

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Семинар по твердотельной электронике
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.А. Волков, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры электроники 29.05.2020

Аннотация

Курс "Семинар по твердотельной электронике" предусматривает формирование у студентов практических навыков и опыта применения базовых знаний в решении научно-практических задач.

Задачи курса:

- формирование у студентов базы знаний по вопросам функционирования, расчета и конструирования полупроводниковых приборов;
- привитие навыков к развитию новых подходов при постановке и решении задач фундаментального и прикладного значения;
- дать студентам знания в области наиболее важных практических приложений полупроводниковых приборов и устройств в науке, технике и технологиях;
- привить студентам навыки развития новых подходов к постановке и решению задач фундаментального и прикладного значения;
- привить студентам навыки к развитию новых подходов к постановке и решению экспериментальных задач исследований электрофизических свойств твердых тел современными методами.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Общие сведения о полупроводниковых наноструктурах и низкоразмерных электронных системах. Квантовые размерные эффекты.
2. Размерное квантование. Квантовые ямы (КЯ) в гетероструктурах, волновые функции и спектр электрона в прямоугольной и квазиправильной яме, двумерные подзоны, условия наблюдения размерного квантования.
3. Системы с 2D электронным газом : пленки полуметаллов (висмут), МДП-структуры на основе кремния, селективно легированные гетероструктуры, гетероструктуры с квантовыми ямами, сверхрешетки, графен.
4. Полевые транзисторы с двумерным с 2D электронами.
5. 2D оптика и электрооптика.
6. Межзонное поглощение в квантовых ямах. 2D экситон: энергия связи и влияние электрического поля, квантово-размерный эффект Штарка и его применения в оптических КЯ- модуляторах.
7. Резонансное туннелирование. Туннельный диод Esaki
8. Проводимость 2D систем – 1. Квантовый точечный контакт и квантование баллистической проводимости, условия наблюдения. Формула Ландауэра.
9. Проводимость 2D систем – 2. 2D проводимость и контактное сопротивление в магнитном поле: тензор 2D проводимости и тензор 2D сопротивления в классически сильных магнитных полях. Квантующие магнитные поля и эффект Шубникова-де Гааза.
10. Проводимость 2D систем – 3. Квантование Ландау. Скачущие орбиты и краевые токи. Квантовый эффект Холла в графене. Представление о дробном квантовом эффекте Холла.
11. Межэлектронное взаимодействие. Межэлектронное взаимодействие в объемных системах и 2D системах (в наноструктурах). Параметр межэлектронного взаимодействия в вырожденных и невырожденных системах.
12. Элементы электрических цепей
13. Идеальный операционный усилитель и схемы на его основе
14. Характеристики реальных операционных усилителей
15. Электронные ключи, компараторы и цифро-аналоговые преобразователи
16. Цифровая измерительная техника
17. . Основные методы измерения электрических сигналов
18. Измерения малых напряжений, измерения низкоомных объектов
19. Измерение малых токов
20. Измерение потенциалов высокоомных объектов, электрометрические измерения
21. Измерение дифференциального сопротивления и нелинейных вольт-амперных характеристик
22. Наводки
23. Методы измерения и стабилизации температуры
24. Особенности проведения измерений при низких температурах
25. Ввод данных в компьютер и системы автоматизации измерений
26. Нестандартные методы проведения электрофизических измерений и ошибки экспериментаторов

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- формирование у студентов практических навыков и опыта применения базовых знаний в решении научно-практических задач.

Задачи дисциплины

- формирование у студентов базы знаний по вопросам функционирования, расчета и конструирования полупроводниковых приборов;
- привитие навыков к развитию новых подходов при постановке и решении задач фундаментального и прикладного значения;
- дать студентам знания в области наиболее важных практических приложений полупроводниковых приборов и устройств в науке, технике и технологиях;
- привить студентам навыки развития новых подходов к постановке и решению задач фундаментального и прикладного значения;
- привить студентам навыки к развитию новых подходов к постановке и решению экспериментальных задач исследований электрофизических свойств твердых тел современными методами.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- природу физических процессов в полупроводниковых структурах применительно к их функциональной роли.

уметь:

- самостоятельно ставить и решать задачи по теоретическому исследованию физических явлений в полупроводниковых приборах.

владеть:

- навыками проведения экспериментальных исследований процессов в полупроводниковых приборах и оценки возможностей их приложений.

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

	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.
--	---

№	Тема (раздел) дисциплины	Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Общие сведения о полупроводниковых наноструктурах		2		1
2	Размерное квантование		2		2
3	Системы с 2D электронным газом		4		1
4	Полевые транзисторы		4		1
5	Двумерная оптика и электроника		4		1
6	Межзонное поглощение в квантовых ямах		4		4
7	Туннелирование		4		1
8	Проводимость 2D систем		2		1
9	2D проводимость и кондактанс в магнитном поле		2		1
10	Квантование Ландау		2		2
11	Межэлектронное взаимодействие		2		1
12	Цепи		2		1
13	Операционный усилитель		2		1
14	Характеристики усилителей		2		1
15	Приборы и методы твердотельной электроники		22		11
Итого часов			60		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

1. Общие сведения о полупроводниковых наноструктурах

Общие сведения о полупроводниковых наноструктурах и низкоразмерных электронных системах. Квантовые размерные эффекты.

2. Размерное квантование

Размерное квантование. Квантовые ямы (КЯ) в гетероструктурах, волновые функции и спектр электрона в прямоугольной и квазипрямоугольной яме, двумерные подзоны, условия наблюдения размерного квантования.

3. Системы с 2D электронным газом

Системы с 2D электронным газом : пленки полуметаллов (висмут), МДП-структуры на основе кремния, селективно легированные гетероструктуры, гетероструктуры с квантовыми ямами, сверхрешетки, графен.

4. Полевые транзисторы

Полевые транзисторы с двумерным с 2D электронами.

5. Двумерная оптика и электроника

2D оптика и электрооптика. Примеры, применение.

6. Межзонное поглощение в квантовых ямах

Межзонное поглощение в квантовых ямах. 2D экситон: энергия связи и влияние электрического поля, квантово-размерный эффект Штарка и его применения в оптических КЯ-модуляторах.

7. Туннелирование

Резонансное туннелирование. Туннельный диод Esaki.

8. Проводимость 2D систем

Проводимость 2D систем – 1. Квантовый точечный контакт и квантование баллистической проводимости, условия наблюдения. Формула Ландауэра.

9. 2D проводимость и кондактанс в магнитном поле

Проводимость 2D систем – 2. 2D проводимость и кондактанс в магнитном поле: тензор 2D проводимости и тензор 2D сопротивления в классически сильных магнитных полях. Квантующие магнитные поля и эффект Шубникова-де Гааза.

10. Квантование Ландау

Проводимость 2D систем – 3. Квантование Ландау. Скачущие орбиты и краевые токи. Квантовый эффект Холла в графене. Представление о дробном квантовом эффекте Холла.

Семестр: 8 (Весенний)

11. Межэлектронное взаимодействие

Межэлектронное взаимодействие. Межэлектронное взаимодействие в объемных системах и 2D системах (в наноструктурах). Параметр межэлектронного взаимодействия в вырожденных и невырожденных системах.

12. Цепи

Элементы электрических цепей.

13. Операционный усилитель

Идеальный операционный усилитель и схемы на его основе.

14. Характеристики усилителей

Характеристики реальных операционных усилителей.

15. Приборы и методы твердотельной электроники

Электронные ключи, компараторы и цифро-аналоговые преобразователи. Цифровая измерительная техника. Основные методы измерения электрических сигналов. Измерения малых напряжений, измерения низкоомных объектов. Измерение малых токов. Измерение потенциалов высокоомных объектов, электрометрические измерения. Измерение дифференциального сопротивления и нелинейных вольт-амперных характеристик. Наводки.

Методы измерения и стабилизации температуры. Особенности проведения измерений при низких температурах. Ввод данных в компьютер и системы автоматизации измерений.

Нестандартные методы проведения электрофизических измерений и ошибки экспериментаторов.

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

1. Ч. Киттель Введение в физику твердого тела - М.: Медиа Стар, 2006 - 792 с.

Дополнительная литература

1. Ч. Киттель Квантовая теория твердых тел - М.: Наука, 1987 - 491 с.

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)

на занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

- 1) посещение всех семинаров, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении семинаров;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к докладчику на семинаре.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра электроники
курс:	4
квалификация:	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
	7 (осенний) - Дифференцированный зачет
	8 (весенний) - Дифференцированный зачет
Разработчик:	В.А. Волков, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Семинар по твердотельной электронике» обучающийся должен:

знать:

- природу физических процессов в полупроводниковых структурах применительно к их функциональной роли.

уметь:

- самостоятельно ставить и решать задачи по теоретическому исследованию физических явлений в полупроводниковых приборах.

владеть:

- навыками проведения экспериментальных исследований процессов в полупроводниковых приборах и оценки возможностей их приложений.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия.

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

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. Как проявляются квантовые размерные эффекты?
2. Условия реализации размерного квантования.
3. Причина высокой подвижности электронов в графене.
4. Почему высока подвижность электронов в транзисторах с 2D электронном газом ?
5. В чем основное преимущество гетеролазеров с квантовыми точками?
6. Почему энергия связи экситона повышается при уменьшении размерности системы?
7. Чем определяется фактор качества резонансных туннельных диодов?
8. Условия наблюдения квантования баллистической проводимости.
9. Как проводимость в квантующем магнитном поле зависит от рассеяния электронов?
10. Можно ли измерить сопротивление диска Корбино в квантующем магнитном поле?
11. Где течет ток в режиме квантового эффекта Холла?
12. Основная особенность двумерных плазмонов.
13. Назовите основные источники шумов и наводок при электрофизических измерениях..
14. Назовите основные преимущества и недостатки измерения дифференциальной проводимости аналоговым и цифровым методами.
15. Перечислите основные методы выделения сигнала из шума.
16. Как повысить быстродействие измерительной схемы при измерении высокоомных объектов?

17. Как уменьшить влияние утечек через сопротивление изоляции при проведении четырехконтактных измерений высокоомных объектов?

18. Как уменьшить влияние температурных дрейфов на результаты измерений при работе с низкоомными объектами, находящимися в криостате?

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;

- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;

- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

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

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.