

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

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета

(подпись) И.С. Огнев

23 мая 2023 года

Рабочая программа дисциплины

Методы измерения и анализа электрических свойств полупроводниковых пленок
программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников

Форма обучения очная

Программа одобрена на заседании
Базовой кафедры нанотехнологий в электронике
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН
от «30» марта 2023 года, протокол № 8

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Методы измерения и анализа электрических свойств полупроводниковых пленок» в соответствии с общими целями основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура) (далее - образовательная программа послевузовского профессионального образования) являются:

- усвоение аспирантами знаний о физических явлениях, имеющих место в полупроводниковых пленках, об использовании пленочных систем в твердотельных устройствах нового поколения;
- изучение модельных представлений и основных теоретических принципов изменения свойств полупроводниковых пленок при вариации толщины и структурных параметров;
- формирование у аспирантов навыков экспериментального изучения явлений переноса в пленочных системах.

2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

«Методы измерения и анализа электрических свойств полупроводниковых пленок» является дисциплиной по выбору. Данная дисциплина рассматривает основные физические процессы, происходящие в полупроводниковых пленках. Данная дисциплина рассматривает основные физические процессы, происходящие в полупроводниковых пленках. Данная дисциплина имеет логические и содержательно-методические взаимосвязи с другими частями ООП, а именно с обязательной дисциплиной «Специальность», курсами по выбору (Формирование, структура и свойства полупроводниковых пленок; Формирование и свойства наноструктурированных полупроводников) и педагогической практикой.

Для изучения данной дисциплины необходимы «входные» знания, умения, полученные в процессе обучения по программам специалитета или бакалавриата – магистратуры.

3. Планируемые результаты освоения дисциплины: -

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- основные понятия и закономерности физической кинетики полупроводников;
- физические основы методов диагностики полупроводниковых тонкопленочных материалов и структур и границы их применимости.

Уметь:

- применять полученные знания для анализа параметров полупроводниковых структур и приборов на их основе;
- оперировать физическими и технологическими терминами и величинами;
- формулировать задачи по исследованию переноса носителей заряда в однородных и барьерных системах различной природы;
- использовать физические законы и закономерности для моделирования физических параметров тонкопленочных полупроводниковых структур.

Владеть:

- методами экспериментального исследования полупроводниковых материалов и структур;

- современными компьютерными технологиями для анализа и обработки экспериментальных данных;
- практическими приемами при самостоятельной работе с полупроводниковыми материалами и структурами
- методами расчета и оптимизации современных полупроводниковых приборов и структур.

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет _3 зачетных 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	Предмет, цели и задачи курса	2	1				10	Реферат
2	Механизмы роста	2	1	1			10	Реферат
3	Кинетические явления в полупроводниковых пленках	2	1	1			10	Реферат
4	Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых пленках	2	1	1		1	14	Контрольная работа №1
5	Классические методы определения концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниковых пленках	2	1	1			12	Реферат
6	Неоднородности в пленках	2	1	1			14	Реферат
7	Зондовые методы диагностики электрических параметров полупроводниковых пленок	2	1			1	12	Контрольная работа №2

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий и их трудоемкость (в академических часах)					Формы текущего контроля успеваемости
8	Специальные методы диагностики электрических параметров полупроводниковых пленок	2	1	1			10	Реферат
								Зачет
	Всего за 2 семестр 108 час		8	6		2	92	

Содержание разделов дисциплины:

1. Предмет, цели и задачи курса

Основная терминология. Роль пленочного материаловедения в современном технологическом процессе. Общая характеристика методов формирования пленок. Особенности эпитаксиального роста полупроводниковых пленок. Критическое соотношение параметров пленки и подложки.

2. Механизмы роста полупроводниковых пленок

Процессы эпитаксиального роста полупроводниковых пленок. Механизм Фольмера-Вебера. Механизм Франка и Ван-дер-Мерве. Механизм Крастанова-Странского. Методы определения кристаллического совершенства полупроводниковых пленок.

3. Кинетические явления в полупроводниковых пленках

Особенности размерных явлений в 2-D системе. Модель Фукса-Зонгмейера проводимости тонких пленок. Зависимость удельного сопротивления полупроводниковых пленок от толщины. Примеры реализации. Зависимость подвижности носителей заряда от толщины.

4. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых пленках

Осцилляции кинетических эффектов в зависимости от толщины. Модель «электрон в ящике». Зависимость плотности состояний от толщины пленки. Примеры расчета ширины запрещенной зоны для полупроводниковых пленок в зависимости от толщины.

5. Классические методы определения концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниковых пленках

Особенности проведения холловских измерений на пленочных структурах. Требования к контактам. Методы определения омичности контактов.

6. Неоднородности в пленках

Влияние неоднородности по толщине на результаты измерений классическими методами. Двухслойная модель Петрица как способ описания простейших неоднородностей.

7. Зондовые методы диагностики электрических параметров полупроводниковых пленок

Достоинства и недостатки зондовых методов анализа. Четырехзондовый метод определения удельного сопротивления полупроводниковых пленок. Четырехзондовый метод магнитосопротивления.

8. Специальные методы диагностики электрических параметров полупроводниковых пленок

Трехзондовый метод. Пятизондовый метод. Исключение роли подложки при анализе данных электрических измерений. Методы определения профиля распределения удельного сопротивления по толщине пленки.

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 используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

Электронный учебный курс «Теоретическая физика» 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

1. Бочкарева Л. В. Физика полупроводников. Эффекты переноса в полупроводниковых пленках: учеб. пособие для вузов. / Л. В. Бочкарева, С. П. Зимин; Ярослав. гос. ун-т им. П. Г. Демидова - Ярославль: ЯрГУ, 1985. - 56 с.
2. Антоненко С.В. Технология тонких пленок. / С.В. Антоненко - Москва: МИФИ, 2008. - 104 с.

б) дополнительная литература

1. Зимин С.П. Измерение параметров пленочных структур. МУ, ЯрГУ, 2004.
2. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972.
3. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников. // Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. - М.: ГРФМЛ, Наука. – 1977. - 672 с
4. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов: учеб.пособие. / В. И.Гаман; М-во образования РФ - Томск: Изд-во НТЛ, 2000. - 425с.
5. Технология тонких пленок. Под ред. Майсела Л., Глэнга Р., М.: Сов. радио, 1977, Т.1, Т.2

в) ресурсы сети «Интернет» (при необходимости)

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

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(ы) :

Заведующий Базовой кафедрой нанотехнологий в электронике
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН
Профессор, доктор физико-математических наук

А.С. Рудый

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Избранные главы физики полупроводников – I»**

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

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

Список вопросов к зачету:

1. Роль пленочного материаловедения в современном технологическом процессе.
2. Общая характеристика методов формирования пленок.
3. Особенности эпитаксиального роста полупроводниковых пленок. Соотношение параметров пленки и подложки.
4. Процессы эпитаксиального роста полупроводниковых пленок. Механизмы роста.
5. Механизм Фольмера-Вебера.
6. Механизм Франка и Ван-дер-Мерве.
7. Механизм Крастанова-Странского.
8. Методы определения кристаллического совершенства полупроводниковых пленок.
9. Кинетические явления в полупроводниковых пленках. Особенности размерных явлений в 2-D системе.
10. Модель Фукса-Зонгмейера проводимости тонких пленок.
11. Зависимость удельного сопротивления полупроводниковых пленок от толщины. Примеры реализации.
12. Зависимость подвижности носителей заряда от толщины.
13. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых пленках. Осцилляции кинетических эффектов в зависимости от толщины.
14. Модель «электрон в ящике». Зависимость плотности состояний от толщины пленки.
15. Примеры расчета ширины запрещенной зоны для полупроводниковых пленок в зависимости от толщины.
16. Классические методы определения концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниковых пленках.
17. Особенности проведения холловских измерений на пленочных структурах.
18. Требования к контактам. Методы определения омичности контактов.
19. Влияние неоднородности по толщине на результаты измерений классическими методами. Двухслойная модель Петрица.
20. Специальные методы диагностики электрических параметров полупроводниковых пленок. Достоинства и недостатки зондовых методов анализа.
21. Четырехзондовый метод определения удельного сопротивления полупроводниковых пленок.
22. Четырехзондовый метод магнитосопротивления.
23. Трехзондовый метод. Пятизондовый метод.
24. Методы определения профиля распределения удельного сопротивления по толщине пленки.

**1.2 Контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущей аттестации**

Темы рефератов

1. Требования к подложкам для оптимального эпитаксиального роста.
2. Механизм Фольмера-Вебера.
3. Механизм Франка и Ван-дер-Мерве.
4. Механизм Крастанова-Странского
5. Классические размерные эффекты в полупроводниковых пленках.
6. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых пленках
7. Достоинства и недостатки двухслойной модели Петрица.
8. Приемы учета электрических свойств подложки при анализе измерений пленочных систем.

Контрольная работа:

1. Охарактеризуйте основные физические закономерности, сопровождающие изменение параметров полупроводниковых пленок при изменении толщины.
2. Дайте характеристику базовым методам измерения электрических параметров полупроводниковых пленок.

2.1 Описание процедуры выставления оценки

По итогам аттестационных мероприятий выставляется зачет/незачет.

Для успешного освоения дисциплины очень важна самостоятельная работа аспирантов над конспектами прослушанных лекций и разделами курса для самостоятельного изучения. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, из учебной литературы при самостоятельной проработке разделов курса.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы и проведения расчетов, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде рефератов и контрольных работ. Также проводятся консультации (при необходимости) по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

Зачет принимается в виде устного опроса с обсуждением 1 вопроса из списка вопросов к зачету, а также углубленное обсуждение 1 из подготовленных рефератов экзаменуемого. На самостоятельную подготовку к зачету выделяется не менее 3 дней, во время подготовки к зачету предусмотрена групповая консультация.