

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям

О.И. Чуприс

(подпись)

03.06.2018
(дата утверждения)

Регистрационный № УД-5149 /уч.

**ЛАБОРАТОРИЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ
«СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:

1-31 04 01 Физика (по направлениям)

направление специальности

1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность),

Минск 2018

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 01-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08. 2013 № 88; учебных планов №G31-163/уч., №G31и-174/уч.

СОСТАВИТЕЛИ:

Н.И. Горбачук — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент

Н.М. Лапчук — доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники
физического факультета Белорусского государственного университета
(протокол № 10 от 17 июля 2018 г.);

Советом физического факультета
(протокол № 11 от 01 июня 2018 г.).



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа лаборатории специализации «Современные методы исследования полупроводниковых материалов» разработана для специальности: 1-31 04 01 Физика (по направлениям) направление специальности 1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность).

Цель лаборатории специализации (лабораторного практикума) «Современные методы исследования полупроводниковых материалов» — практическое освоение студентами современных физических методов исследования основных электрофизических и оптических свойств полупроводниковых материалов и наноструктур, используемых в электронике, в том числе и в оптоэлектронике.

Основные задачи — раскрыть физический смысл основных электрофизических и оптических методов исследования полупроводниковых материалов; привить студентам навыки работы с современным экспериментальным оборудованием; на конкретном примере проиллюстрировать возможности технологий микро- и наноэлектроники в управлении свойствами полупроводниковых материалов; обозначить перспективы развития физики полупроводников и нанотехнологий для решения задач производства современной электронной и оптоэлектронной техники.

Интенсивное развитие физики полупроводников предъявляет повышенные требования как к фундаментальной подготовке специалистов, так и к наличию у них практических навыков работы с экспериментальным оборудованием. При этом одной из важнейших задач является формирование у студентов знаний, умений и навыков научно-исследовательской деятельности. Поэтому выполнение лаборатории специализации предусматривает постановку исследовательских задач по изучению современных материалов электронной техники, а также использование учебно-научного и научного оборудования, имеющегося в наличии на кафедре и в научно-исследовательских лабораториях. Практикум включает выполнение работ, связанных с ЭПР-спектроскопией, абсорбционной спектроскопией и спектроскопией люминесценции, проведением измерений барьерных структур на переменном токе, в том числе и с использованием методов нестационарной спектроскопии глубоких уровней в полупроводниках.

Лаборатория специализации относится к циклу дисциплин специализации и взаимосвязана со следующими дисциплинами: “Избранные главы физики и техники полупроводников” и “Современные методы исследования конденсированных материалов”.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

— теоретические основы неравновесных процессов, оптических процессов и процессов переноса заряда в полупроводниковых структурах, структурные, электрофизические и оптические свойства полупроводниковых материалов;

уметь:

— использовать основные физические и оптические методы исследования параметров полупроводниковых материалов и наноструктур;

владеть:

– методами исследования электрофизических и оптических свойств полупроводниковых материалов.

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Академические компетенции:

1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
2. Владеть системным и сравнительным анализом.
3. Владеть исследовательскими навыками.
4. Уметь работать самостоятельно.
5. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.
6. Обладать навыками устной и письменной коммуникации.
7. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

Социально-личностные компетенции:

1. Быть способным к социальному взаимодействию.
2. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.
3. Быть способным к критике и самокритике (критическое мышление).
4. Уметь работать в команде.

Профессиональные компетенции:

1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики, современных технологий и материалов, методы исследования физических объектов, методы измерения физических величин, методы автоматизации эксперимента.
2. Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов, научное оборудование и аппаратуру.
3. Проводить планирование и реализацию физического эксперимента, оценивать функциональные возможности сложного физического оборудования.
4. Пользоваться глобальными информационными ресурсами, компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.
5. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

При преподавании дисциплины рекомендуется применять активные методы обучения, основу которых составляют технологии проблемного и контекстного обучения, реализуемые на лабораторных занятиях, а также рейтинговая система оценки знаний. Эффективность работы студента проверяется в ходе текущего контроля знаний. Текущий контроль знаний рекомендуется проводить в форме устных опросов и защиты отчетов по лабораторным работам.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины — 124, из них количество аудиторных часов — 74. Аудиторные занятия проводятся в виде лабораторных занятий.

Форма получения высшего образования — очная, дневная.

Занятия проводятся на 5-м курсе в 9-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — зачет.

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 Cr^{3+} в Al_2O_3 . 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 адмитанса 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 перколяционного кластера на импеданс композитов в окрестности порога протекания. Импедансная спектроскопия 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.

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 -структура на кремнии, облученных высокоэнергетическими тяжелыми ионами.

4. Гальваномагнитные явления.

Полупроводниковые кристаллы в однородном постоянном магнитном поле. Изменение энергетического спектра. Плотность разрешенных состояний и

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.

Поглощения 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 p - n -переходе и барьере Шоттки. Экспериментальная база оптической спектроскопии полупроводников. Исследование спектра ЭДС фотодиодов, сформированных на различных полупроводниковых материалах. Определение ширины запрещенной зоны по спектрам электролюминесценции светодиодов. Фотолуминесценция полупроводников. Спектр поглощения света полупроводниками. Фотопроводимость алмаза.

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 p^+ - n -диодах, облученных электронами. Исследование локального распределения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых подложках.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ^{*)}

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов				Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Вводное занятие: оборудование лаборатории специализации и техника безопасности при работе на нем				2		1-12	Устный опрос
Раздел 1 <i>Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса</i>								
3	Парамагнетизм алмаза и алмазоподобных 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
Раздел 2 <i>Импедансная спектроскопия</i>								
6	Импедансная спектроскопия электропроводящих композиционных материалов				8		2	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
Раздел 3 <i>Нестационарная спектроскопия глубоких уровней</i>								
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
Раздел 4 <i>Гальваномагнитные явления</i>								
12	Изучение гальваномагнитных явлений				8		1, 5, 6, 10, 11	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос

Раздел 5 <i>Оптическая спектроскопия полупроводниковых материалов и структур</i>								
14	Фотопроводимость алмаза				8		1, 6, 8, 10, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
17	Спектр поглощения света полупроводниками.				8		1, 6, 8, 10, 11, 12	1. Защита отчетов о выполнении лабораторных работ 2. Устный опрос
Раздел 6 <i>Переходные процессы в полупроводниковых барьерных структурах</i>								
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

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 – Мн.: БГУ, 2003. – 82 с.
2. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И. Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук. – Мн.: БГУ, 2005. – 130 с.
3. Исследование переходных процессов в полупроводниковых структурах: пособие / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, А.И. Сягло, С.В. Шпаковский. – Мн.: БГУ, 2009. — 103 с.
4. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Лапчук Н.М. Физика электрического контакта металл/полупроводник: Учебное пособие по спецпрактикуму “Физика полупроводниковых приборов”. – Мн.: БГУ, 2003. – 51 с.
5. Лукашевич, М.Г. Изучение гальваномагнитных явлений / М.Г. Лукашевич, А.А. Мазаник, Д.А. Скрипка – Мн.: 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., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Лань, 2001.

Дополнительная

1. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников – М.: Наука, 1990.— 688 с.
2. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин. – М.: Мир, 2001. – 573 с.
3. Розеншер, Э. Оптоэлектроника / Э. Розеншер, Б.Винтер. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.
4. Грибковский, В.П. Полупроводниковые лазеры / Грибковский В.П. – Мн.: Университетское, 1988.
5. Шуберт, Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

6. Зеегер, К. Физика полупроводников / К. Зеегер. – М.: Мир, 1977. – 615 с.
7. Орешкин, П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Т. Орешкин. – М.: Высшая школа, 1977. – 448 с.
8. Аут, И. Фотоэлектрические явления / И. Аут, Д. Генцов, К. Герман. – М.: Мир, 1980. – 208 с.
9. Толстой, Н.А. Методы УВИ и ИК спектроскопии нанослоев / Н.А. Толстой – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1998. – 223 с.
10. Булярский С.В. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах / С.В. Булярский, Н.С. Грушко. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 399 с.
11. Шуберт, Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности

1. Защита письменных отчетов о выполнении лабораторных работ;
2. Устный опрос.

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 кремнии.
7. Особенности частотных зависимостей импеданса p^+-n -структур на кремнии, 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 -структурах на кремнии, 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

Рекомендации по организации выполнения работ лаборатории специализации «Современные методы исследования полупроводниковых материалов»

Вводное занятие является обязательным. Выбор лабораторных работ осуществляется на вводном занятии индивидуально для каждого обучающегося. Выбор лабораторных работ осуществляется студентом по согласованию с преподавателем с учетом имеющегося аудиторного фонда, загруженности учебно-научного и научного оборудования, правил техники безопасности, а также иных технических возможностей. Перечень лабораторных работ, выбранных индивидуально для каждого обучающегося, фиксируется в лабораторном журнале.

Перечень выбранных лабораторных работ должен обеспечивать выполнение цели и задач лаборатории специализации. Расчетное время выполнения лабораторных работ представлено в «Учебно-методической карте дисциплины». Объем работ (без учета вводного занятия) выполняемых при освоении дисциплины для каждого студента должен составлять 72 часа. Работы должны быть выбраны не менее чем из четырех разделов, предусмотренных содержанием учебной программы.

При выполнении лабораторных работ рекомендуется использовать оборудование научно-исследовательских лабораторий кафедры. В случае необходимости в целях соблюдения требований техники безопасности и правил эксплуатации сложного учебно-научного и научного оборудования по решению кафедры преподавателем к обеспечению занятий могут привлекаться сотрудники научно-исследовательских лабораторий кафедры. Выписка из соответствующего протокола заседания кафедры является неотъемлемой частью учебной программы.

Методика формирования итоговой оценки

Итоговая оценка формируется на основе:

1. Правил проведения аттестации студентов (Постановление Министерства образования Республики Беларусь № 53 от 29 мая 2012 г.);
2. Положения о рейтинговой системе оценки знаний по дисциплине в БГУ (Приказ ректора БГУ от 18.08.2015 № 382-ОД);
3. Критериев оценки знаний студентов (письмо Министерства образования от 22.12.2003)

Для текущего контроля знаний по дисциплине рекомендуется использовать устные опросы и защиту письменных отчетов о выполнении лабораторных работ.

Устные опросы проводятся перед выполнением каждой лабораторной работы и используются для контроля знаний техники безопасности, а также правил эксплуатации оборудования. Оценивание знаний студентов на устных опросах проводится по десятибалльной системе. К выполнению лабораторных работ студенты могут быть допущены только при положительной оценке.

Оценка выполнения лабораторных работ проводится на основе защиты письменных отчетов о выполнении лабораторных работ. Оценивание знаний студентов проводится по десятибалльной системе. Лабораторная работа считается выполненной только при положительной оценке за защиту отчета. Оценка текущего контроля знаний рассчитывается как среднее арифметическое оценок за все выполненные работы.

При неявке на занятия по уважительной причине преподаватель, по согласованию со студентом, определяет дату и время выполнения пропущенной работы в течение учебного семестра. При неявке на занятия по неуважительной причине заведующий кафедрой на основании письменного заявления студента рассматривает возможность выполнения пропущенной работы. В случае наличия такой возможности заведующий кафедрой по согласованию с преподавателем определяет дату и время выполнения пропущенной работы в течение учебного семестра. При отсутствии возможности проведения занятий в течение учебного семестра решением кафедры оформляется недопуск обучающегося к экзаменационной сессии, и заведующий кафедрой по согласованию с преподавателем определяет дату и время выполнения пропущенной работы после окончания учебного семестра.

Текущая аттестация проводится в форме зачета. К зачету допускаются студенты, выполнившие все, индивидуально определенные для них лабораторные работы. По решению преподавателя (группы преподавателей) при оценке текущей успеваемости 7 (семь) баллов и более определение результатов текущей аттестации по дисциплине может проводиться на основании результатов текущего контроля знаний без проведения дополнительного опроса на зачете. При этом явка обучающегося на зачет является обязательной.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Избранные главы физики и техники полупроводников	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению в представленном варианте протокол № 10 от 17 мая 2018 года
Современные методы исследования конденсированных материалов	Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению в представленном варианте протокол № 10 от 17 мая 2018 года