

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор института nano-, био-,
информационных, когнитивных
и социогуманитарных наук и
технологий**

П.А. Форш

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Молекулярная электроника
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Конвергентные nano-, био-, информационные и когнитивные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра nano-, био-, информационных и когнитивных технологий
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Г.С. Плотников, доктор наук, профессор, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры nano-, био-, информационных и когнитивных технологий
18.03.2020

Аннотация

Необходимость изучения основных принципов молекулярной электроники связана с развитием нанотехнологий и биотехнологии, которые реально позволяют конструировать и создавать материалы с заданными уникальными физическими и химическими свойствами.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области молекулярной электроники;
- изучение широкого круга вопросов, касающихся механизмов передачи информации в молекулярных системах;
- ознакомление с принципами построения элементной базы устройств молекулярной электроники и технологическими приемами синтеза наноструктур, используемых в таких устройствах.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области молекулярной электроники как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов принципам и технологические приемы синтеза наноструктур, используемых в таких устройствах;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области био и молекулярной электроники в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности

ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики, химии, математики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем физико-химического моделирования;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- математическим моделированием физических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Безызлучательные процессы переноса энергии электронного возбуждения.	2	3		2

2	Введение.	2	2		2
3	Движение носителей заряда в молекулярных кристаллах.	2	2		10
4	Запоминание, хранение и переработка информации на молекулярном уровне.	2	4		3
5	Молекулярные кристаллы.	2	2		2
6	Основные экспериментальные методы изучения тонких молекулярных слоев.	2	3		2
7	Пленки Лэнгмюра-Блоджетт (ЛБ).	4	3		4
8	Полимеры: структура и электрические свойства.	2	1		2
9	Принцип самоорганизации отдельных молекулярных компонентов интегральных схем.	4	1		2
10	Синглетные экситоны. Солитоны.	2	2		2
11	Электронная проводимость протяженных молекулярных систем.	1	1		10
12	Электронно-возбужденные молекулы органических красителей на поверхности полупроводников.	4	3		2
13	Электронные спектры поглощения и люминесценции адсорбированных молекул.	1	3		2
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Безызлучательные процессы переноса энергии электронного возбуждения.

Механизм Ферстера. Особенности переноса энергии в системе молекулы-твердотельная подложка. Обменный механизм переноса энергии. Теория Ферстера-Декстера.

2. Введение.

Традиционная планарная микроэлектроника, принципиальные физические ограничения ее развития. Молекулярные системы как элементная база электронных устройств. Перспективы развития молекулярной электроники. Проблема использования отдельных атомов, молекул и их комплексов в качестве логических элементов электронных устройств. Характеристики таких элементов: надежность срабатывания, КПД преобразования сигнала, однозначность реакции молекулы при ее возбуждении. Большие органические и биоорганические молекулы как элементы молекулярных устройств.

3. Движение носителей заряда в молекулярных кристаллах.

Виды переноса, модельный гамильтониан. Перенос в модели перескоков. Перенос в зонной модели.

4. Запоминание, хранение и переработка информации на молекулярном уровне.

Создание постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) с использованием триплетных состояний органических красителей. Электро- и фотохромизм адсорбированных молекул. Природа электронных процессов, определяющих эти явления. Запись информации на основе эффекта электронно-конформационной перегруппировки. Механизм оптической частотно-селективной записи информации в пленках органических молекул. Способ «выжигания провала».

Выпрямляющий молекулярный элемент. Управляющий элемент резонансного туннельного переноса носителей. Управляющие группировки. Принцип солитонного переключения.

5. Молекулярные кристаллы.

Жидкие кристаллы; нематические, смектические и холестерические мезофазы. Перспективы использования в молекулярной электронике.

6. Основные экспериментальные методы изучения тонких молекулярных слоев.

Малоугловая рентгеновская спектроскопия, электронография, эллипсометрия, генерация второй гармоники, сканирующая туннельная и атомная силовая микроскопия.

7. Пленки Лэнгмюра-Блоджетт (ЛБ).

Методика синтеза пленок ЛБ и их нанесения на поверхность твердого тела. Применения тонких органических пленок в молекулярной электронике. Метод молекулярного наслаивания.

8. Полимеры: структура и электрические свойства.

Биополимеры. Перспективы использования в молекулярной электронике биомембран и иммобилизованных ферментов.

9. Принцип самоорганизации отдельных молекулярных компонентов интегральных схем.

Основные идеи синергетики. Синтез Меррифилда. Самоорганизация поверхностно-активных веществ. Перестройка структуры слоев органических молекул и пленок ЛБ при самоорганизации.

10. Синглетные экситоны. Солитоны.

Поверхностные экситоны. Солитонный механизм передачи энергии и заряда. Электросолитоны и протосолитоны.

11. Электронная проводимость протяженных молекулярных систем.

Внутримолекулярный перенос электронов. Квантовомеханическое резонансное туннелирование. «Одноэлектроника».

12. Электронно-возбужденные молекулы органических красителей на поверхности полупроводников.

Спектральная сенсibilизация различных фотоэффектов в полупроводниках и диэлектриках. Два альтернативных механизма сенсibilизации: перенос энергии и перенос электрона. Фотосенсibilизированная перезарядка различных групп поверхностных состояний в типичных гетероструктурах, используемых в микро- и нанoeлектронике.

13. Электронные спектры поглощения и люминесценции адсорбированных молекул.

Основные пути диссипации энергии возбужденных адсорбированных молекул: процессы в адсорбционной фазе, в твердом теле. Характерные энергетические схемы уровней возбужденных молекул и электронных переходов между ними. Флуоресценция. Колебательная релаксация энергии электронного возбуждения в адсорбционной фазе. Использование этих эффектов для создания селективных полупроводниковых сенсоров для газового анализа.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

Фонд литературы кафедры

1. Плотников Г.С., Зайцев В.Б. Физические основы молекулярной электроники. – М: МГУ, 2000.
2. Поуп М., Свенберг В. Электронные процессы в органических кристаллах. – М: Мир, 1985.
3. Агранович В.М., Галанин Д.М. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. – М: Наука, 1978.

Дополнительная литература

Фонд литературы кафедры

1. Введение в молекулярную электронику /под ред. В.Г. Лидоренко. – М: Энергоиздат, 1984.
2. Симон Ж., Андре Ж.Э. Молекулярные полупроводники. – М: Мир, 1988.
3. Давыдов А.С. Солитоны в молекулярных системах. – Киев: Наукова думка, 1984.
4. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. – М: МГУ, 1989.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://lib.mipt.ru>– электронная библиотека Физтеха.
2. <http://www.Sci-lib.com> – Большая научная библиотека.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе);

– подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения. Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций. В начале занятия, как правило, проводится короткий (10-15 минут) опрос по материалу прошедших занятий в устной или письменной форме. Обычно придерживаются следующей схемы: изучение материала лекции по конспекту в тот же день, когда была прослушана лекция (10-15 минут); повторение материала накануне следующей лекции (10-15 минут); проработка учебного материала по конспектам лекций, учебной и научной литературе; подготовка ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения (1 час неделю); подготовка к практическому занятию, решение задач (1 час).

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Промежуточный контроль знаний проводится в виде коллоквиумов, на которых студенту предлагается письменно ответить на теоретический вопрос, а также студенту в ходе освоения курса необходимо выполнить одну домашнюю индивидуальную работу с ее последующей защитой.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Конвергентные нано-, био-, информационные и когнитивные технологии Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра нано, био, информационных и когнитивных технологий
курс:	1
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	Г.С. Плотников, доктор наук, профессор, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Молекулярная электроника» обучающийся должен:

знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики, химии, математики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем физико-химического моделирования;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- математическим моделированием физических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В целях текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущих занятий по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Промежуточная аттестация по дисциплине «Молекулярная электроника» осуществляется в форме экзамена. Дифференцированный зачет проводится в устной форме.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена

1. Каковы принципиальные физические ограничения уменьшения размеров устройств традиционной микроэлектроники?
2. Можно ли создать элементы молекулярной электроники на основе простых неорганических молекул?
3. Назвать важнейшие характеристики, которым должен удовлетворять любой элемент микро или молекулярной электроники.
4. Написать модельный гамильтониан для случая зонной модели переноса электронов.
5. Каковы критерии реализации прыжкового механизма переноса носителей в молекулярных системах?
6. Какие случаи прыжкового переноса носителей заряда реализуются в молекулярных системах. Написать модельные гамильтонианы описывающие эти случаи.
7. В чем состоит специфика электронной проводимости протяженных молекулярных систем?
8. Вывести выражение для вероятности переноса электронов для случая прохождения барьеров при квантовомеханическом резонансном туннелировании.
9. Что такое критический радиус переноса в теории Ферстера-Декстера? Привести количественные оценки критического радиуса для молекулярных систем.
10. Что такое обменный механизм переноса энергии?
11. Роль экситонов при переносе энергии электронного возбуждения в молекулярных системах. Что такое синглетный экситон?
12. Основные закономерности солитонного механизма передачи энергии и заряда. Электросолитоны и протосолитоны-сопоставить их параметры.
13. Основные электрофизические свойства молекулярных кристаллов.
14. Какова классификация жидких кристаллов?
15. Перспективы использования в молекулярной электронике биомембран и иммобилизованных ферментов.
16. Объяснить принцип формирования пленок Ленгмюра-Блоджетт.
17. В чем состоят преимущества и недостатки метода молекулярного наслаивания по сравнению с методами молекулярно-лучевой эпитаксии?
18. Чем отличаются методы туннельной и атомной силовой микроскопии?
19. В чем состоят основные недостатки метода электронографии в применении к молекулярным системам?
20. Что такое параметр упаковки при реализации самоорганизации молекулярных устройств?
21. В чем состоит основной принцип синтеза Меррифилда?
22. Объяснить два альтернативных механизма сенсibilизации: перенос энергии и перенос электрона. Что такое критерий Герни-Мотта?
23. В чем состоит специфика фотосенсибилизированной перезарядка различных групп поверхностных состояний в типичных гетероструктурах, используемых в микро- и наноэлектронике?
24. Чем определяется вероятность колебательной релаксации энергии электронного возбуждения в адсорбционной фазе? Использование этих эффектов для создания селективных полупроводниковых сенсоров для газового анализа.
25. В каких условиях максимально проявляется неоднородное уширение спектров люминесценции на поверхности?

26. Какие спектральные параметры используются в молекулярной люминесцентной спектроскопии поверхности твердых тел?
27. Возможно ли создание постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) с использованием триплетных состояний органических красителей?
28. Каковы основные принципы записи информации на молекулярном уровне?
29. Объяснить механизм оптической частотно-селективной записи информации в пленках органических молекул.
30. Какие механизмы преобразования информации существуют в молекулярных системах?
31. В каком случае может быть реализован принцип солитонного переключения ?

3.1. Примеры экзаменационных билетов

Билет №1

1. Каковы принципиальные физические ограничения уменьшения размеров устройств традиционной микроэлектроники?
2. В каких условиях максимально проявляется неоднородное уширение спектров люминесценции на поверхности?

Билет №2

1. Назвать важнейшие характеристики, которым должен удовлетворять любой элемент микро или молекулярной электроники.
2. Объяснить два альтернативных механизма сенсibilизации: перенос энергии и перенос электрона. Что такое критерий Герни-Мотта?

Билет №3

1. Написать модельный гамильтониан для случая зонной модели переноса электронов.
2. Какова классификация жидких кристаллов?

4. Критерии оценивания

Оценка	Баллы	Критерии
отлично	10	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	9	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	8	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и

		умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.
хорошо	7	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.
	6	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.
	5	Выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.
удовлетворительно	4	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.
	3	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.
неудовлетворительно	2	Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.
	1	Выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и

		вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.
--	--	---

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется не менее 40 минут на подготовку. Опрос по билету и ответы на дополнительные вопросы не должен превышать двух астрономических часов. По завершении отведенного на опрос времени, экзаменатор должен выставить обучающемуся оценку в соответствии с вышеприведенными критериями. Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины