

Приложение № 5
к программе
подготовки научных и научно-педагогических
кадров в аспирантуре
НИЦ «Курчатовский институт»
по научной специальности
1.3.5. Физическая электроника

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
по специальной дисциплине
«Физическая электроника»

1. Цель и задачи освоения дисциплины

Цель дисциплины «Физическая электроника» состоит в ознакомлении с основными закономерностями явлений, связанных с движением свободных носителей заряда в различных средах, с электрофизическими свойствами материалов и структур, используемых при изготовлении электронных приборов и изделий интегральной электроники.

Программа дисциплины включает изучение:

1) законов движения заряженных частиц в статических электрических и магнитных полях. Основные типы электростатических линз и расчет их фокусных расстояний. Общие принципы работы электронного микроскопа. Изучаются автоэлектронная, фотоэлектронная и термоэлектронная эмиссии (ТЭЭ), работа выхода, принцип работы вакуумного диода на их основе, эмиссия под воздействием частиц и взаимодействие электронов подпороговых энергий с твердым телом. Приводятся сведения по формированию электронных пучков большой плотности и конструкции пушки Пирса;

2) спонтанного и вынужденного излучения потоков заряженных частиц: черенковское, циклотронное (синхротронное) и ондуляторное излучения;

3) особенностей динамики электрона в идеальном твердом теле, его волновой функции, квазиимпульса. Изучается построение зон Бриллюэна, зонного энергетического спектра. Уделяется внимание изучению полупроводников: квази-электроны и дырки как способ описания носителей заряда в полупроводниках, свойства и законы их движения, типы точечных дефектов в кристаллах, акцепторные и донорные примеси, статистика носителей заряда в полупроводниках, обоснование применения статистики Ферми-Дирака к электронам в идеальном твердом теле. Невырожденные и вырожденные полупроводники;

4) электропроводности полупроводников и металлов, электропроводность в сильных электрических полях, неравновесные

носители заряда в полупроводниках и диэлектриках. Генерация и рекомбинация, механизмы рекомбинации, диффузия и дрейф неравновесных носителей, плотность тока и градиент уровня Ферми;

5) широкого круга поверхностных и пограничных явлений: контакт твердое тело – вакуум, контакт металл – полупроводник, диоды Шоттки, диодная и диффузионная теории выпрямления, электронно-дырочный переход, количественная теория инжекции и экстракции неосновных носителей, выпрямление и усиление с помощью р-п перехода, статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п перехода и туннельный эффект в полупроводниковых гетероструктурах. Изучаются оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках, методы анализа поверхности и пленок, сверхпроводимость;

б) цифровых ячеек логики и памяти, проблем создания больших интегральных схем (БИС) и миниатюризации элементов микроэлектроники, полупроводниковых, пленочных и гибридных интегральных схем. Уделяется внимание способам изготовления интегральных схем: фотолитография, рентгеновская и электронная литографии. Демонстрируются последние достижения в области запоминающих устройств на основе мемристоров.

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

Дисциплина «Физическая электроника» входит в образовательный компонент и является специальной дисциплиной программы подготовки научных и научно-педагогических кадров для научной специальности 1.3.5. «Физическая электроника».

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 физической электроники и применять полученные результаты для решения научно-исследовательских и научно-инновационных задач.

В результате освоения данной дисциплины аспирант должен знать:

1) физические явления в металлах, полупроводниках и диэлектриках;

2) базовые элементы интегральных схем и методы их изготовления;

3) методы проектирования цифро-аналоговых электронных устройств.

В результате освоения данной дисциплины аспирант должен уметь:

- 1) проводить необходимые эксперименты;
- 2) получать результаты, обрабатывать и анализировать их;
- 3) использовать полученные результаты в практических целях для разработки новых типов электронных устройств.

В результате освоения данной дисциплины аспирант должен владеть:

- 1) основными методами моделирования электронных устройств;
- 2) опытом научной деятельности;
- 3) навыками выполнения простейших электрофизических расчетов и подготовки научных сообщений.

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	Введение в корпускулярную оптику	33	12	5	16

2	Электронная эмиссия	33	12	5	20
3	Электронные пучки и излучения потоков заряженных частиц	33	12	5	16
4	СВЧ-излучение	33	12	5	16
5	Динамика электронов в различных телах	33	12	5	16
6	Зоны Бриллюэна	33	12	5	20
7	Электропроводность полупроводников и металлов	33	12	5	16
8	Микроминиатюризация элементов микроэлектроники	33	12	5	16
9	Физика тонких пленок	33	12	5	16
10	Методы анализа поверхности и тонких пленок	33	12	5	20
11	Литография	33	12	2	20
12	Цифровые ячейки логики и память	33	12	2	6
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 (промежуточный) проводится на 7 и 14 неделе в форме контрольной работы с оценкой по пятибалльной системе.

Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

Примеры контрольных вопросов:

1. Изобразить конструкцию электронной пушки.
2. Какие транзисторы быстрее: полевые или биполярные. Почему.
3. Принцип работы вакуумного диода.
4. Построить зоны Бриллюэна для двумерной квадратной решетки.
5. Изложить известные методы регистрации частиц.
6. Особенности ВАХ мемристивного элемента.

Для получения положительной оценки и для выполнения задания по самостоятельной работе аспиранту необходимо подготовить реферат по представленным или подобным темам объемом 15 – 20 страниц. Реферат должен быть написан самостоятельно и построен по типу статьи: краткая аннотация: 4 – 5 строк, введение (цели, задачи обзора, объект рассмотрения), основная часть (описание объекта или способа), заключение, литература. Обязательно предоставляется информация (ссылки на статьи) об авторах, институтах, лабораториях, которые разрабатывали представленную тематику. Перспективы и прогноз дальнейших исследований. Возможное применение данных разработок. Можно предоставить данные по фирмам и рекламную литературу по их деятельности, которые занимаются данными разработками. В реферате должны быть отражены методы формирования объекта, способы измерения его характеристик и свойств, применения.

Примеры тем предлагаемых докладов, рефератов:

1. Литография. Способы создания интегральных схем.
2. Понятие мемристивности. Память на основе мемристивных структур.
3. Передовые технологии проектирования транзисторов. Понятие технического процесса.
4. Нейроморфные системы на основе мемристоров.

5. Характеристики ламповой электроники в сравнении с транзисторной.

6. Искусственные нейроны на полевых транзисторах.

Итоговый контроль – экзамен (КЭ).

Примеры вопросов к экзамену:

1. Назовите известные источники СВЧ-излучения.
2. Электронно-дырочный переход. Принцип работы биполярного транзистора.
3. Типы излучений. Принцип работы полупроводникового лазера.
4. Получить зависимость фазовой скорости фононов от волнового вектора в первой и последующих зонах Бриллюэна.
5. Генерация и рекомбинация. Механизмы рекомбинации.
6. Понятия зон Бриллюэна для фононов.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

I. Основная литература:

1. Ковальчук, М.В. Идеология природоподобных технологий / Михаил Ковальчук; Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». – Москва: Физматлит, 2021. – 336 с. – ISBN 978-5-9221-1931-3.
2. Шахнов, В.А. Электронная микроскопия (Библиотека Наноинженерия в 17 кн. Книга 11) [Электронный ресурс]. - Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 168 с.; ISBN 978-5-7038-3502-9.
3. Эмиссионная электроника / Н. Н. Коваль [и др.]; под ред. Ю. С. Протасова. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. - 595 с.: ил., табл.; 24 см. - (Серия Электроника. Прикладная электроника); ISBN 978-5-7038-3347-6.
4. Матына, Л.И. Основы световой, электронной и рентгеновской микроскопии: учеб. пособие по курсу "Методы исслед. состава, структуры

и электрофиз. свойств материалов электрон. техники / Л. И. Матына; М-во общ. и проф. образования РФ. Моск. гос. ин-т электрон. техники (Техн. ун-т). - Москва, 1998. - 104 с. – ISBN 5-7256-0184-6.

II. Дополнительная литература:

1. Ищенко, А.А. Методы анализа поверхности: учебное пособие / А. А. Ищенко, А. Е. Лукьянов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет" (РТУ МИРЭА). - Москва: МИРЭА - Российский технологический ун-т, 2021-12 см.

2. Минькова, Р.М. Функции комплексного переменного в примерах и задачах: учебно-методическое пособие для студентов / Р. М. Минькова ; М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Физико-технологический ин-т. - Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. - 55 с. – ISBN 978-5-7996-1216-0.

3. Шмидт, В.В. Введение в физику сверхпроводников / В.В. Шмидт. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: МЦНМО, 2000, 397 с. – ISBN 5-900916-68-5.

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/>

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

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>

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, онлайн и оффлайн 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.