

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине

"ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ "

для специальности **36.04.01 "Электронно-оптическое аппаратостроение"**
специализация: **36.04.01.01 "Электрофизические процессы и
оборудование"**

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ	5
1.1. Общая характеристика электрофизикохимических технологических процессов.....	5
1.2. Классификация электрофизикохимических методов обработки материалов и изделий электронной техники.....	7
1.3. Использование методов и оборудования для электрофизической обработки в производстве изделий электронной техники.....	8
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ	9
2.1. Понятие о плазме, как об особом состоянии вещества	9
2.2. Основные характеристики технологической плазмы.....	9
2.3. Элементарные процессы в плазме	12
2.4. Взаимодействие частиц плазмы между собой	16
2.5. Особенности газового разряда при низком давлении	17
2.6. Воздействие плазменного потока на обрабатываемый материал	18
2.6.1. Типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал	18
2.6.2. Классификация плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность	20
2.6.3. Распыление материалов под действием ионной бомбардировки.....	22
2.6.4. Физико-химический механизм плазмохимической обработки.	24
2.6.5. Газовые среды и химические реакции в плазме.....	26
2.7. Средства и способы устойчивого поддержания плазмы.....	28
2.7.1. Виды газовых электрических разрядов.....	28
2.7.2. Разряд постоянного тока.....	28
2.7.3. Высокочастотный газовый разряд	31
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ	36
3.1. Характеристика ультразвука как физического фактора.....	36
3.2. Основные эффекты УЗ-колебаний в среде	37
3.3. Технологическое использование силового и.....	38
физико-химического действия ультразвука	38
4. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ	42
4.1. Понятие и механизм электрической эрозии	42
4.2. Параметры электрических разрядов.....	45
4.3. Сравнительная характеристика технологических возможностей процессов ЭЭО	46
4.4. Методы электроэрозионной обработки	47
5. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	51
5.1. Технологические особенности электронно-лучевого нагрева	51
5.2. Взаимодействие электронного луча с веществом.....	52
5.3. Технологическое применение электронно-лучевого нагрева.....	54
6. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ	61

6.1. Классификация лазеров	61
6.2. Физические принципы создания лазерного излучения	61
6.3. Принцип работы твёрдотельных лазеров	62
6.4. Параметры излучения твёрдотельного лазера.....	64
6.5. Принцип работы газового лазера.....	65
6.5.1. Лазер на нейтральных атомах	66
6.5.2. Лазеры на ионных переходах	67
6.5.3. Молекулярные лазеры.....	68
6.6. Взаимодействие мощного лазерного излучения с веществом.....	69
6.7. Формообразование поверхностей при обработке отверстий импульсным лазером.....	70
6.7.1. Моноимпульсная обработка. Получение глухих отверстий	70
6.7.2. Многоимпульсная обработка	72
6.7.3. Моноимпульсная обработка. Получение сквозных отверстий.....	72
7. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	74
7.1. Приэлектродные процессы в среде электролита.....	74
7.2. Выбор режимов проведения процессов обработки металлов.....	77
7.3. Определение производительности процесса электрохимической обработки.....	80

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

1.1. Общая характеристика электрофизикохимических технологических процессов

К электрофизическим и электрохимическим методам обработки материалов относят методы изменения формы, размеров, шероховатости и свойств обрабатываемых поверхностей заготовок, происходящее под воздействием электрического тока и его разрядов, электромагнитного поля, электронного или оптического излучения, плазменной струи, а также высокоэнергетических импульсов и магнитострикционного эффекта.

Отличительной особенностью этих методов является использование электрической энергии непосредственно для технологических целей без промежуточного преобразования ее в другие виды энергии. Причем использование электрической энергии осуществляется непосредственно в рабочей зоне через химические, тепловые и механические воздействия.

К этим методам относят также и различные сочетания (совмещения) в одном процессе нескольких из указанных способов воздействия между собой или с традиционными методами обработки резанием или давлением. Такие методы называют комбинированными.

Большинство процессов электрофизикохимической обработки сопровождается удалением с обрабатываемой поверхности заготовок припуска. Такие процессы и операции относят к размерной обработке (размерное формообразование). Некоторые процессы осуществляются без снятия припуска с обрабатываемых поверхностей — их относят к безразмерной (отдельной) обработке.

Основные технологические особенности и достоинства ЭФХИО по сравнению с традиционными технологиями, основанными на преимущественно силовом контактном воздействии инструмента на заготовку следующие:

1. Возможность обработки широкого круга материалов с разнообразными механическими, электрическими, оптическими и другими свойствами. По меньшей мере, для каждого материала можно подобрать наиболее эффективный процесс.
2. Незначительное механическое воздействие на заготовку благодаря тому, что либо вообще отсутствует инструмент, либо процесс бесконтактный.
3. Получение сложных конфигураций, широкие пределы возможных размеров обрабатываемой поверхности от объектов так называемой нанотехнологии до крупногабаритных деталей.
4. Незначительная технологическая наследственность процессов, т. е. возможность проведения обработки в режимах, не создающих остаточного воздействия на свойства вещества детали.

5. Возможность интенсификации многих технологических процессов механической обработки (резанием и давлением), нанесения покрытий, сварки, пайки и др. выполняемых традиционными методами с большой трудоемкостью и низким качеством обработки.

6. Возможность механизации и автоматизации основных технологических и вспомогательных переходов вплоть до применения робототехнических средств и комплексной автоматизации операций и процессов.

7. Возможность сокращения расходования остродефицитных и дорогих инструментальных сталей и сплавов, а также потерь обрабатываемых материалов.

Однако методы электрофизикохимической обработки имеют недостатки и ограничения, которые обусловлены их физической сущностью и спецификой:

1) Повышенная энергоемкость процессов при равнозначных с механической обработкой продолжительности и качественных показателях;

2) Относительная громоздкость применяемого технологического оборудования и оснастки, а также необходимость применения во многих случаях специальных источников питания электрическим током, устройств для подачи, сбора, хранения и очистки рабочей жидкости;

3) Необходимость размещения технологического оборудования в отдельных помещениях, связанная с учетом повышенной пожарной опасности и выполнением специфических требований безопасности труда.

В настоящее время к электрофизическим и электрохимическим методам обработки материалов относят:

1) электроэрозионную обработку;

2) электрохимическую обработку;

3) ультразвуковую обработку;

4) плазменную обработку (все виды, включая ионно-плазменную, ионную имплантацию, высокочастотную и т.д.);

5) детонационную обработку;

6) электроннолучевую обработку;

7) лазерную обработку;

8) комбинированную обработку.

Эти методы применяются для:

1) обработки материалов, имеющих плохую обрабатываемость режущими и абразивными инструментами (высоколегированные стали, твердые сплавы, ферриты, керамика, полупроводниковые материалы, рубин, кварц и т. д.);

2) обработки миниатюрных нежестких деталей;

3) обработки деталей сложной формы с пазами и отверстиями микронных размеров (выводные рамки корпусов микросхем, маски фотошаблонов, трафареты);

4) изготовления глухих отверстий и пазов.

1.2. Классификация электрофизикохимических методов обработки материалов и изделий электронной техники

Существует несколько вариантов классификации методов электрофизикохимической обработки:

а) по виду и характеру энергетического воздействия на обрабатываемый материал:

- электроразрядные;
- электрохимические;
- ультразвуковые;
- лучевые;
- комбинированные.

б) по характеру явлений, происходящих вследствие воздействия на заготовку электрического тока — основного вида энергии, затрачиваемого на осуществление обработки:

- химическое воздействие электрического тока (разновидности электрохимической обработки);
- тепловое воздействие электрического тока (электроэрозионная, плазменная обработка, лучевые методы обработки);
- механическое воздействие электрического тока или электромагнитного поля (ультразвуковая, электрогидроимпульсная обработка — сочетание различных воздействий электрического тока или электромагнитного поля одновременно друг с другом, а также с различными процессами механической обработки).

в) по виду обработки:

- с применением инструмента (электроэрозионная, электрохимическая, ультразвуковая);
- обработка с использованием высококонцентрированных потоков энергии (электроннолучевая, светолучевая, плазменная, электро-взрывная, магнитоимпульсная);
- комбинированные методы (анодно-механический, электроэрозионно-химический, обработка с наложением ультразвуковых колебаний, электролазерный и др.).

Общей объединяющей основой всех этих методов является использование электрической энергии в процессе формообразования или обработки.

Необходимость применения и развития указанных методов обработки обусловлена тремя специфическими особенностями развития современных отраслей промышленности:

1. В конструкциях машин и приборов все шире применяются твердые специальные сплавы и стали с различными легирующими добавками, трудно обрабатываемые классическими методами механообработки.

2. Все чаще к формообразованию деталей приборов и устройств предъявляются специальные требования — обработка детали с точностью ± 1 мкм,

прорезание пазов шириной 5 – 7 мкм, образование отверстия с криволинейной осью или конической поверхностью и др.

3. В связи с широким развитием вычислительной, электронной и полупроводниковой техники появилась необходимость массовой обработки миниатюрных деталей: обработка тонкостенных деталей, деталей объемом менее 1 мм³ и др.

1.3 Использование методов и оборудования для электрофизической обработки в производстве изделий электронной техники

Примеры использования электрофизикохимических методов обработки в производстве изделий электронной техники:

- электроэрозионная обработка — изготовление полостей ковочных штампов и пресс-форм, формообразование анодных блоков магнетронов, электроэрозионная вырезка деталей электровакуумной и электронной техники (сеток, решеток, пазов и др.), прошивание мелкоразмерных отверстий в корпусах, деталях плазменных устройств, обработка мелких деталей из нержавеющей стали, вырезание спиралей ламп бегущей волны и т. д.;
- электрохимическая обработка — внутренних полостей сложной формы, сверление глубоких отверстий, полирование поверхности деталей сложной формы, снятие заусенцев на деталях после механической обработки, изготовление печатных плат;
- ультразвуковая обработка — очистка деталей, подложек ИМС, сверление отверстий в полупроводниковых и диэлектрических пластинах, приварка проволоки к контактным площадкам ИМС и т. д.;
- лазерная сварка — выводы диодов, миниатюрных реле (в частности герконовых), выводы для солнечных элементов, лазерная сварка баллонов электронных ламп и корпусов полупроводниковых приборов;
- лазерная резка — заготовок из алмаза, формы из керамических подложек, скрайбирование кристаллов и т. д.;
- лазерное сверление, закалка...
- электронно-лучевая обработка — испарение материалов с целью нанесения тонких пленок, подгонка элементов интегральных микросхем, зонная плавка с целью роста монокристаллов кремния и германия, точечная сварка, сварка деталей из разнородных материалов (W и Mo; Ni и сталь и т. д.), электронно-лучевая литография и др.;
- плазменные методы обработки — микрофрезерование рисунка, нанесение тонких пленок, резка, наплавка и т. д.;
- электровзрывная обработка — формирование отражателей прямо-передающих антенн и т. д.;

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

2.1. Понятие о плазме, как об особом состоянии вещества

Плазма (от греч. *plasma* — буквально - вылепленное, оформленное) — частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы (т. е. выполняется условие квазинейтральности).

Плазма представляет собой смесь компонент: положительные ионы, отрицательные ионы, электроны и нейтральные частицы (атомы, молекулы, радикалы).

Название плазмы было введено Ленгмюром.

Плазма — наиболее распространенное состояние вещества. Верхние слои атмосферы, звезды, радиационные пояса Земли, газовые разряды любого типа представляют собой плазму и их поведение связано с явлениями, протекающими в плазме.

Необходимо различать понятия «плазма» и «газовый разряд». Газовый разряд — это явление прохождения электрического тока через газ или пары вещества под действием электрического поля. Таким образом газовый разряд — это способ получения плазмы в земных условиях с помощью электрического поля. В лабораторных условиях плазма может быть получена и с помощью других способов: нагрев газа в процессе горения; воздействием ионизирующих излучений (лазерное, электронное, ИК и др.); ионизация с помощью ударных волн и т. д.

В дальнейшем, говоря о плазме, мы будем иметь в виду только газообразную плазму, не касаясь рассмотрения свойств плазмы твердых тел.

2.2. Основные характеристики технологической плазмы

Под технологической плазмой понимают состояние вещества в виде газового разряда, характеризующееся определенной степенью ионизации и квазинейтральностью.

Плазма в общем случае состоит из заряженных частиц обоих знаков и нейтральных атомов, молекул и радикалов.

Если обозначить концентрацию электронов и ионов в единице объема n_e или n_i , а концентрацию частиц газа при соответствующих условиях n_r , то воспользовавшись соотношением

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_r} = \frac{n_e}{n_e + n_r} \quad (2.1)$$

можно определить важнейшую характеристику плазмы, называемую «степень ионизации плазмы».

Обычно в технологической плазме

$$n_r > n_e > n_i \quad (2.2)$$

и поэтому в первом приближении можно записать

$$\alpha \approx \frac{n_e}{n_r} = \frac{n_i}{n_r}. \quad (2.3)$$

В зависимости от величины α плазму разделяют на слабо, сильно и полностью ионизированную.

В слабо ионизированной (или низкотемпературной) плазме средняя энергия частиц значительно меньше энергии ионизации атомов, и степень ионизации

$$\alpha = \frac{n_i}{n_r} \ll 10^{-2}. \quad (2.4)$$

Обычно степень ионизации низкотемпературной плазмы составляет величину долей процента при концентрации электронов $n_e = 10^9 \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Сильно ионизованная плазма характеризуется

$$\alpha = \frac{n_i}{n_r} > 10^{-2}. \quad (2.5)$$

Для полностью ионизованной плазмы $\alpha \approx 1$. Такая плазма в земных условиях существует только в процессе протекания термоядерной реакции и поэтому имеет весьма ограниченное практическое использование.

Важнейшей физико-технической характеристикой плазмы является ее температура. Плазма может быть низкотемпературной и высокотемпературной.

К низкотемпературной относят плазму, имеющую среднемассовую температуру газа от комнатной, до примерно равной $5 \cdot 10^4 \text{ К}$.

Низкотемпературная плазма может быть термической, т. е. оказывать тепловое воздействие на вещество, и холодной, т. е. не оказывать такого воздействия. Более строго определить эти понятия можно, введя такую характеристику плазмы, как температура.

Температура T представляет собой эквивалент энергии W . За единицу энергии в плазме принят один электронвольт, равный $11\,600 \text{ К}$. В плазме как в системе разнородных частиц, имеющих различный заряд и массу, чаще всего помещенной во внешние электрические и магнитные поля, энергия этих частиц будет существенно отличаться. Поэтому в физике говорят о температуре (энергии) отдельных ее компонент, т. е. температуре нейтральных частиц T_n , ионов T_i , электронов T_e .

Масса электрона существенно меньше массы иона. Энергия частиц в плазме приобретает за счет увеличения энергии электрона при его движении во внешних полях, а передается другим частицам в результате столкновительных процессов.

В связи с этим обычно

$$T_e > T_i > T_n. \quad (2.6)$$

Такая плазма называется неравновесной. Холодная низкотемпературная плазма чаще всего существенно неравновесна и образуется в условиях пониженного давления, когда длина свободного пробега частицы достаточно велика, чтобы на этом пути электрон приобрел значительную энергию ($T_e \sim 10^4$ К).

Термическая низкотемпературная плазма существует чаще всего в условиях нормального атмосферного или повышенного давления, когда длина свободного пробега достаточно мала, количество столкновительных актов в плазме резко возрастает и энергии частиц за счет этого почти выравниваются. Однако в этом случае должны существовать внешние условия, которые быстро компенсируют потери энергии при столкновениях, т. е. эффективность передачи энергии от внешнего источника должна быть очень велика. Обычно и величина передаваемой энергии значительна — порядка нескольких киловатт и выше. Тогда устанавливается соотношение $T_e \approx T_i \approx T_n$ и плазма может называться квазиравновесной или равновесной.

О температуре плазмы в целом говорить нельзя. Необходимо всегда указывать температуру отдельных ее компонентов.

Например, в неравновесной холодной плазме при $T_e = 10^5$ К температура ионов может составлять порядка $5 \cdot 10^2$ К, а температура нейтральных частиц может быть и того меньше. В это же время энергия отдельных частиц (в том числе ионов и нейтральных) в плазме будет достаточной, чтобы существенно увеличить скорость химических реакций и обеспечить эффективный процесс физико-химических превращений вещества, который при нормальных условиях идет либо слишком медленно, либо вообще не идет.

Низкотемпературной считают плазму с $T_e \leq 10^5$ К, а высокотемпературной с $T_i \approx 10^6 - 10^8$ К.

Высокотемпературная (горячая) плазма состоит практически только из электронов и ионов, а степень ее ионизации близка к единице.

Важнейшее свойство плазмы — квазинейтральность — проявляется тогда, когда линейные размеры занимаемой ею области много больше дебаевского радиуса экранирования

$$r_d = \left(\frac{\varepsilon_0 \cdot k \cdot T_e}{n \cdot e^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(2.7)

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;

k — постоянная Больцмана;

T_e — электронная температура;

n — концентрация электронов;
 e — заряд электрона.

На расстоянии порядка r_D электрическое поле отдельной частицы в плазме практически исчезает, вследствие «экранирования» частицами противоположного знака. Внешнее электрическое поле способно проникать в плазму тоже на глубину, не превышающую r_D . Экранировка этого поля обусловлена появлением в плазме компенсирующих полей пространственных зарядов. Квазинейтральность может нарушаться вблизи границы плазмы за счет теплового движения на длину r_D .

2.3. Элементарные процессы в плазме

К элементарным процессам в плазме газового разряда относят:

- 1) ионизацию;
- 2) диссоциацию молекул на атомы без ионизации;
- 3) рекомбинацию;
- 4) упругие соударения с обменом энергии;
- 5) процессы перезарядки.

Ионизацией называют отрыв части электронов от атомов или молекул, который может осуществляться несколькими путями:

- а) термическим (термическая ионизация);
- б) воздействием излучения различных видов (рентгеновское, УФ, лазерное и т. д.);
- в) электрическим разрядом.

В технологических плазменных устройствах чаще всего обеспечивается ионизация в электрических газовых разрядах различного вида.

Механизм ионизации в разряде заключается в образовании электронной лавины.

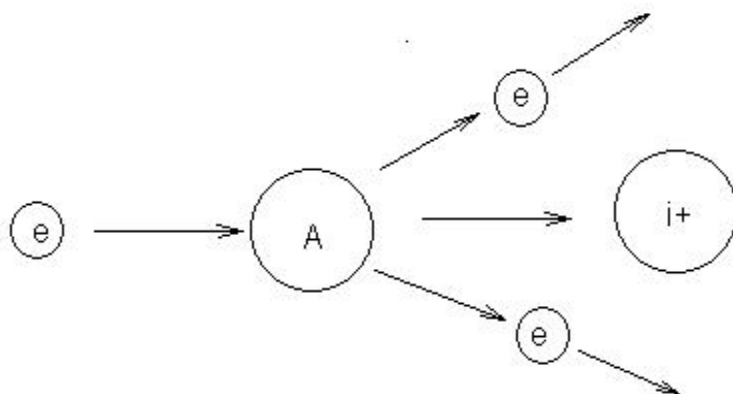


Рис. 2.1 Образование электронной лавины

Обязательным условием развития лавины должно быть электрическое или электромагнитное поле такой величины, чтобы оно сообщало электрону на длине свободного пробега больше энергии, чем нужно для выбивания из

атома еще одного электрона. Такой механизм носит название *ионизации электронным ударом*.

Динамическое равновесие большинства элементарных плазменных процессов можно оценить, введя такое понятие как сечение столкновений частиц в плазме и частота столкновений.

Сечением столкновений σ , имеющим размерность площади, называют эффективную геометрическую площадь препятствия, которым оказывается частица — мишень для пучка падающих на нее частиц. Оно зависит от типа столкновений, относительной скорости пучка, типа взаимодействующих частиц.

В теории плазмы имеют особое значение *сечение ионизации* σ_i и *сечение упругих столкновений* «электрон — атом» с передачей импульса σ_m , которые связаны соотношением

$$\sigma_i = \sigma_m \cdot f_i(W_e) \quad (2.8)$$

где $f_i(W_e)$ — *вероятность ионизации* или *функция ионизации*, зависящая от энергии электрона.

По сути дела f_i представляет собой число благоприятных для ионизации соударений по отношению к их общему числу. Для различных газов f_i различна, и может быть представлена в виде зависимости:

$$f_i = A(W_e - \varphi_i) \cdot \exp\left(-\frac{W_e - \varphi_i}{B}\right) \quad (2.9)$$

где φ_i — потенциал ионизации, эВ;

A и B — константы, зависящие от рода газа, например, для азота $A = 7,8 \cdot 10^{-8}$, $B = 160$.

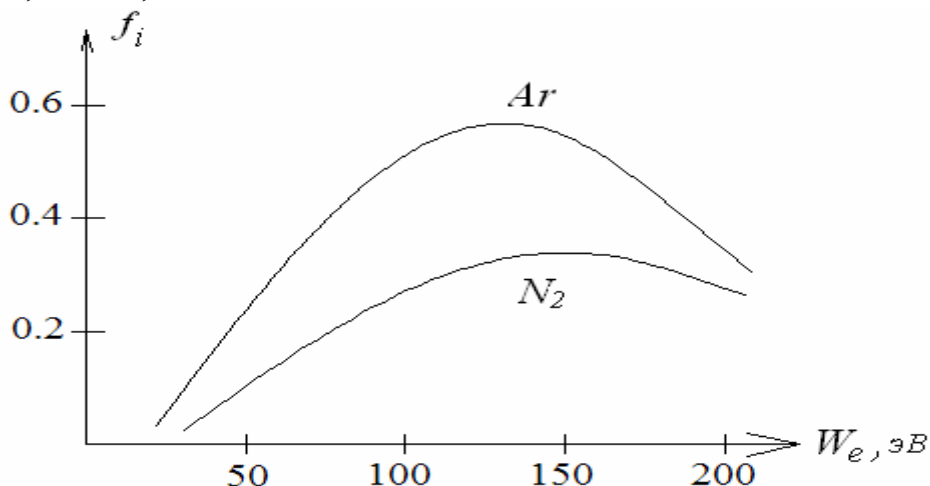


Рис. 2.2 Графики зависимости $f_i(W_e)$ для Ar и N_2

Потенциалы ионизации некоторых газов, используемых в плазменной технике, имеют величину:

Потенциалы ионизации
некоторых газов

Таблица 2.1.

Газ	<i>Ar</i>	<i>N₂</i>
φ_i , эВ	15,8	14,5

Сечение упругих столкновений σ_m представляет величину, связанную с так называемой константой тонкой структуры, полученной из квантовой модели атома Бора. Эта константа a_0 равна $0,529 \cdot 10^{-10}$ м, а сечение σ_m измеряется величиной

$$\sigma_m = (10^{-1} \div 10^{-3}) \cdot \pi \cdot a_0^2 \quad (2.10)$$

Частота столкновения электрона с атомом или молекулой ν_e может быть вычислена из выражения

$$\nu_e = \frac{v_e}{\ell_e} \quad (2.11)$$

где v_e и ℓ_e — скорость и длина свободного пробега электронов.

Скорость электрона v_e однозначно связана с кинетической энергией

$$W_e = \frac{m_e \cdot v_e^2}{2} = \frac{3}{2} kT_e \quad (2.12)$$

Длина свободного пробега электрона ℓ_e определяется длиной свободного пробега молекулы газа ℓ_r при соответствующих условиях

$$\ell_e = 4 \cdot \sqrt{2} \cdot \ell_r \quad (2.13)$$

Величина ℓ_r для каждого рода газа при определенном давлении может быть рассчитана из молекулярно-кинетической теории газов.

Так как в большинстве плазменных технологических устройств используются многоатомные газы, одним из результатов столкновительных процессов с молекулами является их *диссоциация*.

Под диссоциацией понимается расщепление молекулы на более простые частицы в результате нарушения связи между атомами, происходящее за счет поглощения молекулой избыточной энергии.

Схематично это может быть представлено: $AB \leftrightarrow A + B$

В конечном счете именно этот процесс ответственен за многие физико-химические превращения, используемые в различных технологических задачах.

Для оценки скоростей образования активных частиц, участвующих в физико-химических процессах в плазме и на поверхности образцов, помещенных в плазму, вводят понятие *скорость диссоциации*.

В общем случае скорость диссоциации молекул сложных веществ ν_d можно определить из соотношения

$$\frac{dn_d}{d\tau} = \nu_d = n_e \int_{W_d}^{\infty} v_e \cdot \varphi_d(W_e) \cdot f(W_e) \cdot dW \quad (2.14)$$

где W_d — пороговая энергия диссоциации молекул газа, эВ;

$f(W_e)$ — функция распределения электронов по энергиям;

$\varphi_d(W_e)$ — вероятность диссоциации, зависящая от рода газа и энергии
электрона и определяемая через сечение диссоциации как

$$\varphi_d(W_e) = \sigma_d \cdot n_r \cdot \ell_e \quad (2.15)$$

Важной характеристикой газового разряда является функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ).

В плазме электроны могут получать различные энергии, однако после возникновения устанавливается их динамическое равновесие. В первом приближении оно может быть описано распределением Максвелла.

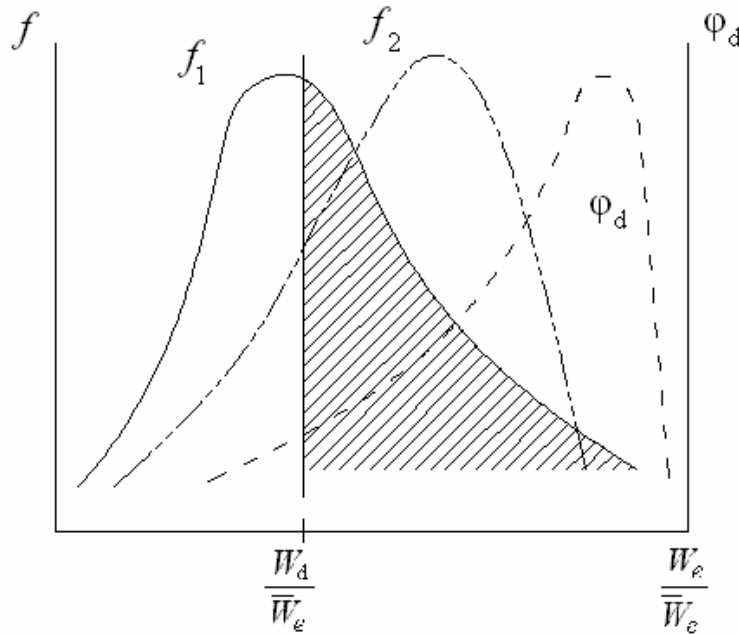


Рис. 2.3 График функции распределения электронов по энергиям в плазме:

f_1 — распределение по Максвеллу; f_2 — в сильных полях; φ_d — вероятность диссоциации.

Однако в конкретных случаях оно может отличаться от распределения Максвелла и зависеть от внешних условий, в том числе от наличия и характеристики внешних электромагнитных, электрических и магнитных полей.

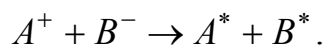
Из представленных зависимостей видно, что электроны, имеющие энергию $W_e < W_d$ фактически не участвуют в процессах диссоциации и образования активных частиц. Отсюда следует, что для повышения эффективности процессов в плазме необходимо либо добиваться сдвига максимума ФРЭЭ вправо, либо уменьшить пороговую энергию диссоциации W_d и увеличивать вероятность диссоциации ψ_d выбором конкретных химических соединений.

Кроме процесса ионизации в плазме происходит и процесс нейтрализации заряженных частиц — так называемая рекомбинация.

Вследствие соединения двух частиц с противоположными знаками рекомбинация является важным каналом убыли электронов и ионов в плазме.

Рекомбинировать могут положительные и отрицательные ионы, а также электроны с положительными ионами.

Возможные механизмы рекомбинации



2.4. Взаимодействие частиц плазмы между собой

При использовании плазмы в технологическом оборудовании полупроводниковой техники как правило имеют дело с низкотемпературной плазмой, степень ионизации которой не очень высока.

В силу этого большое значение имеют столкновения между нейтральными частицами и электронами, а также ионов с нейтральными частицами. Электрон — электронные и ион-ионные столкновения играют в низкотемпературной плазме меньшую роль.

Столкновения между заряженными и нейтральными частиц могут быть упругими и неупругими.

При упругом взаимодействии частицы обмениваются импульсами. Эти столкновения описываются законами классической механики.

Неупругие взаимодействия происходят тогда, когда часть энергии сталкивающихся частиц переходит на повышение их внутренней энергии. Важнейшими из этих процессов является ионизация и возбуждение.

При упругом взаимодействии электронов с тяжелыми частицами энергия, передаваемая этим частицам, незначительна. С увеличением энергии электронов эффективное сечение упругого взаимодействия (т. е. величина, определяющая вероятность взаимодействия) снижается. Примерный вид зависимости представлен на рис. 2.4.

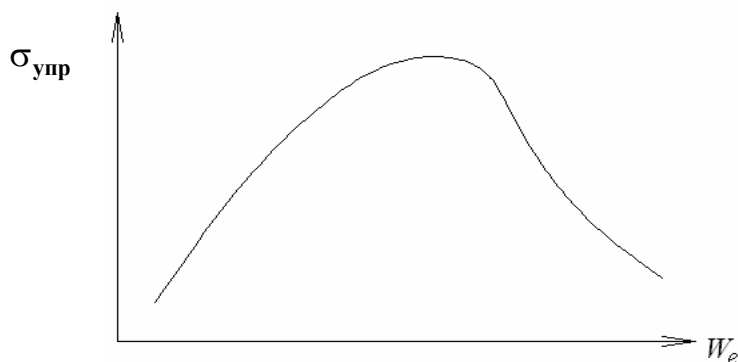


Рис. 2.4 Примерный график зависимости $\sigma_{\text{упр}}(W_e)$:

$\sigma_{\text{упр}}$ — эффективное сечение взаимодействия электронов с нейтральными частицами в плазме, W_e — энергия электронов.

Максимум для большинства частиц достигается при значении W_e несколько десятков электрон-вольт.

Из неупругих взаимодействий наибольшее значение имеет ионизация, так как именно этот процесс является ответственным за поддержание газового разряда. Характерной особенностью зависимости эффективного сечения ионизации от энергии электронов является наличие пороговой энергии этого процесса, находящейся в интервале от нескольких эВ до двух десятков эВ для всех частиц.

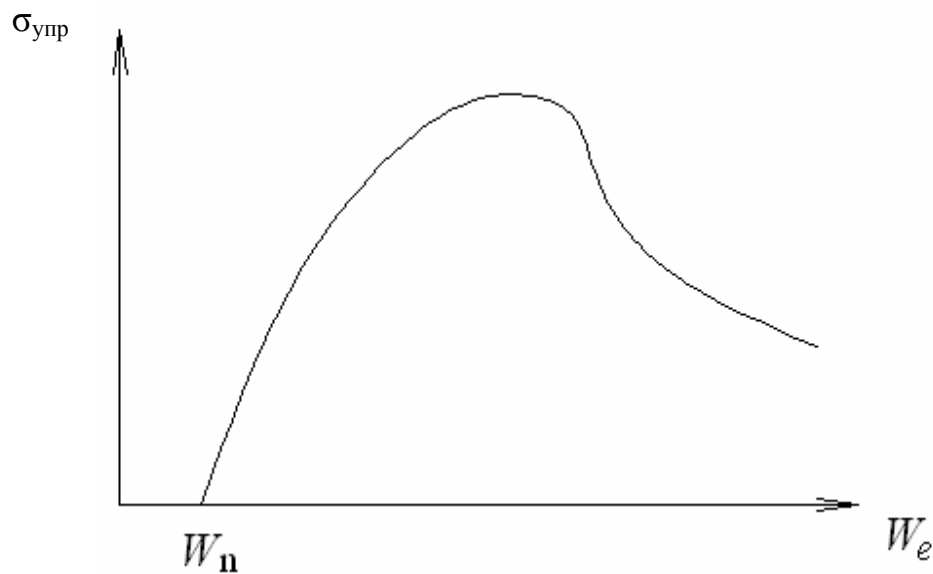


Рис. 2.5 Примерный график зависимости $\sigma_{\text{упр}}(W_e)$ для ионизационного процесса

2.5. Особенности газового разряда при низком давлении

Развитие и существование постоянного разряда низкого давления в значительной мере определяется эмиссией электронов с катода. В таких разрядных устройствах применяются горячие, холодные и реже так называемые плазменные катоды.

При использовании горячих катодов электроны эмиттируются вследствие термоэлектронной эмиссии, и разряд поддерживается при напряжении до 100 В и больших плотностях тока (до нескольких ампер).

В холодных катодах эмиссия электронов осуществляется за счет их бомбардировки ионами и нейтральными частицами. В этом случае разряд горит при напряжениях от нескольких сотен вольт до нескольких киловольт. Плотность разрядного тока меньше, чем в устройствах с горячим катодом.

Плазменные катоды характеризуются использованием вспомогательных разрядов, являющихся источниками электронов.

Для плазмы низкого давления характерна рекомбинация электронов и ионов на стенках разрядной камеры. Длина свободного движения электронов и ионов при низких давлениях значительно больше размеров камеры. В период формирования плазмы электроны, попадающие на стенки, сообщают ей отрицательный потенциал, поэтому в установившемся режиме электроны движутся к стенкам в тормозящем поле. Путь до стенки они проходят практически без столкновений с атомами газа. Движение же положительных ионов происходит в ускоряющем поле. Рекомбинация электронов и ионов на стенках приводит к спаду концентрации электронов и ионов по направлению от оси разряда к его границе. Этот градиент концентраций в свою очередь вызывает диффузионное движение заряженных частиц к стенке. Поскольку концентрации электронов и ионов равны и достаточно велики, а температура T_e больше T_i на 2 – 3 порядка, то движение в плазме низкого давления происходит по законам амбиполярной диффузии.

Первичные электроны, из-за большей подвижности чем ионы, главным образом переносят энергию внешнего электрического поля в плазму разряда. Можно записать уравнение баланса мощностей в плазме

$$P_e = P_n + P_v + P_p + P_u + P_{рек} \quad (2.19)$$

где P_e — мощность, получаемая электронами от электрического поля;

P_n — мощность, расходуемая электронами на нагрев газа;

P_v — мощность, расходуемая на возбуждение атомов;

P_p — мощность, уносимая из разряда радиацией (тепловой и световой);

P_u — мощность, расходуемая на ионизацию;

$P_{рек}$ — мощность, выделяющаяся на стенках при рекомбинации.

При низких давлениях основная доля энергии электронов расходуется на ионизацию. На нагрев и возбуждение атомов расходуется около 5 % энергии.

Для достижения высокой плотности носителей заряда при низкой затрате энергии на получение одного иона необходимо уменьшить потери носителей заряда и энергии. Один из способов ограничения утечки электронов состоит в том, что подают достаточно высокий отрицательный потенциал или сами стенки включают катодом. Этот принцип устойчивого поддержания плазмы используется, например, в ионных источниках с полым катодом.

Часто стенки разрядной камеры выполняют из диэлектрического материала (кварца, пирекса, окиси алюминия Al_2O_3).

2.6. Воздействие плазменного потока на обрабатываемый материал

2.6.1. Типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал

В основу работы технологического плазменного оборудования, используемого в настоящее время, могут быть положены различные типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал:

- 1) термическое воздействие плазмы на введенные в реакционный объем материалы и среды;
- 2) воздействие заряженными частицами высоких энергий (ионами и электронами);
- 3) воздействие нейтральными возбужденными в плазме химически активными атомами, молекулами и радикалами;
- 4) воздействие фотонами ультрафиолетового диапазона излучения;
- 5) комплексное воздействие.

Структурно все вышесказанное может быть упрощенно представлено в следующем виде:

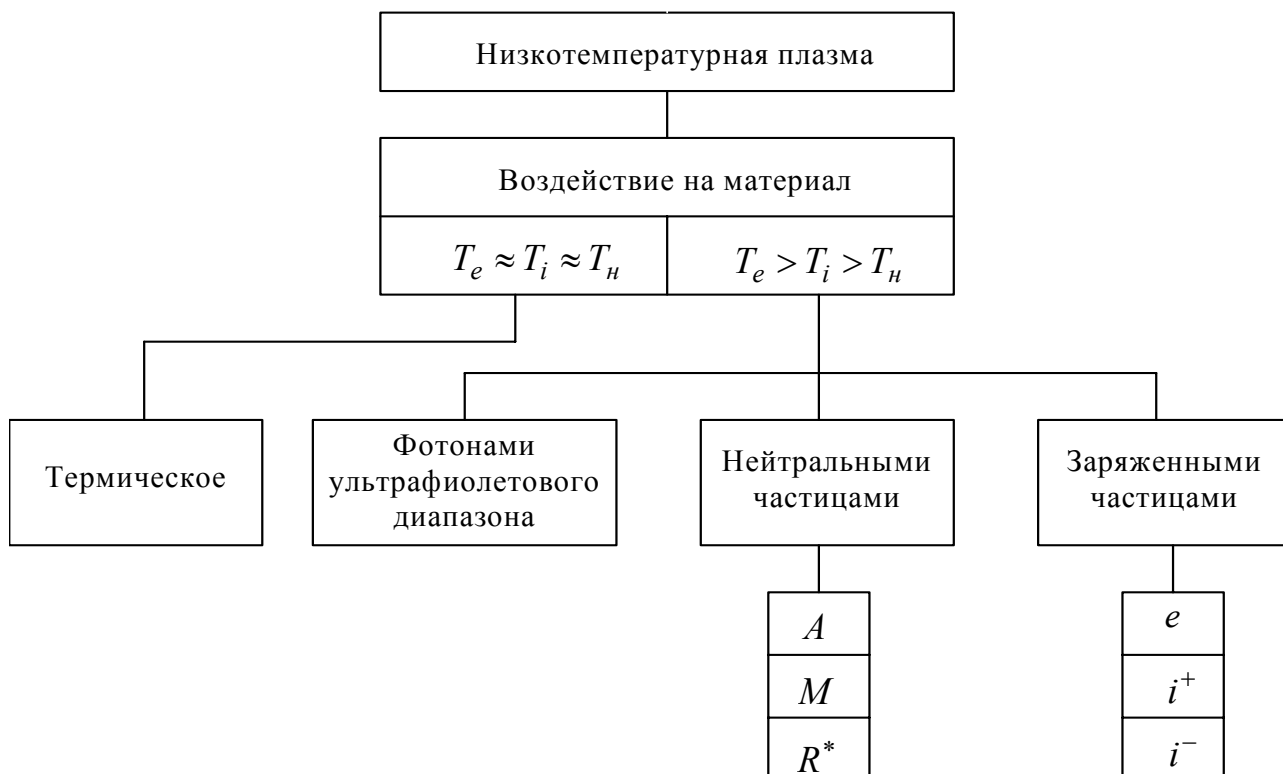


Рис. 2.6 Типы воздействия плазмы на обрабатываемый материал

Каждый из приведенных типов воздействия определяет назначение соответствующего технологического оборудования и процессов:

- для получения монокристаллов или порошков тугоплавких материалов;
- для осаждения толстых или тонких слоев;
- для очистки поверхности от органических или неорганических загрязнений или пленок;
- для травления слоев физическим распылением;
- для травления слоев плазмохимическим способом;
- для полимеризации поверхностных слоев и т. д.

В конкретном технологическом оборудовании может использоваться плазма с различными сильно отличающимися характеристиками и параметрами. Это может быть либо термическая низкотемпературная квазиравновес-

ная плазма с высокой среднемассовой температурой газа, либо холодная неравновесная плазма при пониженном давлении с высокой электронной температурой.

Виды воздействия на обрабатываемый материал могут резко отличаться, однако в любом случае инструментом воздействия служит плазма газового электрического разряда либо ее составляющая. Обычно это плазма с контролируемым составом обновляемой газовой среды в замкнутом объеме.

Чаще всего для передачи энергии в плазму используются такие виды разрядов, которые не вносят загрязнения конструктивных элементов разрядного устройства.

2.6.2. Классификация плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность

В основе классификации плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность лежит выделение трех основных видов обработки с использованием плазмы:

- ионной;
- плазмохимической;
- ионно-химической (иногда называемой реактивно-ионной).



Рис. 2.7 Классификация плазменных технологических процессов по механизму воздействия на обрабатываемую поверхность

Ионная обработка представляет собой процесс, при котором поверхностные слои твердого вещества подвергаются бомбардировке ускоренными положительными ионами как правило инертных газов, химически не реагирующими с обрабатываемым материалом. Если обрабатываемый материал помещен на электродах или держателях, соприкасающихся с плазмой разряда, то обработку в таких условиях называют ионно-плазменной. Если материал помещен в вакуумную зону обработки, отделенную от области плазмы, то обработка в этом случае называется ионно-лучевой.

При *плазмохимической обработке* основными ответственными за процесс частицами выступают химически активные нейтральные атомы, молекулы, радикалы, часто объединяемые под общим названием *химически активные частицы* (ХАЧ), вступающие в химические реакции с поверхностными слоями материалов. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы разряда, то обработку называют *плазменной*. В этом случае химические реакции на поверхности материала будут активироваться низкоэнергетическими электронной и ионной бомбардировками, а также фотонной бомбардировкой. Если материал находится в вакуумной зоне обработки, обычно называемой в этом случае реакционной зоной и отделенной от области плазмы, то обработку производят ХАЧ без активации электронной и ионной бомбардировками, а в ряде случаев и при отсутствии воздействия фотонов. Такую обработку называют радикальной.

Ионно-химическая обработка представляет совместное воздействие физического распыления и химических реакций с участием ионов различных веществ и поверхностных атомов материала. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы, то процесс в этих условиях называют реактивным ионно-плазменным. Тогда ХАЧ могут доставляться к поверхности материала из плазмы разряда или образовываться на поверхности при ударной диссоциации молекул или нейтрализации атомарных ионов. На поверхность материала воздействуют также электронная и фотонная бомбардировки.

Если же из объема плазмы с помощью системы вытягивающих, ускоряющих или фокусирующих устройств выделяется поток молекулярных или атомарных ионов, такая обработка носит название *реактивной ионно-лучевой*.

В процессах ионно-химической обработки трудно выделить вклад физического и химического механизмов, так как физическое распыление активирует поверхность материалов, повышая скорость химических реакций, которые, в свою очередь, ослабляют химические связи поверхностных атомов, увеличивая скорость их поверхностного распыления. Так как заметных скоростей физическое распыление достигает при энергиях ионов больше $1,6 \cdot 10^{-17}$ Дж (100 эВ), то данная энергия ионов, бомбардирующих материал служит условной границей между процессами ИХО и ПХО. При $E_u < 100$ эВ обработка будет относиться к ПХО, а при $E_u > 100$ эВ — к ИХО.

2.6.3. Распыление материалов под действием ионной бомбардировки

При падении ускоренных ионов на поверхность образца, последний распыляется, т. е. эмитирует атомы или молекулы того вещества, из которого он состоит. Это явление, носящее название *катодное* или *ионное распыление* используется в процессах ионной очистки и получении тонких пленок. Распыленные частицы снова могут осаждаться на какую-либо поверхность, на этом и основано получение тонких пленок.

Сам процесс распыления зависит от многих параметров: энергии ионов, качества поверхности, угла падения ионов на распыляемую мишень и других.

В настоящее время общепризнанным является импульсный (нетермический) механизм разрушения поверхности твердых тел под действием ионной бомбардировки. В этом случае происходит обмен импульсами при столкновениях бомбардирующего иона с атомами решетки и атомов решетки между собой.

Распыление материалов количественно характеризуется коэффициентом распыления k , который определяется количеством выбитых одним ионом атомов. Т. к. k — статистическая величина, она может выражаться и дробным числом, и определяется так

$$k = \frac{n_a}{n_i} \quad (2.20)$$

где n_a — число выбитых атомов

n_i — число ионов, бомбардирующих материал.

С ростом энергии бомбардирующих ионов k сначала растет, а затем уменьшается.

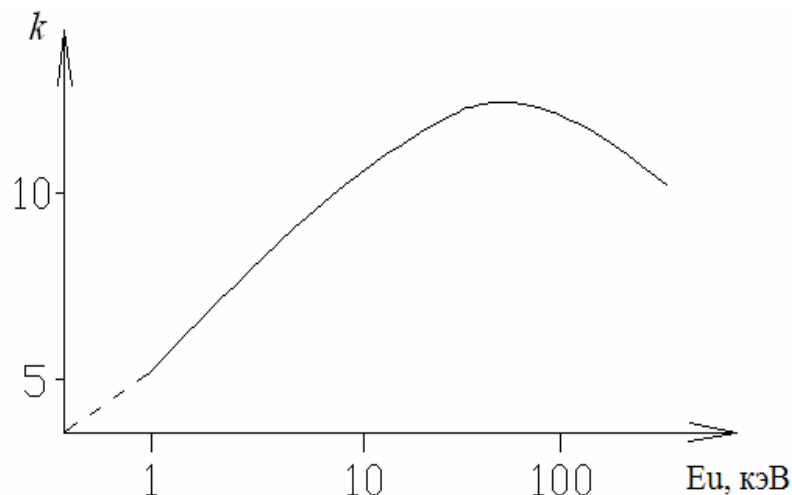


Рис. 2.8 Зависимость коэффициента распыления меди ионами Ag от энергии

При изменении угла падения ионов от 0° (нормальное падение ионов) до 90° наблюдается значительное увеличение k в области углов $50^\circ - 70^\circ$.

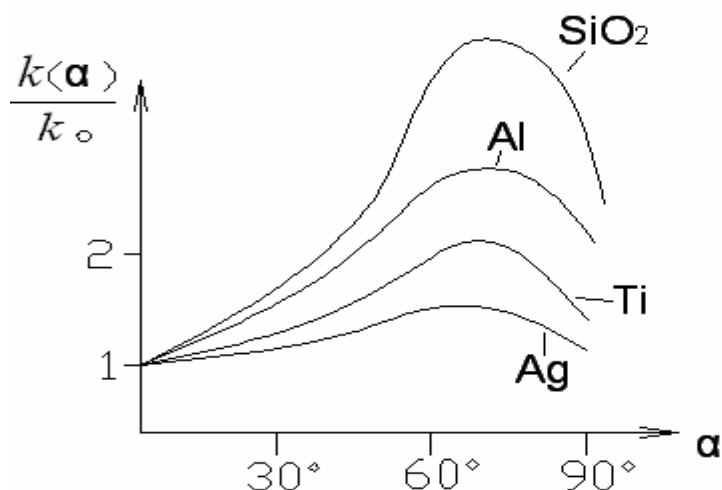


Рис. 2.9 Зависимость коэффициента распыления различных материалов ионами Ar при изменении угла падения

Коэффициент распыления растет также с увеличением массы бомбардирующих ионов.

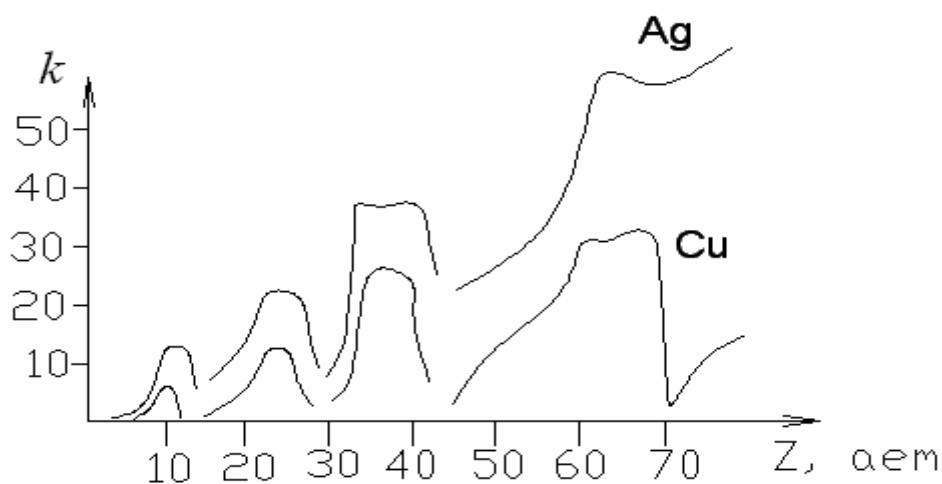


Рис. 2.10 Зависимость коэффициента распыления мишени из меди и Ag от атомного номера бомбардирующих ионов

Очевидно, что с увеличением общего тока в пучке число распыленных частиц растет.

Сами частицы, покидающие мишень под действием ионной бомбардировки, имеют некоторое распределение в пространстве и распределение по энергиям, причем средняя энергия существенно больше средней тепловой энергии при той температуре, при которой происходит распыление.

Число распыленных частиц N определяется формулой:

$$N = k \frac{(U - U_k) \cdot j_i}{p \cdot d} \quad (2.18)$$

где k — коэффициент распыления;

U — потенциал анода относительно катода;

U_k — т. н. критический потенциал, равный ≈ 500 В ;

j_i — плотность ионного тока;

d — ширина темного катодного пространства;

p — давление.

2.6.4. Физико-химический механизм плазмохимической обработки.

Физико-химический механизм воздействия образующихся свободных атомов и радикалов на поверхность твердого тела (обрабатываемого материала) может быть разбит на отдельные стадии, которые помогают выявлению лимитирующей стадии, т.е. стадии, имеющей минимальную скорость и определяющей скорость всего процесса.

Возможные схемы физико-химических механизмов воздействия плазмы на обрабатываемый материал представлены на рис.2.11.

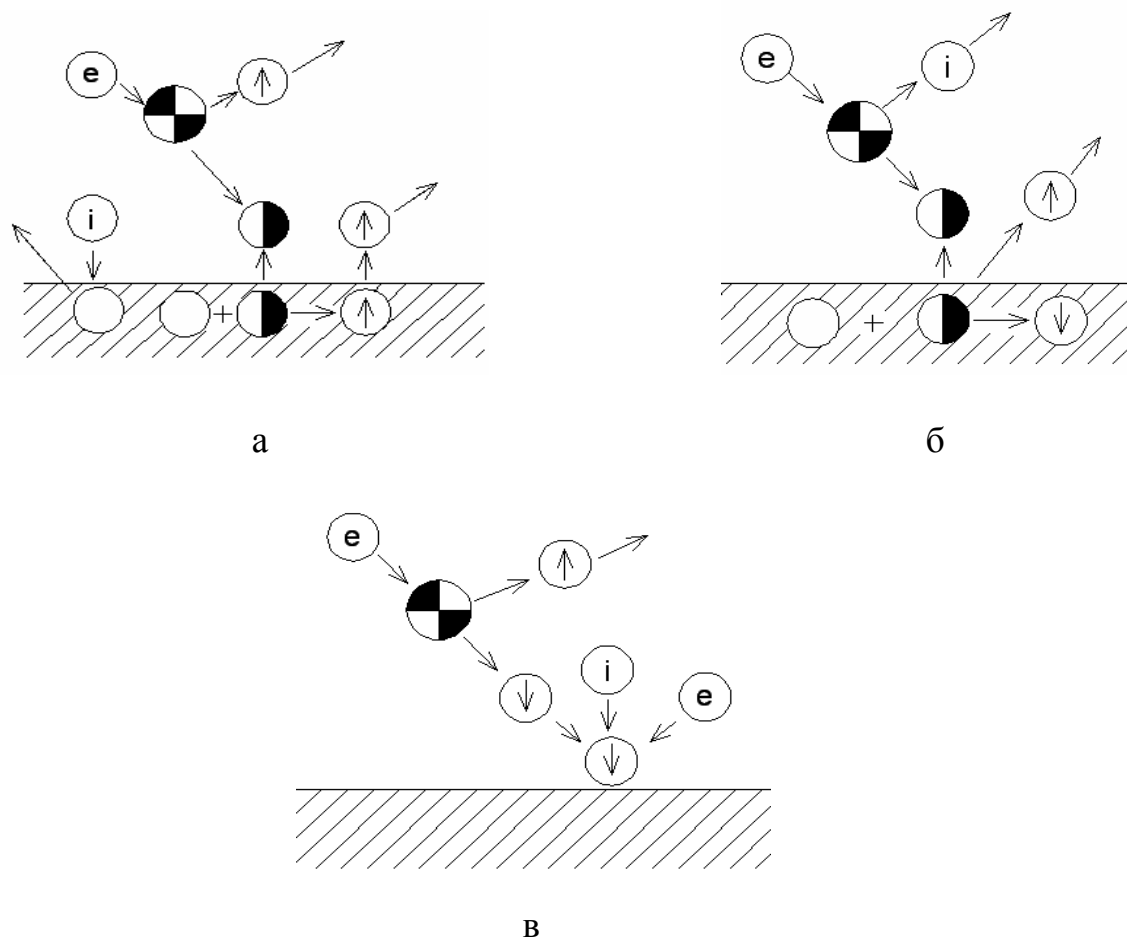
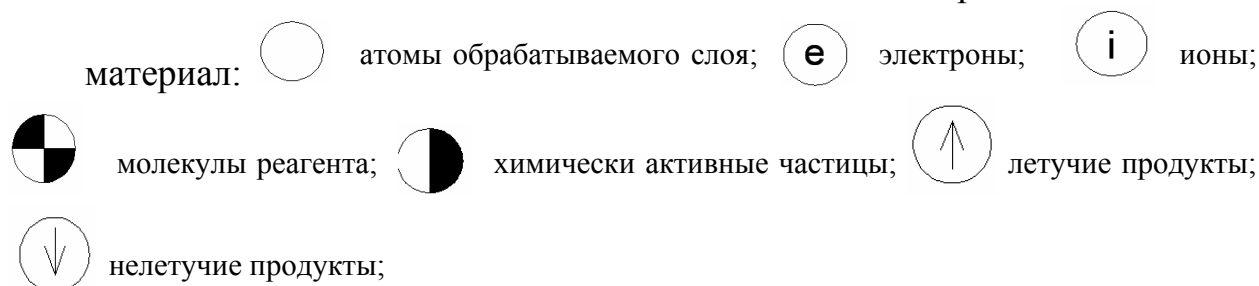


Рис. 2.11 Возможные схемы воздействия плазмы на обрабатываемый



Для всех плазмохимических процессов (ПХП) характерно образование в плазме разряда свободных атомов или радикалов в результате неупругих соударений электронов с молекулами реагентов. Свободные атомы (кроме инертных газов) и радикалы, отличающиеся от молекул наличием свободных (одной или нескольких) валентностей, проявляют вследствие этого высокую физико-химическую активность. Воздействие же образующихся свободных атомов и радикалов на поверхность твердого тела может идти несколькими путями.

При плазмохимической обработке, протекающей по схеме [а], основными стадиями являются:

- доставка реагентов в зону плазмы;
- диссоциация с образованием ХАЧ;
- доставка ХАЧ к поверхности;
- адсорбция ХАЧ на поверхности;
- гетерогенная химическая реакция с поверхностными атомами с образованием летучих и стабильных соединений;
- десорбция этих соединений с поверхности;
- отвод продуктов реакции от поверхности и из реакционного объема.

В такой схеме реализуются процессы удаления *фоторезистивных слоев, очистки поверхности от неорганических загрязнений, шлифовки и обработки поверхностей* и торцов подложек и пластин, *размерного и полирующего травления, глубинного травления мезоструктур и скрайбирования* пластин.

Возможно протекание процесса по иным стадиям (схема б). Вместо летучих веществ в результате гетерогенных химических реакций с адсорбированными ХАЧ возможно образование нелетучих соединений с высокими температурами испарения. Следствием этого является необходимость отвода продуктов реакции только из реакционного объема. По такой схеме проводятся процессы *формирования окислов* (анодирования), *нитридов* и других соединений в поверхностных слоях материалов.

При протекании процесса по схеме [в] после доставки реагентов в зону плазмы может осуществляться химическая реакция в газовой фазе с образованием конечных соединений или их фрагментов. Эти соединения доставляются к поверхности и осаждаются на ней, формируя либо сразу пленку требуемого состава и структуры, пленку-полуфабрикат. Формирование пленки конечного заданного состава происходит на следующем этапе под действием электронной или ионной бомбардировки.

По такой схеме проводятся процессы нанесения тонких пленок различных материалов и полимеризации слоев.

Постадийный анализ процессов, протекающих при взаимодействии плазмы или ее составляющих в газовой фазе и с твердой поверхностью, помогает выделить лимитирующую стадию и по ее скорости оценить скорость процесса обработки в целом.

Как сама лимитирующая стадия, так и ее скорость могут существенно различаться в зависимости от характера и параметров внешних условий (давления, наличия и характеристик внешних полей, типа электрического разряда, конструкции и геометрических размеров реактора и т. д.). а это значит, что скорость процесса в конечном счете может определяться такими условиями, как газодинамические режимы подвода реагентов и отвода продуктов реакции, температура поверхности обрабатываемого слоя, концентрация электронов в плазме n_e и вид функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), пороговая энергия диссоциации и т. п.

2.6.5. Газовые среды и химические реакции в плазме

В низкотемпературной плазме, используемой для технологических задач микроэлектроники, большую роль играет образование химически активных частиц.

Специфической особенностью процессов в плазме является наличие целого ряда одновременно, и большей частью независимо друг от друга протекающих гомогенных и гетерогенных реакций, особенно при использовании многокомпонентных смесей.

Наиболее распространенными реагентами, применяемыми в производстве ИС для травления пленочных материалов, являются (табл. 2.2).

Газы, используемые в
производстве ИС

Таблица 2.2

Реагент	Агрегатное состояние
CCl_4 — тетрахлорметан	состояние в баллоне: жидкость
CCl_2F_2 — дифтордихлорметан	жидкий газ
CF_4 — тетрафторметан	газ
$SiCl_4$ — четыреххлористый кремний	жидкость
SF_6 — гексафторид сера	жидкий газ
BCl_3 — трихлорид бора	жидкость
SiH_2Cl_2 — дихлорсилан	жидкий газ
SiH_4 — моносилан	жидкий газ

А также их смеси с O_2 , N_2 , H_2 , Ar и др.

Главную роль в образовании активных частиц в плазме играют процессы диссоциации молекул электронным ударом.

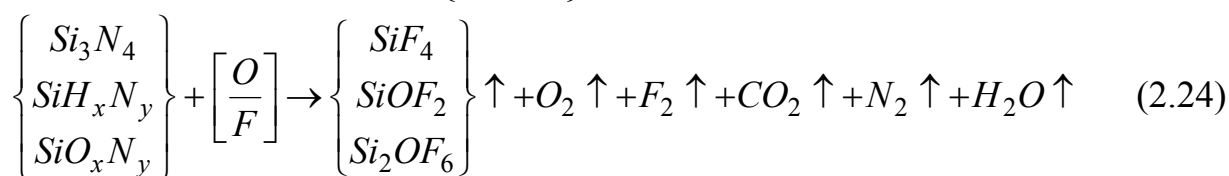
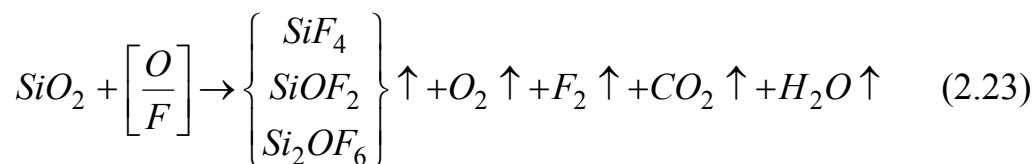
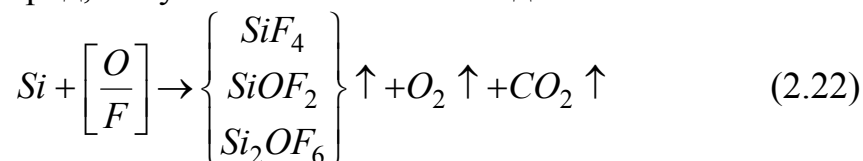
Скорость таких процессов определяется ФРЭЭ, сечением столкновения электронов, концентрации электронов, которые в свою очередь зависят от многих технологических и конструктивных факторов.

Физико-химические процессы в плазме очень сложны, что можно проиллюстрировать на примере плазмохимического травления кремния и его соединений в плазме, содержащей фтор (например в плазме) CF_4 .

Продуктами первичной диссоциации CF_4 являются: F^* , CF_3^* , CF_3 , F^- , CF_3^- , CF_3^+ , и т. д., которые принимают в процессе травления активное участие.

Кроме этого в плазмохимических реакциях принимают участие и те газы, которые присутствуют в реакционной камере после ее предварительной откачки или добавляются в реакционные смеси. Причем активироваться и приобретать способность к химическим реакциям могут и инертные газы (в том числе Ar и Xe).

В присутствии углерода и водорода общие уравнения реакций взаимодействия с кремнийсодержащими соединениями в плазме, где наряду с фтором присутствует и кислород, могут быть записаны в виде:



Приведенные уравнения реакций, однако, не отражают в полном объеме всего многообразия и сложности химических процессов в плазме.

В частности, взаимодействие кислорода с радикалами CF_3^* может приводить к образованию не только CO_2 , но и CO , COF_2 , F .

Поэтому в настоящее время продолжается интенсивный поиск эмпирических закономерностей для выявления оптимальных технологических режимов. Одновременно ведется поиск составов реакционных смесей, обеспечивающих лучшие характеристики: скорость обработки, селективность, анизотропность.

Для этих целей применяются более сложные по составу реагенты, добавляются газы, содержащие в связанном состоянии кислород и т. д.

Существенную роль при химических реакциях в плазменном технологическом оборудовании играют материалы электродов и стенок реакционной разрядной камеры. В результате реакций с конструктивными элементами могут существенно снижаться скорости процессов обработки за счет отвода химически активных частиц на стенки.

Изучение механизма и характера химических процессов в плазме постоянно выдвигает новые требования к конструкции плазменного технологического оборудования, в частности:

- 1) необходимость проведения процесса в несколько стадий и создание для этого многореакторного оборудования;
- 2) обеспечение откачки несколькими вакуумными системами (предварительная глубокая откачка и рабочая откачка);
- 3) необходимость шлюзовой загрузки и выгрузки изделий и т. д.

2.7. Средства и способы устойчивого поддержания плазмы

2.7.1. Виды газовых электрических разрядов

Для создания и поддержания низкотемпературной плазмы в технологических плазменных устройствах чаще всего используется *газовый электрический разряд*.

Если основную ионизацию газа создают постоянные источники (например, источники ультрафиолетового или рентгеновского излучения) и без них разряд не может существовать, то его называют *несамостоятельным*.

Как правило в технологических устройствах электронной техники используется *самостоятельный* разряд. В этом случае процесс поддерживается внутренними источниками ионизации (например, столкновениями электронов с молекулами и атомами газа, процессами на катоде и т. д.).

Для перехода несамостоятельного разряда в самостоятельный и обеспечения лавинного пробоя требуется начальная концентрация электронов n_{eo} , которая может быть получена либо за счет впрыска электронов (так называемый *поджиг разряда*), либо за счет *остаточной ионизации*. Поджиг разряда обычно обеспечивается каким-либо вспомогательным устройством, действующим в течение короткого начального отрезка времени. Остаточная ионизация обычно является следствием естественных процессов в газовой среде (например, за счет естественного фона радиоактивности). При наличии предварительной ионизации и соответствующей напряженности поля электронной лавины и развития и поддержания самостоятельного электрического газового разряда.

Основными формами газовых разрядов являются: тлеющий, дуговой, искровой, высокочастотный и некоторые их разновидности.

Существование разряда может поддерживаться не только при непосредственном контакте плазмы с электродами (*электродный разряд*), но и в отсутствие такового контакта (*безэлектродный*).

2.7.2. Разряд постоянного тока

При изменении тока во внешней цепи в простейшей камере с холодными электродами можно наблюдать различные формы *электродного газового разряда*.

Эти формы прослеживаются на характерной вольт-амперной характеристике разряда постоянного тока.

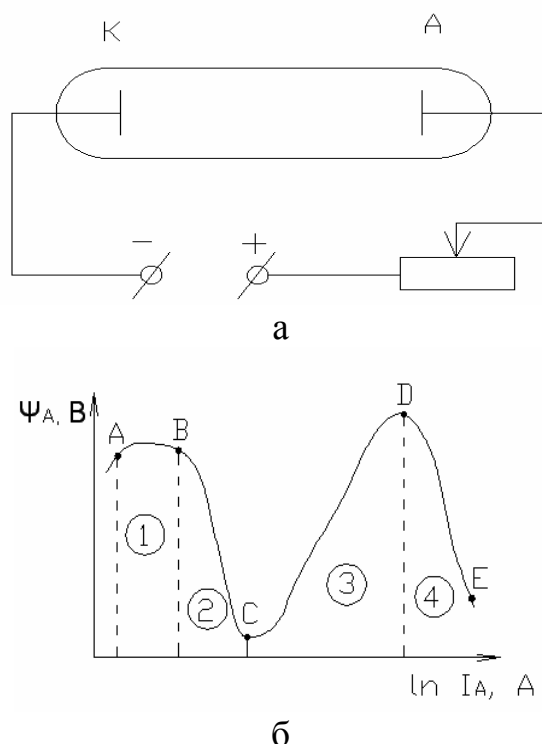


Рис. 2.12 Вольтамперная характеристика разряда постоянного тока (б) и схема его реализации (а)

Область АВ соответствует переходу от таунсендовского разряда (с очень малой плотностью тока — $10^{-15} - 10^{-6} \text{ А/см}^2$) к нормальному тлеющему, при котором эмитирует электроны и покрыта свечением только часть катода. На участке ВС с возрастанием тока «работающая» область катода увеличивается, а плотность тока сохраняется.

Когда вся поверхность катода начинает эмитировать электроны и покрывается свечением, разряд переходит в режим аномального тлеющего (CD). В этом режиме для повышения интенсивности ионизации и роста тока необходимо ускорять до больших скоростей электроны увеличением напряжения на разрядном промежутке.

С дальнейшим подъемом напряжения ускорение электронов сопровождается существенным ускорением ионов, которые начинают бомбардировать катод. Катод разогревается и возникает заметная термоэлектронная эмиссия. Напряжение, необходимое для поддержания разряда, уменьшается, ток существенно растет, разряд переходит в сильноточную дугу с падающей характеристикой.

В дуговом разряде основным процессом генерации ионов и электронов становится термическая ионизация.

Тлеющий и дуговой разряд имеют существенные отличия. Они отличаются, прежде всего, процессами на катоде. В тлеющем разряде эти процессы связаны с выходом электронов под действием ионной бомбардировки, в дуговом — с термоэлектронной эмиссией.

Для тлеющего и дугового разряда существенно различаются распределения потенциала в межэлектродном промежутке.

Основные зоны тлеющего разряда и падение напряжения вдоль оси разрядного промежутка имеют вид:

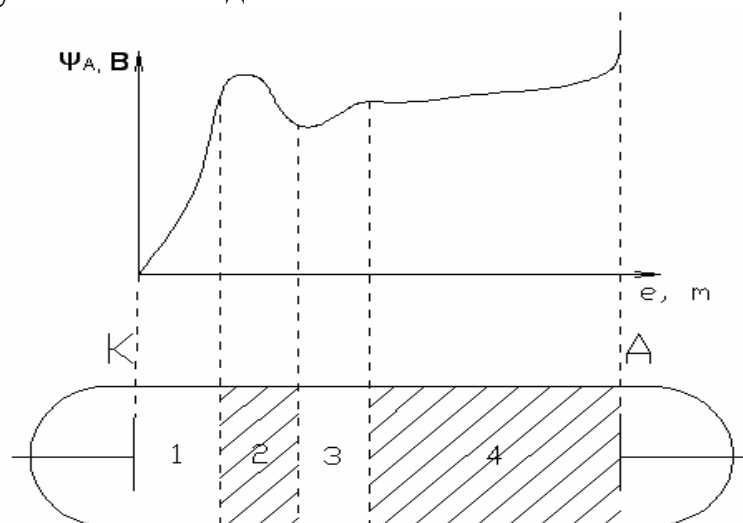


Рис. 2.13 Основные зоны тлеющего разряда и падение напряжения вдоль оси разрядного промежутка

Зоны 1, 2, 3 образуют катодную область разряда.

Область 1 называется темное кружево или темное катодное пространство. В этой области наблюдается основное падение потенциала, вызванное большой концентрацией ионов на границе областей 1 и 2.

В области 1 происходит значительное ускорение электронов и ионов. Ионы направляются к катоду, где происходит взаимодействие ускоренных ионов с материалом катода, в результате которого из катода выбиваются электроны, которые обуславливают поддержание режима самостоятельного разряда, а материал катода под действием ионной бомбардировки распыляется.

В области 2 электроны, набрав достаточную энергию, сталкиваются с атомами или молекулами остаточного газа. Здесь происходит ионизация и возбуждение атомов, в результате чего возникает свечение. Эта область носит название *области катодного свечения*. Именно в этой области образуются ионы, необходимые для поддержания разряда и дают поток распыленных атомов вещества катода.

В области 3, называемой *Фарадеевым темным пространством*, электроны, потерявшие свою энергию в области 2, вновь ее набирают, ускоряясь в электрическом поле. Энергия электронов в области 3 недостаточна для ионизации или возбуждения, поэтому пространство 3 — темное.

В пространстве 4, носящем название *положительного столба*, происходит ионизация и возбуждение атомов газа электронным ударом. Концентрация электронов и ионов здесь велика, падение потенциала незначительно, проводимость большая. Весь положительный столб светится.

При сближении электродов область 4 может совсем исчезнуть. Пространство 1 при этом остается неизменным. При дальнейшем сближении исчезают пространства 3 и 2 и разряд гаснет.

При уменьшении давления при неизменном расстоянии между электродами увеличивается пространство 1, так как возрастает длина свободного пробега. Когда пространство 1 доходит до анода, разряд гаснет.

Для дугового разряда характерные области следующие:

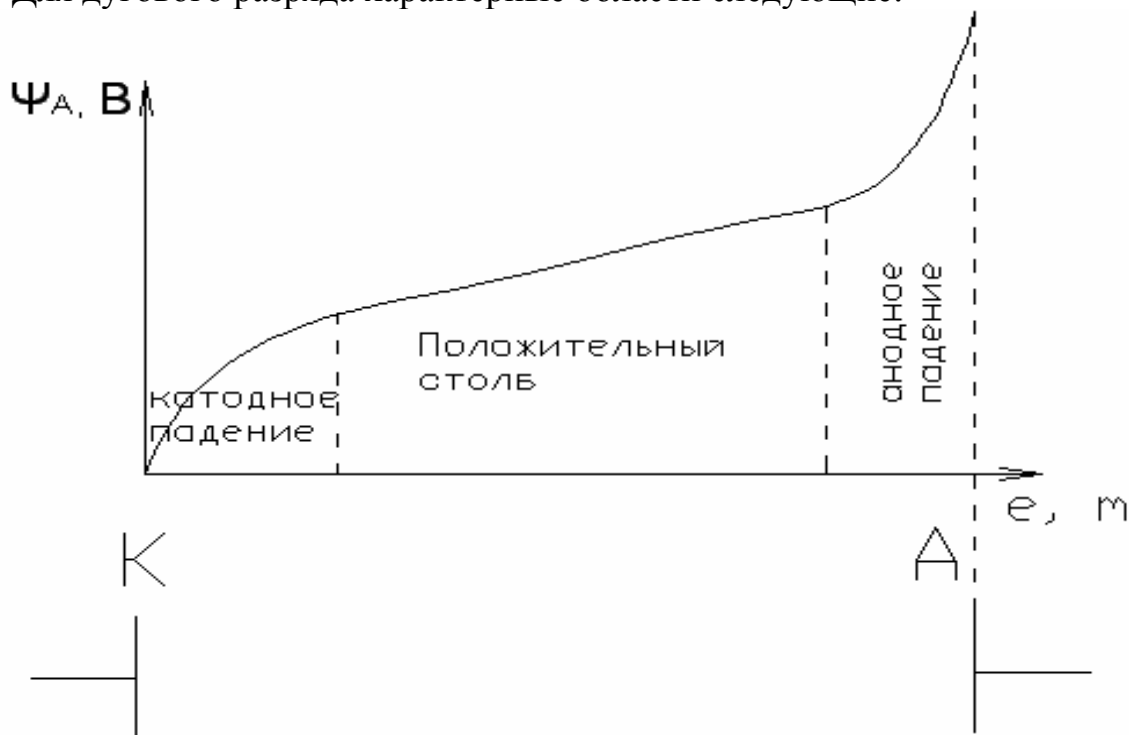


Рис. 2.14 Характерные области дугового разряда

Основными отличиями дугового разряда от тлеющего являются:

- 1) уменьшение катодного падения потенциала;
- 2) резкое возрастание силы тока;
- 3) наличие термической ионизации;
- 4) шнурование разряда;
- 5) увеличение свечения и исчезновение темных пространств.

2.7.3. Высокочастотный газовый разряд

При достаточно высокой частоте тока, сравнимой с частотой столкновений электронов в плазме, возникает особый разряд — *высокочастотный*.

Он может быть как электродным, так и безэлектродным, и наиболее часто используется в технологических плазменных устройствах электронной техники.

В отличие от разрядов постоянного тока, когда процессы на электродах во многом определяют их характер, высокочастотные разряды в большинстве случаев могут существовать без контакта с электродами. Электрическое поле

настолько быстро изменяет свое направление, что заряженные частицы не успевают выйти на электроды или на стенки разрядной камеры. Таким образом, потери электронов и ионов из разряда существенно снижаются, и в некоторых случаях разряд может возникать при небольшой напряженности электрических полей.

Роль вторичной эмиссии в высокочастотных разрядах значительно снижена, так как выбитые из стенок или электродов электроны не способны содействовать развитию разряда, за исключением тех, которые выходят в моменты благоприятного направления поля (в фазе с полем).

Параметры высокочастотных разрядов и плазмы (концентрация частиц, температура разрядов и электронов, напряженность пробойного электрического поля и т. д.) зависят от рода газа, его рабочего давления, частоты поля, размеров камеры, в которой зажигается разряд.

В высокочастотных разрядах электроны дрейфуют в виде облака в фазе с полем и здесь существенную роль играет соотношение между длиной свободного пробега электрона ℓ_e и характерными размерами камеры L .

Если $\ell_e \gg L$, а частота поля ω меньше частоты соударений ν_e , то частицы за полпериода могут долетать до стенок и вызывать вторичные процессы.

С повышением частоты ω амплитуда колебаний частиц становится меньше размеров камеры, ионизация происходит только в объеме, потери частиц связаны только с диффузией, рекомбинацией, прилипанием электронов (в электроотрицательных газах) или химическими процессами, иначе говоря, только с объемными процессами.

Если давление газа не слишком велико или частота ω настолько велика, что превосходит частоту соударений электронов ($\omega \gg \nu_e$), то дрейф частиц отсутствует: они движутся почти свободно. Если еще дальше повышать частоту ω , пока длина волны не станет соизмеримой с размерами камеры, то на электроны воздействует уже не сосредоточенное поле, а электромагнитная волна. Разряд тогда называют сверхвысокочастотным (СВЧ-разряд).

Время τ_e , за которое электрон полностью потеряет при столкновениях приобретенную энергию, можно определить соотношением

$$\nu_e \cdot \delta \cdot \tau_e = 1 \text{ или } \tau_e = \frac{1}{\delta \cdot \nu_e} \quad (2.25)$$

где δ — доля энергии, теряемой при одном столкновении.

Тогда возможны два случая развития разряда.

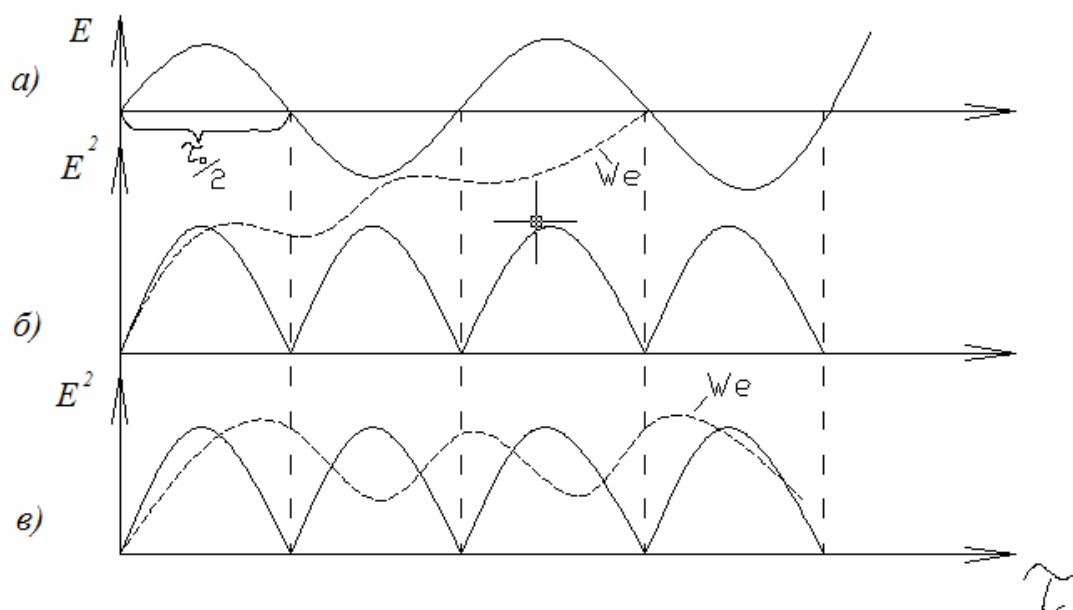


Рис. 2.15 Возможные случаи набора энергии электронами в ВЧ-разряде

На рис. 2.15 представлены возможные случаи набора энергии электронами в ВЧ-разряде:

а — изменение напряженности электрического поля от времени τ ;

б — набор энергии электроном при $\tau_e > \frac{\tau_0}{2}$;

в — изменение энергии электрона при $\tau_e < \frac{\tau_0}{2}$.

В первом случае при $\tau_e > \frac{\tau_0}{2}$ (время полупериода изменения поля) возможен набор энергии электронами W_e за несколько периодов изменения поля, что облегчает пробой и ионизацию газа. Следует отметить, что изменение энергии электрона следует за изменением квадрата напряженности электрического поля.

Во втором случае при $\tau_e < \frac{\tau_0}{2}$ энергия электронов начнет сильно уменьшаться, они не смогут ионизовать газ и потребуются большие напряженности поля для развития разряда.

Минимального значения напряженность поля при высокочастотном пробое E_{np} достигает в области, где $\nu_e \approx \omega$, т. е. когда частота столкновений электронов порядка круговой частоты электрического поля. В этом случае достигается наибольшая проводимость плазмы. При высоких давлениях газа ($\omega \ll \nu_e$) зависимость напряженности пробойного поля от частоты не очень сильная, в то время как при низких давлениях ($\omega \gg \nu_e$) для заданного давления она примерно линейная, т.е. E_{np} пропорциональна ω .

Зависимость $E_{пр}$ от давления обычно имеет вид типичных кривых, описываемых законом Пашена для разрядов постоянного тока (рис. 2.16)

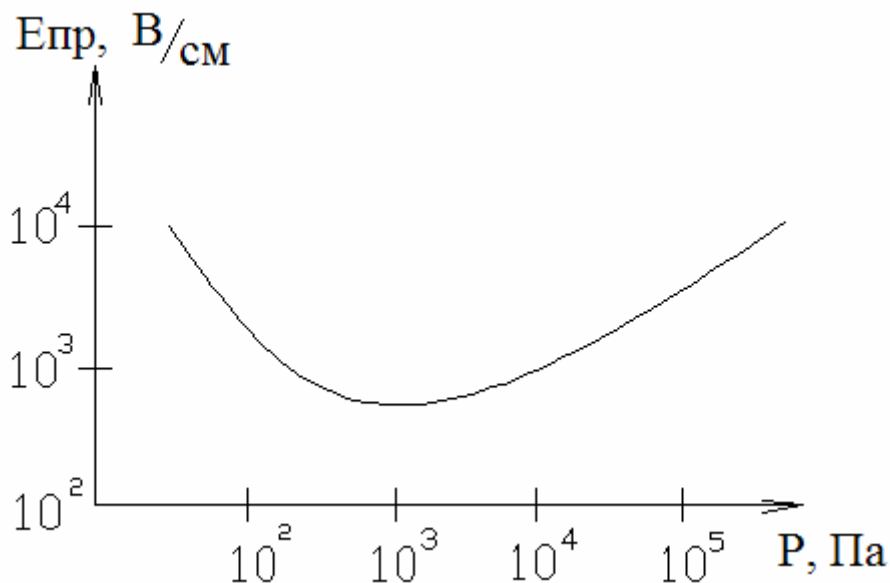


Рис. 2.16 Кривая напряженности электрического поля для ВЧ-пробоя в неоне

Численные значения зависят от рода газа и частоты поля. При наложении внешних магнитных полей, например, в направлении, перпендикулярном электрическому полю, условия существования разряда облегчаются. Это объясняется тем, что описывая винтовые линии на пути вдоль электрического поля, электрон вынужден проходить большее расстояние, что увеличивает число его столкновений с молекулами газа на единицу пути.

Высокочастотные разряды (в том числе и СВЧ-разряд) можно разделить на два типа.

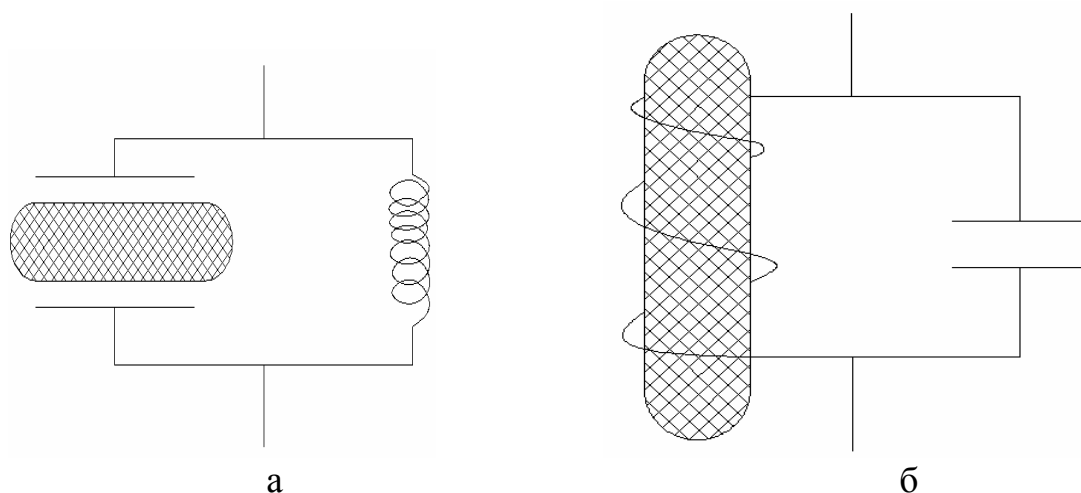


Рис. 2.17 Типы ВЧ-разрядов

Одни так называемые E -разряды (рис. 2.17, а), характеризуются тем, что токи внутри них связаны в внешней цепи через токи смещения, которые возникают из-за дрейфа облака электронов в фазе с полем. Такие разряды

существуют в устройствах между обкладками конденсатора, включенного в высокочастотный контур, или во внутренней полости объемного резонатора или волновода на волне типа E_{mn} . Волны E_{mn} (так же как волны H_{mn}) имеют, кроме поперечных составляющих, продольные составляющие поля.

Другие разряды — H (рис. 2.17, б)-типа имеют индуктивную связь с внешними цепями и существуют в устройствах типа диэлектрических камер, помещенных внутри катушки индуктивности контура. Плазма образуется чаще всего в виде кольца. В котором возникают вторичные кольцевые токи. СВЧ-разряды H -типа обычно зажигаются в резонаторах или волноводах на волне типа H_{mn} на частотах порядка $10^8 - 10^{10}$ Гц.

Высокочастотные разряды, используемые в технике реализуются в промышленных устройствах только на разрешенных диапазонах частот, чтобы не создавать помех радиосвязи. Наиболее часто применяемые диапазоны следующие: 440 кГц; 880 кГц; 1,76 МГц; 5,28 МГц (с точностью $\pm 2,5\%$); 13,56 МГц; 27,12 МГц; 40,68 МГц (с точностью $\pm 1\%$).

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Характеристика ультразвука как физического фактора

По своей физической природе ультразвук (УЗ), так же как и слышимый звук, представляет собой упругие колебания и волны, т. е. чередующиеся во времени процессы механического сжатия и разрежения, распространяющиеся в твердой, жидкой и газообразных средах. От слышимого звука ультразвук отличается лишь частотой. Слышимый звук охватывает диапазон частот от 16 Гц до 15–20 кГц, а ультразвук — область неслышимых частот от ~15–20 кГц до 10^9 Гц.

Ультразвуковые (звуковые) волны представляют собой механические упругие колебания, которые могут распространяться только в упругой среде, в отличие от электромагнитных колебаний. Частицы среды, в которой распространяются УЗК, периодически колеблются около положения равновесия. Приблизительно можно считать, что колебания частиц совершаются во времени по синусоидальному закону с амплитудой смещения A .

Сгущения и разрежения, которые образуются в среде при прохождении в ней упругой волны, добавочно изменяют давление по отношению к среднему (статистическому). Эта добавочная переменная часть давления называется *звуковым давлением*. Его амплитуда, Па :

$$p_{зм} = 2\pi \cdot \rho \cdot c \cdot f \cdot A \quad (3.1)$$

где ρ — плотность среды, кг/м³ ;

c — скорость распространения упругой волны (скорость звука), м/с ;

f — частота колебаний, Гц ;

A — амплитуда смещения, м .

Скорость, с которой материальные частицы совершают упругие колебания около своих положений равновесия, называется колебательной.

Между колебательной скоростью и звуковым давлением существуют взаимосвязь, определяемая свойствами среды. Для плоской звуковой волны взаимосвязь между давлением и колебанием определяется акустическим законом Ома

$$R_a = \frac{p_{зм}}{y} = \rho \cdot c \quad (3.2)$$

где R_a — акустическое (волновое) сопротивление среды;

y — колебательная скорость.

Скорость распространения звуковой волны зависит от плотности среды, в которой движется волна:

$$c = \frac{S}{\rho} \quad (3.3)$$

где S — модуль продольной упругости (модуль Юнга).

Из формулы следует, что скорость звуковой волны тем больше, чем жестче и легче материал среды.

При распространении ультразвуковой волны в среде происходит перенос энергии, которую можно использовать в технологических процессах. Энергию волны, проходящую в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную распространению волны, называют интенсивностью ультразвука, Вт/м² :

$$I = \frac{P_{\text{зм}}^2}{2 \cdot \rho \cdot c} = 2 \cdot \rho \cdot c \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2 \quad (3.4)$$

По мере распространения ультразвуковой волны в среде ультразвук поглощается, т. е. его энергия переходит в другие виды энергии, в частности в теплоту. Интенсивность плоской звуковой волны, распространяющейся вдоль оси x , убывает с расстоянием как $e^{-2 \cdot \alpha \cdot x}$, где α — коэффициент поглощения звука, м⁻¹.

При переходе УЗ-волны из одной среды в другую, если их волновые сопротивления не равны, часть энергии волны отражается от границы раздела двух сред обратно в первую среду, а остальная часть проходит во вторую среду. Отношение интенсивности отраженной волны к интенсивности падающей, называемое коэффициентом отражения k_0 , зависит от волновых сопротивлений сред:

$$k_0 = \left(\frac{\rho_1 \cdot c_1 - \rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2} \right)^2 \quad (3.5)$$

При переходе УЗ-волны из твердого тела в воздух, коэффициент отражения близок к единице. Например, при движении УЗ-волны из никеля в воздух $k_0 = 0,99996$, т.е. ультразвук в воздух практически не проходит. Существенно меньшая часть энергии УЗ отражается от границы «твердое тело — жидкость». Например, при движении УЗ-волны из никеля в воду $k_0 = 0,88613$. поэтому ультразвуковая обработка проводится с использованием промежуточной рабочей жидкости, с которой контактируют как излучатель УЗ, так и обрабатываемый объект.

3.2. Основные эффекты УЗ-колебаний в среде

Ультразвуковые колебания сопровождаются рядом эффектов, которые могут быть использованы как базовые для разработки различных процессов.

Кавитация — нарушение сплошности жидкости, возникающее при давлении ниже некоторого критического значения. При этом происходит процесс образования полостей и пузырьков в ультразвуковом поле во время фазы растяжения, имеющейся в переменном звуковом давлении. Эти полости и пузырьки аннигилируют (схлопываются) во время фазы сжатия. В зоне схло-

пывания кавитационного пузырька возникают большие местные мгновенные давления, достигающие значений $10^7 - 10^8 \text{ Н/м}^2$.

Поглощение ультразвуковых колебаний веществом — необратимый процесс, в котором часть энергии превращается в тепловую энергию, другая же часть расходуется на изменение структуры вещества. Поглощение возникает вследствие взаимного трения частиц, зависит от свойств вещества и пропорционально квадрату частоты.

Поверхностное трение возникает вследствие движения частиц у граничной поверхности, разделяющей различные среды. Перечисленные явления лежат в основе ряда технологических процессов.

Разделение молекул и частиц различной массы в неомогенных суспензиях в звуковом поле зависит от состава суспензий и частоты поля.

Коагуляция заключается в образовании из мелкодисперсных частиц (дыма, пыли, тумана) значительно более крупных частиц. Движение частиц при наличии между ними сил притяжения приводит к соударению и в результате к их обеднению и укрупнению.

Дегазация жидкостей или расплавов с помощью ультразвуковых колебаний происходит вследствие вытеснения газовых пузырьков, которые приходят в движение, объединяются в пузырьки больших размеров и всплывают.

Диспергирование является эффектом, противоположным коагуляции, и заключается в дроблении вещества и перемешивании его с другими.

3.3. Технологическое использование силового и физико-химического действия ультразвука

К преимуществам ультразвуковой обработки относятся:

1. возможность получения акустической энергии различными техническими приемами;
2. широта диапазона технологического применения ультразвука — от размерной обработки до получения неразъемных соединений (сварка, пайка и т. д.);
3. простота эксплуатации и автоматизации промышленных установок.

К недостаткам этого метода относятся:

1. повышенная стоимость акустической энергии по сравнению с другими видами энергии;
2. необходимость изготовления специальных установок и аппаратов для генерации ультразвуковых колебаний, их передачи и распределения.

Рассмотрим примеры технологического использования УЗ в основных производственных процессах микроэлектроники и радиоаппаратостроения.

Применение УЗ в процессах, основанных на тепломассообмене.

Ультразвук используют для очистки поверхностей твердых тел (деталей, сборочных единиц, изделий) от загрязнения. Предметы, подлежащие очистке, помещают в ванну, заполненную моющим раствором. Электроакустический преобразователь встраивают в дно или стенки ванны либо погружают в

раствор. Типовые параметры процесса: $f = 18 - 44$ кГц, $I = 2,5 - 100$ кВт/м², время очистки — от десятков секунд до десятков минут. Кавитационные пузырьки, играющие основную роль в процессе УЗ-очистки, проникают под пленку загрязнения, разрывают и отслаивают ее.

Применение ультразвука позволяет:

- 1) значительно ускорить процесс очистки;
- 2) повысить ее качество (например, при прополаскивании деталей на их поверхности остается до 88 % загрязнений, при вибрационной очистке — около 55 %, при ручной — около 20 %, а при ультразвуковой — не более 0,5 %);
- 3) исключить вредный ручной труд;
- 4) заменить дорогие токсичные либо пожароопасные растворители водой или дешевыми водными растворами.

Ультразвуковую очистку применяют перед сборкой, окраской, нанесением покрытий и другими операциями. Особенно эффективно применять ультразвук для очистки деталей, имеющих сложную форму и труднодоступные места.

Ультразвук можно использовать также и для интенсификации других процессов, связанных с тепломассообменом: сушка материалов, пропитка пористо—капиллярных материалов жидкостью (пропитка электрической изоляции лаком) и т. д.

Применение УЗ для различной обработки твердых хрупких материалов.

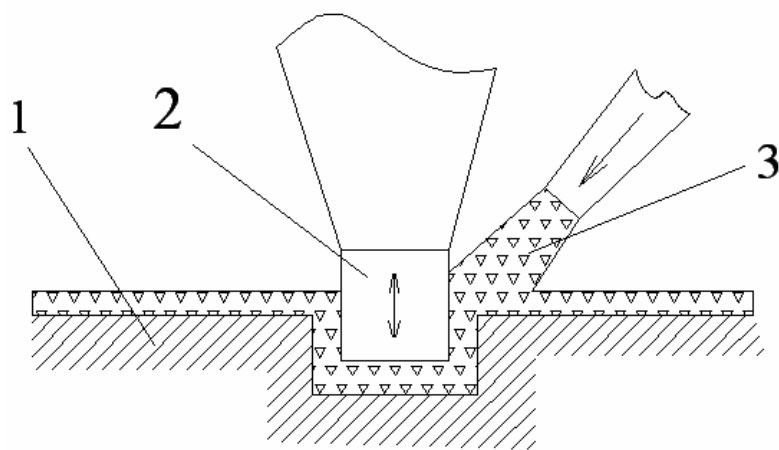


Рис. 3.1 Схема УЗ обработки твердых хрупких материалов

Сущность этой обработки состоит в том, что между инструментом 2, колеблющемся с частотой 18 – 44 кГц и амплитудой 10 – 60 мкм, и обрабатываемой поверхностью заготовки 1 подаются взвешенные в жидкости (как правило в воде) зерна абразива 3. Инструмент периодически ударяет по зернам абразива, которые выкалывают микрочастицы с поверхности заготовки. Поскольку инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности, то на ней постепенно образуется углубление, копирующее форму рабочей части инст-

румента. Таким образом осуществляется соответствующая операция: вырезание, прошивание, сверление и т. д.

Ультразвуковая размерная обработка в отличие от электроэрозионной пригодна для обработки как проводящих, так и диэлектрических материалов. Наиболее эффективна УЗ-обработка при изготовлении деталей и отверстий сложной формы в изделиях из твердых хрупких материалов (стекло, керамика, алмаз, германий, кремний и т. д.), обработка которых другими методами затруднена.

Применение УЗ для соединения материалов.

Ультразвук применяется для пайки и сварки металлов.

Ультразвуковая пайка отличается от обычной тем, что жало паяльника жестко связано через концентратор с электроакустическим преобразователем и совершает колебания с частотой 18 – 44 кГц и амплитудой 3 – 20 мкм. Ультразвуковые колебания вызывают в расплавленном припое кавитацию, которая способствует разрушению окисной пленки на поверхности металла. Чистый металл, обнажившийся при этом, облуживается. Ультразвук позволяет проводить пайку легкоокисляющихся металлов (например, алюминий) без специальных флюсов и повысить качество соединений.

Ультразвуковая сварка. При ультразвуковой сварке металлов соединяемые детали прижимаются одна к другой под действием относительно небольшой силы, направленной по нормали к поверхности их соприкосновения. По касательной к этой поверхности направлены ультразвуковые колебания, которые разрушают пленку окиси на поверхности деталей и вызывают в зоне сварки состояние пластичности или текучести. При этом под действием нормальной силы детали соединяются.

Сварка происходит без заметного нагрева металла, вследствие чего его структура в зоне сварки изменяется мало. Ультразвук можно использовать для сварки листов очень малой толщины (доли миллиметра), при этом требования к чистоте поверхности снижены.

Применение УЗ для диспергирования коагуляции.

Используются следующие виды ультразвукового диспергирования:

1. образование суспензий (измельчение твердых тел в жидкости);
2. получение жидких аэрозолей (распыление жидкостей в вакууме);
3. получение эмульсий (получение мелких капелек одной из взаимно нерастворимых жидкостей в среде другой).

Применение ультразвука для получения информации.

Основано на анализе ультразвукового сигнала, прошедшего через исследуемый объект или отраженного от него. В качестве приемника УЗ чаще всего применяют пьезоэлектрические преобразователи. Методы получения информации при помощи УЗ можно разделить на две группы:

I. Методы, основанные на измерении затухания и скорости распространения ультразвуковых волн в среде, связанные с зависимостью коэффициента поглощения α и скорости звука c от состава и свойств среды (влажмеры, измерители содержания примесей и др.).

II. Методы, основанные на отражении ультразвуковых волн от границы раздела двух сред. Применяют в таких областях, как гидролокация (определение положения подводных объектов), дефектоскопия, медицинская диагностика и др.

4. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

4.1. Понятие и механизм электрической эрозии

Для обработки металлов с высокими механическими свойствами применяется метод размерной обработки при непосредственном использовании теплового эффекта электрической энергии — электроэрозионная обработка. Она основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала под тепловым воздействием импульсов электрической энергии, которая выделяется в канале электроискрового разряда между поверхностью обрабатываемой детали и электродом-инструментом, погруженным в жидкую непроводящую среду. Следующие друг за другом импульсные разряды определенной длительности и формы производят выплавление и испарение микропорций металла.

Постадийно, физические процессы, протекающие в межэлектродном зазоре при электроэрозионной обработке, могут быть представлены следующим образом.

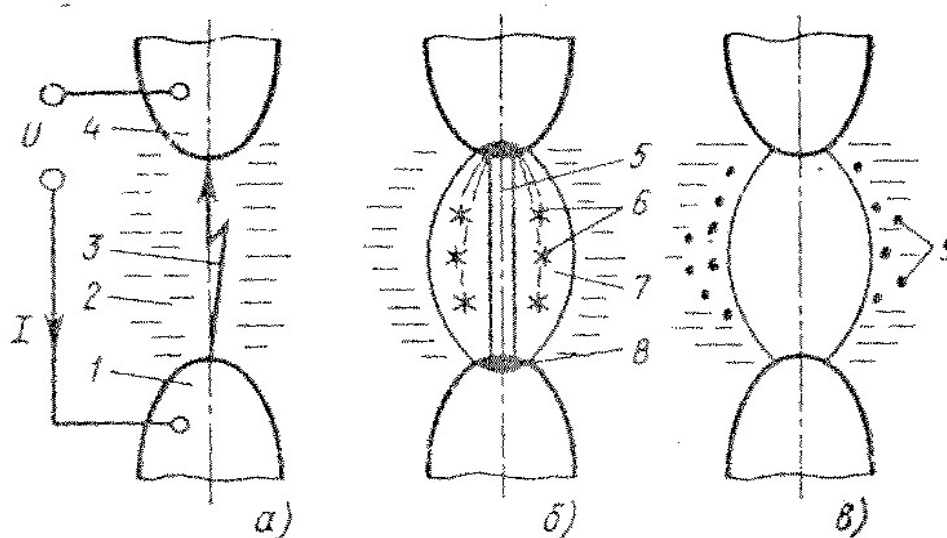


Рис. 4.1 Схема физических процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке

По достижении импульсным напряжением u определенного значения между электродом-деталью 1 в диэлектрической жидкости 2 происходит электрический пробой. При этом от электрода, который в данный момент является катодом, отделяется стример 3 и направляется к аноду, ионизируя на своем пути жидкость. В результате этой фазы (ее длительность $10^{-9} - 10^{-7}$) образуется канал сквозной проводимости и сопротивление межэлектродного промежутка снижается от нескольких мегаом до долей ома (рис. 3.1, а).

Через канал проводимости в виде импульса выделяется электрическая энергия, накопленная в источнике питания (рис. 3.1, б). при этом происходит

электрический разряд 5, длительность которого составляет $10^{-6} - 10^{-4}$ с, для которого характерна падающая вольт-амперная характеристика. Разряд проходит искровую и дуговую стадии. Благодаря высокой концентрации энергии в зоне разряда и приэлектродных областях развиваются высокие температуры. Под их воздействием образуется парогазовая полость 7. В приэлектродных областях 8 происходит плавление и испарение микропорций металла на поверхности электрода. В результате развивающегося давления капли жидкого металла 6 выбрасываются из зоны разряда и застывают в окружающей электрода жидкой среде в виде мелких сферических частиц 9 (рис. 3.1, в).

После пробоя электрическая прочность межэлектродного промежутка восстанавливается. Следующий разряд возникает в другом месте между другими неровностями поверхностей электродов. При этом электрод-инструмент получает возможность внедряться в обрабатываемую деталь.

Выделяющаяся в столбе разряда энергия расходуется на испарение жидкости и представляет собой потери энергии. Это обусловило уменьшение длины межэлектродных промежутков между электродами (1–10 мкм), что диктуется также условиями техники безопасности по снижению рабочего напряжения установки.

Электрическая эрозия электродов определяется процессами, проходящими в приэлектродных областях на границе разряда, с одной стороны, и анодом или катодом — с другой.

Поток тепловой энергии, поступающий на граничащую с токопроводящим каналом часть катода, складывается из нескольких составляющих:

1. кинетическая энергия ионов, приобретаемая при их ускорении в зоне катодного падения потенциала, U_k ;
2. потенциальная энергия ионов, которые разряжаясь на катоде, отдают ему энергию ионизации, а отходя от него в виде атома, уносят энергию, равную работе выхода электрона ϕ_k ;
3. тепловая энергия нейтральных частиц с температурой T_u , отдающих мощность P_T на единичной площадке.

Суммарный тепловой поток, поступающий на катод:

$$q_k = j_k \left[\beta_u (U_k - A_u) - \left(\phi_k - \frac{\sqrt{eE_k}}{\sqrt{\epsilon_0}} \right) \right] + P_T \quad (4.1)$$

где j_k — плотность полного тока на катоде;

β_u — доля ионного тока, $\beta_u = \frac{j_u}{j_k}$, здесь j_u — плотность ионного тока;

A_u — энергия ионизации атома;

E_k — напряженность поля в зоне катодного падения потенциала;

e — заряд электрона;

$P_T = \frac{3}{2} kT_u \cdot n_{\text{пов}}$, где $n_{\text{пов}}$ — количество частиц, пропорциональное их давлению в канале, приходящееся на единицу поверхности за 1 с.

Как следует из этого выражения, износ катода-инструмента, а также съем с катода заготовки определяются ионным током и мощностью P_T .

Поступающий на анод тепловой поток состоит из следующих компонент: *Кинетическая энергия электрона* eU_a , накопленная им при ускорении в области анодного падения потенциала U_a . Мощность, поступающая на единицу поверхности анода, обусловленная электронами, равна $j_a(1 - \beta_u) \cdot U_a$ (j_a — плотность анодного тока).

Энергии, равной *работе выхода электрона* из анода ϕ_a , соответствует мощность на единице поверхности $j_a(1 - \beta_u) \cdot \phi_a$.

Тепловая энергия нагретых нейтральных частиц, соответствующая мощности на единице поверхности P_T .

Тепловая и кинетическая энергия паров, исходящих из катодного пятна. Передаваемая ими удельная мощность $P_{\text{пар}}$ растет с повышением температуры плавления материала катода и скорости пара в струе.

Удельные потери энергии на аноде равны $j_u \phi_u$, где j_u — плотность ионного тока; ϕ_u — работа выхода положительных ионов;

$$\phi_u = \phi_{\text{исп}} + \phi_{\text{ион}} \left(\phi_a - \frac{\sqrt{eE_a}}{\epsilon_0} \right) \quad (4.2)$$

здесь $\phi_{\text{исп}}$ — энергия, эВ, достаточная для «испарения» одного атома; E_a — напряженность поля в зоне анодного падения потенциала.

Удельный тепловой поток на анод

$$q_a = j_a \left(U_a + \left(\phi_a - \frac{\sqrt{eE_a}}{\epsilon_0} \right) \right) - j_a \beta_{\text{исп}} \left(\phi_{\text{исп}} + \phi_{\text{ион}} \left(\phi_a - \frac{\sqrt{eE_a}}{\epsilon_0} \right) \right) + P_T + P_{\text{пар}} \quad (4.3).$$

Как следует из выражений для тепловых потоков, поступающих на электроды, интенсивность процесса электрической эрозии определяется тепло- и электрофизическими свойствами обрабатываемых металлов.

В месте действия импульса тока на поверхности электродов остаются небольшие углубления — лунки, образовавшиеся вследствие удаления рядом некоторого количества металла. Параметры лунки (диаметр и высота) определяются мощностью импульсного разряда, его длительностью и свойствами материала. Таким образом, для лунки диаметром d и глубиной h можно записать:

$$d = f(\phi_a, k, A_u, U_k, U_a) \quad (4.4)$$

$$h = f_1(C_p, \lambda) \quad (4.5)$$

где ϕ_a — работа выхода электрона из анода;

A_u — энергия ионизации атома (молекулы) среды;

U_k — величина катодного падения потенциала;

U_a — величина анодного падения потенциала;

C_p — удельная теплоемкость;

λ — коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала.

В процессе электроэрозионной обработки материалов могут изнашиваться оба электрода. Для сохранения электрода-инструмента следует подобрать пару металлов инструмента и изделия, чтобы инструмент не разрушался; подобрать режим работы источника питания или вообще его параметры так, чтобы инструмент оставался целым.

4.2. Параметры электрических разрядов

Параметры электрических (как правило импульсных) разрядов в значительной мере определяют эффект электроэрозионной обработки металлов.

Поскольку при прохождении тока разряда межэлектродный промежуток имеет малое сопротивление, амплитудные значения тока в импульсах достигают нескольких миллионов ампер, скорость нарастания тока $di/d\tau$ — до 10^8 А/см, а давление в зоне разряда достигает 10^8 Н/м².

На рис. 3.2 показана форма импульсов тока при электроэрозионной обработке.

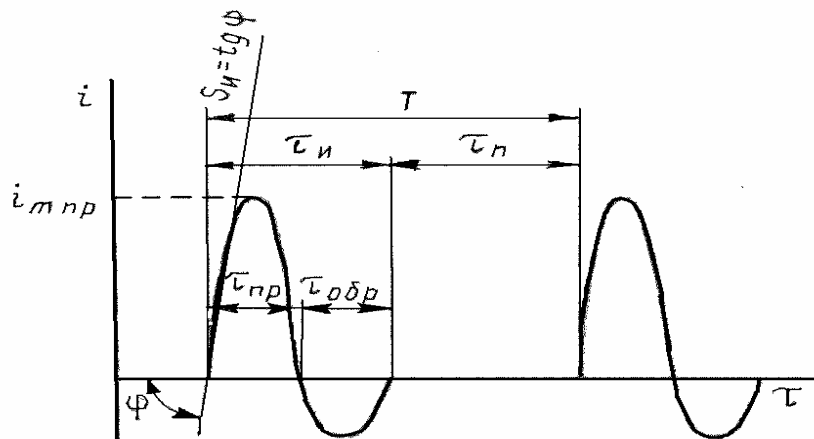


Рис. 3.2 Форма импульсов тока в межэлектродном промежутке

В составе импульса различают две стадии: рабочую — с импульсом прямой полярности $\tau_{пр}$ и холостую — с импульсом обратной полярности $\tau_{обр}$.

Прямой полярностью импульса считается та его часть, которая вызывает наибольшее разрушение обрабатываемой детали. Она изображается над осью абсцисс независимо от ее истинной полярности.

Часть импульса, вызывающая разрушение электрода-инструмента, называется *обратной полярностью импульса* и располагается под осью абсцисс.

Униполярные импульсы — это импульсы, разрушающие только изделие.

Количество импульсов в секунду называется частотой импульсов $f_{\text{и}}$. Величину, обратную частоте, называют периодом $T = 1/f_{\text{и}}$. Он состоит из длительности импульса $\tau_{\text{и}}$ и паузы между импульсами $\tau_{\text{п}}$. Отношение периода импульса к его длительности называют скважностью. Скорость нарастания тока $di/d\tau$ называют крутизной импульса $S_{\text{и}}$; она равна тангенсу угла ψ наклона касательной к кривой фронта импульса.

Параметрами импульсов также являются максимальные и средние значения тока и напряжения, максимальная и средняя мощность импульса, а также его энергия.

Средние значения токов и напряжений в импульсе определяют по формулам

$$\begin{cases} I_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^{\tau_{\text{и}}} i(\tau) d\tau, \\ U_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^{\tau_{\text{и}}} u(\tau) d\tau, \end{cases} \quad (3.6)$$

где i и u — мгновенные значения тока и напряжения.

Действующие значения тока и напряжения за период соответственно

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(\tau) d\tau}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(\tau) d\tau} \quad (3.7)$$

Энергия импульса

$$A = \int_0^{\tau_{\text{и}}} u(\tau) \cdot i(\tau) d\tau \quad (3.8)$$

Средняя мощность импульса

$$P_{\text{и ср}} = \frac{A}{\tau_{\text{и}}} \quad (3.9)$$

4.3. Сравнительная характеристика технологических возможностей процессов ЭЭО

Общие преимущества ЭЭО по сравнению с обработкой резанием заключается в следующем:

1. возможность осуществлять технологические операции, не выполнимые другими способами (например, прошивание отверстий сложной формы и диаметром менее 0,3 мм);
2. возможность обрабатывать проводящие материалы с любыми механическими свойствами (прочностью, твердостью, вязкостью, хрупкостью) инструментом из дешевых, легко обрабатываемых материалов;

3. значительно снижается трудоемкость по сравнению с обработкой резанием;
4. отсутствует механическое воздействие на заготовку и инструмент;
5. возможно осуществление механизации и автоматизации с целью глубокого регулирования параметров процесса;
6. снижение отходов.

Однако по сравнению с механической электроэрозионная обработка имеет ряд существенных недостатков:

1. производительность при такой обработке обычных материалов (стали, цветных металлов и т. д.) значительно ниже, чем при обработке резанием, а расход энергии выше;
2. для получения высокой чистоты поверхности приходится затрачивать больше времени, чем, например, при абразивной обработке.

Электроэрозионные методы используются в основном для обработки твердых материалов и изготовления сложных фасонных деталей.

Электроэрозионная обработка может осуществляться профилированным или непрофилированным электродом-инструментом (ЭИ).

В первом случае размеры и форма рабочих частей ЭИ определяются в соответствии с заданной поверхностью изготавливаемой детали.

Во втором случае ЭИ имеет простейшую конфигурацию (проволока, диск или стержень), а его размеры лишь частично связаны с размерами электрода-детали.

4.4. Методы электроэрозионной обработки

К электроэрозионным методам обработки относят:

- электроискровую;
- электроимпульсную;
- высокочастотные электроискровую и электроимпульсную;
- электроконтактную.

При *электроискровой обработке* используют импульсные искровые разряды между электродами, один из которых обрабатываемая заготовка (анод), а другой — инструмент (катод).

Напряжение источника электрической энергии (100 – 200) В. Продолжительность импульса составляет (20 – 200) мкс.

В зависимости от количества энергии, расходуемой в импульсе, режим обработки делят на жесткий или средний - для предварительной обработки и мягкий или особо мягкий для отделочной обработки. Мягкий режим обработки позволяет получать размеры с точностью до 0,002 мм при шероховатости 0,63-0,16 мкм.

Производительность обработки составляет от 7,5 до 1900 мм³/мин.

Электроискровым методом обрабатывают практически все токопроводящие материалы, но эффект эрозии при одних и тех же параметрах электрических импульсов различен. Зависимость интенсивности эрозии от

свойств металлов называют электроэрозионной обрабатываемостью. За единицу принята электроэрозионная обрабатываемость стали (сталь 45), тогда для твердых сплавов она будет 0,5; титан – 0,6; никель – 0,3; медь – 1,1; латунь – 1,6; алюминий – 4 и т.д.

Электроискровым методом целесообразно обрабатывать твердые сплавы, труднообрабатываемые металлы и сплавы, тантал, молибден, другие материалы.

Схемы организации процессов электроискровой обработки.

Электроэрозионная отрезка

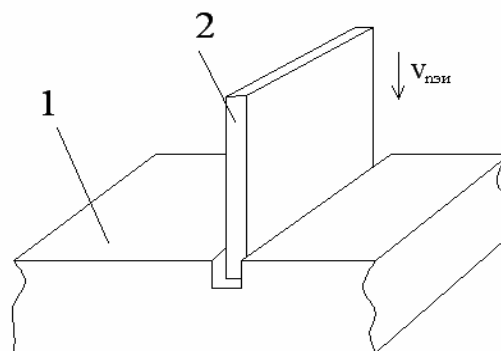


Рис. 3.3 Схема организации процесса электроэрозионной отрезки прямым электродом-инструментом

Электрод-инструмент 2 перемещается со скоростью $V_{пэи}$ по отношению к заготовке. Заготовка неподвижна.

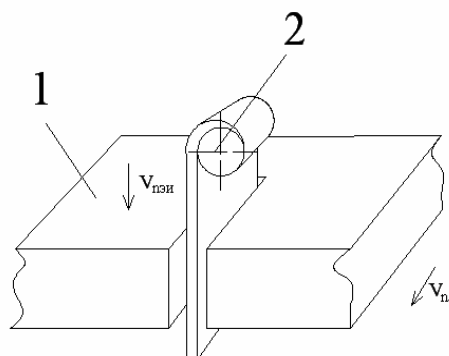


Рис. 3.4 Схема организации процесса электроэрозионной отрезки ленточным электродом-инструментом

Заготовка 1 перемещается со скоростью $V_{пз}$. Операцию выполняют погружением в ванну с РЖ.

Электроэрозионное объемное копирование

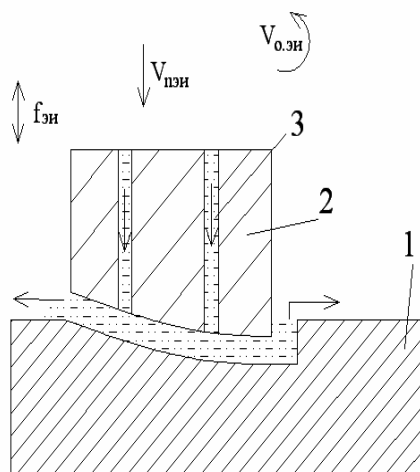


Рис. 3.5 Схема организации процесса электроэрозионного объёмного копирования

Обработка производится прямым копированием электрода-инструмента 2 на заготовку 1 в ванне с рабочей жидкостью с прокачкой или без прокачки её через каналы 3 в ЭИ. Для стабилизации обработки используют вибрацию ЭИ($f_{ЭИ}$), а для повышения точности обработки – осцилляцию ($V_{О.ЭИ}$) в процессе перемещения электрода в направлении заготовки ($V_{П.ЭИ}$).

Электроэрозионное прошивание

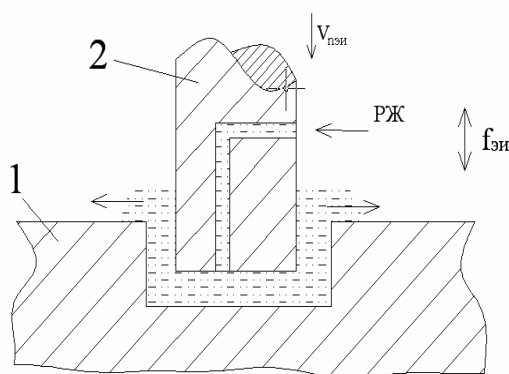


Рис. 3.6 Схема организации процесса электроэрозионного прошивания прямым электродом-инструментом

Подача электрода-инструмента со скоростью $V_{П.ЭИ}$ относительно заготовки и вибрация с частотой $f_{ЭИ}$.

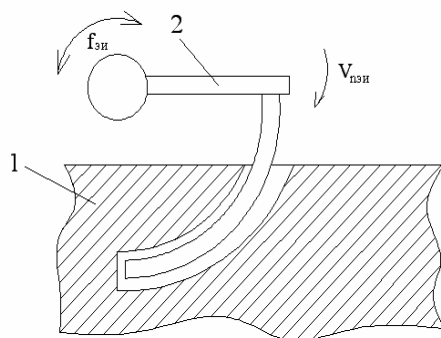


Рис. 3.7. Схема организации процесса электроэрозионного прошивания изогнутым электродом-инструментом

Обработка производится прямым копированием в ванне с РЖ с одновременной прокачкой её через электрод-инструмент или без прокачки.

При электроимпульсной обработке используют электрические импульсы большой длительности (500-1000 мкс.), в результате чего происходит *дуговой разряд*.

Большие мощности импульсов получаемых от электронных или машинных генераторов тока, обеспечивают высокую производительность процесса обработки.

Электроимпульсная обработка производится при напряжениях генератора импульсов $U=18-36$ В.

При электроимпульсной обработке съем металла в единицу времени в 8-10 раз больше, чем при электроискровой обработке, однако точность размеров и шероховатость обработанных поверхностей ниже.

Высокочастотная электроискровая обработка применяется для повышения точности и уменьшения шероховатости поверхностей, обработанных электроимпульсным методом. Метод основан на использовании электрических импульсов малой мощности при частоте 10-150 кГц.

Полнота включения электрода-инструмента и заготовки – прямая. Точность поверхности ниже, чем при электроискровой обработке.

5. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

5.1. Технологические особенности электронно-лучевого нагрева

Электронно-лучевой нагрев применяется для выполнения следующих технологических операций:

1. получение отверстий, резка металлов, диэлектриков, синтетических материалов;
2. получение монтажных соединений в изделиях микроэлектроники;
3. испарение металлов и оксидов с целью металлизации и напыления;
4. сварка узлов электронных приборов, корпусов мощных полупроводниковых приборов, герметизация сваркой изделий электроники;
5. сварка тугоплавких и химически активных металлов толщиной от нескольких десятых долей миллиметра до десятков и более миллиметров;
6. сварка крупногабаритных (более 100 мм) изделий ответственного назначения из различных металлов, когда необходимо глубокое и узкое проплавление металла;
7. сварка изделий из разнородных металлов (тугоплавких и обычных), не удающаяся на воздухе;
8. получение сплавов особо чистых веществ;
9. выращивание монокристаллов и т. д.

С технической точки зрения основными преимуществами электронно-лучевого нагрева следует считать:

1. возможность в широких пределах плавно изменять удельную энергию в зоне нагрева;
2. большую удельную мощность (от десятков ватт до нескольких мегаватт) в месте взаимодействия электронного луча с обрабатываемым изделием;
3. возможность управления пространственным положением луча с помощью магнитной системы;
4. возможность использования вакуума как рабочей среды;
5. возможность получения прецизионной (малоразмерной) зоны воздействия электронного луча на обрабатываемый материал.

К временным недостаткам этого вида нагрева следует отнести:

1. необходимость обеспечения высокого вакуума в электронной пушке;
2. сложность изготовления, эксплуатации и высокую стоимость электронно-лучевого оборудования.

В нагревательных установках с использованием электронного луча электронный луч представляет собой направленный поток электронов, переносящий энергию от излучателя электронов к зоне обработки.

Этапами формирования электронного луча являются:

— получение эмиссии свободных электронов;

- ускорение электронов электростатическим полем и фокусирование электронного пучка;
- отклонение луча по необходимой траектории для целей обработки.

Ускоренные электроны приобретают кинетическую энергию, пропорциональную их скорости. При торможении высокоскоростных электронов в веществе происходит переход их кинетической энергии в теплоту вещества обрабатываемого объекта.

Так как электроны теряют свою энергию при столкновении с молекулами и атомами вещества, то в пространстве рабочей камеры должен поддерживаться высокий вакуум, который необходим также для защиты катода бомбардировки положительным ионами.

5.2. Взаимодействие электронного луча с веществом

Вышедший из катода электронной пушки электрон ускоряется в электрическом поле и приобретает энергию

$$W_e = \frac{m_e \cdot v^2}{2} = e_0 \cdot U \quad [\text{эВ}] \quad (5.1)$$

где m_e , e_0 — масса и заряд электрона;

U — пройденная электроном разность потенциалов (В).

излучаемые катодом электроны ускоряются в электрическом поле и формируются электрическими и магнитными полями в электрический луч. Мощность электронного луча

$$P_{\text{л}} = I_{\text{л}} \cdot U_y \quad (5.2)$$

где $I_{\text{л}}$ — ток луча, (А);

U_y — ускоряющее напряжение, В.

Удельная мощность в луче и на поверхности обработки

$$P_{\text{л.уд.}} = \frac{P_{\text{л}}}{S_{\text{л}}} = \frac{I_{\text{л}} \cdot U_y}{\pi \cdot r_{\text{л}}^2} \quad (5.3)$$

где $S_{\text{л}}$ и $r_{\text{л}}$ — поперечное сечение и радиус луча на обрабатываемой поверхности.

Сформированный электронный пучок проходит через рабочую камеру и попадает на поверхность обрабатываемого объекта. Скорость электронов при попадании на поверхность детали

$$v = \sqrt{\frac{2e_c \cdot U_y}{m_e}} \quad (5.4)$$

При торможении электронов в веществе возникают явления упругих и неупругих столкновений с атомами вещества. Электроны отдают свою кинетическую энергию атомам, что приводит к раскачке кристаллической решетки (нагревание), и потере внутрискристаллических связей (плавление и кипение).

ние). Упруго сталкивающиеся электроны многократно отражаются и рассеиваются внутри вещества.

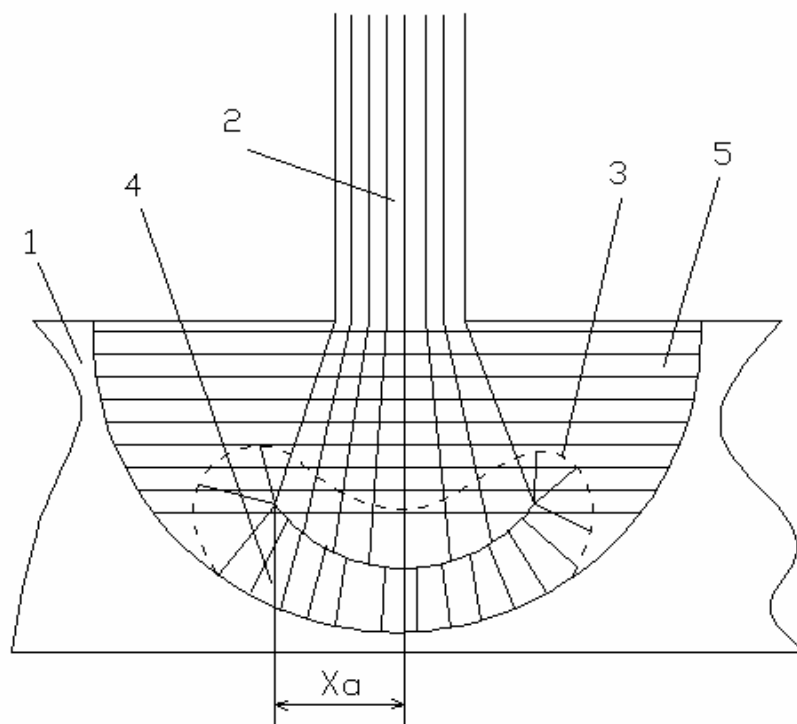


Рис. 5.1 Модель зоны взаимодействия монокристаллического электронного пучка с веществом: 1. мишень; 2. пучок электронов; 3. зона рассеяния пучка при столкновениях на малые углы; 4. зона диффузно рассеянных электронов;

5. область рассеяния электронов при столкновениях на большие углы (в направлении к поверхности).

Часть электронов отражается от поверхности, формируя рентгеновское излучение (0,1...1% всей мощности). После выделения энергии в поверхностном слое вещества происходит теплоотдача в глубинные слои. Благодаря высокой интенсивности потока и огромной скорости энергии в вещество, развиваются очень высокие температуры (выше температур кипения металлов). Расстояние, пробегаемое тормозящим электроном в веществе очень мало, и для электронов с энергией 5 – 100 эВ может быть определено по формуле Шонланда

$$b = 2,1 \cdot 10^{-17} \cdot U_y \cdot \rho, [\text{м}] \quad (5.5)$$

где ρ — плотность вещества мишени, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Это расстояние в зависимости от скорости составляет 5...30 мкм. Время торможения при этом составляет $\approx 10^{-6}$ с. За это время микропорция материала расплавляется и вскипает.

Возможность получения глубокого проплавления определяется, в основном, свойствами материала, а не характеристиками источника энергии. Основное ограничение на источник тепла — он должен быть достаточно ма-

лых размеров. Реальные величины — $0,2 - 0,5 \text{ мм}$. По этому принципу требующая для глубокого плавления плотность мощности равна $10^5 - 10^6 \text{ Вт/см}^2$.

После вскипания формируется парогазовое облако, выбрасываемое навстречу лучу. Луч рассеивается облаком на стенки канала (экранируется от дна). При этом плавятся стенки и углубления канала не происходит. После окончания взрыва и рассеивания облака луч проникает на дно углубления и процесс повторяется. Таким образом, вследствие периодической экранировки обработка идет в прерывистом режиме

Периодическое смыкание канала проплавления, зависящее от времени воздействия луча на материал, т. е. от плотности потока, происходит с частотой $10 \dots 20 \text{ Гц}$.

Варианты формообразования каналов электронным лучом представлены на рис. 5.2.

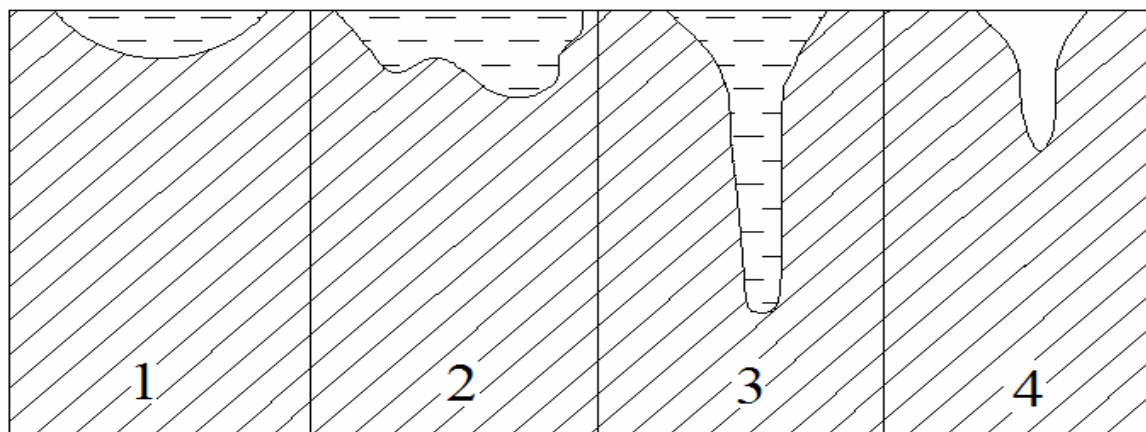


Рис 5.2. Варианты формы расплавленного электронным лучом канала в металле: (1 «мягкий» режим (плотность мощности) $5 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ — образование расплавленной лунки; (2 переход к «жесткому» режиму; (3 «кинжальное» проплавление ($10^5 \dots 10^6 \text{ Вт/см}^2$); (4 формирование отверстия в металле $> 10^6 \text{ Вт/см}^2$).

Важное значение при формировании канала отверстия имеет длина фокуса магнитной линзы, т. е. угол сходимости электронного луча в точке фокуса. Короткофокусные линзы (угол сходимости $> 10^\circ$) обеспечивают меньшую глубину проплавления, чем длиннофокусные (угол сходимости до $2^\circ \dots 3^\circ$).

5.3. Технологическое применение электронно-лучевого нагрева

Основные технологические операции электронно-лучевой обработки можно условно разделить на 4 группы:

- плавка (технологические операции плавки в вакууме, локального переплава);
- испарение (испарение в вакууме, размерная обработка электронным лучом);
- термообработка (без изменения агрегатного состояния вещества);
- сварка.

Для технологических процессов, связанных с нагревом веществ в электронно-лучевых установках (сварка, плавка, размерная обработка и т. п.) необходимая удельная мощность электронного луча

$$N_{y\partial} = 3,47 \cdot \lambda \cdot T_{пл} \frac{1}{d_s \cdot \lg \frac{d_s}{d_0}} \quad (5.6)$$

где $N_{y\partial}$ — удельная энергия для образования ванны расплава диаметром d_s ;

d_s — диаметр волны расплава, равный толщине металла, м;

λ — коэффициент теплопроводности металла, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{К}}$;

$T_{пл}$ — температура плавления, К;

d_0 — диаметр участка, на краях которого температура остаётся неизменной.

Таким образом, основные параметры, определяющие размеры участка, расплавляемого электронным лучом, определяются теплопроводностью и температурой плавления.

Плавка электронным лучом в вакууме применяется в тех случаях, когда необходимо получить особо чистые металлы.

Переплавляемый материал может быть использован практически в любой форме (шихта, пруток, лом, спеченные штабики, губка).

Важную роль при электронно-лучевой плавке играет вакуум:

1. В вакууме происходит интенсивное удаление растворенных в металле газов, что значительно улучшает его механические свойства, особенно пластичность. Многие сплавы на основе вольфрама, молибдена, ниобия и других химически активных металлов получили промышленное применение только благодаря тому, что их выплавляют в вакууме.

2. Некоторые из вредных примесей (нитриды, карбиды, оксиды) при нагреве в вакууме разлагаются, при этом происходит вакуумное рафинирование переплавляемого металла.

3. При плавке металла в вакууме непрерывно происходит удаление газообразных продуктов из зоны реакции, вследствие чего равновесие химических реакций $MeO + C = Me + CO$ сдвигается вправо, т. е. резко интенсифицируются раскислительные реакции. Это повышает качество выплавляемого в вакууме металла, значительно снижает в нем содержание газов и прежде всего кислорода.

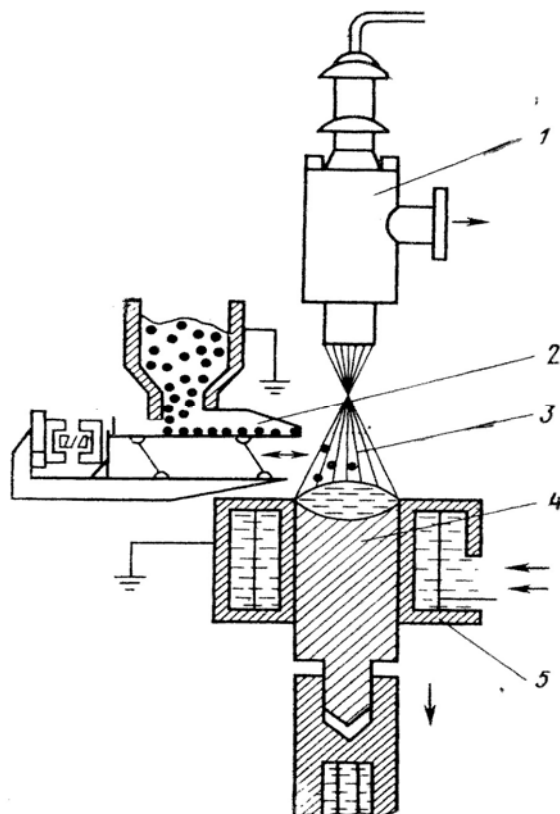


Рис. 5.3. Схема ЭЛУ для переплавки порошка:
 1 – электронная пушка; 2 – переплавляемый порошок; 3 – электронный луч; 4 - переплавляемый слиток; 5 - водоохлаждаемый кристаллизатор

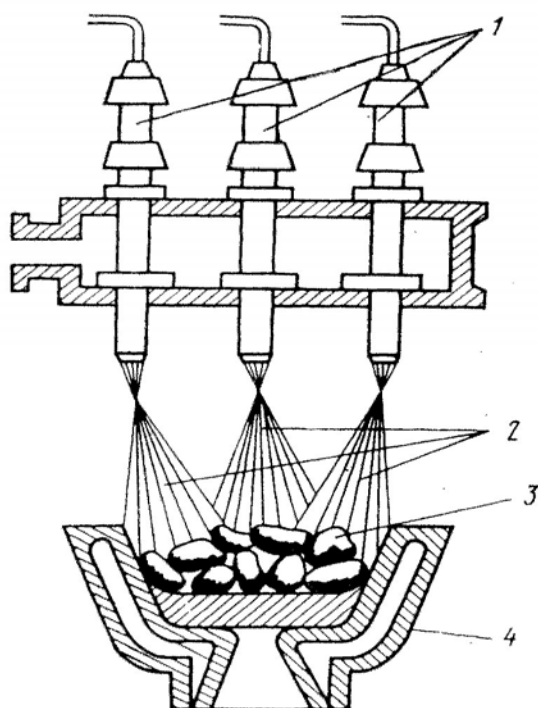


Рис. 5.4. Схема ЭЛУ для переплавки металлолома:
 1 – электронные пушки; 2 – электронные лучи; 3 – переплавляемый металлолом; 4 – водоохлаждаемая форма

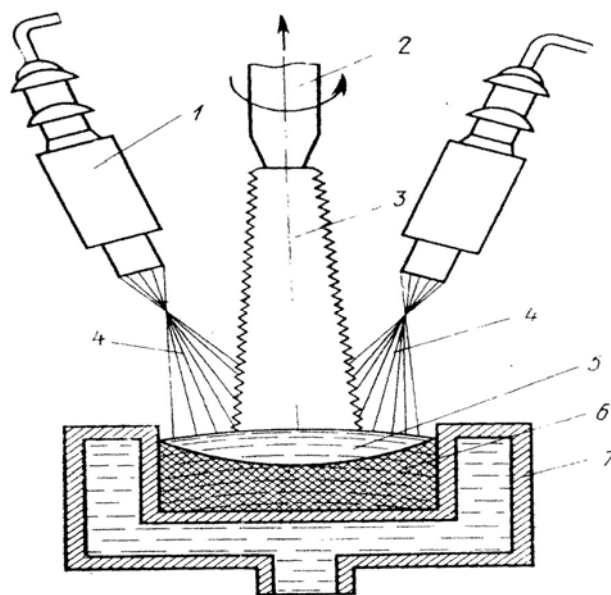


Рис. 5.5. Схема ЭЛУ для выращивания монокристаллов:
 1 – электронная пушка; 2 – затравка; 3 – монокристалл; 4 – электронный луч;
 5 – расплав переплавляемого материала; 6 – переплавляемый материал;
 7 – водоохлаждаемый тигель

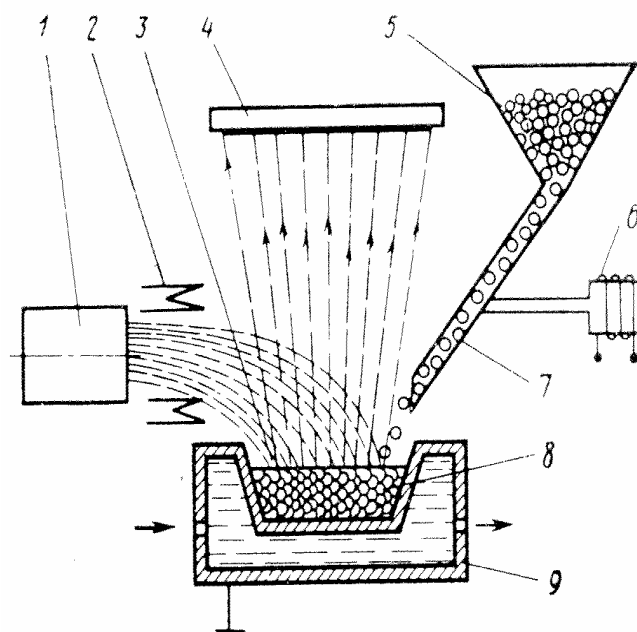


Рис. 5.6. Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки
 Переплавляемый металл (рис. 5.3 — 5.4) в виде порошка, гранул или мелкого металлолома подается в установку, где он подвергается обработке одной или несколькими пушками.

Электронно-лучевая плавка удобна при выращивании монокристаллов (рис. 5.4), когда на затравку 2 наплавляется материал 5 из тигля 7 и вытягивается с заданной скоростью вертикально вверх с получением монокристалла 3.

В промышленности применяют электронно-лучевую плавку с последующей заливкой в вакууме литейных форм. На различных ЭЛУ для плавки в вакууме при давлении $10^{-4} - 10^{-7}$ Па получают слитки массой до 20 т.

Локальный переплав обрабатываемых поверхностей с помощью электронного луча дает возможность получать чрезвычайно высокие скорости кристаллизации металла в зоне плавления. Образующиеся при этом структуры значительно отличаются от структур, получаемых в обычных условиях: расширяются границы растворимости для твердых растворов, измельчается микроструктура, значительно повышаются пластичность и твердость.

Такое поверхностное оплавление материала называют «облагораживающим», что позволяет для изготовления ответственных конструкций с высокими показателями износостойкости использовать недорогие исходные металлы и сплавы.

Испарение в вакууме материалов при нагреве их электронным лучом широко используют для получения тонких пленок. В отличие от других способов испарения, где энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля или высокотемпературный нагревательный элемент, при электронно-лучевом испарении осуществляется прямой нагрев поверхности испаряемого материала. Это позволяет испарять материалы из воды охлаждаемых тиглей, что особенно важно при работе с химически активными и тугоплавкими материалами.

При электронно-лучевом испарении удастся управлять электронным пучком в пространстве и во времени, регулируя тем самым интенсивность ввода энергии в испаряемое вещество, а следовательно, и скорость испарения и распределение плотности потоков пара.

Электронно-лучевое испарение применяют в микроэлектронике для нанесения различных металлических покрытий на стальную ленту, для изготовления фольги из псевдосплавов сложного состава. Электронным лучом можно испарять с последующим осаждением на подложку различные неметаллические материалы: диоксид кремния, оксид алюминия, различные виды стекла. Конденсационные покрытия применяют в оптической промышленности и в различных областях электроники.

Принципиальная схема электронно-лучевой испарительной установки для нанесения покрытий показана на рис. 5.6. Из бункера 5 испаряемый материал по желобу 7, приводимому в действие вибратором 6, поступает в водоохлаждаемый тигель 9. Траектория электронного луча 3, получаемого с помощью электронной пушки 7, искривляется отклоняющей системой 2 в направлении испаряемого вещества 8. В результате воздействия луча 3 на вещество оно испаряется, частицы пара поднимаются вверх и оседают на поверхности подложки 4, образуя плотную пленку. Применение отклоняющего маг-

нитного поля позволяет располагать электронную пушку 1 практически в любом удобном месте.

С помощью *размерной обработки* заготовки электронным лучом в ней получают глухие или сквозные отверстия заданных размеров или заданный контур. Размерная обработка основана на том, что при достаточно большой удельной поверхностной мощности скорость испарения обрабатываемого материала и давление пара возрастают настолько, что весь жидкий металл с потоком пара выбрасывается из зоны обработки. Строгое дозирование подводимой энергии осуществляется импульсным воздействием электронного луча на поверхность или его перемещением по поверхности с заданной скоростью.

Можно выделить три режима размерной электронно-лучевой обработки:

1. Моноимпульсный режим — обработка ведется одиночным импульсом, т. е. отверстие получают за время действия одного импульса.

2. Многоимпульсный режим — отверстие получают воздействием на заданное место заготовки несколькими импульсами.

3. Режим обработки с перемещением электронного луча по заготовке с заданной скоростью.

Электронный луч нашел применение в первую очередь для размерной обработки твердых материалов — алмазов, кварца, керамики, кристаллов кремния и германия.

Особой разновидностью размерной электронно-лучевой обработки является *перфорация* (получение мелких сквозных отверстий) различных материалов. Этим способом изготавливают металлические и керамические элементы фильтров, пористый материал для охлаждения камер сгорания и лопаток турбин.

Электронно-лучевая термообработка заключается в локальном нагреве обрабатываемых участков поверхности с целью получения структурных превращений материала. Она применяется также для отжига материалов в вакууме, повышая их пластичность и очищая поверхность от адсорбированных газов.

Электронно-лучевая сварка является одним из самых распространенных технологических применений электронного луча. Ее производят с помощью тонкого пучка электронов, который фокусируется на стыке соединяемых деталей и нагревает их до плавления. Сварочный шов при электронно-лучевой сварке получается чистым и свободным от газов, оксидов и летучих примесей. Общее количество энергии, необходимое для расплавления материала, гораздо меньше, чем при других видах нагрева в процессе сварки. Это обусловлено высокой концентрацией энергии в фокусе электронного луча.

При электронно-лучевой сварке благодаря высокой концентрации энергии в сварочной зоне сварочный шов представляет собой вытянутый клин с большим отношением длины зоны расплавления к ее ширине.

В общем случае глубина проплавления электронным лучом может превышать ширину шва более чем в 20 раз («кинжальное проплавление»). Глу-

бина проплавления также зависит от скорости сварки и от температуры предварительного прогрева свариваемого металла.

Установки электронно-лучевой сварки делятся на два основных типа: низковольтные с рабочим ускоряющим напряжением до 15 – 20 кВ и высоковольтные, работающие при ускоряющем напряжении 150 – 200 кВ.

6. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

6.1. Классификация лазеров

По типу активного элемента существуют следующие разновидности лазеров — оптических квантовых генераторов:

- твёрдотельные с кристаллическим и стеклянным активным элементом;
- полупроводниковые (в частности на арсениде галлия, интимониде индия и т. д.);
- жидкостные на кристаллах и неорганических растворах;
- газовые лазеры, которые по типу возбуждаемой квантовой системы делятся на атомные, ионные и молекулярные. Последние из них имеют разновидности: газостатические, газодинамические и непрерывные.

В технологии, т. е. Для целей обработки материалов, нашли применение импульсные твёрдотельные и непрерывные газовые лазеры, поскольку они могут создать необходимую плотность мощности на поверхности материала для реализации фазовых изменений структуры материала.

6.2. Физические принципы создания лазерного излучения

Атом или молекула — есть квантовые системы, т. е. Элементы микромира, подчиняющиеся законам квантовой электроники, которые характеризуются величиной внутренней энергии.

Важнейшим свойством квантовой системы является то, что внутренняя энергия системы может принимать только определенные дискретные значения. Каждому из этих разрешённых энергетических состояний соответствуют дискретные орбиты движения электронов, ядер или молекулы в целом.

Энергетический спектр молекулы сложнее, чем у атома, поскольку возможны колебательные движения атомов относительно друг друга и вращательное движение самой молекулы как целого. Причём электронные уровни внутри атома далеко отстоят друг от друга, колебательные уровни атомов более сближены, вращательные и колебательные уровни молекулы еще более часты.

Взаимодействие излучения (т. е. электромагнитного поля) с веществом основано на скачкообразном переходе квантовой системы (атомов или молекул вещества) с одного уровня энергии на другой, причём при поглощении кванта излучения система переходит вверх (накапливает энергию), а при переходе вниз (релаксация) — система отдаёт энергию в виде кванта, равную разности энергетических состояний.

В связи с этим в веществе могут протекать такие процессы взаимодействия, как поглощение, люминесценция, вынужденное излучение.

Поглощение — уменьшение амплитуды бегущих волн при прохождении через вещество (среду), обусловленное превращением энергии волны в раз-

личные формы внутренней энергии вторичного излучения с иным, чем у первоначальной волны, спектральным составом.

Люминесценция — спонтанный, самопроизвольный переход возбужденного атома с верхнего уровня энергии на нижний. При этом испускается энергия в виде фотона или другого кванта с частотой ν в соответствии с формулой

$$E = h \cdot \nu \quad (6.1)$$

где h — постоянная Планка.

Так как отдельные спонтанные переходы не связаны во времени, то излучение люминесценции не когерентно, т. е. отсутствует пространственная $h\nu$ и временная корреляция отдельных электромагнитных колебаний по фазе и частоте.

При вынужденном излучении возбужденная квантовая система переходит с верхнего энергетического уровня на нижний, испуская квант $h\nu$. Эйнштейн высказал предположение, что испускание системой квант можно инициировать внешним квантом с энергией, соответствующей разности между основным и возбужденным состоянием квантовой системы. В результате генерируются два кванта с одинаковой частотой, распространяющиеся в одном направлении, т. е. неотличимые друг от друга.

Поскольку вынужденные переходы совершаются одновременно и частоты квантов равны, то излучение когерентно, монохроматично и распространяется в узком телесном угле.

6.3. Принцип работы твёрдотельных лазеров

Исторически первым активным лазерным веществом был рубин — искусственный кристалл розового цвета, состоящий из окиси алюминия (Al_2O_3 — корунд) с добавлением 0,05 % атомов хрома. Наличие хрома и делает кристалл корунда активным лазерным веществом.

Рубин относится к активным веществам с трёхуровневой системой возбуждения.

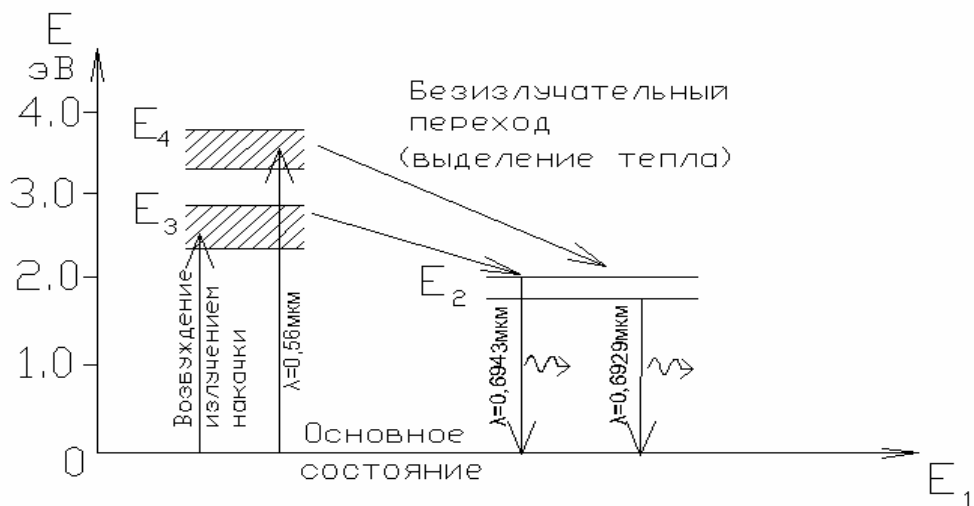


Рис. 6.1 Схема энергетических уровней иона хрома в рубине

Для перевода атома хрома с основного уровня E_1 на разрешенный промежуточный уровень E_3 (или E_4) необходим квант электромагнитной энергии величиной 2,5...3,5 эВ. Этой энергией обладают фотоны с длиной волны 0,52...0,58 мкм, что соответствует сине-зелёной части видимого спектра. Таким образом, возбуждение рубина можно осуществить излучением лампы — это оптическая накачка. Время пребывания (время жизни) атома на этом уровне чрезвычайно мало $\approx 10^{-8}$ с. Этот уровень — короткоживущий. Атом спонтанно переходит на более низкий энергетический уровень E_2 , излучая квант с энергией 0,5...1,2 эВ. Этой энергии соответствует длина волны 1...2 мкм, лежащая в инфракрасной части спектра. Вследствие спонтанности моментов возбуждения и релаксации атома излучённые при этом переходе кванты некогерентны и энергия их расходуется на нагрев кристалла рубина (раскачка кристаллической решетки Al_2O_3). Переход можно назвать безизлучательным.

Уровень E_2 является метастабильным. Время жизни его может быть до 3 мс. Таким образом, на уровне E_2 может находиться одновременно значительное количество активных центров. При условии накопления более половины атомов хрома на уровне создаётся инверсия населенности энергетических уровней. Переход на основной уровень E_1 совершается вынужденно, под действием лавинообразного процесса, инициированного первым спонтанно излученным фотоном. Генерируется световое излучение с длиной волны 0,6943 мкм, когерентное и распространяющееся вдоль оптической оси кристалла.

Для создания на этом физическом принципе стабильно работающего оптического генератора необходимо выполнить три условия:

1. Создать инвертор населённостей энергетических уровней в активном элементе.
2. Иметь усиление света внутри рабочего вещества больше порогового (при низком усилении свет поглощается в кристалле).
3. Сформировать оптическую положительную обратную связь внутри лазерного генератора.

Первое условие выполняется в процессе взаимодействия активного вещества с излучением накачки.

Второе условие обеспечивается при развитии лавинообразного процесса вынужденного излучения внутри активного элемента.

Для обеспечения выполнения третьего условия активный элемент размещается между двумя параллельными зеркалами, поверхности которых перпендикулярны оптической оси активного элемента. Расстояние между зеркалами должно быть равно целому числу полуволен генерируемого излучения ($L = \frac{n \cdot \lambda}{2}$). При этом зеркала образуют оптический резонатор, а фаза

отраженной волны будет совпадать с фазой падающей (положительная обратная связь). Настройка резонатора позволяет создать оптимальные условия для генерации только одной частоты излучения, для которой выполняется условие формирования стоячих волн внутри резонатора, и потери минимальны.

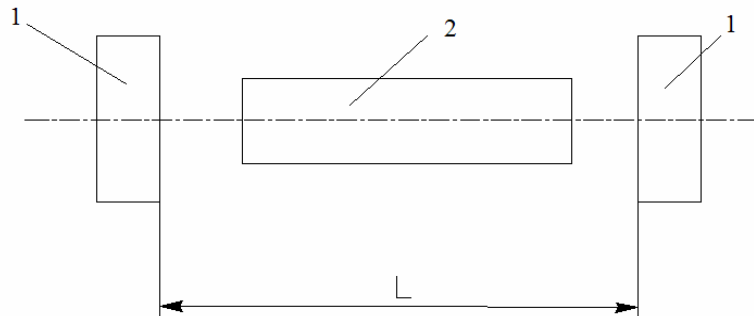


Рис. 6.2 Оптический резонатор: 1 – зеркала; 2 – рабочий стержень

6.4. Параметры излучения твёрдотельного лазера

Основной вид работы — режим свободной генерации. Длительность импульса определяется временем вспышки лампы накачки, которое зависит от параметров разрядной цепи — ёмкости конденсатора и величины индуктивности. При различных их сочетаниях длительность колеблется от 0,5 до 4 мс. Лазерный импульс короче вспышки лампы, т. к. нужно некоторое время на создание инверсии населённостей. При анализе формы импульса можно видеть, что он состоит из отдельных коротких импульсов («пичков»). Это объясняется тем, что в каждый момент времени в формировании вынужденного лазерного излучения участвует неконтролируемое спонтанное количество возбуждаемых активных центров. Отрицательное влияние на технологические параметры при прошивании отверстий оказывают пологий задний фронт лазерного импульса и особенно отдельные пички излучения, находящиеся на спаде импульса. Энергия их недостаточна для испарения материала, поэтому их присутствие увеличивает количество жидкой фазы и ухудшает форму отверстия.

Естественным пределом мощности твёрдотельного лазера является перегрев стержня. Однако, если перевести в возбуждение состояние не половину, а практически все атомы активного вещества, то импульс в активном элементе мог бы развиваться за 10^{-8} с, что повышает мощность до нескольких мегаватт. Добиться этого можно отключением оптического резонатора на начальном периоде накачки активного элемента (примерно 2 мс от начала вспышки лампы) и включением его после этого. Лазер в таком режиме генерирует «гигантский» импульс. Это — режим «модулированной добротности» резонатора. Достигается он, например, выполнением глухого зеркала в виде вращающейся призмы полного внутреннего отражения, синхронизированной со вспышкой лампы. Более надёжной схемой является установка внутри резонатора прозрачной кюветы с веществом, изменяющим свои оптические ха-

рактеристики (например, коэффициент преломления для плоскополяризованного излучения) при изменении электрического потенциала (ячейка Керра, Поккельса). Это электрооптические затворы, обладающие высоким быстродействием.

Существует еще одно естественное ограничение мощности рубинового лазера — наличие затухания света в самом кристалле. Поэтому максимальная длина его не может превышать 60 см.

Распределение энергии в поперечном сечении луча аппроксимируется гауссоидой, т. е. имеет колоколообразную форму. Ближе к оси интенсивность излучения выше благодаря максимальному усилению света вдоль оси резонатора, где условия формирования пучка вынужденного излучения лучше, чем на периферии стержня из-за наличия лучей, направленных под углом к оптической оси резонатора.

Вследствие интерференции световых лучей, направленных под небольшим углом к оси из-за неточной установки зеркал, возможно появление нескольких максимумов в пятне лазерного излучения. Это явление называется многомодовой генерацией.

Примеры конфигураций поля для различных поперечных мод и соответствующие им картины распределения интенсивности лазерного излучения имеют вид

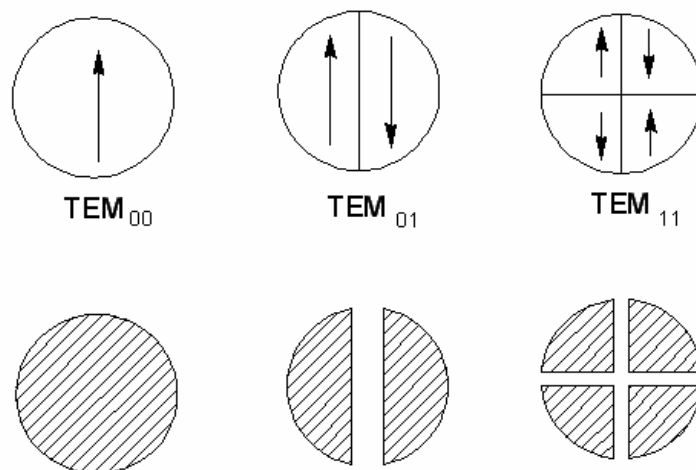


Рис 6.3 Примеры конфигураций поля для различных поперечных мод и соответствующие им картины распределения интенсивности лазерного излучения ($TEM_{m,n}$ - мода: где m, n — число минимумов излучения в пятне генерации, подсчитываемых по вертикали и горизонтали)

6.5. Принцип работы газового лазера

Активным веществом здесь является газ или смесь газов. Возбуждение активных центров газов требует энергии квантов в одних случаях более 20...30 эВ. Этого невозможно достичь, облучая активный элемент светом. Поэтому носителем энергии возбуждения в газовых лазерах является поток электронов, генерируемый газовым разрядом. Активная среда газового ла-

ра обычно заключается в стеклянную или кварцевую трубку, торцы которой закрыты прозрачными окнами. В боковые стенки трубки впаивают электроды, подключенные к источнику питания для создания электрического разряда в газе. Активный элемент помещается между зеркалами оптического резонатора.

В газах, благодаря их чистому составу, можно весьма точно предсказать наличие тех или иных лазерных переходов. Ввиду хорошей прозрачности и чистоты смеси размер активного элемента может достигать многих метров. Но плотность газов естественно мала и поэтому невозможно получение большой удельной мощности, т. е. большого числа возбужденных атомов. В отличие от твердотельных газовые лазеры способны длительное время работать в непрерывном режиме генерации.

По типу квантовой системы, является активным центром, они подразделяются на три разновидности:

- лазеры на нейтральных атомах;
- лазеры на ионных переходах;
- молекулярные лазеры.

6.5.1. Лазер на нейтральных атомах

Типичным представителем является гелий-неоновый лазер. Возбуждение активных центров осуществляется электронным ударом газового разряда. Энергия электрона при соударении с атомом газа будет зависеть от ускоряющего напряжения и величины свободного пробега. При развитии разряда в газовой среде невозможно создать монокинетический поток электронов, необходимый для возбуждения атома на заданную величину, поэтому речь идет о вероятности той или иной энергии электрона в газовом разряде.



Рис. 6.4 Схема распределения разрешенных энергетических состояний атомов гелия и неона

В силу неоднородности энергии электронов в разряде невозможно получить инверсию населенности атомов неона на метостабильных уровнях E_5 или E_4 , поэтому промежуточным элементом для передачи возбуждения вы-

бран гелий, у которых первые нижние уровни возбуждения E_2 и E_3 довольно точно соответствуют уровням E_4 и E_5 неона. Передача возбуждения от гелия к неону осуществляется за счет неупругих соударений. После релаксации на уровень E_3 , который является короткоживущим и которая происходит в результате вынужденного излучения, т. е. лазерной генерации, атом переходит спонтанно на метастабильный уровень E_2 . Переход сопровождается люминесценцией (красно-оранжевое свечение, наблюдаемое сквозь боковую поверхность разрядной трубки). Опустошить быстро уровень E_2 удастся только путем соударений атома неона со стенками трубки (охлаждением). Вследствие этого максимальный диаметр трубки не должен превышать 7 мм. Таким образом, гелий выполняет роль катализатора в этой лазерной реакции.

Для реализации такого механизма создания лазерной генерации подобраны технические параметры газовой смеси: соотношение гелия и неона от 5:1 до 10:1 и давление гелия 100 Па, а также установлены напряжение между электродами и ток разряда.

$He - Ne$ лазер может генерировать на трех длинах волн. Выбор необходимой длины волны определяется созданием условий наиболее вероятного возбуждения неона на уровень E_5 и настройкой резонатора на длину волны 0,6328 мкм. Было установлено. Что замена природного He^4 более легким изотопом He^3 повышает вероятность возбуждения Ne на уровень E_5 и релаксацию с уровня E_2 на основной E_1 .

$He - Ne$ лазер отличается малым углом расходимости излучения, близким к дифракционному пределу (около $2 \cdot 10^{-4}$ рад.) и высокой стабильностью частоты излучения, близкой к 10^{-14} . Вследствие малой мощности излучения (единицы и десятки мВт) эти лазеры получили широкое распространение в измерительной технике и, особенно, в голографии.

6.5.2. Лазеры на ионных переходах

В качестве активного вещества используются возбужденные до состояния ионизации инертные газы — аргон, криптон. Ионные лазеры имеют следующие основные особенности:

- высоко расположенные и разреженные энергетические уровни ионов дают возможность получить лазерную генерацию в сине-зеленой части видимой и ультрафиолетовой областях спектра;

- большая вероятность переходов и высокие параметры насыщения обеспечивают высокую мощность излучения в непрерывном режиме (до 500 Вт);

- вследствие необходимости поддерживать высокую плотность ионов активный элемент работает в напряженном электрическом и термическом режиме.

Ионные лазеры — это наиболее мощные источники непрерывного излучения в видимой и ультрафиолетовой частях спектра.

Для возбуждения иона аргона на лазерный переход требуется двухступенчатый процесс. Сначала атом аргона ионизируется, т. е. переходит с основного состояния нейтрального атома на основное состояние иона (около 16 эВ) за счет электронного удара. Затем с этого уровня ион требуется возбудить до 35,5 эВ, откуда, совершая вынужденный переход на уровень 33 эВ, ион аргона испускает фотон на длине волны около 0,5 мкм. Возбуждение в ионных лазерах требует большой плотности тока 200...400 А/см² и напряжения между электродами 6 кВ.

Технологическое применение ионных лазеров: гравировка, перфорация и резка тонких листов металлов, подгонка резисторов в микросхемах.

6.5.3. Молекулярные лазеры

Молекула как квантовая система имеет собственный энергетический спектр колебательных и вращательных уровней. Молекулярные лазеры создавались сначала на переходах между колебательными уровнями молекулы углекислого газа в чистом CO₂, а затем на смеси азота, гелия и CO₂, что позволило резко увеличить его мощность.

Механизм возбуждения CO₂-лазера:

- электронным ударом;
- передачей возбуждения от азота к CO₂;
- за счет каскадного перехода при соударениях на лазерный метастабильный уровень (0,3 эВ) с более верхних после возбуждения электронами.

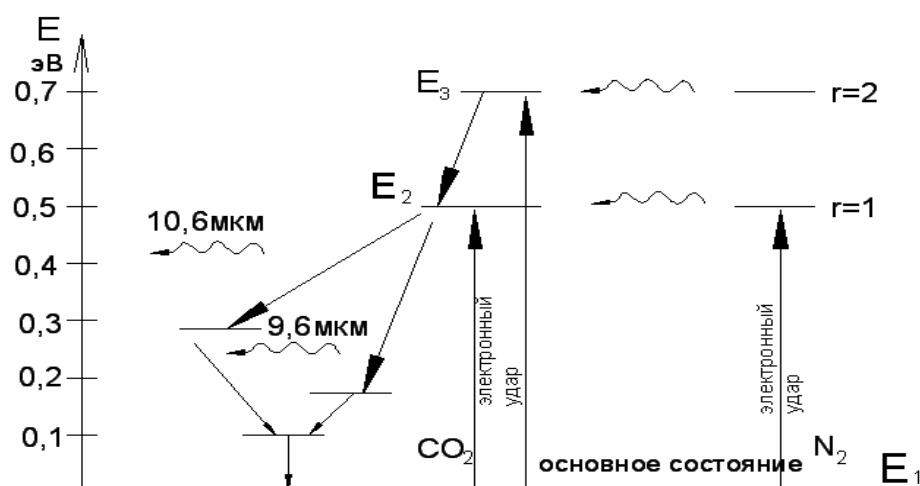


Рис. 6.5 Схема колебательного энергетического спектра молекул CO₂ и азота

Спектр колебательных энергетических уровней молекулы CO₂ лежит ниже электронных переходов и не требует столь высоких энергий возбуж-

дающих электронов, а уровни в спектре расположены значительно чаще (в десятки раз). Кроме того, расстояния между отдельными колебательными уровнями равны (эквидистантны). Это обстоятельство позволяет возбуждать их электронами с разными энергиями, что обуславливает высокий КПД этих лазеров.

Уровни возбуждения молекулы CO_2 начинается с 0,3 эВ и через 0,3 эВ повторяются вверх. В силу такой величины энергии возбуждения нагрев газа приводит к потере инверсии населенностей из-за интенсивных соударений молекул между собой (температуре 500°C соответствует энергия 0,1 эВ). Эта особенность требует охлаждения активного вещества.

Опустошение нижних уровней за счет соударений молекулы CO_2 с не-возбужденными молекулами He.

Особенностью CO_2 лазера является:

- 1) генерация в инфракрасном диапазоне ($\lambda = 10,6$ мкм);
- 2) высокий КПД (до 60 %);
- 3) высокая мощность излучения (несколько тысяч кВт в импульсном и десятки кВт в непрерывном режиме).

В силу генерации инфракрасного излучения возникают трудности с технической реализацией оптических элементов. Зеркала изготавливают из тугоплавких металлов, линзы и выходные окна — из кристаллов поваренной соли, германия, арсенида галлия и других материалов.

Разновидностями CO_2 -лазеров являются:

- 1) отпаянный лазер — герметичная трубка заполнена смесью газов $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : (1...2) : (3...5)$ при давлении около 1 кПа;
- 2) газодинамические CO_2 -лазеры — с прокачкой горячих молекул CO_2 через теплообменник;
- 3) лазер с медленной прокачкой (скорость газового потока около 1 м/с);
- 4) лазер с быстрой прокачкой (скорость газового потока около 30 м/с).

6.6. Взаимодействие мощного лазерного излучения с веществом

Лазерное излучение, падающее на поверхность образца, интенсивно поглощается в очень тонком слое 1...2 мкм. Выделившееся тепло проникает вглубь материала за счет теплопроводности. После достижения на поверхности температуры плавления вглубь материала перемещается фронт расплава. Появляется жидкая фаза. В результате продолжения облучения начинается процесс испарения материала с поверхности и формируется лунка. Если позволяет плотность мощности, образуется плазма, экранирующая луч от дна отверстия.

Из-за кратковременности процесса взаимодействия ($\sim 10^{-3}$ с) испарение носит характер взрыва. Заключительная стадия формирования лунки может быть различна.

1. При свободной генерации импульс лазера состоит из множества пиков, причем в конце импульса они даже не сливаются друг с другом, энергия их недостаточна для испарения. Это вредное явление приводит к образованию жидкой фазы после испарения. Появляются наплывы материала на внутренних стенках отверстия.

2. В режиме «модулированной добротности» при генерации лазером коротких импульсов с крутыми фронтами жидкая фаза на заключительной стадии формирования отверстия не образуется. Форма отверстия получается близкой к цилиндрической.

6.7. Формообразование поверхностей при обработке отверстий импульсным лазером

6.7.1. Моноимпульсная обработка. Получение глухих отверстий

Процесс определяется четырьмя факторами:

- 1) энергией луча;
- 2) величиной фокусного расстояния линзы;
- 3) положением точки фокуса линзы относительно поверхности детали;
- 4) теплофизическими характеристиками материала.

В зависимости от сочетания этих факторов можно сформировать четыре вида отверстий:

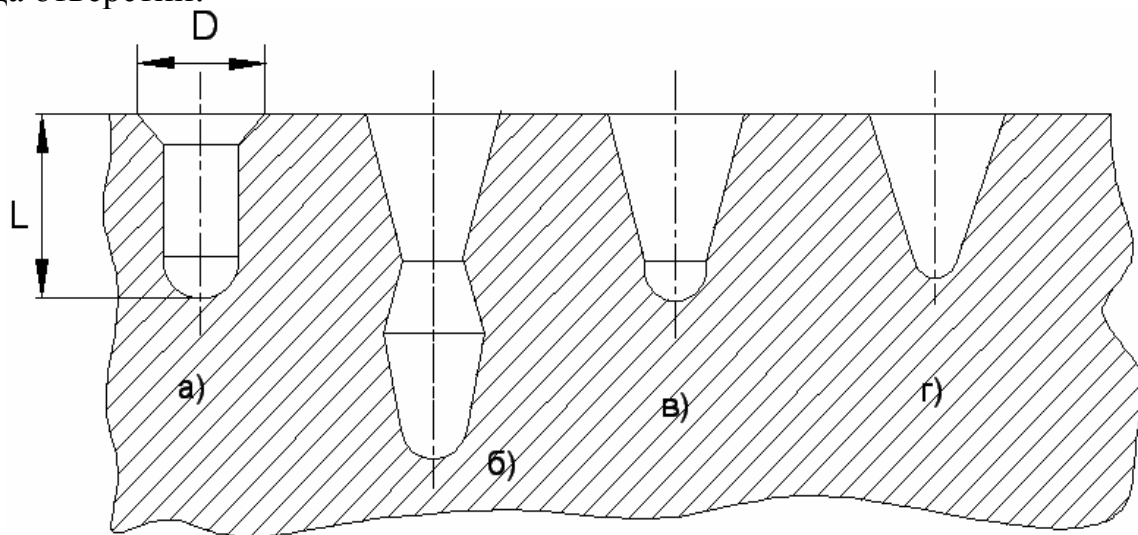


Рис. 6.6 Виды отверстий: а) отверстие цилиндрической формы; б) «бомбардированное» отверстие; в, г) отверстия «конусного» типа

Типовая зависимость параметров отверстия от энергии луча имеет вид

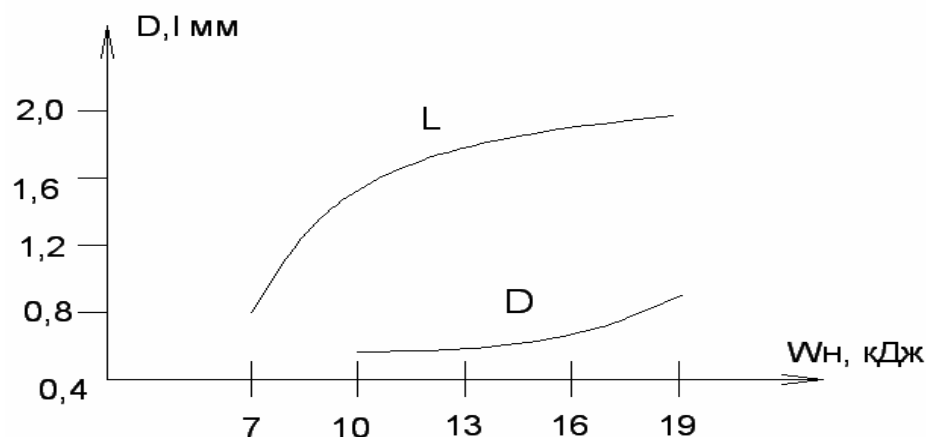


Рис. 6.7 Типовая зависимость параметров отверстия от энергии луча

Активный элемент — стекло ниодима; материал заготовки — сталь 30ХГСА; W_n — энергия накачки.

Незначительное увеличение диаметра отверстия на рис. а) объясняется преимущественным распространением теплового фронта вглубь материала, и только при прекращении интенсивного роста глубины энергия импульса начинает обрабатывать стенки канала отверстия.

Влияние фокусного расстояния линзы в основном выражается в изменении диаметра пятна излучения на поверхности заготовки и соответствующего изменения плотности мощности, поэтому зависимости носят такой характер

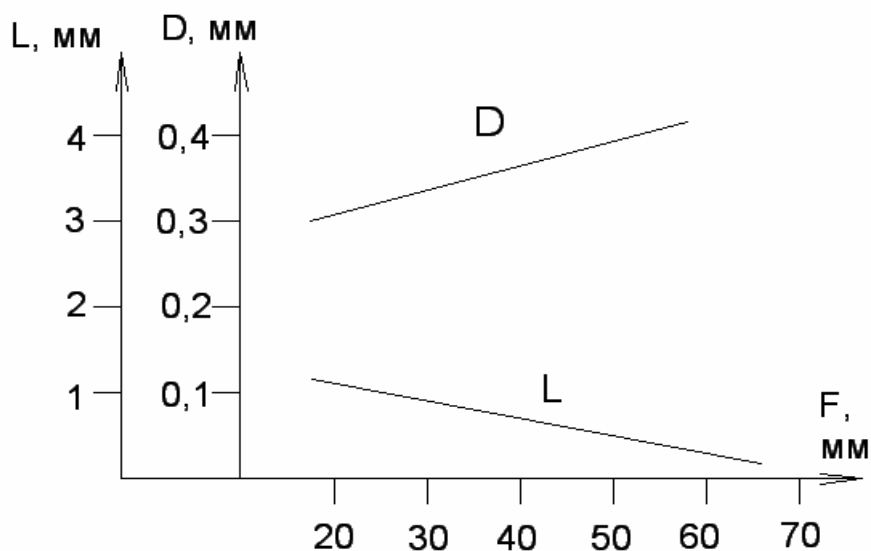


Рис. 6.8 Зависимость параметров L, D от фокусного расстояния линзы F

Положение точки фокуса линзы существенно определяет форму отверстия. Возможны следующие положения фокального пятна фокусирующей линзы относительно поверхности детали.

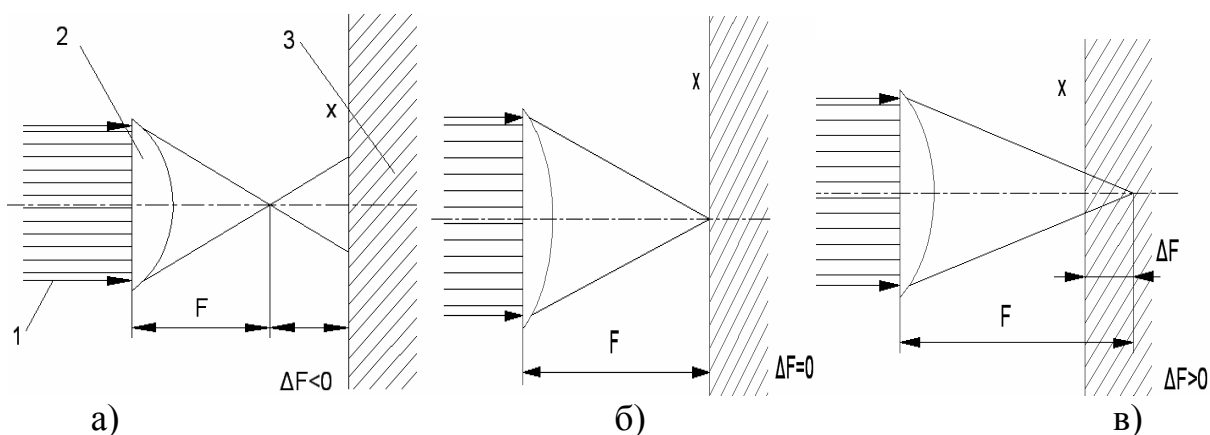


Рис. 6.9 Возможные расположения точки фокуса линзы: 1 — световой луч; 2 — фокусирующая линза; 3) заготовка.

При $\Delta F > 0$ формируются «бомбообразные» отверстия (поз. б) на рис. типовых глухих отверстий). При $\Delta F < 0$ отверстия имеют конусообразную форму (рис. в) и г) на типовых формах глухих отверстий).

Требуемую плотность мощности излучения для формирования отверстия определяют такие теплофизические характеристики материала, как температура плавления и испарения, теплопроводность.

6.7.2. Многоимпульсная обработка

Формирование канала отверстия осуществляется за несколько лазерных импульсов. При повторных импульсах фокус линзы необходимо перемещать на дно получаемого отверстия. Однако входное отверстие работает как диафрагма, экранируя часть излучения. Целесообразно применять длиннофокусные линзы с малым углом сходимости луча ($2...3^\circ$) и использовать лазеры с небольшой энергией в импульсе ($10...15$ Дж). При правильном выборе параметров процесса можно получить отверстие $\varnothing 0,4...0,6$ мм и длиной $7...10$ мм за $5...6$ импульсов. Для автоматизации процесса перемещения точки фокуса возможно применение оптических револьверных головок.

6.7.3. Моноимпульсная обработка. Получение сквозных отверстий

Основное влияние на форму отверстия и наплыва жидкой фазы оказывает энергия и форма лазерного импульса.

В зависимости от положения фокуса относительно поверхности заготовки, возможно формообразование следующих отверстий:

1. Фокус расположен на поверхности заготовки ($\Delta F = 0$). Форма отверстия близка к цилиндрической. Выброс факела испаряющегося материала происходит с двух сторон заготовки.

2. Смещение фокуса вглубь металла ($\Delta F > 0$) приводит к образованию внутренней полости в самой горячей точке канала отверстия (бомбообразные).

3. При дальнейшем смещении фокуса к задней кромке заготовки формируется отверстие с обратным конусом. Основной выброс материала происходит с обратной стороны.

4. Формирование наклонных отверстий осуществляется направлением сфокусированного излучения под требуемым углом к поверхности заготовки.

Физический процесс формообразования идентичен получению глухих отверстий. В некоторых случаях для уменьшения отражения излучения мощного лазера сначала делается небольшая лунка перпендикулярно поверхности.

7. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

7.1. Приэлектродные процессы в среде электролита

Удаление припуска с заготовки при размерной электрохимической обработке происходит под действием электрического тока в среде электролита между инструментом и заготовкой.

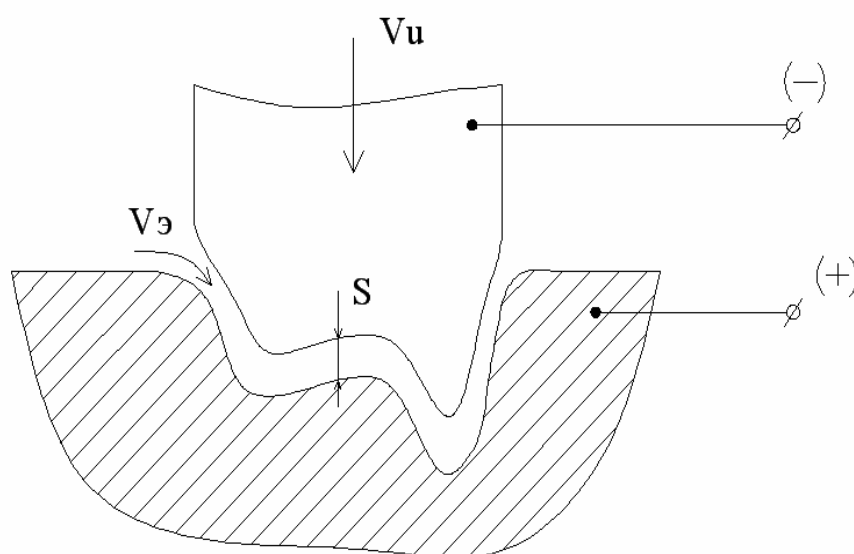


Рис. 7.1 Схема проведения размерной электрохимической обработки: $V_э$ - скорость прокачки электролита; V_u - скорость перемещения электрода к заготовке; S - межэлектродный зазор.

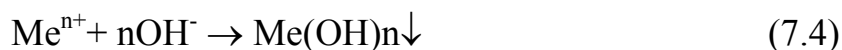
В основе этого процесса лежит явление анодного растворения металла, идущее в электролитах разного состава, например, в водном растворе хлорида натрия, нитрита натрия и др. Эти соли дешевы и растворы их безвредны для окружающего персонала.

Под действием тока погруженный в электролит материал анода растворяется, в виде продуктов обработки поступает в электролит и выносится из зоны обработки. При этом материал катода не растворяется. На поверхности электродов в процессе обработки идут следующие реакции:

1) На катоде протекает разложение молекул воды с образованием молекулярного водорода



2) На аноде происходит реакция растворения металла с образованием нерастворимого гидроксила, выпадающего в осадок





Т.е. в результате реакции на катоде выделяется водород, а на аноде кроме нерастворимого гидроксидов еще и кислород.

Количественно процесс растворения металла на аноде под действием тока определяется законом Фарадея

$$m = \varepsilon \cdot Q \quad (7.7)$$

где m - масса растворенного с анода металла;

ε - коэффициент пропорциональности, электрохимический эквивалент;

Q - количество электричества, прошедшего через электролит.

Если сила тока J , а время его прохождения τ , то

$$Q = J \cdot \tau \quad (7.8)$$

и тогда $m = \varepsilon \cdot J \cdot \tau$

Электрохимический эквивалент чистого металла (приводится в справочниках) равен

$$\varepsilon = \frac{A \cdot n}{F} \quad (7.9)$$

где A - атомная масса; n - валентность; F - 96500-число Фарадея к/Г·экв или 26,8 А·г/Г·экв.

Для сплавов можно рассчитать. При проведении процессов размерной обработки должно выполняться равенство между скоростью ухода материала анода и перемещением электрода по отношению к обрабатываемой заготовке.

При равномерном поступательном перемещении электрода инструмента масса удаленного с анода материала может быть определена по формуле

$$m = S_1 \cdot l \cdot \rho \quad (7.10)$$

где S_1 - площадь торца инструмента; l - перемещение инструмента по отношению к заготовке; ρ - плотность обрабатываемого материала.

Скорость растворения определяется как

$$V = l / \tau \quad (7.11)$$

и тогда, сопоставляя (2) и (3) получим

$$v = \frac{j \cdot \varepsilon}{\rho} \quad (7.12)$$

где j - плотность тока.

Или

$$v = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot u}{\rho \cdot s} \quad (7.13)$$

где σ - удельная проводимость (электропроводность зазора); u - величина напряжения на зазоре.

(U) и (σ) вводятся из соотношения

$$\begin{aligned} I &= u \cdot \sigma \\ \Rightarrow u \cdot \sigma &= j \cdot S \Rightarrow u = \frac{j \cdot S}{\sigma} \\ I &= j \cdot S \end{aligned} \quad (7.14)$$

Если зазор $s = \text{const}$, процесс обработки стационарный, если $s = \text{var}$ - процесс не стационарный.

Опыт показывает, что количество фактически растворимого металла меньше, чем это следует из закона Фарадея, т.к. часть количества электричества расходуется на образование газов, вторичные реакции и т.д. Эти потери учитываются с помощью *коэффициента выхода по току* (η), следовательно

$$v = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \tau \cdot u}{\rho \cdot S_1} \quad (7.15)$$

где V - скорость растворения.

Величина (η) зависит от плотности тока, материала заготовки, скорости прокачивания электролита, степени защелоченности электролита и др.

Для раствора NaCl

Для низколегированных сталей при ведении процесса в растворе *хлорида натрия* $\eta = 0.8 \dots 0.85$, для жаропрочных сталей $\eta = 0.85 - 0.93$, для титановых сплавов $\eta = 0.83 \dots 0.85$.

Для раствора NaNO₃

При ведении процесса ЭХО в среде нитрата натрия для стали $\eta = 0.6 \dots 0.7$, для алюминиевых сплавов $\eta = 1.1 \dots 1.35$. Здесь $\eta > 1$ из-за дополнительного химического растворения металла.

Для нормального протекания ЭХО необходим интенсивный вынос продуктов обработки из зоны обработки, поэтому электролит прокачивается через зазор со скоростью, достаточной для выноса твердых и газообразных продуктов реакции.

В процессе обработки с увеличением напряжения ток изменяется весьма сложным образом

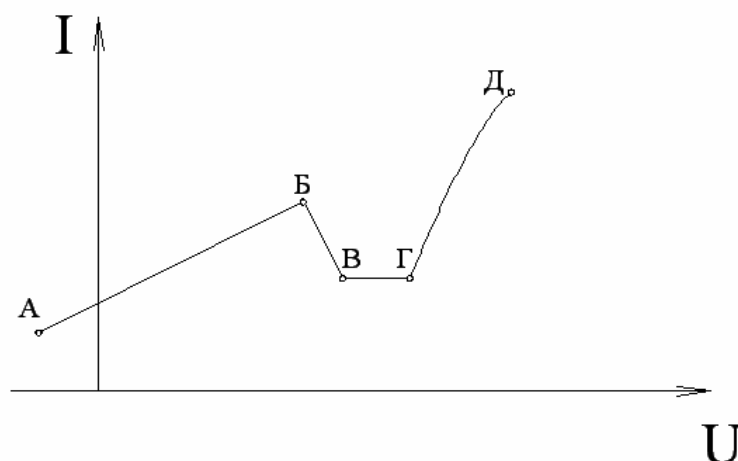


Рис. 7.2 Вольт-амперная характеристика процесса ЭХО

На участке АБ ток с увеличением напряжения растет, но сила тока невелика и эффективность обработки низка, поэтому этот участок практически не используется.

При дальнейшем росте напряжения ток убывает (Б-В), из-за пассивации обрабатываемой поверхности, т. е. покрытие ее окисной пленкой. Последующий рост напряжения сначала (В-Г) не приводит к изменению тока, пока толщина оксидной пленки растет, но при дальнейшем увеличении напряжения пленка разрушается и ток растет на участке (Г-Д). Этот участок называется *перепассивной областью* и характеризуется повышенным растворением металла.

Для различных сплавов пассивация наступает при различных напряжениях в зависимости от химического состава металла, состава электролита, температуры, условия течения электролита и др. При обработке, например, нержавеющей стали пассивация проявляется очень слабо.

7.2. Выбор режимов проведения процессов обработки металлов

Для улучшения условий растворения и снижения пассивации обрабатываемого материала в электролит вводят активирующие элементы (бром, йод и др.). Улучшение растворимости имеет место и при воздействии на зону обработки *ультразвука*.

Важное значение имеет *вынос продуктов* обработки. Установлено, что при скорости течения электролита менее некоторой критической, поток не успевает выносить продукты обработки, что ведет к снижению скорости растворения.

Поэтому *скорость течения электролита* ($V_{\text{э}}$) должна быть достаточной для выноса всех продуктов обработки из зазора и находится по уравнению

$$v'_3 \geq \frac{k^2 \cdot v \cdot L_p \cdot \eta^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \sigma^2 \cdot u^2}{\rho_1^2 \cdot D^2 \cdot (c_a - c_{вх})^2 \cdot s^2 \cdot \left(\frac{v}{D}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (7.16)$$

η - коэффициент выхода по току; ε - электрохимический эквивалент; σ - удельная проводимость (электропроводность зазора); u - напряжение в зазоре; s - площадь инструмента;

Здесь: $k=4.64$ - безразмерный коэффициент;

v - коэффициент кинематической вязкости электролита в пограничном слое;

L_p - длина участка детали в направлении течения электролита, на котором происходит растворение (мм);

ρ_1 - плотность продуктов обработки (по опытным данным составляет приблизительно (2500...3000) кг/м³);

D - коэффициент диффузии частиц в электролите;

$c_a = (0.98...0.97)$ массовая доля продуктов обработки на аноде;

$c_{вх} = (0.02...0.005)$ массовая доля продуктов обработки в электролите при входе его в зазор.

Распределение продуктов растворения в пограничном слое показано на рис. 7.3.

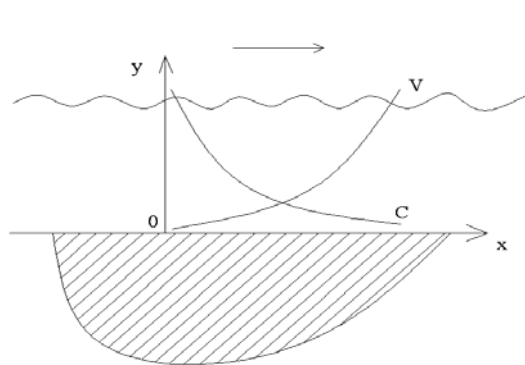


Рис. 7.3 Распределение продуктов растворения в пограничном слое: c - распределение концентрации частиц; v - распределение скорости жидкости в потоке вблизи поверхности обработки

Это уравнение справедливо для плоских горизонтальных электродов, и в случаях, когда толщина межэлектродного зазора много меньше длины его кривизны, а скорость выноса продуктов обработки на несколько порядков превышает скорость их диффузии.

При проведении процесса ЭХО следует учитывать, что при протекании тока через электролит *нагрев жидкости* за счет джоулева тепловыделения. Поэтому при расчете процесса ЭХО необходимо следить чтобы температура электролита на выходе из зазора не превышала допустимой, т.к. она влияет на качество обработки.

На основе баланса подведенной к электролиту энергии и выделившегося в нем тепла можно получить уравнение

$$v_{\text{э}}^{\prime\prime} = \frac{j^2 \cdot L_p}{\sigma \cdot \rho_{\text{э}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})} \quad (7.17)$$

где $v_{\text{э}}^{\prime\prime}$ - скорость электролита в зазоре, найденная из условия исключения его перегрева; $\rho_{\text{э}}$ - средняя по длине зазора плотность электролита; c_p - удельная теплоемкость электролита; L_p - длина участка детали; j - плотность тока; $T_{\text{вых}}$ и $T_{\text{вх}}$ - температура электролита на выходе из зазора и на входе в него.

Действительная скорость прокачки электролита выбирается *максимальной* из найденных, т.е. $v_{\text{э}}^{\prime}$ и $v_{\text{э}}^{\prime\prime}$.

При ЭХО необходимо обеспечить достаточное напряжение (U_0) на клеммах источника тока, чтобы вести процесс с нужной производительностью, и необходимый напор (H) насоса для создания заданной скорости прокачки электролита.

Требуемое *напряжение источника* находится из уравнения

$$U_0 = U + \Delta U_T + \Delta U + \Delta U_3 \quad (7.18)$$

где U - напряжение на межэлектродном зазоре;

ΔU_T - потери напряжения на зажимах и в токоведущих шинах;

ΔU - потери напряжения в двойном электрическом слое в электролите;

ΔU_3 - потери напряжения в заготовке.

Величина ΔU_T обычно мала и ею можно пренебречь; ΔU_3 - учитывается только в случае деталей больших размеров.

Таким образом:

$$U = U_0 - \Delta U \quad (7.19)$$

где U - напряжение на межэлектродном зазоре; U_0 - напряжение источника тока; ΔU - потери напряжения в двойном электрическом слое.

Величина ΔU зависит от режима обработки материала заготовки и состава электролита, напряжения и др. *Среднее значение потерь напряжения* в двойном электрическом слое (на аноде и катоде) для наиболее распространенных режимов обработки составляет (2-5)В.

Для увеличения производительности необходимо повышать U , однако при этом после определенного значения U качество обработки поверхности снижается, а при $U > 30$ В могут возникать пробой межэлектродного промежутка, что приводит к снижению качества обработки.

ЭХО в оптимальных условиях возможна только при необходимой скорости прокачки электролита через межэлектродный зазор, которая может быть получена при достаточном напоре насоса и его производительности (расходе электролита).

Расход Q_H , создаваемый насосом для прокачки электролита со скоростью $v_э$, определяется выражением

$$Q_H = K_H \cdot v_э \cdot S \quad (7.20)$$

где K_H - 1.5...2.0-коэффициент износа насоса; S - толщина межэлектродного зазора.

Напор, обеспечивающий необходимую скорость прокачки, находится из соответствующего уравнения.

7.3. Определение производительности процесса электрохимической обработки

Производительность ЭХО обработки в различных условиях определяется следующим образом:

1. При обработке *с неподвижным электродом* средняя скорость (V_c) растворения анода находится из уравнения

$$v_c = \frac{z}{\tau} \quad (7.21)$$

где z - припуск на обработку; τ - время обработки.

Скорость удаления припуска в реальных условиях здесь составляет (0.001-0.01) мм/с.

2. В схемах удаления материала при ЭХ резании, прошивании, точении и др. скорость растворения металла совпадает со скоростью (v_H) *подачи инструмента*

$$v_u = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot u}{\rho \cdot S_1} \quad (7.22)$$

где η - коэффициент выхода по току; ε - электрохимический эквивалент; σ - проводимость зазора; u - напряжение в зазоре; ρ - плотность продуктов обработки; S_1 - площадь инструмента.

3. При обработке круглых отверстий с помощью центрично расположенного инструмента

$$v_u = \frac{L_p \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot u}{\rho \cdot z \cdot \left(\rho_0 + \frac{z}{2} \right)} \quad (7.23)$$

где ρ_0 - боковой зазор; z - припуск на обработку.