



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

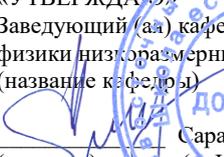
**ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

«СОГЛАСОВАНО»  
Руководитель ОП

  
\_\_\_\_\_ Крайнова Г. С.  
(подпись) (Ф.И.О. рук. ОП)

« 15 » сентября 2017 г.

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

  
\_\_\_\_\_ Саранин А.А.  
(подпись) (Ф.И.О. зав. каф.)

« 15 » сентября 2017 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 30 час.

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

практические занятия 40 час.

всего часов аудиторной нагрузки 70 часов

в том числе с использованием МАО 20 час.

самостоятельная работа 74 час.

в том числе на подготовку к экзамену 27 час.

контрольные работы 8 семестр

курсовая работа / курсовой проект нет семестр

зачет нет семестр

экзамен 8 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  
« 15 » сентября 2017 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой, чл.-корр. РАН Саранин А.А.

Составитель, д.ф.-м.н., профессор Галкин Н.Г.

**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)

## 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, 4 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-3, willingness to take into account modern trends in the development of electronics, measuring and computing equipment, information technologies in their professional activities;

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.

**Main course literature:**

1. Astaykin, A. I. Quantum and optoelectronic devices and devices [Electronic resource]: study guide / A. I. Astaikin, M. K. Smirnov; by ed. A.I. Astaykin. - Electron. text data. - Sarov: Russian Federal Nuclear Center - VNIIEF, 2011. - 343 p. - 978-5-9515-0159-2. - Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/60849.html>

2. Yakushenkov, Yu. G. Theory and calculation of optoelectronic devices [Electronic resource]: textbook / Yu. G. Yakushenkov. - Electron. text data. - M.: Logos, 2011. - 568 c. - 978-5-98704-533-6. - Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/9130.html>

3. Shangina, L.I. Quantum and optical electronics [Electronic resource]: a tutorial / L.I. Shangina. - Electron. text data. - Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2012. - 301 p. - 2227-8397. - Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/13939.html>

**Form of final knowledge control: exam.**

## АННОТАЦИЯ

Учебная дисциплина «Физика и технология квантовых приборов» разработана для студентов 4 курса направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» и образовательной программы 11.03.04.01 «Нанотехнологии в электронике» в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 4 ЗЕ (144 часа). Учебным планом предусмотрены лекции (40 часов), семинарские занятия (40 часов) и самостоятельная работа студента (74 часа, в том числе 27 часов на подготовку к экзамену). 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» логически и содержательно связана с такими курсами, как «Физические основы электроники», «Материалы электронной техники», «Физика конденсированного состояния», «Физика полупроводников и низкоразмерных систем» и «Наноэлектроника». 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:

- 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.

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 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-3, готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.	Знает	методы анализа и систематизации экспериментальных данных; методы поиска научной литературы по тематике исследований; основы информационных технологий для составления презентаций.
	Умеет	анализировать и систематизировать литературные экспериментальные и теоретические данные, представлять их в виде обзоров; анализировать данные собственных исследований, полученных с помощью взаимодополняющих методов исследований; представлять полученные данные в виде научных статей и презентаций на научных конференциях.

	Владеет	<p>методами анализа и систематизации результатов научных исследований;</p> <p>в достаточной мере словарным запасом в области своей специализации для чтения, а также написания статей на иностранном языке (английском).</p>
ПК-20, способность разрабатывать инструкции для обслуживающего персонала по эксплуатации используемого технического оборудования программного обеспечения	Знает	<p>методики экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения;</p> <p>методику работы на оборудовании и программное обеспечение оборудования</p>
	Умеет	<p>анализировать результаты экспериментальных исследований параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения;</p> <p>инструктировать по методике работы на техническом оборудовании и использования программного обеспечения оборудования</p>
	Владеет	<p>техникой экспериментов с различными приборами в области характеризации приборов электроники и нанoeлектроники;</p> <p>методикой обработки экспериментальных данных и расчетов ошибок измерений;</p> <p>разработкой инструкций по работе на техническом оборудовании и использовании программного обеспечения</p>
ПК-21, способность находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте измерительного и диагностического оборудования	Знает	<p>принципы работы измерительного и диагностического оборудования электроники и нанoeлектроники</p>
	Умеет	<p>анализировать и находить возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств нанoeлектроники</p>
	Владеет	<p>Умением анализировать возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств нанoeлектроники, находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте</p>

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 (30 часов)**

### **1. Полевые и биполярные гетероструктурные транзисторы (10 часов)**

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 (8 часов)**

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 (3 часов)**

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

### **4. Транзисторы на квантовых эффектах (5 часов)**

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 часов)**

Транзисторы с наивысшим быстродействием. Интегральные микросхемы на сверхбыстродействующих транзисторах.

### **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).

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).

### 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;
- 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-3, ПК-20	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-3, 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-3, 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-3, 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
5	Тема 5. Транзисторы и интегральные микросхемы с наивысшим быстродействием.	ПК-1, ПК-3, 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. Астайкин, А. И. Квантовые и оптоэлектронные приборы и устройства [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. И. Астайкин, М. К. Смирнов ; под ред. А. И. Астайкин. — Электрон. текстовые данные. — Саров : Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2011. — 343 с. — 978-5-9515-0159-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/60849.html>

2. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет опико-электронных приборов [Электронный ресурс] : учебник / Ю. Г. Якушенков. — Электрон. текстовые данные. — М. : Логос, 2011. — 568 с. — 978-5-98704-533-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/9130.html>

3. Шангина, Л. И. Квантовая и оптическая электроника [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. И. Шангина. — Электрон. текстовые данные. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 301 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13939.html>

### **Дополнительная литература**

*(электронные и печатные издания)*

1. Кольцов, Г. И. Физика полупроводниковых приборов. Расчет параметров биполярных приборов [Электронный ресурс] : сборник задач / Г. И. Кольцов, С. И. Диденко, М. Н. Орлова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский Дом МИСиС, 2012. — 78 с. — 978-5-87623-533-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/56589.html>

2. Старосельский В.И., "Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники. Учебное пособие для вузов". М. Юрайт. 2015, 463 с.  
<https://biblio-online.ru/bcode/378870>

3. Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур. Учебное пособие. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 347 с. <http://window.edu.ru/resource/346/63346>

4. Лысенко А.П. Биполярные транзисторы: Учебное пособие. - М.: МИЭМ, 2006. - 76 с. <http://window.edu.ru/resource/860/55860>

## Перечень ресурсов сети «Интернет»

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>
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., Обороина Е.Е. Физические основы нанoeлектроники: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. - 83 с. <http://window.edu.ru/resource/415/73415>

## **VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

В общей трудоемкости дисциплины 144 час. (4 ЗЕ) аудиторные занятия составляют 70 час, включая лекции (30 час.) и семинарские занятия (40 час.).

По дисциплине предусмотрена внеаудиторная самостоятельная работа в объеме 47 часов на весь курс дисциплины. Кроме того, в период экзаменационной сессии, планируется 27 часов на подготовку к экзамену.

Расписание аудиторных занятий включает в неделю 7 часов. Рекомендуется учащимся планировать внеаудиторную самостоятельную работу в объеме 4,5 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 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.



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 наноэлектроника

**Форма подготовки очная**

**Владивосток  
2017**

## 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	6 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	6 час.	резюме статей по теме
4	5 недели семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 5	6 час.	контрольная работа
5	6 недели семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 6	6 час.	резюме статей по теме
6	7 недели семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 7	6 час.	контрольная работа
7	8 неделя семестра	Подготовка к семинарскому занятию по теме 8	6 час.	резюме статей по теме
8	9 неделя семестра	Подготовка устных докладов в виде презентации с рисунками и выводами на основе подготовленных резюме	7 час.	Обзорные доклады по тематике курса
Итого			47 часов	

### 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».

## **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 материалов.

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;

✓ *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



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

---

**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**  
**2017**

## Паспорт ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
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-3, готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.	Знает	методы анализа и систематизации экспериментальных данных; методы поиска научной литературы по тематике исследований; основы информационных технологий для составления презентаций.
	Умеет	анализировать и систематизировать литературные экспериментальные и теоретические данные, представлять их в виде обзоров; анализировать данные собственных исследований, полученных с помощью взаимодополняющих методов исследований; представлять полученные данные в виде научных статей и презентаций на научных конференциях.
	Владеет	методами анализа и систематизации результатов научных исследований;

		в достаточной мере словарным запасом в области своей специализации для чтения, а также написания статей на иностранном языке (английском).
ПК-20, способность разрабатывать инструкции для обслуживающего персонала по эксплуатации используемого технического оборудования программного обеспечения	Знает	методики экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; методику работы на оборудовании и программное обеспечение оборудования
	Умеет	анализировать результаты экспериментальных исследований параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; инструктировать по методике работы на техническом оборудовании и использования программного обеспечения оборудования
	Владеет	техникой экспериментов с различными приборами в области характеристики приборов электроники и нанoeлектроники; методикой обработки экспериментальных данных и расчетов ошибок измерений; разработкой инструкций по работе на техническом оборудовании и использовании программного обеспечения
ПК-21, способность находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте измерительного и диагностического оборудования	Знает	принципы работы измерительного и диагностического оборудования электроники и нанoeлектроники
	Умеет	анализировать и находить возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств нанoeлектроники
	Владеет	Умением анализировать возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств нанoeлектроники, находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели	баллы
ПК-1, способность строить	знает (пороговый)	физику процессов формирования гетеропереходов;	может воспроизводить и объяснять	способность показать базовые знания и основные умения в использовании:	65-74

<p>простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроник и различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования</p>	<p>уровень б)</p>	<p>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 зонные диаграммы.</p>	<p>учебный материал с требуемой степенью научной точности и полноты</p>	<p>- 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.</p>	
	<p>умеет (продвинутый)</p>	<p>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</p>	<p>Умеет выполнять типичные задачи по разработке конструкции и параметров сверхбыстродействующих транзисторов на основе воспроизведения стандартных подходов</p>	<p>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</p>	<p>75-89</p>

		<p>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</p>		<p>реализации транзисторных структур.</p>	
владеет (высокий)	<p>Владеет навыками и имеет опыт применения 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.</p>	<p>Владение навыками решения усложненные задачи по разработке конструкции и расчету параметров сверхбыстродействующих транзисторов основе приобретенных знаний, умений и навыков</p>	<p>способность применить систематизированные знания и практические 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</li> </ul>	90-100	

		Владеет методами расчета параметров транзисторных структур для генерации в них горячих носителей. Владеет методами расчета электрических и частотных характеристик всех типов транзисторных структур.		перспективы их использования для построения сверхбыстродействующих интегральных схем.	
ПК-3, готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.	знает (пороговый уровень)	современные приемы и методы работы с информационными и технологиями, методы поиска новой периодической информации в виде статей и монографий.	Может воспроизводить и объяснять новый научно-технический материал с требуемой степенью научной точности и полноты	способность показать базовые знания и основные умения в использовании: - принципов организации информационного поиска литературы в области нанoeлектроники и физики транзисторных структур; - способов подготовки литературных обзоров по заданной тематике; - методов создания и оптимизации подачи материалов в презентациях.	65-74
	умеет (продвинутый)	Добывать и анализировать информацию из периодических источников; применять приемы и методы работы с информационными и технологиями; планировать работы по использованию полученной периодической информации для составления обзоров и резюме.	Умеет выполнять типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения задач по поиску информации	способность применить знания и практические умения в задачах, связанных с поиском периодической информации по заданной теме и за определенный период времени; умеет подготавливать обзоры и резюме по заданной тематике; знает и применяет подходы к оформлению презентаций с использованием фотоматериалов и иллюстраций.	75-89
	владеет (высокий)	навыками применения: методов рациональной организации научной работы в выбранной области нанoeлектроники; методов представления	Владеет методами решения сложные задачи в нетипичных ситуациях на основе приобретенных знаний, умений и навыков	способность применить фактическое и теоретическое знание, практические умения по разработке проектных материалов в профессиональной области нанoeлектроники и физики транзисторных структур; создавать обзоры по связанным с выбором и	90-100

		результатов научной работы на конференциях; навыками подготовки инициативных заявок на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в выбранной области нанoeлектроники предприятия и организации		обоснованием новых достижений в выбранной области, создавать полноценные презентации с использованием фото- и видеоматериалов для представления их на научных конференциях и симпозиумах.	
ПК-20, способность разрабатывать инструкции для обслуживающего персонала по эксплуатации используемого технического оборудования и программного обеспечения	Знает	методики экспериментально го 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.	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
	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.	Умеет 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 наноэлектроники; методикой обработки экспериментальных данных и расчетов ошибок измерений.	Владеет методами решения усложненных задач наноэлектроник и на основе приобретенных знаний, умений и навыков	способность применить знания и практические умения в задачах, связанных с усложненными задачами наноэлектроники.	90-100
ПК-21, способность находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте измерительного и диагностического оборудования	знает	принципы работы измерительного и диагностического оборудования электроники и наноэлектроники.	знает принципы работы измерительного и диагностического оборудования электроники и наноэлектроник и	способность показать базовые знания диагностики измерительного оборудования	65-74
	умеет	анализировать и находить возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств наноэлектроники.	умеет анализировать и находить возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств наноэлектроник и	способен применить знания и практические умения в задачах, связанных с диагностикой и мелким ремонтом измерительного оборудования	75-89
	владеет	Умением анализировать возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств наноэлектроники, находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте	владеет знанием и умением анализировать возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств наноэлектроник и, находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте	способность применить знания и умения анализировать возможные поломки оборудования, исходя из принципов работы устройств наноэлектроники, находить аналоги импортных деталей при мелком ремонте	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.

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.

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.

## **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 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**

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?
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?
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 транзисторов на других гетеропарах GaInAs/InP, GaInAsP/InP, GaAs/Si, Ge/Si,  $\alpha$ -Si/Si?

## **Тема 2. Транзисторы на горячих электронах**

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 инжекцией 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 р-n переход и планарно-легированный барьер.
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**

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 пронизаемой базой от транзисторов со статической индукцией.
5. Реальные конструкции транзисторов с пронизаемой 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**

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

### **Тема 5. Транзисторы и интегральные микросхемы с наивысшим быстродействием**

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).

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).