

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Введение в физику полупроводников

по направлению подготовки

03.03.03 Радиофизика

Направленность (профиль) подготовки:
Радиофизика, электроника и информационные системы

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
М. Л. Громов

Председатель УМК
А. П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.

ПК-1 Способен проанализировать поставленную задачу в области радиофизики и электроники, осуществлять поиск, обобщение и использование научно-технической информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональной задачи.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

ИПК 1.1 Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования.

2. Задачи освоения дисциплины

– изучить модели, описывающие энергетический спектр и поведение носителей заряда в полупроводниковых материалах;

– научиться применять понятийный аппарат и модели зонной теории и статистики электронов и дырок в полупроводниках при проведении расчётов или измерений параметров полупроводниковых материалов.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор. Дисциплина входит в модуль «Твердотельная электроника».

4. Семестр освоения и форма промежуточной аттестации по дисциплине

Пятый семестр, зачет.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: «Математический анализ», «Физика», «Радиоэлектроника».

6. Язык реализации

Русский.

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 з.е., 72 часа, из которых:

– лекции: 32 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Раздел 1. Структура кристаллов

Понятия ближнего и дальнего порядков в твердых веществах. Вектор трехмерной трансляции. Индексы Миллера. Основные типы кристаллических решеток. Прямая и обратная кристаллические решетки.

Раздел 2. Основы зонной теории твердого тела

Спектр электронов в изолированном атоме. Уравнение Шредингера для кристалла, одноэлектронное приближение. Зоны разрешенных значений энергии электрона в кристалле. Понятие зоны Бриллюэна.

Движение носителей заряда в кристалле под действием электрического поля, понятие эффективной массы; физический смысл эффективной массы. Связь энергии носителей заряда с эффективной массой.

Плотность квантовых состояний в разрешенных зонах. Зонная структура некоторых полупроводников (германий, кремний, арсенид галлия). Зависимости плотности квантовых состояний в разрешенных зонах от энергии.

Раздел 3. Электроны и дырки в полупроводниках

Типы примесей в полупроводниках. Функция распределения в статистике Ферми – Дирака. Концентрации электронов и дырок в разрешенных зонах и на примесных уровнях. Уравнение электронейтральности.

Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике. Температурная зависимость уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси. Вырожденные и частично вырожденные полупроводники.

Перераспределение носителей заряда в компенсированных полупроводниках. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в частично компенсированном полупроводнике. Степень компенсации полупроводника.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, устных опросов в процессе занятий, проведения коллоквиума по теме «Энергетический спектр электронов в кристалле».

Самостоятельная работа студентов проводится в форме изучения учебного материала по теме занятия, подготовке к коллоквиуму, подготовке к зачёту.

Проведение контрольных опросов и коллоквиума направлено на проверку достижения обучающимися индикаторов компетенций: ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 1.1 (Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования).

Примеры контрольных вопросов по дисциплине для самостоятельной работы

1 Что собой представляет энергетический спектр электронов в изолированном атоме? Каков его характер, от чего зависит энергия электронов в изолированном атоме?

2 Физический смысл эффективной массы. Зависимость эффективной массы носителей заряда от номера зоны.

3. Функция Ферми – Дирака для электронов и дырок, её зависимость от энергии и температуры.

4. Изобразить и прокомментировать графики температурной зависимости уровня Ферми и концентрации электронов в полупроводнике p -типа.

Примеры вопросов к коллоквиуму

1. Уравнение Шредингера для кристалла: записать все составляющие оператора энергий; суть адиабатического приближения.

2. Решение уравнения Шредингера для электронов в кристалле методом Кронига-Пени (приближения, используемые в данном методе). Функция Блоха.

3. Используя уравнение $\cos \alpha a + (P \sin \alpha a)/\alpha a = \cos(k_x a)$, получить выражение для $E(k)$ в случае абсолютно свободных электронов; провести анализ полученного выражения.

Результаты контроля фиксируются в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в пятом семестре проводится в устной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса по двум темам дисциплины. Продолжительность зачёта 1,5 часа.

Вопросы каждого билета формулируются таким образом, чтобы проверить сформированность общепрофессиональной и профессиональной компетенций с использованием их индикаторов: ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 1.1 (Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования).

Примеры билетов для устного зачёта

Билет №1

Вопрос 1. Используя уравнение $\cos \alpha a + (P \sin \alpha a)/\alpha a = \cos(k_x a)$, получить выражение для $E(k)$ в случае сильно связанных электронов; провести анализ полученного выражения.

Вопрос 2. Функция распределения Ферми – Дирака для дырок в разрешенной зоне; ее зависимость от энергии и температуры.

Билет №2

Вопрос 1. Используя уравнение $E(k) = A_n + (-1)^n B_n \cos(ka)$, дать понятие эффективной массы носителей заряда.

Вопрос 2. Температурная зависимость уровня Ферми и концентрации носителей заряда в невырожденном полупроводнике n -типа (область низких температур, первый и второй участки зависимости $\ln n_0$ от $1/T$).

Результаты промежуточной аттестации по дисциплине характеризуются оценками «зачтено» или «не зачтено» в соответствии с таблицей.

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения			
		Не зачтено	Зачтено		
ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать	ИОПК-1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении	Не имеет представления об основных характеристиках полупроводниковых	Имеет общее представление о некоторых характеристиках полупроводниковых	Допускает отдельные неточности в описании основных характеристик полупроводниковых	Имеет полное представление об основных характеристиках полупроводниковых

их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.	профессиональной деятельности.	материалов.	материалов.	иковых материалов.	иковых материалов.
ПК-1 Способен проанализировать поставленную задачу в области радиофизики и электроники, осуществлять поиск, обобщение и использование научно-технической информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональной задачи.	ИПК-1.1 Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования.	Не понимает смысла физических процессов, определяющих их характеристики полупроводниковых материалов. Не знает общие алгоритмы расчета характеристик полупроводниковых материалов.	Путается в описании теоретических моделей и физических процессов в полупроводниковых материалах. Испытывает затруднения в объяснении смысла измеряемого параметра или характеристики полупроводникового материала.	Грамотно представляет теоретические модели и физические процессы в полупроводниковых материалах; допускает незначительные ошибки в их интерпретации. Поясняет принципы определения характеристик к полупроводниковых материалов, допуская незначительные ошибки.	Грамотно представляет теоретические модели и физические процессы в полупроводниковых материалах, свободно и убедительно их интерпретирует. Свободно использует теоретические модели для описания характеристик к полупроводниковых материалов.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6212>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (п. 9, 10).

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6212>

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников / Шалимова К. В.. - 4-е изд. - Санкт-Петербург : Лань. - 384 с. - 2021. - Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). - URL: <https://e.lanbook.com/book/167840>

2. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников / Ансельм А. И. - 4-е изд. - Санкт-Петербург : Лань. - 624 с. - 2021. - Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). - URL: https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=71742

3. Панюшкин Н. Физика полупроводников и полупроводниковые приборы. - Воронеж : ФГБОУ ВПО ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2016. - Электронный ресурс: ЭБС Знаниум (доступно в локальной сети ТГУ). - 131 с.. URL: <http://znanium.com/catalog/document?id=295140>

б) дополнительная литература:

1. Сорокин В.С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник для студентов вузов. [Т. 1] / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. - Изд. 2-е, испр. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2015. - 1 онлайн-ресурс (442 с.). URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=67462

2. Гуртов В.А. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие для студентов вузов / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко ; науч. ред. Л.А. Алешина. - Москва: Техносфера, 2007. - 518 с.

3. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников: учебное пособие для студентов физических специальностей вузов / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1990. - 685 с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>

2. Новые полупроводниковые материалы. Характеристики и свойства: база данных ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – URL: <http://www.matprop.ru/>

3. eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>

4. Scopus: база данных цитирования издательства Elsevier(доступ из сети НИ ТГУ).– URL: <http://www.scopus.com/>

5. WebofScience: база данных цитирования компании ClarivateAnalytics(доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://webofknowledge.com/WOS>

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакетпрограмм. Включаетприложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);

– публично доступные облачные технологии (GoogleDocs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Актру»).

15. Информация о разработчиках

Калыгина Вера Михайловна, кандидат физико-математических наук, доцент, радиофизический факультет НИ ТГУ, кафедра полупроводниковой электроники, доцент.