

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 03/3-21

от 31.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ (PHYSICS OF SEMICONDUCTORS)**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
2	3	108	36	0	0	72	0	3
Итого	3	108	36	0	0	72	0	

## АННОТАЦИЯ

В курсе излагаются основные экспериментальные сведения и теоретические основы для процессов переноса, генерации и рекомбинации носителей заряда, контактных явлений, явлений поглощения и излучения света в полупроводниковых материалах.

Большое внимание уделяется новым полупроводниковым материалам, таким как нитрид галлия (алюминия), карбид кремния, а также полупроводниковым гетероструктурам.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины «Физика полупроводников» являются:

- изучение основных понятий, экспериментальных результатов и методов теоретического описания явлений в физике полупроводников;
- знакомство с базовыми электронными и оптическими процессами: собственная и примесная электропроводность полупроводников, колебания решётки процессы переноса, рассеяния, инжекции, рекомбинации носителей заряда, контактные явления в полупроводниках и др.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для успешного освоения дисциплины «Физика полупроводников» студент должен владеть математическим аппаратом, необходимым для решения дифференциальных и интегральных уравнений, владеть представлениями о физике атомов и молекул, физике твёрдого тела из курса общей физики, владеть понятийным аппаратом и методами решения задач квантовой механики, статистической физики. Требуется предварительное изучение следующих дисциплин:

- "Дифференциальные и интегральные уравнения";
- "Общая физика (молекулярная физика и основы статистической термодинамики)";
- "Общая физика (электричество и магнетизм)";
- "Общая физика (волны и оптика)";
- "Квантовая механика";
- "Уравнения математической физики".

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание	Код и наименование индикатора достижения профессиональной
--	---------------------------	---	---

		(профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	компетенции
научно-исследовательский			
анализ состояния научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и нанoeлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и нанoeлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.	ПК-1.1 [1] - Способен применять представления, концепции и модели физики конденсированного состояния в самостоятельной научно-исследовательской работе в области электроники и нанoeлектроники  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-1.1[1] - Знать основные сведения из физики конденсированного состояния, в особенности физики полупроводников, имеющие отношения к принципам функционирования приборов электроники и нанoeлектроники; У-ПК-1.1[1] - Уметь применять представления, концепции и модели физики конденсированного состояния в самостоятельной научно-исследовательской работе в области электроники и нанoeлектроники; В-ПК-1.1[1] - Владеть основными экспериментальными и теоретическими методами физики конденсированного состояния, используемым для исследования материалов и приборов электроники и нанoeлектроники
анализ состояния научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы	ПК-7 [1] - способен анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа	З-ПК-7[1] - Знать: современное состояние научно-технических проблем в области электроники и нанoeлектроники ;

<p>патентных источников</p>	<p>их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и микроэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и микроэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.</p>	<p>литературных и патентных источников</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>У-ПК-7[1] - Уметь: анализировать состояние научно-технической проблемы путём изучения и анализа литературных и патентных источников.; В-ПК-7[1] - Владеть: навыками сбора научно-технической информации, необходимой для проведения исследований.</p>		
<p>проектно-конструкторский</p>		<p>проектирование приборов и элементной базы твердотельной электроники и микроэлектроники в соответствии с техническим заданием</p>	<p>Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование,</p>	<p>ПК-9 [1] - способен проектировать устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.003</p>	<p>З-ПК-9[1] - Знать: государственные стандарты, нормативы, законы физики и методы технологии в области приборов и систем электронной техники. ; У-ПК-9[1] - Уметь: применять компьютерные технологии и методы автоматизированного проектирования устройств, приборов и</p>

	<p>математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и наноэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и наноэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.</p>		<p>систем электронной техники; В-ПК-9[1] - Владеть: навыками проектирования устройств, приборов и систем электронной техники с учетом заданных требований.</p>
--	---	--	--

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары )/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Физика полупроводников. Часть 1.	1-8	18/0/0		25	к.р-8	З-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-7, У-ПК-7,

							В-ПК-7, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
2	Физика полупроводников. Часть 2	9-15	18/0/0		25	к.р-15	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-7, У-ПК-7, В-ПК-7, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		36/0/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	3	3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-7, У-ПК-7, В-ПК-7, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
к.р	Контрольная работа
З	Зачет

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>2 Семестр</i>	36	0	0
<b>1-8</b>	<b>Физика полупроводников. Часть 1.</b>	18	0	0
1 - 2	<b>Тема 1. Введение в физику полупроводников</b> Физика полупроводников как наука (история становления, современное состояние). Требования к технологии полупроводникового производства. История развития микроэлектроники (от микроэлектроники к наноэлектронике). Полупроводниковые гетероструктуры.	Всего аудиторных часов		
		4	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Тема 2. Основы квантовой теории твердого тела и зонной теории проводимости</b> Прямая и обратная решетки. Вид волновой функции свободного электрона. Вид волновой функции электрона в периодическом поле. Теорема Блоха. Квазиволновой вектор и квазиволновой импульс. Зона Бриллюэна. Примеры зоны Бриллюэна. Разрешенные значения квазиимпульса. Энергетические зоны. Концепция метода сильно связанных электронов и метода почти свободных электронов. Закон дисперсии. Кривые дисперсии и изоэнергетические поверхности. Металлы и полупроводники. Эффективная масса. Вырождение. Кривые дисперсии и изоэнергетические поверхности некоторых полупроводников.	Всего аудиторных часов		
		6	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	<b>Тема 3. Статистика электронов и дырок в полупроводниках</b> Распределение квантовых состояний в зонах (зоне проводимости и валентной зоне полупроводника). Распределение Ферми – Дирака. Концентрация носителей в невырожденном полупроводнике. Положение уровня Ферми. Уровень Ферми в собственном и примесном полупроводнике. Случай сильного вырождения.	Всего аудиторных часов		
		6	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Тема 4. Кинетические явления</b> Характер движения носителей заряда в полупроводниках. Диффузия и дрейф. Тепловая и дрейфовая скорости. Коэффициент диффузии и подвижность, их связь со средним временем между столкновениями. Соотношение Эйнштейна. Основные механизмы рассеяния носителей, ограничивающие подвижность. Основные кинетические явления: проводимость, эффект Холла и др.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0

9-15	<b>Физика полупроводников. Часть 2</b>	18	0	0
9 - 10	<b>Тема 5. Неравновесные носители заряда в полупроводниках</b> Возникновение неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Оптическая генерация. Темпы генерации и рекомбинации, время жизни. Квазиравновесие и квазиуровни Ферми. Механизмы рекомбинации. Время жизни при межзонной рекомбинации. Рекомбинация через примеси и дефекты. Коэффициент захвата на локальные уровни. Центры прилипания и центры рекомбинации. Фотоэлектрические явления: собственная и примесная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.	Всего аудиторных часов		
		4	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	<b>Тема 6. Контактные явления в полупроводниках (электрические переходы)</b> Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Зонная диаграмма при внешнем напряжении. Распределение электрического поля и потенциала в барьере Шоттки. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки. Механизм формирования и зонная диаграмма p-n-перехода. Поле и потенциал в p-n-переходе. Компоненты тока и квазиуровни Ферми в p-n-переходе. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода. Емкость p-n-перехода. Гетеропереходы. Изотипные и анизотипные гетеропереходы. Зонная диаграмма гетеропереходов. Распределение электрического поля и потенциала в гетеропереходах.	Всего аудиторных часов		
		6	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	<b>Тема 7. Полупроводниковые структуры пониженной размерности</b> Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.	Всего аудиторных часов		
		6	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Тема 8. Широкозонные полупроводниковые соединения (нитриды III группы, карбид кремния)</b> Карбид кремния: общие сведения о структуре, физических свойствах и применении. Нитриды металлов III группы: общие сведения о структуре, физических свойствах и применении. Гетероструктуры на основе нитридов металлов III группы.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы

АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы используются следующие технологии:

- лекции по курсу традиционного типа, на некоторых лекциях применяется компьютерный проектор для иллюстраций сложных устройств, систем и процессов;
- самостоятельная работа студентов.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1.1	З-ПК-1.1	З, к.р-8, к.р-15
	У-ПК-1.1	З, к.р-8, к.р-15
	В-ПК-1.1	З, к.р-8, к.р-15
ПК-7	З-ПК-7	З, к.р-8, к.р-15
	У-ПК-7	З, к.р-8, к.р-15
	В-ПК-7	З, к.р-8, к.р-15
ПК-9	З-ПК-9	З, к.р-8, к.р-15
	У-ПК-9	З, к.р-8, к.р-15
	В-ПК-9	З, к.р-8, к.р-15

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его

			излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 537 А71 Введение в теорию полупроводников : Учебное пособие для вузов, А. И. Ансельм, Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008
2. 537 Б81 Физика полупроводников : Учеб. пособие для вузов, Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г., М.: Наука, 1990
3. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Ч. Киттель , М.: МедиаСтар, 2006

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.38 3-47 Сборник задач по курсу "Основы микроэлектроники" : , Г.И.Зебрев, Москва: МИФИ, 2004

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Курс включает в себя лекционные занятия. Для успешного освоения курса полезно вспомнить некоторые темы из курса квантовой механики, например: волновая функция и энергетический спектр электрона в атоме водорода. На лекционных занятиях рассматриваются теоретические аспекты физики полупроводников. Помимо лекционных занятий курс включает в себя самостоятельную работу студентов. Данное время отводится для самостоятельной переработки и повторения материала, устранения долгов, накопленных во время семестра, а также для самостоятельной подготовки к сдаче теоретического материала (зачет). Во время самостоятельной подготовки к сдаче теоретического материала студенты учатся работать с научной литературой.

Итоговые баллы складываются из: 1) результатов контрольной работы; 2) результатов контроля посещаемости; 3) результатов оценки работы студента в интерактивном режиме. Получение положительной оценки по каждой проверочной работе (контрольной) является необходимым условием получения итоговой положительной оценки. В случае пропуска или получения отрицательной оценки контрольная работа должна быть переделана и сдана во время зачетной недели.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Курс логически разбит на несколько взаимосвязанных частей. В первом разделе (1-8 недели) рассматриваются основные понятия и подходы физики твердого тела применительно к полупроводникам, во втором (9-16 недели) – основные понятия физики полупроводников. Преподавателю обязательно следует указать все источники литературы, из которых берётся информация на лекциях. Важно, чтобы информация была донесена до студентов в чёткой и ясной форме. Укажем, на что необходимо обратить особое внимание при раскрытии каждой из тем, перечисленных в программе дисциплины. На все возникающие вопросы лучше всего давать ответы, ссылаясь на определённый источник, который студент может подробнее изучить дома самостоятельно. Следует обращать внимание на то, чтобы материал, прочитанный на лекциях, позволял студенту в полном объеме справиться с контрольной работой.

Автор(ы):

Гусев Александр Сергеевич