

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики твердого тела

«ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по подготовке к практическим занятиям

*для обучающихся по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и
микросистемная техника», профиль «Компоненты микро- и
наносистемной техники» очной формы обучения*

Воронеж 2021

УДК 621.362
ББК 22.37

Составители:

д-р физ.-мат. наук О.В. Стогней

Физика конденсированного состояния: методические указания по подготовке к практическим занятиям для обучающихся по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», профиль «Компоненты микро- и наносистемной техники» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: О.В. Стогней - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 26 с.

В методических указаниях приводится перечень изучаемых тем, вопросы к этим темам и список литературы, в которой приводится теоретический материал для освоения тем и ответов на контрольные вопросы.

Предназначены для студентов 2 курса, обучающихся по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», профиль «Компоненты микро- и наносистемной техники».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле "МУ Практик Физика Конденс Сост.pdf".

Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

УДК 621.362
ББК 22.37

Рецензент – В.В. Ожерельев, канд. физ-мат. наук, доц. кафедры технологии сварочного производства и диагностики ВГТУ

Рекомендовано методическим семинаром кафедры ФТТ и методической комиссией ФРТЭ Воронежского государственного технического университета в качестве методических материалов

Введение

Практическое занятие – одна из основных форм организации учебного процесса, заключающаяся в выполнении студентами под руководством преподавателя комплекса учебных заданий с целью усвоения научно-теоретических основ учебной дисциплины, приобретения умений и навыков, опыта творческой деятельности

Целью практического занятия является привитие умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачами практических занятий являются:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Подготовку к каждому практическому занятию необходимо начинать с ознакомления с планом практического занятия, который отражает содержание предложенной темы. Тщательное продумывание и изучение вопросов плана основывается на проработке текущего материала лекции, а затем изучения обязательной и дополнительной литературы, рекомендованной к данной теме. Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения дисциплины.

Результат такой работы должен проявиться в способности свободно ответить на теоретические вопросы практикума, выступать и участвовать в коллективном

обсуждении вопросов изучаемой темы, правильно выполнять практические задания и контрольные работы.

В процессе подготовки к практическим занятиям, необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной литературы. При всей полноте конспектирования лекции в ней невозможно изложить весь материал из-за лимита аудиторных часов. Поэтому самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной литературой, материалами периодических изданий и Интернета является наиболее эффективным методом получения дополнительных знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Тема Типы химических связей. Кристаллическая решётка

1. Перечислить основные типы межатомных взаимодействий.
2. Какой тип межатомных взаимодействий зависит от углов между хим. связями, что приводит к хрупкости материалов?
3. Какой тип межатомных взаимодействий непосредственно связан с взаимодействием зарядов?
4. Какой тип межатомных взаимодействий возникает между атомами всегда и в любом случае?
5. Если материал проявляет высокую твердость, прочность и пластичность какой тип межатомных взаимодействий реализуется в этом материале?
6. Если материал проявляет высокую твердость, прочность и хрупкость какой тип межатомных взаимодействий реализуется в этом материале?
7. Что задают индексы Миллера, если они заключены в "квадратных" скобках $[hkl]$?
8. Что задают индексы Миллера, если они заключены в "круглых" скобках (hkl) ?
9. Нарисовать в декартовых координатах то, что обозначено индексами Миллера: $[011]$; $[101]$; $[123]$
 (001) ; (111) ; (110)

Тема Дефекты в конденсированных средах.

1. Перечислить точечные дефекты.
2. Перечислить линейные (одномерные) дефекты.
3. Перечислить двумерные дефекты.
4. Что такое дефект «по Френкелю»?

5. Что такое дефект «по Шоттки»?
6. В чем основное отличие тепловых дефектов от дефектов другого типа?
7. От чего зависит концентрация дефектов «по Френкелю»?
8. От чего зависит концентрация дефектов «по Шоттки»?
9. Точечные дефекты являются неподвижными или могут мигрировать в объеме твердого тела?
10. Возможно ли взаимодействие между точечными дефектами?
11. Что такое дислокация?
12. Дислокации существуют в твердом теле всегда и их число постоянно или они могут возникать в объеме твердого тела и перемещаться, взаимодействуя друг с другом?
13. Как образуются дислокации?
14. Какой тип межатомных связей считается самым слабым?

Тема Элементы физической статистики

1. В чем отличие *термодинамического* подхода в описании состояния макроскопической системы (то есть коллектива частиц) от *статистического*?
2. Дать определение понятию "химический потенциал" (в контексте термодинамического способа описания состояния системы).
3. Основная особенность статистического описания состояния макроскопической системы.
4. От чего зависит степень точности статистического способа описания состояния системы?
5. Основная особенность частиц, относящихся к фермионам. Примеры фермионов.
6. Основная особенность частиц, относящихся к бозонам. Примеры бозонов.

7. Какой физический смысл имеет понятие “полная статистическая функция распределения” ($N(E)dE$)?
8. Какой физический смысл имеет понятие “число состояний” ($g(E)dE$)?
9. Какой физический смысл имеет понятие “функция распределения” $f(E)$?
10. Состояние каких частиц описывает распределение Максвелла-Больцмана?
11. Написать математическое выражение для функции Максвелла-Больцмана.
12. Нарисовать график функции распределения Максвелла-Больцмана $f_M(E)$ (то есть нарисовать зависимость f_M от энергии).
13. Нарисовать график зависимости числа частиц в невырожденном коллективе от энергии (полная функция распределения М-Б).
14. Состояние каких частиц описывает распределение Ферми-Дирака?
15. Электрические свойства каких материалов могут быть описаны с помощью функции Ферми-Дирака?
16. Написать математическое выражение для функции Ферми-Дирака.
17. Что такое уровень Ферми (энергия Ферми)? Что он определяет?
18. Нарисовать график функции распределения Ферми-Дирака $f_F(E)$ при $T=0$ (то есть нарисовать зависимость f_F от энергии).
19. Нарисовать график зависимости числа частиц в вырожденном коллективе от энергии (полная функция распределения Ф-Д) при $T=0$.
20. Показать, как будет меняться функция распределения Ф-Д при повышении температуры. Что это означает?

Тема 4. Нормальные колебания решётки. Фононы. Тепловые свойства конденсированных сред.

1. Фонон можно считать квазичастицей. В твердом теле при ненулевой температуре существует много фононов. *Вопрос:* Энергия разных фононов различна или может быть ситуация, когда много разных фононов имеют абсолютно одинаковое значение энергии?
2. Все твердые тела проводят тепло. За счет чего это происходит? Каков механизм теплопроводности?
3. Отличается ли механизм теплопроводности металлов от механизма теплопроводности диэлектриков? Если нет - почему? Если да - в чем разница?
4. От чего зависит абсолютное значение коэффициента теплопроводности диэлектрика (ведь у разных диэлектриков теплопроводность разная)?
5. Электрический ток это направленное движение носителей заряда. Что заставляет элетроны двигаться направленно?
6. Электрический ток это направленное движение носителей заряда. Электроны в металле при фиксированной температуре обладают одинаковой энергией или разной?
7. Электросопротивление металлов при увеличении температуры возрастает, с чем это связано?
8. Влияют ли дефекты решётки на электросопротивление металлов?
9. Влияют ли фононы на электросопротивление металлов?
10. В каких веществах сопротивление выше: в чистых металлах или в сплавах? Ответ аргументировать.
11. В чем суть закона Видемана -Франца?
12. Выполняется ли закон Видемана -Франца в диэлектриках? Ответ аргументировать.
13. Объяснить, почему зависимость сопротивления от концентрации немонотонная:

Тема Элементы зонной теории конденсированных сред.

1. Что представляют собой энергетический спектр электронов в изолированном атоме?
2. Чем отличается спектр разрешенных электронных состояний в изолированном атоме от спектра разрешенных электронных состояний в твердом теле, сформированном из этих атомов?
3. Чем отличаются электроны, чья энергия соответствует валентной зоне, от электронов, «расположенных» в зоне проводимости?
4. Чем, с точки зрения зонной теории, отличаются металлы от полупроводников?
5. Чем, с точки зрения зонной теории, отличаются диэлектрики от полупроводников?
6. Что такое «электрон-вольт»?
7. Чему равна ширина запрещенной зоны полупроводника (примерно)? Чему она равна в кремнии ($\Delta E_{Si}=1.12$ эВ)?
8. Что такое собственный полупроводник?
9. Что такое «дырка» в контексте зонной теории?
10. Что такое примесный полупроводник, донорная примесь и акцепторная примесь? К чему приводит добавление примеси?
11. Чем собственный полупроводник отличается от примесного?

Тема Статистика равновесных носителей заряда в полупроводниках

1. Написать выражения для равновесной концентрации электронов в зоне проводимости ($n_0 = \dots$).
2. Написать выражения для равновесной концентрации дырок в валентной зоне ($p_0 = \dots$).
3. Что такое «равновесное состояние» применительно к п/п? Дать определение равновесного состояния п/п.
4. В чем суть «закона действующих масс». Как он записывается математически.
5. Нарисовать зонную диаграмму собственного п/п. Показать где находится уровень Ферми.

6. Нарисовать зонную диаграмму донорного п/п и показать, где расположен уровень Ферми, учитывая, что примесь НЕ ионизирована.

- Сместится ли уровень Ферми, если примесь будет ионизирована. Если да, то куда (показать на рисунке).

7. Нарисовать зонную диаграмму акцепторного п/п и показать, где расположен уровень Ферми, учитывая, что примесь НЕ ионизирована.

- Сместится ли уровень Ферми, если примесь будет ионизирована. Если да, то куда (показать на рисунке).

8. Записать уравнение электронейтральности. В чем его физический смысл.

9. Записать уравнение электронейтральности для донорного полупроводника.

10. Нарисовать зависимость $\ln(n)$ от $1/T$ для донорного полупроводника и написать для каждого линейного участка зависимости какой тип проводимости реализуется.

11. При каких условиях в примесном п/п реализуется собственная проводимость.

Тема Неравновесные носители заряда. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда

12. Что такое неравновесные носители заряда? Чем они отличаются от равновесных.

13. Дать определение рекомбинации и генерации.

14. Записать математическое выражение для «принципа детального равновесия» (для равновесного состояния).

15. Как математически связана концентрация неравновесных носителей заряда и равновесных?

16. Перечислить механизмы генерации в п/п.

17. Перечислить виды межзонной рекомбинации.

18. Что собой представляют «ловушки», через которые осуществляется рекомбинация свободных носителей заряда в п/п?

19. Суть (механизм) биполярной генерации.

20. Суть (механизм) монополярной генерации.

21. Что такое дрейф носителей заряда?
22. Чем отличается дрейфовая скорость электронов от тепловой?
23. Что такое дрейфовый ток? Записать выражение для дрейфового тока.
24. Физическая причина возникновения диффузионного тока? Записать выражение для диффузионного тока.
25. Что определяет уравнение непрерывности, какие процессы оно учитывает? Записать уравнение непрерывности для электронов.

Тема Кинетические явления в полупроводниках

1. Дать определение понятия "время релаксации".
2. Какие взаимодействия электронов с дефектами называются упругими, какие - неупругими? Привести примеры упругих и неупругих взаимодействий, объяснить, почему они таковыми являются.
3. В чем смысл "кинетического уравнения"?
4. Что такое стационарное состояние?
5. Если рассматривается стационарное состояние, как в этом случае выглядит кинетическое уравнение?
6. Электроны рассеиваются на нейтральных атомах и ионах: какое рассеяние более сильно влияет на движение электронов (на атомах или ионах)? Влияет ли температура на то, какой именно механизм будет определяющим?
7. Какой тип дефектов в большей степени снижает длину свободного пробега электронов при нормальных условиях (комнатная температура). Влияет ли температура на порядок значимости дефектов?
8. Что такое эффективное сечение рассеяния? У каких дефектов оно наибольшее?
9. Что такое теплопроводность? Дать определение коэффициента теплопроводности.
10. Может ли диэлектрический материал проводить тепло?
11. Что обеспечивает теплопроводность диэлектриков?

12. Что обеспечивает теплопроводность металлов?
13. Закон Видемана-Франца.
14. Суть эффекта Зеебека.
15. Физическая причина возникновения эффекта Зеебека.
16. В каких материалах (п/п или металл) эффект Зеебека численно больше?
17. Суть эффекта Пельтье.
18. Физическая причина возникновения эффекта Пельтье в материалах с одним типом проводимости.
19. Физическая причина возникновения эффекта Пельтье в материалах с разным типом проводимости.
20. Критерий сильного (или слабого) магнитного поля.
21. В чем суть эффекта Холла?
22. Что такое коэффициент Холла? Какую характеристику полупроводника можно определить исследуя эффект Холла?
23. Что такое угол Холла?
24. Причина возникновения баллистического магнитосопротивления. Как проявляется магнитосопротивление?
25. Критерий сильного (или слабого) магнитного поля.
26. Эффект Холла в полупроводниках с одним типом носителей заряда.
27. Что такое коэффициент Холла? Какую характеристику полупроводника можно определить исследуя эффект Холла?
28. Что такое угол Холла?
29. В чем заключаются различия эффекта Холла и эффекта Нернста-Эттингсгаузена?

Тема Контактные явления

1. Что такое работа выхода электрона?
2. Чему численно равна термоэлектронная работа выхода?
3. Если соединить друг с другом металл и полупроводник на границе возникает заряд. Его появление обусловлено тем, что ...
4. Что является признаком того, что контакт металл- п/п "пришёл" к равновесному состоянию?

5. Чем определяется величина контактной разности потенциалов ($e\phi_k$) на границе металл - полупроводник?
6. Имеется контакт металл-полупроводник. В области контакта возникает объёмный заряд. Заряд какого знака возникает в металле?
7. В области контакта пространственный заряд возникает как со стороны металла, так и со стороны полупроводника. Заряды, возникающие по разные стороны от границы разные по величине?
8. Какой смысл несёт в себе фраза "выпрямление на контакте металл-полупроводник"?
9. Имеется контакт металл-полупроводник. К нему прикладывается внешнее напряжение. В каком случае возникает "прямое смещение"?
10. Есть две теории выпрямления тока на контакте металл-полупроводник: диодная и диффузионная. В чем особенность диодной теории.
11. Что такое p-n переход?
12. В полупроводнике сформирован p-n переход за счет введения примесей разного типа. Ширина запрещённой зоны одинакова и в p и в n области. За счет чего начинается перераспределение носителей заряда в области перехода?
13. В условиях равновесия через p-n переход перемещаются носители заряда. Можно выделить дрейфовый и диффузионные токи.
14. Чем обусловлен дрейфовый ток?
15. В условиях равновесия на p-n переходе возникает потенциальный барьер. Это потенциальный барьер для каких носителей заряда?
16. На ВАХ p-n перехода существует "обратный ток". Какими носителями заряда он создается?
17. В силу чего p-n переход можно рассматривать как конденсатор?
18. Что такое гетеропереход?

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Критерии оценки учебных действий студентов по решению учебно-профессиональных задач на практических занятиях:

Оценка «отлично» выставляется, если студент активно работает в течение всего практического занятия, дает полные ответы на вопросы преподавателя в соответствии с планом практического занятия и показывает при этом глубокое овладение лекционным материалом, способен выразить собственное отношение по данной проблеме, проявляет умение самостоятельно и аргументированно излагать материал, анализировать явления и факты со ссылками на соответствующие нормативные документы, делать самостоятельные обобщения и выводы, заключения, рекомендации, правильно выполняет все этапы практического задания.

Оценка «хорошо» выставляется при условии соблюдения следующих требований: студент активно работает в течение практического занятия, вопросы освещены полно, изложения материала логическое, обоснованное фактами, со ссылками на соответствующие нормативные документы и литературные источники, освещение вопросов завершено выводами, студент обнаружил умение анализировать факты и события, а также выполнять учебные задания. Но в ответах допущены неточности, некоторые незначительные ошибки, имеет место недостаточная аргументированность при изложении материала, недостаточно четко сделаны обобщение и выводы.

Оценка «удовлетворительно» выставляется в том случае, когда студент в целом овладел сути вопросов по данной теме, обнаруживает знание лекционного материала и учебной литературы, пытается анализировать факты и события, делать выводы и решать задачи. Но на занятии ведет себя пассивно, отвечает только по вызову преподавателя, дает неполные ответы на вопросы, допускает грубые ошибки при освещении

теоретического материала, не может обобщить и сделать четкие логические выводы.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, когда студент обнаружил несостоятельность осветить вопросы или вопросы освещены неправильно, бессистемно, с грубыми ошибками, отсутствуют понимания основной сути вопросов, выводы, обобщения, обнаружено неумение решать учебные задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филимонова, Н. И. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Н. И. Филимонова, Р. П. Дикарева. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2016. — 136 с. [Текст : электронный] // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : URL: <https://www.iprbookshop.ru/91569.html>

2. Физика конденсированного состояния. Дефекты строения в металлах : учебник / А. Н. Чуканов, Н. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев [и др.] ; под редакцией А. Н. Чуканова. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 300 с. [Текст : электронный] // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : URL: <https://www.iprbookshop.ru/115191.html>

3. Черевко, А. Г. Физика конденсированного состояния. Часть 1. Кристаллы и их тепловые свойств : учебное пособие / А. Г. Черевко. — Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. — 81 с. — [Текст : электронный] // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : URL: <https://www.iprbookshop.ru/69566.html>

4. П.В.Павлов, А.Ф.Хохлов Физика твердого тела Учеб. пособие / - 3-е изд., стереотип. - М. : Высш. шк., 2000. - 494с.

5. Байков Ю.А. Физика конденсированного состояния Учеб. пособие. - М. : Бинум. Лаборатория знаний, 2011. - 293 с.

6. Сысоев О.И. Физические основы твердотельной электроники Учеб. пособие. Ч.1. - Воронеж : ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2012. - 213 с.

7. Л.И.Янченко, О.В.Стогней Методические указания 12-2015 к лабораторным работам № 1-4 по курсу «Физика конденсированного состояния» для студентов направления «Нанотехнологии и микросистемная техника» (профиль «Компо-

ненты микро- и наносистемной техники») очной формы обучения – 2015. – 45 с. (электронное издание)

8. С.А.Гриднев, Л.Н. Коротков Методические указания к выполнению лабораторных работ № 1-4 по дисциплине «Физика твердого тела» для студентов специальности «Техническая физика» дневной формы обучения – 2007 – 38 с. (электронное издание)

9. А.В.Калгин, Л.Н.Коротков, О.В.Стогней, Л.И.Янченко Методические указания 124-2014 к выполнению практических работ по дисциплине «Физика твердого тела» для студентов направления «Техническая физика». 2014 – 26 с. (электронное издание)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Вопросы для практических занятий	5
Критерии оценки	14
Список литературы	16

«ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по подготовке к практическим занятиям
для обучающихся по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии
и микросистемная техника», профиль «Компоненты микро- и
наносистемной техники» очной формы обучения

Составитель:
Стогней Олег Владимирович

В авторской редакции

Уч.-изд. л. 1.0.

ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический
университет" 394026 Воронеж, Московский просп., 14