

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
и образовательным инновациям
_____ О.Н. Зубок
«31» мая 2021

Регистрационный № УД- 9809/уч.

ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУР В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности**

1-31 04 08 Компьютерная физика

Минск, 2021

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 08 - 2018, учебного плана №G31-220/уч. от 13.07.2018, №G31и-231/уч от 20.03.2019

СОСТАВИТЕЛЬ:

В. А. Пилипенко — профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, заместитель директора по научному развитию Государственного центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ», доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси

РЕЦЕНЗЕНТ:

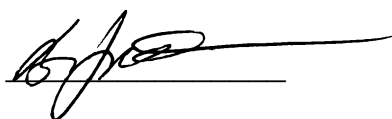
Ф. Ф. КОМАРОВ — заведующий лабораторией элионики Научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко», член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 9 от 06 апреля 2021 г.)

Научно-методическим Советом БГУ (протокол № 5 от 24 мая 2021 г.)

Заведующий кафедрой



Оджаев В.Б.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины «Измерение параметров структур в электронной промышленности» разработана для учреждений высшего образования Республики Беларусь в соответствии с требованиями образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 08 – 2018, утвержденным Постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 22.12.2018 г. № 124 по специальности: 1-31 04 08 Компьютерная физика для студентов, обучающихся по специализации 1-31 04 08-02 Физическая информатика.

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины «Измерение параметров структур в электронной промышленности» — ознакомление студентов с основами методов измерения основных параметров полупроводниковых структур при создании интегральных микросхем (ИМС).

Задачи учебной дисциплины:

- дать обзор основных методов измерения и контроля параметров материалов и структур, используемых в электронике, и методические руководства по выбору и практической реализации различных методов измерений.
- показать причины возникновения различных составляющих погрешности при измерении параметров полупроводниковых структур, и установить взаимосвязь погрешности с объектом измерения.
- дать необходимые оценки результатов, получаемых при использовании оптических и электрофизических методов контроля полупроводниковых структур, методов анализа атомной структуры, химического состава и электронных свойств различных материалов, применяемых в производстве изделий электронной техники
- показать перспективы создания новых видов материалов полупроводниковой электроники с использованием технологии наноструктурирования и контроля их параметров.

Содержание учебной дисциплины «Измерение параметров структур в электронной промышленности» охватывает круг вопросов, которые будут рассмотрены в процессе чтения лекций и на занятиях, предусматривающих управляемую самостоятельную работу. Курс призван представить современную аппаратуру для контроля параметров структур электронной техники, показать конструктивные особенности и принципы проведения различных видов измерений и способы подготовки образцов для измерений. В курсе рассматриваются основные факторы, влияющие на качество изготавливаемых ИМС. Приводится классификация современных методов контроля, используемых в микроэлектронике. Отражены этапы в развитии измерительной техники, используемой в электронике, характеризующиеся

целенаправленными усилиями по изучению свойств широкого спектра новых материалов и структур, получивших общее наименование наноматериалы.

Управляемая самостоятельная работа проводится за счет части аудиторных часов по дисциплине, целью которой является создание условий для реализации творческих способностей студентов. Эти занятия позволят студентам приобретать навыки самостоятельного анализа средств диагностики традиционных полупроводниковых структур и совершенно новых возможностей в использовании наноматериалов и методов измерения их параметров.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина «Измерение параметров структур в электронной промышленности» дает представление о современных и традиционных средствах измерения параметров полупроводниковых структур и материалов, используемых в микроэлектронике и наноэлектронике, их электрофизических, оптических и магнитных свойствах, о возможных механизмах управления этими свойствами.

Учебная дисциплина «Измерение параметров структур в электронной промышленности» относится к **циклу** дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования, **основана** на знаниях и представлениях, заложенных в общих курсах атомной физики, оптики, теоретической механики, и является базовой для дисциплин: «Основы радиоэлектроники», «Введение в твердотельную электронику».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Измерение параметров структур в электронной промышленности» должно обеспечить формирование следующих базовых профессиональных и специализированных компетенций:

Требования к **базовым профессиональным** компетенциям специалиста

Специалист должен:

БПК-6. Владеть методами теории вероятностей и математической статистики для обработки экспериментальных данных и результатов мониторинга технологических процессов; демонстрировать способность применять аппарат математической физики для моделирования и решения стандартных задач в области прикладной физики.

БПК-8. Владеть основными понятиями и базовыми законами электромагнетизма, навыками расчетов и практической работы с электрическими цепями и устройствами.

БПК-11. Владеть базовыми представлениями об электромагнитных свойствах материалов, методами решения задач электродинамики и теоретического описания полей систем зарядов и токов.

БПК-12. Быть способным интерпретировать проявления корпускулярно-волнового дуализма в атомных явлениях, уметь связывать структуру

атомных и молекулярных систем с их физическими и химическими свойствами.

Требования к *специализированным* компетенциям специалиста

Специалист должен:

СК-1. Быть способным выбрать необходимый метод компьютерного моделирования для решения физической задачи в предметной области, уметь реализовывать на современных языках программирования численные алгоритмы решения нелинейных, дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных и систем уравнений.

СК-4. Быть способным демонстрировать систематизированные знания и умения в области радиоэлектроники аналоговых устройств; владеть знаниями о физических принципах работы элементов твердотельной электроники; владеть базовыми знаниями принципов работы оптических квантовых генераторов; уметь проводить основные измерения параметров полупроводниковых приборов, электронных схем и оптических квантовых генераторов с помощью стандартных измерительных приборов.

СК-6. Владеть навыками работы с компьютером, как средством сбора измерительной информации, управления физическим экспериментом или технологическим процессом; быть способным обрабатывать экспериментальные данные и данные мониторинга технологических процессов современными методами.

СК-8. Быть способным разрабатывать физико-математическую модель исследуемого явления, уметь моделировать на компьютере физические процессы различной природы.

СК-13. Владеть классическими и полуклассическими моделями конденсированного состояния вещества; уметь рассчитывать их электрофизические и оптические параметры, исходя из значения внутренних параметров вещества.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать:

- основы физики твердого тела;
- явления переноса заряда в материалах с различным удельным сопротивлением;
- методы измерения и контроля параметров полупроводниковых структур, используемых в электронике;
- конструктивные особенности измерительного оборудования;
- принципы проведения различных видов измерений;

уметь:

- проводить различные виды измерений;
- правильно выбирать режимы измерений полупроводниковых структур;
- правильно подготовить приборные структуры для измерений;

владеть:

- базовыми принципами расчета электрофизических параметров полупроводниковых структур и материалов;
- методами оценки и расчета погрешностей, вносимых при измерениях;
- теоретическими основами переноса заряда в полупроводниковых структурах.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 5 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Измерение параметров структур в электронной промышленности» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 108 часов, в том числе 54 аудиторных часа, из них: лекции – 48 часов, аудиторный контроль управляемой самостоятельной работы – 6 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.
Форма текущей аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Измерение толщины эпитаксиальных слоев и геометрических параметров полупроводниковых структур. Спектрометрические методы контроля

Тема 1.1. Анализ и классификация методов измерения основных параметров полупроводниковых структур. Влияние качества материалов, используемых в микроэлектронике, на параметры создаваемых полупроводниковых приборов и ИМС.

Тема 1.2. Эллипсометрические измерения и аппаратура для их проведения. Принципы эллипсометрических измерений. Эллипсометрия диэлектрических покрытий. Эллипсометрия в видимой области спектра.

Тема 1.3. Спектрофотометры для инфракрасной области спектра. Применение методов спектрофотометрии МНПВО. Интерференционный метод измерения толщин эпитаксиальных слоев.

Раздел 2. Измерение концентрации и подвижности носителей заряда. Электрофизические методы контроля

Тема 2.1. Эффект Холла и его физическая сущность. Физические явления, сопутствующие эффекту Холла. Геометрия образцов и расположение контактов. Факторы, влияющие на систематическую погрешность измерений.

Тема 2.2. Измерение подвижности носителей заряда по геометрическому магнитосопротивлению полупроводника (когда не возможно применение других методов).

Тема 2.3. Зондовые методы контроля. Основы C-V-метода. C-V-характеристики идеализированной МОП-структуры.

Тема 2.4. Измерение профиля распределения концентрации свободных носителей по толщине монокристаллов и полупроводниковых слоев вольт-фарадным методом. Измерение поверхностной концентрации примесей в диффузионных слоях.

Тема 2.5. Измерение неоднородностей удельного сопротивления методом сопротивления растекания точечного контакта. Измерение удельного сопротивления тонких эпитаксиальных слоев. Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления структур.

Тема 2.6. Методы измерения поверхностного заряда МДП-структур. Неоднородность распределения поверхностного заряда в МДП-структурах. Определение генерационно-рекомбинационных характеристик МДП-структур.

Раздел 3. Электронная микроскопия

Тема 3.1. Применение электронной микроскопии для изучения структурного совершенства полупроводника. Техника приготовления образцов для электронной микроскопии.

Тема 3.2. Принцип работы электронного микроскопа. Дифракция электронов. Микродифракция.

Тема 3.3. Фигуры (линии) Кикучи. Темнопольная микроскопия. Изготовление реплик поверхности. Утонение образца.

Тема 3.4. Применение высоковольтной микроскопии для изучения структуры фрагмента интегральной схемы с р-п- переходами и диэлектрическими слоями. Применение рентгеновских топографических методов для изучения дефектов в полупроводниках.

Раздел 4. Растровая электронная микроскопия

Тема 4.1. Растровая электронная микроскопия. Метод сканирования и качество изображения. Принцип работы растрового электронного микроскопа.

Тема 4.2. Механизмы формирования контраста. Механизм формирования контраста во вторичных и отраженных электронах, обусловленного морфологией поверхности структуры.

Тема 4.3. Растровая электронная микроскопия в микроэлектронике. Метод химического и ионного выявления микроструктуры полупроводникового материала.

Тема 4.4. Растровая электронная микроскопия с использованием режима наведенного тока для изучения электрической активности дефектов в полупроводниковой электронике.

Раздел 5. Контроль состава, содержания примесей и загрязнений в полупроводниковых материалах и структурах

Тема 5.1. Вторичная ионная масс-спектрометрия. Электронная спектрометрия для химического анализа.

Тема 5.2. Электронная Оже-спектрометрия. Электронно-зондовый рентгеновский микроанализ.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Иное	Формы контроля Знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Количество часов УСП		
1	2	3	4	5	6	7		9
1	Измерение толщины эпитаксиальных слоев и геометрических параметров полупроводниковых структур. Спектрометрические методы контроля	8						
1.1.	Анализ и классификация методов контроля создания ИМС. Влияние качества материалов, используемых в микроэлектронике, на параметры создаваемых полупроводниковых приборов и ИМС.	2						
1.2	Эллипсометрические измерения и аппаратура для их проведения. Принципы эллипсометрических измерений. Эллипсометрия диэлектрических покрытий. Эллипсометрия в видимой области спектра.	2						
1.3	Спектрофотометры для инфракрасной области спектра. Применение методов спектрофотометрии МНПВО. Интерференционный метод измерения толщин эпитаксиальных слоев.	4						
2	Измерение концентрации и подвижности носителей заряда. Электрофизические методы контроля	12				2		
2.1	Эффект Холла и его физическая сущность. Физические явления, сопутствующие эффекту Холла. Геометрия образцов	2						

	и расположение контактов. Факторы, влияющие на систематическую погрешность измерений.							
2.2	Измерение подвижности носителей заряда по геометрическому магнитосопротивлению полупроводника (когда не возможно применение других методов).	2						
2.3	Зондовые методы контроля. Основы C-V-метода. C-V-характеристики идеализированной МОП-структуры.	2						
2.4	Измерение профиля распределения концентрации свободных носителей по толщине монокристаллов и полупроводниковых слоев вольт-фарадным методом. Измерение поверхностной концентрации примесей в диффузионных слоях	2						
2.5	Измерение неоднородностей удельного сопротивления методом сопротивления растекания точечного контакта. Измерение удельного сопротивления тонких эпитаксиальных слоев. Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления структур.	2				2		Письменная контрольная работа
2.6	Методы измерения поверхностного заряда МДП-структур. Неоднородность распределения поверхностного заряда в МДП-структурах. Определение генерационно-рекомбинационных характеристик МДП-структур.	2						
3	Электронная микроскопия	8				2		
3.1	Применение электронной микроскопии для изучения структурного совершенства полупроводника. Техника приготовления образцов для электронной микроскопии.	2						
3.2	Принцип работы электронного микроскопа. Дифракция электронов. Микродифракция	2						
3.3	Фигуры (линии) Кикучи. Темнопольная микроскопия. Изготовление реплик поверхности. Утонение образца.	2						
3.4	Применение высоковольтной микроскопии для изучения структуры фрагмента интегральной схемы с р-п- переходами и диэлектрическими слоями. Применение рентгеновских	2				2		Защита рефератов

	топографических методов для изучения дефектов в полупроводниках.							
4	Растровая электронная микроскопия	12				2		
4.1	Растровая электронная микроскопия. Метод сканирования и качество изображения. Принцип работы растрового электронного микроскопа.	2						
4.2	Механизмы формирования контраста. Механизм формирования контраста во вторичных и отраженных электронах, обусловленного морфологией поверхности структуры	4						
4.3.	Растровая электронная микроскопия в микроэлектронике. Метод химического и ионного выявления микроструктуры полупроводникового материала	4						
4.4	Растровая электронная микроскопия с использованием режима наведенного тока для изучения электрической активности дефектов в полупроводниковой электронике.	2				2		Устный контрольный опрос
5	Контроль состава, содержания примесей и загрязнений в полупроводниковых материалах и структурах	8						
5.1	Вторичная ионная масс-спектрометрия. Электронная спектрометрия для химического анализа.	4						
5.2	Электронная Оже-спектрометрия. Электронно-зондовый рентгеновский микроанализ.	4						
	Итого	48				6		
	Текущая аттестация							экзамен

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Батавин В. В. и др. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. В. В. Батавин, Ю. А. Концевой, Ю. В. Федорович. Москва: Радио и связь, 1985.
2. Зеегер К. Физика полупроводников. М., 1977.
3. Крегер Ф. Химия несовершенных кристаллов. М., 1969.
4. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М., 1983.
5. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем.-СПб.: Наука, 2001.-160 с.
6. Пул Ч., Оуенс Ф. Нанотехнологии.- М.: Техносфера, 2004.-328 с.
7. Нанотехнология в полупроводниковой электронике /Отв. ред. А.Л. Асеев.- Новосибирск: Изд. СО РАН, 2004.-368 с.
8. Оджаев, В.Б. Современные методы исследования конденсированных состояний / В.Б. Оджаев, И.А. Карпович, Д.В. Свиридов, В.В. Понарядов. – Минск : БГУ, 2003. – 84 с.
9. Технология СБИС: в 2 т./ под ред. С. Зи. - М.: Мир, 1986. – Т.1. – 404 с.; Т.2. – 454 с.
10. Нанотехнологии в электронике/ Под. ред Ю.А.Чаплыгина. -М.: Техносфера, 2005. – 348 с.
11. Щука А.А. Наноэлектроника. –М.: Физматкнига, 2007, – 464 с.
12. Пилипенко, В. А. Инновационные технологии и оборудование микроэлектронного производства / В.А. Пилипенко, А.П. Достанко, С.М. Аваков, В.И. Плебанович, С.Н. Мельников, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, Е.В. Телеш, В.А. Солодуха, И.Б. Петухов, И.Б. Ковальчук, С.Б. Школык, В.Л. Ланин, А.И. Лаппо, А.Н. Петлицкий— Минск: Беларуская навука, 2020. –368 с.
13. Основы эллипсометрии / под ред. чл.-корр. АН СССР А.В.Ржанова. — Новосибирск, изд. «Наука», 1979.
14. Pliskin, W.A. Structural evaluation of silicon oxide films / W.A.Pliskin, H.S.Lehman. // J.Electrochem. Soc. — V.112, '10. — 1965. — P.1013.
15. Электронная микроскопия / под редакцией А.А.Лебедева. — М., ГИИТ, 1954.
16. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / под редакцией Ф.Морис, Л.Мени, Р.Тиксье. — М., 1985.
17. Современные физические методы в геохимии / под редакцией В.Ф.Барабанова. — Л., ЛГУ, 1990.
18. [Hitachi преодолевает предел разрешения РЭМ](http://www.labtechnologist.com/10.03.2005), www.labtechnologist.com, 10.03.2005
19. Scanning electron microscopy and X-Ray microanalysis / J. I. Goldstein [et. al.]. – New York : Springer, 2018. – 554 p. – <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>.

Перечень дополнительной литературы

1. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. М., 1971.
2. Вендик, О.Г. Корпускулярно-фотонная технология / О.Г.Вендик, Ю.Н.Горин, В.Ф.Попов. — М.: Высшая школа, 1984.
3. Агаханян, Т.М. Интегральные микросхемы / Т.М.Агаханян. — М.: Энерго-атом издат., 1983.
4. Березин, А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С.Березин, О.Р.Мочалкина.— М.: Радио и связь, 1983.
5. Тилл, У. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление / У.Тилл, Дж.Лаксон. — М.:Мир, 1985.
6. Броудай, И. Физические основы микротехнологии / И. Броудай, Дж. Мерей. — М.:Мир, 1985.
7. Зи, С. Физика Полупроводников / С.Зи. — Т.1. — М.:Мир, 1984.
8. Мейер, Дж. Ионное легирование полупроводников / Дж.Мейер, Л.Эриксон, Дж.Дэвис. — М.:Мир, 1973.
9. Анищик, В.М. Физические основы быстрой термообработки. Температурные поля и конструктивные особенности оборудования / В.М. Анищик, В.А. Горушко, В.А. Пилипенко и др. —Минск, БГУ, 2000.
10. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры //ФТП, т.32, №4, с.385 (1998).
11. Tondare, V. N. Three-Dimensional (3D) Nanometrology Based on Scanning Electron Microscope (SEM) Stereophotogrammetry / V. N. Tondare, J. S. Villa-rubia, A. E. Vladár // Microscopy and Microanalysis. – 2017. – Vol. 23(5). – P. 967–977. – <http://dx.doi.org/10.1017/s1431927617012521>.
12. В.К. Неволин. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. М.: МИЭТ, 1996 –90 с. (Переработанное и дополненное пособие размещено на сайте: www.nanotube.ru).

Перечень средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине «Измерение параметров структур в электронной промышленности» рекомендуется использовать письменные контрольные работы по разделам дисциплины, устные контрольные опросы, защиту реферативных работ.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Измерение параметров структур в электронной промышленности» учебным планом предусмотрен экзамен.

Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Оценка каждой из контрольных работ должна быть не ниже 4 баллов (по 10-ти бальной шкале), оценка ниже 4 баллов считается неудовлетворительной. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно. Темы рефератов предлагаются максимально приближенными к теме курсовой работы. Реферат оформляется подобно обзору литературных данных в курсовой работе и должен включать не менее 10 страниц (включая титульный лист, оглавление, иллюстрации и список литературы). Защита реферативных работ проводится индивидуально, в устной форме. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

Текущий контроль по дисциплине «Измерение параметров структур в электронной промышленности» проводится только после выполнения студентом всех контрольных мероприятий, предусмотренных учебной программой и защиты реферата. Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости — 0,4; для экзаменационной оценки — 0,6.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

(Темы заданий к контрольным работам, перечень вопросов для устного опроса и темы рефератов обновляются и размещаются на сайте образовательного портала БГУ <https://eduphys.bsu.by/course/view.php?id=755>)

Тема 2.5. Измерение неоднородностей удельного сопротивления методом сопротивления растекания точечного контакта. Измерение удельного сопротивления тонких эпитаксиальных слоев. (2 часа)

Форма контроля – письменная контрольная работа.

Примерные задания к контрольной работе по теме 2.5:

Выполнить в письменном виде следующие задания:

1. Описать явление растекания тока в точке контакта металлического острия зонда с полупроводником и указать, где это явление необходимо учитывать.
2. Объяснить, что является причиной неоднородности удельного сопротивления пластин полупроводника.
3. Перечислить, что необходимо учитывать при измерении удельного электрического сопротивления тонких полупроводниковых слоев, толщина которых соизмерима с длиной экранирования электростатического поля?
4. Объяснить, почему контактное сопротивление перехода металл-полупроводник при измерении поверхностного удельного сопротивления полупроводникового образца четырехзондовым методом не влияет на результат измерения.
5. Перечислить условия применения четырехзондового метода измерения удельного электрического сопротивления полупроводниковых монокристаллических слитков (толщина проводящего слоя много больше расстояния между зондами)

Тема 3.4. Применение высоковольтной микроскопии для изучения структуры фрагмента интегральной схемы с р-п- переходами и диэлектрическими слоями. Применение рентгеновских топографических методов для изучения дефектов в полупроводниках. (2 часа)

Форма контроля – защита рефератов.

Примерная тематика реферативных работ по теме 3.4.

1. Виды излучения, которые могут возникать при взаимодействии электронного пучка с веществом в электронном микроскопе.
2. Методы определения пространственного разрешения сканирующего электронного микроскопа.
3. Основные факторы, влияющие на пространственное разрешение сканирующего электронного микроскопа.
4. Механизм возникновения характеристического рентгеновского излучения в СЭМ.
5. Определение элементного состава полупроводникового образца по положению максимума характеристических линий излучения.
6. Определение количественного элементного состава исследуемого образца методом рентгеновского микроанализа в сканирующем электронном микроскопе.
7. Получение электронно-микроскопического изображения поверхности диэлектрического образца и определение его элементного состава методом микроанализа в сканирующем электронном микроскопе.

Тема 4.4. Растровая электронная микроскопия с использованием режима наведенного тока для изучения электрической активности дефектов в полупроводниковой электронике. (2 часа)

Форма контроля – устный контрольный опрос

Примерный перечень вопросов по теме 4.4 к устному опросу

1. Принцип действия растрового электронного микроскопа (РЭМ)
2. От чего зависит диаметр зонда в РЭМ?
3. В чем проявляется влияние контраста на разрешающую способность микроскопа?
4. Перечислить основные факторы, влияющие на разрешающую способность микроскопа.
5. Причина возникновения отраженных, вторичных и поглощенных электронов при работе РЭМ
6. Изобразить схему РЭМ и пояснить основное назначение его узлов и их функционирование
7. Основные требования к полупроводниковым образцам при исследовании их с помощью РЭМ.
8. Что позволяет наблюдать объемное изображение структуры с возможностью ее количественной оценки?
9. Основные технические возможности РЭМ в исследовании полупроводниковых структур.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используются *проблемно-аналитический метод и приемы развития критического мышления*, которые представляют собой систему, формирующую навыки работы с информацией в процессе изучения и представления материала, включающую понимание поставленной проблемы, анализ особенностей рассматриваемого явления, построение физической модели, получение выражений для количественного описания и рассмотрение путей практического применения.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

– изучение электронных материалов по дисциплине, представленных в разделе info сайта физического факультета (www.physics.bsu.by/info);

– использование информационного ресурса vk.com/kafedrafizikipr и <https://eduphys.bsu.by/course/view.php?id=755> : где осуществляется размещение учебно-методических материалов, включая, вопросы для подготовки к зачету, темы письменных контрольных работ по разделам дисциплины, темы

устных контрольных опросов, темы реферативных работ и список рекомендуемой литературы;

– поиск и ознакомление с литературой и электронными источниками по изучаемой проблеме курса.

Примерная тематика реферативных работ по курсу лекций

1. Высокочастотные бесконтактные методы измерения удельного сопротивления полупроводников и низкоразмерных структур.
2. Измерение распределения концентрации и подвижности носителей заряда в диффузионных, эпитаксиальных и ионно-легированных слоях.
3. Методы измерения дрейфовой подвижности неосновных носителей заряда.
4. Метод двойного лучепреломления для контроля напряжений в кремниевых пластинах. Оптическая схема установки двойного лучепреломления.
5. Контроль стрелы изгиба полупроводниковых пластин. Контроль профиля изгиба полупроводниковых пластин. Установка контроля изгиба.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Объясните формы вольт-амперных характеристик контакта металл-полупроводник (М-П), соответствующих р-и n-типу проводимости?
2. Какие показатели эффекта Холла говорят о типе проводимости?
3. Каковы преимущества и недостатки четырёхзондового метода измерения удельного электрического сопротивления?
4. Каким образом учитывать контактные сопротивления М-П при измерении удельного электрического сопротивления?
5. Как проводятся и что дают бесконтактные измерения электропроводности?
6. Какими способами устранить влияние ловушек захвата при измерении времени жизни ННЗ?
7. Как определить диффузионную длину ННЗ в полупроводнике?
8. Как узнать скорость поверхностной рекомбинации и время жизни ННЗ в объёме полупроводника?
9. Чем определяется требование к источнику фотовозбуждения?
10. Как определяется концентрация носителей заряда по спектрам поглощения и отражения.
11. Как осуществляется измерение профиля распределения концентрации свободных носителей по толщине монокристаллов и полупроводниковых слоев вольтфарадным методом.
12. Как измерить поверхностную концентрацию примесей в диффузионных слоях?
13. Измерение удельного сопротивления методом Ван дер Пау.
14. Измерение неоднородностей удельного сопротивления методом сопротивления растекания точечного контакта.

15. Измерение удельного сопротивления тонких эпитаксиальных слоев.
16. Исходные уравнения и физические основы методов контроля параметров неосновных носителей заряда.
17. Стационарные методы измерения диффузионной длины, времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда.
18. Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда нестационарными методами.
19. Анализ и классификация методов контроля создания ИМС.
20. Влияние качества материалов, используемых в микроэлектронике, на параметры создаваемых полупроводниковых приборов и ИМС.
21. Принципы эллипсометрических измерений. Эллипсометрия диэлектрических покрытий.
22. Спектрофотометры для инфракрасной области спектра.
23. Применение методов спектрофотометрии МНПВО.
24. Интерференционный метод измерения толщин эпитаксиальных слоев.
25. Метод вольтфарадных характеристик. С-V-характеристики идеализированной МОП-структуры.
26. Применение электронной микроскопии для изучения структурного совершенства полупроводников.
27. Применение рентгеновских топографических методов для изучения дефектов в полупроводниках.
28. Растровая электронная микроскопия. Метод сканирования и качество изображения.
29. Принцип работы растрового электронного микроскопа.
30. Метод химического и ионного выявления микроструктуры полупроводникового материала.
31. Контроль состава, содержания примесей и загрязнений в полупроводниковых материалах и структурах.
32. Вторичная ионная масс-спектрометрия. Электронная спектроскопия для химического анализа.
33. Электронная спектроскопия.
34. Электронно-зондовый рентгеновский микроанализ.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Основы радиоэлектроники	Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники	Нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 9 от 06.04.2021)
Введение в твердотельную электронику.	Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники	Нет	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения (протокол № 9 от 06.04.2021 г.)

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО
 на ____/____ учебный год

№ № ПП	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
 (протокол № ____ от _____ 20__ г.)

Заведующий кафедрой
 физики полупроводников и наноэлектроники
 д.ф.-м.н., профессор _____ В.Б. Оджаев

УТВЕРЖДАЮ
 Декан физического факультета
 к.ф.-м.н., доцент _____ М.С. Тиванов