

Приложение № 5
к программе
подготовки научных и научно-педагогических
кадров в аспирантуре НИЦ «Курчатовский
институт»
по научной специальности
1.3.11. Физика полупроводников

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
по специальной дисциплине
«Физика полупроводников»

1. Цель и задачи освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Физика полупроводников» является получение фундаментальных знаний в области физики полупроводников и приобретение необходимых навыков для их использования в научно-исследовательской деятельности. Задачи дисциплины состоят в овладении фундаментальными понятиями, законами и теориями физики полупроводников, а также основными методами исследования физических свойств полупроводников; формировании приемов и методов решения конкретных задач из различных областей физики полупроводников. В результате освоения дисциплины аспирант должен знать основные понятия и законы физики полупроводников, а также используемые в физике полупроводников основополагающие модели и теории; уметь решать задачи по основным разделам физики полупроводников; использовать полученные знания для определения параметров и интерпретации физических свойств полупроводников; владеть методами построения математических и физических моделей типовых задач физики полупроводников; иметь опыт деятельности в применении теоретических моделей для интерпретации экспериментальных данных по физическим свойствам полупроводников.

2. Место дисциплины в структуре программы подготовки научных и научно-педагогических кадров

Дисциплина «Физика полупроводников» входит в образовательный компонент и является специальной дисциплиной программы подготовки научных и научно-педагогических кадров для научной специальности 1.3.11. «Физика полупроводников».

В соответствии с учебным планом занятия проводятся на первом, втором году обучения (во втором, третьем, четвертых семестрах). Кандидатский экзамен сдается в четвертом семестре.

Объем дисциплины составляет 396 часов (11 зачетных единиц), из которых 198 часов составляет контактная работа обучающегося

с преподавателем (лекции, занятия семинарского типа, групповые и индивидуальные консультации, мероприятия текущего контроля успеваемости и итогового контроля). Самостоятельная работа обучающегося составляет 198 часов. Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа, групповых и/или индивидуальных консультаций.

3. Требования к результатам освоения дисциплины

Данная дисциплина участвует в формировании следующих компетенций:

1) способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;

2) способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития;

3) владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности;

4) владение культурой научного исследования, в том числе с использованием современных информационно-коммуникационных технологий;

5) способность самостоятельно проводить научные исследования в области физики полупроводников и применять полученные результаты для решения научно-исследовательских и научно-инновационных задач.

В результате освоения данной дисциплины аспирант должен знать:

1) основные понятия и законы физики полупроводников, а также используемые в физике полупроводников основополагающие модели и теории;

В результате освоения данной дисциплины аспирант должен уметь:

1) решать задачи по основным разделам физики полупроводников; использовать полученные знания для определения параметров и интерпретации физических свойств полупроводников;

В результате освоения данной дисциплины аспирант должен владеть:

1) методами построения математических и физических моделей типовых задач физики полупроводников; приемами применения теоретических моделей для интерпретации экспериментальных данных по физическим свойствам полупроводников.

4. Объем дисциплины, виды учебной работы (в часах), структура и содержание дисциплины

4.1. Объем и виды учебной работы (в часах) по дисциплине в целом

Вид учебной работы	Всего часов
Общая трудоемкость базового модуля дисциплины	396
Аудиторные занятия (всего)	198
В том числе:	
Лекции (Л)	144
Семинары/практические занятия (С/ПрЗ)	54
Самостоятельная работа (СР)	198
В том числе*:	
Форма текущего контроля	реферат, контрольная работа, (домашние задания, индивидуальные и групповые консультации)
Форма итогового контроля (промежуточная аттестация)	экзамен (КЭ)

* приводятся все виды самостоятельной работы по данной дисциплине

4.2. Структура и содержание дисциплины

№ п/п	Наименование разделов, тем дисциплины	Часы			
		Всего	Л	С/ПрЗ	СР
1	Химическая связь и атомная структура полупроводников	30	11	5	16
2	Основы технологии	30	11	5	20

	полупроводников и методы определения их параметров				
3	Основы зонной теории полупроводников	30	11	3	16
4	Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках	30	11	5	16
5	Кинетические явления в полупроводниках	30	11	3	16
6	Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках	30	11	5	10
7	Контактные явления в полупроводниках	30	11	5	16
8	Свойства поверхности полупроводников	30	11	5	16
9	Оптические явления в полупроводниках	30	11	5	16
10	Фотоэлектрические явления	30	11	4	20
11	Некристаллические полупроводники	32	11	3	20
12	Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки	32	12	3	6
13	Принципы действия полупроводниковых приборов	32	11	3	10
Всего		396	144	54	198

5. Образовательные технологии

1. При реализации настоящей дисциплины предусмотрено применение следующих образовательных технологий: лекции-визуализации (все лекции сопровождаются презентациями), проблемные лекции с дискуссией (на каждой лекции рассматриваются проблемные вопросы по актуальным направлениям развития предмета).

2. В учебном процессе помимо чтения лекций широко используются активные и интерактивные формы. Совместное и самостоятельное решение аспирантами задач по темам лекций на занятиях семинарского типа,

самостоятельное изучение предложенных тем и выступление с докладами на занятиях.

В сочетании с внеаудиторной работой это способствует формированию и развитию профессиональных навыков обучающихся.

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов.

Текущий контроль успеваемости проводится на каждом семинарском занятии. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность аспирантов, выполнение контрольных работ (контрольные работы рассчитаны на 10-15 минут).

Примеры контрольных вопросов и заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины (работы состоят из контрольных вопросов, тестовых заданий и задач).

Примеры контрольных вопросов:

- 1) Приведите примеры полупроводников.
- 2) Напишите выражение для постоянной Холла.
- 3) Сформулируйте теорему Блоха.
- 4) Что такое первая зона Бриллюэна?
- 5) Дайте определения прямозонного и непрямозонного полупроводников.
- 6) Приведите примеры многодолинных полупроводников.
- 7) Напишите выражение для плотности состояний в зоне проводимости в случае изотропного параболического закона дисперсии.
- 8) Запишите функцию Ферми-Дирака.
- 9) Запишите выражение для эффективной массы плотности состояний в случае эллиптических изоэнергетических поверхностей.
- 10) Какие полупроводники называются компенсированными?
- 11) Запишите выражение для длины экранирования Дебая.

12) Запишите уравнение кинетики рекомбинации в пространственно однородных системах.

13) Запишите уравнение кинетики рекомбинации в пространственно неоднородных системах.

14) Перечислите возможные механизмы рекомбинации.

15) Приведите примеры неупорядоченных полупроводников.

Примеры задач:

1) Вычислить подвижность, которой обладает электрон в образце германия n-типа, если удельное сопротивление германия $\rho=0,1$ Ом·см, а концентрация электронов в нем $n=10^{17}$ см⁻³.

2) Вычислить электропроводность германия, содержащего $N_1=10^{17}$ см⁻³ атомов мышьяка и $N_2=5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ атомов галлия.

3) Пластинка полупроводника n-типа, квадратного сечения с шириной $a=1$ мм помещена в магнитное поле. Ток, проходящий через пластину, равен $I=50$ мА. Величина образовавшейся разности потенциалов Холла составляет $U=10$ мВ. Определить индукцию магнитного поля, если концентрация носителей заряда $n=10^{16}$ см⁻³.

4) Сколько электронов и дырок образуется в маленьком кристалле ВаО при поглощении им световой энергии $W=10^{-11}$ Дж с длиной волны $\lambda=200$ нм? На каком характерном расстоянии происходит основное поглощение световой энергии, если коэффициент поглощения $\alpha=3 \cdot 10^9$ см⁻¹.

5) У кремния ширина запрещенной зоны равна примерно 1.2 эВ, а у германия – 0.75 эВ (при $T=0$ К). Для каких длин волн эти кристаллы непрозрачны?

6) Как изменится концентрация электронов в собственном полупроводнике в невырожденном случае при уменьшении температуры от 300 К до 100 К. Считать, что ширина запрещенной зоны равна 1,1 эВ. Зависимостью ширины запрещенной зоны от температуры пренебречь.

7) Определите зависимость уровня Ферми от температуры в невырожденном полупроводнике, содержащем один тип одновалентных акцепторов с концентрацией N_a .

8) Вычислите эффективное число состояний для двумерной системы с квадратичным законом дисперсии.

9) Получите выражение для эффективной плотности состояний в валентной зоне для тяжелых и легких дырок.

10) Определите закон изменения концентрации носителей заряда от времени в материале p-типа, если после выключения источника межзонной генерации неравновесных носителей заряда темп рекомбинации $R=a(np-n_0p_0)$, где $a=const$, n , p – неравновесные концентрации электронов и дырок соответственно, n_0 , p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок соответственно.

Промежуточная аттестация проводится на 9 неделе путем подведения итогов контрольных работ, написанных на состоявшихся лекциях.

Итоговый контроль – экзамен (КЭ).

Примеры вопросов к экзамену:

1) Отличительные черты полупроводников. Примеры полупроводников.

2) Оптические переходы в неупорядоченных полупроводниках.

3) Энергетический спектр сверхрешеток. Классификация полупроводниковых сверхрешеток.

4) Проводимость неупорядоченных полупроводников.

5) Потенциальные барьеры. Плотность тока. Соотношение Эйнштейна.

6) Качественные представления об электронном спектре в неупорядоченных полупроводниках.

7) Общие особенности неупорядоченных систем.

- 8) Квазиимпульс и зона Бриллюэна. Понятие об энергетических зонах.
- 9) Центры прилипания и центры рекомбинации. Демаркационные уровни.
- 10) Основные различия между металлами, полупроводниками и диэлектриками с точки зрения зонной теории.
- 11) Статистика Шокли-Рида-Холла.
- 12) Рекомбинация через примеси и дефекты. Времена жизни в случае рекомбинации через примесный уровень.
- 13) Понятие об эффективной массе. Тензор обратных эффективных масс.
- 14) Коэффициент межзонной рекомбинации. Время жизни при межзонной рекомбинации.
- 15) Статистика электронов и дырок в компенсированных полупроводниках.
- 16) Длина экранирования. Истощенный контактный слой. Обогащенный контактный слой. Экранирование электрического поля в 2 D-системах.
- 17) Вырождение зон и гофрировка изоэнергетических поверхностей вблизи потолка валентной зоны.
- 18) Плотность состояний в системах пониженной размерности. Вычисление положения уровня Ферми в 2 D-системах.
- 19) Применение метода эффективной массы для нахождения энергетического спектра полупроводниковых систем пониженной размерности.
- 20) Энергетический спектр мелких примесных состояний в полупроводниковых квантовых ямах.
- 21) Квазиравновесие и квазиуровни Ферми.
- 22) Выпрямление в контакте металл-полупроводник. p-n переход. Статическая вольтамперная характеристика p-n перехода.

- 23) Туннельный эффект в p-n переходах. Туннельный диод.
- 24) Метод слабо связанных (почти свободных) электронов. Обсуждение особенностей электронного энергетического спектра на основе метода слабо связанных электронов.
- 25) Эффективная масса плотности состояний.
- 26) Статистика заполнения примесных уровней. Простые центры.
- 27) Биполярный транзистор.
- 28) Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.
- 29) Эффект Шубникова-де Гааза.
- 30) Квантовый эффект Холла.
- 31) Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах.
- 32) Приборы с зарядовой связью.
- 33) Шумы в полупроводниковых приборах.
- 34) Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность.
- 35) Полупроводниковые детекторы ядерных излучений.
- 37) Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.
- 38) Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (HEMT). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками.
- 39) Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод.
- 40) Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса-Кронига.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

I. Основная литература:

1. Ковальчук, М.В. Идеология природоподобных технологий / Михаил Ковальчук; Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», М.: Физматлит, 2021. – 336 с. – ISBN 978-5-9221-1931-3.

2. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. – М.: Физматлит, 2009 г. – ISBN 978-5-9221-1005-1 (в пер.)

3. Тиллабоева М.Р. Физика полупроводников Современные инновации. № 6 (20). С. 6-7, 2017. – Текст: электронный. DOI отсутствует. – URL: <https://moderninnovation.ru/images/PDF/2017/20/MODERN-INNOVATION-6-20.pdf> (дата обращения: 28.06.2022).

II. Дополнительная литература:

1. Петер, Ю. Основы физики полупроводников / Питер Ю, Мануэль Кардона; Под ред. Б.П. Захарчени; Пер. с англ. И.И. Решинной. - М.: Физматлит, 2002. - 560 с. – ISBN 5-9221-0268-0.

2. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Физматлит, 2008 г. – 487 с. – ISBN 978-5-9221-0995-6 (в пер.).

III. Перечень ресурсов Интернет, необходимых для освоения дисциплины:

1. Фонд знаний «Ломоносов»: [сайт]. URL: <http://lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:01270:article> (дата обращения: 28.06.2022).

2. Электронная библиотека Платонанет: [сайт]. – URL: https://platona.net/load/knigi_po_filosofii/2 (дата обращения: 28.06.2022).

3. Онлайн-каталог DOAJ: [сайт]. – URL: <https://doaj.org/> (дата обращения: 28.06.2022).

4. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: [сайт]. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp> (дата обращения: 30.07.2022).

5. Сервер документов ЦЕРН: [сайт]. – URL: <https://cds.cern.ch/> (дата обращения: 30.07.2022).

6. Открытый доступ к журналам по физике и астрономии Physics related free-access Journals: [сайт]. – URL: <https://www.elsevier.com/physical-sciences-and-engineering/physics-and-astronomy/journals/open-access-in-physics-journals> (дата обращения: 30.07.2022).

7. Большая научная библиотека: [сайт]. – URL: <http://www.scilib.net/> (дата обращения: 12.08.2022).

8. Научная электронная библиотека диссертаций и авторефератов: [сайт]. – URL: <https://www.dissercat.com/> (дата обращения: 12.08.2022).

9. Электронная библиотека механико-математического факультета Московского государственного университета: [сайт]. – URL: <http://lib.mexmat.ru/index.php> (дата обращения: 12.08.2022).

10. Электронная библиотека Российского фонда фундаментальных исследований: [сайт]. – URL: <https://www.rfbr.ru/rffi/ru/library> (дата обращения: 12.08.2022).

11. Вестник РФФИ: [сайт]. – URL: <https://www.rfbr.ru/rffi/ru/bulletin> (дата обращения: 30.08.2022).

12. Книги, изданные при поддержке РФФИ: [сайт]. – URL: <https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books> (дата обращения: 30.08.2022).

IV. Доступ к журналам и базам публикаций различных научных издательств:

1. Электронный доступ к коллекции из 15 журналов базы данных компании Американского физического общества (APS). База данных APS содержит журналы по ядерной физике, физике высоких энергий, астрофизике, математической физике, механике и др.: [сайт]. – URL: <https://www.aps.org/> (дата обращения: 12.09.2022).

2. Электронный доступ к коллекции из 17 журналов базы данных компании AIP Publishing LLC (AIP). Тематические рубрики изданий включают основные разделы физики и смежных областей знания: [сайт]. – URL: <https://www.aip.org/> (дата обращения: 12.09.2022).

3. Электронный доступ и использование баз данных журналов компании IOP PUBLISHING LIMITED: База данных журнала Nuclear Fusion: [сайт]. – URL: <https://www.iop.org/> (дата обращения: 12.09.2022).

4. Электронный доступ к журналам и книгам издательства Elsevier на платформе ScienceDirect. Коллекция журналов Complete Freedom Collection: [сайт]. – URL: <http://info.sciencedirect.com/techsupport/journals/freedomcoll.htm> (дата обращения: 12.09.2022).

5. Электронный доступ к журналам, книгам и базам данных издательства Springer_Nature: [сайт]. – URL: <https://www.springernature.com/gp> (дата обращения: 12.09.2022).

6. Электронный доступ к базе данных Cambridge Crystallographic Data Centre. База данных Кембриджского центра структурных данных CSD-Enterprise содержит данные о строении кристаллических органических и элементарноорганических соединений (800 000 структур, он-лайн и офф-лайн версии), комплекс программ для работы с ними для биологов, химиков и кристаллографов: [сайт]. – URL: <https://www.ccdc.cam.ac.uk/> (дата обращения: 12.09.2022).

V. Электронный доступ к следующим изданиям:

1. Web of Science (авторитетная политематическая реферативно-библиографическая и наукометрическая (библиометрическая) база данных: [сайт]. – URL: <https://webofknowledge.com/> (дата обращения: 12.09.2022).

2. Scopus (мультидисциплинарная библиографическая и реферативная база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях): [сайт]. – URL: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic> (дата обращения: 12.09.2022).

3. Коллекция журналов Wiley (более 1600 изданий) с глубиной архива с 1997 г. по текущий момент: [сайт]. – URL: <https://www.wiley.com/> (дата обращения: 25.09.2022).

4. Science (один из самых авторитетных научных журналов Американской ассоциации содействия развитию науки): [сайт]. – URL: <https://www.science.org/> (дата обращения: 17.09.2022).

5. Institute of Physics (охватывает три направления области физики: образование, исследования и разработки): [сайт]. – URL: <https://www.iop.org/> (дата обращения: 15.08.2022).

6. Электронный доступ к архивам научных журналов: Annual Reviews: [сайт]. – URL: <https://www.annualreviews.org/> (дата обращения: 12.09.2022).

7. Cambridge University Press: [сайт]. – URL: <https://www.cambridge.org/core> (дата обращения: 21.06.2022).

8. Nature: [сайт]. – URL: <https://www.nature.com/> (дата обращения: 13.08.2022).

9. Oxford University Press: [сайт]. – URL: <https://global.oup.com/?cc=ru> (дата обращения: 12.09.2022).

10. SAGE Publications: [сайт]. – URL: <https://us.sagepub.com/en-us/nam/home> (дата обращения: 03.09.2022).

11. Science Magazine: [сайт]. – URL: <https://www.science.org/> (дата обращения: 14.09.2022).

12. Springer Journals Archiv с 1832 - 1996 гг.: [сайт]. – URL: <https://link.springer.com/> (дата обращения: 22.08.2022).

13. Taylor&Francis: [сайт]. – URL: <https://taylorandfrancis.com/> (дата обращения: 12.09.2022).

14. Wiley: [сайт]. – URL: <https://www.wiley.com/> (дата обращения: 12.09.2022).

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. При освоении дисциплины необходимы стандартная учебная аудитория с доской, ноутбук, мультимедийный проектор, экран. Аспирантам должен быть обеспечен доступ к сети Интернет и свободный доступ

к библиотеке периодических изданий по предмету (в том числе и к электронным изданиям).

2. Лекции проводятся в стандартной аудитории, оснащенной в соответствии с требованиями преподавания теоретических дисциплин.