

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

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН РЭФ
д.т.н. Хрусталеv В. А.
“ ____ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Физические основы полупроводниковой наноэлектроники

Образовательная программа: 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль:
Микроэлектроника и наноэлектроника

Курс: 4, семестр : 7

Факультет радиотехники и электроники,

		Семестр
№	Вид деятельности	7
1	Всего зачетных единиц (кредитов)	7
2	Всего часов	252
3	Всего занятий в контактной форме, час.	107
4	Лекции, час.	36
5	Практические занятия, час.	36
6	Лабораторные занятия, час.	18
7	из них в активной и интерактивной форме, час.	16
8	Аттестация, час.	2
9	Консультации, час.	15
10	Самостоятельная работа, час.	145
11	Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе)	КП контр.
12	Вид аттестации	Э

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

ФГОС введен в действие приказом №218 от 12.03.2015 г. , дата утверждения: 07.04.2015 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, вариативная, по выбору студента

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ППиМЭ, протокол заседания кафедры №5 от 20.06.2017

Утверждена на совете факультета радиотехники и электроники, протокол № 6 от 21.06.2017

Программу разработал:

старший преподаватель, Калинин С. В.

Заведующий кафедрой:

с.н.с., д.ф-м.н. Гайслер В. А.

Ответственный за образовательную программу:

заведующий кафедрой Гайслер В. А.

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Компетенция ФГОС: ОПК.1 способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики; в части следующих результатов обучения:	
38. туннельный эффект;	
Компетенция ФГОС: ОПК.2 способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат; в части следующих результатов обучения:	
у2. умеет выбирать простейшие модели физических объектов и процессов	
Компетенция ФГОС: ОПК.3 способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей; в части следующих результатов обучения:	
32. эквивалентные схемы активных элементов	
Компетенция ФГОС: 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; в части следующих результатов обучения:	
37. основы физики твердого тела, принципы использования физических эффектов в твердом теле в приборах и устройствах оптической электроники;	
у7. уметь формировать математические модели на функциональном уровне	
Компетенция ФГОС: ПК.2 способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; в части следующих результатов обучения:	
у6. определять надежность, стабильность и воспроизводимость характеристик твердотельных объектов или приборов при наличии внешних воздействий	

2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)		Формы организации занятий
Физические основы полупроводниковой нанoeлектроники		
ОПК.1.38 туннельный эффект;		
1.Понятийный аппарат (терминологию) дисциплины		Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ПК.1.37 основы физики твердого тела, принципы использования физических эффектов в твердом теле в приборах и устройствах оптической электроники;		
2.об основных физических особенностях и моделях для наноструктур		Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
3.об современной элементной базе, используемой в СБИС и УБИС		Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
4.Анализировать принципы действия современных транзисторов с помощью зонных диаграмм		Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ПК.1.у7 уметь формировать математические модели на функциональном уровне		
5.о фундаментальной системе уравнений полупроводникового прибора		Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ОПК.2.у2 умеет выбирать простейшие модели физических объектов и процессов		

6.Применения математических моделей для исследования анализа элементной базы СБИС и УБИС	Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ПК.2.у6 определять надежность, стабильность и воспроизводимость характеристик твердотельных объектов или приборов при наличии внешних воздействий	
7.Физику и особенности МДП-структур и МОПТ	Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
8.Физические основы процесса миниатюризации	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
9.Физику КМОПТ, основные физические процессы и эффекты	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
10.Физику полевые гетеропереходных транзисторов на основе GaAs.и HEMT.	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
11.Физику гетеропереходов и гетероструктурных биполярных транзисторов.	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
12.Мезоскопические эффекты в нанoeлектронных структурах	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
13.Квантово-механические вопросы нанoeлектроники и приборы на их основе	Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
14.Применения экспериментальных методик для определения ВАХ и параметров элементной базы СБИС	Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ОПК.3.32 эквивалентные схемы активных элементов	
15.Численно вычислять основные параметры полупроводниковых наноприборов	Лекции; Практические занятия; Лабораторные работы; Самостоятельная работа

3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

Темы лекций	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 7				
Дидактическая единица: Общие вопросы физического базиса нанoeлектроники				
1. Элементы зонной теории	0	2	1, 2	Модель Кронига-Пенни. Зонные структуры зоны проводимости и валентной зоны в кремнии. Закон дисперсии. Энергетическая плотность состояний наноструктур различной размерности.
2. Статистические концентрационные модели для электронов и дырок	0	1	1, 2, 3	Функция распределения Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Собственная концентрация и концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике. Невырожденные полупроводники.

3. Основные процессы генерации и рекомбинации носителей заряда	0	1	1, 2, 5	Прямозонная тепловая генерация-рекомбинация, ловушечная генерация-рекомбинация по Шокли-Риду-Холлу, ударная, Оже и поверхностная рекомбинация
4. Кинетика переноса заряда	0	3	1, 2, 5	Уравнения Больцмана и непрерывности. Диффузионный и дрейфовый ток в полупроводниках. Связь с квазиуровнями Ферми. Проводимость и закон Ома. Основные состояния полупроводникового прибора и его фундаментальная система уравнений.
5. Нанообъекты, нанотехнологии, наноэлектроника	0	2	1, 2, 3, 5	Две концепции наноэлектроники. Тенденции развития и перспективные полупроводниковые приборы наноэлектроники.
Дидактическая единица: Физика МДП-структур и приборы на их основе				
5. Физика МДП-структур	0	4	1, 3, 7	Идеальная МДП-структура и три ее основных состояния. ВФХ идеальной МДП-структуры. Распределение поля и потенциала в МДП-структуре в состоянии обеднения. Пороговое напряжение и потенциал инверсии для идеальной МДП-структуры. Физические особенности реальных МДП-структур. Системы зарядов в двуокиси кремния и их влияние на напряжение плоских зон. ВХФ реальной МДП-структуры и ее пороговое напряжение
6. ВАХ МОПТ и модели	0	3	1, 3, 5, 7	Влияние смещения подложки на пороговое напряжение МДПТ. Коэффициент влияния подложки. Основные физические процессы в МОП транзисторе обогащенного типа. ВАХ МОП транзисторов. Простейшая теория ВАХ МДП-транзисторов. Модель Шихмана-Ходжеса с учетом влияния смещения подложки
Дидактическая единица: Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе				

7. КМОП-технологии и физика миниатюризации	0	4	1, 15, 2, 3, 4, 6, 8	Закон Мура и три современных пути развития КМОП-технологии. Зависимость граничной частоты КМОПТ от конструктивно-технологических параметров. Основные конструктивно-технологические способы увеличения быстродействия КМОПТ. Процесс миниатюризации и его влияние на параметры КМОПТ. Компромиссы миниатюризации. Правила Деннарта и скейлинг параметров. Физические пределы миниатюризации. .
8. Основные физические процессы в каналах КМОПТ	0	2	1, 15, 2, 3, 8, 9	Процессы: защелкивания, насыщения дрейфовой скорости, подпороговые характеристики, влияние поверхностных состояний на процесс переноса, смыкание, влияние на ВАХ модуляции длины канала и последовательных сопротивлений стока и истока. Короткоканальные эффекты: зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала, DIBL-эффект. Эффекты сильных полей: разогрев носителей, ударная ионизация, ток в подложку, биполярный эффект. Основные технологические способы подавления паразитных эффектов в КМОПТ: DDD и LDD структуры, HALO-области и "кармашки", ретроградные карманы, скрытые слои.
Дидактическая единица: Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе				

9. Квантово-механические свойства электрона и эффекты туннелирования через барьеры	0	4	1, 13, 14, 15, 3, 6	Основные квантово-механические свойства электрона. Квантово-механическое взаимодействие электрона с потенциальным барьером. Эффекты туннелирования в МОПТ: ток утечки затвора и туннелирование горячих носителей из канала в подзатворный диэлектрик. Эффект размерного квантования в квантовых ямах и в МОПТ. Эффект резонансного туннелирования. Резонансно-туннельные диоды
10. Квантовые нити и точки. Наноприборы на их основе.	0	4	1, 12, 14, 15, 3, 4, 6	Квантовые нити и приборы на их основе. Квантовые точки (искусственные атомы), эффект одноэлектронного туннелирования, одноэлектронные транзисторы, кулоновская блокада
Дидактическая единица: Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе				
10. Гетеропереходы и гетеротранзисторы на их основе	0	4	1, 10, 11, 14, 15, 3, 4, 6	Электрофизика гетеропереходов различных типов. Полевые гетеропереходные транзисторы на основе GaAs. НЕМТ.. Конструкция, физические особенности и принцип действия ПТ с высокой подвижностью электронов (НЕМТ). Гетеропереходные биполярные транзисторы. Варизонные биполярные транзисторы с Si/Ge.
Дидактическая единица: Мезоскопические эффекты в нанoeлектронных структурах				
11. Баллистический перенос и баллистические транзисторы	0	2	1, 12, 2, 3, 4, 6	Диффузионный и баллистический перенос носителей в полупроводниках. Эффект всплеска скорости. Баллистические транзисторы.

Таблица 3.2

Темы лабораторных работ	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 7				
Дидактическая единица: Общие вопросы физического базиса нанoeлектроники				

1. Нанoeлектроника и физические пределы миниатюризации транзисторов	4	4	1, 2, 5, 6	Нанообъекты и две концепции нанoeлектроники. Нанотехнологии. Тенденции развития и перспективные полупроводниковые приборы нанoeлектроники.
Дидактическая единица: Физика МДП-структур и приборы на их основе				
2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОП-ТРАНЗИСТОРА	4	4	1, 2, 3, 5, 7	Цель работы заключается в знакомстве с ВАХ и основными дифференциальными статическими параметрами МОПТ. В работе измеряется пороговое напряжение МОПТ, его передаточные и выходные вольт-амперные характеристики и по результатам измерений определяются статические дифференциальные параметры МОПТ: крутизна и выходная проводимость.
Дидактическая единица: Квантово-механические вопросы нанoeлектроники и приборы на их основе				
3. Квантово-механические свойства наночастиц	4	4	1, 13, 14, 15, 2, 3, 4, 5, 6	Цель работы заключается в знакомстве с идеями корпускулярно-волнового дуализма, изучении свойств волновых функций наночастиц и в овладении техникой физико-математического анализа решений уравнения Шредингера на примере задачи взаимодействия электрона с потенциальным барьером
4. Электрофизические свойства квантовых ям и приборы на их основе	4	6	1, 13, 14, 15, 2, 3, 4, 6	Эффекты туннелирования в МОПТ: ток утечки затвора и туннелирование горячих носителей из канала в подзатворный диэлектрик. Эффект размерного квантования в квантовых ямах и в МОПТ. Эффект резонансного туннелирования. Резонансно-туннельные диоды

Таблица 3.3

Темы практических занятий	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 7				

Дидактическая единица: Общие вопросы физического базиса нанoeлектроники				
1. Общие вопросы физики полупроводниковых приборов	0	4	1, 2, 3, 5, 7	Проводимость и сопротивление полупроводников. Дифференциальный закон Ома. Диффузионный и дрейфовый ток в полупроводниках. Связь с квазиуровнями Ферми. Основные состояния полупроводникового прибора и его фундаментальная система уравнений. Применение ФСУ при анализе работы прибора: релаксация фотовозбужденных носителей; односторонняя световая засветка в полупроводниковой пластине. Полупроводниковые резисторы. Эффективная ширина. Математическая модель сопротивления тонкопленочного полупроводникового резистора
Дидактическая единица: Физика МДП-структур и приборы на их основе				
2. Физика МДП-структур и МОПТ	0	8	1, 2, 3, 5, 7	Идеальная МДП-структура и три ее основных состояния. ВФХ идеальной МДП-структуры. Распределение поля и потенциала в МДП-структуре в состоянии обеднения. Пороговое напряжение и потенциал инверсии для идеальной МДП-структуры. Физические особенности реальных МДП-структур. Системы зарядов в двуокиси кремния и их влияние на напряжение плоских зон. ВХФ реальной МДП-структуры и ее пороговое напряжение. Влияние смещения подложки на пороговое напряжение МДПТ. Коэффициент влияния подложки. Основные физические процессы в МОП транзисторе обогащенного типа. ВАХ МОП транзисторов. Простейшая теория ВАХ МДП-транзисторов. Модель Шихмана-Ходжеса с учетом влияния смещения подложки
Дидактическая единица: Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе				

3. КМОП-технологии и физика процесса миниатюризации	0	10	1, 14, 15, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	КМОП-технологии. Закон Мура и три современных пути развития КМОП-технологии. Зависимость граничной частоты КМОПТ от конструктивно-технологических параметров. Основные конструктивно-технологические способы увеличения быстродействия КМОПТ. Процесс миниатюризации и его влияние на параметры КМОПТ. Компромиссы миниатюризации. Правила Деннарта и скейлинг параметров. Физические пределы миниатюризации. Основные физические процессы в каналах КМОПТ: защелкивание, насыщение дрейфовой скорости, подпороговые характеристики, влияние поверхностных состояний на процесс переноса, смыкание, влияние на ВАХ модуляции длины канала и последовательных сопротивлений стока и истока. Короткоканальные эффекты: зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала, DIBL-эффект. Эффекты сильных полей: разогрев носителей, ударная ионизация, ток в подложку, биполярный эффект. Основные технологические способы подавления паразитных эффектов в КМОПТ: DDD и LDD структуры, HALO-области и "кармашки", ретроградные карманы, скрытые слои. 3D
Дидактическая единица: Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе				

4. Квантовая физика наноструктур	0	10	1, 12, 13, 14, 15, 2, 3, 4, 5, 6	Идеальная МДП-структура и три ее основных состояния. Особенности вольт-фарадных характеристик идеальной МДП-структуры. Анализ емкостей и зарядов в идеальной МДП-структуре. Пороговое напряжение и потенциал инверсии для идеальной МДП-структуры. Влияние смещения подложки на пороговое напряжение МДП-структуры. Физические особенности реальных МДП-структур. Напряжение плоских зон и разность работ выхода. Системы зарядов в двуокиси кремния и их влияние на напряжение плоских зон. ВХФ реальной МДП-структуры. Классификация состояний МДП-структуры на основе понятия поверхностного потенциала. Физические процессы в МОПТ и их влияние на ВАХ МОПТ. Интегральные МОПТ самосовмещенным затвором. Простейшая теория ВАХ МДП-транзисторов. Модель Шихмана-Ходжеса с учетом влияния смещения подложки
Дидактическая единица: Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе				
5. Физика гетеропереходов	0	4	1, 10, 11, 14, 15, 2, 3, 4, 5, 6	Электрофизика и технологии гетеропереходов. Анализ зонных диаграмм. Принцип действия НЕМТ.

4. Самостоятельная работа обучающегося

№	Виды самостоятельной работы	Ссылки на результаты обучения	Часы на выполнение	Часы на консультации
Семестр: 7				
1	Контрольные работы	15, 4	10	0
Работа с конспектом лекции и рекомендованной литературой: Драгунов В. П. Микро- и нанoeлектроника. Сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. П. Драгунов, Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2015. - 45, [3] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000215042 Физика полупроводниковых приборов : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ по направлениям 210100.62 - Электроника и нанoeлектроника, 222900.62 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин, Е. А. Макаров, А. С. Черкаев]. - Новосибирск, 2014. - 90, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213790				
2	Курсовой проект	14, 15, 4, 6	60	8

Работа с технической документацией, рекомендованной литературой: Драгунов В. П. Микро- и наноэлектроника. Сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. П. Драгунов, Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2015. - 45, [3] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000215042 Физика полупроводниковых приборов : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ по направлениям 210100.62 - Электроника и наноэлектроника, 222900.62 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин, Е. А. Макаров, А. С. Черкаев]. - Новосибирск, 2014. - 90, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213790				
3	Подготовка к занятиям	1, 10, 11, 12, 13, 7, 8, 9	45	0
Работа с конспектом лекций, рекомендованной литературой и Интернетом: Драгунов В. П. Микро- и наноэлектроника. Сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. П. Драгунов, Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2015. - 45, [3] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000215042 Физика полупроводниковых приборов : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ по направлениям 210100.62 - Электроника и наноэлектроника, 222900.62 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин, Е. А. Макаров, А. С. Черкаев]. - Новосибирск, 2014. - 90, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213790				
4	Подготовка к аттестации	1, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	30	7
Работа с конспектом лекций, рекомендованной литературой и Интернетом: Драгунов В. П. Микро- и наноэлектроника. Сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. П. Драгунов, Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2015. - 45, [3] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000215042 Физика полупроводниковых приборов : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ по направлениям 210100.62 - Электроника и наноэлектроника, 222900.62 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин, Е. А. Макаров, А. С. Черкаев]. - Новосибирск, 2014. - 90, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213790				

5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Деятельность	Информационно-коммуникационные технологии
Информирование	e-mail
Консультирование	e-mail
Контроль	e-mail
Размещение учебных материалов	e-mail

6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставять оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS. Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Оцениваемые виды деятельности обучающихся	Мин. балл	Максимальный балл
Семестр: 7		
<i>Лекция:</i>	2	4

<i>Лабораторная:</i>	12	25
<i>Практические занятия:</i>	13	25
<i>Контрольные работы:</i>	3	6
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Драгунов В. П. Микро- и нанoeлектроника. Сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. П. Драгунов, Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2015. - 45, [3] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000215042 "		
<i>Курсовой проект: Итого</i>	0	100
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Физика полупроводниковых приборов : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ по направлениям 210100.62 - Электроника и нанoeлектроника, 222900.62 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин, Е. А. Макаров, А. С. Черкаев]. - Новосибирск, 2014. - 90, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213790 "		
<i>Экзамен:</i>	20	40
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Физика полупроводниковых приборов : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ по направлениям 210100.62 - Электроника и нанoeлектроника, 222900.62 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин, Е. А. Макаров, А. С. Черкаев]. - Новосибирск, 2014. - 90, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213790 "		

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

Коды компетенций ФГОС	Результаты обучения	Формы контроля			
		Защита Л/Р	Контр. раб.	Защита КП/КР	Экзамен
ОПК.1	з8. туннельный эффект;	+			+
ОПК.2	у2. умеет выбирать простейшие модели физических объектов и процессов	+			+
ОПК.3	з2. эквивалентные схемы активных элементов				+
ПК.1	з7. основы физики твердого тела, принципы использования физических эффектов в твердом теле в приборах и устройствах оптической электроники;	+	+	+	+
	у7. уметь формировать математические модели на функциональном уровне				+
ПК.2	уб. определять надежность, стабильность и воспроизводимость характеристик твердотельных объектов или приборов при наличии внешних воздействий	+			+

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

7. Литература

Основная литература

1. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники : учебное пособие / Г. И. Зебрев. - М., 2011. - 240 с. : ил., схемы
2. Старосельский В. И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие [для вузов по направлению 210100 "Электроника и микроэлектроника"] / В. И. Старосельский. - М., 2011. - 463 с. : ил., табл.
3. Драгунов В. П. Наноструктуры: физика, технология, применение : учебное пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2010. - 354, [1] с. : ил.
4. Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанofизика и технические приложения / М. Грундман ; пер. с англ. под ред. В. А. Гергеля. - Москва, 2012. - 771 с., [3] л. цв. ил. : ил., табл.. - Парал. тит. л. англ..
5. Игнатов А. Н. Основы электроники : [учебное пособие для вузов по направлению 210400 "Телекоммуникации"] / А. Н. Игнатов [и др.] ; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики [и др.]. - Новосибирск, 2005. - 323 с. : ил.
6. Борисенко В. Е. Нанoeлектроника : [учебное пособие для вузов по специальности "Микро- и нанoeлектронные технологии и системы" и "Квантовые информационные системы"] / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, Е. А. Уткина. - М., 2011. - 223 с. : ил., граф., схемы, табл.

Дополнительная литература

1. Драгунов В. П. Основы нанoeлектроники : учебное пособие для вузов по специальности "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы" / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. - Новосибирск, 2000. - 331 с. : ил.
2. Драгунов В. П. Физика твердого тела. Основы нанoeлектроники (квантовые проводники и углеродные нанотрубки) : учебное пособие / В. П. Драгунов ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2007. - 106, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000074043. - Инновационная образовательная программа НГТУ "Высокие технологии".
3. Старосельский В. И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие : [для вузов по направлению 210100 "Электроника и микроэлектроника"] / В. И. Старосельский. - М., 2009. - 463 с. : ил., схемы
4. Шур М. С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1 : В 2-х кн. : Пер. с англ.. - М., 1992. - 479с. : ил.
5. Шур М. С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2 : В 2-х кн. : Пер. с англ.. - М., 1992. - 295с. : ил.
6. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2 ч. Ч. 2 / Г. Я. Красников. - М., 2004. - 535 с. : ил.
7. Маллер Р. Элементы интегральных схем : пер. с англ. / Р. Маллер, Т. Кейминс. - М., 1989. - 630 с. : ил., схемы
8. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / [Н. Н. Михайлов и др.] ; отв. ред. А. Л. Асеев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т физики полупроводников. - Новосибирск, 2004. - 367 с. : ил.. - Авт. указаны в огл..
9. Драгунов В. П. Наноструктуры: физика, технология, применение : учебное пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2008. - 354, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000113265. - Инновационная образовательная программа НГТУ "Высокие технологии".
10. Щука А. А. Нанoeлектроника : [учебное пособие для вузов по направлению "Прикладные математика и физика"] / А. А. Щука ; под общ. ред. Ю. В. Гуляева. - М., 2007. - 463 с. : ил.

Интернет-ресурсы

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znanium.com" : <http://znanium.com/>
5. :

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

1. Физика полупроводниковых приборов : методическое руководство к лабораторному практикуму для 4 курса РЭФ по направлениям 210100.62 - Электроника и нанoeлектроника, 222900.62 - Нанотехнология / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: С. В. Калинин, Е. А. Макаров, А. С. Черкаев]. - Новосибирск, 2014. - 90, [2] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213790
2. Драгунов В. П. Микро- и нанoeлектроника. Сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. П. Драгунов, Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2015. - 45, [3] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000215042

8.2 Специализированное программное обеспечение

1 Microsoft Windows

2 Microsoft Office

9. Материально-техническое обеспечение

Лабораторный стенд

№	Наименование	Назначение
1	Осциллограф двухканальный приставка АСК3106	Используются в учебном процессе

1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине **Физические основы полупроводниковой наноэлектроники** приведена в Таблице.

Таблица

Формируемые компетенции	Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)	Темы	Этапы оценки компетенций	
			Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.)	Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)
ОПК.1 способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики	з8. туннельный эффект;	Дидактическая единица:1 Общие вопросы физического базиса наноэлектроники 1.1 Общие вопросы физики полупроводниковых приборов 1.1 Элементы зонной теории 2.2 Физика МДП-структур и МОПТ Дидактическая единица:2 Физика МДП-структур и приборы на их основе 2.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОП-ТРАНЗИСТОРА 2.5 Физика МДП-структур 2.6 ВАХ МОПТ и модели Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе 3.3 КМОП-технологии и физика процесса миниатюризации 3.7 КМОП-технологии и физика миниатюризации 3.8 Основные физические процессы в каналах КМОПТ 4.3 Квантово-механические свойства наночастиц 4.4 Квантовая физика наноструктур 4.9 Квантово-механические свойства электрона и эффекты туннелирования через барьеры Дидактическая единица:4 Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе 4.10 Квантовые нити и точки. Наноприборы на их основе. 5.5 Физика гетеропереходов Дидактическая единица:5 Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе 5.10 Гетеропереходы и гетеротранзисторы на их основе	Отчет по лабораторным работам 2-3, Курсовой проект	Экзамен, вопросы по темам «Общие вопросы физического базиса наноэлектроники», «Физика МДП-структур и приборы на их основе», «Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе», «Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе», «Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе»; «Мезоскопические эффекты в наноэлектронных структурах»
ОПК.2 способность выявлять естественнонаучную сущность проблем,	у2. умеет выбирать простейшие модели физических объектов и процессов	Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе 3.3 КМОП-технологии и физика процесса	Отчет по лабораторным работам 2-4, Контрольная работа	Экзамен, вопросы по темам «Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их

возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат		миниатюризации Дидактическая единица:4 Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе 4.3 Квантово-механические свойства наночастиц 4.4 Квантовая физика наноструктур Дидактическая единица:5 Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе 5.5 Физика гетеропереходов		основе», «Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе», «Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе»;
ОПК.3 способность решать задачи анализа и расчета характеристик электрических цепей	32. эквивалентные схемы активных элементов	Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе 3.3 КМОП-технологии и физика процесса миниатюризации 3.7 КМОП-технологии и физика миниатюризации 3.8 Основные физические процессы в каналах КМОПТ 4.3 Квантово-механические свойства наночастиц 4.4 Квантовая физика наноструктур 4.9 Квантово-механические свойства электрона и эффекты туннелирования через барьеры Дидактическая единица:4 Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе 4.10 Квантовые нити и точки. Наноприборы на их основе. 5.5 Физика гетеропереходов Дидактическая единица:5 Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе 5.10 Гетеропереходы и гетеротранзисторы на их основе	Отчет по лабораторным работе 1-4, Контрольная работа	Экзамен, вопросы по темам «Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе», «Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе», «Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе»;
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	37. основы физики твердого тела, принципы использования физических эффектов в твердом теле в приборах и устройствах оптической электроники;	1.1 Элементы зонной теории Дидактическая единица:1 Общие вопросы физического базиса наноэлектроники 1.1 Общие вопросы физики полупроводниковых приборов Дидактическая единица:2 Физика МДП-структур и приборы на их основе 2.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОП-ТРАНЗИСТОРА 2.2 Физика МДП-структур и МОПТ 2.5 Физика МДП-структур 2.6 ВАХ МОПТ и модели Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе 3.3 КМОП-технологии и физика процесса миниатюризации 3.7 КМОП-	Отчет по лабораторным работе 1-4, Контрольная работа, Курсовой проект	Экзамен, вопросы по темам «Общие вопросы физического базиса наноэлектроники», «Физика МДП-структур и приборы на их основе», «Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе», «Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе», «Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе»;

		технологии и физика миниатюризации 3.8 Основные физические процессы в каналах КМОПТ 4.3 Квантово-механические свойства наночастиц 4.4 Квантовая физика наноструктур 4.9 Квантово-механические свойства электрона и эффекты туннелирования через барьеры Дидактическая единица:4 Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе 4.10 Квантовые нити и точки. Наноприборы на их основе. 5.5 Физика гетеропереходов Дидактическая единица:5 Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе 5.10 Гетеропереходы и гетеротранзисторы на их основе		
ПК.1	у7. уметь формировать математические модели на функциональном уровне	Дидактическая единица:1 Общие вопросы физического базиса наноэлектроники 1.1 Общие вопросы физики полупроводниковых приборов Дидактическая единица:2 Физика МДП-структур и приборы на их основе 2.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОП-ТРАНЗИСТОРА 2.2 Физика МДП-структур и МОПТ Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе 3.3 КМОП-технологии и физика процесса миниатюризации Дидактическая единица:4 Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе 4.3 Квантово-механические свойства наночастиц 4.4 Квантовая физика наноструктур Дидактическая единица:5 Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе 5.5 Физика гетеропереходов	Отчет по лабораторным работе 1-4, Контрольная работа, Курсовой проект	Экзамен, вопросы по темам «Общие вопросы физического базиса наноэлектроники», «Физика МДП-структур и приборы на их основе», «Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе», «Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе», «Квантово-механические вопросы наноэлектроники и приборы на их основе»; «Мезоскопические эффекты в нанoeлектронных структурах»
ПК.2 способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментально о исследования параметров и	уб. определять надежность, стабильность и воспроизводимость характеристик твердотельных объектов или приборов при наличии внешних воздействий	Дидактическая единица:1 Общие вопросы физического базиса наноэлектроники 1.1 Общие вопросы физики полупроводниковых приборов Дидактическая единица:2 Физика МДП-структур и приборы на их основе 2.2 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ	Отчет по лабораторным работе 1-4, Контрольная работа, Курсовой проект	Экзамен, вопросы по темам «Общие вопросы физического базиса наноэлектроники», «Физика МДП-структур и приборы на их основе», «Физика и технология КМОП-

характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения		ХАРАКТЕРИСТИК И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОП-ТРАНЗИСТОРА 2.5 Физика МДП-структур Дидактическая единица:3 Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе 3.3 КМОП-технологии и физика процесса миниатюризации 4.3 Квантово-механические свойства наночастиц 4.4 Квантовая физика наноструктур 4.9 Квантово-механические свойства электрона и эффекты туннелирования через барьеры Дидактическая единица:4 Квантово-механические вопросы нанoeлектроники и приборы на их основе 4.10 Квантовые нити и точки. Наноприборы на их основе. 5.5 Физика гетеропереходов Дидактическая единица:5 Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе 5.10 Гетеропереходы и гетеротранзисторы на их основе		структур и наноприборы на их основе», «Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе», «Квантово-механические вопросы нанoeлектроники и приборы на их основе»;
---	--	--	--	---

2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 7 семестре - в форме экзамена, который направлен на оценку сформированности компетенций ОПК.1, ОПК.2, ОПК.3, ПК.1, ПК.2.

Экзамен проводится в устной форме, по билетам.

Кроме того, сформированность компетенций проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 7 семестре обязательным этапом текущей аттестации являются контрольная работа, курсовой проект. Требования к выполнению контрольной работы, курсового проекта, состав и правила оценки сформулированы в паспорте контрольной работы, курсового проекта.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенций ОПК.1, ОПК.2, ОПК.3, ПК.1, ПК.2, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

Общая характеристика уровней освоения компетенций.

Ниже порогового. Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

Пороговый. Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы,

большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

Базовый. Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

Продвинутый. Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

Паспорт экзамена

по дисциплине «Физические основы полупроводниковой наноэлектроники», 7 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в устной форме, по билетам. Билет формируется по следующему правилу:
первый вопрос выбирается из диапазона вопросов соответствующих одной из шести тематик, изученных в ходе семестра,
второй вопрос выбирается из диапазона вопросов соответствующих другой тематике из оставшихся пяти тем.

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет РЭФ

Билет № _

к экзамену по дисциплине «Физические основы полупроводниковой наноэлектроники»

-
1. Вопрос 1. Идеальная МДП-структура и три ее основных состояния. ВФХ идеальной МДП-структуры.
 2. Вопрос 2. Диффузионный и баллистический перенос носителей в полупроводниках.

Утверждаю: зав. кафедрой ППиМэ _____ проф. Гайслер В.А.
(подпись)

Дата _____ 201_г.

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный билет считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопросы не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает принципиальные ошибки, оценка составляет менее 20 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопросы дает определение основных понятий, может показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает не принципиальные ошибки, оценка составляет 20-25 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопросы формулирует основные понятия, законы, дает характеристику

процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, может представить качественные характеристики процессов, не допускает ошибок при решении задачи, оценка составляет 26-34 *баллов*.

• Ответ на экзаменационный билет (тест) билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, не допускает ошибок и способен обосновать выбор метода решения задачи, оценка составляет 35-40 *баллов*.

Экзамен считается сданным, если средняя сумма баллов по всем вопросам составляет не менее 20 баллов (по 40 балльной шкале).

Коэффициент, с которым учитывается полученная сумма баллов в общей оценке по дисциплине, определяется Правилами аттестации исходя из того, что максимальное количество баллов за экзамен не может превышать 40 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Физические основы полупроводниковой наноэлектроники»

Полный перечень вопросов по курсу

«Общие вопросы физического базиса наноэлектроники»

- 1.1 Элементы зонной теории. Модель Кронига-Пенни.
- 1.2 Зонные структуры зоны проводимости и валентной зоны в кремнии. Закон дисперсии.
- 1.3 Энергетическая плотность состояний наноструктур различной размерности
- 1.4 Статистические концентрационные модели для электронов и дырок.
- 1.5 Основные процессы генерации и рекомбинации носителей заряда.
- 1.6 Кинетика переноса заряда. Уравнения Больцмана и непрерывности.
- 1.7 Диффузионный и дрейфовый ток в полупроводниках. Связь с квазиуровнями Ферми.
- 1.8 Электростатический потенциал и энергия. Объемный заряд, теорема Гаусса, уравнение Пуассона.
- 1.9 Основные состояния полупроводникового прибора и его фундаментальная система уравнений
- 1.10 Нанообъекты и две концепции наноэлектроники. Нанотехнологии.
- 1.11 Тенденции развития и перспективные полупроводниковые приборы наноэлектроники.

«Физика МДП-структур и приборы на их основе»

- 2.1 Идеальная МДП-структура и три ее основных состояния. ВФХ идеальной МДП-структуры.
- 2.2 Распределение поля и потенциала в МДП-структуре в состоянии обеднения
- 2.3 Пороговое напряжение и потенциал инверсии для идеальной МДП-структуры
- 2.4 Физические особенности реальных МДП-структур. Системы зарядов в двуокиси кремния и их влияние на напряжение плоских зон.
- 2.5 ВХФ реальной МДП-структуры и ее пороговое напряжение
- 2.6 Влияние смещения подложки на пороговое напряжение МДПТ. Коэффициент влияния подложки.
- 2.7 Основные физические процессы в МОП транзисторе обогащенного типа. ВАХ МОП транзисторов.
- 2.8 Простейшая теория ВАХ МДП-транзисторов
- 2.9 Модель Шихмана-Ходжеса с учетом влияния смещения подложки

«Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе»

- 3.1 КМОП-технологии. Закон Мура и три современных пути развития КМОП-технологии
- 3.2 Зависимость граничной частоты КМОПТ от конструктивно-технологических параметров
- 3.3 Основные конструктивно-технологические способы увеличения быстродействия КМОПТ.
- 3.4 Процесс миниатюризации и его влияние на параметры КМОПТ. Компромиссы миниатюризации.
- 3.5 Правила Деннарта и скейлинг параметров. Физические пределы миниатюризации.
- 3.6 Основные физические процессы в каналах КМОПТ: защелкивание, насыщение дрейфовой скорости, подпороговые характеристики, влияние поверхностных состояний на процесс переноса, смыкание,

- влияние на ВАХ модуляции длины канала и последовательных сопротивлений стока и истока.
- 3.7 Короткоканальные эффекты: зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала, DIBL-эффект.
- 3.8 Эффекты сильных полей: разогрев носителей, ударная ионизация, ток в подложку, биполярный эффект.
- 3.9 Основные технологические способы подавления паразитных эффектов в КМОПТ: DDD и LDD структуры, HALO-области и «кармашки», ретроградные карманы, скрытые слои.
- 3.10 3D-технологии: FinFET
- 3.11 КМОП-транзисторы на структурах КНИ.

Физика и технология гетероструктур и наноприборы на их основе»

- 4.1 Гетеропереходы.
- 4.2 Полевые гетеропереходные транзисторы на основе GaAs. HEMT.
- 4.3 Гетеропереходные биполярные транзисторы.

Квантово-механические вопросы нанoeлектроники и приборы на их основе»

- 5.1 Основные квантово-механические свойства электрона.
- 5.2 Квантово-механическое взаимодействие электрона с потенциальным барьером.
- 5.3 Эффекты туннелирования в МОПТ: ток утечки затвора и туннелирование горячих носителей из канала в подзатворный диэлектрик.
- 5.4 Эффект размерного квантования в квантовых ямах и в МОПТ.
- 5.5 Эффект резонансного туннелирования.
- 5.6 Резонансно-туннельные диоды
- 5.7 Квантовые нити и приборы на их основе
- 5.8 Квантовые точки (искусственные атомы), эффект одноэлектронного туннелирования, одноэлектронные транзисторы, кулоновская блокада

Мезоскопические эффекты в нанoeлектронных структурах

- 6.1 Диффузионный и баллистический перенос носителей в полупроводниках.
- 6.2 Эффект всплеска скорости.
- 6.3 Баллистические транзисторы.

Вопросы составил _____ доц. Калинин С.В. декабрь 20_

Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Физические основы полупроводниковой наноэлектроники», 7 семестр

1. Методика оценки

Контрольная работа проводится по теме «Физика и технология КМОП-структур и наноприборы на их основе». Содержит более 10 заданий. Каждое задание содержит в себе две задачи. Выполняется устно.

2. Критерии оценки

Каждое задание контрольной работы оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если выполнено менее 50% заданий. Оценка составляет 0-3 баллов.

Работа выполнена на **пороговом** уровне, если выполнено 50-60% заданий. Оценка составляет 4 балла.

Работа выполнена на **базовом** уровне, если выполнено 70-80% заданий. Оценка составляет 5 баллов.

Работа считается выполненной на **продвинутом** уровне, если выполнено не менее 90% заданий. Оценка составляет 6 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Пример варианта контрольной работы

Пример 1 задания

Поясните, что такое – крутизна МОП-транзистора и каким образом ее можно определить графически? Какое важное качество МОПТ определяет его крутизна? По модели Шихмана-Ходжеса вычислите в случае схемы с общим истоком зависимость крутизны от напряжения на стоке.

Пример 2 задания

Пусть подзатворный диэлектрик – двухслойный, т.е. состоит из $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с толщинами 8 Å и 5 Å соответственно. Рассчитайте эквивалентную толщину оксида EOT и удельную входную емкость МОПТ. В чем состоит физический смысл параметра EOT?

Паспорт курсового проекта

по дисциплине «Физические основы полупроводниковой наноэлектроники», 7 семестр

1. Методика оценки.

Целью курсового проекта является ознакомление студентов современными классами полупроводниковых приборов (элементной базой), которые используются при изготовлении интегральных схем (ИМС).

Задание к курсовому проекту состоит в том, чтобы составить аналитическое описание конкретной конструкции прибора, описать его физику работы с учетом различных специфических физических эффектов, технологию изготовления, ВАХ и другие характеристики прибора, а также его параметры, которые используются на практике разработчиками ИМС, математические модели прибора.

Примерная структура курсовой работы:

- Структура прибора и принцип его действия;
- Технология изготовления;
- Специфические особенности и физические эффекты в приборе;
- Рабочие характеристики прибора и его параметры;
- Математические модели прибора (в том числе, используемые при SPICE-моделировании).

Работа выполняется последовательно, с соответствии с заданной структурой. Защита курсового проекта проводится только после предоставления письменного отчета.

Главными оцениваемыми позициями являются структура прибора и принцип его действия, рабочие характеристики и параметры прибора, используемые при проектировании ИМС, математические модели.

Письменный отчет выполняется в редакторе Word. Он должен содержать: титульный лист, лист содержания, лист кратких обозначений, введение, разделы структуры, описанные выше, заключение, список использованных литературных и других источников.

2. Критерии оценки.

Каждый раздел структуры курсовой работы оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Курсовой проект считается **невыполненной**, если выполнено менее 50% заданий, причем отсутствуют или содержат принципиальные ошибки разделы: структура прибора и принцип его действия и рабочие характеристики прибора и его параметры. Оценка может составлять 0-40 баллов.

Работа выполнена на **пороговом** уровне, если выполнено 50-60% заданий, причем в разделах технология изготовления и специфические особенности и физические эффекты в приборе имеются неточности. Оценка может составлять 50-60 баллов.

Работа выполнена на **базовом** уровне, если выполнено 70-80% заданий, причем в разделе математические модели имеются ошибки. Оценка составляет 70-80 баллов.

Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если выполнено не менее 90% заданий. Оценка составляет 90-100 баллов.

3. Шкала оценки.

В общей оценке по дисциплине баллы за проект учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

Баллы по курсовой работе начисляются отдельно от баллов по курсу в целом.

4. Примерный перечень тем курсового проекта (работы).

- Исследование и анализ характеристик и параметров n- и p-канальных субмикронных обедненных МОП транзисторов на объемном кремнии;
- Исследование и анализ характеристик и параметров субмикронных n- и p-канальных обогащенных МОП транзисторов на объемном кремнии;
- Исследование и анализ основных физических процессы в каналах субмикронных КМОП транзисторах;
- Исследование и анализ эффектов сильных полей в КМОП субмикронных и нано - транзисторах;
- Исследование и анализ характеристик и параметров субмикронных КМОП транзисторов с LDD структурой исток-стоков;
- Исследование и анализ характеристик короткоканальных эффектов в субмикронных КМОП транзисторах
- Исследование и анализ характеристик и параметров процесса миниатюризации FinFET транзисторов на объемном кремнии;
- Исследование и анализ характеристик и параметров процесса миниатюризации FinFET транзисторов на КНИ структурах;
- Исследование и анализ основные технологические способы подавления паразитных эффектов в субмикронных КМОПТ;

5. Перечень вопросов к защите курсового проекта (работы).

- Основные состояния полупроводникового прибора и его фундаментальная система уравнений
- КМОП-технологии. Закон Мура и три современных пути развития КМОП-технологии;
- Процесс миниатюризации и его влияние на параметры КМОПТ. Компромиссы миниатюризации
- Правила Деннарта и скейлинг параметров. Физические пределы миниатюризации.
- Основные физические процессы в каналах КМОПТ: защелкивание, насыщение дрейфовой скорости, подпороговые характеристики, влияние поверхностных состояний на процесс переноса, смыкание, влияние на ВАХ модуляции длины канала и последовательных сопротивлений стока и истока.
- Короткоканальные эффекты: зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала, DIBL-эффект Входные-выходные ВАХ БТ
- Эффекты сильных полей: разогрев носителей, ударная ионизация, ток в подложку, биполярный эффект
- 3D-технологии: FinFET
- КМОП-транзисторы на структурах КНИ