

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям

О.И. Здрок

« 29 » июня 2020 г.

Регистрационный № УД-8221/уч.



ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

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

1-31 04 04 Аэрокосмические радиоэлектронные и информационные системы и
технологии

2020 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 04 04 -2018 и учебного плана № G 31-223/уч от 13.07.2018 г.

СОСТАВИТЕЛИ:

П.И.Гайдук, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук

РЕЦЕНЗЕНТЫ

С.И.Чубаров, доцент кафедры информационных технологий в образовании Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка, кандидат физико-математических наук, доцент

В.С.Садов, профессор кафедры интеллектуальных систем Белорусского государственного университета, кандидат технических наук

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета
(протокол № 11 от 29.05. 2020 г.);

Научно-методическим Советом Белорусского государственного университета
(протокол № 5 от 17.06.2020 г).

Заведующий кафедрой физической
электроники и нанотехнологий

В.М. Борздов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Целью изучения дисциплины является формирование у студентов систематизированных теоретических знаний, умений и практических навыков в области полупроводниковой микро- и нано-электроники, а также дискретных приборов и датчиков, используемых для детектирования, обработки, хранения и передачи информации в аэрокосмической отрасли.

Задачи дисциплины:

- формирование представлений о физических явлениях, эффектах и процессах, протекающих в полупроводниковых материалах и структурах, лежащих в основе работы приборов электроники и компьютерных систем;
- изучение зонной теории, статистики носителей заряда, кинетических явлений и основных закономерностей переноса носителей заряда в полупроводниках;
- изучение принципов работы и характеристик р-п переходов, контактов металл-полупроводник и электронных структур на их основе;
- изучение физических процессов, происходящих в электронных структурах и приборах при различных внешних воздействиях.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием (бакалавра).

Учебная дисциплина относится к модулю «Общая физика» государственного компонента.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.:

Материал курса опирается на сведения, полученные ранее при освоении учебных дисциплин государственного компонента: модуля «Высшая математика», а также следующих курсов модуля «Общая физика»: «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Атомная и ядерная физика».

Требования к компетенциям:

Освоение программы по учебной дисциплине «Физика полупроводниковых приборов» должно обеспечить формирование следующих **компетенций**:

Базовые профессиональные компетенции:

БПК-11. Знать основные физические процессы, связанные с переносом зарядов в полупроводниковых материалах, принципы работы, основные характеристики и области применения полупроводниковых приборов.

В результате изучения дисциплины магистрант должен:

знать:

- зонную структуру и статистику носителей зарядов в материалах электроники;
- основные физические процессы, связанные с распределением и переносом носителей заряда в электронных структурах и приборах;
- принципы работы, основные характеристики и области применения полупроводниковых приборов;

уметь:

- экспериментально определять, теоретически рассчитывать и проводить компьютерное моделирование характеристик полупроводников;
- на основе экспериментальных измерений определять электрофизические параметры полупроводниковых материалов, структур и приборов;

владеть:

- методами экспериментального определения и теоретического расчета физических параметров полупроводников;
- практическими приемами и методами измерения характеристик электронных структур и приборов

Структура учебной дисциплины

Дисциплина «Физика полупроводниковых приборов» изучается студентами дневной формы получения высшего образования первой степени в 5-ом семестре. Всего на изучение учебной дисциплины отведено:

- для очной формы получения высшего образования – 108 часов, в том числе 62 аудиторных часа, из них: лекции – 34 часа, лабораторные занятия – 28 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетных единицы.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. Введение. Цель и задачи курса. Этапы развития полупроводниковой электроники. Основные свойства материалов полупроводниковой электроники.

2. Модельные представления полупроводников. Структурные модели полупроводников. Обратная решетка. Дефекты кристаллического строения. Фононы. Выращивание монокристаллов Si. Зонная модель. Уравнение Шредингера для кристалла и модель Кроннига-Пенни. Зоны Бриллюэна. Эффективная масса носителей заряда. Циклотронный резонанс. Классификация материалов с позиций зонной теории. Элементарная теория примесных состояний.

3. Статистика носителей заряда в полупроводниках. Плотность квантовых состояний. Функции распределения частиц по энергетическим состояниям. Заполнение примесных уровней. Концентрация носителей заряда в полупроводниках. Закон действующих масс. Собственный полупроводник. Вырожденные и невырожденные полупроводники. Зависимость положения уровня Ферми от концентрации примеси и температуры для невырожденного полупроводника.

4. Кинетические явления в полупроводниках. Дрейфовая и диффузионная электропроводность. Подвижность носителей заряда. Соотношение Эйнштейна. Эффект Холла. Механизмы рассеяния носителей заряда. Рассеяние на фононах и ионизированной примеси. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры. Электропроводность в сильном электрическом поле. Электростатическая, термоэлектронная и ударная ионизация. Эффект Ганна.

5. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Взаимодействие света с полупроводниками. Закон Бугера-Ламберта. Генерация и рекомбинация носителей. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми. Биполярная и монополярная оптическая генерация носителей. Время жизни и диффузионная длина неравновесных носителей заряда. Механизмы рекомбинации.

6. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Внутренний фотоэффект. Внешний фотоэффект. Фотопроводимость. Фотовольтаические эффекты.

7. Контактные явления. Электронно-дырочный переход: формирование, токи, ОПЗ, емкость. Вольтамперная характеристика электронно-дырочного перехода. Пробой электронно-дырочного перехода. Контакты металл-полупроводник. Гетеропереходы. Структуры металл-окисел-полупроводник.

8. Полупроводниковые диоды. Специальные типы диодов. Классификация диодов. Переходные процессы в диодах. Выпрямительные и силовые диоды. Диоды Шоттки. Стабилитроны. Импульсные диоды. СВЧ диоды. Диоды Ганна. Лавинно пролетные диоды. Туннельные диоды. Обращенные диоды. Варикапы.

9. Полупроводниковые транзисторы. Биполярные транзисторы. Электрические схемы включения и режимы работы биполярных транзисторов. Эквивалентная схема биполярного транзистора. Емкости переходов. Частотные характеристики. Статистические характеристики. Полевые транзисторы с управляющим переходом. Полевые транзисторы с изолированным затвором.

10. Ключевые и функциональные приборы. Тиристоры. Приборы с зарядовой связью. Полупроводниковые термоэлектрические и гальваноманнитные приборы. Терморезисторы. Варисторы. Приборы Пельтье. Датчики Холла.

11. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы. Фотоприемники. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Оптипары. Интегральные оптоэлектронные схемы.

12. Приборы электронной памяти. Магнитные материалы. Приборы памяти на основе магнитных материалов. Приборы памяти на основе CCD. Транзисторы с плавающим затвором и устройства Flash – памяти. Перспективы развития приборов памяти.

13. Перспективы развития полупроводниковой электроники. Микро- и нано-электроника. Интегральные схемы. Приборы на гетеропереходах. Квантоворазмерные структуры и приборы на их основе.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Введение	1					Аудиторный опрос
2	Модельные представления полупроводников	3			4		Отчет по лабораторной работе. Презентации по рефератам.
3	Статистика носителей заряда в полупроводниках	2			4		Отчет по лабораторной работе. Презентации по рефератам
4	Кинетические явления в полупроводниках	2					Аудиторный опрос Презентации по рефератам.
5	Генерация и рекомбинация носителей заряда	2					Аудиторный опрос Презентации по рефератам.
6	Фотоэлектрические явления в полупроводниках	2			4		Отчет по лабораторной работе. Презентации по рефератам.
7	Контактные явления	2					Аудиторный опрос Презентации по рефератам.
8	Полупроводниковые диоды. Специальные типы диодов	4			6		Отчет по лабораторной работе. Презентации по рефератам.
9	Полупроводниковые транзисторы	4			6		Отчет по лабораторной работе. Презентации по рефератам..
10	Ключевые и функциональные приборы	3					Аудиторный опрос Презентации по рефератам.

11	Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	4			4			Отчет по лабораторной работе. Презентации по рефератам.
12	Приборы электронной памяти	3						Аудиторный опрос Презентации по рефератам.
13	Перспективы развития полупроводниковой электроники	2						Аудиторный опрос Презентации по рефератам.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. *Шалимова, К.В.* Физика полупроводников: Учебник. / К.В. Шалимова. 4 е изд., стер., СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 400 с.: ил.
2. *Николайчук Г. П.* Физика полупроводников и полупроводниковых приборов : учеб. пособие / Г. П. Николайчук. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – 96 с.
3. *Sze S.M., Kwok K.Ng.* Physics of Semiconductor Devices / NY, 3rd Edition ISBN: 978-0-471-14323-9, 2006, 832 pp.
4. *Лебедев А.И.* Физика полупроводниковых приборов / М.: Физматлит. 2008. – 488 с.
5. *Кардона М.* Основы физики полупроводников / Кардона М., Петер Ю., 2002. 3-е изд. М. Физматлит. 2002. 560 с.
6. *Фистуль, В.И.* Введение в физику полупроводников / В.И. Фистуль. М.: Высш. шк., 1984.
7. *Росадо, Л.* Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. М.: Высш. школа, 1991.
8. *Пасынков, В.В.* Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. СПб, 1991. 470с

Перечень дополнительной литературы

1. *Старосельский В.* Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники / Изд-во Юрайт, 2011, 463 стр.
2. *Гайдук, П.И.* Материалы микро и наноэлектроники / П.И.Гайдук, Ф.Ф.Комаров, О.Р.Людчик, А.В.Леонтьев. Минск: БГУ, 2009.
3. *Афоненко А.А.* Перспективные технологии в нано- и оптоэлектронике / А.А.Афоненко, П.И.Гайдук, Ф.Ф.Комаров, А.Г.Новиков, С.Л.Прокопьев, Д.В.Ушаков. Мн., Изд-во БГУ, 2018, 209 стр.
4. *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия. / М. Шур. М.: Мир, 1991.
5. Кинетические явления в полупроводниках: учеб. пособие / А.Н. Комов; Федер. агентство по образованию. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2005. – 62 с.
6. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно- методическое пособие. /Сост. П.А. Шиляев, Д.А. Павлов. – Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 18 с.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Итоговая оценка формируется в соответствии со следующими документами:

1. «Об утверждении правил проведения аттестации студентов, курсантов, слушателей при освоении содержания образовательных программ высшего образования». Постановление Министерства образования Республики Беларусь от 29 мая 2012 г. № 53.

2. «Положение о рейтинговой системе оценки знаний по дисциплине в Белорусском государственном университете». Приказ ректора БГУ от 18.08.2015 № 382-ОД.

3. «Критерии оценки знаний и компетенций студентов по десятибалльной шкале». Письмо Министерства образования Республики Беларусь №09-10/53-ПО от 28.05.2013г.

Формой текущей аттестации по дисциплине учебным планом предусмотрен зачет.

При формировании итоговой оценки используется рейтинговая оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая оценка предусматривает использование весовых коэффициентов для текущего контроля знаний и текущей аттестации студентов по дисциплине.

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется опрос по материалам лекций, защита лабораторных работ, защита реферативных работ, устные вопросы и обмен мнениями, идеями по отдельным темам (метод учебной дискуссии).

Оценка за ответы на лекциях (опрос) включает в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики, участие в дискуссии и т.д.

Контроль выполнения лабораторных работ осуществляется путем рассмотрения отчета по каждой выполненной лабораторной работе.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций с последующей дискуссией.

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- ответы на лекциях (опрос) – 20 %;
- выполнение лабораторных работ – 40 %;
- презентация по реферату – 40 %.

Рейтинговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости и экзаменационной оценки с учетом их весовых коэффициентов Вес оценки по текущей успеваемости составляет 40 %, зачетной оценки – 60 %.

Примерный перечень лабораторных занятий

1. Изучение кристаллической структуры основных полупроводников (*компьютерные Апплеты*).
2. Изучение зонной структуры полупроводников Si, Ge, GaAs, AlAs и сплавов на их основе в зависимости от композиционного состава (*компьютерные Апплеты*).
3. Исследование положения уровня Ферми в зависимости от концентрации легирующей примеси и температуры (*компьютерные Апплеты*).
4. Определение подвижности и концентрации носителей заряда методом эффекта Холла (лабораторный стенд).
5. Спектральная зависимость фотопроводимости полупроводников (лабораторный стенд).
6. Изучение эффекта Ганна (лабораторный стенд).
7. Изучение электрофизических характеристик терморезистора (лабораторный стенд).
8. Изучение электрофизических характеристик диода (*компьютерные Апплеты*).
9. Изучение характеристик транзистора (*компьютерные Апплеты*).
10. Изучение спектральных характеристик светодиодов (лабораторный стенд).

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется метод учебной дискуссии, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или согласования существующих позиций по определенной проблеме.

Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания изучаемой темы, применение знаний (теорий, концепций) при решении проблем, определение способов их решения.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся, кроме подготовки к экзамену, подготовка к зачету

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы: – поиск (подбор) и обзор литературы и электронных источников по индивидуально заданной проблеме курса.

Реферат должен содержать следующие обязательные разделы:

- постановка задачи или проблемы и пути ее решения;
- историю исследования со ссылками на литературные источники;
- современное состояние проблемы;
- выводы.

По содержанию реферата должна быть

- подготовлена презентация для публичной защиты;
- подготовлены вопросы к аудитории по представленному материалу для выяснения усвоения основных положений доклада.

Примерные темы реферативных работ

1. Механизмы рассеяния носителей заряда и подвижность в полупроводниковых сплавах IV группы (SiGe, SiSn, SiGeSn).
2. Преобразователи солнечной энергии в электрическую. Физические принципы и методы построения солнечных элементов. Перспективы развития СЭ.
3. Преобразователи солнечной энергии в электрическую. ВАХ, КПД, спектральный отклик.
4. Контакты полупроводников и металлов. Приборы, использующие контактные явления.
5. Функциональные приборы на основе полупроводников и металлов.
6. Транзисторы с плавающим затвором и приборы память на их основе.
7. Архитектура FLASH памяти. Перспективы развития FLASH памяти.
8. Сегнетоэлектрическая память (FRAM). Принципы построения, состояние технологии и перспективы развития.
9. Магниторезистивная память (MRAM). Принципы построения, состояние технологии и перспективы развития.
10. Фазоинверсная память (PCM). Принципы построения, состояние технологии и перспективы развития.
11. Перспективы развития интегральной оптоэлектроники.
12. Перспективы развития светодиодов и полупроводниковых лазеров.

Список компьютерных программ

1. RUMP
2. ICECREAM
3. SIMNRA 6.0
4. HEAD 6
5. SRIM – 2013
6. ORIGIN
7. Crystallographica

Выполнение лабораторных работ

В лабораторном практикуме по дисциплине «Физика полупроводниковых приборов» запланировано проведение натуральных экспериментов по изучению физических свойств полупроводников контактов металл-полупроводник и гетеропереходов, а также характеристик структур на их основе с различными по сложности стендовыми измерениями. Кроме того, необходимым условием глубокого понимания и усвоения изучаемого материала является проведение студентами компьютерного моделирования, самостоятельного анализа полученных результатов с использованием современных программных комплексов интерактивного исследования и изучения характеристик как полупроводниковых материалов, так и приборов на их основе.

Задание по лабораторным работам для студентов заключается в подготовке отчета в письменном виде по выполненной работе. Контроль выполнения лабораторных работ будет осуществляться путем рассмотрения отчета по каждой

выполненной лабораторной работе. Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Фамилию, имя, отчество студента, номер группы.
2. Название работы.
3. Цель исследования.
4. Исходные данные и методику проведения лабораторной работы.
5. Название выполняемого пункта задания.
6. Блок-схему исследования (где это применимо) с необходимыми пояснениями.
7. Таблицы рассчитанных и экспериментальных зависимостей в виде удобном для анализа.
8. Графические зависимости рассчитанных и экспериментальных данных с нанесенными точками и выполненными на одном рисунке для каждого случая.
9. Обсуждение полученных результатов, оценки величин и зависимостей, выводы по работе.

Защита отчетов по лабораторной работе студентам будет проводиться в форме индивидуального собеседования и тестирования.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Структура материалов электроники. Обратная решетка.
2. Дефекты кристаллического строения. Элементарная теория примесных состояний.
3. Основы зонной теории полупроводников. Зоны Бриллюэна.
4. Эффективная масса носителей заряда.
5. Концентрация носителей заряда в полупроводниках. Закон действующих масс.
6. Зависимость положения уровня Ферми от концентрации примеси и температуры.
7. Кинетические явления в полупроводниках. Дрейфовая и диффузионная электропроводность. Подвижность носителей заряда. Соотношение Эйнштейна.
8. Механизмы рассеяния носителей заряда.
9. Электропроводность в сильном электрическом поле. Электростатическая, термоэлектронная и ударная ионизация.
10. Генерация и рекомбинация носителей. Равновесные и неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми.
11. Механизмы рекомбинации.
12. Взаимодействие света с полупроводниками. Закон Бугера-Ламберта.
13. Биполярная и монополярная оптическая генерация носителей.
14. Внешний и внутренний фотоэффекты. Фотопроводимость.
15. Фотовольтаические эффекты.
16. Электронно-дырочный переход: формирование, ОПЗ, ВАХ.
17. Барьерная емкость р-п-перехода. Варикапы.
18. Контакты металл-полупроводник. Диоды Шоттки.
19. Гетеропереходы.

20. Классификация диодов. Выпрямительные и силовые диоды. Стабилитроны.
21. Пробой электронно-дырочного перехода.
22. Лавинно пролетные диоды.
23. Туннельные диоды. Обращенные диоды.
24. Биполярные транзисторы. Эквивалентная схема биполярного транзистора.
25. Статистические характеристики биполярного транзистора.
26. Полевые транзисторы с управляющим переходом. МОП полевые транзисторы.
27. Ключевые и функциональные приборы. Тиристоры. Диоды Ганна, Варисторы
28. Терморезисторы. Приборы Пельтье. Датчики Холла.
29. Фотоприемники. Светодиоды и полупроводниковые лазеры.
30. Оптопары. Интегральные оптоэлектронные схемы.
31. Магнитные материалы. Приборы памяти на основе магнитных материалов.
32. Приборы с зарядовой связью. Приборы памяти на основе CCD.
33. Транзисторы с плавающим затвором и устройства Flash – памяти. Перспективы развития приборов памяти.

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)*
Интегральная электроника	Кафедра интеллектуальных систем	нет	Изменений не требуется (Прот. № 11 от 29.05.2020 г.)

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

на _____ / _____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
физической электроники и нанотехнологий

(протокол № _____ от _____ 201__ г.)

Заведующий кафедрой

(ученая степень, ученое звание)
(И.О.Фамилия)

(подпись)

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета

(ученая степень, ученое звание)
(И.О.Фамилия)

(подпись)