**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ
Директор департамента образования
_____ П. Е. Троян
«___» _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

# Наноэлектроника

Уровень образования: **высшее образование - бакалавриат**
Направление подготовки / специальность: **11.03.04 Электроника и наноэлектроника**
Направленность (профиль) / специализация: **Промышленная электроника**
Форма обучения: **очная**
Факультет: **ФЭТ, Факультет электронной техники**
Кафедра: **ПрЭ, Кафедра промышленной электроники**
Курс: **4**
Семестр: **7**
Учебный план набора 2015 года

Распределение рабочего времени

| № | Виды учебной деятельности | 7 семестр | Всего | Единицы |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Лекции | 20 | 20 | часов |
| 2 | Практические занятия | 18 | 18 | часов |
| 3 | Лабораторные работы | 16 | 16 | часов |
| 4 | Всего аудиторных занятий | 54 | 54 | часов |
| 5 | Самостоятельная работа | 90 | 90 | часов |
| 6 | Всего (без экзамена) | 144 | 144 | часов |
| 7 | Общая трудоемкость | 144 | 144 | часов |
| | | 4.0 | 4.0 | З.Е. |

Дифференцированный зачет: 7 семестр

Томск 2018

Согласована на портале № 27706

Рассмотрена и одобрена на заседании кафедры
протокол № 91 от «19» 4 2018 г.

# ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Рабочая программа дисциплины составлена с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки (специальности) 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, утвержденного 12.03.2015 года, рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФЭ «___» _____ 20__ года, протокол №_____.

Разработчик:

Доцент Кафедра физической электроники (ФЭ) _____ Ю. В. Сахаров

Заведующий обеспечивающей каф. ФЭ _____ П. Е. Троян

Рабочая программа дисциплины согласована с факультетом и выпускающей кафедрой:

Декан ФЭТ _____ А. И. Воронин

Заведующий выпускающей каф. ПрЭ _____ С. Г. Михальченко

Эксперты:

Доцент кафедры физической электроники (ФЭ) _____ И. А. Чистоедова

Профессор кафедры промышленной электроники (ПрЭ) _____ Н. С. Легостаев

Согласована на портале № 27706

## 1. Цели и задачи дисциплины

### 1.1. Цели дисциплины

формирование теоретических и практических основ, необходимых для расчета, разработки и создания элементов, приборов и устройств и наноэлектроники, а также дальнейшего совершенствования знаний путем изучения научно-техничкой литературы по данной или смежной тематикам.

### 1.2. Задачи дисциплины

– изучение законов физики в низкоразмерных полупроводниковых структурах, изучение технологии изготовления полупроводниковых гетероструктур, изучение основных квантовых эффектов, лежащих в основе приборов и устройств наноэлектроники, изучение структуры и принципов работы приборов и устройств наноэлектроники.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Наноэлектроника» (Б1.Б.15) относится к блоку 1 (базовая часть).

Предшествующими дисциплинами, формирующими начальные знания, являются: Квантовая и оптическая электроника, Материалы электронной техники, Твердотельная электроника, Физика, Физика конденсированного состояния, Химия.

Последующими дисциплинами являются: Вакуумная и плазменная электроника.

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

– ОПК-2 способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат;

– ОПК-7 способностью учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности;

– ПК-1 способностью строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования;

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

– **знать** методы экспериментального исследования параметров и характеристик приборов наноэлектроники различного функционального назначения; физико-математический аппарат для расчета приборов и устройств наноэлектроники;

– **уметь** проводить исследование параметров и характеристик приборов наноэлектроники различного функционального назначения; проводить физико-математический расчет приборов и устройств наноэлектроники;

– **владеть** методикой проведения исследований параметров и характеристик приборов наноэлектроники различного функционального назначения; методикой расчета приборов и устройств наноэлектроники;

## 4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4.0 зачетных единицы и представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Трудоемкость дисциплины

| Виды учебной деятельности | Всего часов | Семестры |
|---|---|---|
| | | 7 семестр |
| Аудиторные занятия (всего) | 54 | 54 |
| Лекции | 20 | 20 |
| Практические занятия | 18 | 18 |
| Лабораторные работы | 16 | 16 |

Согласована на портале № 27706

| | | |
|---|---|---|
| Самостоятельная работа (всего) | 90 | 90 |
| Подготовка к контрольным работам | 12 | 12 |
| Выполнение индивидуальных заданий | 15 | 15 |
| Оформление отчетов по лабораторным работам | 10 | 10 |
| Подготовка к лабораторным работам | 4 | 4 |
| Проработка лекционного материала | 18 | 18 |
| Самостоятельное изучение тем (вопросов) теоретической части курса | 11 | 11 |
| Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 20 | 20 |
| Всего (без экзамена) | 144 | 144 |
| Общая трудоемкость, ч | 144 | 144 |
| Зачетные Единицы | 4.0 | 4.0 |

## 5. Содержание дисциплины

### 5.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Разделы дисциплины и виды занятий приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Разделы дисциплины и виды занятий

| Названия разделов дисциплины | Лек., ч | Прак. зан., ч | Лаб. раб., ч | Сам. раб., ч | Всего часов (без экзамена) | Формируемые компетенции |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 семестр | | | | | | |
| 1 Введение | 2 | 0 | 0 | 2 | 4 | ОПК-2 |
| 2 Физические основы наноэлектроники | 4 | 6 | 0 | 16 | 26 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |
| 3 Способы формирования квантово-размерных наноструктур | 4 | 0 | 0 | 10 | 14 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |
| 4 Квантовые эффекты | 4 | 6 | 4 | 20 | 34 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |
| 5 Устройства наноэлектроники | 6 | 6 | 12 | 42 | 66 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |
| Итого за семестр | 20 | 18 | 16 | 90 | 144 | |
| Итого | 20 | 18 | 16 | 90 | 144 | |

### 5.2. Содержание разделов дисциплины (по лекциям)

Содержание разделов дисциплин (по лекциям) приведено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Содержание разделов дисциплин (по лекциям)

| Названия разделов | Содержание разделов дисциплины по лекциям | Трудоемкость, ч | Формируемые компетенции |
|---|---|---|---|
| 7 семестр | | | |
| 1 Введение | Предмет дисциплины и ее задачи. Основные этапы | 2 | ОПК-2 |

Согласована на портале № 27706

| | | | |
|---|---|---|---|
| | исторического развития наноэлектроники и нанотехнологии. Связь с другими дисциплинами. Задачи курса. | | |
| | Итого | 2 | |
| 2 Физические основы наноэлектроники | Волны Де Бройля. Квантовое ограничение. Квантово-размерные объекты и их классификация. Полупроводниковые наногетеростуктуры. Энергетические диаграммы наногетроструктур. Требования, предъявляемые к наногетероструктурам. Двойные гетероструктуры (ДГС). Сверхрешетки. Полупроводниковые сверхрешетки. Виды сверхрешеток. Энергетические диаграммы сверхрешеток. Минизоны. Энергетический спектр электронов в сверхрешетках. Свойства электронного газа в сверхрешетках. Влияние квантоворазмерных эффектов на свойства вещества. Баллистический транспорт. | 4 | ОПК-2, ПК-1 |
| | Итого | 4 | |
| 3 Способы формирования квантово-размерных наноструктур | Общие принципы формирования квантово-размерных структур. Эпитаксия. Формирование квантово-размерных структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Формирование квантово-размерных структур методом химического осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD). Формирование квантовых ям. Формирование квантовых проволок (нитей) геометрическим и электронным способом. Формирование квантовых точек. Механизм процесса самоорганизации при формировании квантовых точек. Размер и форма островков. Вертикальные массивы квантовых точек. | 4 | ОПК-2, ПК-1 |
| | Итого | 4 | |
| 4 Квантовые эффекты | 2D-электронный газ в магнитном поле. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла. Эффект Ааронова-Бома. Эффект Штарка. Квантово-размерный эффект Штарка в гетеронаноструктурах с квантовыми ямами. Туннельный эффект. Эффект Джозефсона. Кулоновская блокада. Кулоновская блокада с одним туннельным переходом. Кулоновская блокада с двумя туннельными переходами. Сотуннелирование. | 4 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |
| | Итого | 4 | |
| 5 Устройства наноэлектроники | Приборы на резонансном туннелировании. Диоды на резонансном туннелировании. Транзисторы на резонансном туннелировании. Логические элементы на резонансно-туннельных приборах. Приборы на одноэлектронном туннелировании. Одноэлектронный транзистор. Одноэлектронный насос. Одноэлектронная память. Устройства на основе сверхрешеток. Инфракрасные фотоприемники. Сверхрешетки в лазерных структурах. Квантовые | 6 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |

Согласована на портале № 27706

| | | | |
|---|---|---|---|
| | каскадные лазеры. Лавинные фотодиоды. Оптические модуляторы. Транзисторы с высокой подвижностью HEMT. Обзор программных средств для моделирования приборов и устройств наноэлектроники. | | |
| | Итого | 6 | |
| Итого за семестр | | 20 | |

### 5.3. Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечивающими (предыдущими) и обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечивающими (предыдущими) и обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Разделы дисциплины и междисциплинарные связи

| Наименование дисциплин | № разделов данной дисциплины, для которых необходимо изучение обеспечивающих и обеспечиваемых дисциплин | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Предшествующие дисциплины | | | | | |
| 1 Квантовая и оптическая электроника | + | + | + | + | + |
| 2 Материалы электронной техники | | | + | + | + |
| 3 Твердотельная электроника | | + | | | + |
| 4 Физика | + | + | + | + | + |
| 5 Физика конденсированного состояния | + | + | + | + | + |
| 6 Химия | | | + | | |
| Последующие дисциплины | | | | | |
| 1 Вакуумная и плазменная электроника | + | + | + | + | + |

### 5.4. Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий представлено в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Соответствие компетенций, формируемых при изучении дисциплины, и видов занятий

| Компетенции | Виды занятий | | | | Формы контроля |
|---|---|---|---|---|---|
| | Лек. | Прак. зан. | Лаб. раб. | Сам. раб. | |
| ОПК-2 | + | + | + | + | Контрольная работа, Отчет по индивидуальному заданию, Защита отчета, Отчет по лабораторной работе, Опрос на занятиях, Тест |

Согласована на портале № 27706

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ОПК-7 | + | | + | + | Контрольная работа, Отчет по индивидуальному заданию, Защита отчета, Отчет по лабораторной работе, Опрос на занятиях, Тест |
| ПК-1 | + | + | + | + | Контрольная работа, Отчет по индивидуальному заданию, Защита отчета, Отчет по лабораторной работе, Опрос на занятиях, Тест |

## 6. Интерактивные методы и формы организации обучения

Не предусмотрено РУП.

## 7. Лабораторные работы

Наименование лабораторных работ приведено в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Наименование лабораторных работ

| Названия разделов | Наименование лабораторных работ | Трудоемкость, ч | Формируемые компетенции |
|---|---|---|---|
| 7 семестр | | | |
| 4 Квантовые эффекты | Туннельный эффект | 4 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |
| | Итого | 4 | |
| 5 Устройства наноэлектроники | Исследование электрических и оптических характеристик светодиодов на основе гетероструктуры с квантовыми ямами | 4 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 |
| | Исследование характеристик транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) | 4 | |
| | Исследование температурной зависимости электрических и оптических характеристик светодиодов на основе гетероструктур с квантовыми ямами | 4 | |
| | Итого | 12 | |
| Итого за семестр | | 16 | |

## 8. Практические занятия (семинары)

Наименование практических занятий (семинаров) приведено в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Наименование практических занятий (семинаров)

| Названия разделов | Наименование практических занятий (семинаров) | Трудоемкость, ч | Формируемые компетенции |
|---|---|---|---|
| 7 семестр | | | |
| 2 Физические основы | Волны Де Бройля. Квантовое ограничение | 2 | ОПК-2, |

Согласована на портале № 27706

| | | | |
|---|---|---|---|
| наноэлектроники | Полупроводниковые наногетеростуктуры | 2 | ПК-1 |
| | Полупроводниковые сверхрешетки и баллистический транспорт. | 2 | |
| | Итого | 6 | |
| 4 Квантовые эффекты | 2D-электронный газ в магнитном поле | 2 | ОПК-2, ПК-1 |
| | Туннельный и резонансно-туннельный эффект. | 2 | |
| | Кулоновская блокада | 2 | |
| | Итого | 6 | |
| 5 Устройства наноэлектроники | Одноэлектронный транзистор | 2 | ОПК-2, ПК-1 |
| | Инфракрасные фотоприемники | 2 | |
| | Светодиоды и лазеры на гетероструктурах. Квантовые каскадные лазеры. | 2 | |
| | Итого | 6 | |
| Итого за семестр | | 18 | |

## 9. Самостоятельная работа

Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции представлены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Виды самостоятельной работы, трудоемкость и формируемые компетенции

| Названия разделов | Виды самостоятельной работы | Трудоемкость, ч | Формируемые компетенции | Формы контроля |
|---|---|---|---|---|
| 7 семестр | | | | |
| 1 Введение | Проработка лекционного материала | 2 | ОПК-2 | Опрос на занятиях, Тест |
| | Итого | 2 | | |
| 2 Физические основы наноэлектроники | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 6 | ОПК-2, ОПК-7, ПК-1 | Контрольная работа, Опрос на занятиях, Тест |
| | Самостоятельное изучение тем (вопросов) теоретической части курса | 2 | | |
| | Проработка лекционного материала | 4 | | |
| | Подготовка к контрольным работам | 4 | | |
| | Итого | 16 | | |
| 3 Способы формирования квантово-размерных наноструктур | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 2 | ОПК-2, ПК-1, ОПК-7 | Контрольная работа, Опрос на занятиях, Тест |
| | Самостоятельное изучение тем (вопросов) теоретической части курса | 4 | | |

Согласована на портале № 27706

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Проработка лекционного материала | 4 | | |
| | Итого | 10 | | |
| 4 Квантовые эффекты | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 6 | ОПК-2, ПК-1, ОПК-7 | Защита отчета, Контрольная работа, Опрос на занятиях, Отчет по лабораторной работе, Тест |
| | Самостоятельное изучение тем (вопросов) теоретической части курса | 3 | | |
| | Проработка лекционного материала | 4 | | |
| | Подготовка к лабораторным работам | 1 | | |
| | Оформление отчетов по лабораторным работам | 4 | | |
| | Подготовка к контрольным работам | 2 | | |
| | Итого | 20 | | |
| 5 Устройства наноэлектроники | Подготовка к практическим занятиям, семинарам | 6 | ОПК-2, ПК-1, ОПК-7 | Защита отчета, Контрольная работа, Опрос на занятиях, Отчет по индивидуальному заданию, Отчет по лабораторной работе, Тест |
| | Самостоятельное изучение тем (вопросов) теоретической части курса | 2 | | |
| | Проработка лекционного материала | 4 | | |
| | Подготовка к лабораторным работам | 3 | | |
| | Оформление отчетов по лабораторным работам | 6 | | |
| | Выполнение индивидуальных заданий | 15 | | |
| | Подготовка к контрольным работам | 6 | | |
| | Итого | 42 | | |
| Итого за семестр | | 90 | | |
| Итого | | 90 | | |

## 10. Курсовая работа (проект)

Не предусмотрено РУП.

## 11. Рейтинговая система для оценки успеваемости обучающихся

### 11.1. Балльные оценки для элементов контроля

Таблица 11.1 – Балльные оценки для элементов контроля

| Элементы учебной деятельности | Максимальный балл на 1-ую КТ с начала семестра | Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ | Максимальный балл за период между 2КТ и на | Всего за семестр |
|---|---|---|---|---|

Согласована на портале № 27706

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | конец семестра | |
| 7 семестр | | | | |
| Контрольная работа | 10 | 10 | 10 | 30 |
| Опрос на занятиях | 5 | 10 | 10 | 25 |
| Отчет по индивидуальному заданию | | 5 | 10 | 15 |
| Отчет по лабораторной работе | | | 20 | 20 |
| Тест | | | 10 | 10 |
| Итого максимум за период | 15 | 25 | 60 | 100 |
| Нарастающим итогом | 15 | 40 | 100 | 100 |

### 11.2. Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Пересчет баллов в оценки за контрольные точки представлен в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

| Баллы на дату контрольной точки | Оценка |
|---|---|
| ≥ 90% от максимальной суммы баллов на дату КТ | 5 |
| От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ | 4 |
| От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ | 3 |
| < 60% от максимальной суммы баллов на дату КТ | 2 |

### 11.3. Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку представлен в таблице 11.3.

Таблица 11.3 – Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

| Оценка (ГОС) | Итоговая сумма баллов, учитывает успешно сданный экзамен | Оценка (ECTS) |
|---|---|---|
| 5 (отлично) (зачтено) | 90 - 100 | A (отлично) |
| 4 (хорошо) (зачтено) | 85 - 89 | B (очень хорошо) |
| | 75 - 84 | C (хорошо) |
| | 70 - 74 | D (удовлетворительно) |
| 3 (удовлетворительно) (зачтено) | 65 - 69 | |
| | 60 - 64 | E (посредственно) |
| 2 (неудовлетворительно) (не зачтено) | Ниже 60 баллов | F (неудовлетворительно) |

## 12. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### 12.1. Основная литература

1. Борисенко В. Е. Наноэлектроника: учебное пособие для вузов / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, Е. А. Уткина. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 224 с. - ISBN 978-5-94774-914-4 (наличие в библиотеке ТУСУР - 81 экз.)

2. Наноэлектроника: Учебное пособие / Сахаров Ю. В., Троян П. Е. - 2010. 88 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/537, дата обращения: 31.05.2018.

Согласована на портале № 27706

### 12.2. Дополнительная литература

1. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике: Монография / Н. И. Боргардт [и др.] ; ред. Ю. А. Чаплыгин ; Московский государственный институт электронной техники. - М. : Техносфера, 2005. - 446 с. - ISBN 5-94836-059-8 (наличие в библиотеке ТУСУР - 20 экз.)
2. Драгунов В.П. Основы наноэлектроники: учебное пособие для вузов / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. - М. : Физматкнига ; М. : Логос ; М. : Университетская книга, 2006. - 494 с. - ISBN 5-98704-054-X. - ISBN 5-89155-149-7 (наличие в библиотеке ТУСУР - 32 экз.)

### 12.3. Учебно-методические пособия

#### 12.3.1. Обязательные учебно-методические пособия

1. Троян П.Е. Наноэлектроника: Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров // изд-во Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2015. – 31 с – [Электронный ресурс] [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://miel.tusur.ru/images/files/Uchebno-metodicheskii_kompleks%20disciplin/Sakharov/Nanoelectronics_Practics.pdf, дата обращения: 31.05.2018.
2. Троян П.Е. Наноэлектроника: Учебно-методическое пособие по лабораторным работам / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2010. – 52 с. – [Электронный ресурс]. [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://miel.tusur.ru/images/files/Uchebno-metodicheskii_kompleks %20disciplin/Sakharov/Nanoelectronics_lab.pdf, дата обращения: 31.05.2018.

#### 12.3.2. Учебно-методические пособия для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Учебно-методические материалы для самостоятельной и аудиторной работы обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предоставляются в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

**Для лиц с нарушениями зрения:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме увеличенным шрифтом.

**Для лиц с нарушениями слуха:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

**Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме.

### 12.4. Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. Научно-образовательный портал ТУСУР - https://edu.tusur.ru/
2. Электронная библиотека - www.elibrary.ru
3. Справочник по наноматериалам - https://nano.nature.com/

## 13. Материально-техническое обеспечение дисциплины и требуемое программное обеспечение

### 13.1. Общие требования к материально-техническому и программному обеспечению дисциплины

#### 13.1.1. Материально-техническое и программное обеспечение для лекционных занятий

Для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации используется учебная аудитория с количеством посадочных мест не менее 22-24, оборудованная доской и стандартной учебной мебелью. Имеются демонстрационное оборудование и учебно-наглядные пособия, обеспечивающие тематические иллюстрации по лекционным разделам дисциплины.

#### 13.1.2. Материально-техническое и программное обеспечение для практических занятий

Учебная аудитория

Согласована на портале № 27706

учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 224 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение не требуется.

**13.1.3. Материально-техническое и программное обеспечение для лабораторных работ**

Лаборатория наноэлектроники и микросистемной техники

учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 115а ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Осциллограф АСК 1021;
- Генератор 3-34;
- Вольтметр В7-21;
- Вольтметр В7-26;
- Блок питания Б5-47 (2 шт.);
- Блок питания Б5-10;
- Микроскоп МБС – 9 (2 шт.);
- Источник питания HY 3003 (2 шт.);
- Источник питания UT5003ED (2 шт.);
- Измеритель мощности светового потока TES-133;
- Лабораторные стенды: «Элементы наноэлектроники: оптоэлектронные приборы и устройства», «Элементы наноэлектроники: диоды», «Элементы наноэлектроники: полевые транзисторы»;
- Источник питания GPS 3030 DD;
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение не требуется.

**13.1.4. Материально-техническое и программное обеспечение для самостоятельной работы**

Для самостоятельной работы используются учебные аудитории (компьютерные классы), расположенные по адресам:

- 634050, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 40, 233 ауд.;
- 634045, Томская область, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146, 201 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 47, 126 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 207 ауд.

Состав оборудования:

- учебная мебель;
- компьютеры класса не ниже ПЭВМ INTEL Celeron D336 2.8ГГц. - 5 шт.;
- компьютеры подключены к сети «Интернет» и обеспечивают доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.

Перечень программного обеспечения:

- Microsoft Windows;
- OpenOffice;
- Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows;
- 7-Zip;
- Google Chrome.

Согласована на портале № 27706

### 13.2. Материально-техническое обеспечение дисциплины для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Освоение дисциплины лицами с ограниченными возможностями здоровья и инвалидами осуществляется с использованием средств обучения общего и специального назначения.

При занятиях с обучающимися **с нарушениями слуха** предусмотрено использование звукоусиливающей аппаратуры, мультимедийных средств и других технических средств приема/передачи учебной информации в доступных формах, мобильной системы преподавания для обучающихся с инвалидностью, портативной индукционной системы. Учебная аудитория, в которой занимаются обучающиеся с нарушением слуха, оборудована компьютерной техникой, аудиотехникой, видеотехникой, электронной доской, мультимедийной системой.

При занятиях с обучающимися **с нарушениями зрениями** предусмотрено использование в лекционных и учебных аудиториях возможности просмотра удаленных объектов (например, текста на доске или слайда на экране) при помощи видеоувеличителей для комфортного просмотра.

При занятиях с обучающимися **с нарушениями опорно-двигательного аппарата** используются альтернативные устройства ввода информации и другие технические средства приема/передачи учебной информации в доступных формах, мобильной системы обучения для людей с инвалидностью.

## 14. Оценочные материалы и методические рекомендации по организации изучения дисциплины

### 14.1. Содержание оценочных материалов и методические рекомендации

Для оценки степени сформированности и уровня освоения закрепленных за дисциплиной компетенций используются оценочные материалы в составе:

#### 14.1.1. Тестовые задания

1. По каким направлениям ограничено движение заряженных частиц в квантовых точках:

а) только по направлению X

б) только по направлению Y

в) только по направлению Z

г) по направлениям XYZ

2. По каким направлениям ограничено движение заряженных частиц в квантовых пленках:

а) по направлениям X и Y

б) только по направлению Y

в) только по направлению Z

г) по направлениям X и Z

3. По каким направлениям ограничено движение заряженных частиц в квантовых нитях (шнурах):

а) по направлениям X и Y

б) по направлению Y и Z

в) только по направлению Z

г) по направлениям X и Z

4. Какое минимальное количество энергетических уровней должно быть в квантовой яме двойной гетероструктуры:

а) 0

б) 1

в) 4

г) 9

5. Максимальная толщина квантовой ямы двойной гетероструктуры не должна превышать:

а) 100 нм

б) длину волны Де Бройля для электрона в квантовой яме

в) длину когерентности

г) 10 нм

6. Максимальное различие постоянных решеток для материалов входящих в гетероструктуру не должно превышать:

а) 1 %

Согласована на портале № 27706

б) 0,1 %

в) 5 %

г) 8 %

7. В какую из сверхрешеток входят полупроводники с одинаковым химическим составом:

а) композиционную

б) легированную

в) модулировано –легированную

г) во все перечисленные

8. Какой из методов эпитаксии, позволяет получать качественную гетерограницу в гетростуктурах:

а) молекулярно – лучевая

б) химическое осаждение из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD)

в) жидкостная

г) газовая

9. При каком из типов начальной стадии роста, возникающих при осаждении атомов на подложку из газовой фазы, происходит формирование квантовых точек:

а) Франка- Ван дер Мерве (слоевой рост)

б) Странского – Крастанова (промежуточный тип)

в) Фольмера – Вебера (островковый рост)

г) При всех перечисленных

10. Как будет изменяться коэффициент прозрачности барьера D, при увеличении массы частицы, если ее энергия остается при этом постоянной

а) уменьшится

б) увеличится

в) останется постоянным

г) может уменьшиться или увеличиться, в зависимости от заряда частицы

11. В каких плоскостях будут существовать уровни Ландау, если вектор магнитной индукции B направлен вдоль оси Z, перпендикулярной плоскости 2D-газа:

а) в плоскости Z

б) в плоскостях X и Y

в) в плоскостях Y и Z

г) в плоскостях X и Z

12. От чего зависит сопротивление баллистической квантовой проволоки

а) от сечения

б) от длины

в) не зависит от геометрических размеров и равно нулю

г) от сечения и длины

13. Как измениться длина волны излучения светодиода, изготовленного на основе гетероструктуры с квантовыми ямами, при уменьшении их толщины:

а) уменьшится

б) увеличится

в) останется постоянной

г) может уменьшиться или увеличиться в зависимости от материалов гетероструктуры

14. Практическое применение целочисленного эффекта Холла

а) эталон силы тока

б) эталон сопротивления

в) эталон напряжение

г) эталон заряда

15. Как изменится поверхностная плотность квантовых точек при увеличении температуры подложки в процессе осаждения

а) увеличится

б) уменьшится

в) останется постоянной

г) может уменьшиться или увеличиться в зависимости от осаждаемых материалов

Согласована на портале № 27706

16. Какой квантовый эффект лежит в основе работы оптических модуляторов

а) эффект Штарка

б) эффект Джозефсона

в) эффект Холла

г) эффект Зеемана

17. Какой квантовый эффект лежит в основе работы сверхпроводящего квантового интерференционного датчика (СКВИД)

а) эффект Штарка

б) эффект Джозефсона

в) эффект Холла

г) эффект Аронова – Бома

18. Чем можно объяснить существование целочисленного эффект Холла

а) квантовым ограничением

б) уровнями Ландау

в) туннельным эффектом

г) размерными уровнями

19. От чего зависит число уровней в минизонах сверхрешетки

а) от толщины квантовых ям

б) от числа квантовых ям

в) от толщины барьеров

г) является постоянной величиной

20. Какой из методов эпитаксии может быть использован при изготовлении транзисторов с высокой подвижностью HEMT

а) молекулярно – лучевая

б) химическое осаждение из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD)

в) жидкостная

г) газовая

### 14.1.2. Темы контрольных работ

Темы контрольных работ:

1. Определение волны де Бройля
2. Определение энергетических состояний в квантовой яме
3. 2D-электронный газ в магнитном поле.
4. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла.
5. Туннельный эффект.
6. Оптические модуляторы. Эффект Штарка.
7. Светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами.
8. Инфракрасные фотоприемники.
9. Квантовые каскадные лазеры.
10. Одноэлектронное туннелирование.

Вариант №1 (темы 1 - 3)

1. Определить длину волны Де Бройля для электрона с энергией 2 эВ.

2. Протон обладает кинетической энергией T = 1 кэВ. Определить дополнительную энергию, которую необходимо ему сообщить для того, чтобы длина волн де Бройля уменьшилась в три раза.

3. Имеется ДГС на основе AlAs/AlxGa1-xAs/AlAs. Толщина квантовой ямы составляет 4,5 нм. Определить максимальный x при котором в квантовой яме будет один энергетический уровень. Справочные данные для материалов взять из справочника. Эффективные массы считать постоянными и приравнять к средним значениям

4. Имеется ДГС на основе AlAs/InAs/AlAs. Определить минимальную и максимальную толщину квантовой ямы. Справочные данные для материалов взять из справочника.

Вариант 2 (темы 4-7)

1. Найти вероятность прохождения D и отражения R для электрона с энергией 3,2 эВ, пролетающего над потенциальным барьером высотой 2,5 эВ и протяженностью 8 нм. Эффективную массу принять равной массе электрона в состоянии покоя.

Согласована на портале № 27706

2. Определить толщину квантовой ямы для сверхрешетки на основе GaAs/GaInAs/GaAs при которой она может быть использована для модуляции излучения Nd:YAG лазера с длиной волны 1,064 мкм.

3. Определить длину волны, при которой будет максимум оптического поглощения для сверхрешетки на основе AlAs/GaAs/AlAs. Если толщина квантовых ям составляет 5 нм, барьеров 15 нм.

4. Определить длину волны излучения для светодиода на основе гетероструктуры GaN/InxGa1-xN/GaN (x=0.25). Толщина барьеров составляет 10 нм, толщина квантовой ямы составляет 4 нм.

Вариант 3 (темы 8-10)

1. Определить максимальную и минимальную длину волны регистрируемого ИК-излучения для сверхрешетки на основе AlGaAs/GaAs

2. Определить максимальную и минимальную длину волны излучения для квантового каскадного лазера на основе сверхрешетки AlInAs/InGaAs/AlInAs. Ширину запрещенной зоны AlInAs принять 1,5 эВ

3. Определить максимальную емкость для туннельного перехода при которой возможен эффект одноэлектронного туннелирования для T=300 К и T=1 К

4. Определить максимальную температуру, при которой возможна работа одноэлектронного транзистора с топологическими размерами 100 нм, выполненного по технологии изоляции имплантированным кислородом (SIMOX) и имеющего ширину зазора 35 нм.

### 14.1.3. Темы опросов на занятиях

Предмет дисциплины и ее задачи. Основные этапы исторического развития наноэлектроники и нанотехнологии. Связь с другими дисциплинами. Задачи курса.

Волны Де Бройля. Квантовое ограничение. Квантово-размерные объекты и их классификация. Полупроводниковые наногетеростуктуры. Энергетические диаграммы наногетроструктур. Требования, предъявляемые к наногетероструктурам. Двойные гетероструктуры (ДГС). Сверхрешетки. Полупроводниковые сверхрешетки. Виды сверхрешеток. Энергетические диаграммы сверхрешеток. Минизоны. Энергетический спектр электронов в сверхрешетках. Свойства электронного газа в сверхрешетках. Влияние квантоворазмерных эффектов на свойства вещества. Баллистический транспорт.

Общие принципы формирования квантово-размерных структур. Эпитаксия. Формирование квантово-размерных структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Формирование квантово-размерных структур методом химического осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD). Формирование квантовых ям. Формирование квантовых проволок (нитей) геометрическим и электронным способом. Формирование квантовых точек. Механизм процесса самоорганизации при формировании квантовых точек. Размер и форма островков. Вертикальные массивы квантовых точек.

Приборы на резонансном туннелировании. Диоды на резонансном туннелировании. Транзисторы на резонансном туннелировании. Логические элементы на резонансно-туннельных приборах. Приборы на одноэлектронном туннелировании. Одноэлектронный транзистор. Одноэлектронный насос. Одноэлектронная память. Устройства на основе сверхрешеток. Инфракрасные фотоприемники. Сверхрешетки в лазерных структурах. Квантовые каскадные лазеры. Лавинные фотодиоды. Оптические модуляторы. Транзисторы с высокой подвижностью HEMT. Обзор программных средств для моделирования приборов и устройств наноэлектроники.

### 14.1.4. Темы индивидуальных заданий

Темы индивидуальных заданий:

1. Светодиоды на основе гетероструктур с квантовыми ямами.
2. ИК – фотоприемники на многослойных гетероструктурах.
3. Квантовые каскадные лазеры.

Тема типового индивидуального задания:

Светодиоды синего спектра.

Содержание индивидуального задания:

1. Выбор материалов кристалла.
2. Расчет параметров материала кристалла.

Согласована на портале № 27706

3. Построение технологического маршрута изготовления кристалла.

Исходные данные для расчета:

основная длина волны излучения – 450 нм.

### 14.1.5. Темы лабораторных работ

Туннельный эффект

Исследование электрических и оптических характеристик светодиодов на основе гетероструктуры с квантовыми ямами

Исследование характеристик транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT)

Исследование температурной зависимости электрических и оптических характеристик светодиодов на основе гетероструктур с квантовыми ямами

### 14.1.6. Вопросы дифференцированного зачета

1. Волна Де Бройля. Квантовое ограничение. Квантовые пленки.

2. Волна Де Бройля. Квантовое ограничение. Квантовые точки.

3. Волна Де Бройля. Квантовое ограничение. Квантовые шнуры.

4. Гетероструктуры. Энергетическая диаграмма ДГС. Основные требования, предъявляемые к гетероструктурам. Методы изготовления гетероструктур.

5. Сверхрешетки. Энергетические диаграммы сверхрешеток. Минизоны.

6. Сверхрешетки. Энергетические диаграммы сверхрешеток. Свойство электронов в сверхрешетках.

7. Баллистический транспорт. Квант сопротивления. Квант проводимости.

8. Способы формирования квантоворазмерных структур. Формирование квантовых точек.

9. Способы формирования квантоворазмерных структур. Формирование квантовых проволок.

10. Способы формирования квантоворазмерных структур. Формирование квантовых пленок.

11. Двумерный электронный газ в магнитном поле. Уровни Ландау.

12. Целочисленный и дробный эффект Холла.

13. Эффект Штарка. Эффект Штарка в гетероструктурах с квантовыми ямами.

14. Туннельный эффект. Коэффициент прозрачности барьера. Резонансный туннельный эффект.

15. Эффект Джозефсона. Практическое применение эффекта Джозефсона.

16. Кулоновская блокада. Кулоновская блокада с одним туннельным переходом.

17. Кулоновская блокада. Кулоновская блокада с двумя туннельными переходами одинаковой прозрачности.

18. Кулоновская блокада. Кулоновская блокада с двумя туннельными переходами различной прозрачности.

19. Сотуннелирование. Где наблюдается. Причины.

20. Резонансно туннельный диод. Конструкция. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. ВАХ.

21. Резонансно туннельный транзистор. Конструкция. Принцип работы. ВАХ.

22. Одноэлектронный транзистор. Конструкция. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. Передаточные и выходные характеристики.

23. HEMT транзисторы. Конструкции pHEMT транзисторов. Принцип работы. Передаточные и выходные характеристики. Применение.

24. HEMT транзисторы. Конструкции mHEMT транзисторов. Принцип работы. Передаточные и выходные характеристики. Применение.

25. Светодиоды и лазеры на основе ДГС. Конструкция. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. Основные характеристики. Применение.

26. Светодиоды и лазеры на основе ДГС и квантовых точек. Конструкции. Принцип работы. Достоинства и недостатки.

27. Квантовые каскадные лазеры. Конструкция. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. Применение.

28. ИК-фотоприемники. Конструкция. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. Применение.

Согласована на портале № 27706

29. Оптические модуляторы. Конструкция. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. Применение.

30. Лавинные фотодиоды. Конструкция. Энергетическая диаграмма. Принцип работы. Применение.

### 14.1.7. Методические рекомендации

Конспектирование лекций является обязательным. Для допуска к экзамену должны быть выполнены все лабораторные и контрольные работы предусмотренные планом.

## 14.2. Требования к оценочным материалам для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предусмотрены дополнительные оценочные материалы, перечень которых указан в таблице 14.

Таблица 14 – Дополнительные материалы оценивания для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

| Категории обучающихся | Виды дополнительных оценочных материалов | Формы контроля и оценки результатов обучения |
|---|---|---|
| С нарушениями слуха | Тесты, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету, контрольные работы | Преимущественно письменная проверка |
| С нарушениями зрения | Собеседование по вопросам к зачету, опрос по терминам | Преимущественно устная проверка (индивидуально) |
| С нарушениями опорно-двигательного аппарата | Решение дистанционных тестов, контрольные работы, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету | Преимущественно дистанционными методами |
| С ограничениями по общемедицинским показаниям | Тесты, письменные самостоятельные работы, вопросы к зачету, контрольные работы, устные ответы | Преимущественно проверка методами исходя из состояния обучающегося на момент проверки |

## 14.3. Методические рекомендации по оценочным материалам для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов предусматривается доступная форма предоставления заданий оценочных средств, а именно:

- в печатной форме;
- в печатной форме с увеличенным шрифтом;
- в форме электронного документа;
- методом чтения ассистентом задания вслух;
- предоставление задания с использованием сурдоперевода.

Лицам с ограниченными возможностями здоровья и инвалидам увеличивается время на подготовку ответов на контрольные вопросы. Для таких обучающихся предусматривается доступная форма предоставления ответов на задания, а именно:

- письменно на бумаге;
- набор ответов на компьютере;
- набор ответов с использованием услуг ассистента;
- представление ответов устно.

Процедура оценивания результатов обучения лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

**Для лиц с нарушениями зрения:**

- в форме электронного документа;
- в печатной форме увеличенным шрифтом.

**Для лиц с нарушениями слуха:**

Согласована на портале № 27706

– в форме электронного документа;
– в печатной форме.

**Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:**

– в форме электронного документа;
– в печатной форме.

При необходимости для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов процедура оценивания результатов обучения может проводиться в несколько этапов.

Согласована на портале № 27706