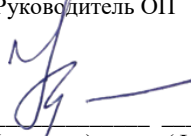




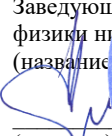
**Федеральное агентство по образованию  
Министерства образования и науки РФ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

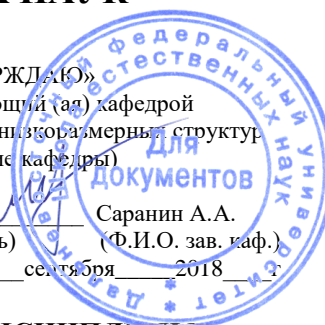
**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

«СОГЛАСОВАНО»  
Руководитель ОП

  
\_\_\_\_\_ Крайнова Г. С.  
(подпись) (Ф.И.О. рук. ОП)  
« 19 » сентября 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Заведующий (ая) кафедрой  
физики низкоразмерных структур  
(название кафедры)

  
\_\_\_\_\_ Саранин А.А.  
(подпись) (Ф.И.О. зав. каф.)  
« 19 » сентября 2018 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Физика и технология квантовых приборов

**Направление подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»**

**Форма подготовки очная**

Школа естественных наук

Кафедра физики низкоразмерных структур

курс 4, семестр 8

лекции 22 час.

в том числе с использованием МАО лек. \_\_\_\_\_ /пр. 20 /лаб. \_\_\_\_\_ час.

семинарские занятия 44 час.

всего часов аудиторной нагрузки 66 часов

в том числе с использованием МАО 20 час.

самостоятельная работа 42 час.

в том числе на подготовку к экзамену \_\_\_\_\_ час.

контрольные работы (количество) 3

курсовая работа / курсовой проект нет семестр

зачет (с оценкой) 8 семестр

экзамен \_\_\_\_\_ семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ, утвержденного приказом ректора от 18.02.2016 № 12-13-235.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры Физики низкоразмерных структур « 19 » сентября 2018 г., протокол № 1.

Заведующий кафедрой, чл.-корр. РАН \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Саранин А.А.

Составитель, д.ф.-м.н., профессор \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Галкин Н.Г.

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 2 из 36

### Оборотная сторона титульного листа РПУД

#### I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Саранин А.А.  
(подпись) (И.О. Фамилия)

#### II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Саранин А.А.  
(подпись) (И.О. Фамилия)

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 3 из 36

## ABSTRACT

**Bachelor's degree in 11.03.04 "Electronic and nanoelectronics"  
Study Bachelor's Program "Nanotechnology in electronics"**

**Course title: Physics and Technology of Quantum devices, 3 credits**

**Lecturer:** N.G. Galkin, Doctor of Sciences, Professor on speciality, Professor of the Chair of Physics of Lowdimensional Structures, School of Natural Sciences of Far Eastern Federal University.

**Learning outcomes:**

SPC-1, the ability to build the simplest physical and mathematical models of devices, circuits, devices and installations of electronics and nanoelectronics of various functional purposes, and also to use standard software tools for their computer simulation;

SPC-20, the ability to reasonably choose and put into practice an effective method of experimental study of the parameters and characteristics of devices, circuits, devices and installations of electronics and nanoelectronics of various functional purposes.

SPC-21, readiness to analyze and systematize the results of research, to present materials in the form of scientific reports, publications, presentations.

**Course description:** The contents of discipline covers the formation of students' ideas on the physics of collisionless (ballistic transfer) processes in transistor structures and its influence on the performance of devices; on the interrelation of the electronic structure of heterojunctions, quantization conditions of the electron gas, thickness and doping of the layers of transistor layers, the use of quantum well double tunnel barriers in the construction of heterostructural transistors, including transistors on quantum effects; about the features of technological processes in the creation of heterojunction transistors, ballistic transistors and transistors on quantum effects to create ultra-high-speed integrated circuits.

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 4 из 36

### Main course literature:

1. Schelkachev NM, Fominov Y.V. Electric current in nanostructures: Coulomb blockade and quantum dot contacts: Teaching aid. - М.: МИПТ, 2010. - 39 p.  
<http://window.edu.ru/resource/539/73539>
2. Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Measurement of the polarization characteristics of radiation of nanoheterostructures: a teaching aid. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2011. - 81 p. <http://window.edu.ru/resource/006/74006>
3. Borisenko S.I. Physics of semiconductor nanostructures: a training manual. - Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2010. - 115 p.  
<http://window.edu.ru/resource/927/73927>
4. Lapshinov B.A. Technology lithographic processes. Tutorial. - Moscow State Institute of Electronics and Mathematics. - М., 2011. - 95 p.  
<http://window.edu.ru/resource/498/78498>
5. Vdovichev S.N. Modern methods of high-vacuum deposition and plasma treatment of thin-film metal structures. Electronic teaching aid. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2012. - 60 p.  
<http://window.edu.ru/resource/357/79357>
6. Polyakov V.I., Starodubtsev E.V. Designing hybrid thin-film integrated circuits: a manual on the discipline "Design and technological support of computer production" - SPb.: NRU ITMO, 2013. - 80 p.  
<http://window.edu.ru/resource/042/79042>
7. Gromov D.G. Metallization of ultra-large-scale integrated circuits: study guide / DG Gromov, A.I. Mochalov, A.D. Sulimin, V.I. Shevyakov. - М.: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2009. - 277 pp., Ill.  
<http://window.edu.ru/resource/591/64591>
8. Tkalich V.L., Makeeva A.V., Oborin E.E. Physical basics of nanoelectronics: Tutorial. - SPb.: SPbSU ITMO, 2011. - 83 p.  
<http://window.edu.ru/resource/415/73415>

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 5 из 36

## АННОТАЦИЯ

Учебная дисциплина «Физика и технология квантовых приборов» разработана для студентов 4 курса направления подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 ЗЕ (108 час.). Учебным планом предусмотрены лекции (22 час.), семинарские занятия (44 час.) и самостоятельная работа студента (42 час.). Дисциплина «Физика и технология квантовых приборов» входит в вариативную часть цикла дисциплин образовательной программы (раздел – дисциплины по выбору), реализуется на 4 курсе, в 8 семестре.

Дисциплина «Физика и технология квантовых приборов» (ФТКП) логически и содержательно связана с такими курсами, как «Физические основы электроники», «Материалы электронной техники», «Физика конденсированного состояния», «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» и «Нанoeлектроника». ФТКП является завершающей дисциплиной специализации, которая формирует компетенции студента в области реализации квантово-механических процессов в реальных полупроводниковых приборах (транзисторах).

**Цель** изучения дисциплины - подготовка академических бакалавров в области нанотехнологий в электронике, понимающих физические и технологические аспекты разработки и технологического воплощения гетеропереходных транзисторов, включая транзисторы на горячих носителях и транзисторы на квантовых эффектах, а также перспективы их использования для разработки сверхбыстродействующих интегральных схем.

### **Задачи:**

- Формирование у студентов следующих знаний:

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 6 из 36

- понятийный аппарат квантовой механики, для более полного и точного понимания формирования электронной структуры систем с пониженной размерностью (квантовых ям, квантовых проволок, квантовых точек и сверхрешеток на их основе);
- целостное представление о физике процессов бесстолкновительного (баллистического переноса) в транзисторных структурах и его влиянии на быстродействие приборов;
- представление о взаимосвязи электронной структуры гетеропереходов, условий квантования электронного газа, толщины и легирования слоев транзисторных слоев, использования двойных туннельных барьеров с квантовой ямой при построении гетероструктурных транзисторов, в том числе транзисторов на квантовых эффектах.
- представления об особенностях технологических процессах при создании гетеропереходных транзисторов, баллистических транзисторов и транзисторов на квантовых эффектах для создания сверхбыстродействующих интегральных микросхем.

Для успешного изучения дисциплины «Физика и технология квантовых приборов» у обучающихся **должны быть сформированы следующие предварительные компетенции:**

ОПК-1 способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики;

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

ОПК-7 способность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности.

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 7 из 36

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие профессиональные компетенции (элементы компетенций).

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
ПК-1, способность 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.	Знает	простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.
	Умеет	выделять, анализировать и моделировать приборы, схемы, устройства и установки электроники и наноэлектроники.
	Владеет	технологиями и математическим аппаратом для моделирования приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.
ПК-20, способностью аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем,	Знает	методики экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения; методы реализации на практике различных подходов к исследованию характеристик приборов.
	Умеет	анализировать результаты экспериментальных исследований параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения;

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 8 из 36

устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.		сравнивать результаты экспериментальных исследований с известными теоретическими расчетами и данными моделирования.
	Владеет	техникой экспериментов с различными приборами в области характеристики приборов электроники и наноэлектроники; методикой обработки экспериментальных данных и расчетов ошибок измерений.
ПК-21, готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций	Знает	методики анализа экспериментальных данных, а также средства компьютерной обработки информации, в том числе графической.
	Умеет	анализировать и систематизировать результаты исследований, а также как представлять материалы в виде отчетов, публикаций и презентаций.
	Владеет	методиками систематизации экспериментальных данных и их компьютерной обработки.

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Физика и технология квантовых приборов» применяются следующие методы активного/ интерактивного обучения:

- дискуссия;
- анализ современной научной литературы по тематике дисциплины на английском языке;
- обзорные доклады по предлагаемым тематикам и обсуждение их со студентами и преподавателем.

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (22 часа)**

### **1. Полевые и биполярные гетероструктурные транзисторы (8 часов)**



Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 9 из 36

Гетеропереход. Селективное легирование. Двумерный электронный газ. Гетероструктурные полевые транзисторы. Полевые транзисторы на гетероструктурах AlGaAs/GaAs с селективным легированием. Обратные и многоканальные структуры. Гетероструктурные биполярные транзисторы (ГСБТ). Гетероэмиттер. База и коллектор. Гетероструктурные биполярные транзисторы на AlGaAs/GaAs. ГСБТ на GaInAs/InP, GaInAsP/InP. Транзисторы с гетеропереходами из GaAs/Si, Ge/Si,  $\alpha$ -Si/Si.

## **2. Транзисторы на горячих электронах (4 часа)**

Транзисторы с баллистической инжекцией электронов. Спектроскопия горячих электронов. Баллистические транзисторы с планарно-легированными барьерами. Баллистические транзисторы с гетероструктурными барьерами. Транзисторы с переносом заряда в пространстве.

## **3. Аналоговые транзисторы (2 часа)**

Транзисторы со статической индукцией. Транзисторы с проницаемой базой. Транзисторы с металлической базой.

## **4. Транзисторы на квантовых эффектах (4 часа)**

Туннелирование и размерное квантование. Резонансное туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой и сверхрешетку. Транзисторы с резонансным туннелированием (биполярные и полевые).

## **5. Транзисторы и интегральные микросхемы с наивысшим быстродействием (4 часа)**

Транзисторы с наивысшим быстродействием. Интегральные микросхемы на сверхбыстродействующих транзисторах.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (семинарские занятия, выступления с докладами) (44 часа)**

Тема 1. Построение гетеропереходов в модели Андерсона и с учетом поверхностных состояний (6 часов).

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 10 из 36

Тема 2. Принцип селективного легирования. Двумерный электронный и дырочный газы. Методы исследования двумерного электронного газа (8 часов).

Тема 3. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров гетероструктурных полевых транзисторов (6 часов).

Тема 4. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров гетероструктурных биполярных транзисторов (6 часов).

Тема 5. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров транзисторов на горячих электронах (6 часов).

Тема 6. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров аналоговых транзисторов (4 часа)

Тема 7. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Построение зонных диаграмм транзисторов на квантовых эффектах (4 часа).

Тема 8. Анализ сверхбыстродействующих микросхем на различных типах транзисторов (4 часа).

### **III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Физика и технология квантовых приборов» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

- план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;
- характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 11 из 36

- требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;
- критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

#### IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Тема 1. Полевые и биполярные гетероструктурные транзисторы.	ПК-1, ПК-20, ПК-21	знает	резюме (ПР-3)	экзамен, вопросы 1-7
			умеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 1, 2
			владеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 3 и 4
2	Тема 2. Транзисторы на горячих электронах.	ПК-1, ПК-21, ПК-20	знает	резюме (ПР-3)	экзамен, вопросы 8-13
			умеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5
			владеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5
3	Тема 3 Аналоговые транзисторы.	ПК-1, ПК-21, ПК-20	знает	резюме (ПР-3)	экзамен, вопросы 14-15
			умеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6
			владеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6
4	Тема 4. Транзисторы на квантовых эффектах.	ПК-1, ПК-20, ПК-21	знает	Резюме (ПР-3)	экзамен, вопросы 16-20
			умеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7
			владеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 12 из 36

5	Тема 5. Транзисторы и интегральные микросхемы с наивысшим быстродействием.	ПК-1, ПК-20, ПК-21	знает	резюме (ПР-3)	экзамен, вопросы 21 - 22
			умеет	Семинарское занятие (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8
			владеет	Обзорные доклады (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8

Вопросы и типы заданий к экзамену, типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

## V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Основная литература

*(электронные и печатные издания)*

1. Щелкачёв Н.М., Фоминов Я.В. Электрический ток в наноструктурах: кулоновская блокада и квантовые точечные контакты: Учебно-методическое пособие. - М.: МФТИ, 2010. - 39 с. <http://window.edu.ru/resource/539/73539>
2. Дорохин М.В., Данилов Ю.А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. - 81 с. <http://window.edu.ru/resource/006/74006>
3. Борисенко С.И. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - 115 с. <http://window.edu.ru/resource/927/73927>

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 13 из 36

4. Лапшинов Б.А. Технология литографических процессов. Учебное пособие. - Московский государственный институт электроники и математики. - М., 2011. - 95 с. <http://window.edu.ru/resource/498/78498>
5. Вдовичев С.Н. Современные методы высоковакуумного напыления и плазменной обработки тонкопленочных металлических структур. Электронное учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. - 60 с. <http://window.edu.ru/resource/357/79357>
6. Поляков В.И., Стародубцев Э.В. Проектирование гибридных тонкопленочных интегральных микросхем: учебное пособие по дисциплине "Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ" - СПб.: НИУ ИТМО, 2013. - 80 с. <http://window.edu.ru/resource/042/79042>
7. Григорьев Ф.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники: Учебное пособие / Московский государственный институт электроники и математики. - М. 2003. - 48 с. <http://window.edu.ru/resource/784/76784>
8. Громов Д.Г. Металлизация ультрабольших интегральных схем: учебное пособие / Д.Г. Громов, А.И. Мочалов, А.Д. Сулимин, В.И. Шевяков. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 277 с.: ил. <http://window.edu.ru/resource/591/64591>
9. Ткалич В.Л., Макеева А.В., Оборина Е.Е. Физические основы нанoeлектроники: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. - 83 с. <http://window.edu.ru/resource/415/73415>

**Дополнительная литература**  
(электронные и печатные издания)

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984, 567 с.
2. Алексеенко А.Г. Основы микросхемотехники. М.: Советское радио, 1977, 405 с.
3. Старосельский В.И., "Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники. Учебное пособие для вузов". М. Юрайт. 2015, 463 с.

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 14 из 36

4. Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур. Учебное пособие. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 347 с. <http://window.edu.ru/resource/346/63346>
5. Лысенко А.П. Биполярные транзисторы: Учебное пособие. - М.: МИЭМ, 2006. - 76 с. <http://window.edu.ru/resource/860/55860>

## VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

В общей трудоемкости дисциплины 108 час. (3 ЗЕ) аудиторные занятия составляют 66 час, включая лекции (22 час.) и семинарские занятия (44 час.).

По дисциплине предусмотрена внеаудиторная самостоятельная работа в объеме 42 часа на весь курс дисциплины.

Расписание аудиторных занятий включает в неделю 9 часов. Рекомендуется учащимся планировать внеаудиторную самостоятельную работу в объеме 5 часов в учебную неделю.

Для углубленного изучения теоретического материала курса дисциплины рекомендуются использовать основную и дополнительную литературу, указанную в приведенном выше перечне.

Самостоятельная работа студентов при изучении данной дисциплины состоит из подготовки к семинарским занятиям и подготовки коротких эссе по каждой теме лекционных занятий на основе современных специализированных по курсу статей, в том числе и на английском языке. Эссе выполняются в виде коротких заметок на 1-2 страницы с анализом литературных данных.

Целью осуществления данной деятельности является приобретение студентами, обучающимися по направлению «Электроника и наноэлектроника», навыков работы с научной литературой при подготовке к семинарским занятиям; получение опыта обработки и интерпретации

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 15 из 36

литературных данных, а также методов построения зонных диаграмм гетероструктур и анализа их поведения при приложении рабочих напряжений.

## **VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Образовательный процесс по дисциплине проводится в лекционных и компьютерных аудиториях корпуса ИАПУ ДВО РАН, оснащенных компьютерами класса Pentium и мультимедийными (презентационными) системами, с подключением к общекорпоративной компьютерной сети ИАПУ ДВО РАН, ДВФУ и сети Интернет.

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 16 из 36



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
 (ДВФУ)

---

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
 РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**  
 по дисциплине «Физика и технология квантовых приборов»  
**Направление подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2018**



### План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	1-2 недели семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 1 и 2	3 час.	резюме статей по теме
2	3 неделя семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 3	4 час.	контрольная работа
3	4 неделя семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 4	4 час.	резюме статей по теме
4	5 недели семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 5	5 час.	контрольная работа
5	6 недели семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 6	5 час.	резюме статей по теме
6	7 недели семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 7	5 час.	контрольная работа
7	8 неделя семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 8	7 час.	резюме статей по теме
8	9 неделя семестра	Подготовка устных докладов в виде презентации с рисунками и выводами на основе подготовленных резюме	10 час.	Обзорные доклады по тематике курса
Итого			42 часа	

### Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению

Задания и методические рекомендации для самостоятельной работы обеспечивают подготовку резюме по прочитанным оригинальным статьям, контрольным работам и обзорному докладу по всем статьям в рамках тематике курса лекций «Физика и технология квантовых приборов».

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 18 из 36

## **Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению**

Задания выдаются в виде оригинальных статей по курсу читаемых лекций, которые необходимо разобрать к семинарскому занятию и подготовить короткое резюме (2-3) страницы машинописного текста.

### **Требования к представлению резюме**

Резюме по оригинальным статьям представляет краткую письменную работу с изложением сути рассматриваемой в статье проблемы. Обучаемый самостоятельно проводит анализ этой проблемы и кратко излагает их в резюме в виде выводов и сопоставляет с разобранным в ходе лекций материалами.

Резюме составляется по тематике определенных теоретических вопросов изучаемой дисциплины при использовании научной литературы. Резюме оформляется в соответствии с требованиями Правил оформления письменных работ студентами ДВФУ.

По форме резюме представляет краткое письменное сообщение, имеющее ссылки на источники литературы и краткий терминологический словарь, включающий основные термины и их расшифровку (толкование) по раскрываемой теме (вопросу).

Резюме представляется на проверку в электронном виде, исходя из условий:

- ✓ текстовый документ в формат MS Word;
- ✓ объем – 2-3 компьютерные страницы 1 статье;
- ✓ объем словаря – не менее 7-10 терминов на одно резюме;
- ✓ набор текста с параметрами - шрифт 14, межстрочный интервал 1,5;
- ✓ формат листов текстового документа - А4;
- ✓ *титульный лист* (первый лист документа, без номера страницы) – по заданной форме;

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 19 из 36

✓ *список литературы* по использованным при подготовке резюме источникам, наличие ссылок в тексте резюме на источники по списку.

### **Критерии оценки выполнения самостоятельной работы**

*Оценивание резюме проводится по критериям:*

- использование данных отечественной и зарубежной литературы, источников Интернет и курса лекций;
- владение методами и приемами анализа теоретических и/или практических аспектов изучаемой области;
- отсутствие фактических ошибок, связанных с пониманием проблемы.

### **Подготовка к контрольным работам**

Подготовка к контрольным работам проводится по тематике лекций в рамках рассмотренных тем. Вопросы выносятся на контрольные работы без их предварительного обсуждения. Преподаватель оставляет за собой право проводить короткие по времени контрольные работы (до 10 минут) с ответом на 5 коротких вопросов, сформулированных в строгом соответствии с темами лекционных занятий.

Приложение 2

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 20 из 36



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДВФУ)

---

**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
**по дисциплине «Физика и технология квантовых приборов»**  
**Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника**

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2018**

## Паспорт ФОС

<b>Код и формулировка компетенции</b>	<b>Этапы формирования компетенции</b>	
ПК-1, способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования.	Знает	простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.
	Умеет	выделять, анализировать и моделировать приборы, схемы, устройства и установки электроники и нанoeлектроники.
	Владеет	технологиями и математическим аппаратом для моделирования приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.
ПК-20, способностью аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного	Знает	методики экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения;  методы реализации на практике различных подходов к исследованию характеристик приборов.
	Умеет	анализировать результаты экспериментальных исследований параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения;  сравнивать результаты экспериментальных исследований с известными теоретическими расчетами и данными моделирования.
	Владеет	техникой экспериментов с различными приборами в области характеризации приборов электроники и нанoeлектроники;

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 22 из 36

функционального назначения.		методикой обработки экспериментальных данных и расчетов ошибок измерений.
ПК-21, готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций	Знает	методики анализа экспериментальных данных, а также средства компьютерной обработки информации, в том числе графической.
	Умеет	анализировать и систематизировать результаты исследований, а также как представлять материалы в виде отчетов, публикаций и презентаций.
	Владеет	методиками систематизации экспериментальных данных и их компьютерной обработки.

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели	баллы
ПК-1, способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроник и различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования	знает (пороговый уровень)	физику процессов формирования гетеропереходов; основные механизмы достижения максимальных дрейфовых скоростей носителей в объемных полупроводниках; методы генерации горячих носителей в гетеропереходах и методы исследования горячих носителей в них; физику процессов переноса носителей через транзисторные структуры с гетеропереходами и двойной барьер с квантовой ямой; условия формирования транзисторных структур и их	воспроизводить и объяснять учебный материал с требуемой степенью научной точности и полноты	способность показать базовые знания и основные умения в использовании: - механизмов транспорта носителей в гетероструктурах, включая принципы баллистического транспорта носителей для анализа работы транзисторов; - подходов к построению зонных диаграмм транзисторных структур; - особенностей ростовых процессов для реализации транзисторных структур.	65-74

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 23 из 36

		зонные диаграммы.			
	умеет (продвинутый)	анализировать и моделировать физику процессов формирования гетеропереходов; определить возможности достижения максимальных дрейфовых скоростей носителей в транзисторных структурах; задать параметры транзисторных структур для генерации в них горячих носителей; учесть влияние поверхностных состояний на формирование зонных диаграмм гетеропереходов; использовать типы транзисторных структур для исследования механизмов рассеяния горячих носителей в них; рассчитать параметры носителей в гетеропереходных транзисторных структурах и двойном барьере с квантовой ямой; построить зонные диаграммы для всех типов транзисторных структур; рассчитать электрические и частотные характеристики всех типов транзисторных структур	выполнять типичные задачи по разработке конструкции и параметров сверхбыстродействующих транзисторов на основе воспроизведения стандартных подходов	способность применить сформированные представления и практические умения в задачах, связанных с разработкой технологии транзисторных структур со сверхвысоким быстродействием: - анализировать механизмы транспорта носителей в гетероструктурах, включая баллистический транспорт носителей при различных температурах; - проводить сравнительный анализ зонных диаграмм транзисторных структур с различными механизмами транспорта носителей; - анализировать технологические процессы при росте различных типов транзисторных структур; - проводить оценки параметров быстродействия транзисторных структур в зависимости от типов материалов и выбора технологических схем для реализации транзисторных структур.	75-89
	владеет (высокий)	Владеет навыками и имеет опыт применения	решать сложные задачи по	способность применить систематизированные знания и практические	90-100

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 24 из 36

		<p>методов расчета параметров транзисторных структур, методов расчета свойств реальных гетеропереходов и двойных барьеров с квантовой ямой, а также методами построения зонных диаграмм сверхбыстродействующих транзисторных структур всех типов без и со смещением, сравнительного анализа быстродействия транзисторных структур и построения на их основе интегральных схем с анализом основных технологических процессов и их совместимости с планарной технологией. Владеет методами расчета параметров транзисторных структур для генерации в них горячих носителей. Владеет методами расчета электрических и частотных характеристик всех типов транзисторных структур.</p>	<p>разработке конструкции и расчету параметров сверхбыстродействующих транзисторов основе приобретенных знаний, умений и навыков</p>	<p>умения в задачах, связанных с разработкой и расчетами параметров транзисторных структур со сверхвысоким быстродействием:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- анализировать механизмы транспорта носителей в гетероструктурах, включая баллистический транспорт носителей при различных температурах;</li> <li>- проводить сравнительный анализ зонных диаграмм транзисторных структур с различными механизмами транспорта носителей;</li> <li>- анализировать технологические процессы при росте различных типов транзисторных структур;</li> <li>- проводить оценки параметров быстродействия транзисторных структур в зависимости от типов материалов и выбора технологических схем для реализации транзисторных структур;</li> <li>- проводить сравнительный анализ параметров быстродействия транзисторных структур всех типов и определять перспективы их использования для построения сверхбыстродействующих интегральных схем.</li> </ul>	
ПК-20, способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику эксперименталь	Знает	методики экспериментально го исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и	Может воспроизводить на практике методики экспериментальных исследований	способность показать базовые знания и основные умения в использовании экспериментального оборудования и методик обработки экспериментальных данных.	65-74



<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 25 из 36

ного исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроник и различного функционального назначения		нанoeлектроники различного функционального назначения; методы реализации на практике различных подходов к исследованию характеристик приборов.			
	Умеет	анализировать результаты экспериментальных исследований параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; сравнивать результаты экспериментальных исследований с известными теоретическими расчетами и данными моделирования.	Выполнять типовые исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроник и	способность применить знания и практические умения в задачах по исследованию простейших систем нанoeлектроники.	75-89
	владеет	техникой экспериментов с различными приборами в области характеристики приборов электроники и нанoeлектроники; методикой обработки экспериментальных данных и расчетов ошибок измерений.	методами решения усложненных задач нанoeлектроник и на основе приобретенных знаний, умений и навыков	способность применить знания и практические умения в задачах, связанных с усложненными задачами нанoeлектроники.	90-100
ПК-21, готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных	знает	Техникой обработки экспериментальных знаний без тонкостей представления для различных систем измерений.	воспроизводить и объяснять новые экспериментальные данные, может рассчитать ошибки измерений с	способность показать базовые знания и основные умения в использовании подходов к обработке данных.	65-74

отчетов, публикаций, презентаций	умеет	Применять полученные знания для обработки экспериментальных данных, представленных в различных системах физических единиц. Может успешно применять системы представления графических данных в различных редакторах.	выполнять типичную обработку экспериментальных данных на основе воспроизведения стандартных алгоритмов. Может представлять данные в графических редакторах.	применить знания и практические умения в задачах, связанных с обработкой экспериментальной информации за ограниченный период времени; умеет подготавливать презентации по обработанным данным с использованием графических редакторов.	75-89
	владеет	навыками применения: методов обработки данных и их представления, может анализировать возникающие нестыковки в представлении физических данных.	Техникой обработки различных физических данных с учетом их размерностей и перевода в различные системы единиц. Может решать сложные задачи обработки в нетипичных ситуациях на основе приобретенных знаний, умений и навыков.	способность применить фактическое и теоретическое знание, практические умения по обработке экспериментальных знаний в области наноэлектроники и физики транзисторных структур, а также по их представлению в виде презентаций и для написания статей.	90-100

### **Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков**

**Текущая аттестация студентов.** Текущая аттестация студентов по дисциплине «Физика и технология квантовых приборов» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 27 из 36

Текущая аттестация по дисциплине «Физика и технология квантовых приборов» проводится в форме контрольных мероприятий (защита резюме, выступление на семинарских занятиях, контрольное тестирование) по оцениванию фактических результатов обучения студентов осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);
- степень усвоения теоретических знаний;
- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;
- результаты самостоятельной работы.

Оценивание результатов освоения дисциплины на этапе текущей аттестации проводится в соответствии с используемыми оценочными средствами.

#### Критерии оценки резюме

Оценивание защиты резюме проводится при представлении резюме в электронном виде, по двухбалльной шкале: «зачтено», «незачтено».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он представляет к защите резюме, удовлетворяющее поставленным к резюме требованиям (использование данных отечественной и зарубежной литературы, источников Интернет и сопоставления с теоретическим курсом лекций, представление краткого терминологического словаря по теме), по оформлению, если студент демонстрирует владение методами и приемами теоретических аспектов работы, не допускает фактических ошибок, связанных с пониманием проблемы.

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 28 из 36

Оценка «незачтено» выставляется студенту, если он не владеет методами и приемами теоретических аспектов работы, допускает существенные ошибки в работе, связанные с пониманием проблемы, представляет резюме с существенными отклонениями от правил оформления письменных работ.

#### Критерии оценки отчетов по семинарским занятиям

Оценивание работы на семинарских занятиях проводится на основе анализа выступлений студента с краткими ответами по заданным на семинарском занятии вопросам теоретического и технологического характера по двухбалльной шкале: «зачтено», «незачтено».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он посетил 100% семинарских занятий и продемонстрировал владение методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы.

Оценка «незачтено» выставляется студенту, если он посетил менее 50% семинарских занятий и не владеет методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы, допускает существенные ошибки в работе, представляет отчет с существенными отклонениями при ответах на поставленные вопросы.

#### Критерии оценки контрольных работ

Оценивание проводится после письменных ответов на поставленные вопросы по пятибалльной шкале.

Максимальная оценка по контрольной работе – 5, минимальная 3.

Результаты контрольных работ учитываются при сдаче экзаменов. Дополнительные вопросы задаются по темам с оценкой ниже 4.

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 29 из 36

## Оценочные средства для промежуточной аттестации

### Вопросы к экзамену

1. Спектроскопия горячих электронов.
2. Селективное легирование. Двумерный электронный газ.
3. Стационарная дрейфовая скорость, междолинный перебор, эффект убегания электронов.
4. Гетеропереход: основные условия формирования, типы гетеропереходов, разрывы зон, резкие и варизонные гетеропереходы.
5. Гетероструктурные биполярные транзисторы: гетероэмиттер, база и коллектор.
6. Гетероструктурные биполярные транзисторы: транзисторы на структуре AlGaAs\GaAs.
7. Полевые транзисторы на гетероструктурах с селективным легированием (ПТ ГСЛ): прямая, обратная и многоканальные структуры, нормально открытые и нормально закрытые структуры, достоинства и недостатки ПТ ГСЛ.
8. Всплеск дрейфовой скорости в длинных и коротких структурах, баллистический пролет.
9. Баллистические транзисторы с планарно-легированными барьерами.
10. Баллистические транзисторы с гетероструктурными барьерами: транзистор с двумерной базой, туннельный транзистор на горячих электронах.
11. Транзисторы на горячих электронах: транзисторы с баллистической инжекцией электронов.
12. Баллистические транзисторы с гетероструктурными барьерами: БЭТ с варизонным эмиттером, транзистор с индуцированной базой.
13. Транзисторы с переносом заряда в пространстве.
14. Транзисторы со статической индукцией: принцип действия, частотные

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 30 из 36

характеристики.

15. Аналоговые транзисторы: транзисторы с проникаемой и металлической базами.
16. Транзисторы на квантовых эффектах: резонансное туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой и сверхрешетку.
17. Транзисторы с ДБКС-эмиттером.
18. Квантово-размерные структуры: квантовые проволоки и квантовые точки. Материалы с распределенными квантовыми точками.
19. Биполярные транзисторы с резонансным туннелированием.
20. Полевые транзисторы с резонансным туннелированием.
21. Перспективы построения интегральных схем на сверхбыстродействующих транзисторах.
22. Основные проблемы интегральных схем при дальнейшей микроминиатюризации транзисторов.

## Оценочные средства для текущей аттестации

### Вопросы для самопроверки

#### Тема 1. Полевые и биполярные гетероструктурные транзисторы (12 часов)

1. Что такое гетеропереход и при каких условиях он формируется?
2. Какие типы гетеропереходов существуют? Чем они принципиально различаются?
3. Модель Андерсона – в чем основные допущения?
4. Возможно ли создание идеальных гетеропереходов между полупроводниками с различной симметрией кристаллической решетки?

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 31 из 36

5. Что такое принцип селективного легирования? Какой из слоев в гетеропереходе легируется?
6. Как сформировать слой двумерного электронного газа? При каких условиях формируется двумерный дырочный газ?
7. Возможно ли в кремниевом p-n переходе сформировать двумерный электронный газ?
8. Каковы условия рассеяния носителей в двумерном электронном (дырочном) газе?
9. Может ли двумерный электронный газ существовать при комнатной температуре (да, нет, почему)?
10. Какой тип рассеяния носителей превалирует в двумерном электронном (дырочном) газе?
11. Чем определяется максимальная дрейфовая скорость в полупроводниках?
12. Возможен ли всплеск максимальной дрейфовой скорости носителей?
13. Возможно ли всплеск дрейфовой скорости реализовать в транзисторных структурах с тонкой базовой областью?
14. Чем отличается гетероструктурный полевой транзистор от МОП-полевого транзистора?
15. Какой принцип работы полевого транзистора на гетероструктурах AlGaAs/GaAs с селективным легированием?
16. При каких температурах проявляются основные достоинства транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием?
17. Назовите основные режимы работы транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием?
18. В чем достоинства и недостатки обратных и многоканальных типов транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием?

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 32 из 36

19. Каков принцип работы гетероструктурных биполярных транзисторов (ГСБТ)?
20. Какой параметр гетероперехода позволяет регулировать гетероэмиттер?
21. Чего позволяет добиться использование электрического поля в базе и как это влияет на быстродействие ГСБТ?
22. Какой уровень легирования допускается в коллекторе ГСБТ в системе GaAs/AlGaAs/GaAs?
23. Сравните схемы легирования в обычном биполярном транзисторе и гетероструктурном биполярном транзисторе.
24. В чем преимущества гетероструктурных биполярных транзисторы на других гетеропарах GaInAs/InP, GaInAsP/InP, GaAs/Si, Ge/Si,  $\alpha$ -Si/Si?

## Тема 2. Транзисторы на горячих электронах (10 часов)

1. Что такое горячие электроны? Каковы основные механизмы их генерации в полупроводниках?
2. До каких максимальных расстояний в транзисторных структурах нужно учитывать существование горячих носителей?
3. Что такое баллистический перенос носителей в полупроводниках? Можно ли этот эффект использовать при создании транзисторных структур?
4. Принцип действия транзисторов с баллистической инъекцией электронов, типовые его структуры и параметры быстродействия.
5. Что такое спектроскопия горячих электронов? На каком типе транзисторных структур она реализована?
6. Что такое планарно-легированный барьер? Это гетеропереход или нет?
7. Сравните по быстродействию обычный p-n переход и планарно-легированный барьер.



<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 33 из 36

8. Нарисуйте схему баллистического транзистора с планарно-легированными барьерами и обоснуйте параметры его быстродействия.
9. Принцип работы и параметры быстродействия баллистических транзисторов с гетероструктурными барьерами.
10. Типы транзисторов с переносом заряда в пространстве и их зонные диаграммы.

### **Тема 3. Аналоговые транзисторы (5 часов)**

1. Конструкция и принцип работы транзисторов со статической индукцией.
2. Механизм переноса носителей в транзисторе со статической индукцией. Вольт-амперные характеристики.
3. Основные типы транзисторов со статической индукцией и области их применения.
4. Чем отличаются транзисторы с пронизываемой базой от транзисторов со статической индукцией.
5. Реальные конструкции транзисторов с пронизываемой базой и их быстродействие.
6. Конструкция транзисторов с металлической базой и их зонная диаграмма.
7. Как влияет квантово-механическое отражение на коллекторном барьере на коэффициент переноса носителей в транзисторах с металлической базой?
8. Для каких систем можно ожидать реализацию транзисторов с металлической базой?

### **Тема 4. Транзисторы на квантовых эффектах (7 часов)**

1. Механизм туннелирования носителей через одиночный барьер
2. Механизм переноса носителей через квантовую яму
3. Как размерное квантование влияет на перенос носителей?

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 34 из 36

4. В чем заключается механизм резонансного туннелирования через двойной барьер с квантовой ямой?
5. Чем отличаются последовательное и резонансное туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой?
6. Что такое сверхрешетка и как ее можно сформировать на основе гетеропереходов?
7. Чем отличаются многобарьерные структуры от сверхрешетки?
8. Каков механизм переноса носителей через сверхрешетку?
9. В каком случае сверхрешетку можно использовать для эмиссии фотонов?
10. Какие типы транзисторов с резонансным туннелированием вы можете перечислить?
11. В каких транзисторах на квантовых эффектах можно ожидать реализацию резонансного туннелирования с максимальной вероятностью?
12. В чем основная особенность выходных характеристик транзисторов на квантовых эффектах?
13. Как можно построить умножитель частоты на транзисторах на квантовых эффектах?
14. Каково быстродействие транзисторов на квантовых эффектах?
15. Какие из параметров транзисторов на квантовых эффектах ограничивает их быстродействие?
16. Каков принцип действия диода на двойном барьере с квантовой ямой?
17. От каких параметров зависит быстродействие диодов на двойном барьере с квантовой ямой?
18. В чем разница принципов действия между биполярными и полевыми транзисторами на квантовых эффектах?.

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 35 из 36

## **Тема 5. Транзисторы и интегральные микросхемы с наивысшим быстродействием (6 часов)**

1. Какие из транзисторов с наивысшим быстродействием реализованы на практике и каковы их параметры быстродействия?
2. Каковы перспективы использования транзисторов на горячих электронах, с баллистическим пролетом и аналоговых транзисторов?
3. Можно ли ожидать использования транзисторов на квантовых эффектах в микросхемах с наивысшим быстродействием?
4. Интегральные микросхемы на сверхбыстродействующих транзисторах.
5. Основные технологические проблемы при реализации транзисторов с наивысшим быстродействием.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (семинарские занятия, выступления с докладами) (40 часов)**

Тема 1. Построение гетеропереходов в модели Андерсона и с учетом поверхностных состояний (4 часа).

Тема 2. Принцип селективного легирования. Двумерный электронный и дырочный газы. Методы исследования двумерного электронного газа (8 часов).

Тема 3. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров гетероструктурных полевых транзисторов (6 часов).

Тема 4. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров гетероструктурных биполярных транзисторов (6 часов).

Тема 5. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров транзисторов на горячих электронах (6 часов).

<b>Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика и технология квантовых приборов»</b>			
Разработал: Галкин Н.Г.	Идентификационный номер: РПУД 11.03.04.01 БЗ.В.ДВ.12 -2016	Контрольный экземпляр находится на кафедре физики низкоразмерных структур ШЕН ДВФУ	Лист 36 из 36

Тема 6. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Расчет параметров аналоговых транзисторов (4 часа)

Тема 7. Построение зонных энергетических диаграмм без и со смещением. Построение зонных диаграмм транзисторов на квантовых эффектах (4 часа).

Тема 8. Анализ сверхбыстродействующих микросхем на различных типах транзисторов (2 часа).