

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:  
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

**Основы нанoeлектроники**

по направлению подготовки

**03.03.03 Радиофизика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**Радиофизика, электроника и информационные системы**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2025**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
М. Л. Громов

Председатель УМК  
А. П. Коханенко

Томск – 2025

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.

ПК-2 Способен проводить математическое моделирование процессов в приборах и устройствах радиофизики и электроники, владеть современными отечественными и зарубежными пакетами программ при решении профессиональных задач.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

ИПК 2.1 Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства.

ИПК 2.2 Применяет в профессиональной деятельности различные численные методы, в том числе реализованные в готовых библиотеках при решении конкретных радиофизических задач.

ИПК 2.3 Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

- изучить особенности поведения носителей заряда в квантово-размерных структурах;

- освоить методы расчёта параметров энергетического спектра, электрофизических и оптических характеристик квантово-размерных структур;

- научиться применять понятийный аппарат нанoeлектроники для анализа квантово-размерных эффектов в полупроводниковых структурах.

## **3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор. Дисциплина входит в модуль «Твердотельная электроника».

## **4. Семестр освоения и форма промежуточной аттестации по дисциплине**

Восьмой семестр, зачет.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: «Математический анализ», «Физика», «Квантовая механика», «Физика полупроводников».

## **6. Язык реализации**

Русский.

## **7. Объем дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

- лекции: 38 ч.,

– практические занятия: 8 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины, структурированное по темам**

### **Тема 1. Виды полупроводниковых низкоразмерных структур (НРС)**

Условия наблюдения квантовых размерных эффектов. Структуры с двумерным – квантовые ямы (КЯ), одномерным – квантовые нити (КН) и нульмерным – квантовые точки (КТ) электронным газом. Структуры с вертикальным переносом – сверхрешетки (СР).

### **Тема 2. Энергетический спектр носителей заряда в НРС**

Размерное квантование энергии электронов в одномерных КЯ. Энергетический спектр и волновые функции носителей заряда в КЯ, КН и КТ. Энергетический спектр и волновые функции носителей заряда в СР из КЯ. Энергетический спектр локализованных состояний в НРС: водородоподобные примеси, экситоны.

### **Тема 3. Статистика носителей заряда в НРС**

Двумерная и одномерная плотности состояний. Концентрация носителей заряда в КЯ, КН и СР.

### **Тема 4. Оптические свойства НРС**

Оптическая плотность состояний в НРС. Межзонное поглощение света в КЯ, КН и СР в области края фундаментальной полосы. Межподзонное поглощение в КЯ и СР. Лазеры на КЯ. Фотодетекторы ИК-излучения.

### **Тема 5. Кинетические свойства НРС**

Планарная проводимость носителей заряда в КЯ в области омиической проводимости. Вертикальный перенос носителей заряда в СР из КЯ в области классических и квантовых полей.

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения тестов по лекционному материалу, выполнения индивидуальных домашних заданий. Результаты контроля фиксируются в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Теоретические индивидуальные домашние задания (ИДЗ) сформированы с целью проверки достижения обучающимся следующих индикаторов компетенций: ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 2.1 (Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства).

### **Примеры теоретических индивидуальных заданий**

#### **ИДЗ № 1(теория)**

1. Какие твердотельные структуры называются низкоразмерными и почему? Дать определение.
2. Какой вид имеет энергетическая диаграмма носителей заряда в одинарной и двойной гетероструктурах с двумерным электронным газом. Изобразить диаграмму. Пояснить обозначения.
3. Что называется графеном, графаном?
4. Какие сверхрешетки называются композиционными? Дать определение.
5. Какая сверхрешетка называется легированной? К какому типу относятся

легированные сверхрешетки? Дать определение.

### ИДЗ № 2 (теория)

1. Какая физическая величина называется функцией оптической (комбинированной) плотности состояний. Дать определение. Функцией чего она является?
2. Какие имеются дополнительные правила отбора для собственного (межзонного) поглощения света в симметричных квантовых ямах первого типа из прямозонного полупроводника с разрешенными оптическими переходами? Дать краткий ответ. Пояснить ответ картинкой.
3. При какой поляризации света имеет место собственное (межзонное) поглощение света в прямозонных квантовых нитях с разрешенными оптическими переходами? Дать обоснованный ответ.
4. Какой области спектра соответствует межподзонное поглощение света в квантовой яме? Дать обоснованный ответ.
5. Какой вид имеет спектр межзонного поглощения света в квантовых нитях прямозонного полупроводника с разрешенными оптическими переходами? Представить график зависимости коэффициента поглощения от энергии фотона в области пороговой частоты. Пояснить обозначения.

Практические индивидуальные домашние задания сформированы с целью проверки достижения обучающимся следующих индикаторов компетенций: ИПК 2.2 (Применяет в профессиональной деятельности различные численные методы, в том числе реализованные в готовых библиотеках при решении конкретных радиофизических задач) и ИПК 2.3 (Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники).

### Примеры практических индивидуальных заданий

#### ИДЗ № 1(практика)

1. Какой должна быть подвижность невырожденных электронов ( $m^*=0.066 m_0$ ) в прямоугольных КЯ из GaAs при температуре 300 К, чтобы длина свободного пробега была больше ширины прямоугольной КЯ, равной 10 нм?
2. Рассчитать три нижних уровня энергии электронов кубической квантовой точки из полупроводника с эффективной массой электронов  $m^*=0.06 m_0$  и стороной куба  $a=60$  нм. Указать степень вырождения этих уровней без учета спина.
3. Оценить минимальное значение напряженности однородного электрического поля, при котором проводимость СР из глубоких прямоугольных КЯ в области штарковской локализации будет иметь максимум? Считать ширину КЯ равной  $a = 6$  нм, период СР  $d = 16$  нм, эффективную массу электронов квазидвумерного газа  $m^*=0.06 m_0$ .

#### ИДЗ.№ 2(практика)

1. Чему равняется значение длины волны де-Бройля для электронов InAs ( $m^*=0.028 m_0$ ) с тепловой энергией при температуре 300 К?
2. Рассчитать в одноподзонам приближении максимальную линейную концентрацию невырожденного ( $\eta = -1$ ) и минимальную вырожденного ( $\eta=4$ ) электронного газа ( $m^*=0.063 m_0$  (GaAs)) в квантовой нити при  $T = 295$  К.
3. Оценить напряженность и напряжение однородного электрического поля, приложенного к СР с периодом 40 нм и шириной КЯ 20 нм, при которых вертикальная проводимость в области штарковской локализации будет соответствовать первому максимуму? Эффективная масса электронов КЯ  $0.07 m_0$ , число периодов СР равно 200.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в восьмом семестре проводится в письменной форме в виде рубежного тестирования. К рубежному тестированию допускаются студенты, успешно выполнившие все теоретические и практические ИДЗ. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Вопросы рубежного теста позволяют оценить выполнение обучающимся следующих индикаторов компетенций: ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 2.1 (Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства).

### Примеры вопросов зачётного теста

| № | Вопрос                                                                                                                                | Варианты ответа                                                                                                                |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Какие из перечисленных структур могут соответствовать одиночной МДП-структуре:                                                        | 1) прямоугольная КЯ.<br>2) параболическая КЯ<br>3) треугольная КЯ<br>4) с вертикальным переносом.                              |
| 2 | Как зависит энергия разрешенных уровней прямоугольной КЯ от квантового числа $n$ ?                                                    | 1) $\sim n^{-2}$<br>2) $\sim n^{-1}$<br>3) $\sim n^0$<br>4) $\sim n$<br>5) $n^2$                                               |
| 3 | Чему равняется плотность вероятности найти электрон в середине глубокой прямоугольной КЯ шириной $a$ в первом возбужденном состоянии? | 1) $4/a$<br>2) $3/a$<br>3) $2/a$<br>4) $1/a$<br>5) 0                                                                           |
| 4 | Как изменяется энергия активации водородоподобной примеси в узкой КЯ по сравнению с объемным проводником?                             | 1) уменьшается в 4 раза<br>2) уменьшается в 2 раза<br>3) не меняется<br>4) увеличивается в 2 раза<br>5) увеличивается в 4 раза |
| 5 | Ширина запрещенной зоны СР первого типа по сравнению с шириной узкозонного полупроводника:                                            | 1) возрастает<br>2) не меняется<br>3) уменьшается<br>4) однозначного ответа нет                                                |
| 6 | Самую большую плотность состояний носителей заряда в области низких энергий имеют:                                                    | 1) объемные полупроводники<br>2) КЯ<br>3) КН<br>4) КТ                                                                          |
| 7 | Как зависит от температуры эффективная плотность состояний в КН?                                                                      | 1) $\sim T^{-3/2}$<br>2) $\sim T^{-1}$<br>3) $\sim T^{-1/2}$<br>4) $\sim T^{1/2}$<br>5) $\sim T^1$<br>6) $\sim T^{3/2}$ .      |
| 8 | Пороговая частота собственного поглощения света в эпитаксиальной пленке прямозонного полупроводника по сравнению с монокристаллом:    | 1) возрастает<br>2) не меняется<br>3) уменьшается<br>4) однозначного ответа нет                                                |

|    |                                                                                                                                                                                            |                                                                                  |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 9  | Межподзонное поглощение света в КЯ имеет место между подзонами:                                                                                                                            | 1) четными<br>2) нечетными<br>3) разной четности<br>4) любыми                    |
| 10 | Как зависит дрейфовая скорость носителей заряда $\overline{v}_D$ при вертикальном переносе от напряженности электрического поля $E$ в области отрицательной дифференциальной проводимости? | 1) $\sim E^{-2}$<br>2) $\sim E^{-3/2}$<br>3) $\sim E^{-1}$<br>4) $\sim E^{-1/2}$ |

Результаты промежуточной аттестации по дисциплине характеризуются оценками «зачтено» или «не зачтено» в соответствии с таблицей.

| Компетенция                                                                                                                                                                                                                          | Индикатор компетенции                                                                                                                                                                 | Критерии оценивания результатов обучения                                                                                                                         |                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                       | Не зачтено                                                                                                                                                       | Зачтено                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                       |
| <b>ОПК-1</b><br>Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.                                                 | <b>ИОПК-1.3</b><br>Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.                                                           | Не имеет представления о характеристиках основных полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники.                                                     | Имеет общее представление о характеристиках основных полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники.                                                     | Допускает отдельные неточности в представлении и характеристиках основных полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроник и.                            | Имеет полное представление о характеристиках основных полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники.                                                                                      |
| <b>ПК-2</b><br>Способен проводить математическое моделирование процессов в приборах и устройствах радиофизики и электроники, владеть современными отечественными и зарубежными пакетами программ при решении профессиональных задач. | <b>ИПК-2.1</b><br>Применяет в профессиональной деятельности различные численные методы, в том числе реализованные в готовых библиотеках при решении конкретных радиофизических задач. | Не знает численные методы, необходимые для расчета параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники и их электрических и оптических свойств. | Знает численные методы, необходимые для расчета параметров полупроводниковых структур нанoeлектроники и их электрических и оптических свойств, недостаточно хорошо. | Знает численные методы, необходимые для расчета параметров полупроводниковых структур нанoeлектроники, но допускает существенные ошибки при проведении расчетов. | Знает численные методы, необходимые для расчета параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники и их электрических и оптических свойств, проводя расчеты практически без ошибок. |
|                                                                                                                                                                                                                                      | <b>ИПК-2.2</b><br>Применяет в                                                                                                                                                         | Не знает теорию                                                                                                                                                  | Знает содержание                                                                                                                                                    | Проводит теоретические                                                                                                                                           | Свободно использует                                                                                                                                                                                   |

|  |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                          |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | профессиональной деятельности различные численные методы, в том числе реализованные в готовых библиотеках при решении конкретных радиофизических задач. | расчёта параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники и их электрических и оптических свойств.                                                | теоретических моделей для определения характеристик полупроводниковых структур нанoeлектроники, но допускает существенные ошибки при проведении расчетов.                           | расчёты параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники и их электрических и оптических свойств, допуская незначительные ошибки.                                            | теоретические модели для расчёта параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники и их электрических и оптических свойств.                           |
|  | <b>ИПК-2.3</b><br>Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники.                                    | Не владеет современным и пакетами программ при расчёте параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники и их электрических и оптических свойств. | Владеет современным и пакетами программ при расчёте параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники, но допускает существенные ошибки при проведении расчетов. | Владеет современным и пакетами программ при расчёте параметров полупроводниковых низкоразмерных структур нанoeлектроники, их электрических и оптических свойств, допуская незначительные ошибки. | Владеет современным и пакетами программ при расчёте параметров полупроводниковых низкоразмерных структур и их электрических и оптических свойств практически без ошибок. |

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=2561>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (п. 9, 10).

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=2561>

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем: Учебное пособие. - СПб.: Наука, 2001. - 160 с.

2. Борисенко С.И., Вячислая Ю.В. Учебно-методический комплекс. – Томск, ТГУ, 2011. <http://edu.tsu.ru/eor/resource/572/tpl/index.html>

3. Вьюрков В.В., Гридчин В.А., Драгунов В.П., Орликовский А.А. Нанoeлектроника. Часть 1. Введение в нанoeлектронику. МГТУ им. Баумана, 2009. – 711 с. [http://rffi.molnet.ru/rffi/ru/books/o\\_27028](http://rffi.molnet.ru/rffi/ru/books/o_27028)

4. Кульбачинский В.А. Двумерные, одномерные, нульмерные структуры и сверхрешетки: Учебное пособие. - М.: Изд-во физического факультета МГУ, 1998. - 164 с.

5. Неверов В.Н., Титов А.Н. Физика низкоразмерных систем. Учебное пособие. Екатеринбург: УГУ, 2008.- 233 с.

б) дополнительная литература:

1. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур. - М.: Логос, 2000. - 248 с.
2. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки: Пер.с англ. - М.: Мир, 1989. - 240 с.
3. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников.– М.: Физматлит, 2002.– 560 с.
4. Воронов В.К., Подоппелов А.В. Современная физика: Учебное пособие.– М.:КомКнига, 2005.–512 с.
5. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. Москва: Техносфера, 2006.-595с.
6. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанoeлектроники: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск, 2000. - 328 с.
7. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. Вильнюс: Мокслас, 1989. - 264 с.
8. Тавгер Б.А., Демиховский В.Я. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых и полуметаллических пленках. Успехи физических наук. – 1968. - Т.96, В.1. - С. 61-86.
9. Тагер А.С. Размерные квантовые эффекты в субмикронных полупроводниковых структурах и перспективы их применения в электронике СВЧ. Ч. 1. Физические основы. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1987. - В.9. - С. 21-34.
10. Борисенко С.И. Электропроводность полупроводниковых сверхрешеток (методическая разработка). Томск: ТГУ, 1998. - 36 с.
11. Борисенко С.И. Интерференционные эффекты при туннелировании электронных волн в квантовых гетероструктурах и перспективы их использования (методическая разработка). Томск: ТГУ, 1999. - 29 с.
12. Борисенко С.И. Оптические свойства низкоразмерных полупроводниковых структур. Учебно-методическое пособие. Томск: ТГУ, 2007. – 23 с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>
2. Новые полупроводниковые материалы. Характеристики и свойства: база данных ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – URL: <http://www.matprop.ru/>
3. eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>

### **13. Перечень информационных технологий**

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакетпрограмм. Включаетприложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
- пакет программного обеспечения PTCMathCadEducation (Договор поставки №7193 от 14.10.2015;
- пакет SMathStudio для решения задач на практических занятиях (в свободном доступе);
- публично доступные облачные технологии (GoogleDocs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –  
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>  
– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>  
– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Актру»).

#### **15. Информация о разработчиках**

Борисенко Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, радиофизический факультет НИ ТГУ, кафедра полупроводниковой электроники, доцент.