

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Галунин Сергей Александрович  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 10.07.2023 15:46:04  
Уникальный программный ключ:  
08ef34338325bdb0ac5a47baa5472ce36cc3fc3b

Приложение к ОПОП  
«Квантовая и оптическая электроника»



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»**  
**(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

---

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

ДИСЦИПЛИНЫ

**«ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

для подготовки бакалавров

по направлению

11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

по профилю

**«Квантовая и оптическая электроника»**

Санкт-Петербург

2022

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Разработчики:

доцент, к.т.н., старший научный сотрудник Иванов Б.В.

доцент, к.т.н. Райская Е.К.

профессор, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лебедев А.А.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры МВЭ

10.03.2022, протокол № 2

Рабочая программа рассмотрена и одобрена учебно-методической комиссией

ФЭЛ, 24.03.2022, протокол № 01/22

Согласовано в ИС ИОТ

Начальник ОМОЛА Загороднюк О.В.

## 1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Обеспечивающий факультет	ФЭЛ
Обеспечивающая кафедра	ОЭ
Общая трудоемкость (ЗЕТ)	5
Курс	3
Семестр	6
<b>Виды занятий</b>	
Лекции (академ. часов)	34
Лабораторные занятия (академ. часов)	17
Практические занятия (академ. часов)	34
Иная контактная работа (академ. часов)	3
Все контактные часы (академ. часов)	88
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	92
Всего (академ. часов)	180
<b>Вид промежуточной аттестации</b>	
Экзамен (курс)	3
Курсовая работа (курс)	3

## **2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

Основная цель изучения дисциплины «Твердотельная электроника» - формирование фундаментальных знаний о принципах функционирования приборов и устройств твердотельной электроники, а также областей их применения. Дисциплина предполагает изучение физико-технических основ твердотельной электроники, составляющих ее научный базис и определяющих с единых позиций принципы действия широкого класса приборов и устройств твердотельной электроники, а также формирование навыков по проведению измерений, наблюдений и экспериментального исследования характеристик твердотельных приборов, анализу, систематизации и обобщению экспериментальных данных.

### **SUBJECT SUMMARY**

#### **«SOLID STATE ELECTRONICS»**

Main objective of studying of discipline «Solid-state electronics» -formation of fundamental knowledge of principles of functioning of solid-state electronics devices, and also areas of their application. The discipline assumes studying of physico-technical bases of the solid-state electronics making its scientific basis and defining from uniform positions principles of action of a wide class devices of solid-state electronics, and also formation of skills of measurements and an experimental research of solid-state devices characteristics, the analysis of experimental data.

## 3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 3.1 Цели и задачи дисциплины

1. Цели дисциплины: изучение основ физики полупроводниковых приборов, принципов их действия, формирование умений применения методов расчета и проектирования, а также навыков экспериментального исследования компонентной базы твердотельной электроники (биполярных, униполярных, оптоэлектронных приборов).

2. Задачи дисциплины включают:

-получение базовых знаний в области физических принципов работы компонентов и устройств твердотельной электроники и тенденций их развития;

-формирование умений расчета электрических и конструктивных параметров изучаемых устройств твердотельной электроники, моделирования их основных характеристик;

-формирование навыков экспериментального исследования современной компонентной базы твердотельной электроники.

3. Знания основ физики полупроводников, принципов использования физических эффектов в твердом теле в приборах и устройствах твердотельной электроники, вариантов их конструкции, параметров, характеристик и методов их моделирования

4. Умения:

-обеспечивать технологическую и конструктивную реализацию материалов и элементов в приборах и устройствах электроники и нанoeлектроники;

-применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования приборов и устройств твердотельной электроники.

5. Навыки владения методами экспериментальных исследований параметров и характеристик материалов, приборов и устройств твердотельной электроники

и наноэлектроники, современными программными средствами их моделирования.

### **3.2 Место дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина изучается на основе ранее освоенных дисциплин учебного плана:

1. «Учебная практика (ознакомительная практика)»
2. «Материалы электронной техники»
3. «Квантовая механика и статистическая физика»
4. «Методы математической физики»
5. «Оптоэлектроника (специальная технология)»
6. «Статистическая физика»
7. «Физика твердого тела»
8. «Физико-химические основы технологии изделий электроники и наноэлектроники»
9. «Электродинамика»

и обеспечивает изучение последующих дисциплин:

1. «Микро-и наноэлектроника»
2. «Основы проектирования электронной компонентной базы»
3. «Основы фотоники»
4. «Производственная практика (производственно-технологическая практика)»
5. «Оптоэлектроника (специальная диагностика)»
6. «Производственная практика (преддипломная практика)»
7. «Технология приборов оптоэлектроники»

### 3.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате освоения образовательной программы обучающийся должен достичь следующие результаты обучения по дисциплине:

<b>Код компетенции/ индикатора компетенции</b>	<b>Наименование компетенции/индикатора компетенции</b>
ПК-1	Способен 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
<i>ПК-1.1</i>	<i>Умеет строить физические и математические модели моделей, узлов, блоков</i>
<i>ПК-1.2</i>	<i>Владеет навыками компьютерного моделирования</i>
ПК-3	Способен выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования
<i>ПК-3.1</i>	<i>Знает принципы конструирования отдельных аналоговых блоков электронных приборов</i>
<i>ПК-3.2</i>	<i>Умеет проводить оценочные расчеты характеристик электронных приборов</i>
<i>ПК-3.3</i>	<i>Владеет навыками подготовки принципиальных и монтажных электрических схем</i>

## 4 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1 Содержание разделов дисциплины

#### 4.1.1 Наименование тем и часы на все виды нагрузки

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Лек, ач	Пр, ач	Лаб, ач	ИКР, ач	СР, ач
1	Тема 1. Теоретические основы твердотельной электроники	5	5			12
2	Тема 2. Контактные явления и структурные неоднородности в полупроводниках	4	4	2		12
3	Тема 3. Биполярные полупроводниковые приборы	8	8	6		22
4	Тема 4. Униполярные (полевые) полупроводниковые приборы	8	8	6		21
5	Тема 5. Оптоэлектронные приборы	5	5	3		15
6	Тема 6. Полупроводниковые преобразователи и сенсорные устройства	4	4			10
7	Заключение	0			3	
	Итого, ач	34	34	17	3	92
	Из них ач на контроль	0	0	0	0	35
	Общая трудоемкость освоения, ач/зе	180/5				

#### 4.1.2 Содержание

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
1	Тема 1. Теоретические основы твердотельной электроники	Энергетическая зонная диаграмма полупроводников. Основные уравнения, управляющие поведением носителей заряда в твердом теле. Характерные пространственные и временные интервалы: время релаксации импульса и энергии, время максвелловской релаксации и длина Дебая, время жизни и диффузионная длина. Неравновесная проводимость полупроводников. Квазинейтральность. Диффузионно-дрейфовая модель полупроводника. Процессы генерации и рекомбинация носителей заряда в полупроводнике. Поверхностные заряды и “эффект поля



№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
2	Тема 2. Контактные явления и структурные неоднородности в полупроводниках	<p>Методы формирования и классификация электронно-дырочных переходов. Равновесное и неравновесное состояния. Инжекция и экстракция. Граничная концентрация носителей заряда.</p> <p>Омические и выпрямляющие контакты металл-полупроводник. Гетеропереходы. Квантовые ямы и сверхрешетки. Энергетические диаграммы</p>
3	Тема 3. Биполярные полупроводниковые приборы	<p>Полупроводниковые диоды. Разновидности полупроводниковых диодов. Вольтамперные характеристики идеализированного и реального диодов. Пробой. Барьерная и диффузионная емкости. Частотные и импульсные свойства. Высокий и низкий уровень инжекции. Диоды Шотки.</p> <p>Биполярные транзисторы. Принцип действия и режимы работы, схемы включения. Статические характеристики. Физические параметры и эквивалентные схемы транзистора для больших и малых сигналов. Частотные свойства. Пробой транзисторов. Биполярные гетеротранзисторы. Транзисторы Шотки. Тиристоры. Структура, принцип действия и вольтамперная характеристика тиристора. Параметры тиристора. Двухтранзисторная модель. Способы включения и выключения тиристоры. Разновидности и области применения тиристоры.</p>
4	Тема 4. Униполярные (полевые) полупроводниковые приборы	<p>Разновидности полевых транзисторов. Структура, принцип действия, параметры и характеристики МДП-транзисторов, полевых транзисторов с управляющим переходом и полевых транзисторов с затвором Шотки. Гетеропереходные полевые транзисторы. Приборы с зарядовой связью. Энергонезависимые элементы памяти на МДП-транзисторах. Гибридные приборы – IGBT, SIT</p>
5	Тема 5. Оптоэлектронные приборы	<p>Полупроводниковые излучающие приборы: светоизлучающие и инфракрасные излучающие диоды, полупроводниковые лазеры. Принцип действия, основные характеристики и параметры этих приборов. Полупроводниковые приемники излучения: фоторезисторы, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы. Полупроводниковые оптопары</p>
6	Тема 6. Полупроводниковые преобразователи и сенсорные устройства	<p>Термисторы и позисторы. Болометры. Термоэлектрические полупроводниковые преобразователи. Полупроводниковые гальваномагнитные приборы: преобразователи Холла, магниторезисторы, магнитодиоды и магнитотранзисторы. Тензорезисторы. Сенсорные устройства</p>
7	Заключение	<p>Краткий обзор курса. Ознакомление с контрольными вопросами</p>

## 4.2 Перечень лабораторных работ

Наименование лабораторной работы	Количество ауд. часов
1. Исследование выпрямительного диода	2
2. Исследование стабилитрона	2
3. Исследование туннельного диода	2
4. Исследование биполярного транзистора	3
5. Исследование тиристора	2
6. Исследование полевого транзистора с управляющим р-п-переходом	2
7. Исследование МДП-транзистора	2
8. Исследование IGBT	2
Итого	17

## 4.3 Перечень практических занятий

Наименование практических занятий	Количество ауд. часов
1. Концентрация носителей заряда и проводимость полупроводника	2
2. обеднение и обогащение в полупроводнике. Инжекция и экстракция	3
3. Диффузионные и дрейфовые токи в полупроводнике. Закон полного тока	2
4. Контактная разность потенциалов в резком и плавном р-п переходах. Барьерная емкость резкого и плавного р-п переходов	3
5. Зонные диаграммы контакта металл-полупроводник, р-п-перехода, гетероперехода	3
6. Расчет токов в контакте металл-полупроводник	3
7. Напряжение пробоя полупроводникового диода. Влияние температуры на параметры и характеристики диода	3
8. Расчет параметров биполярного транзистора для малых и больших уровней сигнала. Схема замещения для больших уровней сигнала	3
9. Расчет параметров и характеристик полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом	3
10. Расчет параметров и характеристик полевых транзисторов с изолированным затвором	3
11. Расчет параметров и характеристик полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов	3
12. Расчет спектральной характеристики р-і-п-фотодиода	3
Итого	34

#### 4.4 Курсовое проектирование

Цель работы (проекта): Исследование характеристик активных элементов твердотельной электроники.

Содержание работы (проекта): Теоретически и экспериментально исследуются характеристики активных элементов твердотельной электроники. Анализируется влияние геометрических и электрических параметров на эти характеристики.

Общие требования к оформлению курсовой работы изложены в ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ. Структура и правила оформления.

Отчет должен содержать не менее трех литературных источников, объем не менее 20 страниц, передается в электронном виде на проверку преподавателю и в бумажном, подписанном виде на защиту.

Темы:

№ п/п	Название темы	Перевод темы
1	Расчет параметров активных элементов твердотельной электроники (Calculation of solid-state electronic devices parameters)	

#### 4.5 Реферат

Реферат не предусмотрен.

#### 4.6 Индивидуальное домашнее задание

Темы ИДЗ

1. Рассчитать дисперсионную характеристику одномерного кристалла по заданным параметрам
2. Рассчитать концентрацию носителей заряда в легированном полупроводнике

по заданным параметрам примеси

3. Рассчитать ВАХ диода Шоттки по заданным параметрам

5. Рассчитать напряжение пробоя рп-перехода по заданным параметрам легирования

6. Рассчитать характеристики ПТУП по заданным параметрам

7. Рассчитать характеристики МДП- транзистора с индуцированным каналом по заданным параметрам

8. Рассчитать характеристики НЕМТ- транзистора по заданным параметрам

9. Рассчитать спектральную характеристику рп-фотодиода по заданным параметрам

Отчетный документ не требуется. Ответ отправляется на электронную почту преподавателя.

#### **4.7 Доклад**

Доклад не предусмотрен.

#### **4.8 Кейс**

Кейс не предусмотрен.

#### **4.9 Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы**

Изучение дисциплины сопровождается самостоятельной работой студентов с рекомендованными преподавателем литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет.

Планирование времени для изучения дисциплины осуществляется на весь период обучения, предусматривая при этом регулярное повторение пройденно-

го материала. Обучающимся в рамках внеаудиторной самостоятельной работы необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников материал, законспектированный на лекциях. При этом на основе изучения рекомендованной литературы целесообразно составить конспект основных положений, терминов и определений, необходимых для освоения разделов учебной дисциплины.

Особое место уделяется консультированию как одной из форм обучения и контроля самостоятельной работы. Консультирование предполагает особым образом организованное взаимодействие между преподавателем и студентами, при этом предполагается, что консультант либо знает готовое решение, которое он может предписать консультируемому, либо он владеет способами деятельности, которые указывают путь решения проблемы.

<b>Текущая СРС</b>	<b>Примерная трудоемкость, ач</b>
Работа с лекционным материалом, с учебной литературой	6
Опережающая самостоятельная работа (изучение нового материала до его изложения на занятиях)	0
Самостоятельное изучение разделов дисциплины	2
Выполнение домашних заданий, домашних контрольных работ	9
Подготовка к лабораторным работам, к практическим и семинарским занятиям	3
Подготовка к контрольным работам, коллоквиумам	2
Выполнение расчетно-графических работ	0
Выполнение курсового проекта или курсовой работы	35
Поиск, изучение и презентация информации по заданной проблеме, анализ научных публикаций по заданной теме	0
Работа над междисциплинарным проектом	0
Анализ данных по заданной теме, выполнение расчетов, составление схем и моделей, на основе собранных данных	0
Подготовка к зачету, дифференцированному зачету, экзамену	35
<b>ИТОГО СРС</b>	<b>92</b>

## 5 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

### 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

№ п/п	Название, библиографическое описание	К-во экз. в библ.
Основная литература		
1	Пасынков, Владимир Васильевич. Полупроводниковые приборы [Текст] : Учеб. для вузов / В.В.Пасынков, Л.К.Чиркин, 2001. -479 с.	552
2	Лебедев, Александр Иванович. Физика полупроводниковых приборов [Текст] : учеб. пособие для вузов по специальностям 010701-Физика, 010704-Физика конденсированного состояния вещества”, 010803-”Микроэлектроника и полупроводниковые приборы” / А.И. Лебедев, 2008. -487 с.	52
Дополнительная литература		
1	Иванов, Борис Викторович. Исследование полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Б. В. Иванов, А. Е. Синев, А. Д. Тупицын, 2019. -1 эл. опт. диск (CD-ROM)	неогр.
2	Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов [Текст] : в 2 кн. Кн. 1, 1984. -455 с.	108
3	Гуртов, Валерий Алексеевич. Твердотельная электроника [Текст] : учеб. пособие для вузов по направлению подгот. бакалавров, магистров 010700 ”Физика” и специальности 010701 ”Физика” / В.А. Гуртов, 2008. -511 с.	48
4	Моделирование биполярного транзистора при проектировании электронных схем [Текст] : метод. указ. к выполнению курсовой работы по дисциплине ”Твердотельная электроника” / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) ”ЛЭТИ”, 2006. -32 с.	97
5	Иванов, Борис Викторович. Применение характеристики графа для исследования вакуумных и твердотельных приборов [Текст] : учеб. пособие / Б. В. Иванов, А. Д. Тупицын, А. К. Шануренко, 2022. -97, [1] с.	50
6	Шур, Михаил. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. [Текст]. Кн. 2 / Ю.Д.Биленко, В.Л.Видро, 1992. -295 с	14
7	Зятыков, Игорь Иванович. Твердотельная электроника в вопросах и задачах [Текст] : учеб. пособие / И.И. Зятыков, О.А. Изумрудов, В.А. Миронов, 2007. -58 с.	127
8	Физические основы электроники [Текст] : лаб. практикум / [Б.Л. Антипов [и др.]], 2007. -87 с.	930
9	Расчет параметров активных элементов твердотельной электроники [Текст] : метод. указания по курсовому проектированию / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) ”ЛЭТИ”, 2006. -60 с.	104

№ п/п	Название, библиографическое описание	К-во экз. в библ.
10	Чиркин, Лев Константинович. Физические основы микроэлектроники [Текст] : Учеб. пособие / Л.К.Чиркин, А.П.Андреев, Н.А.Ганенков, 2001. -120 с.	921
11	Изумрудов, Олег Алексеевич. Твердотельная электроника [Текст] : конспект лекций / О. А. Изумрудов, Е. К. Райская, 2016. -63 с.	50

## 5.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины

№ п/п	Электронный адрес
1	Электронный курс <a href="https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=9260">https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=9260</a>
2	Электронные компоненты и радиодетали <a href="http://www.chipinfo.ru">http://www.chipinfo.ru</a>
3	Библиотека полупроводниковых материалов ФТИ им.А.Ф.Иоффе <a href="http://www.matpro.ru">http://www.matpro.ru</a>
4	Нанометр: нанотехнологическое сообщество <a href="http://www.nanometr.ru">www.nanometr.ru</a>
5	ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ. Структура и правила оформления <a href="https://cs.msu.ru/sites/cmc/files/docs/2021-11gost_7.32-2017.pdf">https://cs.msu.ru/sites/cmc/files/docs/2021-11gost_7.32-2017.pdf</a>

## 5.3 Адрес сайта курса

Адрес сайта курса: <https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=12659>

## 6 Критерии оценивания и оценочные материалы

### 6.1 Критерии оценивания

Для дисциплины «Твердотельная электроника» предусмотрены следующие формы промежуточной аттестации: экзамен.

#### Экзамен

<b>Оценка</b>	<b>Описание</b>
Неудовлетворительно	Курс не освоен. Студент испытывает серьезные трудности при ответе на ключевые вопросы дисциплины
Удовлетворительно	Студент в целом овладел курсом, но некоторые разделы освоены на уровне определений и формулировок
Хорошо	Студент овладел курсом, но в отдельных вопросах испытывает затруднения. Умеет решать задачи
Отлично	Студент демонстрирует полное овладение курсом, способен применять полученные знания при решении конкретных задач.



## Особенности допуска

Для допуска к экзамену необходимо: выполнить и защитить курсовую работу; выполнить и защитить все лабораторные работы; сдать контрольные работы; выполнить все ИДЗ

## 6.2 Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

### Вопросы к экзамену

№ п/п	Описание
1	Модель Кронига-Пенни для кристаллов. Запрещенная зона. Эффективная масса электрона в кристалле. Зона Бриллюэна. Тензор эффективной массы. Заполнение зон. Деление твердых тел на Ме, полупроводники и диэлектрики. Электронный ток в кристаллах. Понятие "дырка"
2	Функция распределения в статистике Ферми-Дирака. Функция плотности состояний. Эффективная масса плотности состояний. Вырожденный и невырожденный полупроводник. Граница вырождения. Закон действующих масс. Собственная концентрация как параметр материала. Зависимость от температуры
3	Примесные полупроводники. Водородоподобная модель. Энергия активации. Решение уравнения электронейтральности для невырожденного полупроводника
4	Компенсация примесей. Температура перехода к собственной концентрации. Температура истощения примеси. Сильное легирование полупроводника. Примесная зона и эффект сужения запрещенной зоны.
5	Дрейф свободных носителей заряда в электрическом поле. Время релаксации импульса. Подвижность свободных носителей заряда. Рассеяние на примесях и фононах. Зависимость подвижности от температуры. Подвижность в сильных электрических полях. Аппроксимации зависимости подвижности от электрического поля, концентрации примеси и подвижных носителей.
6	Диффузия электронов и дырок. Соотношение Эйнштейна. Методы измерения концентрации и подвижности в полупроводниках. Уравнения диффузионно-дрейфовой модели процессов в полупроводнике.
7	Генерация и рекомбинация. Типы рекомбинации. Рекомбинация и генерация Шокли-Рида-Холла через локальные центры. Межзонная Оже рекомбинация. Поверхностная рекомбинация.
8	Виды поглощения света в полупроводнике. Правило к-отбора. Квантовый выход. Эффект Франца-Келдыша.
9	Генерация электронно-дырочных пар ускоренными электронами. Лавинная генерация электронно-дырочных пар. Определение коэффициентов лавинной генерации.
10	Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда. Длина Дебая и максвелловское время релаксации зарядовой неоднородности при монополярной инжекции. Биполярные диффузия и дрейф. Диффузионная длина.

11	Решение задач для стационарного и нестационарного случаев облучения светом локальной области полупроводника. Приближение квазинейтральности при анализе процессов токопрохождения в неоднородно легированном полупроводнике.
12	Эффект Ганна. Принцип действия диода Ганна.
13	Контактные явления. Работа выхода. Энергия электронного сродства для полупроводника. Поверхностные состояния. Зонная диаграмма для п-и р-полупроводника при наличии поверхностных состояний.
14	Связь поверхностного заряда и потенциала. Режим обогащения, обеднения, инверсии. Зонные диаграммы. Условие сильной инверсии.
15	Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Контактная разность потенциалов. Барьерная емкость.
16	Уравнение для тока диода Шоттки. Влияние на ВАХ границы раздела, уровня легирования и неосновных носителей.
17	Управление высотой барьера в диодах Шоттки. Омический контакт. Два типа омических контактов. Зонные диаграммы. Основные параметры контакта.
18	Методы измерения высоты барьера Шоттки: метод ВАХ, ВФХ, метод энергии активации, фотоэлектрический метод.
19	Контактная разность потенциалов в р-п-переходе. Образование обедненной области. Концентрации неосновных носителей на границе квазинейтральной области. Распределение напряженности электрического поля, потенциала, и зарядов в резком
20	Методы формирования р-п переходов: сплавные, меза, планарные, ионно-легированные. Прокол базы диода. Приближение линейного перехода. Барьерная емкость.
21	ВАХ идеального диода. Ток насыщения. Приближение тонкой и толстой базы. Характеристика реального диода, ее отличие от идеальной ВАХ.
22	Накопление заряда и переходные процессы в диоде. Диффузионная емкость. Сравнение барьерной и диффузионной емкостей. Эквивалентная схема диода. Сравнение токов насыщения диода Шоттки и р-п перехода.
23	Виды пробоя р-п перехода. Характерные признаки туннельного пробоя. Лавинный пробой. Виды обратных ветвей ВАХ при лавинном пробое для разных уровней легирования базы. Оценки напряжения лавинного пробоя по Екр и интегралу пробоя.
24	Влияние краевых эффектов на напряжение лавинного пробоя. Пробой в цилиндрическом переходе. Методы повышения напряжения лавинного пробоя диодов.
25	Тепловой пробой. Баланс выделяемой и рассеиваемой мощности в диоде. Шнурование тока при тепловом пробое.
26	Особенности зонной диаграммы р-п гетероперехода. Контактная разность потенциалов. Ширина обедненной области. Барьерная емкость. Коэффициент инжекции N-р перехода. Изотипный ГП. Сверхрешетка с селективным легированием.
27	Квантово-размерные эффекты. Плотность состояний 2Д-газа. Варизонная структура. Сверхрешетка. Модуляционное легирование.
28	Диоды, обозначения. Основные параметры диодов. Особенности и характеристики выпрямительных плоскостных полупроводниковых диодов. Последовательное и параллельное соединение диодов. Диодный мост.
29	Особенности детекторных высокочастотных диодов. Диоды с мезаструктурой, точечные диоды и диоды с барьером Шоттки. Принцип детектирования.
30	Принцип действия и параметры варикапов. Принцип действия и основные характеристики стабилитронов.

31	Принцип действия и характеристики туннельных диодов. Работа туннельного диода в усилительном режиме. Обращенные диоды.
32	Основные параметры р-і-п-диода. Принцип действия: диода с быстрым восстановлением, дрейфового диода с резким восстановлением, диодного лавинного обострителя
33	Принцип действия биполярного транзистора. Структура планарного транзистора. Основное уравнение транзистора. Число Гуммеля. Режимы работы транзистора. Размеры коллектора, обеспечивающие оптимальную мощность и частоту.
34	Распределение токов в транзисторе. Коэффициент переноса неосновных носителей через базу и эффективность эмиттера. Влияние эффектов сильного легирования на эффективность эмиттера. Коэффициент передачи по току для схемы с ОЭ и ОБ.
35	Эффект Эрли. Эффекты рекомбинации при малых и больших токах коллектора. Эффект Кирка. Влияние объемного сопротивления базы на эффективность эмиттера.
36	Три схемы включения БТ. Статические характеристики БТ в схеме с ОБ и ОЭ. Малосигнальная модель БТ. Частотные свойства БТ.
37	Модель Гуммеля-Пуна для машинного моделирования биполярного транзистора.
38	Особенности БТ с гетеропереходом
39	ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п-переходом. Ток насыщения. Входная характеристика. Нормально-открытый и нормально-закрытый транзисторы.
40	Малосигнальная модель ПТУП. ПТУП с триодными характеристиками. ПТ с барьером Шоттки. Частотные свойства.
41	HEMT-транзистор. Особенности плотности состояний в 2D-газе, модуляционное легирование. Выходные характеристики и параметры.
42	Транзистор с изолированным затвором. МОП-структура. Инверсная проводимость. Условие сильной инверсии. Уравнение тока стока МОП-транзистора. Управление пороговым напряжением.
43	Малосигнальные параметры МДП-транзистора. Быстродействие МДП-транзистора. Мощные МДП-транзисторы с двойной диффузией и с V-канавкой.
44	МОП-структура. Устройства динамической памяти на МОП-и КМОП-структурах. Принцип действия устройств статической памяти и ПЗС.
45	Тиристор. Принцип действия. Уравнение ВАХ тиристора. Шунтирование перехода. Методы включения и выключения тиристора. Включение током управления. Распространение включенного состояния.
46	Распространение включенного состояния в мощных тиристорах. Устойчивость $dU/dt$ и $dI/dt$ . Комбинированное управление в тиристорах. SIT и IGBT мощные ключи. Принцип фазового управления.
47	Приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Характеристики N-и S-типа. Образование ОДС в приборах на пролетных эффектах. Принцип действия и основные характеристики лавинно-пролетных (ЛПД)
48	Приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Характеристики N-и S-типа. Образование ОДС в приборах на пролетных эффектах. Принцип действия и основные характеристики инжекционно-пролетных (ИПД) диодов.
49	Излучательная рекомбинация. Люминесценция. Виды люминесценции в полупроводниках. Условие инверсии и усиления излучения. Связь между оптическим поглощением и люминесценцией.

50	Свойства гетеропереходов, повышающие эффективность оптоэлектронных приборов. СИД, его параметры: эффективность, спектр излучения и яркость. Белые светодиоды.
51	Свойства гетеропереходов, повышающие эффективность оптоэлектронных приборов. ДГС лазер. Пороговый ток, зависимость спектра от прямого тока. Вертикальноизлучающий лазер.
52	Фотоприемник на основе р-і-п диода, фотовольтаический эффект. Основные параметры. Фотоприемники с внутренним усилением (ЛФД, фототранзистор)
53	Виды шумов в полупроводниковых приборах. Коэффициент шума. Учет влияния шумов в эквивалентных схемах диода и биполярного транзистора. Влияние параметров транзистора на коэффициент шума.

### Форма билета

Министерство образования и науки Российской Федерации  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
 «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ №1

Дисциплина: Твердотельная электроника ФЭЛ

1. ВАХ идеального диода. Ток насыщения. Приближение тонкой и толстой базы. Характеристика реального диода, ее отличие от идеальной ВАХ
2. Фотоприемник на основе р-і-п диода. Фотовольтаический эффект. Фотоприемники с внутренним усилением (ЛФД, фототранзистор).

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Холодняк Д.И.

### Образцы задач (заданий) для контрольных (проверочных) работ

#### Пример контрольной работы

1. Определить концентрацию электронов и дырок в Ge полупроводнике, в котором уровень Ферми превышает средний уровень  $E_i$  на 0.1 эВ, ес-

ли известно, что при условии совпадения уровней концентрация электронов равна  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_i = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

2. Определить концентрацию примеси и ее тип в примесном полупроводнике с проводимостью, равной собственной проводимости Si, если  $\mu_n/\mu_p = 2$ ,  $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

3. Какую область в легированном Si полупроводнике создаст поверхностный заряд величиной  $Q/q$ . Определить  $\phi_0$ . Построить зонную диаграмму, распределение заряда и напряженности электрического поля.  $Q/q = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;  $N_a = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

**Примерные вопросы для контрольных работ на практических занятиях:**

- 1. Определить концентрацию электронов и дырок в Ge п/п, в котором уровень Ферми превышает средний уровень  $E_i$  на 0.1 эВ, если известно, что при условии совпадения уровней концентрация электронов равна  $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_i = 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

- 2. Определить концентрацию примеси и ее тип в примесном п/п с проводимостью, равной собственной проводимости si, если  $m_n/m_p = 2$ ,  $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

- 3. Какую область в легированном Si полупроводнике создаст поверхностный заряд величиной  $Q/q$ . Определить  $\phi_0$ . Построить зонную диаграмму, распределение заряда и напряженности электрического поля.  $Q/q = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;  $N_d, \text{ см}^{-3} = 0$ ;  $N_a, \text{ см}^{-3} = 10^{13}$ .

3.3. Примерные домашние задачи на практических занятиях:

Найти значение минимума энергии для первой разрешенной зоны

6201 студент ДюсекеевЕМ задача1  $A = 5 \text{ анг}$   $B = 2 \text{ анг}$   $U_0 = 10 \text{ эВ}$

Весь комплект контрольно-измерительных материалов для проверки сформированности компетенции (индикатора компетенции) размещен в закрытой части по адресу, указанному в п. 5.3

### 6.3 График текущего контроля успеваемости

Неделя	Темы занятий	Вид контроля
1	Тема 1. Теоретические основы твердотельной электроники	
2	Тема 1. Теоретические основы твердотельной электроники	Отчет по лаб. работе
3	Тема 1. Теоретические основы твердотельной электроники	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
4	Тема 2. Контактные явления и структурные неоднородности в полупроводниках	Отчет по лаб. работе
5	Тема 2. Контактные явления и структурные неоднородности в полупроводниках	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
6	Тема 3. Биполярные полупроводниковые приборы	Отчет по лаб. работе
7	Тема 3. Биполярные полупроводниковые приборы	Контрольная работа
8	Тема 3. Биполярные полупроводниковые приборы	Отчет по лаб. работе
9	Тема 3. Биполярные полупроводниковые приборы	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
10	Тема 3. Биполярные полупроводниковые приборы	Отчет по лаб. работе
11	Тема 4. Униполярные (полевые) полупроводниковые приборы	
12	Тема 4. Униполярные (полевые) полупроводниковые приборы	Отчет по лаб. работе
13	Тема 4. Униполярные (полевые) полупроводниковые приборы	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
14	Тема 5. Оптоэлектронные приборы	
15	Тема 5. Оптоэлектронные приборы	ИДЗ / ИДРГЗ / ИДРЗ
16	Тема 5. Оптоэлектронные приборы	Отчет по лаб. работе
17	Тема 6. Полупроводниковые преобразователи и сенсорные устройства	Защита КР / КП

### 6.4 Методика текущего контроля

#### 1. Методика текущего контроля на лекционных занятиях.

1.1. Текущий контроль включает в себя:

- контроль посещаемости (не менее 80% занятий),

#### 2. Методика текущего контроля на лабораторных занятиях.

2.1. Порядок выполнения лабораторных работ, подготовки отчетов и их защиты.

В процессе обучения по дисциплине студент обязан выполнить 8 лабораторных работ. Под выполнением лабораторных работ подразумевается подготовка к работе, проведение экспериментальных исследований, подготовка от-

чета и его защита на коллоквиуме. Выполнение лабораторных работ студентами осуществляется в бригадах до 2-3 человека. Оформление отчета студентами осуществляется индивидуально в соответствии с принятыми в СПбГЭТУ правилами оформления студенческих работ. Отчет оформляется после выполнения экспериментальных исследований и представляется преподавателю на проверку. После проверки отчет либо возвращается (при наличии замечаний) на доработку, либо подписывается к защите.

Лабораторные работы защищаются студентами индивидуально. Каждый студент получает вопрос по теоретической части, или по процедуре проведения экспериментальных исследований, или по последующей обработке результатов, после чего ему предоставляется время для подготовки ответа. При обсуждении ответа преподаватель может задать несколько уточняющих вопросов. В случае если студент демонстрирует достаточное знание вопроса, работа считается защищенной.

На защите лабораторной работы студент должен показать: понимание методики исследования и знание особенностей её применения, понимание и умение объяснять особенности применяемых методов, возможные области их применения и т.д., умение давать качественную и количественную оценку полученных экспериментальных результатов и прогнозировать реакции исследуемого объекта на различные воздействия, навыки и умения, приобретенные при выполнении лабораторной работы.

Примеры контрольных вопросов приведены в методических указаниях по выполнению лабораторных работ.

2.2. Текущий контроль включает в себя:

- выполнение и сдачу в срок отчетов по всем лабораторным работам;
- защиту на коллоквиуме всех лабораторных работ, оценка за которые по четырехбалльной шкале выставляется по следующим критериям:



- «отлично» - на заданные вопросы даны исчерпывающие ответы
- «хорошо» - вопросы раскрыты не полностью
- «удовлетворительно» - ответы в принципе правильны, но в формулировках имеются существенные ошибки
- «неудовлетворительно» - отсутствуют ответы на вопросы или содержание ответа не совпадает с поставленным вопросом

### **3. Методика текущего контроля на практических (семинарских) занятиях**

3.1. Текущий контроль включает в себя:

- контроль посещаемости (не менее 80% занятий)
- выполнение контрольной, оценка за которую по четырехбалльной шкале выставляется по следующим критериям:
  - «отлично» - вопрос раскрыт полностью, задача решена правильно
  - «хорошо» - вопрос раскрыт не полностью, задача решена частично
  - «удовлетворительно» - в ответе на вопрос имеются существенные ошибки; задача не решена или решена неправильно, ход решения правильный
  - «неудовлетворительно» - отсутствует ответ на вопрос или содержание ответа не совпадает с поставленным вопросом, задача не решена, ход решения неправильный
- выполнение 9 индивидуальных домашних задач. Задача считается решенной при соответствии ответа эталонному.

3.4. В ходе проведения семинарских и практических занятий целесообразно привлечение студентов к как можно более активному участию в дискуссиях, решении задач, обсуждениях и т. д. При этом активность студентов также может учитываться преподавателем, как один из способов текущего контроля на практических занятиях.

#### **4. Методика текущего контроля самостоятельной работы студентов.**

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется на лекционных, лабораторных и практических занятиях студентов по методикам, описанным в п.п. 1-3.

#### **5. Методика текущего контроля при выполнении курсового проекта (работы)**

Текущий контроль при выполнении курсового проекта (работы) осуществляется в соответствии с методическими указаниями по курсовому проектированию и заданием на курсовой проект (работу).

Оформление пояснительной записки на курсовой проект (работу) выполняется в соответствии с требованиями к студенческим работам, принятым в СПбГЭТУ.

Защита курсового проекта (работы) осуществляется в соответствии с требованиями «Положения о промежуточной аттестации».

Оценка за курсовой проект (работу) по четырехбалльной шкале выставляется по следующим критериям:

- «отлично» - вопрос раскрыт полностью, задача работы решена правильно
- «хорошо» - вопрос раскрыт не полностью, задача работы решена частично
- «удовлетворительно» - в ответе на вопрос имеются существенные ошибки; задача работы не решена или решена неправильно, ход решения правильный
- «неудовлетворительно» - отсутствует ответ на вопрос или содержание ответа не совпадает с поставленным вопросом, задача работы не решена, ход решения неправильный

## 7 Описание информационных технологий и материально-технической базы

Тип занятий	Тип помещения	Требования к помещению	Требования к программному обеспечению
Лекция	Лекционная аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, ПК, проектор, экран, меловая или маркерная доска	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше
Лабораторные работы	Лаборатория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, лабораторный стенд для изучения полупроводниковых приборов	
Практические занятия	Аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, меловая или маркерная доска	
Самостоятельная работа	Помещение для самостоятельной работы	Оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше

## **8 Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ**

Адаптированная программа разрабатывается при наличии заявления со стороны обучающегося (родителей, законных представителей) и медицинских показаний (рекомендациями психолого-медико-педагогической комиссии). Для инвалидов адаптированная образовательная программа разрабатывается в соответствии с индивидуальной программой реабилитации.

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

<b>№ п/п</b>	<b>Дата</b>	<b>Изменение</b>	<b>Дата и номер протокола заседания УМК</b>	<b>Автор</b>	<b>Начальник ОМОЛА</b>