

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

Кафедра микроэлектроники и общей физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета

И.С. Огнев
(подпись)

« 23 » мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины

«Модификация твердых тел при ионно-плазменной обработке»

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния

Форма обучения очная

Программа одобрена
на заседании кафедры
микроэлектроники и общей физики
« 17 » апреля 2023 года, протокол №5

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины являются:

- получение аспирантами знаний о физических явлениях, происходящих с поверхностью и объемом твердого тела при ионном распылении в плазменных процессах;
- изучение модельных представлений и основных теоретических принципов взаимодействия ионов плазмы с поверхностью и объемом твердого тела;
- формирование у аспирантов знаний об экспериментальных условиях плазменной обработки и о методах описания морфологии поверхности твердых тел после плазменной обработки.

2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

Данная дисциплина является дисциплиной по выбору. Дисциплина имеет логические и содержательно-методические взаимосвязи с другими изучаемыми дисциплинами и способствует научно-исследовательской работе аспиранта по научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния по отрасли наук: физико-математические.

3. Планируемые результаты освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- основные физические процессы и математический аппарат, связанные с распылением твердых тел ионами плазмы при вариации энергии ионов, с формированием микро- и нанорельефа на поверхности материалов с различным химическим составом, со специфическими свойствами радиационных дефектов;

Уметь:

- классифицировать поставленные задачи в соответствии с фундаментальными разделами физики;
- применять полученные знания для целенаправленного изменения параметров и характеристик микро- и наноэлементов при модификации в плазме, использовать физические законы, физические модели для управления морфологическими параметрами в разных технологических условиях;

Владеть:

- современными методами проведения исследований в области ионно-плазменных технологий модификации поверхности и объема твердотельных систем;
- теоретическими и экспериментальными приемами при работе с модифицированными в плазме объектами твердотельной электроники, информацией о методах управления морфологическими, электрическими и оптическими параметрами поверхности.

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы , 108 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий и их трудоемкость (в академических часах)					Формы текущего контроля успеваемости Форма промежуточной аттестации
			лекции	практические	лабораторные	консультации	самостоятельная работа	
1	Введение. Предмет, цели и задачи курса. Физические основы взаимодействия ускоренных ионов с веществом.	2	2	2			23	Задания для самостоятельной работы
2	Особенности распыления многокомпонентных мишеней. Аппаратура для проведения плазменной обработки	2	2	2		1	23	Задания для самостоятельной работы
3	Методы исследования морфологии поверхности и химического состава	2	2	1			23	Задания для самостоятельной работы
4	Радиационные дефекты. Изменение электрофизических и оптических характеристик кристаллов и пленок после ионной бомбардировки	2	2	1		1	20	Задания для самостоятельной работы
							3	зачет
	Всего за 2 семестр 108 час		8	6		2	92	
	Всего 108 час.		8	6		2	92	

Содержание разделов дисциплины:

Тема 1. Введение. Предмет, цели и задачи курса. Физические основы взаимодействия ускоренных ионов с веществом.

Взаимодействие с ядрами. Взаимодействие с электронами. Пробег иона. Эффект каналирования. Влияние энергии ионов на эффекты взаимодействия. Роль кристаллографической ориентации в процессах ионного распыления. Пороговая энергия распыления. Коэффициент распыления. Влияние угла наклона ионов. Основные модели распыления.

Тема 2. Особенности распыления многокомпонентных мишеней. Аппаратура для проведения плазменной обработки

Физические модели для описания распыления многокомпонентных мишеней. Условия распыления отдельных атомов и целых молекул в бинарных материалах. Анализ скоростей распыления на примере бинарных кристаллов халькогенидов свинца. Распыление твердых растворов. Аппаратура для проведения плазменной обработки. Типы реакторов. Управление основными параметрами процесса. Параметры плазмы. Модификация поверхности при ионной бомбардировке. Формирование микро- и наноструктур на поверхности, в приповерхностных слоях и в объеме. Роль дефектов. Особенности распыления эпитаксиальных пленок. Размерные эффекты при распылении. Моделирование процессов взаимодействия ионов с твердыми телами.

Тема 3. Методы исследования морфологии поверхности и химического состава

Методы исследования химического состава поверхности твердых тел после ионного распыления. Методы анализа химического состава. Вторичная ионная масс-спектрометрия. Оже-электронная спектроскопия. EDX-метод. Микроскопические методы исследования поверхности. Растровая и просвечивающая электронная микроскопия. Режимы наблюдения и технические возможности визуализации объектов. Сканирующая туннельная микроскопия. Методика атомно-силовой микроскопии для описания нанообъектов на поверхности. Масштабы по горизонтали и вертикали. Экспериментальные приемы исследований.

Тема 4. Радиационные дефекты. Изменение электрофизических и оптических характеристик кристаллов и пленок после ионной бомбардировки

Влияние электрически активных дефектов кристалла на изменение электропроводности. Радиационные дефекты и их вклад в электропроводность. Пострадиационный отжиг. Влияние морфологии поверхности после ионной обработки на оптические характеристики.

5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

Вводная лекция – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой литературы.

Академическая лекция с элементами лекции-беседы – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание аспирантов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

Проблемная лекция – изложение материала, предполагающее постановку проблемных и дискуссионных вопросов, освещение различных научных подходов, связанные с различными моделями интерпретации изучаемого материала. Проблемная лекция начинается с вопросов, с постановки проблемы, которую в ходе изложения

материала необходимо решить. В лекции сочетаются проблемные и информационные начала. При этом процесс познания аспирантом в сотрудничестве и диалоге с преподавателем приближается к поисковой, исследовательской деятельности.

Практическое занятие – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

Консультации – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы аспирантов. На консультациях по просьбе аспирантов рассматриваются наиболее сложные разделы дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы аспирантов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения в случае перехода на дистанционное обучение используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

Электронный учебный курс «Модификация твердых тел при ионно-плазменной обработке» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы аспирантов по темам дисциплины;
- представлен список литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения консультаций по дисциплине в случае их проведения в дистанционном формате в режиме онлайн.

6. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины

а) основная литература

- Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. -М.: Наука, 1978.
www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=797721&cat_cd=YARSU
- Распыление под действием бомбардировки частицами. Вып.3. Характеристики распыленных частиц, применения в технике / Под ред. Бериша Р., Виттмака К. - М.: Мир, 1998.
www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=269906&cat_cd=YARSU
- Берлин Е. В. , Григорьев В. Ю. , Сейдман Л. А. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения. - Москва : Техносфера, 2018. - 464 .
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785948365190.html>.

б) дополнительная литература

- Беграмбеков Л.Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии: Учебное пособие. - М: МИФИ, 2001.
- Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. -М.: Высшая школа, 2000.
www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=280147&cat_cd=YARSU
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. -М.: Физматлит, 2007.
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922105828.html>. Режим доступа: по подписке.
- Зимин С.П., Горлачев Е.С. Наноструктурированные халькогениды свинца. – ЯрГУ, 2011.
www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=1268771&cat_cd=YARSU

в) ресурсы сети «Интернет» (при необходимости)

- Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»
http://www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php;

- Библиотека научных журналов «Физика твердого тела», «Физика полупроводников», «Журнал технической физики», «Письма в журнал технической физики», «Оптика и спектроскопия». Журнальный портал ФТИ им. А.Ф. Иоффе. <http://journals.ioffe.ru/>.

7. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав следующие помещения:

- учебные аудитории для проведения лекций;
- учебные аудитории для проведения практических занятий;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы.

Помещения для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ЯрГУ.

Автор:

Профессор, д.ф.-м.н.
(должность, ученая степень)

(подпись)

Зимин С.П.
(Фамилия И.О.)

Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Модификация твердых тел при ионно-плазменной обработке»
по научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния

Оценочные материалы
для проведения текущей и/или промежуточной аттестации
аспирантов по дисциплине

1. Контрольные задания и (или) иные материалы,
используемые в процессе текущего контроля успеваемости

Задания для самостоятельной работы

2 семестр

Тема 1. Введение. Предмет, цели и задачи курса. Физические основы взаимодействия ускоренных ионов с веществом.

- опишите угловую зависимость коэффициента распыления; какую роль играет этот эффект при распылении участков поверхности с естественными плоскостями наклона?

Тема 2. Особенности распыления многокомпонентных мишеней. Аппаратура для проведения плазменной обработки

- дайте характеристику процессам изменения химического состава поверхности при распылении бинарных и многокомпонентных соединений;
- опишите условия проведения эксперимента в установке ионно-плазменного распыления, применяемой в Вашей диссертационной работе.

Тема 3. Методы исследования морфологии поверхности и химического состава

- составьте сводную информацию о методах определения химического состава в электронных структурах;
- опишите возможности метода растровой электронной микроскопии на примере микроскопа SUPRA-40.

Тема 4. Радиационные дефекты. Изменение электрофизических и оптических характеристик кристаллов и пленок после ионной бомбардировки

- какие радиационные дефекты характерны для материалов, исследуемых в Вашей диссертационной работе?
- на примере материалов, исследуемых в Вашей диссертационной работе, дайте характеристику изменений морфологии поверхности, электрических и оптических характеристик, вызванных ионно-плазменной обработкой.

2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

Зачет по дисциплине выставляется по результатам очного собеседования. Для получения зачета необходимы выполнение заданий для самостоятельной работы по всем четырем темам и прохождение индивидуального финального собеседования на оценку не менее 3 баллов.

Правила выставления оценки по результатам финального собеседования:

Оценка по результатам индивидуального финального собеседования определяется в баллах по следующему принципу: обучающемуся выдается 4 вопроса из Списка вопросов к зачету (по одному вопросу из темы). За каждый правильно раскрытый вопрос дается 1 балл, неправильное раскрытие материала - 0 баллов. Общее число баллов за каждый вопрос суммируется. Для получения зачета по результатам собеседования необходимо набрать не менее 3 баллов.

Список вопросов к зачету:

Взаимодействие ионов с ядрами. Взаимодействие с электронами. Пролет иона. Эффект каналирования. Влияние энергии ионов на эффекты взаимодействия. Роль кристаллографической ориентации в процессах ионного распыления. Пороговая энергия распыления. Коэффициент распыления. Влияние угла наклона ионов. Основные модели распыления.

Физические модели для описания распыления многокомпонентных мишеней. Условия распыления отдельных атомов и целых молекул в бинарных материалах. Анализ скоростей распыления на примере бинарных кристаллов халькогенидов свинца. Распыление твердых растворов. Аппаратура для проведения плазменной обработки. Типы реакторов. Управление основными параметрами процесса. Параметры плазмы. Модификация поверхности при ионной бомбардировке. Формирование микро- и наноструктур на поверхности, в приповерхностных слоях и в объеме. Роль дефектов. Особенности распыления эпитаксиальных пленок. Размерные эффекты при распылении. Моделирование процессов взаимодействия ионов с твердыми телами.

Методы исследования химического состава поверхности твердых тел после ионного распыления. Методы анализа химического состава. Вторичная ионная масс-спектрометрия. Оже-электронная спектроскопия. EDX-метод. Микроскопические методы исследования поверхности. Растровая и просвечивающая электронная микроскопия. Режимы наблюдения и технические возможности визуализации объектов. Сканирующая туннельная микроскопия. Методика атомно-силовой микроскопии для описания нанобъектов на поверхности. Масштабы по горизонтали и вертикали. Экспериментальные приемы исследований.

Влияние электрически активных дефектов кристалла на изменение электропроводности. Радиационные дефекты и их вклад в электропроводность. Пострадиационный отжиг. Влияние морфологии поверхности после ионной обработки на оптические характеристики.

