

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан

А. Г. Коротаев

Оценочные материалы по дисциплине

Низкоразмерные структуры в электронике

по направлению подготовки

**03.04.03 Радиофизика**

Направленность (профиль) подготовки:

**Материалы и устройства функциональной электроники и фотоники**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Магистр**

Год приема

**2025**

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

И.А. Прудаев

Председатель УМК

А.П. Коханенко

Томск – 2025

## **1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-2 Способен осуществлять построение математических моделей объектов исследования и выбор готового или разработку нового алгоритма решения задачи.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК 2.1 Формулирует постановку задачи, определяет параметры и функции разрабатываемой системы

ИПК 2.2 Определяет алгоритм и набор параметров, с учётом которых должно быть проведено моделирование устройства или системы

ИПК 2.3 Проводит компьютерное моделирование устройства или системы

## **2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания**

Элементы текущего контроля:

- тесты;
- контрольная работа;
- презентации на семинарах.

В ходе контроля проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: ИПК-2.1 (Формулирует постановку задачи, определяет параметры и функции разрабатываемой системы), ИПК-2.2 (Определяет алгоритм и набор параметров, с учётом которых должно быть проведено моделирование устройства или системы), ИПК-2.3 (Проводит компьютерное моделирование устройства или системы).

### **Примерный перечень вопросов для самостоятельной работы студентов (тестов)**

1. Какие твердотельные структуры называются низкоразмерными и почему? Дать определение.
2. Какое явление называется размерным квантованием энергетического спектра носителей заряда в полупроводниковых структурах?
3. Какие условия необходимы для наблюдения размерного квантования зонного спектра? Перечислить эти условия. Записать формулы. Пояснить обозначения.
4. В каких наноструктурах можно получить двумерный электронный газ? Перечислить эти структуры. Указать где в них находится двумерный электронный газ.
5. Какой вид имеет энергетическая диаграмма носителей заряда в МДП структуре с двумерным электронным газом. Изобразить диаграмму. Пояснить обозначения.
6. От каких квантовых чисел зависит состояние носителей заряда в КЯ? Какие значения они принимают?
7. Записать формулу для энергетического спектра электронов в подзоне одномерной прямоугольной бесконечно глубокой квантовой ямы. Пояснить обозначения.
8. Записать формулу для волновых функций электронов в подзоне одномерной прямоугольной бесконечно глубокой квантовой ямы. Пояснить обозначения.
9. Записать формулу для энергетического спектра электронов в подзоне одномерной параболической бесконечно глубокой квантовой ямы. Пояснить обозначения.
10. Записать формулу для энергетического спектра электронов в подзоне изолированной квантовой ямы конечной глубины. Пояснить обозначения.
11. От каких квантовых чисел зависит состояние носителей заряда в КН? Какие значения они принимают?
12. Что называется плотностью состояний электронов в подзоне зоны проводимости

- квантовой ямы?
13. Чему равняется поверхностная плотность состояний в подзоне одномерной квантовой ямы? Записать формулу. Пояснить обозначения.
  14. Чем отличается функция двумерной плотности состояний от трехмерной?
  15. Какой вид имеет график зависимости плотности состояний двумерного электронного газа в квантовых ямах от энергии? Нарисовать график. Пояснить обозначения.
  16. Что называется плотностью состояний электронов в подзоне зоны проводимости квантовой нити?
  17. Чему равняется линейная плотность состояний в подзоне квантовой нити? Записать формулу. Пояснить обозначения.
  18. Аналогом чего является плотности состояний электронов в квантовых нитях. Пояснить почему?
  19. Какая физическая величина называется функцией оптической (комбинированной) плотности состояний. Дать определение. Функцией чего она является?
  20. Чему равняется функция оптической плотности в прямозонных полупроводниках с разрешенными оптическими переходами в области края собственного поглощения? Написать формулу. Нарисовать график зависимости этой функции в области пороговой частоты собственного поглощения. Пояснить обозначения.
  21. Чему равняется функция оптической плотности состояний в прямоугольной квантовой яме первого типа из прямозонного полупроводника с разрешенными оптическими переходами? Записать формулу. Нарисовать график зависимости этой функции в области края собственного поглощения. Пояснить обозначения.
  22. Чем отличается край собственного поглощения света при переходе от объемного прямозонного полупроводника с разрешенными оптическими переходами к квантовой яме первого типа? Дать обоснованный ответ. Представить край собственного поглощения КЯ и объемного полупроводника на графике. Пояснить обозначения.
  23. Чему равняется пороговое значение энергии собственного поглощения света в глубокой прямоугольной квантовой яме первого типа из прямозонного полупроводника? Записать формулу. Пояснить обозначения.
  24. Какая проводимость носителей заряда в КЯ называется планарной? Дать определение.
  25. Как влияет размерное квантование на планарную проводимость носителей заряда в КЯ?
  26. Какие новые механизмы рассеяния следует учитывать при расчете планарной проводимости носителей заряда в квантовых ямах в отличие от объемной проводимости?
  27. Как зависит планарная плотность тока в КЯ от напряженности электрического поля? Записать формулу, пояснить обозначения.
  28. Чему равняется удельная планарная проводимость носителей заряда в КЯ? Записать формулу, пояснить обозначения.
  29. Как изменяется зависимость времени релаксации от энергии для основных механизмов рассеяния электронов при переходе от трехмерного газа к двумерному? Записать формулу, пояснить обозначения.

### **Примеры задач:**

#### **1. Условия наблюдения размерного квантования**

- 1) Чему равняется значение длины волны де-Бройля для электронов InAs ( $m^*=0.028 m_0$ ) с тепловой энергией при температуре 300 К?

- 2) Каким должно быть минимальное значение подвижности носителей заряда в глубокой прямоугольной КЯ шириной 6 нм, чтобы эффекты размерного квантования были заметны?

## 2. Энергетический спектр и волновые функции носителей заряда

- 1) При какой максимальной толщине  $d$  в пленке висмута (Bi), имеющим перекрытие валентной зоны и зоны проводимости  $\Delta E = E_v - E_c = 30$  мэВ, появится запрещенная зона. Эффективную массу электронов висмута принять равной  $0.01 m_0$ , дырок  $0.1 m_0$ .
- 2) Рассчитать среднее значение энергии невырожденных электронов ( $m^* = 0.07 m_0$ ) в прямоугольной глубокой КЯ шириной 5 нм при  $T = 295$  К. Считать, что все электроны находятся в нижней подзоне зоны проводимости.
- 3) Рассчитать максимальное значение энергии связи экситона в тонкой эпитаксиальной пленке полупроводника в приближении глубокой прямоугольной КЯ для электронов и дырок с параметрами  $m_n = 0.063 m_0$ ,  $m_p = 0.51 m_0$ ,  $\epsilon_s = 13$ . Оценить ширину КЯ (в нм) при этом значении.
- 4) В приближении квазиклассики оценить ширину области локализации электронов в минизоне одномерной СР шириной  $\Delta = 1.5$  мэВ в однородном электрическом поле  $F = 20$  кВ.

## 3. Плотность состояний и концентрация носителей заряда

- 1) Рассчитать поверхностную плотность состояний электронов ( $m^* = 0.06 m_0$ ) с энергией 0.36 эВ в глубокой прямоугольной КЯ шириной 10 нм.
- 2) Рассчитать в одноподзонном приближении линейную концентрацию электронного газа ( $m^* = 0.1 m_0$ ) в квантовой нити при  $T = 295$  К для уровня Ферми  $\xi = 1.5 k_0 T$ .
- 3) Рассчитать поверхностную концентрацию электронов при  $T = 77$  К в глубокой прямоугольной КЯ шириной  $a = 1$  нм при  $m^* = 0.06 m_0$  и  $\epsilon = 12$ , легированной однородно водородоподобной однозарядной примесью с концентрацией  $N_{DV} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .
- 4) Рассчитать приведенный безразмерный уровень ферми для электронов при  $T = 77$  К в глубокой прямоугольной КЯ шириной  $a = 1$  нм при  $m^* = 0.06 m_0$  и  $\epsilon = 12$ , легированной однородно водородоподобной однозарядной примесью с концентрацией  $N_{DV} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

## 4. Оптические свойства

- 1) Рассчитать модуль матричного элемента импульса для оптического перехода при межзонном поглощении света в эпитаксиальной пленке GaAs толщиной 5 нм, если коэффициент поглощения в области края равен  $5.5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ . Значение необходимых для расчета параметров считать равными соответствующим значениям в объемном GaAs:  $m_n = 0.06 m_0$ ,  $m_p = 0.5 m_0$ ;  $E_g = 1.4$  эВ;  $\epsilon_\infty = 11$ .
- 2) \*Рассчитать в эВ сдвиг края собственного поглощения света  $\Delta \hbar \omega$  за счет размерного квантования энергетического спектра в двойной гетероструктуре первого типа с глубокими КЯ шириной  $a = 10$  нм из полупроводника с эффективной массой электронов  $m_n = 0.04 m_0$  и дырок  $m_p = 0.1 m_0$ .

## 5. Проводимость

- 1) Рассчитать при комнатной температуре  $T = 295$  К максимальное значение удельной проводимости невырожденных ( $\eta = -1$ ) электронов глубокой КЯ ( $a = 6$  нм) в одноподзонном приближении с параметрами  $m_n = 0.04 m_0$ ;  $\tau = 2$  пс. Сравнить полученную проводимость с объемной при тех же условиях
- 2) В одноминизонном приближении рассчитать среднее по энергии значение продольной эффективной массы носителей заряда при вертикальном переносе в

области омыческой проводимости в СР из слабо взаимодействующих КЯ при  $T=300$  К. Ширина нижней минизоны СР  $\Delta=4$  мэВ, период сверхрешетки  $d=10$  нм, эффективная масса электронов полупроводника, составляющего КЯ, равна  $0.06 m_0$ , концентрация электронов в минизоны  $1.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

- 3) Рассчитать в одноминизонном приближении максимальное значение отрицательной дифференциальной проводимости при вертикальном переносе электронов СР из глубоких КЯ в области классических электрических полей для следующих параметров: ширина основной минизоны  $\Delta=2$  мэВ, период сверхрешетки  $d=10$  нм, эффективная масса квазидвумерных электронов в КЯ равна  $0.06 m_0$ , концентрация электронов при  $T=100$  К равняется  $n_V=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $\tau=1$  пс.
- 4) 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  $200$ .

### **Примерные темы семинарских занятий:**

1. Виды основных низкоразмерных структур нанoeлектроники
2. Энергетический спектр и волновые функции носителей заряда
3. Плотность состояний и концентрация носителей заряда
4. Оптические свойства низкоразмерных структур
5. Проводимость низкоразмерных структур

### **3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания**

В ходе контроля проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: ИПК-2.1 (Формулирует постановку задачи, определяет параметры и функции разрабатываемой системы), ИПК-2.2 (Определяет алгоритм и набор параметров, с учётом которых должно быть проведено моделирование устройства или системы).

#### **Примерный перечень теоретических вопросов:**

1. Какие твердотельные структуры называются низкоразмерными и почему? Дать определение.
2. Какой вид имеет энергетическая диаграмма носителей заряда в одинарной и двойной гетероструктуре 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.
6. От каких квантовых чисел зависит состояние носителей заряда в одномерных КЯ? Какие значения они принимают?
7. Записать формулу для энергетического спектра электронов в подзоне квантовой нити прямоугольного сечения с бесконечно глубокой двумерной прямоугольной квантовой ямой. Пояснить обозначения.
8. От каких квантовых чисел зависит состояние носителей заряда в СР из одномерных

КЯ? Какие значения они принимают?

9. Записать формулу для огибающих волновые функции электронов в минизоне сверхрешетки в приближении сильной связи. Пояснить обозначения.
10. Какую роль играют примесные состояния возбужденных подзон квантовой ямы?
11. Что называется плотностью состояний электронов в подзоне зоны проводимости квантовой ямы? Дать определение. Записать общую формулу. Пояснить обозначения. Нарисовать график этой функции.
12. Чему равняется линейная плотность состояний в подзоне квантовой нити? Записать формулу. Пояснить обозначения. Нарисовать график этой функции.
13. Чему равняется эффективная плотность состояний электронов квантовой ямы в одноподзонном приближении? Записать формулу. Пояснить обозначения.
14. Чему равняется линейная концентрация электронов в квантовой нити в одноподзонном приближении для **невыврожденного** одномерного электронного газа? Записать формулу. Пояснить обозначения.
15. Записать формулу для концентрации электронов в сверхрешетке в одноминизонном и квазидвумерном приближении? Пояснить обозначения.
16. Какая физическая величина называется функцией оптической (комбинированной) плотности состояний. Дать определение. Функцией чего она является?
17. 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.
18. При какой поляризации света имеет место собственное (межзонное) поглощение света в прямозонных квантовых нитях с разрешенными оптическими переходами? Дать обоснованный ответ.
19. Какой области спектра соответствует межподзонное поглощение света в квантовой яме? Дать обоснованный ответ.
20. Какой вид имеет спектр межзонного поглощения света в квантовых нитях прямозонного полупроводника с разрешенными оптическими переходами.
21. Представить график зависимости коэффициента поглощения от энергии фотона в области пороговой частоты. Пояснить обозначения.
22. Какая проводимость носителей заряда в КЯ называется планарной? Дать определение. Чему она равняется. Записать формулу, пояснить обозначения.
23. Как изменяется зависимость подвижности электронов от температуры для основных механизмов рассеяния при переходе от невырожденного трехмерного газа к планарной подвижности двумерного? Указать степень этой зависимости. Сделать выводы.
24. Как зависит подвижность вырожденных электронов минизоны сверхрешетки при вертикальном переносе в области омической проводимости от концентрации для основных механизмов рассеяния? Указать степень этой зависимости.
25. Чему равняется максимальное значение дрейфовой скорости вырожденных (невыврожденных) электронов минизоны СР при вертикальном переносе в области классических электрических полей? Записать формулу, пояснить обозначения.
26. Указать область электрических полей, в которой происходит шарковская локализация электронов минизоны сверхрешетки? Записать формулу для нижней границы напряженности поля, пояснить обозначения. Что она означает?

Студент, не аттестованный в контрольной точке, не допускается к сдаче зачета.

Результаты зачета определяются оценками «зачтено», «не зачтено».

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
		Не зачтено	Зачтено
ПК-2 Способен осуществлять построение математических моделей объектов исследования и выбор готового или разработку нового алгоритма решения задачи.	ИПК 2.1 Формулирует постановку задачи, определяет параметры и функции разрабатываемой системы	Не способен формулировать постановку задач в области исследования низкоразмерных структур	Формулирует постановку задачи в области исследования низкоразмерных структур, определяет параметры и функции разрабатываемой системы с использованием информационных технологий
	ИПК 2.2 Определяет алгоритм и набор параметров, с учётом которых должно быть проведено моделирование устройства или системы	Не способен определять алгоритмы моделирования и наборы параметров в области исследования низкоразмерных структур	Определяет алгоритм и набор параметров в области исследования низкоразмерных структур, с учётом которых должно быть проведено моделирование устройства

#### 4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Вопросы теста для оценки остаточных знаний по дисциплине

(верные ответы выделены курсивом)

№	Вопрос	Варианты ответа
1	Какие из перечисленных структур могут соответствовать одиночной МДП-структуре:	1) прямоугольная КЯ. 2) параболическая КЯ 3) <i>треугольная КЯ</i> 4) с вертикальным переносом.
2	Как зависит энергия разрешенных уровней прямоугольной КЯ от квантового числа $n$ ?	1) $\sim n^{-2}$ 2) $\sim n^{-1}$ 3) $\sim n^0$ 4) $\sim n$ 5) $n^2$

3	Чему равняется плотность вероятности найти электрон в середине глубокой прямоугольной КЯ шириной $a$ в первом возбужденном состоянии?	1) $4/a$ 2) $3/a$ 3) $2/a$ 4) $1/a$ 5) $0$
4	Как изменяется энергия активации водородоподобной примеси в узкой КЯ по сравнению с объемным проводником?	1) уменьшается в 4 раза 2) уменьшается в 2 раза 3) не меняется 4) увеличивается в 2 раза 5) <i>увеличивается в 4 раза</i>
5	Ширина запрещенной зоны СР первого типа по сравнению с шириной узкозонного полупроводника:	1) <i>возрастает</i> 2) не меняется 3) уменьшается 4) однозначного ответа нет
6	Самую большую плотность состояний носителей заряда в области низких энергий имеют:	1) объемные полупроводники 2) КЯ 3) КН 4) $KT$
7	Как зависит от температуры эффективная плотность состояний в КН?	1) $\sim T^{-3/2}$ 2) $\sim T^{-1}$ 3) $\sim T^{-1/2}$ 4) $\sim T^{1/2}$ 5) $\sim T^1$ 6) $\sim T^{3/2}$ .
8	Пороговая частота собственного поглощения света в эпитаксиальной пленке прямозонного полупроводника по сравнению с монокристаллом:	1) <i>возрастает</i> 2) не меняется 3) уменьшается 4) однозначного ответа нет
9	Межподзонное поглощение света в КЯ имеет место между подзонами:	1) четными 2) нечетными 3) <i>разной четности</i> 4) любыми
10	Как зависит дрейфовая скорость носителей заряда СР при вертикальном переносе от напряженности электрического поля $E$ в области отрицательной дифференциальной проводимости?	1) $\sim E^{-2}$ 2) $\sim E^{-3/2}$ 3) $\sim E^{-1}$ 4) $\sim E^{-1/2}$

### Информация о разработчиках

Борисенко Сергей Иванович, доктор физ.-мат. наук, Томский государственный университет, профессор.