

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

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ:
Декан физического факультета

С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Основы физики твердого тела

по направлению подготовки
03.03.02 – Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2021

Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.03.07

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

– ОПК-2 - Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИПК-1.1 - Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

– ИОПК-2.2 - Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования.

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить понятийный аппарат и приобрести базовые знания в области теории твердого тела, в основном связанной с электрофизическими явлениями.

– Научиться применять понятийный аппарат и полученные базовые знания для решения научных и практических задач в области теории твердого.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в профессиональный модуль по выбору «Физика плазмы».

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 7, зачет.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины обучающимся необходимы знания по дисциплинам общего курса физики таким, как «Механика» (механические свойства твердых тел), «Термодинамика» (тепловые свойства твердых тел), «Электричество и магнетизм» (электрические и магнитные свойства твердых тел), «Оптика» (оптические и фотоэлектрические свойства твердых тел, дифракция рентгеновских лучей на кристаллах, квантовые генераторы), «Атомная физика» (рентгеновские спектры, методы рентгеноструктурного анализа), а также некоторым разделам высшей математики (математического анализа, линейной алгебры, теории дифференциальных уравнений).

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

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

– лекции: 16 ч.;

– практические занятия: 16 ч.;

в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Введение. Структура кристаллов. Кристаллическая решетка.

Типы химических связей. Реальные кристаллы. Дефекты. Кристаллическая решетка (КР) и ее описание. Элементы симметрии КР. Классификация КР. Индексы Миллера. Обратная решетка. 3-мерный ряд Фурье. Условия дифракционного отражения. Зоны Бриллюэна.

Тема 2. Колебания кристаллической решетки. Теплоемкость кристаллов.

Колебания однородной цепочки масс. Колебания сложной цепочки масс. Энергия колебаний. Нормальные колебания. Фононы. Колебания 3-мерной кристаллической решетки. Теория теплоемкости твердых тел Дебая.

Тема 3. Электроны в кристалле.

Одноэлектронное приближение. Функция Блоха и ее свойства. Приближение слабосвязанных электронов. Лекция. Приближение сильносвязанных электронов. Методы расчета состояний электрона. Зонная структура энергетического спектра. Изоэнергетические поверхности. Реальная структура зон. Металлы, диэлектрики, полупроводники. Плотность состояний электронов вблизи краев зон. Электроны проводимости и дырки и их динамические характеристики и параметры.

Тема 4. Статистика носителей заряда в полупроводниках.

Функция распределения электронов по энергии и концентрация носителей заряда. Вырожденные и невырожденные полупроводники. Собственный полупроводник. Активные примеси в полупроводниках. Уровень Ферми и концентрация носителей заряда в примесных полупроводниках.

Тема 5. Перенос носителей заряда в полупроводниках.

Закон сохранения. Поток носителей заряда. Уравнения переноса частиц. Случай статистического равновесия. Соотношение Эйнштейна. Неравновесные процессы при малых возмущениях. Дебаевский радиус. Время релаксации Максвелла. Время жизни неосновных носителей заряда. Длина инжекции.

Тема 6. Контактные явления.

Работа выхода. Контакт металлов. Контакты «металл – полупроводник». p-n-переход. Изотипные переходы. Омические контакты. Диоды, транзисторы.

Тема 7. Явления в сильных полях.

Разогрев носителей заряда. Потенциальная и ударная ионизация. Туннельный эффект. Эффект Ганна. Туннельный диод.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения контрольных работ, заданий и тестов по материалам курса, и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 10, выполнение контрольных заданий – 20, тестов – 10. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в седьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса и задачу. Один из вопросов является «понятийным», то есть не требующим углубленного изложения. Второй вопрос является

«фундаментальным», ответ на который должен содержать логическую цепь рассуждений, как правило, включающую математические выкладки. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Ниже даны примеры зачетных вопросов.

1-й вопрос зачета («понятийный»)

1. Типы химических связей в кристаллах и их особенности: насыщенность, направленность, полярность.
2. Методика построения зон Бриллюэна
3. Количество ветвей колебаний в кристаллической решетке.
4. Электроны проводимости и дырки.
5. Диффузия и дрейф носителей заряда в полупроводнике. Общая формулировка системы уравнений. Состояние равновесия.
6. Эффект Ганна.

2-й вопрос зачета («фундаментальный»)

1. Закономерности колебания одномерной цепочки масс в приближении упругих сил. Дисперсионное соотношение.
2. Фононы и их статистика в равновесном состоянии.
3. Приближение сильной связи для простой кубической решетки.
4. Зависимость уровня Ферми от температуры в полупроводнике. Общая формулировка задачи и ее приближенное решение для полупроводника с одним типом проводимости.
5. Свойства контактов в системе металл-полупроводник в зависимости от возможных комбинаций работ выхода и типа полупроводника. Размер области обеднения носителями заряда барьеров Шоттки.
6. Контакт электронного и дырочного полупроводников. Вольтамперная характеристика в приближении диодной теории.

Ниже даны примеры задач, включенных в экзаменационные билеты:

1. Для трех типов кубической решетки (ПК, ОЦК и ГЦК) с ребром a определить количество узлов n на одну элементарную ячейку, количество узлов в единице объема N , число ближайших соседей m и расстояние между ними d (дан рисунок решеток).

2. ГЦК и ОЦК решетки могут быть построены на примитивных ромбоэдрических ячейках, "вытянутой" (в первом случае) или «сплюсненной» (во втором случае) вдоль главной диагонали куба (дан рисунок). Во сколько раз объем примитивной элементарной ячейки меньше объема элементарного куба Бравэ ОЦК и ГЦК?

3. Найти расстояние между атомами углерода в кристалле алмаза, если плотность алмаза равна $\rho = 3.52 \text{ г/см}^3$ (дан рисунок расположения атомов).

4. Написать индексы Миллера для плоскостей в примитивной кубической решетке (на рисунке даны несколько вариантов).

5. Линейная цепочка атомов с плотностью $5 \cdot 10^7$ атомов/см совершает колебания. Определить максимальную частоту колебаний в цепочке, если скорость низкочастотного звука в ней равна $3 \cdot 10^3$ м/с. Во сколько раз групповая скорость больше фазовой скорости для длины волны, равной трем постоянным решетки?

6. Определить частоту длинноволновых оптических фононов в цепочке из сгруппированных попарно атомов с плотностью пар $2 \cdot 10^7$ атомов/см. Массы атомов считать одинаковыми. Скорость продольного звука в этой цепочке равна 5 км/с.

7. Оценить дебаевскую температуру германия и кремния, если скорость продольного звука в них равна, соответственно, 3,83 и 6,6 км/с, а плотность $5,33$ и $2,32 \text{ г/см}^3$.

8. Температура Дебая серебра равна 208 К. Определить максимальную энергию акустического фонона и среднее число фононов с этой энергией при $T = 300 \text{ К}$.

9. Оценить энергию Ферми в кристалле натрия, если известно, что его валентность равна 1, решетка ОЦК и плотность 0.97 г/см^3 . Оценить из квадратичного дисперсионного уравнения электронов волновой вектор, соответствующий энергии Ферми.

10. Определить минимальную концентрацию водородоподобных доноров в антимониде индия (InSb), при которой станут заметными эффекты, связанные с перекрытием орбит примесных атомов. Для InSb диэлектрическая проницаемость $\epsilon=17$, эффективная масса электронов $m_n^* = 0.014 m_0$.

11. При какой температуре произойдет истощение примеси в теллуриде кадмия (CdTe) если энергия ионизации доноров равна 0.013 эВ , а их концентрация составляет 10^{15} см^{-3} . Эффективная масса электрона в CdTe $m_n^* = 0.11 m_0$

12. Определить концентрацию электронов и дырок в кремнии при $T = 300 \text{ К}$, если концентрации примеси мышьяка (As) в нем $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а примеси бора (B) $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Эффективные массы электронов и дырок в кремнии $m_{dn}^* = 1.08 m_0$, $m_{dp}^* = 0.56 m_0$. Ширина запрещенной зоны кремния $E_g = 1.11 \text{ эВ}$.

13. Определить контактную разность потенциалов между собственным германием и вольфрамом. Работа выхода электронов из вольфрама $e\phi_W = 4.54 \text{ эВ}$, энергия электронного сродства в германии $e\chi_{Ge} = 4.13 \text{ эВ}$, ширина запрещенной зоны германия $E_g = 0.66 \text{ эВ}$.

14. На основе диодной теории выпрямления оценить силу тока через диод Шоттки при температуре 300 К при напряжении 0.15 В для случаев прямого и обратного смещения. Барьер Шоттки образован контактом вольфрама и кремния n-типа с концентрацией электронов $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Площадь контакта составляет 1 мм^2 .

При выставлении итоговой аттестации обучающегося используется система оценивания зачет-незачет. При этом зачет выставляется по величине суммарного балла исходя из результатов ответов на зачете (60%) и текущей аттестации в течение семестра (40%). Отметка «зачет» выставляется при суммарном балле 80–100. В случае, если суммарный балл составляет менее 80 выставляется отметка «незачет».

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21955>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Типы химических связей в кристаллах и их особенности: насыщаемость, направленность, полярность.
2. Методика построения зон Бриллюэна
3. Количество ветвей колебаний в кристаллической решетке.
4. Электроны проводимости и дырки.
5. Диффузия и дрейф носителей заряда в полупроводнике. Общая формулировка системы уравнений. Состояние равновесия.
6. Эффект Ганна.
7. Закономерности колебания одномерной цепочки масс в приближении упругих сил. Дисперсионное соотношение.
8. Фононы и их статистика в равновесном состоянии.
9. Приближение сильной связи для простой кубической решетки.
10. Зависимость уровня Ферми от температуры в полупроводнике. Общая формулировка задачи и ее приближенное решение для полупроводника с одним типом проводимости.
11. Свойства контактов в системе металл-полупроводник в зависимости от возможных комбинаций работ выхода и типа полупроводника. Размер области обеднения носителями

заряда барьеров Шоттки.

12. Контакт электронного и дырочного полупроводников. Вольтамперная характеристика в приближении диодной теории.

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к зачету.

Вопросы, вынесенные на самостоятельное изучение:

1. Условия дифракционного отражения в кристаллах. Теории Лауэ и Эвальда
2. Иллюстративная теория Кронига-Пени.
3. Электронные возбуждения в кристаллах.
4. Неупорядоченные системы — аморфные полупроводники.
5. p-i-n-структуры.
6. Электрофизические свойства тонких металлических пленок.
7. Эпитаксиальные пленки.
8. Поверхностные состояния и поверхностная проводимость.
9. Эффект поля и его практическое использование. Полевые транзисторы.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: М: ВШ, 1985, 384 с.
2. Блейкмор Дж. Физика твердого тела: М: Мир, 1988, 608 с.
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М., Энергия, 1976

б) дополнительная литература:

1. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела: М: Мир, 1969, 608 с..
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М: Наука, 1978.
3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М: Наука, 1978
4. Шаскольская М. П. Кристаллография. М., ВШ, 1976.

в) ресурсы сети Интернет:

1. А.В. Малеев. Лекции по физике твердого тела. Уч. пособие, Владимир, 2015, - https://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Bacalavr_academ/44.03.05/Fizika_Matematika/Metod_doc/Fizika_Tverdogo_Tela.pdf
2. <https://kaf70.mephi.ru/pdf/kittel.pdf>
3. https://portal.tpu.ru/SHARED/e/ELP/teaching/Physics/Tab/FKS_Matykhin.pdf

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: 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 (Google Docs, 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/>
– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.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

Шипилова Анна Викторовна, кандидат технических наук, кафедра физики плазмы физического факультета ТГУ, доцент.