**Рабочая программа дисциплины**

**1. Электронно-стимулированные процессы на поверхности твердых тел**

**2. Лекторы.**

**2.1.** Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Зыкова Екатерина Юрьевна, кафедра физической электроники физического факультета МГУ, zykova@phys.msu.ru, +7(495)9392937.

**3. Аннотация дисциплины.**

В лекционном курсе рассмотрены физические процессы, происходящие на поверхности твёрдых тел при воздействии низкоэнергетического электронного облучения. Подробно изложены экспериментальные закономерности и теоретические модели, описывающие такие явления как создание в кристаллах радиационных точечных дефектов, процессы электронно- стимулированной адсорбции, десорбции и поверхностной диффузии. Рассмотрены практические аспекты применения этих физических процессов для технологических целей осаждения тонких металлических пленок на поверхности твердых тел при их бомбардировке электронами низких энергий. В рамках курса студенты познакомятся также с методом электронно-лучевой полимеризации, позволяющим формировать полимерные плёнки, локализованные в области электронного пучка.

**4. Цели освоения дисциплины.**

Получить основные представления о физических процессах, происходящих на поверхности твёрдых тел при воздействии низкоэнергетического электронного облучения и возможностях их применения для технологических целей осаждения тонких пленок на твердотельных подложках. Овладеть современными профессиональными методиками исследования их свойств.

**5. Задачи дисциплины.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать экспериментальные закономерности и теоретические модели, описывающие электронно- стимулированные процессы на поверхности твёрдых тел; уметь подобрать метод исследования, позволяющий наиболее оптимально решать поставленную исследовательскую задачу.

**6. Компетенции.**

**6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.**

ОНК-1, ОНК-5, ОНК-6

**6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.**

М-ОНК-2, М-ИК-2, М-ИК-3, М-ПК-1, М-ПК-2, М-ПК-3, М-ПК-5, М-ПК-6, М-ПК-8.

**7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины**

В результате освоения дисциплины студент должен:

знать основные физические процессы, происходящие на поверхности твёрдых тел при воздействии низкоэнергетического электронного облучения;

уметь применять полученные знания для решения технологических задач осаждения тонких пленок на различных твердотельных подложках.

**8. Содержание и структура дисциплины.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Вид работы** | **Семестр** | **Всего** |
| **1** |
| **Общая трудоёмкость, акад. часов** | 72 | 72 |
| **Аудиторная работа:** | 36 | 36 |
| Лекции, акад. часов | 36 | 36 |
| Семинары, акад. часов |  |  |
| Лабораторные работы, акад. часов |  |  |
| **Самостоятельная работа, акад. часов** | 36 | 36 |
| **Вид промежуточной аттестации (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)** | зачет |  |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **N раз- дела** | **Наименование раздела** | **Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий** | | | | **Форма текущего контроля** |
| **Аудиторная работа** | | | **Самостоятельная работа** |
| **Лекции** | **Семинары** | **Лабораторные работы** |
| **1** | Введение.  Основные понятия | 2 часа.  Обзор основных физических процессов, происходящих на поверхности твёрдых тел при воздействии низкоэнергетического электронного облучения, их классификация |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции.*.* | *ДЗ,*  *КР,*  *Оп* |
| **2** | Электронно-стимулированное создание точечных дефектов в твердых телах | 2 часа.  Структура реальных твердых тел. Классификация структурных дефектов. Точечные дефекты в твердых телах. Типы точечных дефектов и их комплексы. Равновесная концентрация точечных дефектов. Энергия образования. Механизмы образования. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.  Энергетические уровни дефектов и примесных атомов в кристалле.Точечные дефекты в щелочно-галоидных кристаллах. Центры окраски. Экспериментальные методы изучения центров окраски. Методы ЭПР и абсорбционный метод. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.  Радиационные дефекты. Специфика образования радиационных дефектов в металлах, ионных кристаллах, полупроводниках и бинарных соединениях в результате различного вида облучения. Ударные механизмы создания радиационных дефектов в кристаллах. Механизмы создания стабильных радиационных дефектов в кристаллах при низкоэнергетическом электронном облучении. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| **3** | Электронно-стимулированные процессы адсорбции, десорбция и поверхностной диффузии | 2 часа.  Электронно- стимулированная адсорбция. Адатомы. Типы адсорбции. Физическая и химическая адсорбции. Кинетика адсорбции. Модель адсорбции Ленгмюра. Зависимость от покрытия, температуры, угла и кинетической энергии. Изменение адсорбционной способности поверхности при низкоэнергетическом электронном облучении. Модели прочной и слабой связи. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. | *ДЗ,*  *КР,*  *Оп* |
| Электронно-стимулированная десорбция (ЭСД). Экспериментальные методы изучения ЭСД.  Модели электронно-стимулированной десорбции частиц, адсорбированных на металлической поверхности (Модель Менцеля-Гомера-Рэдхеда и модель Антониевича). Электронно-стимулированная деструкция поверхности ионных и ионно-ковалентных кристаллов. Основные экспериментальные закономерности. Механизмы ЭСД Кнотека-Фейбельмана и Пули-Херша. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| Электронно-стимулированная диффузия.  Диффузия. Поверхностная и объемная диффузия. Законы Фика. Основные механизмы поверхностной диффузии (прыжковый, вакансионный, механизм атомного обмена). Агнизотропия поверхностной диффузии. Механизмы радиационно-стимулированной диффузии в твердых телах. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| **4** | Электронная стимуляция роста тонких пленок. | 2 часа.  Основные закономерности роста тонких пленок. Механизмы зародышеобразования. Капиллярная модель. Влияние на процессы зародышеобразования неоднородностей подложки, точечных дефектов, поверхностного заряда. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.  Атомистическая теория Уолтона-Родина. Зародышеобразование при наличии сильных центров адсорбции. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.  Кинетика роста островков. Форма островков. Распределение островков по размеру. Механизмы укрупнения островков. Коалесценция. Дозревание Освальда. Динамическая (миграционная) коалесценция. Коалесценция металлических островков под влиянием электронного облучения. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.  Эпитаксия. Температура эпитаксии. Влияние электронного облучения на эпитаксиальное зарождение |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| **5** | Полимеризация пленок под воздействием электронного облучения | 2 часа.  Теоретические основы метода электронно-лучевой полимеризации. Влияние режимов полимеризации на свойства плёнок, полученных электронно-лучевой полимеризацией. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.  Металлонаполненные полимерные пленки. Получение металлонаполненных полимерных плёнок. Механизм проводимости металлонаполненных плёнок. |  |  | 2 часа.  Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |

**Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости.**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1. Защита лабораторной работы (ЛР);  2. Расчетно-графическое задание (РГЗ);  3. Домашнее задание (ДЗ); | 4. Реферат (Р);  5. Эссе (Э);  6. Коллоквиум (К); | 7. Рубежный контроль (РК);  8. Тестирование (Т);  9. Проект (П); | 10. Контрольная работа (КР);  11. Деловая игра (ДИ);  12. Опрос (Оп); | 15. Рейтинговая система (РС);  16. Обсуждение (Об). |

**9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО**

1. Дисциплина по выбору.
2. Вариативная часть, блок профессиональной подготовки.
3. Для освоения дисциплины студент должен знать основные разделы физики и математики.
   1. До начала освоения дисциплины должны быть освоены дисциплины модулей «Общая физика», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Элементы квантовой теории конденсированного состояния вещества», .
   2. Освоение дисциплины необходимо для дисциплин НИП, НИР, НИС.

**10. Образовательные технологии**

* дискуссии,
* круглые столы,
* использование средств дистанционного сопровождения учебного процесса,
* преподавание дисциплин в форме авторских курсов по программам, составленным на основе результатов исследований научных школ МГУ.

**11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации**

Перечень вопросов:

1. Типы точечных дефектов в твердых телах.
2. Энергия образования точечного дефекта. Равновесная концентрация точечных дефектов.
3. Диффузия точечных дефектов в твердых телах
4. Центры окраски в щелочно-галоидных кристаллах. Методы их изучения
5. Радиационные дефекты. Ударные механизмы создания радиационных дефектов в кристаллах.
6. Электронные возбуждения в ЩГК. Свободные и автолокализованные электронные возбуждения.
7. Механизмы создания стабильных дефектов в ЩГК при низкоэнергетическом электронном облучении.
8. Адсорбция. Типы адсорбции. Кинетика адсорбции. Модель Ленгмюра.
9. Механизм увеличения адсорбционной способности поверхности при электронном облучении.
10. Поверхностная диффузия адсорбированных атомов. Коэффициент диффузии. Основные механизмы поверхностной диффузии.
11. Электронно-стимулированная десорбция (ЭСД). Модель Менцеля-Гомера-Рэдхеда.
12. Электронно-стимулированная десорбция с поверхности ионно-ковалентных кристаллов. Механизм Кнотека-Фейбельмана.
13. ЭСД с поверхности ЩГК. Механизм Пули-Херша.
14. Механизмы зародышеобразования. Капиллярная модель.
15. Гетерогенное зарождение. Влияние на процесс зародышеобразования неоднородности поверхности подложки (геометрические неоднородности, адсорбируемые примеси, точечные дефекты).
16. Атомистическая теория Уолтона и Родина и капиллярная модель. Критическая температура конденсации.
17. Зародышеобразование при наличии сильных центров адсорбции.
18. Механизмы укрупнения островков. Статическая и динамическая коалесценция.
19. Коалесценция металлических островков под влиянием электронного облучения.
20. Эпитаксия. Модель жесткого кластера.
21. Влияние электронного облучения на эпитаксиальное зарождение. Температура эпитаксии.
22. Полимеризация пленок под воздействием электронного облучения. Теоретические основы метода.
23. Влияние режимов полимеризации на свойства плёнок, полученных электронно-лучевой полимеризацией. Получение металлонаполненных полимерных плёнок.

Примеры задач:

1. Вычислить равновесную концентрацию вакансий при температуре 300 и 900 К, если энергия образования вакансии равна 1 эВ.

2. Вывести формулу для расчета равновесной концентрации пары дефектов по Френкелю.

3. Оценить глубину проникновения атомов углерода в поверхностный слой железа после выдержки при температуре 300 и 1500 К в течение 3 часов. Считать, что среда, содержащая углерод, вплотную прилегает к поверхности железа. Коэффициент диффузии вычислить по следующим данным , . Параметр решетки ОЦК -железа равен a=0,288 нм.

4. Рассчитать начальный коэффициент прилипания кислорода, если газ O2 при давлении 10-7 Торр диссоциативно адсорбируется на поверхности Ni (100) c начальной скоростью 0.045 монослоя/с. Температура T=300 К. Кристалл Ni имеет г.ц.к. структуру с постоянной решетки 0,352 нм.

5. Время жизни атома алюминия в состоянии адсорбции на поверхности Si(111) составляет 30 c при T=850°C и 1000 с при T=755°C. Найти энергию активации десорбции Al.

6. Атом Ag случайно мигрирует по поверхности . Определите среднее смещение атома за 1 с, 1 мин, 1 час при температуре T=450°C.

, .

7. На диаграмме Аррениуса насыщающей концентрации островков, измеренной в случае роста Ag на поверхности Pt (111), наблюдаются два участка с наклоном 56 и 122 мэВ для размеров кристаллических островков и соответственно. Рассчитайте энергию связи димера Ag-Ag и энергию миграции адатомов Ag на поверхности Pt(111).

**12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

Основная литература

1. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. ″Введение в физику поверхности″. М., Наука, 2006.

2. Дж.Динс, Дж.Винйард. Радиационные эффекты в твердых телах, Изд. Иностранная литература, Москва, 1960.

3. К. Лейман. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов. М., Атомиздат, 1979.

4. Ч.Б. Лущик, А.Ч. Лущик. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М: «Наука», 1989.

5. В.В.Никитин. Электронно-стимулированные процессы в твердых телах. Учебное пособие. – Орск: Издательство ОГТИ, 2005.

6. Ф.Ф.Волькенштейн. Электронная теория катализа на полупроводниках. М., Физматлит, 1960.

7. Монокристаллические пленки. Под ред.. Мир, Москва, 1966.

8. Смирнова К.И. Тонкие пленки в микроэлектронике: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007.

9. Технология тонких пленок. Под ред. Л. Майссела, Р.Г. Глэнга. Справочник. Том 1–2. М.: Советское радио, 1977.

10. Гегузин Я.Е., Кагановский Ю.С. Диффузионные процессы на поверхности кристалла. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Дополнительная литература

1. Milton Ohring. Materials science and thin films. 2nd ed., Academic Press, 2001.
2. H.Luth. Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films, Fifth Edition, Springer, 2010, 577 p.

Периодическая литература

1. Ч.Б. Лущик, И.К. Витол, М.А. Эланго. Распад электронных возбуждений на радиационные дефекты в ионных кристаллах // УФН, 1977, т.122, в.2, с. 223-254
2. М.И.Клингер, Ч. В. Лущик, Т. В. Машовец, Г.А.Холодарь, М.К.Шейнкман, М.А.Эланго. Создание дефектов в твердых телах при распаде электронных возбуждении // УФН, 1985, т.147, в.3, с. 523-558
3. Блюменфельд Л.А., Тихонов А.Н. Электронный парамагнитный резонанс // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 9. с. 91–99.

Интернет-ресурсы

http://www.ph4s.ru/book\_ph\_poverhn.html

physelec.phys.msu.ru

**13. Материально-техническое обеспечение**

13.1. Помещения

Лекционные и семинарские занятия по дисциплине проводятся в соответствии с требованиями к материально-техническим условиям реализации ООП (п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика»).

13.2. Оборудование

Для проведения лекционных занятий в аудитории предусмотрены: учебная доска большого формата, компьютер, проектор, экран.