

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**
на 2024/2025 учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание
1	Внести изменения и дополнения в раздел «Содержание учебного материала» (внести пункт 7) согласно Приложению № 1	На основании решения кафедры. Протокол №12 от 14.06.2024г.
2	Внести изменения и дополнения в раздел «Учебно-методическая карта учебной дисциплины» (внести лабораторные работы с 20 по 25) согласно Приложению № 2	
3	Внести изменения и дополнения в раздел «Информационно-методическая часть. Перечень основной и дополнительной литературы. Основная» (внести литературу с 13 по 15) согласно Приложению № 3	
4	Внести изменения и дополнения в раздел «Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний. Рекомендуемые разделы для устного опроса» (внести пункты с 19 по 22) согласно Приложению №4	

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры физики полупроводников и наноэлектроники (протокол № 12 от 14.06.2024 г.)

Заведующий кафедрой
д-р физ.- мат. наук, профессор



В.Б.Оджаев

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
канд. физ.- мат. наук, доцент



М.С.Тиванов

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса

Основные термины и определения. Орбитальный магнитный момент атома и спин электрона. Эффект Зеемана. g-Фактор. Анизотропия g-фактора, тонкая структура спектров ЭПР. Сверхтонкая структура спектров ЭПР. Ширина и форма линий ЭПР, спин-спиновая и спин-решеточная релаксации. История развития ЭПР-спектроскопии. Техника ЭПР-спектроскопии. Определение концентрации парамагнитных центров. Изучение угловой зависимости спектров ЭПР ионов Cr³⁺ в Al₂O₃. Парамагнетизм алмаза и алмазоподобных материалов. Исследование методом ЭПР фуллеренов и фуллереноподобных материалов. ЭПР углеродсодержащих композитов.

2. Импедансная спектроскопия

Векторные диаграммы токов и напряжений. Представление импеданса и адmittанса в виде комплексных чисел. Комплексная емкость и диэлектрическая проницаемость. Определение понятия эквивалентная схема замещения. Простейшие RC-цепи и годографы комплексных величин. Методика измерения материалов на переменном токе. Техника импедансной спектроскопии. Электропроводность композитов в окрестности порога протекания. Импеданс композитов без учета особенностей межфазных слоев. Влияние неоднородности токопроводящего переколяционного кластера на импеданс композитов в окрестности порога протекания. Импедансная спектроскопия электропроводящих композиционных материалов. Эквивалентная схема замещения p + n-структур на кремнии. Частотные зависимости импеданса p + n-структур. Вольт-фарадные характеристики. Влияние радиационных дефектов на импеданс p + n-структур на кремнии. Особенности частотных зависимостей импеданса p + n-структур на кремнии, обусловленные радиационно-нарушенным слоем, сформированным облучением высокоэнергетическими ионами. Импедансная спектроскопия структур металл-диэлектрик-полупроводник, облученных электронами.

3. Нестационарная спектроскопия глубоких уровней

Первичные радиационные дефекты в полупроводниках. Основные радиационные дефекты в кремнии при облучении его гамма-квантами, электронами, легкими ионами. Особенности дефектной структуры в кремнии, облученном высокоэнергетическими ионами. Релаксация емкости барьерных структур после подачи постоянного напряжения смещения, обеспечивающего заполнение или опустошение ловушек носителей заряда: исходные теоретические соотношения и методика проведения измерений. Техника нестационарной спектроскопии глубоких уровней. Определение методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней радиационных дефектов, введенных в кремний облучением электронами, ионами гелия. Нестационарная спектроскопия глубоких уровней в p + n-структурах на кремнии, облученных высокоэнергетическими тяжелыми ионами.

4. Гальваномагнитные явления

Полупроводниковые кристаллы в однородном постоянном магнитном поле. Изменение энергетического спектра. Плотность разрешенных состояний и 7 энергии Ферми в магнитном поле. Представление о классических и квантующих магнитных полях. Кинетические явления в полупроводниках. Эффект Холла,

магниторезистивный эффект. Эффекты Эттинггаузена и Нернста. Кинетические явления в квантующих магнитных полях, при прыжковом и зонном механизмах переноса заряда. Техника и методика измерения магнитосопротивления. Техника и методика измерения ЭДС Холла и определения концентрации и подвижности носителей зарядов. Магнитосопротивление и ЭДС Холла полупроводниковых структур.

5. Оптическая спектроскопия полупроводниковых материалов и структур

Поглощение света в полупроводниках: закон Бугера–Ламберта, коэффициент поглощения. Фундаментальное поглощение в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Поглощение света носителями заряда и кристаллической решеткой. Поглощение света примесями. Фото- и электролюминесценция. Фотопроводимость. Квантовый выход фотоэффекта. Спектральное распределение фотопроводимости. Фотовольтаические эффекты: вентильный фотоэффект, фото-ЭДС на рп-переходе и барьере Шоттки. Экспериментальная база оптической спектроскопии полупроводников. Исследование спектра ЭДС фотодиодов, сформированных на различных полупроводниковых материалах. Фотопроводимость алмаза. Определение ширины запрещенной зоны по спектрам электролюминесценции светодиодов. Фотолюминесценция полупроводников. Спектр поглощения света полупроводниками.

6. Переходные процессы в полупроводниковых барьерных структурах

Линейная и квадратичная рекомбинации. Время жизни неравновесных носителей заряда. Мгновенное время жизни неравновесных носителей заряда. Типы и механизмы рекомбинации. Межзонные излучательная и ударная рекомбинации. Рекомбинация с участием локализованных состояний. Центры рекомбинации, сечение захвата. Ловушки захвата и ловушки рекомбинации. Демаркационные уровни. Модель Шокли–Рида–Холла. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от уровня легирования и температуры. Технологии создания диодов с быстрым восстановлением обратного сопротивления. Радиационные технологии управления параметрами биполярных полупроводниковых приборов. Методики определения времени жизни неравновесных носителей заряда. Определение времени восстановления обратного сопротивления и расчет времени жизни в кремниевых р + n-диодах, облученных электронами. Исследование локального распределения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых подложках.

7. Синтез графена и пиролитического углерода и исследование их свойств

Аллотропные модификации углерода. Углеродные наноструктуры и их свойства. Графен, его кристаллическая и зонная структура. Электрические и оптические свойства графена. Методы синтеза графена: микромеханическое расслоение графита, жидкостное расслоение графита, восстановление оксида графена, электродуговое осаждение, термическое расслоение карбида кремния, эпитаксиальный рост на металлических подложках. Особенности синтеза графена и пиролитического углерода методом химического осаждения из газовой фазы. Перенос графена на диэлектрические подложки. Исследование структуры графена и пиролитического углерода методом комбинационного рассеяния света. Влияние адсорбции паров воды на электрические свойства графена и пиролитического углерода.

Приложение № 2

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ*)

Номер раздела,	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное			
1	Вводное занятие: оборудование лаборатории специализации и техника безопасности при работе на нем				2			1-12	Устный опрос
1 Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса									
2	Изучение угловой зависимости спектров ЭПР ионов Cr ³⁺ в Al ₂ O ₃				16			1, 8, 9	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
3	Парамагнетизм алмаза и алмазоподобных материалов				8			1, 8, 9	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
4	Исследование методом ЭПР фуллеренов и фуллереноподобных материалов				8			1, 8, 9	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
5	ЭПР углеродсодержащих композитов				8			1, 8, 9	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
2 Импедансная спектроскопия									
6	Импедансная спектроскопия электропроводящих композиционных материалов				8			2	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
7	Влияние радиационных дефектов на импеданс p+n-структур на кремнии				16			2, 3, 7, 11	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос

8	Особенности частотных зависимостей импеданса p^+n -структур на кремнии, обусловленные радиационно-нарушенным слоем, сформированным облучением высокоэнергетическими ионами			16		2, 3, 7, 11	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
9	Импедансная спектроскопия структур металл-диэлектрик-полупроводник, облученных электронами			16		2, 3, 7, 11	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
3 Нестационарная спектроскопия глубоких уровней							
10	Определение методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней радиационных дефектов, введенных в кремний облучением электронами, ионами гелия			8		3, 4, 7, 11	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
11	Нестационарная спектроскопия глубоких уровней в p^+n -структуре на кремнии, облученных высокоэнергетическими тяжелыми ионами			8		3, 4, 7, 11	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
4 Гальваномагнитные явления							
12	Изучение гальваномагнитных явлений			8		1, 5, 6, 10, 11	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
5 Оптическая спектроскопия полупроводниковых материалов и структур							
13	Исследование спектра ЭДС фотодиодов, сформированных на различных полупроводниковых материалах			8		1, 6, 8, 10, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
14	Фотопроводимость алмаза			8		1, 6, 8, 10, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
15	Определение ширины запрещенной зоны по спектрам электролюминесценции светодиодов			16		1, 6, 8, 10, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
16	Фотолюминесценция полупроводников			16		1, 6, 8, 10, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос

17	Спектр поглощения света полупроводниками			16		1, 6, 8, 10, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
6 Переходные процессы в полупроводниковых барьерных структурах							
18	Определение времени восстановления обратного сопротивления и расчет времени жизни в кремниевых p + n-диодах, облученных электронами			8		24, 6, 7, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
19	Исследование локального распределения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых подложках			16		2–4, 6, 7, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
7. Синтез графена и пиролитического углерода и исследование их свойств							
20	CVD-синтез графена на никелевой подложке			6		13–15	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
21	CVD-синтез графена на медной подложке			6		13–15	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
22	CVD-синтез пленок пиролитического углерода			6		13–15	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
23	Перенос пленок графена на диэлектрические подложки			6		13–15	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
24	Анализ структуры пленок графена и пиролитического углерода методом комбинационного рассеяния света			6		13–15	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос
25	Измерение электрических свойств пленок графена и пиролитического углерода при различных значениях относительной влажности воздуха			6		13–15	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2.Устный опрос

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной и дополнительной литературы

Основная

1. Оджаев, В.Б. Современные методы исследования конденсированных материалов / В.Б. Оджаев, Д.В. Свиридов, И.А. Карпович, В.В. Понарядов.— Минск: БГУ, 2003.— 82 с.
2. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И. Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук.— Минск: БГУ, 2005.— 130 с.
3. Исследование переходных процессов в полупроводниковых структурах: пособие / Н.А. Поклонский [и др.].— Минск: БГУ, 2009. — 103 с.
4. Поклонский, Н.А. Физика электрического контакта металл/полупроводник: Учебное пособие по спецпрактикуму «Физика полупроводниковых приборов» / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, Н.М. Лапчук.— Минск: БГУ, 2003.— 51 с.
5. Лукашевич, М.Г. Изучение гальваномагнитных явлений / М.Г. Лукашевич, А.А. Мазаник, Д.А. Скрипка.— Минск: БГУ, 2004.— 39 с.
6. Павлов, Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов.— М.: Высшая школа, 1987.— 239 с.
7. Вавилов, В.С. Действие излучений на полупроводники / В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов.— М.: Наука, 1988.— 192 с.
8. Пентин, Ю.А. Физические методы исследования в химии / Ю.А. Пентин, Л.В. Вилков.— М.: Мир, 2006.— 684 с.
9. Рембеза, С.И. Парамагнитный резонанс в полупроводниках / С.И. Рембеза.— М.: Металлургия, 1988.— 176 с.
10. Ю, П. Основы физики полупроводников / П. Ю, М. Кардона.— М.: Физматлит, 2002.— 560 с.
11. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин.— СПб.: Изд-во «Лань», 2001.— 480 с.
12. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин.— СПб.: Лань, 2001.— 368 с.
13. Новоселов, К.С. Графен: материалы Флатландии / К.С. Новоселов // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181, №12. – С. 1299-1311.
14. Алексеенко, А.Г. Графен / А.Г. Алексеенко. – 3-е изд. – Москва: Лаборатория знаний, 2021. – 179 с.
15. Елецкий, А.В. Графен: методы получения и теплофизические свойства / А.В. Елецкий [и др.] // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181, №3 – С. 233-268.

**Примерный перечень мероприятий для
контроля качества усвоения знаний**

Рекомендуемые разделы для устного опроса

1. Изучение угловой зависимости спектров ЭПР ионов Cr_3^+ в Al_2O_3
2. Парамагнетизм алмаза и алмазоподобных материалов
3. Исследование методом ЭПР фуллеренов и фуллереноподобных материалов
4. ЭПР углеродсодержащих композитов
5. Импедансная спектроскопия электропроводящих композиционных материалов
6. Влияние радиационных дефектов на импеданс p^+n -структур на кремни
7. Особенности частотных зависимостей импеданса p^+n -структур на кремни, обусловленные радиационно-нарушенным слоем, сформированным облучением высокоэнергетическими ионами
8. Импедансная спектроскопия структур металл–диэлектрик– полупроводник, облученных электронами
9. Определение методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней радиационных дефектов, введенных в кремний облучением электронами, ионами гелия
10. Нестационарная спектроскопия глубоких уровней в p^+n -структуре на кремни, облученных высокоэнергетическими тяжелыми ионами
11. Изучение гальваномагнитных явлений
12. Исследование спектра ЭДС фотодиодов, сформированных на различных полупроводниковых материалах
13. Фотопроводимость алмаза
14. Определение ширины запрещенной зоны по спектрам электролюминесценции светодиодов
15. Фотолюминесценция полупроводников
16. Спектр поглощения света полупроводниками
17. Определение времени восстановления обратного сопротивления и расчет времени жизни в кремниевых p^+n -диодах, облученных электронами
18. Исследование локального распределения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых подложках
19. Основные методы синтеза графена.
20. Электрические свойства графена.
21. Влияние адсорбции паров воды на электропроводность графена.
22. Исследование структуры пленок графена и пиролитического углерода методом комбинационного рассеяния света.