

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе БГУ

А.Л. Толстик

30 июня
(дата утверждения)

Регистрационный № УД н643 /уч.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

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

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

2016 г.

Учебная программа составлена на основе *ОСВО 1-31 04 04-2013 и учебных планов УВО № G31-171/уч. 2013 г. . и G31и-188уч 2013 г.*

СОСТАВИТЕЛИ:

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

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета

(протокол № 9 от 23 мая 2016 г.);

Учебно-методической комиссией факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета

(протокол № 9 от 24 мая 2016 г.).

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов» разработана для студентов специальности 1-31 04 04 Аэрокосмические радиоэлектронные и информационные системы и технологии в соответствии с требованиями образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 04-2013 «Высшее образование. Первая ступень. Специальность 1-31 04 04» и учебного плана УВО № G31-171/уч. 2013 г. Белорусского государственного университета по специальности 1-31 04 04 «Аэрокосмические радиоэлектронные и информационные системы и технологии».

Целью изучения дисциплины является формирование у студентов систематизированных теоретических знаний, умений и практических навыков, необходимых для специалистов в области полупроводниковой микро- и нано-электроники.

Основная задача дисциплины – научить студентов анализировать физические явления, эффекты и процессы, протекающие в полупроводниковых материалах и структурах, лежащих в основе работы приборов электроники, радиоэлектронных устройств.

Дисциплина входит в цикл общепрофессиональных и специальных дисциплин компонента учреждения высшего образования. Для ее успешного усвоения необходимы знания по физике в объеме курса общей физики.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- основные физические процессы, связанные с переносом зарядов в полупроводниковых материалах;
- принципы работы полупроводниковых приборов;
- основные характеристики и области применения полупроводниковых приборов;

уметь:

- проводить теоретические и экспериментальные исследования физических процессов, связанных с распределением и переносом зарядов в твёрдых структурах;
- определять электрофизические параметры полупроводниковых материалов и приборов.

владеть:

- методами экспериментального определения и теоретического расчета электрофизических параметров полупроводников;
- методами измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов.

Освоение образовательной программы по учебной дисциплине "Физика полупроводников и полупроводниковых приборов" должно обеспечить формирование следующих **компетенций**:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения

теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-5. Быть способным вырабатывать новые идеи (креативность).

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

ПК-4. Проводить математическое моделирование физических процессов, приборов и устройств.

Программа рассчитана на объем 180 часов, из которых 86 являются аудиторными. Распределение аудиторных часов по видам занятий следующее: лекций – 50 часов, лабораторных работ – 36 часов.

Дисциплина изучается студентами дневной формы получения высшего образования на 3-м курсе в 6-ом семестре.

Аттестация по дисциплине проводится в форме зачета и экзамена.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. *Введение.* Цель и задачи курса. Этапы развития полупроводниковой электроники. Основные представления о свойствах полупроводников.

2. *Модельные представления о структуре полупроводников.* Типы химических связей. Кристаллические решетки. Операции симметрии. Положение и ориентация плоскостей в кристаллах. Обратная решетка. Кристаллические структуры материалов электроники. Дефекты кристаллического строения. Фононы. Выращивание монокристаллов Si. Фазовые диаграммы и твердые растворы.

3. *Основы зонной теории полупроводников.* Качественная модель зонной структуры твердых тел. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация. Одноэлектронное приближение. Энергетический спектр электронов в кристалле. Одномерная модель Кроннига-Пенни. Зоны Бриллюэна. Эффективная масса носителей заряда. Циклотронный резонанс. Классификация материалов с позиций зонной теории. Элементарная теория примесных состояний

4. *Статистика носителей заряда в полупроводниках.* Плотность квантовых состояний. Функции распределения частиц. Свойства функции Ферми-Дирака. Степень заполнения примесных уровней. Собственный полупроводник. Вырожденные и невырожденные полупроводники. Концентрация носителей заряда в полупроводниках. Закон действующих масс. Зависимость положения уровня Ферми от концентрации примеси и температуры для невырожденного полупроводника.

5. *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.

6. *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 неравновесных носителей заряда. Диффузионная длина. Механизмы рекомбинации.

7. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках.* Внутренний фотоэффект. Внешний фотоэффект. Фотопроводимость. Спектральная зависимость фотопроводимости. Фотовольтаические эффекты.

8. *Электронно-дырочный переход.* Модель электронно-дырочного перехода. Токи через электронно-дырочный переход. Вольтамперная характеристика электронно-дырочного перехода. Генерация и рекомбинация носителей заряда в электронно-дырочном переходе. Концентрации неосновных носителей заряда у границ электронно-дырочного перехода. Распределение напряженности электрического поля и потенциала. Барьерная емкость

электронно-дырочного перехода. Пробой электронно-дырочного перехода. Контактные явления. Переходы Шоттки. Омические контакты. Гетеропереходы.

9. *Полупроводниковые диоды. Специальные типы диодов.* Модель полупроводникового диода. Переходные процессы в диодах. Классификация диодов. Импульсные диоды. Диод Шоттки. Стабилитроны. Лавинно-пролетные диоды. Туннельные диоды. Варикапы. Варисторы. Шумовые диоды. Обращенные диоды. Импульсные диоды.

10. *Полупроводниковые транзисторы.* Биполярные транзисторы. Электрические схемы включения и режимы работы биполярных транзисторов. Эквивалентная схема биполярного транзистора. Емкости переходов. Частотные характеристики. Статистические характеристики. Явления в транзисторах при больших токах. Дрейфовые транзисторы. Полевые транзисторы с управляющим переходом. Полевые транзисторы с изолированным затвором. Измерение h -параметров биполярного транзистора. Измерение подвижности носителей заряда в канале полевого транзистора.

11. *Ключевые и функциональные приборы.* Тиристоры. Приборы с зарядовой связью. Полупроводниковые термоэлектрические и гальваномагнитные приборы. Терморезисторы. Варисторы. Приборы Пельтье. Датчики Холла.

12. *Оптоэлектронные полупроводниковые приборы.* Фотоприемники. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Оптипары. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии.

13. *Перспективные направления развития полупроводниковых приборов.* Микро- и нано-электроника. Интегральные схемы. Приборы на гетеропереходах. Квантоворазмерные структуры и приборы на их основе.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов			Количество часов УСР	Материальное обеспечение занятия (наглядные, методические пособия и др.)	Литература	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	ВВЕДЕНИЕ (2 ч)	1	-	-	-			
1.1.	Введение	1				Презентация 1	[1], [2], [5], [6]	Устный опрос
2.	МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРУКТУРЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (7 ч)	3	-	4	-			
2.1.	Симметрия кристаллов	1				Презентация 2а	[1], [6], [10]	Устный опрос
2.2.	Выращивание монокристаллов полупроводников	2				Презентация 2б	[1],[2],[3], [12]	Аудиторный тест по главе
2.3.	Изучение кристаллической структуры основных полупроводников.			4		Компьютерный класс, учебная лаборатория	[1], [12]	Отчет по лабораторной работе
3.	ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (8 ч)	4	-	4	-			
3.1.	Уравнение Шредингера для кристалла	2				Презентация 3а	[1-4],[10] [11-15]	Устный опрос
3.2.	Энергетический спектр электронов в кристалле	2				Презентация 3б	[1-6],[11], [13]	Аудиторный тест по главе
3.3.	Изучение зонной структуры полупроводников Si, Ge, GaAs, AlAs и сплавов на их основе в зависимости от композиционного состава			4		Компьютерный класс, учебная лаборатория	[1], [5]	Отчет по лабораторной работе
4.	СТАТИСТИКА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В	6	-	4	-			

	ПОЛУПРОВОДНИКАХ (10 ч)							
4.1.	Заполнение энергетических уровней	2				Презентация 4а	[1-3],[5]	Устный опрос
4.2.	Концентрация носителей заряда в полупроводнике	2				Презентация 4б	[1-4] [10-13]	Устный опрос
4.3.	Положение уровня Ферми в невырожденном полупроводнике	2				Презентация 4в	[1-4],[12]	Аудиторный тест по главе
4.4.	Исследование положения уровня Ферми в зависимости от концентрации легирующей примеси и температуры.			4		Компьютерный класс, учебная лаборатория	[1-4],[11-13]	Отчет по лабораторной работе
5.	КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ (8 ч)	4	-	4	-			
5.1.	Дрейфовая и диффузионная электропроводность	2				Презентация 5а	[1-5],[18]	Устный опрос
5.2.	Электропроводность в сильном электрическом поле	2				Презентация 5б	[1-3],[11] [13-18]	Аудиторный тест по главе
5.3.	Определение подвижности и концентрации носителей заряда методом эффекта Холла.			4		Учебная лаборатория, стенд «эффект Холла»	[1-5] [13]	Отчет по лабораторной работе
6.	ГЕНЕРАЦИЯ И РЕКОМБИНАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА (8 ч)	4	-	4	-			
6.1.	Генерация носителей	2				Презентация 6а	[1-6],[8] [19]	Устный опрос
6.2.	Механизмы рекомбинации	2				Презентация 6а	[1-5], [18]	Аудиторный тест по главе
6.3.	Изучение эффекта Ганна.			4		Учебная лаборатория, стенд «эффект Ганна»	[1-3]	Отчет по лабораторной работе
7.	ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ (8 ч)	4	-	4	-			
7.1.	Фотопроводимость	2				Презентация 7а	[1-3]	Устный опрос
7.2.	Фотовольтаические эффекты	2				Презентация 7б	[1-6]	Аудиторный тест по главе
7.3.	Спектральная зависимость фотопроводимости			4		Учебная лабора-	[1-4]	Отчет по

	полупроводников.					тория, стенд «ФП»		лабораторной работе
8.	ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД (4 ч)	4	-	-	-			
8.1.	Контактные явления	2				Презентация 8а	[1],[13-15]	Устный опрос
8.2.	Область пространственного заряда и емкость	2				Презентация 8б	[1],[7],[8] [12]	Аудиторный тест по главе
9.	ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ДИОДОВ (8 ч)	4	-	4	-			
9.1.	ВАХ и переходные процессы в диодах	2				Презентация 9а	[1],[5],[8] [9-11]	Устный опрос
9.2.	Типы диодов	2				Презентация 9б	[1],[6],[7]	Аудиторный тест по главе
9.3.	Изучение электрофизических характеристик диода.			4		Компьютерный класс, учебная лаборатория	[7],[8]	Отчет по лабораторной работе
10.	ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ (10ч)	6	-	4	-			
10.1	Биполярные транзисторы.	2				Презентация 10а	[1],[7],[8]	Устный опрос
10.2	Частотные и статистические характеристики.	2				Презентация 10б	[7],[8]	Устный опрос
10.1	Полевые транзисторы.	2				Презентация 10в	[7],[8]	Аудиторный тест по главе
10.3	Изучение характеристик транзистора.			4		Компьютерный класс, учебная лаборатория	[1],[2],[7] [8]	Отчет по лабораторной работе
11.	КЛЮЧЕВЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ (4 ч)	4	-	-	-			
11.1	Многослойные структуры	2				Презентация 11а	[10],[8],[19]	Устный опрос
11.2	Функциональные приборы	2				Презентация 11б	[7],[8]	Аудиторный тест по главе
12.	ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ (8 ч)	4	-	4	-			
12.1	Фотоприемники	2				Презентация 12а	[1-3], [5], [9]	Устный опрос

12.2	Светоизлучающие приборы	2				Презентация 12б	[1-7], [9]	Аудиторный тест по главе
12.3	Изучение спектральных характеристик светодиодов.			4		Учебная лаборатория, стенд «ФП»	[1-5] [13]	Отчет по лабораторной работе
13.	ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ (4 ч)	2	-	-	-			
13.1	Интегральные схемы	1				Презентация 13а	[1-3], [5-9]	Устный опрос
13.2	Квантоворазмерные структуры и приборы на их основе	1				Презентация 13б	[17-19]	Аудиторный тест по главе

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основная литература

1. *Шалимова, К.В.* Физика полупроводников / К.В. Шалимова. М.: Энергия, 1985.
2. *Фистуль, В.И.* Введение в физику полупроводников / В.И. Фистуль. М.: Высш. шк., 1984.
3. *Бонч-Бруевич, В.Л.* Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников / М.: Наука, 1977.
4. *Смит, Р.* Полупроводники / Р. Смит. М.: Мир, 1982. 560 с.
5. *Росадо, Л.* Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. М.: Высш. школа, 1991.
6. *Солимар.* Лекции по электрическим свойствам материалов / Солимар. М.: Мир, 1991.
7. *Пасынков, В.В.* Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. С-П, 1991. 470с.
8. *Зи, С.* Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. М, 1984
9. *Степаненко, И.П.* Основы микроэлектроники / И.П. Степаненко. М, 1980. 250с.
10. *Викулин, И.М.* Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. М, 1980.

Дополнительная литература

11. *Ридли, Б.* Квантовые процессы в полупроводниках. / Б. Ридли М.: Мир, 1986.
12. *Епифанов, Г.И.* Физика твердого тела. / Г.И. Епифанов. М.: Высш. школа, 1977.
13. *Анималу, А.* Квантовая теория кристаллических твердых тел. / А. Анималу. М.: Мир, 1981.
14. *Mayer, J.W.* Electronic Materials Science / J.W. Mayer, S.S. Lau. N.Y.: Macmilan Publ. Company, 1994. 476 p.
15. *Малер, Р.* Элементы интегральных схем / Р. Маллер, М.Кейминс. М.: Мир, 1981. 630 с.
16. *Тилл, У.* Интегральные схемы. Материалы, приборы, изготовление. / У. Тилл, Дж. Лаксон. М.: Мир, 1985. 501 с.
17. *Мосс, Т.* Полупроводниковая оптоэлектроника. / Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. М.: Мир, 1979.
18. *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия. / М. Шур. М.: Мир, 1991.
19. *Овчинников, В.В.* Технологии многослойных структур для микроэлектроники / В.В. Овчинников, А.С. Тимошин, В.В. Крапухин. М, 1992. 88с.

Примерный перечень лабораторных работ

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).

Выполнение лабораторных работ

В лабораторном практикуме по дисциплине «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов» запланировано проведение натуральных экспериментов по изучению физических свойств полупроводниковых материалов и характеристик полупроводниковых приборов с различными по сложности стендовыми измерениями. Кроме того необходимым условием глубокого понимания и усвоения изучаемого материала является проведение студентами компьютерного моделирования, решение компьютерных задач (апплетов) с использованием современных программных комплексов интерактивного исследования и изучения характеристик как полупроводниковых материалов, так и приборов на их основе. Параллельное проведение натурального и компьютерного экспериментов в ходе выполнения лабораторного практикума по дисциплине «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов» позволяет в дальнейшем более эффективно и грамотно использовать полученные при изучении дисциплины студентами знания, а также приобретённые ими умения и навыки в своей дальнейшей практической профессиональной работе.

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 выполненные 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.

Перечень средств диагностики

Основным средством диагностики усвоения знаний и овладения необходимыми умениями и навыками по дисциплине «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов» является письменная работа в виде аудиторного тестирования, подготовка отчетов по лабораторным работам с последующим индивидуальным собеседованием и тестированием по ним, подготовка рефератов, контрольные опросы на лекциях, консультации.

Методика формирования итоговой оценки

Итоговая оценка по дисциплине формируется на основе зачетной оценки и оценки текущего контроля. Весовой коэффициент зачетной оценки - 0,5; весовой коэффициент текущей успеваемости - 0,5. Оценка текущего контроля формируется на основании оценок отчетов по лабораторному практикуму и результатов тестирования с равными весовыми коэффициентами.

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) ¹
Общая физика	Кафедра физики и аэрокосмических технологий	-	Протокол № 9 от 23 мая 2016 г.

¹ При наличии предложений об изменениях в содержании учебной программы УВО.

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)

(подпись)

(И.О.Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета

(ученая степень, ученое звание)

(подпись)

(И.О.Фамилия)