

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»



УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета радиотехники  
и электроники

 / В.А. Небольсин /  
31 августа 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
дисциплины  
**«Физика низкоразмерных структур в микро-  
и нанoeлектронике»**

Направление подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Профиль Материалы и устройства функциональной электроники

Квалификация выпускника магистр

Нормативный период обучения 2 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2021

Автор программы

  
С.А. Акулинин

И.о. заведующего кафедрой  
полупроводниковой электроники  
и нанoeлектроники

  
А.В. Строгонов

Руководитель ОПОП

  
А.В. Костюченко

**Воронеж 2021**

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

**1.1. Цели дисциплины** – формирование набора общекультурных и профессиональных компетенций будущего магистра по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» путем освоения теоретического материала и возможностей использования средств вычислительной техники и программного обеспечения для научных расчетов.

### 1.2. Задачи освоения дисциплины:

- формирование у студентов физических представлений о низкоразмерных структурах и их свойствах;
- ознакомление с современными технологиями изготовления квантово-размерных структур;
- развитие представлений о применении устройств и приборов на основе квантово-размерных структур в микро- и наноэлектронике.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина Б1.О.08 «Физика низкоразмерных структур в микро- и наноэлектронике» относится к дисциплинам обязательной части блока Б1 учебного плана.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Физика низкоразмерных структур в микро- и наноэлектронике» направлен на формирование следующих компетенций:

**ОПК-1:** способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора;

**ОПК-3:** способен приобретать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ОПК-1	знать физические основы и свойства низкоразмерных структур;
	уметь моделировать наноструктуры с использованием отечественного и зарубежного опыта;
	владеть современными физическими представлениями о свойствах низкоразмерных структур.
ОПК-3	знать возможности современных технологий изготовления квантово-размерных структур; области применения низкоразмерных структур в электронике;

	<b>уметь</b> видеть перспективу применения низкоразмерных структур в развитии различных направлений электроники;
	<b>владеть</b> современными информационными технологиями для оценки количественных и качественных показателей низкоразмерных структур и прогноза их характеристик.

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины «Физика низкоразмерных структур в микро- и наноэлектронике» составляет 5 зачетных единиц.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

##### Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		1
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	70	70
В том числе:		
Лекции	18	18
Практические занятия (ПЗ)	18	18
Лабораторные работы (ЛР)	34	34
<b>Самостоятельная работа</b>	83	83
Курсовая работа	+	+
Часы на контроль	27	27
Вид промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость час	180	180
зач. ед.	5	5

##### Заочная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		1
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	16	16
В том числе:		
Лекции	4	4
Практические занятия (ПЗ)	4	4
Лабораторные работы (ЛР)	8	8
<b>Самостоятельная работа</b>	155	155
Курсовая работа	+	+
Часы на контроль	9	9
Вид промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость час	180	180
зач. ед.	5	5

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

**очная форма обучения**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Общие сведения об объектах нанотехнологии и размерных эффектах	Наноструктурные материалы (кристаллы, кристаллиты, кластеры). Физические основы нанoeлектроники (квантовое ограничение, баллистический транспорт носителей, туннелирование носителей заряда). Основные характеристики и принцип работы резонансно-туннельного диода.	2	2	4	11	19
2	Углеродные и кремниевые наноструктуры	Углеродные кластеры. Углеродные нанотрубки: методы получения, структура, свойства. Применение углеродных наноструктур в электронике.	2	2	6	11	21
3	Методы исследования наноструктурированных материалов	Электронная микроскопия. Просвечивающая электронная микроскопия. Растровая электронная микроскопия. Дифракционные методы исследования. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА). Электронная оже-спектроскопия. Зондовая микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия. Атомно-силовая микроскопия.	4	4	8	13	29
4	Свойства нанокластеров и наночастиц	Фотонные кристаллы. Фононный кристалл. Магнетонный кристалл. Инфракрасные детекторы. Лазеры на квантовых точках. Основы одноэлектроники. Приборные структуры одноэлектроники. Одноэлектронные транзисторные структуры кремниевые, металлические структуры	2	2	4	13	21
5	Самосборка и катализ	Процесс самосборки. Полупроводниковые островковые структуры. Монослои. Природа катализа. Площадь поверхности наночастиц. Пористые материалы. Коллоиды	2	2	4	11	19
6	Методы формирования нанoeлектронных структур (нанотехнология)	Традиционные методы осаждения пленок. Химическое осаждение из газовой фазы. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Атомная инженерия. Локальное окисление металлов и полупроводников. Нанолитография. Электронно-лучевая литография. Нанопечать	4	4	4	12	24
7	Наноструктурированные материалы в электронике	Микроэлектромеханические системы. Нанoeлектромеханические системы. Молекулярные и супрамолекулярные триггеры. Нанокapsулы. Наножидкостные устройства. Сенсоры на основе наноматериалов.	2	2	4	12	20
<b>Всего</b>			<b>18</b>	<b>18</b>	<b>34</b>	<b>83</b>	<b>153</b>
<b>Контроль</b>							<b>27</b>
<b>Итого</b>							<b>180</b>

### заочная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Общие сведения об объектах нанотехнологии и размерных эффектах	Наноструктурные материалы (кристаллы, кристаллиты, кластеры). Физические основы нанoeлектроники (квантовое ограничение, баллистический транспорт носителей, туннелирование носителей заряда). Основные характеристики и принцип работы туннельного диода.	2	-	4	14	20
2	Углеродные и кремниевые наноструктуры	Углеродные кластеры. Углеродные нанотрубки: методы получения, структура, свойства. Применение углеродных наноструктур в электронике.	-	-	-	25	25
3	Методы исследования наноструктурированных материалов	Электронная микроскопия. Просвечивающая электронная микроскопия. Растровая электронная микроскопия. Дифракционные методы исследования. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА). Электронная оже-спектроскопия. Зондовая микроскопия. Сканирующая туннельная микроскопия. Атомно-силовая микроскопия.				27	27
4	Свойства нанокластеров и	Фотонные кристаллы. Фононный кристалл. Магнетонный кристалл. Инфракрасные детекторы. Лазеры на квантовых точках.	-	2	4	14	20

	наночастиц	Основы одноэлектроники. Приборные структуры одноэлектроники. Одноэлектронные транзисторные структуры кремниевые, металлические структуры					
5	Самосборка и катализ	Процесс самосборки. Полупроводниковые островковые структуры. Монослои. Природа катализа. Площадь поверхности наночастиц. Пористые материалы. Коллоиды				25	25
6	Методы формирования нанoeлектронных структур (нанотехнология)	Традиционные методы осаждения пленок. Химическое осаждение из газовой фазы. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Атомная инженерия. Локальное окисление металлов и полупроводников. Нанолитография. Электронно-лучевая литография. Нанопечать	2			25	27
7	Наноструктурированные материалы в электронике	Микроэлектромеханические системы. Нанoeлектромеханические системы. Молекулярные и супрамолекулярные триггеры. Нанокапсулы. Наножидкостные устройства. Сенсоры на основе наноматериалов.		2		25	27
<b>Всего</b>			<b>4</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>155</b>	<b>171</b>
<b>Контроль</b>							<b>9</b>
<b>Итого</b>							<b>180</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

1. Емкостные методы контроля параметров границы раздела полупроводник - диэлектрик
2. Исследование структуры энергетических зон методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. (ВГУ)
3. Метод Оже-спектроскопии и ЭСХА при исследовании наноматериалов. (кафедра ВГУ).
4. Просвечивающая электронная микроскопия (ВГТУ 1 корпус)
5. Качественный анализ содержания примесей методом электронно-зондового микроанализа (кафедра 4 корпус).
6. Рентгеновский дифракционный анализ (ВГТУ 1 корпус)
7. Исследование поверхности тонкопленочных структур методами СТМ и АСМ (кафедра, ВГТУ 1 корпус)
8. Сенсоры на основе наноматериалов.

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины «Физика низкоразмерных структур в микро- и наноэлектронике» предусматривает выполнение курсовой работы в 1 семестре для очной формы обучения, в 1 семестре для заочной формы обучения.

Примерная тематика курсовых работ:

1. Принципы масштабирования в проектировании субмикронных МОП-СБИС
2. Физические основы функционирования и конструкция приборов одноэлектронной электроники
3. Физические принципы функционирования, конструкция и параметры резонансно-туннельных диодов

4. Технология и оборудование для осаждения пленок с субмикронными толщинами (ALD)

5. Механизмы паразитных утечек в МОП-транзисторе с субмикронными параметрами

Задачи, решаемые при выполнении курсовой работы:

– формирование и развитие навыков самостоятельного поиска, подбора, систематизации, анализа и обобщения литературного и справочного материала;

– систематизация, закрепление и творческое использование теоретических знаний по учебной дисциплине «Физика наноразмерных структур в микроэлектронике и наноэлектронике»;

– приобретение начального опыта научно-исследовательской и проектной работы;

– развитие навыков и умений изложения своих мыслей, использования научной терминологии, аргументации своих выводов и предложений.

Курсовая работа включает в себя графическую часть и расчетно-пояснительную записку.

Учебным планом по дисциплине «Физика низкоразмерных структур в микро- и наноэлектронике» не предусмотрено выполнение контрольной работы.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

### 7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

#### 7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ОПК-1	знать физические основы и свойства низкоразмерных структур;	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь моделировать наноструктуры с использованием отечественного и зарубежного опыта;	Решение стандартных практических задач, написание курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть современными физическими представлениями о свойствах низкоразмерных структур.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

ОПК-3	<b>знать</b> возможности современных технологий изготовления квантово-размерных структур; области применения низкоразмерных структур в электронике;	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	<b>уметь</b> видеть перспективу применения низкоразмерных структур в развитии различных направлений электроники;	Решение стандартных практических задач, написание курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	<b>владеть</b> современными информационными технологиями для оценки количественных и качественных показателей низкоразмерных структур и прогноза их характеристик.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсовой работы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 1 семестре для очной формы обучения, 1 семестре для заочной формы обучения по четырехбалльной системе:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл	Неудовл
ОПК-1	<b>знать</b> физические основы и свойства низкоразмерных структур;	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	<b>уметь</b> моделировать наноструктуры с использованием отечественного и зарубежного опыта;	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	<b>владеть</b> современными физическими представлениями о свойствах низкоразмерных структур.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ОПК-3	<b>знать</b> возможности современных технологий изготовления квантово-размерных структур; области применения низкоразмерных структур в электронике;	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	<b>уметь</b> видеть перспективу применения низкоразмерных структур в развитии различных направлений электроники;	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	<b>владеть</b> современными информационными технологиями для оценки количественных и качественных показателей низкоразмерных структур и прогноза их характеристик.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

## 7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

### 7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Число уровней в минизоне сверхрешетки определяется:
  1. толщиной квантовых ям;
  2. числом квантовых ям;
  3. числом барьеров;
  4. толщиной барьеров.
2. При увеличении массы частицы, коэффициент прозрачности барьера при туннелировании:
  1. увеличивается;
  2. уменьшается;
  3. остается неизменным.
3. В каких плоскостях будут существовать уровни Ландау, если вектор  $B$  направлен вдоль оси  $Z$ , перпендикулярной плоскости 2D-газа:
  1. в плоскости  $X$ ;
  2. в плоскости  $Y$ ;
  3. в плоскости  $Z$ .
4. В каких структурах на ВАХ наблюдается «Кулоновская лестница»:
  1. в однобарьерных структурах с низкой прозрачностью перехода;
  2. в двухбарьерной структуре при одинаковых прозрачностях переходов;
  3. в двухбарьерной структуре при различных прозрачностях переходов.
5. Какие электроды называют стоком и истоком в одноэлектронном транзисторе:
  1. электрод у барьера с низкой прозрачностью;
  2. электрод у барьера с высокой прозрачностью.
6. Практическое применение целочисленного эффекта Холла:
  1. эталон силы тока;
  2. эталон сопротивления;
  3. эталон напряжения.
7. Как изменится частота излучения лазера на основе ДГС, если уменьшить толщину квантовой ямы:
  1. уменьшится;
  2. увеличится;
  3. может как уменьшиться так и увеличиться, в зависимости от материала и эффективной массы.
8. Гипотеза де Бройля выражается соотношением:
  - а)  $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$ ;
  - б)  $\omega = \frac{E}{\hbar}$ ;
  - в)  $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ ;
  - г)  $\omega = \frac{E_n - E_m}{\hbar}$ .
9. Длина волны де Бройля для заряженной частицы, ускоренной электрическим полем, определяется по формуле:

а)  $\frac{2\pi\hbar}{p}$ ,

б)  $\frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mT}}$

в)  $\frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2meU}}$

г)  $\frac{2\pi\hbar}{mv}$ .

10. Волновая функция  $\psi$ , являющаяся решением уравнения Шредингера  $\hat{I} \psi = E\psi$ , должна:
1. быть непрерывной, однозначной и конечной;
  2. иметь решение при любых значениях энергии  $E$ ;
  3. иметь решение при собственных значениях энергии  $E$ .

### 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Высокая подвижность носителей заряда в НЕМТ транзисторах достигается:
  1. за счет принципа масштабирования;
  2. применением гетероструктуры для формирования 2D электронного газа в канале транзистора;
  3. баллистического переноса заряда в канале транзистора;
  4. применением *spice* прослойки в структуре затвора;
  5. совокупностью всех перечисленных методов.
2. Назовите технологические методы создания локальных напряжений в структуре МОП СБИС:
  1. нанесение на МДПТ напряженных пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (etch - stop liner - маскирующих пленок), как для  $N$ - так и для  $P$ -канальных транзисторов;
  2. метод «запоминания» напряжения (Stress Memorization Technique) для  $N$ -канальных МДПТ;
  3. введение  $\text{SiGe}$  в область истока и стока – для  $p$ - МДПТ;
  4. все перечисленные методы.
3. Проблема уменьшения токов утечки в субмикронных МОП решается:
  1. совершенствованием технологии;
  2. увеличением толщины диэлектрика  $\text{SiO}_2$ ;
  3. применением диэлектрика с более высокой диэлектрической постоянной.
4. Максимальная толщина слоев в низкоразмерной гетероструктуре должна быть:

а) меньше 100 нм	б) $a \ll \frac{\sqrt{3\hbar\pi}}{\sqrt{2m^*kT}}$	в) $a \ll \frac{h}{\sqrt{3m^*kT}}$	г) $a \ll \frac{e}{2C}$
---------------------	---	------------------------------------	-------------------------

5. Выберите предпочтительные методы осаждения наноразмерных пленок из числа представленных ниже:
  1. импульсное лазерное осаждение – PLD;
  2. газофазное осаждение – CVD;
  3. физическое вакуумное осаждение – PVD;
  4. газофазное осаждение из металлоорганических соединений – MOS-CVD;
  5. молекулярно-лучевая эпитаксия – MBE (ALD).
6. В технологии современных МОП-СБИС (например, фирмы Intel) в качестве подзатвонного диэлектрика вместо  $\text{SiO}_2$  используются пленки  $\text{HfO}_2$ . Основание для такого решения:
  1. более совершенная граница раздела кремний – диэлектрик;
  2. технологичность;

3. электрическая прочность;
  4. высокая диэлектрическая проницаемость.
7. Назовите основные проблемы при реализации принципа масштабирования в технологии элементов МОП-СБИС:
1. утечки в подзатворном диэлектрике;
  2. смыкание областей истока и стока;
  3. уменьшение подвижности носителей заряда в канале.
8. Формирование квантовых точек происходит при осаждении материалов на подложку по механизму:
1. Фольмера-Вебера;
  2. Странского-Крастанова;
  3. Франка-ВандерМерве.
9. Что происходит с массивом квантовых точек при увеличении температуры подложки в процессе эпитаксиального роста:
1. увеличивается размер основания;
  2. увеличивается высота;
  3. увеличивается поверхностная плотность;
  4. уменьшается размер основания;
  5. уменьшается высота;
  6. уменьшается поверхностная плотность.
10. Минимальный размер островка квантовой точки определяется:
1. длиной волны де Бройля;
  2. необходимостью существования хотя бы одного энергетического уровня;
  3. постоянной решетки осаждаемого материала.

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Найти вероятность прохождения  $D$  и отражения  $R$  для электрона с энергией 2,5 эВ, падающего на потенциальную стенку высотой 2,0 эВ. Эффективную массу принять равной массе электрона в состоянии покоя. Ответ дать в эВ.
2. Определить энергетический спектр электрона в квантовой яме с шириной 4 нм.
3. Определить минимальную энергию электрона, находящегося в потенциальной яме шириной 8 нм. Ответ дать в эВ.
4. Найти вероятность прохождения  $D$  и отражения  $R$  для электрона с энергией 3 эВ, проходящего через барьер высотой 3,5 эВ и протяженностью 5 нм. Эффективную массу принять равной массе электрона в состоянии покоя.
5. Имеется ДГС на основе AlAs/GaAs/AlAs. Определить минимальную и максимальную толщину квантовой ямы. Справочные данные для материалов взять из справочника.
6. Найти вероятность прохождения  $D$  и отражения  $R$  для электрона с энергией 2эВ, проходящего через барьер высотой 3,5 эВ и протяженностью 5 нм. Эффективную массу принять равной массе электрона в состоянии покоя.
7. Определить ширину барьера  $d$ , при которой вероятность прохождения электрона с энергией 3 эВ через барьер высотой 3,5 эВ и шириной 5 нм окажется равной  $D = 0,1$ . Эффективную массу принять равной массе электрона в состоянии покоя ( $d = 0,4$  нм).
8. Наблюдение эффекта кулоновской блокады возможно при условии:

а) температуры, близкой к 0 К	б) $C \ll \frac{e^2}{2kT}$	б) $C \gg \frac{e^2}{2kT}$	$eU_k = \frac{e^2}{2C}$
-------------------------------	----------------------------	----------------------------	-------------------------

9. «Прорыв» кулоновской блокады произойдет при напряжении:

а) $U = \frac{e}{2C}$	б) $U = \frac{e^2}{2C}$	в) $U = -\frac{e}{2C}$	г) $U = -\frac{e^2}{2C}$
-----------------------	-------------------------	------------------------	--------------------------

10. Выберите пару(ы) материалов из предложенных, для создания на их основе синего светодиода с длиной волны 420нм:

- а) GaAs; б) AlGaAs; в) GaN; г) GaAsP; д) InGaN;  
е) GaP; ж) GaInP; з) ZnSe; и) InP; к) ZnMnSe.

#### 7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом.

#### 7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

1. Элементы квантовой теории твердых тел. Виды твердых тел и квазичастиц.
2. Спиновые эффекты. Гигантское магнитосопротивление.
3. Свободная поверхность и межфазные границы. Сверхрешетки. Правило Вегарда.
4. Туннелирование носителей заряда через потенциальные барьеры.
5. Эффект Джозефсона.
6. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла.
7. Волновые свойства частиц. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
8. Волновая функция и уравнение Шредингера. Спин частицы и принцип Паули.
9. Зонные диаграммы. Зонная диаграмма полупроводника.
10. Функция заполнения состояний (функция распределения).
11. Зависимость энергии электрона в полупроводниковом кристалле вблизи краев зон от квазиимпульса. Блоховские функции.
12. Основные типы идеальных твердотельных наноструктур. 2D, 1D, 0D.
13. Квантовый размерный эффект для электронов в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками (электрон в квантовой яме).
14. Квантовый размерный эффект в квантовой яме (прямозонный полупроводник). Квантово- размерная добавка к ширине запрещенной зоны.
15. Квантовые ямы в полупроводниковых гетероструктурах.
16. Самоорганизованные квантовые точки.
17. Квантовый размерный эффект в кремневых наноструктурах.
18. Спектры фотолюминесценции нанокристаллов кремния (Si) в матрице диоксида кремния.
19. Особенности транспорта электронов в наноструктурах.
20. Средняя длина свободного пробега при упругом рассеивании, средняя длина свободного пробега при неупругом рассеивании
21. Влияние магнитного поля на фазу электронных волн: эффект Аронова - Бома.
22. Спиновые эффекты. Длина спиновой релаксации. Гигантское магнитосопротивление. Спинтроника.
23. Свободная поверхность и межфазные границы. Сверхрешетки. Правило Вегарда.
24. Туннелирование носителей заряда через потенциальные барьеры.

25. Одноэлектронное туннелирование. Кулоновская блокада.
26. Эффект Джозефсона.
27. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла.
28. Электрические методы контроля параметров МДМ структур. Метод C-V характеристик.
29. Оже-спектроскопия
30. Электронная спектроскопия для химического анализа
31. Растровая электронная спектроскопия
32. Сканирующая туннельная микроскопия
33. Атомная силовая микроскопия
34. Ближнеполевая оптическая микроскопия
35. Масс-спектроскопия вторичных ионов
36. Оптическая просвечивающая микроскопия
37. Рентгеновская фотоэлектронная микроскопия
38. Качественный анализ состава материалов методом электронно-зондового микроанализа
39. МДП транзистор с субмикронным каналом. Проблемы подвижности носителей заряда.
40. МДП транзистор с нанометровым каналом. Проблемы деградации, обусловленные захватом горячих носителей.
41. Туннельный диод
42. Резонансно-туннельный диод. (resonant tunneling diode – RTD)
43. Лазер на двойных гетероструктурах. Лазер на квантовых точках
44. Фотоприемники излучения на гетероструктурах.
45. Инфракрасные фотоприемники излучения на основе сверхрешеток
46. Приборы на одноэлектронном туннелировании.
47. Транзисторы на гетероструктурах с высокой подвижностью (HEMT-транзисторы)
48. Приборы спинэлектроники.

### **7.2.6 Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

Промежуточная аттестация проводится по билетам, каждый из которых содержит 3 вопроса и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос оценивается 2 баллами, задача оценивается в 4 балла. Максимальное количество набранных баллов – 10.

1. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 9 до 10 баллов.
2. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 8 баллов.
3. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 3 до 5 баллов.
4. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 3 баллов.

При получении оценок «отлично», «хорошо» и «удовлетворительно» требуемые в рабочей программе знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на промежуточном этапе считаются достигнутыми.

### 7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
1	Общие сведения об объектах нанотехнологии и размерных эффектах	ОПК-1, ОПК-3	Тест, требования к курсовой работе
2	Углеродные и кремниевые наноструктуры	ОПК-1, ОПК-3	Тест, требования к курсовой работе
3	Методы исследования наноструктурированных материалов	ОПК-1, ОПК-3	Тест, требования к курсовой работе
4	Свойства нанокластеров и наночастиц	ОПК-1, ОПК-3	Тест, требования к курсовой работе
5	Самосборка и катализ	ОПК-1, ОПК-3	Тест, требования к курсовой работе
6	Методы формирования нанозлектронных структур (нанотехнология)	ОПК-1, ОПК-3	Тест, требования к курсовой работе
7	Наноструктурированные материалы в электронике	ОПК-1, ОПК-3	Тест, требования к курсовой работе

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

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста преподавателем и выставляется оценка согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач преподавателем и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач преподавателем и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсовой работы осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного студента составляет 20 мин.

## 8 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

## **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

1. Рембеза С.И. Низкоразмерные структуры для микро- и нанoeлектроники: учеб. пособие / С.И. Рембеза, Е.С. Рембеза, Н.Н. Кошелева. - Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2015. – 114 с. [Электронный ресурс].
2. Рембеза С.И. Физические свойства низкоразмерных структур: учеб. пособие / С.И. Рембеза, Е.С. Рембеза, Н.Н. Кошелева. – Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2011. – 139 с.
3. Марголин В.И. Введение в нанотехнологию: учебник / В.И. Марголин, В.А. Жабрев, Г.Н. Лукьянов и др. – СПб.: Лань, 2012. – 464 с.
3. Мошников В.А. Золь-гель технология микро- и нанокomпозитов: учеб. пособие / В.А. Мошников, Ю.М. Таиров, Т.В. Хамова и др.; под ред. О.А. Шиловой. – СПб.: Лань, 2013. – 304 с.
4. Игнатов А.Н. Микросхемотехника и нанoeлектроника: учеб. пособие / А.Н. Игнатов. – СПб.: Лань, 2011. – 528 с.
5. Лозовский В.Н. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность: учеб. пособие / В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. – СПб.: Лань, 2008. – 328 с.
6. Нанотехнологии в электронике: сб. / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера. – 2013. – 686 с.
7. Смирнов Ю.А. Основы нано- и функциональной электроники / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2013. – 320 с.
8. Мансури Г.А. Принципы нанотехнологии: исследование конденсированных веществ малых систем на молекулярном уровне: монография / Г.А. Мансури; пер. с англ. А.С. Пак.. – М.: Науч. мир, 2008. – 317 с.
9. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века: монография / П. Харрис; пер. с англ. под ред. и с доп. Л.А. Чернозатонского. – М.: Техносфера, 2003. – 336 с.
10. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие / В.Л. Миронов. – М.: Техносфера, 2009. – 143 с.
11. ГОСТ 2.105-2019. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. – 35 с.

## **8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем**

Образовательный портал ВГТУ: <https://old.education.cchgeu.ru>

Системные программные средства: Microsoft Windows

Прикладные программные средства: Microsoft Office 2010 Pro, FireFox, LabVIEW, Elektronik Workbench.

## 9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

1. Специализированная лекционная аудитория, оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой.
2. Дисплейный класс, оснащенный компьютерными программами для выполнения расчетов, и рабочими местами для самостоятельной подготовки обучающихся с выходом в «Интернет».
3. Учебный лабораторный стенд на ПЛИС структуры FPGA – LESO3.

## 10 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Физика низкоразмерных структур в микро- и наноэлектронике» читаются лекции, проводятся лабораторные и практические занятия, выполняется курсовая работа.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия проводятся путем решения стандартных и прикладных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Большое значение по закреплению и совершенствованию знаний имеет самостоятельная работа студентов. Информацию обо всех видах самостоятельной работы студенты получают на занятиях.

Методика выполнения курсовой работы изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсовой работы студенты должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины осуществляется тестированием, проверкой курсовой работы, защитой курсовой работы. Освоение дисциплины оценивается на экзамене.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом

занятие	лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоения учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: <ul style="list-style-type: none"> <li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой;</li> <li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li> <li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li> <li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li> </ul>
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата вне- сения из- менений	Подпись заведую- щего кафедрой, от- ветственной за реа- лизацию ОПОП
1		31.08.2019	
2		31.08.2020	
3			