

***Лекция 1. Часть 2. Обзор процессов, происходящих
в твердом теле при его бомбардировке
заряженными частицами***

**2.1. Процессы, происходящие в веществе при его
бомбардировке электронами.**

- 1. Понятия:**
 - упругие и неупругие взаимодействия;**
 - торможение;**
 - рассеяние;**
 - термализация.**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке электронами

2. Упругие взаимодействия с атомами облучаемого вещества:

- образование радиационных дефектов ($E >$ нескольких сотен кэВ);**
- фононные колебания (на дискретных квантовых частотах);**
- упругое отражение электронов.**

3. Неупругие взаимодействия:

- генерация излучений (становится существенным при достаточно высоких энергиях ускоренных электронов ($E_{\text{порог}}$ зависит от свойств мишени и превышает для многих веществ 10 МэВ):**
 - тормозного;**
 - переходного;**
 - черенковского;**
 - когерентного испускания рентгеновских квантов (в каналах монокристаллов);**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке электронами

- электрон-электронные взаимодействия (это основной тип взаимодействий, при которых теряется энергия ускоренных электронов с энергией менее 10 МэВ):

- коллективные: плазмоны – кванты колебаний плотности системы валентных электронов при ее возбуждении ускоренным электроном;

- * плазменные колебания имеют дискретные квантовые частоты;

- * при распаде плазмонов выделяется энергия, которая затем уносится в виде э/м излучения или передается подходящему электрону твердого тела;

- * плазменные колебания возбуждаются, если длина их волн много больше расстояния между свободными электронами, т.е. их энергия невелика;

- * рассеяние электрона при возбуждении плазмона происходит на небольшой угол, т.к. от электрона передается небольшое количество импульса и энергии;

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке электронами

- одночастичные: ускоренный электрон взаимодействует с индивидуальным электроном;

* передается большая доля энергии первичного электрона, рассеяние ускоренного электрона происходит на большие углы;

* энергия первичного электрона тратится на возбуждение и ионизацию атомов, а также передается электронам проводимости;

схема возбуждения и ионизации: электрон на внутренней оболочке получает энергию, достаточную для перехода на вышележащие энергетические уровни -> переход на вышележащие энергетические уровни -> возбуждение и ионизация.

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке электронами

4. Отражение электронов

- **упругое отражение первичных электронов;**
- **неупругое отражение первичных электронов;**
- **эмиссия вторичных электронов с облучаемой поверхности.**

5. Процессы, происходящие при снятии возбуждения атомов:

- **оже-процессы (безызлучательная передача дискретной порции энергии оже-электрону при переходе электронов из вышележащих энергетических уровней на вакансии на более низких оболочках);**
- **характеристическое излучение (при заполнении вакансий на внутренних электронных оболочках испускается квант ε/m излучения, величина которого характерна для данного вещества и данных оболочек, спектр излучения - в области рентгеновских длин волн).**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке электронами

6. Методы анализа поверхности с использованием электронного облучения:

- вторичная электронная спектроскопия;**
- оже-спектроскопия;**
- рентгеноспектральный анализ.**

7. Изменение проводимости полупроводников и диэлектриков (радиационная проводимость).

8. Когда атом в возбужденном состоянии, то его связи с соседями могут меняться; это приводит к:

- десорбции чужеродных атомов (радиационно-стимулированная десорбция);**
- диссоциации химических соединений;**
- образованию химических соединений;**
- образованию радиационных дефектов внутри кристаллов.**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке электронами

9. Диссипация энергии ускоренных электронов при их взаимодействии с веществом:

- унос энергии с поверхности электронами, фотонами, атомными частицами (некоторая доля);**
- превращение в конечном итоге в тепловую энергию облучаемого вещества (бóльшая доля); из зоны торможения тепловая энергия распространяется:**
 - путем теплопроводности в глубь вещества;**
 - возникновение теплового излучения.**

10. Явления, к которым приводит нагрев:

- структурно-фазовые изменения в облучаемом материале;**
- усиление диффузии;**
- отжиг дефектов;**
- плавление, рекристаллизация;**
- испарение;**
- десорбция, термоэлектронная эмиссия;**
- возникновение термоупругих и термопластических напряжений;**
- нарушение сплошности среды и т.д.**

2.2. Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами.

- 1. Процессы, которые могут происходить при приближении ионов к бомбардируемой поверхности:**
 - потенциальная электронно-ионная эмиссия (оже-процессы при переходе электронов твердого тела с вышележащих уровней на нижележащие уровни бомбардирующего иона);**
 - химические реакции на поверхности в результате возбуждения электронных состояний атомов и молекул, возбуждение свободных химических связей, разрушение адсорбированных соединений.**

2.2. Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами.

2. Процессы, происходящие внутри твердого тела:

потеря энергии и рассеяние из-за:

- 1) упругих и неупругих взаимодействий с электронами вещества;**
- 2) упругих и неупругих взаимодействий с ядрами атомов вещества;**
- 3) излучения различных видов.**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

3. Основные виды потерь энергии ускоренных ионов при энергиях до нескольких МэВ:

- упругие соударения с ядрами;**
- неупругие соударения с электронами.**

4. Свойства упругих соударений с ядрами:

- передача энергии имеет дискретный характер, так как массы взаимодействующих частиц сопоставимы;**
- рассеяние может быть очень существенным.**

5. Свойства неупругих соударений с электронами вещества:

- при каждом соударении передается относительно малая доля энергии;**
- рассеяние не слишком велико.**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

6. Явления, основанные на упругом взаимодействии с атомами вещества:

- отражение бомбардирующих ионов от поверхности;
- образование радиационных дефектов (*приводит к радиационно-стимулированной диффузии, радиационно-стимулированному отжигу дефектов; изменению химической структуры соединений и химическим реакциям*);
- распыление;
- фото-ионная эмиссия (*атомы, группы атомов и ионы, вылетевшие в возбужденном состоянии в вакуум, могут переходить в невозбужденное состояние, испуская кванты света*).

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

7. Неупругие взаимодействия с электронной подсистемой вещества приводят к возбуждению электронов и ионизации атомов:

возбуждение электронов – появление электронов на высоких, ранее свободных энергетических уровнях и одновременно образование электронных вакансий на заполненных в условиях термодинамического равновесия более низких уровнях.

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

8. Явления, к которым приводят неупругие взаимодействия с электронной подсистемой:
- увеличение проводимости у полупроводников и диэлектриков (радиационная проводимость);
 - эмиссия электронов, или кинетическая ионно-электронная эмиссия;
 - оже-процессы;
 - ионолюминесценция, характеристическое рентгеновское излучение;
 - изменение зарядового состояния примесных атомов, дефектов кристаллической решетки и собственных атомов твердого тела, что приводит к изменению энергии активации ряда процессов, в т.ч. диффузии примесей или дефектов, скорости распада сложных дефектов, образованию радиационных дефектов, инициации химических реакций, невозможных в равновесных условиях при данной температуре;

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

- 9. Почти вся энергия, внесенная ускоренными ионами в вещество и растроченная в упругих и неупругих взаимодействиях, превращается в тепловую. Исключение составляет небольшая доля энергии (как правило, менее 10%), унесенная эмиттированными частицами).**
- 10. Нагрев образца и все последующие процессы, которые могут возникнуть при достаточной мощности (плавление, испарение, термоэмиссия электронов, тепловое излучение и т.д.) в общем, ничем не отличаются от подобных процессов, происходящих при бомбардировке вещества электронами.**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

- 11. Ионное легирование, или имплантация – результат внедрения ускоренных ионов в вещество и потери там их начальной энергии во всевозможных упругих и неупругих взаимодействиях.**
- 12. Каналирование (имеет место, когда ускоренный ион взаимодействует с монокристаллом; ионы при движении в определенных направлениях «чувствуют» не отдельные атомы, а плоскости или цепочки атомов как целые, поэтому близкие взаимодействия каналируемых ионов с атомами, находящимися в узлах кристаллической решетки, оказываются невозможными).**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

- 13. Переходное и тормозное излучение тоже могут иметь место, но они имеют заметную интенсивность только при больших скоростях заряженных частиц, т.е. при энергиях, значительно больших, чем в случае электронной бомбардировки, т.к. массы ионов на несколько порядков больше массы электронов.**

Процессы, происходящие в веществе при его бомбардировке ионами

14. Методы диагностики, основанные на облучении вещества ускоренными ионами:

- метод ионно-нейтрализационной спектроскопии (основан на явлении потенциальной электронно-ионной эмиссии);**
- метод обратного рассеяния медленных и быстрых ионов (энергия иона, рассеянного на заданный угол в парном столкновении, если его масса меньше рассеивающего центра, однозначно определяется массами частиц и их начальными энергиями);**
- вторичная ионная масс-спектрометрия (основан на распылении);**
- ионная оже-спектроскопия (исследуются спектры оже-электронов);**
- рентгеновская спектроскопия (исследуется характеристическое рентгеновское излучение).**