

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 2

от 26.04.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**ПЕРЕНОС И РЕКОМБИНАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ
ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

Направление подготовки
(специальность)

[1] 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
8	1-2	36-72	12	12	0	12-48	0	3
Итого	1-2	36-72	12	12	0	10	12-48	0

АННОТАЦИЯ

В курсе излагаются основные современные теоретические представления о процессах переноса и рекомбинации носителей заряда в неупорядоченных органических материалах, методы математического моделирования данных процессов, основные экспериментальные результаты и описание основных экспериментальных методов, физические основы функционирования электронных приборов на основе органических материалов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины «Перенос и рекомбинация носителей заряда в органических материалах» являются:

Изучение основных теоретических концепций и понятий, овладение методами математического моделирования процессов переноса и рекомбинации носителей заряда в неупорядоченных органических материалах (полупроводниках и диэлектриках).

Знакомство с основными экспериментальными методами и результатами исследования переноса и рекомбинации.

Знание основных физических процессов, определяющих характеристики светодиодов, фотовольтаических элементов и других базовых элементов органической электроники.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для успешного усвоения данной дисциплины студент должен владеть математическим аппаратом, необходимым для решения дифференциальных уравнений, представлениями о физике атомов и молекул, физике твёрдого тела из курса общей физики, владеть понятийным аппаратом и методами решения задач теории электромагнитного поля, квантовой механики, статистической физики, физики полупроводников. Предполагается предварительное изучение следующих дисциплин:

Дифференциальные и интегральные уравнения

Общая физика (электричество и магнетизм)

Общая физика (атомная физика)

Теория поля

Квантовая механика

Теоретическая физика: статистическая физика

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
производственно-технологический			
внедрение результатов исследований и разработок в производство; выполнение работ по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники; проведение технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники; контроль за соблюдением технологической дисциплины и приемов энерго - и ресурсосбережения; подготовка документации и участие в работе системы менеджмента качества на предприятии; организация метрологического обеспечения производства материалов и изделий электронной техники	материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования, технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, алгоритмы решения типовых задач	ПК-9 [1] - Способен выполнять определенный тип измерительных или контрольных операций при исследовании параметров полупроводниковых приборов и устройств или в технологическом процессе по производству материалов и изделий электронной техники <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.002	З-ПК-9[1] - Знание параметров полупроводниковых приборов аналоговой, цифровой, радиочастотной и СВЧ-электроники.; У-ПК-9[1] - Умение выполнять исследования параметров полупроводниковых приборов и устройств в микро- и нанoeлектронике; В-ПК-9[1] - Владение методами измерений в технологическом процессе по производству материалов и изделий электронной техники
внедрение результатов исследований и разработок в производство; выполнение работ по технологической подготовке производства	материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования,	ПК-10 [1] - Способен к модернизации существующих и внедрению новых методов и оборудования для измерений параметров наноматериалов и наноструктур	З-ПК-10[1] - Знание физических основ современных микро- и нанотехнологий, технологий гетероструктурной и СВЧ-электроники.; У-ПК-10[1] - Умение творчески применять

<p>материалов и изделий электронной техники; проведение технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники; контроль за соблюдением технологической дисциплины и приемов энерго - и ресурсосбережения; подготовка документации и участие в работе системы менеджмента качества на предприятии; организация метрологического обеспечения производства материалов и изделий электронной техники</p>	<p>технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, алгоритмы решения типовых задач</p>	<p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.007</p>	<p>современное оборудование для измерений параметров наноматериалов и наноструктур; В-ПК-10[1] - Владение методами измерений параметров наноматериалов и наноструктур</p>
--	---	--	---

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17)	<p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности</p>

		ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для: - формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных

		бесед; - формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.
--	--	--

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары)/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>8 Семестр</i>						
1	Основные понятия и экспериментальные результаты	1-8	6/6/0		25	КИ-8	З-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, З-ПК-10, У-ПК-10, В-ПК-10
2	Методы описания и практическое применение	9-15	6/6/0		25	КИ-15	З-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, З-ПК-10, У-ПК-10,

							В-ПК-10
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		12/12/0		50		
	Контрольные мероприятия за 8 Семестр				50	3	3-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-10, В-ПК-10

* – сокращенное наименование формы контроля

** – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>8 Семестр</i>	12	12	0
1-8	Основные понятия и экспериментальные результаты	6	6	0
1 - 4	Типы, особенности и основные электронные свойства органических материалов. Основные классы органических материалов, их значение в электронике. Отличительные особенности рассматриваемых материалов: структурный беспорядок, низкая собственная проводимость, прыжковый характер проводимости. Молекулярные состояния электронов. П- и σ- связи. Беспорядок и его природа в различных классах органических материалов. Локализованные и делокализованные состояния. Критерий Андерсона. Край подвижности и ловушки. Качественное рассмотрение спектра энергетических состояний электронов и дырок.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 8	Экспериментальные методы и основные результаты исследования переноса носителей заряда. Измерение времени пролёта. Нормальный и дисперсионный транспорт. Нестационарная радиационная электропроводность. Переходная электролюминесценция. Зависимость подвижности от температуры, напряжённости поля и концентрации носителей заряда.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	Методы описания и практическое применение	6	6	0

9 - 12	Аналитические и численные методы описания прыжкового переноса носителей заряда. Примеры задач, решаемых методами теории протекания: задача сфер; переходы между ближайшими состояниями; моттовская проводимость с переменной длиной прыжка. Аналитические и численные методы определения транспортного уровня. Температурная зависимость транспортного уровня для экспоненциального и гауссова распределения прыжковых центров. Зависимость прыжковой проводимости от температуры и концентрации носителей. Алгоритм моделирования методом Монте-Карло. Метод численного решения уравнения баланса. Модель многократного захвата и освобождения.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 15	Генерация и рекомбинация носителей в органических полупроводниках. Органическая электроника. Токи, ограниченные объёмным зарядом. Инжекция Фаулера-Нордгейма и Ричардсона-Шоттки. Фотогенерация и геминальная рекомбинация. Вычисление вероятности разделения геминальной пары в моделях Пула-Френкеля и Онзагера-Брауна. Вычисление константы бимолекулярной рекомбинации.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

ТЕМЫ СЕМИНАРОВ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>8 Семестр</i>
1 - 2	Типы, особенности и основные электронные свойства органических материалов. «Газовый» беспорядок и случай сохранения ближнего порядка. Вычисление распределения расстояний до ближайшего соседа. Вычисление энергии поляризации среды носителем. Связь энергетического и пространственного беспорядка. Оценка выполнения критерия Андерсона.
3 - 6	Экспериментальные методы и основные результаты исследования переноса носителей заряда

	<p>Подвижность в квазиравновесном режиме. Аномальная дисперсия и её описание в приближении полевой диффузии. Теоретический анализ переходного тока в условиях времяпролётного эксперимента</p> <p>Энергетическая релаксация неравновесных носителей. Демаркационная энергия. Умеренно- и сильно-неравновесный (дисперсионный) транспорт. Аномальные характеристики подвижности и дисперсии носителей заряда.</p> <p>Примеры задач, решаемых методами теории протекания: задача сфер; переходы между ближайшими состояниями; моттовская проводимость с переменной длиной прыжка.</p>
7 - 9	<p>Аналитические и численные методы описания прыжкового переноса носителей заряда.</p> <p>Примеры задач, решаемых методами теории протекания: задача сфер; переходы между ближайшими состояниями; моттовская проводимость с переменной длиной прыжка.</p> <p>Аналитические и численные методы определения транспортного уровня. Температурная зависимость транспортного уровня для экспоненциального и гауссова распределения прыжковых центров. Зависимость прыжковой проводимости от температуры и концентрации носителей.</p> <p>Алгоритм моделирования методом Монте-Карло. Метод численного решения уравнения баланса. Модель многократного захвата и освобождения.</p>
10 - 11	<p>Генерация и рекомбинация носителей в органических полупроводниках. Органическая электроника.</p> <p>Токи, ограниченные объёмным зарядом. Инжекция Фаулера-Нордгейма и Ричардсона-Шоттки.</p> <p>Фотогенерация и геминальная рекомбинация. Вычисление вероятности разделения геминальной пары в моделях Пула-Френкеля и Онзагера-Брауна. Вычисление константы бимолекулярной рекомбинации.</p>

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы используются следующие технологии:

- лекции по курсу традиционного типа,
- самостоятельная работа студентов.

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-10	З-ПК-10	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-10	КИ-8, КИ-15
	В-ПК-10	З, КИ-8, КИ-15
ПК-9	З-ПК-9	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-9	КИ-8, КИ-15
	В-ПК-9	З, КИ-8, КИ-15

Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ М37 Introduction to physics of second-order magnetic phase transitions : , Moscow: NRNU MPhI, 2015
2. ЭИ К23 Molecular dynamics in multiscale modeling : textbook, Moscow: NRNU MPhI, 2015
3. ЭИ Т82 Transport Processes in Macroscopically Disordered Media : From Mean Field Theory to Percolation, New York, NY: Springer New York, 2016
4. ЭИ С22 Введение в теорию переноса и физику защиты от ионизирующих излучений : учебного пособия для вузов, В. В. Болятко [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2013
5. ЭИ Н62 Нестационарные процессы переноса и рекомбинации носителей заряда в тонких слоях органических материалов : учебное пособие для вузов, В. Р. Никитенко, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 538 Н62 Нестационарные процессы переноса и рекомбинации носителей заряда в тонких слоях органических материалов : учебное пособие, В. Р. Никитенко, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. справочник по ПО Wolfram Reaearch Mathematica 8 (reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html)

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. www.sciencedirect.com ()
2. www.aps.org ()
3. www.ufn.ru ()

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

Курс включает в себя лекционные и практические занятия. Для успешного освоения курса полезно вспомнить некоторые темы из курса Квантовой механики и Физики полупроводников, в частности, основы зонной теории. На занятиях рассматриваются теоретические аспекты физики неупорядоченных органических полупроводников, а также решаются соответствующие задачи, в том числе и в интерактивной форме (обсуждение). Поощряется активное участие в обсуждении задач, а также умение своевременно задавать вопросы для прояснения всех непонятных моментов по пройденному материалу. Помимо лекционных и семинарских занятий курс включает в себя самостоятельную работу студентов. Данное время отводится для самостоятельной переработки и повторения материала, выполнения домашних заданий, устранения долгов, накопленных во время семестра, а также для самостоятельной подготовки к сдаче теоретического материала (экзамен). Во время самостоятельной подготовки к сдаче теоретического материала студенты учатся работать с научной литературой.

Итоговые баллы складываются из: 1) результатов тестового опроса и контрольной; 2) результатов контроля посещаемости; 3) результатов оценки работы студента в интерактивном режиме.

Получение положительной оценки по каждой проверочной работе (тестовый опрос и контрольная) является необходимым условием получения итоговой положительной оценки. В случае пропуска или получения отрицательной оценки самостоятельная работа должна быть переделана и сдана во время зачетной недели в конце семестра. Положительная оценка (аттестация) каждого раздела необходима для допуска к экзамену.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Курс логически разбит на несколько взаимосвязанных частей. В первом разделе (1-8 недели) рассматриваются основные понятия и экспериментальные результаты, касающиеся общих свойств органических неупорядоченных материалов и устройств на их основе, во втором (9-16 недели) – описание физических процессов и характеристик органических фотовольтаических устройств.

При рассмотрении материала следует подчеркнуть:

Тема 1. Типы, особенности и основные электронные свойства органических материалов.

Характерные особенности беспорядка в сопряженных полимерах, молекулярно-допированных полимерах, органических стёклах. Общие свойства рассматриваемых материалов: слабость межмолекулярного взаимодействия и, как следствие, локализация всех электронных (дырочных) состояний. Как следствие, прыжковый характер транспорта. Низкая концентрация собственных (равновесных) подвижных носителей заряда.

Тема 2. Экспериментальные методы и основные результаты исследования переноса носителей заряда.

Метод измерения времени пролёта, нестационарная радиационная электропроводность, метод CELIV. Температурная и полевая зависимость подвижности, аномальная дисперсия носителей заряда. Дисперсионный режим переноса при достаточно низких температурах.

Тема 3. Аналитические и численные методы описания прыжкового переноса носителей заряда.

Гауссова модель беспорядка. Концепция транспортного уровня и описание прыжкового транспорта на основе формализма модели многократного захвата.

Тема 4. Генерация и рекомбинация носителей в органических полупроводниках. Органическая электроника.

Образование молекулярных возбуждений (экситонов) как промежуточная стадия фотогенерации и рекомбинации носителей заряда. Вычисление вероятности разделения геминальной пары в моделях Пула-Френкеля и Онзагера- Брауна. Вычисление константы бимолекулярной рекомбинации. Многослойные тонкоплёночные органические гетероструктуры.

Тема 5. Преобразование солнечной энергии. Органические фотовольтаические устройства.

Энергоэффективность фотовольтаики, добротность. Отношение между структурой и свойствами. Принцип работы органического солнечного элемента. Переход Шоттки. P-n переход. Объёмный гетеропереход.

Тема 6. Функциональные слои органического солнечного элемента.

Транспортный слой дырок – функция барьер для электронов у фотоанода. Транспортный слой электронов– барьер для дырок и фотокатода. Оптимальный фазовый состав объёмного гетероперехода.

Тема 7. Физика электронных процессов при поглощении света фотоактивными молекулами.

Спектроскопия электронного поглощения и фотолюминесценции. Спиновые состояния электронов и молекул, синглетные и триплетные состояния молекулы. Релаксация возбужденных экситонов. Состояние с переносом заряда в донорно-акцепторной системе. Рекомбинация связанной пары. Генерация свободных носителей заряда. Энергетические состояния верхней заполненной молекулярной орбитали (ВЗМО) и нижней свободной молекулярной орбитали (НСМО). Напряжение открытой цепи и связь с ВЗМО и НСМО фотоактивных молекул.

Тема 8. Стабильность органических солнечных батарей. Продвинутое типы солнечных ячеек.

Проблема стабильности в органических солнечных ячейках. Наночастицы, плазмоника, обратная конверсия, мультиэкситонная генерация и тандемная технология для улучшения свойств органических солнечных ячеек.

Автор(ы):

Никитенко Владимир Роленович, д.ф.-м.н.

Саунина Анна Юрьевна