

***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  $\varepsilon/m$  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 (большая 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).**