. В принципе газоразрядную камеру такого устройства можно использовать при разработке источников ионов газов для других устройств.

Для увеличения концентрации плазмы в некоторых типах ионных источников применяют наложение магнитного поля. Примером таких источников являются источники на основе разряда типа Пеннинга с выходом ионов через одно из отверстий в катоде и источники на основе газомagnetрона.

16.3 Источники ионов металлов и твердых веществ

Ионы металлов и некоторых других твердых веществ, как элементарные частицы вещества, находят все более расширяющееся применение для нанесения тонких пленок в микроэлектронике, для создания упрочняющих покрытий в машиностроении, для изменения служебных характеристик металлов в металлургии, для легирования полупроводников в электронной технологии, а также как автономные источники ионов в ускорительной и космической технике.

При разработке источников ионов твердых веществ, в том числе и металлов, приходится решать ряд сложных технических задач и в частности получение вещества в атомарном состоянии и ионизации атомов. Решение этих задач приводит к созданию таких устройств, в которых, в отличие от источников ионов газов, может отсутствовать разрядная камера и система извлечения и формирования пучка. Для получения вещества в атомарном состоянии используется целый ряд физических и химических процессов, в том числе испарение, распыление, диссоциация металлосодержащих соединений и т.д.

Для ионизации атомов металлов используются процессы поверхностной ионизации, когда испаряясь с поверхности одного более тугоплавкого металла атомы другого металла отдают первому свой электрон

и испаряются в виде ионов, процессы, связанные с воздействием на пары металла потока электронов, так называемый электронный удар, ионизация в электрическом разряде и в катодном пятне дугового разряда.

Одним из первых, нашедших практическое применение, был источник ионов с поверхностной ионизацией.

Источники ионов с поверхностной ионизацией используются в ионных двигателях космических аппаратах и могут применяться для технологических целей в тех случаях, когда необходимо облучать большие поверхности или наносить пленочные покрытия из легкоплавких элементов на большие поверхности.

16.4 Источники ионов с поверхностной ионизацией и электронным ударом

Принцип устройства источника с поверхностной ионизацией приведен на рис. 16.4.1. Источник предназначен для получения ионов щелочных металлов и состоит из испарителя 5, пористой вольфрамовой пластины 4, ускоряющего электрода 3 и систем формирования, которые на рисунке не показаны. Жидкий металл из испарителя диффундирует через поры на поверхность вольфрамовой пластины, имеющей высокую температуру, при которой атомы металла отдают электрон вольфраму, превращаясь в положительные ионы. Под действием электрического поля ускоряющего электрода производится отбор ионов с поверхности и ускорение их до соответствующих энергий.

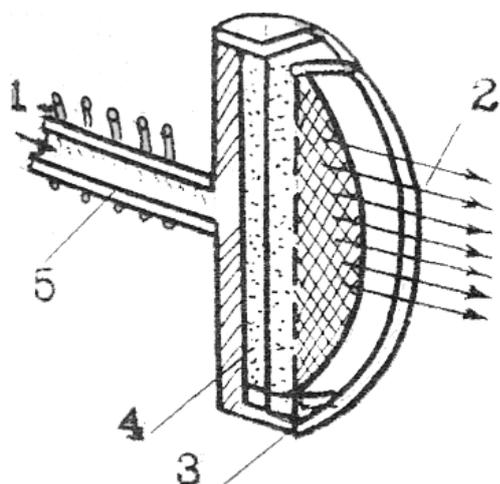


Рисунок 16.4.1 – Источник ионов с поверхностной ионизацией

1 – жидкий щелочной металл; 2 – поток ионов; 3 – ускоряющий электрод; 4 – пористый вольфрамовый ионизатор; 5 – испаритель.

Достоинством данного источника является возможность получать большие ионные токи и сравнительно высокая чистота ионного пучка, определяемая степенью очистки исходного материала, поскольку отбор ионов может осуществляться в высоком вакууме и загрязнение пучка какими-либо примесями практически исключены. К недостаткам источника следует отнести невысокую экономичность и высокую рабочую температуру.

Примером источника с ионизацией паров металла электронным ударом может служить источник ионов пермаллоя, принцип устройства которого представлен на рисунке 16.4.2.

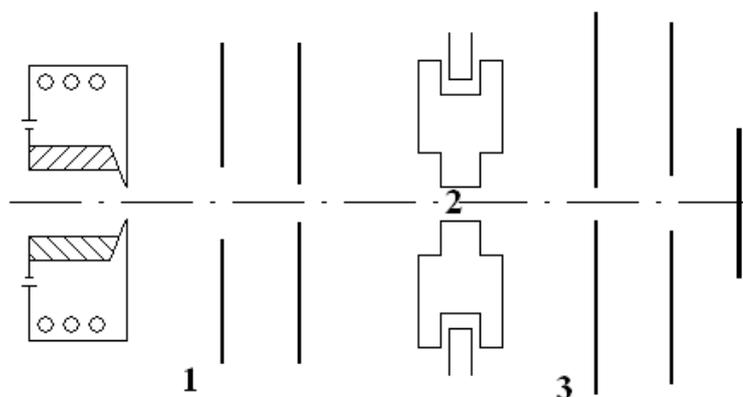


Рисунок 16.4.2 – Источник ионов с ионизацией электронным ударом
1 – электронный прожектор; 2 – область ионизации; 3 – зона ускорения ионов.

Пары пермаллоя создаются в области 2 за счет нагрева испарителя от автономного нагревателя. Пары металла ионизируются электронами, эмиттируемыми термокатодом и ускоряющим в системе анодов. Извлечение ионов производится через отверстие в катоде. Источник успешно использовался для получения пленок пермаллоя методом ионного осаждения, однако ионные источники такого типа по эффективности значительно уступают плазменным источникам и из-за сложности конструкции широкого использования не получили.

16.5 Плазменные источники ионов с использованием испарения чистых веществ

В источниках ионов тугоплавких элементов на основе испарения рабочего вещества для ионизации паров могут использоваться дуговой разряд, тлеющий разряд, разряд с осцилляцией электронов в магнитном поле и некоторые другие виды разряда. Ионный источник такого типа должен содержать испаритель, разрядную камеру и систему извлечения и формирования потока ионов. Конструктивно источники изготавливаются с испарителями, расположенными вне разрядной камеры, с испарителями, совмещенными с разрядной камерой, или находящимися внутри разрядной камеры, а нагрев рабочего вещества может осуществляться путем теплового излучения, электронной бомбардировкой и другими методами.

Принципиальная схема устройства источника ионов с испарителем вне разрядной камеры с дуговым разрядом показана на рисунке 16.5.1.

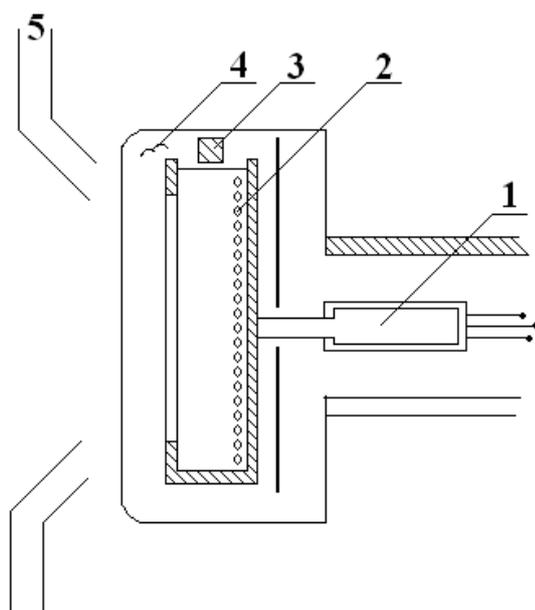


Рисунок 16.5.1 – Источник ионов

1 – испаритель; 2 – парораспределитель-анод; 3 – катод; 4 – вольфрамовая спираль; 5 – электроды системы экстракции.

Пары рабочего вещества из испарителя поступают в парораспределитель и разрядную камеру, образованную трубчатым анодом и катодом в форме вольфрамового блока 3, нагреваемого бомбардировкой электронами, эмиттируемыми вспомогательным катодом 4. Атомы рабочего вещества ионизируются в плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом. Извлечение ионов из плазмы осуществляется с помощью электродов 5 через щель в аноде шириной 2 – 8 мм и высотой 120 – 360 мм. Из такого источника получены пучки ионов тугоплавких металлов с током до сотен миллиампер, при коэффициенте использования вещества от 5 до 50 %. Это достигнуто благодаря высокой температуре разрядной камеры и большой степени ионизации паров рабочего вещества. Испаритель, паропровод, парораспределитель и разрядная камера выполнены из не взаимодействующих с рабочим веществом материалов.

Представляют интерес конструкции источников с полым термокатодом, который одновременно является испарителем, схематически представленные на рисунке 16.5.2.

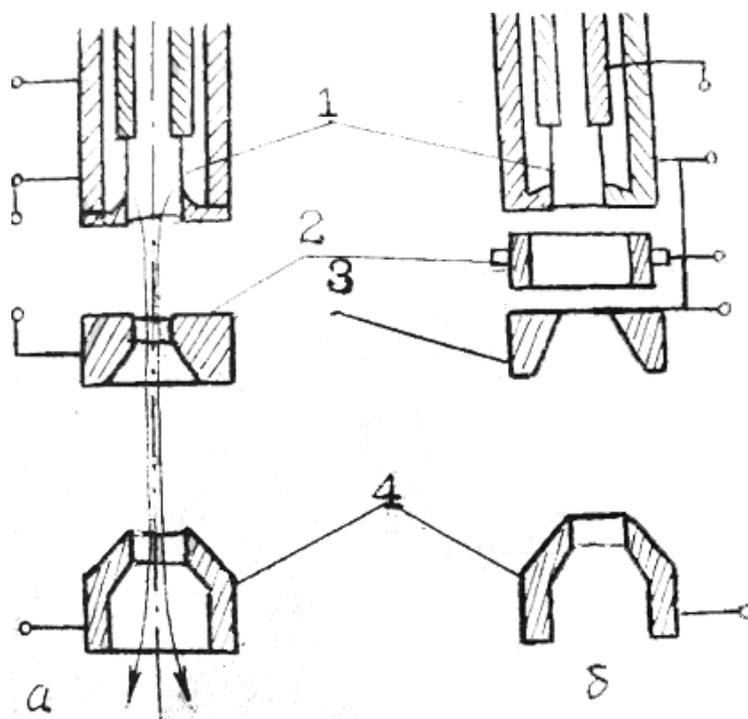


Рисунок 16.5.2 – Источник ионов с полым катодом

(а) – с прямым разрядом; (б) – с разрядом Пеннинга;

1 – трубчатый термокотод; 2 – анод; 3 – отражатель электронов; 4 – экстрактор.

В той и другой конструкциях испаритель нагревается пропусканием тока и пары рабочего вещества поступают в разрядную камеру. В первом варианте (а) разряд зажимается между трубчатым катодом и плоским анодом, в котором выполнено отверстие для выхода ионов. Во второй конструкции источника (б) используется разряд с осцилляцией электронов в магнитном поле. Ионы извлекаются из плазмы разряда с помощью электрода 4. для повышения степени ионизации на область разряда накладывается неоднородное магнитное поле.

В данных источниках испаритель максимально приближен к разрядной камере и фактически совмещен с полым катодом. Несмотря на относительную простоту конструкции эти источники не получили широкого распространения из-за невысокого коэффициента использования рабочего вещества, обусловленного конденсацией паров на холодных деталях. Для повышения этого коэффициента необходимо поддерживать температуру

деталей разрядной камеры на уровне, при котором исключается конденсация паров рабочего вещества.

Примером изотермического источника ионов с испарителем, размещенным в разрядной камере является источник, схематическое изображение которого приведено на рисунке 16.5.3.

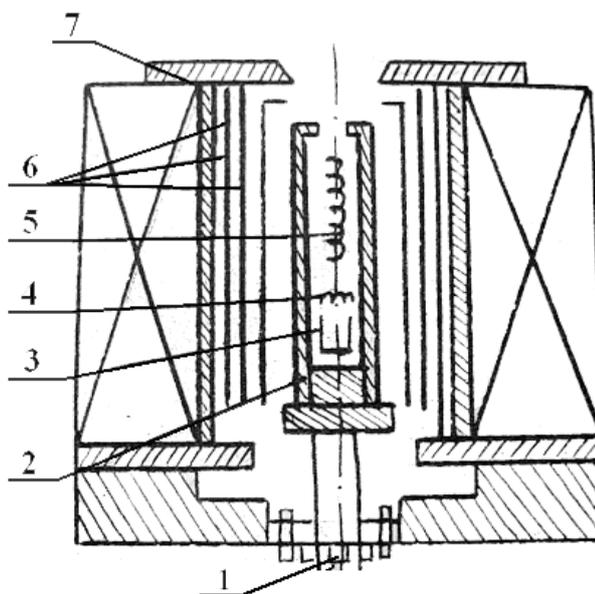


Рисунок 16.5.3. – Источник ионов с испарителем внутри камеры

1 – натекаТЕЛЬ; 2 – анод; 3 – тигель; 4 – катод; 5 – нагреватель;
6 – тепловые экраны; 7 – экстрактор.

Тигель (испаритель), выполненный из материала не взаимодействующего с рабочим веществом, помещен внутри цилиндрического анода. Над тиглем установлен вольфрамовый катод, выполняющий одновременно роль нагревателя рабочего вещества. Анод во время работы нагревается до высокой температуры за счет излучения нагревателя 5. благодаря трем тепловым экранам, расположенным вокруг анода, обеспечивается хорошая стабилизация теплового режима разрядной камеры в широком интервале температур от 200 до 1600⁰С. Для повышения степени ионизации разрядная камера помещена в продольное магнитное поле. Ток пучка ионов цинка при отверстии в аноде 3,2 мм достигал 60 мка. Источник имеет малые размеры, прост по конструкции, достаточно долговечен и обладает сравнительно большим коэффициентом использования рабочего вещества.

Нагрев рабочего вещества может осуществляться не только посредством теплоизлучения от нагревателя или пропусканием тока, но и за счет бомбардировки электронами, эмиттируемыми вспомогательным катодом или отбираемыми из плазмы разряда. В том и в другом случае испаритель может быть совмещен с разрядной камерой. При нагреве электронами в системе с термокатодом источник имеет большую гибкость с точки зрения управления температурным режимом, но требует более сложных электрических схем питания.

Источники ионов с нагревом испарителя электронами из разряда обходятся более простыми схемами питания, но имеют меньше степеней свободы при регулировании режима работы.

Конструкция источников ионов некоторых тугоплавких элементов, для создания необходимого давления пара которых достаточна температура, не достигающая температуры плавления, может быть упрощена благодаря тому, что в качестве испарителя может использоваться одна из деталей разрядной камеры, нагреваемая электронной бомбардировкой. На рисунке 16.5.4 показан принцип устройства источника ионов углерода.

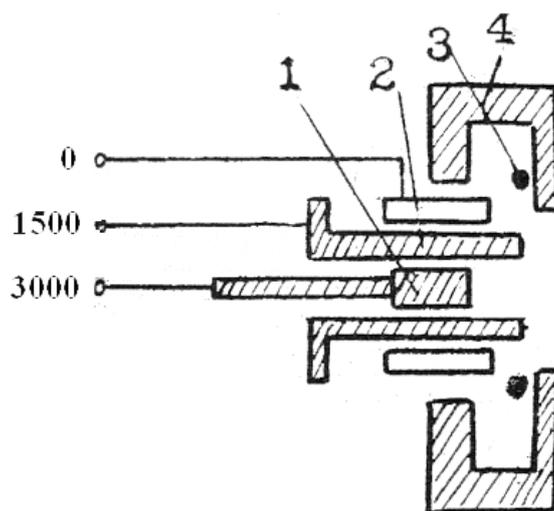


Рисунок 16.5.4 – Источник ионов углерода

1 – графитовый анод-испаритель; 2 – графитовый эмиттер; 3 – вольфрамовая спираль; 4 – экран.

Источник состоит из графитового трубчатого катода 2, нагреваемого бомбардировкой электронами, эмиттируемыми вольфрамовой спиралью 3, и стержневого графитового анода-испарителя, нагреваемого электронами с катода. Такая сложная система получения электронов для нагрева анода и ионизации атомов углерода объясняется необходимостью экранирования вольфрама от прямого попадания атомов углерода, активно реагирующих с вольфрамом и сокращающих срок службы источника. В рабочем режиме при температуре анода 2900°C получен ток ионов углерода до 400 мка. Источник ионов с нагревом анода-испарителя за счет энергии разряда создан на основе разряда с осцилляцией электронов в магнитном поле. Анод разрядной камеры Пеннинговского разряда, будучи выполненным из рабочего вещества (Ni,Fe,Cu), нагревается до температуры, достаточной для поддержания давления паров на уровне 10^{-3} тор за счет электронной бомбардировки непосредственно в разряде. Извлечение ионов производится через отверстие в катоде. В таком источнике получен пучок ионов никеля с током до 100 мка.

На принципе нагрева анода разрядной камеры предложены источники ионов, генерирующие пучки ионов сложного состава, содержащие ионы нескольких элементов, с регулируемым процентным содержанием той или иной компоненты.

16.6 Плазменные источники ионов тугоплавких элементов с катодным распылением рабочего вещества

Для получения рабочего вещества в атомарном состоянии используется катодное распыление ионами непосредственно в разряде. В таких источниках могут использоваться главным образом высоковольтные формы разряда, когда распыляемое рабочее вещество подвергается бомбардировке ионами высоких энергий, при которых коэффициент катодного распыления имеет большее значение. Известны источники ионов тугоплавких элементов, в которых используется дуговой разряд с накаливаемым катодом, разряд с полым анодом, магнетронный разряд, разряд с

осцилляцией электронов в магнитном поле и некоторые другие формы разряда.

В источниках с термокатадами дуговой разряд обычно горит при сравнительно низких падениях, поэтому для увеличения энергии бомбардирующих ионов на распыляемую мишень подается отрицательный потенциал 300 – 2000 В. Этот прием используется также и в источниках с другими видами разряда.

На рисунке 16.6.1 приведена конструкция ионного источника с дуговым разрядом с термокатодом.

Источник состоит из разрядной камеры, образованной графитовым трубчатым анодом 1 и нагреваемой вольфрамовой спиралью 2, выполняющей роль катода. Распыляемый материал 3 укреплен на изолированном охлажденном держателе и находится под потенциалом 2 кВ. Извлечение ионов производится через отверстие в аноде полем электрода 4. В разрядной камере между анодом и катодом поддерживается разряд. Ток накала создает сильное магнитное поле, контрагирующее плазму. Под действием поля распыляемого материала (мишень) ионы из плазмы разряда направляются на мишень и распыляют ее. Постепенно снижая парциальное давление газа и поддерживая ток разряда путем регулировки накала катода можно получить разряд практически в парах металла. Источник имеет сравнительно простую конструкцию и достаточно надежен в работе.

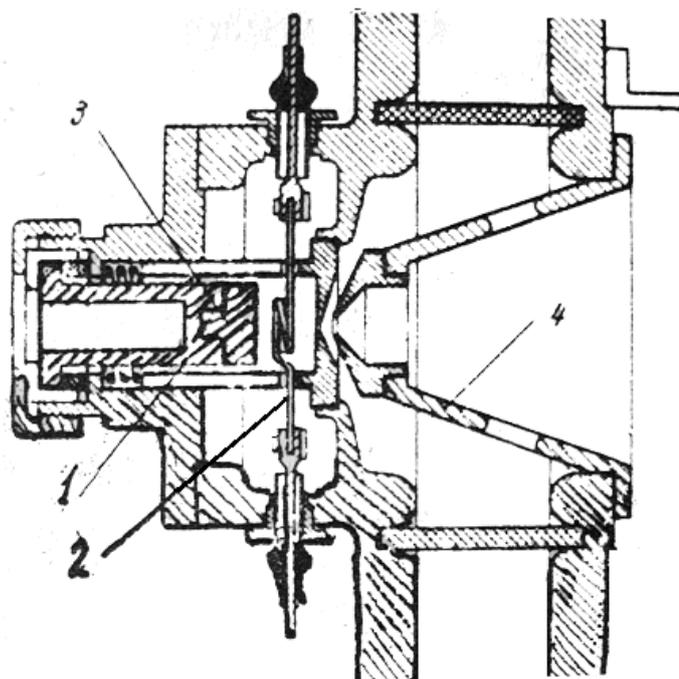


Рисунок 16.6.1 – Источник ионов с катодным распылителем

1 – графитовый анод; 2 – катод; 3 – распыляемый электрод; 4 – экстрактор.

Источник использовался для получения ионов железа, серебра, золота и алюминия. Источник ионов с катодным распылением рабочего вещества с осцилляцией электронов в магнитном поле имеет более сложную конструкцию за счет введения нагревателя анода и анодных экранов. Распыляемое вещество закреплено на катоде. Около противоположного катода, в котором выполнено отверстие для выхода ионов, расположен нагреваемый катод из вольфрамовой спирали. В этом источнике получен ток ионов металла от 50 до 100 мка.

В источнике ионов, изображенном на рисунке 16.6.2 используется разряд с осцилляцией электронов в магнитном поле с катодным распылением рабочего вещества и одновременным его испарением с анода испарителя. Благодаря тому, что рабочее вещество нанесено на оба катода и на анод в разрядной камере сравнительно быстро устанавливается необходимое давление паров рабочего вещества и разряд поддерживается в этой атмосфере. Применение постоянного магнита, полюсные наконечники которого по существу являются катодами разрядной камеры позволило

существенно снизить энергоемкость источника и упростить схему питания. Но это привело к уменьшению возможности регулирования режима разряда и управления параметрами тока пучка.

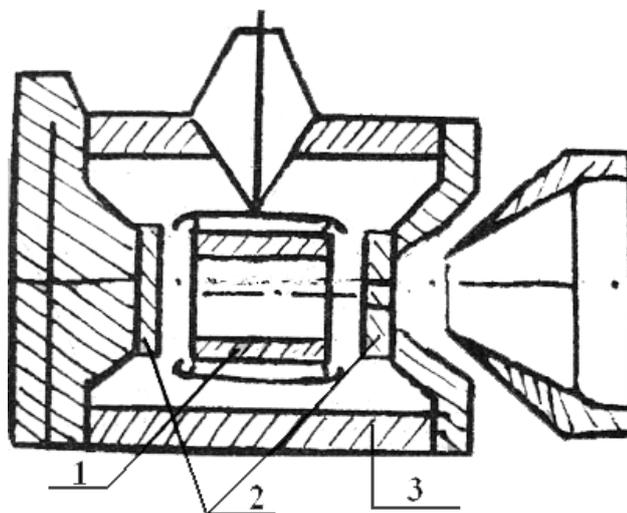


Рисунок 16.6.2 – Источник ионов металлов

1 – анод-испаритель; 2 – рабочее вещество; 3 – постоянный магнит.

Эффективный нагрев анода и распыление катода возможны в режиме высоковольтного разряда в сравнительно узком диапазоне давлений. Вторым недостатком источника является большой разброс энергий ионов, генерируемых источником. Из-за этих недостатков источник применяется для решения сравнительно узкого круга задач ионной технологии, к которым можно отнести очистку поверхности, нанесение пленок методом ионного осаждения, легирование полупроводниковых материалов на установках, массфилтры которых не критичны к разбросу ионов по энергиям.

Сравнительно большой ток ионов получен в источнике с катодным распылением в разряде газометрона, принцип устройства которого показан на рисунке 16.6.3.

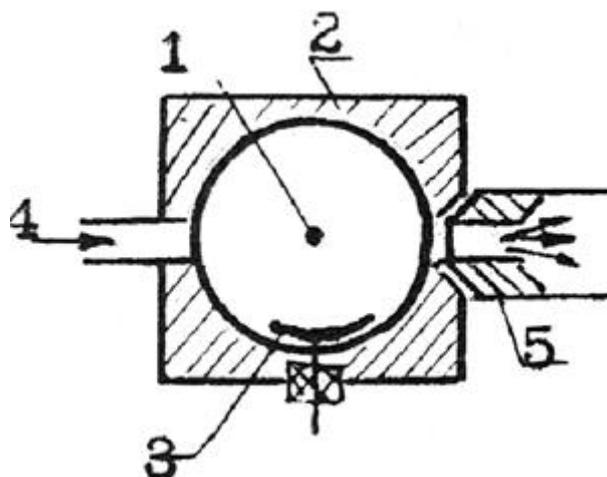


Рисунок 16.6.3 – Газомагнитронный источник ионов

1 – вольфрамовый катод; 2 – анод; 3 – распыляемый электрод; 4 – напуск аргона; 5 – ускоряющий электрод.

Источник наполнен аргоном и находится в магнитном поле. Между графитовым анодом и вольфрамовым катодом зажигается разряд с током несколько ампер в докритическом режиме при напряжении несколько сотен вольт. При этом на пластину, изготовленную из рабочего вещества, под действием приложенного к ней отрицательного потенциала 800 В поступают ионы аргона, вызывая интенсивное распыление ее поверхности. Распыленные атомы ионизируются в разряде и вместе с ионами аргона извлекаются через щель в аноде сечением $2 \times 50 \text{ мм}^2$. Этими же авторами предложен другой вариант источника, в котором катод покрыт распыляемым веществом или его тугоплавким соединением. Эффективность распыления при этом существенно увеличивается. В источнике получены пучки ионов ирридия, никеля, лантана и других элементов с током 50 – 200 мкА.

Для получения ионов тугоплавких элементов в принципе может быть использован эффект ионизации распыленных частиц бомбардирующими ионами. Но эффективность этой ионизации очень мала. Так при бомбардировке поверхности твердого тела ионами аргона с энергией 10 – 12 кВ среди распыленных частиц имеются ионы бомбардируемой мишени, ток которых при токе первичного потока 1 мА составлял 0,01 мкА. Принцип получения паров рабочего вещества посредством катодного распыления

может быть использован в источниках радиально-сходящихся и радиально-расходящихся ионных пучков. В источниках этого типа применяются кольцевые разрядные камеры, в которых плазма локализована в кольцевом объеме, а распыляемый материал может быть нанесен на катодный электрод по всей кольцевой поверхности. Устройство одного из таких источников схематически показано на рисунке 16.6.4. Кольцевой катод 2 имеет коробчатое сечение со щелью в центральной части для выхода ионов. Распыляемый материал укреплен на цилиндрической части катодного электрода вблизи щели по обе стороны от нее на участках, подвергаемых наиболее интенсивной бомбардировке.

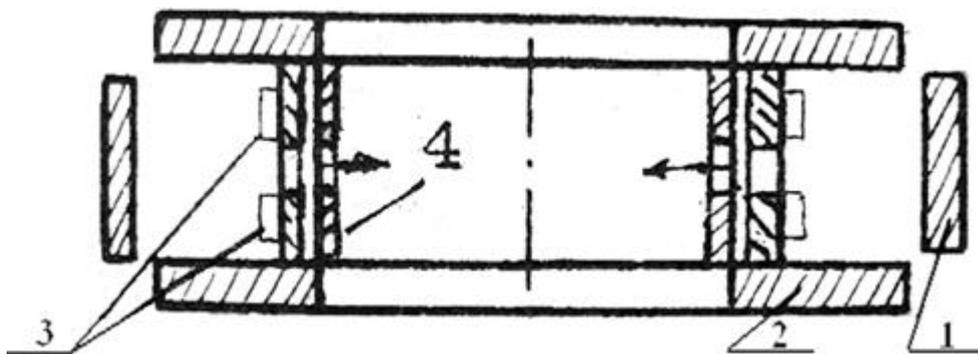


Рисунок 16.6.4 – Источник радиально-сходящегося ионного потока
1 – анод; 2 – катод; 3 – распыляемый материал; 4 – ускоряющий электрод.

По мере распыления повышается парциальное давление паров и доля ионов рабочего вещества в пучке, извлекаемом из разрядной камеры экстрактором, увеличивается. Эффект распыления может быть усилен, если на держатель распыляемой мишени подать отрицательный потенциал, как это делается в рассмотренных выше источниках. По аналогичному принципу могут быть созданы источники радиально-расходящихся ионных потоков.

16.7 Источники ионов с использованием процессов диссоциации химических соединений твердых веществ

При столкновении электронов или ионов с молекулами сложных химических соединений наряду с процессами возбуждения и ионизации происходит диссоциация этих соединений с последующей ионизацией компонент. Это принцип используется для получения ионов тугоплавких

соединений. Если элемент не образует газообразных соединений то его ионы могут быть получены за счет диссоциации и ионизации паров жидкости или легкоплавких соединений. В ионных источниках такого типа могут использоваться для диссоциации и ионизации различные виды разряда, широко применяемые в источниках ионов газов. Пучки ионов, генерируемые такими источниками, содержат кроме ионов необходимого тугоплавкого элемента ионы сопутствующих элементов, входящих в состав диссоциируемого соединения, и ионы остаточного газа. Это является одним из недостатков источников, тем не менее такие источники широко используются в различных установках, особенно в установках, с массфилтрами, в которых так или иначе происходит выделение ионов нужной массы.

В некоторых типах ускорителей и ионно-лучевых установок применялись высокочастотные ионные источники.

16.8 Источники ионов на основе вакуумного дугового разряда с расходуемым катодом

16.8.1 Широкоапертурный источник ионов металлов

Схема широкоапертурного источника ионов металлов, изображена на рисунке 16.8.1., а на рисунке 16.8.2. представлены осциллограммы ускоряющего напряжения, тока дуги и тока коллектора. Катод *K* ионного источника $\varnothing 4 \div 10$ мм изготовлен из металла, ионы которого необходимо ускорить. Он расположен внутри керамического изолятора *И*, охваченного кольцевыми поджигающим электродом *ПЭ*. Аксиально катоду расположен анод *A* и извлекающий электрод *ИЭ*, имеющие внутреннее отверстие $\varnothing 100 \div 200$ мм. Анод и *ИЭ* образуют фокусирующую диодную систему.

Импульсный дуговой разряд создается при подаче напряжения ~ 3 кВ между катодом и анодом. Для облегчения зажигания разряда используется предварительный разряд длительностью ~ 1 мкс (5 кВ) по поверхности керамического изолятора между катодом и поджигающим электродом ($\varnothing 10$ мм).

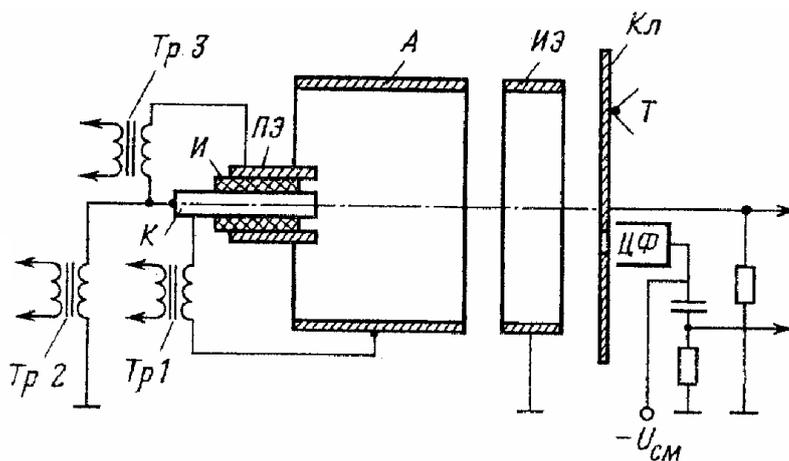


Рисунок 16.8.1 – Схема дугового источника ионов

К- катод; И- керамический изолятор; ПЭ – поджигающий электрод; А- анод; ИЭ- извлекающий электрод; Кл- коллектор; ЦФ- коллимированный цилиндр Фарадея; Т- термопара; Тр1 – Тр3- импульсные трансформаторы с коэффициентами трансформации 1:1, 1:10 и 1:1 соответственно.

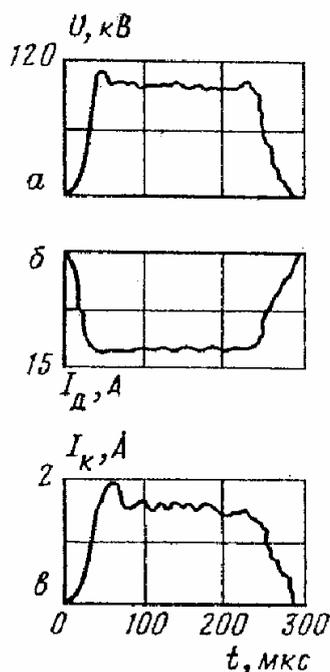


Рисунок 16.8.2 – Осциллограммы: а- ускоряющего напряжения; б- тока вакуумной дуги; в- тока коллектора

Исследования проводились при ускоряющем напряжении $U = 20 \div 150$ кВ, длительности импульса ускоряющего напряжения $t \leq 800$ мкс (дальнейшее увеличение длительности импульса нежелательно из-за

разогрева катода и увеличения в ионном пучке капельной фракции материала катода), частоте следования импульсов от единичных до 50 Гц, токе вакуумной дуги $I_d \sim 2 \div 30$ А, длине ускоряющего промежутка $15 \div 40$ мм. Процентное соотношение ионов материала катода различной зарядности в пучке приведено в табл. 16.8.1, а полный элементный состав пучков представлен в табл. 16.8.2. Наличие в составе пучка ионов водорода и углеводородов связано с использованием паромасляной системы откачки и малой частоты срабатывания источника, что приводит к образованию масляной пленки на катоде. Известно, что вакуумно-дуговые источники позволяют получать ионные пучки высокой чистоты. Поэтому следует ожидать, что с увеличением частоты срабатывания источника исчезнут условия для образования масляной пленки на катоде и соответственно уменьшится доля углеводородов в пучке. Отметим, что ионный источник позволяет получать ионы практически любого твердого проводящего материала, причем это могут быть не только металлы, но и различные композиционные материалы. Различия в потенциалах ионизации и энергии парообразования могут приводить также к получению ионов неметаллов, входящих в состав катода. Параметры ионного пучка определяются мощностью источников питания и электрической прочностью проходного изолятора, но даже достигнутые параметры ($U \sim 130$ кВ, $I_i \sim 2$ А, $t \sim 300$ мкс, $f \sim 10 \div 50$ Гц) позволяют облучать образцы дозой $\approx 10^{17}$ ионов/см² на площади до 300 см² за время $5 \div 15$ мин.

Таблица 16.8.1 – Процентное соотношение ионов материала катода различной зарядности в пучке

Материал катода	Зарядность иона		
	+1	+2	+3
Магний	48	52	-
Титан	39	56	5
Медь	27	52	21
Рений	34	41	25

Таблица 16.8.2 – Процентное соотношение ионов материала катода различной зарядности в пучке (полный список)

Материал катода	Mg	Ti	Cu	Re	H +1	H ₂ +1	CH ₄ +1	B+1
Магний	72	9	-	-	2	6	11	-
Титан	-	81	-	-	2	7	-	10
Медь	-	-	79	-	5	6	10	-
Рений	-	-	-	77	3	8	12	-

16.8.2 Технологический источник для ионной имплантации “Радуга”

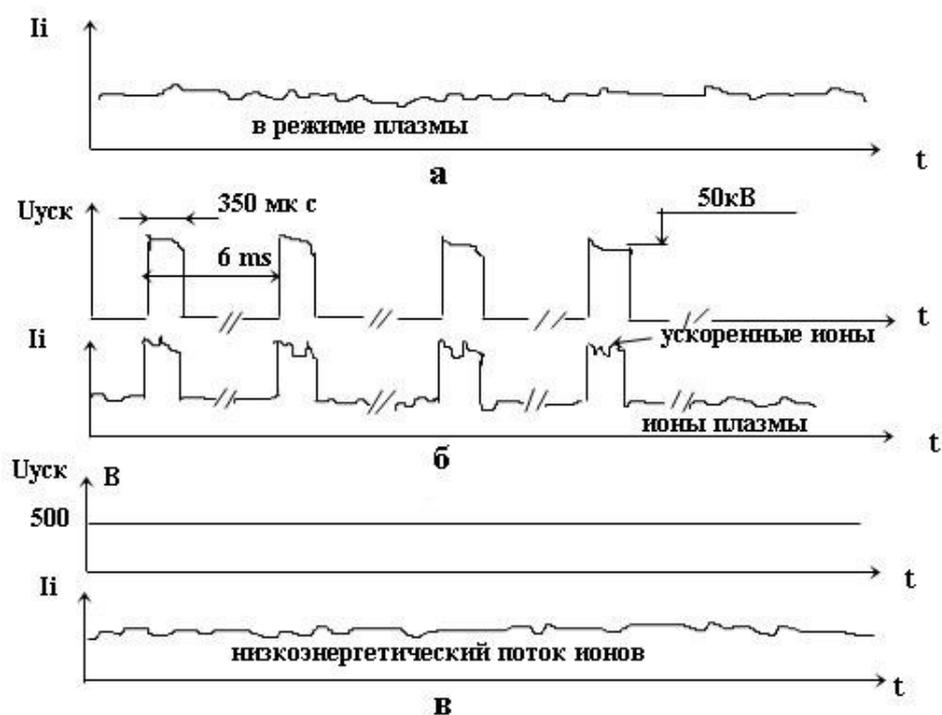


Рисунок 16.8.3 – Осциллограммы токов и напряжений

В источнике ионов “Радуга-4” длительность импульса ускоряющего напряжения варьировалось в пределах 50-200 мкс, в то время как длительность импульса дугового разряда достигает 1000 мкс. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали преимущества применения ионно-плазменного режима для высококонцентрационной имплантации. Решение проблем ограничения ресурса работы и мощности источника в совмещенном ионном и плазменном режимах генерации плазмы с импульсно-периодическим ускорением ионов позволило формировать адгезионнопрочные покрытия на металлах, керамике, стекле, полупроводниках. Однако, вариант подачи импульсно-периодического ускоряющего потенциала на обрабатываемую деталь не позволял реализовать режим чистой имплантации при умеренных и средних мощностях ионного пучка. Кроме того, наличие в плазменном потоке значительной доли микрокапельной фракции и нейтральной компоненты создавало реальные препятствия для использования этого подхода с большинством катодов, особенно легкоплавких.

В настоящее время разработана новая модификация многофункционального источника ионов и плазмы “Радуга-5”. Для очистки плазмы от микрокапельной фракции в источнике применен, разработанный в НИИ ЯФ, плазменный фильтр. Формирование пучков ускоренных ионов осуществляется при подаче импульсного или непрерывного ускоряющего напряжения. В непрерывном режиме формируется пучок ускоренных ионов с энергией до 1,5 кэВ. В режиме формирования импульсных пучков ускоренных ионов к источнику прикладывается ускоряющее напряжение амплитудой до 50 кВ, при частоте следования импульсов до 170 имп/с и длительностью импульсов 200-350мкс.

Совокупность подходов, заложенных при разработке источника ионов и плазмы “Радуга-5”, не имеет ограничений по средней и импульсной мощности, достигаемой в ионном пучке.

Имеющийся генератор позволяет формировать импульсные пучки ускоренных ионов с током до 3 А. На стадии завершения разработка импульсного генератора с током в импульсе до 10 А.

Технологические возможности источника “Радуга-5” включают:

- высокопроизводительную ионно-лучевую обработку изделий в полупромышленных и промышленных масштабах;
- высокопроизводительную высококонцентрационную имплантацию изделий различного назначения;
- очистку поверхности, разогрев образцов, нанесение покрытий пучками ионов с энергией до 6 кэВ.

16.8.3 Источник MEVVA

Источник MEVVA Пб - новый вид источника, в котором в качестве плазменной среды, из которой вытягиваются ионы, используется вакуумная дуга в парах металла. Этот источник позволяет получить пучки ионов металлов с импульсным током более 1 А для множества материалов твердого электрода.

Схема источника MEVVA Пб показана на рис 16.8.3. В этом устройстве использована цилиндрически симметричная конфигурация. Плазма, созданная на катоде, протекает через центральное отверстие в аноде диаметром около 1 см и через дрейфовый промежуток, в несколько сантиметров, к вытягивающим сеткам. Для теплоотвода в катодную и анодную области подается охладитель (вода с низкой электропроводностью или фреон при работе с более высоким напряжением). Катодом является простой цилиндр, изготовленный из соответствующего материала, а поджигающий электрод расположен вокруг конца катода и отделен от него тонким (толщиной около 1мм) алундовым изолятором. Так как только передняя поверхность катода подвергается вакуумнодуговой эрозии, катод в целом не обязательно изготавливать из требуемого элемента. Так, передняя часть катода может представлять собой тонкую пластинку толщиной всего несколько миллиметров, которая укреплена, например, на массивном катодном держателе, изготовленном из нержавеющей стали. Поскольку плазма образуется только из материала катода, на котором располагаются катодные пятна, и фактически отсутствует вклад в процесс её образования от других деталей источника в зоне разряда, не очень существенно из каких материалов изготовлены, например, поджигающий электрод, изолятор поджигающего электрода и анод; тем не менее это должны быть материалы, пригодные для работы в вакууме и плазме. Точная геометрия узла поджигания является предметом разработок, предпринимаемых в настоящее время. Были испытаны катоды диаметром 1,3 – 13 мм разнообразной формы. В одном из хорошо работающих вариантов источника используется катод диаметром 6,4 мм с корундовым изолятором, приклеенным к нему замазкой на основе окиси алюминия (например, «Аремко» или «Зауерайзен»). Замазка предназначена для того, чтобы поджигающая искра была разрядом по поверхности, а не через вакуумный промежуток. Магнитная катушка, которая создает поле в области дуги, имеет простейшую конструкцию. Поле само по себе не требуется для работы

источника, однако служит для повышения эффективности (отношения тока пучка к току дуги) работы источника. Вытягивающая система имеет ускорительно – замедлительную конструкцию с большим количеством отверстий. Три сетки изготовлены из нержавеющей стали или алюминия толщиной около 0,08 мм и имеют 7 – 200 отдельных вытягивающих отверстий, каждое диаметром 1 – 5 мм. Максимальный ток пучка, который может быть создан источником, определяется вытягивающей системой и не ограничен поступающей плазмой. Таким образом, если в конкретном случае важно создать максимальный возможный ток пучка, то конструкция вытягивающей системы является решающим обстоятельством и определяет предельный ток

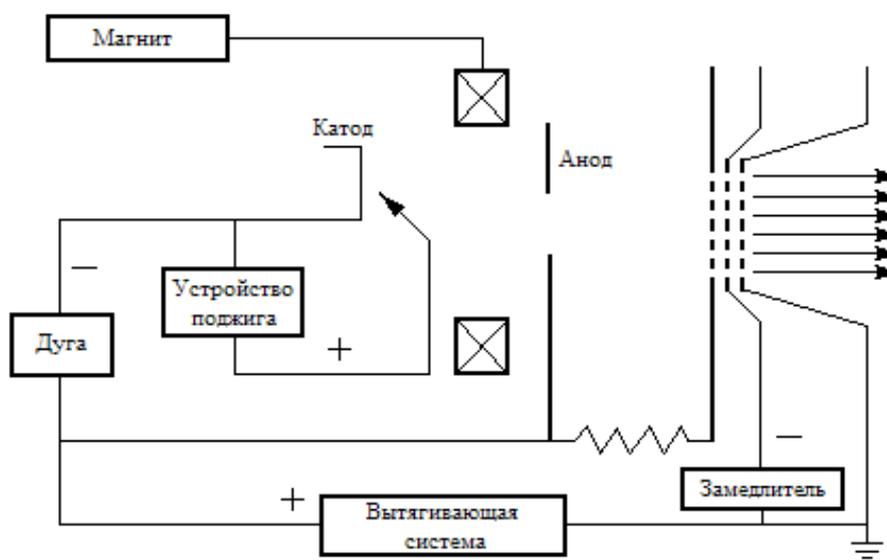


Рисунок 16.8.3 – Электрическая схема источника MEVVA

16.8.4 Тип ионов

Источник работал с использованием разнообразных катодных материалов, включая Li, C, Mg, Al, Si, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, In, Sn, La, Gd, Ho, Hf, Ta, W, Pt, Au, Pb, Th, U, LaB₆, CdSe, FeS, PbS, SiC, TiC и WC. Все эти материалы дают интенсивные пучки – с током в сотни миллиампер при типовых условиях работы. Мягкие материалы, подобные Li, Sn и Pb, обычно работают меньше время до того момента, когда возникает необходимость в ремонте из – за проблем с поджиганием

вследствие отложения материала на изоляторе узла поджигания. Однако время работы до ремонта зависит от режима работы источника (например, тока дуги и длительности импульса). Катоды, изготовленные из химических соединений, дают пучки, содержащие ионы составляющих элементов. Интересно отметить, что пучки, содержащие неметаллические элементы (бор и серу) можно получить, используя электроды из проводящих соединений, в составе которых содержится неметалл.

16.8.5 Универсальный ионно – плазменный источник

На рисунке 16.8.5 представлена конструкция универсального широкоапертурного источника. Он состоит из дискового катода 2 толщиной 4 мм, в центре которого имеется отверстие диаметром 6 мм, поджигающего электрода, керамического изолятора 3 (пиронитрид бора), цилиндрического анода 6 и извлекающего электрода 7.

Катод 2 закреплен на катододержателе с помощью накидной гайки, что облегчает операцию по его замене. Керамический изолятор 3, имеющий как и катод 2 форму диска (\varnothing внеш. < 35 мм, \varnothing внутр. 3-4 мм, толщина $\delta = 3$ мм) установлен между катодом и поджигающим электродом ($\delta = 6$ мм). Для облегчения хорошего механического контакта между этими электродами, поджигающий электрод закреплен на сильфоне. Необходимое усилие сжатия обеспечивается за счет разности давлений внутри сильфона (атмосферное) и снаружи него ($10^4 - 10^5$ Тор). Анод источника, имеющий форму полого цилиндра ($\varnothing = 200$ мм), изготовлен из листовой нержавеющей стали ($\delta = 1-2$ мм). Внутри него, ближе к катоду, установлена металлическая диафрагма, закрытая редкой металлической сеткой, а на эмиссионном отверстии закреплена сетка 8, имеющая коэффициент проницаемости 90%.

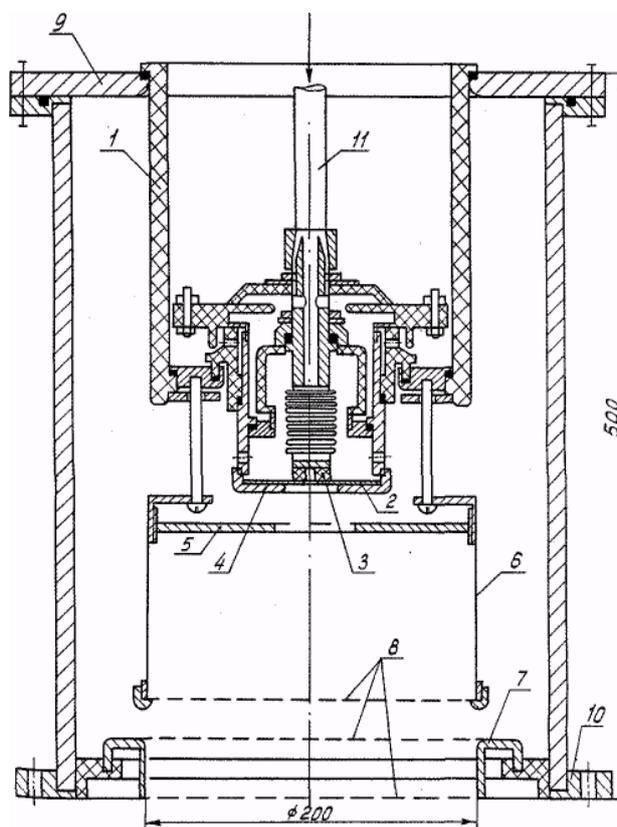


Рисунок 16.8.5 – Схематическое изображение универсального устройства
 1- изолятор; 2- катод; 3- изолятор; 4- катододержатель; 5- диафрагма; 6- анод;
 7-извлекающая система; 8- сетки; 9,10- фланец; 11- маслопровод

Все электроды источника закрепляются на проходном изоляторе, изготовленном из капралона. Изолятор конструктивно выполнен таким образом, чтобы напряженность электрического поля в любой точке его рабочей поверхности не превышала 10 кВ/см.

Извлекающая система источника выполнена в виде двух скрепленных между собой металлических сеток 8 и закреплена на изоляторе в рабочей камере. Коэффициент проницаемости каждой сетки в отдельности составляет 80%. Между вакуумной камерой и трансформаторным баком устанавливается полый цилиндр, внутри которого проходят медные провода, которые соединяют электроды источника с соответствующими импульсными трансформаторами. Электрическая изоляция между проводами и стенками (150 кВ) цилиндра обеспечивается трансформаторным маслом, заполняющий внутренний объем цилиндра и проходной изолятор.

При работе универсального источника на его электродах выделяется мощность 1-2 кВт, что приводит к их разогреву. Отвод тепла осуществляется следующим образом. Масло по трубке подается в держатель поджигающего электрода. Затем через отверстия оно попадает в полость, ограниченную изолятором и катододержателем, и далее заполняет всю полость проходного изолятора. Охлаждение катода и анода осуществляется за счет процесса теплопроводности, а также их собственного теплового излучения.

Схема подсоединения электродов источника с блоками питания показана на рис. 16.8.6.

Перевод источника в режим плазменного напыления осуществляется сильноточным переключателем П1 (при положении, показанном на рис. 16.8.6). При этом ТР5 и линии L1C1 отключаются, а накопительные емкости C_H подключаются к дуговому трансформатору ТР4. При $C_H = 1000$ мкФ, заряжаемых до напряжения 350 В, импульс тока дугового разряда имеет колоколообразную форму, длительностью 1 мс и амплитудой $I_D < 1$ кА. Такие параметры разряда при частоте работы $f = 50$ Гц обеспечивают рост пленки на мишени площадью 300 см² со скоростью <200 нм/мин. Характерные осциллограммы сигналов в указанных режимах снятые при подключении к выводам источника питания эквивалентной активной нагрузки представлены на рисунке 16.8.7.

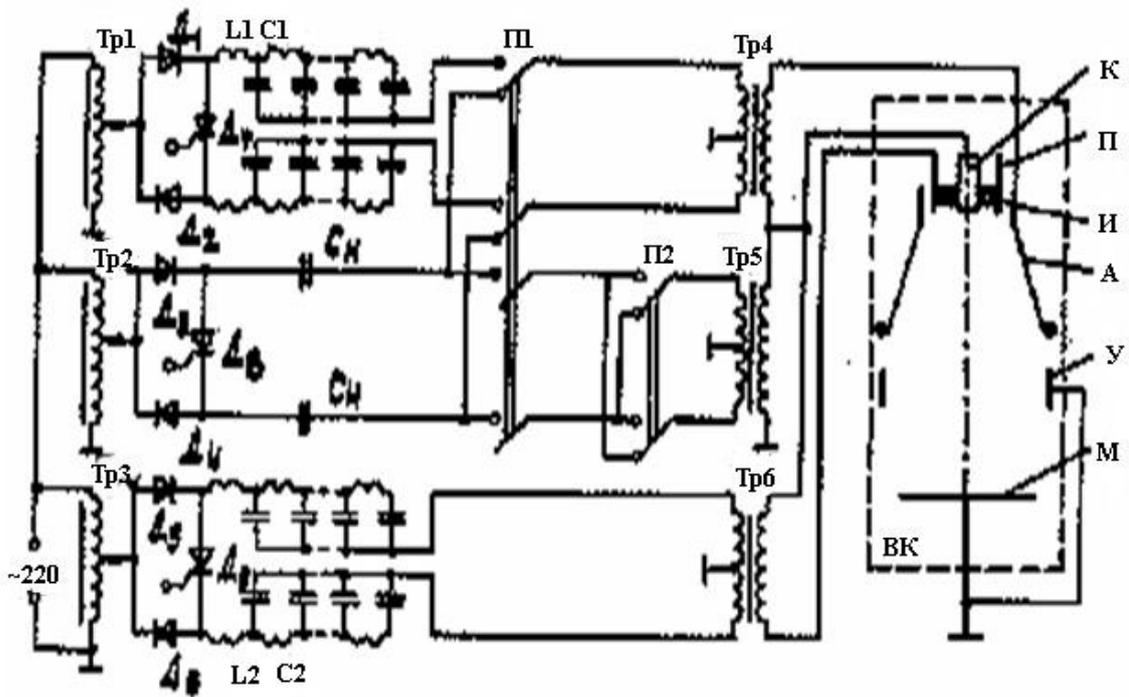


Рисунок 16.8.6 – Схема подсоединения электродов с источниками питания

В режиме генерации ионов универсальный источник должен обеспечивать получение ионных пучков с энергией $E_i < 150 \text{ кэВ}$, током ионов $I_i < 0,5 \text{ А}$ при длительности импульса $t_u \approx 300 \text{ мкс}$ и током дугового разряда $I_o < 60 \text{ А}$.

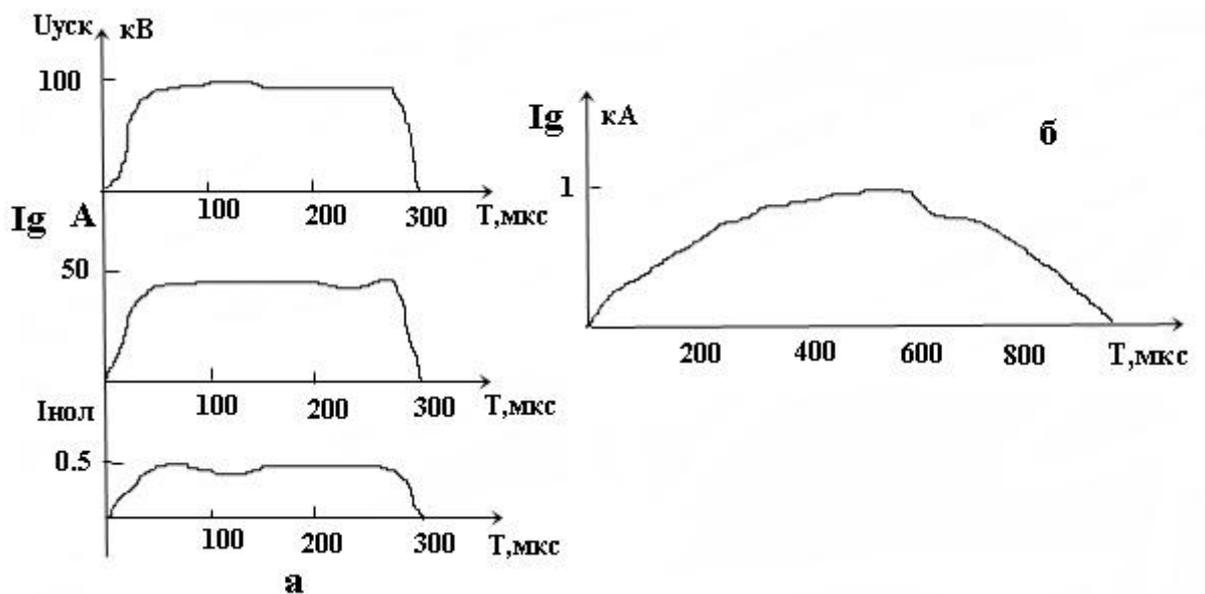


Рисунок 16.8.7 – Осциллограммы токов и напряжений а) режим имплантации; б) режим напыления

Перевод источника в режим генерации электронов осуществляется сильноточным переключателем П2 (переключатель П1 в режиме генерации ионов). При этом меняется направление тока разряда в первичной обмотке ТР5, соответственно на катод источника подается отрицательное напряжение и из плазмы дугового разряда извлекаются электроны. Коэффициент извлечения электронов из плазмы дугового разряда значительно больше, чем ионов ($I_i/I_D < 0,05$; $I_e/I_D < 0,5-0,9$). Соответственно при использовании конфигурации электродов, настроенных на ускорение ионов (величина ускоряющего промежутка 3 см) и минимальном токе стабильного горения дугового разряда $I_D \approx 30$ А переключение П2 приводит к увеличению извлекаемого тока, что при ограниченной мощности источника питания неминуемо приведет к снижению ускоряющего напряжения. Увеличить ускоряющее напряжение в режиме ускорения электронов можно за счет ограничения концентрации плазмы или площади эмиссии, либо деионизацией плазмы на сетках.

Разработанный универсальный источник может устанавливаться на серийные установки плазменного напыления типа «Мир» или ННВ-6.6-И1. При этом он выполняет как основные функции высокоэнергетической имплантации больших доз (10^{17} ион/см² за 5-15 минут) ионов практически любых металлов и сплавов, создание перемешанных ионными (или электронами) пучков напыленных слоев (200 нм/мин), так и подготовительные функции (очистка).

17. Взаимодействие лазерного излучения с веществом

Под излучением мы будем понимать электромагнитное поле, причем наибольший интерес для нас представляет поле от когерентных источников излучения. Именно благодаря взаимодействию электромагнитного излучения с веществом мы можем его обнаруживать, усиливать, генерировать, преобразовывать и т.д. Мы ограничимся изучением взаимодействия

излучения с веществом, находящемся в конденсированном состоянии, в частности, с твердыми телами.

17.1 Классификация процессов взаимодействия излучения с веществом

Схему взаимодействия излучения с веществом можно условно представить в следующем виде (рис.17.1).

Входное излучение может представлять как монохроматическую плоскую волну, так и поле, представляющее суперпозицию плоских волн с различными направлениями распространения и частотами. Вы знаете, что любое поле может быть представлено в виде такой суперпозиции (вспомните фурье-анализ сигналов и фурье-оптику). Иногда это может быть излучение, локализованное во времени (например, импульс) или (и) в пространстве (например, гауссов пучок).

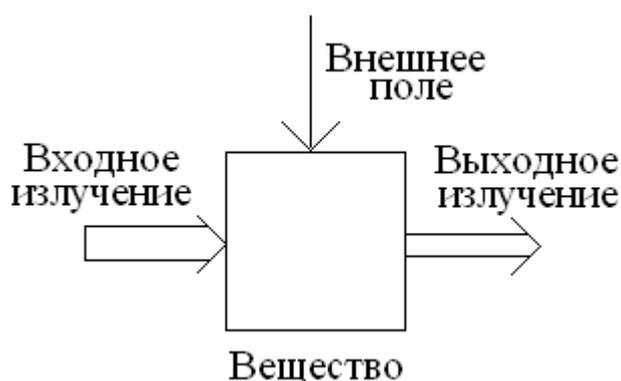


Рисунок 17.1 – Взаимодействие лазерного излучения с веществом

Мы полагаем, что на вещество могут действовать и некоторые низкочастотные внешние поля – электрические, магнитные, акустические, температурные и др. В основе многих устройств управления излучением лежит именно этот подход (электрооптические и акустооптические модуляторы, модуляторы на эффекте Фарадея и т.д.)

Нас интересует как выходное излучение, так и процессы, происходящие с веществом при взаимодействии. Дадим некоторую классификацию эффектов взаимодействия.

1. Воздействие вещества на излучение – какие-либо характеристики излучения на выходе отличаются от входных. Такие эффекты

известны людям давно – отражение света от водной поверхности, преломление света (изображение рыбы в воде не соответствует её действительному положению и др.). Ньютон с помощью призмы разложил белый свет в спектр, Эразм Бартолин в 1669 году наблюдал двулучепреломление света в кристалле исландского шпата – эти примеры можно продолжить бесконечно, поскольку вещество всегда действует на излучение каким либо образом.

2. Воздействие излучения на вещество – при облучении меняются параметры вещества, характеристики вещества, его форма, состояние и т.д. Простой пример – одежда хорошо высыхает на солнце. Она также выцветает на нем со временем. Сфокусированное солнечное излучение может прожечь бумагу, зажечь костер и т.д. Однако наибольшее развитие эффекты воздействия излучения на вещество, их исследования и приложения, получили после появления лазеров. Достижимые здесь плотности энергии позволяют вызвать в веществе как обратимые, так и не обратимые изменения. Примеры – динамические голограммы в фотохромных и фоторефрактивных материалах (обратимые); резка, сварка, сверление отверстий лазерным лучом (необратимые).
3. Эффекты самовоздействия – излучение действует на вещество, а изменение его свойств приводит к изменению параметров излучения. Примеры: самофокусировка и самодефокусировка световых пучков, распространение солитонов и т.д.

Описание эффектов взаимодействия излучения с веществом требует соединения знаний о веществе и о поле. В некоторых случаях появляется квантовая природа вещества – под действием поля происходят переходы между энергетическими уровнями частиц, из которых это вещество состоит. Обычно это имеет место при совпадении частоты излучения с частотой перехода, $\hbar \cdot \omega_{mn} = \varepsilon_m - \varepsilon_n$ (постулат Бора). Такие же эффекты происходят при межзонном поглощении в полупроводниках и диэлектриках, когда

рождаются электронно-дырочные пары, или при примесном поглощении, когда рождается электрон в зоне проводимости или дырка в валентной зоне. В этом случае зачастую приходится прибегать к квантово-механическому описанию: заменить физические величины соответствующими операторами (проквантовать состояние вещества), применять аппарат статистической физики. Если квантовая природа вещества не проявляется, то его проще рассматривать на основе классического описания, используя макроскопические характеристики, такие как диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, проводимость и т.д.

Поле можно рассматривать с позиций квантовой электродинамики, вводя операторы рождения и уничтожения фотонов, и используя другой формализм описания. Классическое описание поля предполагает использование уравнений Максвелла, хорошо вам знакомых. Когда речь идет о взаимодействии излучения с веществом, часто используют полуклассическое описание: вещество рассматривается как квантовая система и соответствующие физические величины заменяются операторами, а поле рассматривается классически, на основе уравнений Максвелла.

Многие эффекты воздействия вещества на свет можно рассматривать с позиций линейной электродинамики (линейной оптики), когда воздействием света на вещество пренебрегается. Однако при больших интенсивностях света отклик вещества становится нелинейным, то есть зависящими от поля становятся характеристики вещества. Такие эффекты рассматривает нелинейная оптика.

17.2 Классическое описание линейных оптических эффектов взаимодействия излучения с веществом

При классическом описании будем исходить из уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot}\bar{H} = \sigma \cdot \bar{E} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \quad (17.2.1)$$

$$\operatorname{rot}\bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (17.2.2)$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho, \quad (17.2.3)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0. \quad (17.2.4)$$

Для безграничных сред мы должны определить связь векторов поля \bar{E} , \bar{H} , \bar{D} и \bar{e} посредством материальных уравнений. В простейшем случае изотропной среды и в отсутствие дисперсии такая связь имеет вид:

$$\bar{D} = \varepsilon \cdot \bar{E}, \quad (17.2.5)$$

$$\bar{B} = \mu \cdot \bar{H}. \quad (17.2.6)$$

Наличие внешних полей приводит к тому, что даже изначально изотропная среда становится анизотропной. Поэтому связь между векторами поля дается тензорами второго ранга: $\hat{\varepsilon}$ - тензор диэлектрической проницаемости, и $\hat{\mu}$ - тензор магнитной проницаемости:

$$\bar{D} = \hat{\varepsilon} \cdot \bar{E}, \quad (17.2.7)$$

$$\bar{B} = \hat{\mu} \cdot \bar{H}. \quad (17.2.8)$$

Отметим, что вещество присутствует в уравнениях (17.2.1) – (17.2.8) именно через $\hat{\varepsilon}$ и $\hat{\mu}$ (или ε и μ). Для немагнитных сред, которые мы, как правило, будем рассматривать, тензор $\hat{\mu}$ имеет диагональный вид.

17.3 Структуро– и фазопреобразование лазерно-имплантированных слоев

17.3.1 Структурные изменения в металлах при наносекундном лазерном воздействии

Вопрос о структурообразовании при высоких скоростях ввода энергии в вещество интересно изучить сопоставляя результаты, полученные в неравновесных условиях при лазерной и ионной имплантации и при лазерном облучении ионно-имплантационных слоев.

Кристаллизация расплава и формирование микроструктуры при имплантационном плавлении:

- слой расплава поверхностный;

- сопутствующие эффекты: термомеханические процессы (напряжение), способные вызвать рождение дефектов и пластическую деформацию;
- внедрение посторонних атомов.

Процессы эпитаксиальной кристаллизации протекают в металлах с ГЦК (Al, Cu, NiPd, Rh) и с ОЦК-решеткой (Mo, W, Nb, Fe), нет эпитаксии Ti Be.

Эпитаксиальное восстановление кристаллической решетки в наносекундном лазерном излучении металлов сопровождается замораживанием в поверхностном слое большого количества дефектов.

Образование большого количества линейных дислокаций и их сплетений обнаружено в Ni.

Дислокации и их сплетения действуют как центры рекомбинаций, обуславливая аннигиляцию большинства замороженных вакансий и создавая тем самым трудности в определении плотности образующихся дефектов данного типа. При больших скоростях движения границы кристаллизации некоторые вакантные места (куда не произошло внедрение атомов и расплава) могут быть сохранены под следующим слоем кристалла. При этом за время наращивания нового слоя атом матрицы может смещаться по механизму диффузии в твердой фазе лишь на расстояние 10^{-4} нм, за время нагрева – менее 0,02 нс.

Анализ микроструктуры показал, что при облучении Al, не вызывающего плавления поверхностного слоя, в нем образуется в основном дислокации. В случае импульсного плавления в нем замораживаются главным образом дислокационные петли вакансионного типа. Размер петель 5–90 нм, при среднем размере 20 нм. Полное число вакансий, содержащихся в петлях не превышает $8 \cdot 10^{-3}$ %, несмотря на то, что равновесная концентрация вакансий вблизи температуры плавления достигает 0,1 %. Столь малое количество замороженных вакансий объясняется:

1. удалением дислокационных петель вследствие взаимодействия дислокаций с петлями;
2. миграцией вакансий и петель к свободным поверхностям из-за их подвижности в Al при комнатной температуре;

17.3.2 Кристаллизация расплава в условиях кипения

В ряде описанных исследований эпитаксиальная кристаллизация расплава наблюдается в условиях невозмущенной поверхности расплава, т.е. в отсутствии испарения или интенсивного кипения.

Есть примеры, когда она (эпитаксиальная кристаллизация) протекает и в условиях интенсивного кипения расплава и давлении паров на расплав. Импульсное лазерное воздействие на Cr приводит к изменению топографии поверхности. Следует отметить, что внедрение примесных атомов в поверхностный слой расплава с молекулами воздуха может приводить к существенным изменениям в структуре. В одной из работ отмечено, что при наносекундном облучении на воздухе алюминиевого образца образуется некристаллический (аморфный) слой толщиной 100 нм, связанный с внедрением примесных атомов в первую очередь азота, стабилизирующего аморфную фазу.

17.3.3 Создание аморфных поверхностных слоев.

Следует выделить структурообразование сплавов, склонных к аморфизации.

Скорость охлаждения при охлаждении струи расплавленного металла на вращающемся барабане 10^6 K c^{-1} .

При лазерном облучении скорость достигает 10^{11} K c^{-1} . при охлаждении расплава имеется идеальный контакт с основным металлом, который может играть роль зародыша в развитии процессов кристаллизации (характерные Ni-Cr, Ni-Ta, Zr-Cu).

В поверхностном слое Ni формируется полностью разупорядоченная структура до 250 нм. Глубина имплантированного сплава – 800 нм. Это

свидетельствует о том, что вначале идет эпитаксиальная кристаллизация с кристаллической структурой матрицы, но скорость кристаллизации меньше скорости охлаждения, поэтому вышележащий слой «застывает» как «переохлажденная» жидкость.

Влияет разница в скоростях охлаждения глубинных и поверхностных слоев. При лазерной имплантации меди в цирконий поверхностный слой состоит из аморфных областей и областей с микрокристаллической структурой.

При nano- и микросекундном лазерном плавлении условия создания стеклообразующих структур не всегда удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

Теплота смешивания является наиболее важным параметром в определении возможности получить аморфные фазы. Сказывается влияние скорости охлаждения на аморфизацию многослойных пленок.

На аморфизацию оказывают влияние термодинамические свойства элементов. Системы Au-Si, Ag-Si – имеют во многом схожие равновесные фазовые диаграммы, указывающие на склонность к аморфизации.

При лазерном оплавлении пленок Au-Si на сапфировой подложке аморфные фазы образуются практически во всем концентрационном интервале. В пленках Ag-Si в тех же условиях аморфная структура образуется только при 80 % Si.

17.4 Лазерная имплантация

При лазерной имплантации можно выделить следующие способы:

1. лазерным излучением воздействуют на систему пленка легирующего вещества - матрица (основной металл);
2. в расплавленный лазерным лучем слой материала (матрицы) инжектируются мелкие частицы легирующего материала.

Стадия имплантации по 1 способу включает:

1. Нанесение пленки легирующего вещества любым способом. Тонкие < 500 нм – напыление в вакууме, толстые – электролитическим осаждением.
2. Облучение системы пленка – матрица лазерным излучением не менее 3 кВт (CO₂ - лазер) на воздухе или в вакууме.
3. Перемешивание атомов пленки с расплавом.
4. Остывание с перемещением кристаллизирующегося слоя к поверхности.

Сканирование луча по поверхности с помощью поворота зеркала.

Параметры лазерных систем

- длина волны 0,53 до 10,6 мкм.
- -диаметр пятна от 0,1 до 10 мкм

17.5 Внедрение и массоперенос в зоне лазерного воздействия

Случай – теплофизические и термодинамические свойства сплавляющихся элементов предполагают простую реализацию процесса внедрения. Как имплантация в системах элементов смешиваемых в жидкой фазе с достаточно близкими теплофизическими свойствами (тугоплавкая пленка на легко плавной матрице), характер лазерного нагрева – максимум температуры на поверхности – должен способствовать одновременному плавлению пленки и матрицы. Справедлива упрощенная модель лазерного излучения: нагрев вещества, его плавление и перемешивание в расплаве, особенности лазерного излучения – сверх быстрый нагрев неоднородной системы (пленка-матрица) влияние теплового контакта между пленкой и матрицей, влияние начального коэффициента отражения, влияние прозрачного покрытия. На процессы внедрения и массы переноса влияет диаграмма состояния смешиваемых элементов.

Пример: пленка Au на Ni.

Использование Au в качестве пленки позволяет:

- исключить влияние химических процессов в зоне лазерного воздействия

- исследовать влияние коэффициента отражения на развитие процесса имплантации.

Лазерное облучение системы Au-Ni приводит к внедрению Au в Ni только когда плотность энергии превышает пороговое значение $P_{п}$ для конкретной толщины пленки. Оно определяется началом плавления Ni матрицы, что проявляется в микроскопическом изменении топографии ее поверхности.

После облучения $P < P_{пор} = 5 \text{ д.см}^{-2}$ происходит только оплавление пленки Au и нет внедрения атомов Au в Ni. пленка легко снимается с Ni.

Внедрение наблюдается только при одновременном расплавлении пленки и матрицы.

Эффективность внедрения связана:

- ✓ с потерями пленки на испарение и вскипание;
- ✓ с отражением излучения

Для уменьшения потерь на испарение предложено использовать излучения с меньшей λ или использовать дополнительную пленку с большим коэффициентом поглощения.

Повысить эффективность легирования можно, применив прозрачную пленку (жидкое стекло, воду и т.д.)

Неоднородный по глубине профиль распределения внедряемых атомов обусловлен ограниченным временем существования расплава имитирующим диффузионный перенос атомов легирующего вещества из поверхностной пленки.

Как правило, глубина диффузии таких атомов меньше, чем глубина плавления материала матриц. Для выравнивания однородности можно использовать многократное облучение систем, либо облучать многослойную систему, состоящую из чередующихся слоев пленки и матрицы.

Так при многократном облучении системы Pd-Ni образуется однородный профиль распределения Pd на глубину 200 нм.

Многослойная структура Cu – Cr – Cu позволяет получить достаточно однородный поверхностный сплав толщиной 240 нм с атомной концентрацией Cr 18%.

Исследования показали, что в результате лазерного воздействия происходит плавление гетероструктуры и приповерхностного слоя монокристаллической матрицы, после чего происходит эпитаксиальная кристаллизация сплава от границы раздела с матрицей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молоковский, С.И./ Интенсивные электронные и ионные пучки. //С.И. Молоковский, А.Д. Сушков - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 304с.
2. Комаров, Ф.Ф./ Ионная имплантация в металлы // Ф.Ф. Комаров - М.: Metallurgy, 1990. -200с.
3. Михайлов, М.М. // Основы электротехнологий // М.М. Михайлов Учебное пособие. - Томск:Изд. ТПУ, 1998.- 239с.
4. Семенов, А.П. /Пучки распыляющих ионов: Получение и применение. // А.П. Семенов Улан-Удэ: Издательство БНЦ СО РАН, 1999. - 207с.
5. Попов, В.Ф./ Процессы и установки электронной технологии. // В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин - М.: Высшая школа, 1988.- 200с.
6. Вендик,О.Г./ Корпускулярно-лучевая технология.// О.Г. Вендик, Ю.Н. Горин, В.Ф. Попов - М.: Высшая школа, 1984. - 175с.
7. Гришин, С.Д./ Ускорители плазмы.// С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов - М.: Машиностроение, 1983. - 150с.
8. Данилин В.С./ Магнетронные распылительные системы.// В.С. Данилин, В.К. Сыргин - М. Радио и связь, 1982.- 160с.
9. Плюто А.А./ Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг.// А.А. Плюто, В.Н. Рыжков, А.Т. Капин - ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 2, с. 494-507.
10. Dewis tf.D., Miller H.C. Analysis of the electrode products emitted by V.C. arcs in a vacuum ambient. - J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, N05, p. 2212-2221.
11. Аксенов, И.И., Хороших В.М./ Потоки частиц и массоперенос в вакуумной дуге.// И.И. Аксенов, В.М. Хороших Обзор. М.: ЦИИАтоминформ, 1984.
12. Iueu H.3.D., Owen H.A., Stewart I.W.L., Tall O.K. Vacuaro evaporation of refractory metale. - Rev.Sci.Instr., 1961, vol.32, Ho2, p. 113-117.
13. Гринвуд, А. /Применение вакуумной дуги.// А. Гринвуд - В кн.: Вакуумные дуги, П.: Мир, 1982, с. 385-426.
14. Аксенов, И.И. / Импульсные коммутирующие газоразрядные приборы с холодным катодом. - Обзоры по электронной технике.// И.И. Аксенов, В.А.

Белоус, А.И. Вишнеvский Серия: электровакуумные и газоразрядные приборы. М.: ЦНИИ "Электроника"; 1974, вып. 8.

15. Блинов, И.Г. / Вакуумные сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники.// И.Г. Блинов, А.М. Дороднов, В.Е. Минайчев - Обзоры по электронной технике. Серия: Микроэлектроника. М.: ЦНИИ "Электроника", 1974, вып. 7,8.

16. Толоч, В.Г., Падалка В.Г./ Методы плазменной технологии высоких энергий.// В.Г. Толоч, В.Г. Падалка - Атомная энергия, 1978, т. 44, с. 476-479.

17. Кесаев, И.Г. / Катодные процессы электрической дуги.// И.Г. Кесаев, М.: Наука, 1968.

18. Фаррел, Дж. /Инициация вакуумной дуги.// Дж. Фаррел - В кн.: Вакуумные дуги, М.: Мир, 1982, с. 108-152.

19. Kimblin C.*. Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arcs. - J. Appl. Phys., 1973, vol. 44, No 7, p. 3074-3081.

20. Snaper A.A. Arc deposition process and apparatus. U.S. Patent No 3.625.848, Int.cl. C23C 15/00, 26.12.1968.

21. Фаррел, Дж. / Электрический пробой в вакууме.// Дж. Фаррел - В кн.: Вакуумные дуги. М.: Мир, 1982, с. 40-107.

22. Сливков, И.Н. /Электрический пробой и разряд в вакууме.// И.Н. Сливков, В.И. Михайлов, Н.И. Сидоров, А.И. Настпха М.: Атомиздат,1966.

23. Смирнов, С.А. / Управляемые разрядники для коммутации больших импульсных токов в высоковольтных установках.// С.А. Смирнов, Ф.Ф. Терещенко М.: Госатомиздат, 1962.