

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

| | |
|----------------------------|--|
| | Рабочая программа дисциплины (модуля) |
| по дисциплине: | Semiconductor Nanoelectronic Devices/Полупроводниковые наноэлектронные устройства |
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур |
| курс: | 1 |
| квалификация: | магистр |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Д.А. Свинцов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и технологии наноструктур 01.02.2021

Аннотация

Курс посвящен физическим принципам, технологиям и моделированию полупроводниковых нанoeлектронных устройств, в том числе на основе новых материалов – различных квантовых материалов, включая графен, другие двумерные материалы и ван-дер-ваальсовы гетероструктуры. Решенные в рамках лекционного курса и задачи могут быть в дальнейшем адаптированы для дальнейшей исследовательской деятельности студентов. Курс нацелен на развитие творческих навыков постановки перспективных научных задач в области полупроводниковых нанoeлектронных устройств и квантовых материалов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

получение знания о физических принципах, технологии и моделировании современных полупроводниковых нанoeлектронных устройств, в том числе на основе новых материалов – различных квантовых материалах, включая графен, другие двумерные материалы и ван-дер-ваальсовы гетероструктуры. Решенные в рамках лекционного курса и задачи могут быть в дальнейшем адаптированы для дальнейшей исследовательской деятельности студентов. Курс нацелен на развитие творческих навыков постановки перспективных научных задач в области полупроводниковых нанoeлектронных устройств и квантовых материалов.

Задачи дисциплины

- получение знаний о современных полупроводниковых приборах;
- получение знаний о приборах на основе низкоразмерных электронных систем;
- изучение проблем создания оптоэлектронных приборов терагерцового диапазона;
- получение знаний о физике двумерных материалов;
- изучение проблем создания электронных, оптоэлектронных и фотонных устройств на основе двумерных материалов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| 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-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации |
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения |
| | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники) |
| | ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений |

| | |
|---|--|
| 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-4.2 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 |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели |
| | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |
| ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию | ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива |
| | ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные принципы работы современных полупроводниковых приборов
- основные подходы к созданию современных оптоэлектронных устройств

уметь:

- рассчитывать распределение электростатического потенциала и плотности носителей заряда в полупроводниковых структурах

владеть:

- методами вычисления характеристик полупроводниковых наноэлектронных устройств
- основными методами решения уравнений электродинамики и электронного транспорта (уравнение Больцмана, диффузионно-дрейфовые и гидродинамические уравнения) применительно к полупроводниковым приборам
- методами оценки параметров носителей заряда (энергетический спектр, подвижность, длина свободного пробега) в низкоразмерных системах

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 | Туннельные транзисторы для низковольтной электроники | 3 | | | 3 |
| 2 | Полевые транзисторы на основе фазовых переходов | 2 | | | 2 |

| | | | | | |
|-----------------------|--|--------------------|--|--|----|
| 3 | Транзисторы с высокой электронной подвижностью на основе двумерных электронов в соединениях АЗВ5 | 4 | | | 4 |
| 4 | Резонансно-туннельные структуры | 2 | | | 2 |
| 5 | Графен и его приложения в аналоговой и цифровой электронике | 2 | | | 2 |
| 6 | Модификации графена и их приложения в электронике | 3 | | | 3 |
| 7 | Электронный транспорт в одномерных системах | 2 | | | 2 |
| 8 | Полевые транзисторы на основе одномерных систем | 2 | | | 2 |
| 9 | Методы расчета оптических переходов в полупроводниках | 2 | | | 2 |
| 10 | Полупроводниковые лазеры | 2 | | | 2 |
| 11 | Полупроводниковые фотодетекторы | 4 | | | 4 |
| 12 | Фотодетекторы на основе двумерных материалов | 2 | | | 2 |
| Итого часов | | 30 | | | 30 |
| Подготовка к экзамену | | 30 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 90 час., 2 зач.ед. | | | |

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Туннельные транзисторы для низковольтной электроники

Проблема снижения потребляемой мощности в полевых транзисторах. «Термоэмиссионный предел» подпороговой крутизны полевого МДП-транзистора. Туннелирование в барьерах Шоттки и устройство полевого транзистора с контактами Шоттки. Межзонное туннелирование в полупроводниках, вычисление туннельного тока при прямом туннелировании, туннелировании с участием фононов и примесей. Конструкция транзистора с туннельным переходом, управляемым затвором, предельная крутизна подпороговой характеристики для данной конструкции. Межзонное туннелирование в полупроводниках при наличии флуктуаций электрического потенциала. Влияние размерности канала туннельного транзистора на туннельную характеристику. Эффекты плотности состояний в межзонном туннелировании.

2. Полевые транзисторы на основе фазовых переходов

Сегнетоэлектрический фазовый переход: феноменологическое описание в рамках теории Ландау. Особенности перехода в диоксиде гафния. Отрицательная дифференциальная емкость и ее влияние на напряжение переключения МОП-транзисторов. Современное состояние приборов на основе отрицательной емкости. Переход металл-диэлектрик при изменении концентрации электронов. Природа фазового перехода «металл-диэлектрик» в диоксиде ванадия.

3. Транзисторы с высокой электронной подвижностью на основе двумерных электронов в соединениях АЗВ5

Методы локализации электронов в двух измерениях: квантовые ямы и локализация электронов на гетеро интерфейсах. Методы легирования двумерных систем и «дистанционное легирование» (remote doping). Схема и зонная диаграмма транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT). Расчет электронной подвижности, ограниченной рассеянием на отдаленных примесях. Эффекты распределенной емкости и индуктивности в высокочастотных транзисторах. Предельная частота усиления тока и предельная частота усиления мощности.

4. Резонансно-туннельные структуры

Туннельный транспорт в двухбарьерных гетероструктурах, расчет туннельной прозрачности и вольтамперной характеристики резонансно-туннельного диода (РТД). Режим отрицательного дифференциального сопротивления и его использование для генерации высокочастотных колебаний. Механизмы избыточного тока в резонансно-туннельных диодах.

5. Графен и его приложения в аналоговой и цифровой электронике

Эффективный гамильтониан и энергетический спектр носителей заряда в одно- и двухслойном графене. Влияние хиральности носителей заряда на транспортные свойства: подавление обратного рассеяния и межзонное туннелирование. Проблема минимальной проводимости графена, влияние флуктуаций потенциала на концентрацию носителей заряда и проводимость. Факторы, ограничивающие электронную подвижность в графене: рассеяние на примесях, оптических и акустических фононах, границах зерен и локальных напряжениях решетки. Особенности рассеяния носителей заряда в подвешенном и инкапсулированном графене. Эффект поля в графене и характеристики графенового транзистора, амбиполярный транспорт. Предельная частота переключения и проблема тока закрытого состояния. Механизмы насыщения тока в графеновых полевых транзисторах.

6. Модификации графена и их приложения в электронике

Структуры на основе графена с конечной шириной запрещенной зоны: двухслойный графен и наноленты. Связь ширины запрещенной зоны с напряженностью поперечного поля (двухслойный графен) и шириной наноленты. Решение проблемы тока закрытого состояния в транзисторах на основе модификаций графена. Краевые эффекты в транзисторах на основе двухслойного графена и нанолент: протекание тока по краевым каналам и рассеяние электронов на краях. Особенности туннельного транспорта в двухслойном графене.

7. Электронный транспорт в одномерных системах

Расчет когерентного электронного транспорта в одномерной системе: вычисление матрицы плотности электронов в канале при поддержании фиксированного заполнения контактов. Эффекты уширения уровней, вызванные наличием контактов. Вывод формулы Ландауэра

8. Полевые транзисторы на основе одномерных систем

Электронный спектр и транспорт носителей заряда в графеновых нанолентах и нанотрубках. Связь хиральности нанотрубок с зонной структурой, полупроводниковые и металлические нанотрубки. Связь структуры края нанолент с энергетическим спектром носителей заряда, краевые состояния. Баллистическая проводимость одномерных систем, формула Ландауэра и ее применение для расчета характеристик баллистического полевого транзистора с одномерным каналом. Взаимодействие носителей заряда в одномерных системах и его проявления в транспортных свойствах.

9. Методы расчета оптических переходов в полупроводниках

К-р гамильтониан для объемных полупроводников. Матричный элемент взаимодействия электрона с электромагнитной волной. Межзонные и внутризонные переходы, ограничения, накладываемые на эти переходы законами сохранения импульса-энергии и симметриями кристалла. Эффекты плотности состояний в спектрах оптического поглощения. Поглощение света двумерными системами. Универсальная оптическая проводимость графена.

10. Полупроводниковые лазеры

Условие лазерной генерации в полупроводниках в терминах квази-уровней Ферми. Методы создания инверсной заселенности зон. Лазер на основе сильно легированного p-n-перехода. Лазер на основе гетероструктуры: эффекты сверхинжекции, оптического ограничения и ограничения носителей заряда. Лазеры на основе квантовых ям, их спектры усиления, сравнение с лазерами на гетероструктурах. Квантовые каскадные лазеры и их принцип работы. Проблема достижения лазерной генерации в терагерцовом диапазоне частот.

11. Полупроводниковые фотодетекторы

Основные характеристики фотодетекторов: чувствительность, эквивалентная мощность шума. «Классический» фотодетектор на основе p-n-перехода. Принцип действия и расчет вольт-ваттной и ампер-ваттной чувствительности. Влияние рекомбинации на характеристики детектора на p-n-переходе. Факторы, ограничивающие чувствительность: темновой ток и шумы в p-n-переходе. Джонсоновский и генерационно-рекомбинационный шум. Проблемы детектирования излучения дальнего инфракрасного диапазона.

12. Фотодетекторы на основе двумерных материалов

Механизмы фотоотклика в графене: фотовольтаический, термоэлектрический, болометрический, резистивное смешивание. Зависимости тока, генерируемого по данным механизмам, от концентрации носителей заряда, температуры, поляризации излучения. Время отклика фотодетекторов на основе графена и факторы, его ограничивающие. Расчет термоэлектрического фотодетектора на основе графена с индуцированными p-n-переходами. Фототранзисторный эффект в двумерных системах, причины возникновения фотоиндуцированного заряда и факторы, влияющие на время его формирования. Физические причины аномально большой токовой чувствительности детекторов на основе двумерных халькогенидов переходных металлов.

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

Комплект электронных презентаций/слайдов; аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук); при необходимости специальные технические средства для обучающихся инвалидов и лиц с ОВЗ.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Физика полупроводниковых приборов [Текст]/С. М. Зи, -М., Энергия, 1973
2. Физика полупроводников [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников .— М. : Наука, 1990 .— 688 с.
- Literature fund of the basic departament:
3. С. Датта «Квантовый транспорт: от атома к транзистору», Москва, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009
4. Enoki T., Ando T. (eds.). Physics and chemistry of graphene: graphene to nanographene. – Pan Stanford Publishing, 2013.

Дополнительная литература

Literature fund of the basic department:

1. L. Venema "Silicon electronics and beyond" Nature 479 стр. 309 (2011) – коллекция статей, посвященная проблемам миниатюризации в кремниевой электронике и альтернативным принципам транзисторов
2. H. Lu, A. Seabaugh. "Tunnel field-effect transistors: State-of-the-art" IEEE Journal of the Electron Devices Society vol. 2 iss. 4 p. 44-49 (2014); S. Cristoloveanu, J. Wan, A. Zaslavsky "A review of sharp-switching devices for ultra-low power applications" IEEE Journal of the Electron Devices Society, vol. 4 iss. 5, 215-226 (2016).
3. S. Salahuddin, S. Datta "Use of negative capacitance to provide voltage amplification for low power nanoscale devices" Nano letters, vol. 8 iss. 2, 405-410 (2008); W. Cao and K. Banerjee "Is negative capacitance FET a steep-slope logic switch?" Nat. Commun. vol. 11, p. 196 (2020).
4. F. Schwierz "Graphene transistors: status, prospects, and problems" Proceedings of the IEEE vol. 101 iss. 7, p. 1567-1584 (2013).
5. M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto "Resonant tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators" Jpn. J. Appl. Phys. vol. 47, p. 4375 (2008).
6. F. Koppens, T. Mueller, P. Avouris, A. Ferrari, M. Vitiello, M. Polini. "Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems" Nature nanotechnology, vol. 9 iss. 10, 780-793 (2014); A. Rogalski, M. Kopytko, P. Martyniuk "Two-dimensional infrared and terahertz detectors: Outlook and status" Applied Physics Reviews, vol. 6 iss. 2, 021316 (2019).
7. M. S. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, P. De Natale "Quantum cascade lasers: 20 years of challenges" Optics express vol. 23 iss. 4, p. 5167-5182 (2015).

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

Не используются

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

При подготовке и проведении лекционных занятий используется сеть интернет. Кроме того, используется Libre Office.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

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

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Общая и прикладная физика
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
кафедра физики и технологии наноструктур
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: Д.А. Свинцов, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| 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-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации |
| ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения | ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения |
| | ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники) |
| | ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений |
| 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-4.2 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 |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели |
| | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |
| ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию | ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива |
| | ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Semiconductor Nanoelectronic Devices/Полупроводниковые нанoeлектронные устройства» обучающийся должен:

знать:

- основные принципы работы современных полупроводниковых приборов
- основные подходы к созданию современных оптоэлектронных устройств

уметь:

- рассчитывать распределение электростатического потенциала и плотности носителей заряда в полупроводниковых структурах

владеть:

- методами вычисления характеристик полупроводниковых наноэлектронных устройств
- основными методами решения уравнений электродинамики и электронного транспорта (уравнение Больцмана, диффузионно-дрейфовые и гидродинамические уравнения) применительно к полупроводниковым приборам
- методами оценки параметров носителей заряда (энергетический спектр, подвижность, длина свободного пробега) в низкоразмерных системах

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

Не предусмотрено.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Примеры контрольных теоретических вопросов:

1. Перечислите основные механизмы возникновения токов утечки в туннельных транзисторах с управляемым затвором р-п-переходом.
2. Изобразите схематически зависимость плотности состояний от энергии в сильно легированном полупроводнике в логарифмическом масштабе. Рассчитайте также зависимость среднеквадратичной флуктуации электрического потенциала от концентраций донорных и акцепторных примесей (размерность объекта $d=3$). Дайте численную оценку этой величины для кремния, легированного донорами с $N_d=10^{19} \text{ см}^{-3}$.
3. Перечислите основные причины возникновения поверхностных состояний на границе «металл-полупроводник»?
4. Выпишите общее выражение для высоты барьера и контактного сопротивления в системе «металл-полупроводник», которое учитывает как различие работ выхода материалов, так и наличие поверхностных состояний в запрещенной зоне.
5. Изобразите зонную диаграмму НЕМТ-транзистора в направлении от истока к стоку и от затвора к каналу. Объясните принцип дельта - легирования.
6. Укажите критерий применимости гидродинамического описания электронного транспорта в полупроводниках. Рассмотрите ограничения на характерную длину изменения внешнего потенциала и на частоту его изменения.
7. Изобразите зависимость частоты от волнового вектора для плазмонов в двумерной электронной системе, если затвор находится (а) на расстоянии, много большем длины волны (б) много меньше длины волны. Считайте, что транспорт электронов подчиняется уравнениям гидродинамики. Как изменится вид спектра, если электроны были бы бесстолкновительными?
8. Изобразите схематично зависимость плотности состояний от энергии в инверсионном слое кремниевого полевого транзистора при большом положительном напряжении на затворе.
9. Изобразите схематически зависимость прозрачности ступенчатого потенциального барьера в графене от направления импульса налетающего электрона (парадокс Клейна). Как качественно изменится ответ при учете конечной величины напряженности поля в барьере?
10. Изобразите схематически вольт - амперную и вольт - затворную характеристики полевого транзистора на основе графена. Прокомментируйте основные качественные отличия от характеристик кремниевых полевых транзисторов, объясните причины отличий.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Перечислите основные механизмы возникновения токов утечки в туннельных транзисторах с управляемым затвором р-п-переходом.

2. Изобразите схематически зависимость плотности состояний от энергии в сильно легированном полупроводнике в логарифмическом масштабе. Рассчитайте также зависимость среднеквадратичной флуктуации электрического потенциала от концентраций донорных и акцепторных примесей (размерность объекта $d=3$). Дайте численную оценку этой величины для кремния, легированного донорами с $N_d=10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Билет 2.

1. Изобразите схематически вольт - амперную и вольт - затворную характеристики полевого транзистора на основе графена. Прокомментируйте основные качественные отличия от характеристик кремниевых полевых транзисторов, объясните причины отличий.

2. Изобразите принципиальную схему генератора терагерцового излучения на основе резонансно-туннельного диода. Считая известными импеданс антенны, емкость диода и его дифференциальную (отрицательную) проводимость, запишите условие самовозбуждения электрических колебаний в данной схеме.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - 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.

Оценка отлично 9 баллов - 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.

Оценка отлично 8 баллов - 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.

Оценка хорошо 7 баллов - 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.

Оценка хорошо 6 баллов - 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.

Оценка хорошо 5 баллов - 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.

Оценка удовлетворительно 4 балла - 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.

Оценка удовлетворительно 3 балла - 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.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - 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.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - 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

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.