

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФРТЭ  В.А. Небольсин

«29» июня 2018 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины

«Физические основы применения полупроводниковых
соединений и гетероструктур на их основе»

Направление подготовки 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Профиль "Нано- и микросистемная техника"

Квалификация выпускника магистр

Нормативный период обучения 2 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2018

Автор программы  /Коротков Л.Н./

Заведующий кафедрой
физики твердого тела  /Калинин Ю.Е./

Руководитель ОПОП  /Калгин А.В./

Воронеж 2018

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины заключается в формировании у студентов знаний физических основ применения гетероструктур на основе полупроводников для СВЧ - и оптоэлектронных устройств электронной техники.

1.2. Задачи освоения дисциплины

1. Усвоение физических принципов и топологических основ оптоэлектронных и СВЧ гетероструктур на основе сложных полупроводников.
2. Формирование у студентов представлений о физико-химических основах и технологии получения сложных полупроводниковых материалов и гетероструктур.
3. Ознакомление студентов с видами перспективных полупроводниковых гетеро- и наноструктур и освоение основ проектирования интегральных гетероструктур на основе сложных полупроводников.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Физические основы применения полупроводниковых соединений и гетероструктур на их основе» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Физические основы применения полупроводниковых соединений и гетероструктур на их основе» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-1 - Способен участвовать в разработке топологии интегральных схем, знаком с топологическими принципами построения интегральных схем.

ПК-2 - Способен принимать участие в осуществлении расчета режимов и контроля технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем

ПК-3 - Способен принимать участие в разработке наногетероструктурных СВЧ устройств.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-1	знать современные представления об основных свойствах сложных полупроводниковых материалов и структурных и топологических особенностях полупроводниковых гетероструктур.
	уметь использовать в практической деятельности фундаментальные физические закономерности, определяющие структуру и свойства гетероструктур на основе сложных полупроводников

	владеть методами расчета и измерения основных физических параметров гетероструктур в полупроводниках
ПК-2	знать физические принципы современных приборов на основе полупроводниковых гетероструктур и технологию их получения
	уметь осуществлять расчет технологических режимов процесса изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем.
	владеть навыками анализа полупроводниковых гетероструктур
ПК-3	знать перспективные типы гетеро- и наноструктур в полупроводниках
	уметь проектировать приборы на основе полупроводниковых гетероструктур
	владеть методами расчета и измерения основных физических параметров СВЧ устройств на основе гетероструктур.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Физические основы применения полупроводниковых соединений и гетероструктур на их основе» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий
очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		2
Аудиторные занятия (всего)	54	54
В том числе:		
Лекции	36	36
Практические занятия (ПЗ)	18	18
Самостоятельная работа	90	90
Часы на контроль	36	36
Виды промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость: академические часы зач.ед.	180 5	180 5

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

очная форма обучения

№ п/п	Название раздела	Темы лекций	Лекц	Прак зан.	СРС	Всего, час
1	Структура и свойства сложных полупроводниковых материалов	1. Кристаллическая и зонная структура полупроводников. Собственные дефекты в полупроводниках. 2. Примеси полупроводниках. Методы определения параметров примесных центров. Явления переноса. Сложные полупроводники	4	2	4	10
2	Полупроводниковые гетероструктуры, их особенности и применение	3. Гетероструктуры в современной микроэлектронике. Основные параметры и отличительные особенности. Физические явления в гетероструктурах. 4. Полупроводниковые приборы на основе гетероструктур. Высокоэффективные светоизлучающие диоды. Солнечные элементы и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна. 5. Полупроводниковая интегральная оптика. Гетеробиполярные транзисторы с широкозонным эмиттером, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала. Мощные диоды и тиристоры	6	4	14	24
3	Способы формирования гетерогенных полупроводниковых структур	6. Общие принципы формирования полупроводниковых квантово-размерных структур. Эпитаксия. Формирование квантово-размерных полупроводниковых структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). 7. Формирование квантово-размерных полупроводниковых структур методом химического осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD). 8. Формирование квантовых ям. Формирование квантовых проволок (нитей) геометрическим и электронным способом. 9. Формирование квантовых точек. Механизм процесса самоорганизации при формировании квантовых точек. Размер и форма островков. Вертикальные массивы квантовых точек.	8	4	30	42
4	Приборы и устройства на основе полупроводниковых гетероструктур	10. Приборы на одноэлектронном туннелировании. Одноэлектронный транзистор. Устройства на основе сверхрешеток. 11. Инфракрасные фотоприемники на основе низкоразмерных	10	4	26	40

		<p>полупроводниковых гетероструктур. Оптические модуляторы на основе полупроводниковых гетероструктур.</p> <p>12. Квантовые каскадные лазеры на основе низкоразмерных полупроводниковых сверхрешеток. Лавинные фотодиоды на основе полупроводниковых гетероструктур . Оптические модуляторы.</p> <p>13. Транзисторы с высокой подвижностью на основе полупроводниковых гетероструктур. SiGe-транзисторы. Мощные GaN- и SiC-транзисторы. Транзисторы на антимонидах и арсенидах индия.</p> <p>14. Транзисторы на углеродных нанотрубках. Алмаз как материал для СВЧ-приборов.</p>				
5	Монолитные интегральные схемы на основе полупроводниковых гетероструктур	<p>15. Кремниевые биполярные интегральные гетероструктуры и проектирование СВЧ интегральных схем на их основе</p> <p>16. Состояние и перспективы технологии кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов для СВЧ-применений</p> <p>17. Особенности проектирования СВЧ интегральных устройств с использованием гетеропереходных транзисторов .</p> <p>18. Проектирование СВЧ ИМС на гетеропереходных биполярных транзисторах с SiGe-базой для сверхскоростных систем передачи данных</p>	8	4	16	28
Итого			36	18	90	144

5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-1	знать современные представления об основных свойствах сложных полупроводниковых материалов и структурных и топологических особенностях полупроводниковых гетероструктур.	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач.	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач.	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач
	уметь использовать в практической деятельности фундаментальные физические закономерности, определяющие структуру и свойства гетероструктур на основе сложных полупроводников	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач
	владеть методами расчета и измерения основных физических параметров гетероструктур в полупроводниках	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач.	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач
ПК-2	знать физические принципы современных приборов на основе полупроводниковых гетероструктур и технологию их получения	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач.	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач
	уметь осуществлять расчет технологических режимов процесса изготовления	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач.	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач

	полупроводниковых приборов и интегральных схем.			
	владеть навыками анализа полупроводниковых гетероструктур	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач
ПК-3	знать перспективные типы гетеро- и наноструктур в полупроводниках	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач.	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач.	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач
	уметь проектировать приборы на основе полупроводниковых гетероструктур	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач
	владеть методами расчета и измерения основных физических параметров СВЧ устройств на основе гетероструктур.	Активная работа на практических занятиях. Знание теоретического материала. Решение прикладных задач	Оценка «удовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач	Оценка «неудовлетворительно» и выше работу на практических занятиях и при решении задач

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 2 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-1	знать современные представления об основных свойствах сложных полупроводниковых материалов и структурных и топологических особенностях полупроводниковых гетероструктур.	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь использовать в	Решение стандартны	Задачи решены в	Продемонстрирован	Продемонстрирован верный	Задачи не решены

	практической деятельности фундаментальные физические закономерности, определяющие структуру и свойства гетероструктур на основе сложных полупроводников	х практически х задач	полном объеме и получены верные ответы	верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	ход решения в большинстве задач	
	владеть методами расчета и измерения основных физических параметров гетероструктур в полупроводниках	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-2	знать физические принципы современных приборов на основе полупроводниковых гетероструктур и технологию их получения	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70- 80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь осуществлять расчет технологических режимов процесса изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем.	Решение стандартных практически х задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками анализа полупроводниковых гетероструктур	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-3	знать перспективные типы гетеро- и наноструктур в полупроводниках	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70- 80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь проектировать приборы на основе полупроводниковых гетероструктур	Решение стандартных практически х задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть (переносится)	Решение	Задачи	Продемонстрирован	Продемонстрирован	Задачи не

	из раздела 3 рабочей программы)	прикладных задач в конкретной предметной области	решены в полном объеме и получены верные ответы	ирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	ирован верный ход решения в большинстве задач	решены
--	---------------------------------	--	---	--	---	--------

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типичные контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1.Какая ширина запрещенной зоны кремния?

- a)1,6 эВ
- b)0,98 эВ
- c)1,12 эВ
- d)8,9 эВ

Правильный ответ c).

2.Какой элемент обязательно входит в состав газов травителей алюминия?

- a)Хлор
- b)Фтор
- c)Иод
- d)Вор

Правильный ответ a).

3.Применение какого метода обеспечивает лучшую очистку поверхности для молекулярно-лучевой эпитаксии?

a)Очистка поверхности с помощью пучка низко-энергетических ионов инертного газа?

b)Высокотемпературный отжиг?

Правильный ответ a).

4.Какой из методов окисления применяется наиболее часто?

- a)Термическое окисление
- b)Осаждение SiO₂ из газовой фазы.

Правильный ответ a).

5.В каком диапазоне температур применима модель Дила-Грува?

- a)300-700 С
- b)700-1300 С
- c)900-1100 С

Правильный ответ b)

6.Для чего формируют скрытый n⁺-слой в при производстве биполярных ИС?

- a)Для уменьшения сопротивления коллектора
- b)Для повышения напряжения пробоя перехода коллектор –база
- c)Для электрической изоляции приборов, находящихся на одной подложке.

Правильный ответ a)

7.С помощью каких статистических распределений описывается профиль распределения легирующей примеси при ионной имплантации?

- a)Распределение Стьюдента
- b)Распределение Гаусса
- c)Распределение Ферми-Дирака

Правильный ответ b)

8.Какой толщины оксидную пленку можно получить при термическом окислении?

a)0,3-0,4 мкм

b)1-2 мкм

c)9-12мкм

d)Без ограничений

Правильный ответ b).

9.По какому механизму диффундирую В и Р?

a)Диссоциативному

b)Междоузельному

c)Вакансионному

d)Краудионный

Правильный ответ c)

10.К металлизации предъявляется требование:

a)Высокое удельное сопротивление

b)Низкая пластичность

c)Хорошая адгезия

Правильный ответ c)

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n-перехода в случае двухстадийной диффузии фосфора в кремний с электропроводностью p-типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см, проводимой в режиме: $T_1=1050^\circ\text{C}$, $t_1 = 10$ мин, $T_2 = 1150^\circ\text{C}$, $t_2 = 2$ ч.

1. 3,5 мкм

2. 2,5 мкм

3. 4,5 мкм

2. Рассчитать распределение примеси для двухстадийной диффузии фосфора в кремний, проводимой в режиме: $T_1=1250^\circ\text{C}$, $t_1 = 10$ мин, $T_2= 1150^\circ\text{C}$, $t_2=2$ ч. Определить глубину залегания p-n-перехода.

1. 4,35 мкм

2. 5,5 мкм

3. 2,5 мкм

3. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в n-p-n-структуре, полученной последовательной диффузией бора и фосфора в кремний с электропроводностью n-типа и удельным сопротивлением 0,15 Ом·см и проводимой в режимах: $T_a=1200^\circ\text{C}$, $t_a = 1$ ч, $T_d=1100^\circ\text{C}$, $t_d = 2$ ч. Поверхностная плотность атомов бора $N_a=5\cdot 10^{14}$ см⁻², диффузия фосфора ведется из неограниченного источника примеси с поверхностной концентрацией, равной предельной растворимости. С помощью этих кривых найти глубину залегания эмиттерного и коллекторного переходов.

1. 1,2 мкм; 3,5 мкм

2. 2,2 мкм; 3,5 мкм

3. 1,2 мкм; 5,5 мкм

4. Определить температуру разгонки мышьяка, предварительно внедренного с помощью ионной имплантации в кремний электропроводностью p-типа и удельным сопротивлением 1 Ом см, если распределение должно обладать глубиной залегания p-n-перехода $x_j = 0,5$ мкм, поверхностная концентрация $C_0=1,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³, а длительность процесса составляет 1ч. Вычислить количество атомов мышьяка N, которое должно быть внедрено в кремний.

1. 1070°C ; $2,5\cdot 10^{15}$ см⁻²

2. 1170°C ; $2,5\cdot 10^{15}$ см⁻²

3. 1070°C ; $5,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

5. Определить режим диффузии, проводимой в одну стадию при постоянной поверхностной концентрации, если распределение должно обладать глубиной залегания p - n -перехода $x_j = 0,5$ мкм, поверхностная концентрация $C_0 = 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а длительность процесса составляет 1ч, кремний электропроводностью p -типа и удельным сопротивлением 1 Ом см.

1. 1080°C ;

2. 1180°C ;

3. 1050°C ;

6. Определить температуры и длительности процессов загонки и разгонки в случае двухстадийной диффузии бора в кремний с электропроводностью n -типа, с удельным сопротивлением 10 Ом-см, если искомое распределение примеси должно иметь следующие параметры: $C_{02} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $x_j = 2,5$ мкм.

1. 1150°C ; 40 мин

2. 1250°C ; 40 мин

3. 1150°C ; 20 мин

7. Определить режим загонки (T_{a1} , $t_{a1}N_a$) и разгонки (T_{a2} , t_{a2}) при базовой диффузии бора и режим загонки T_d , t_d при эмиттерной диффузии фосфора в кремний, если задано: $C_B = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $x_{j3} = 1,2$ мкм, $x_{jk} = 3,5$ мкм, $C_{0a} = 3,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $C_{0d} = 1,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

1. $T_{a1} = 1060^{\circ}\text{C}$, $t_{a1} = 10$ мин, $N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2} = 1150^{\circ}\text{C}$, $t_{a2} = 170$ мин

2. $T_{a1} = 1060^{\circ}\text{C}$, $t_{a1} = 20$ мин, $N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2} = 1150^{\circ}\text{C}$, $t_{a2} = 170$ мин

3. $T_{a1} = 1060^{\circ}\text{C}$, $t_{a1} = 10$ мин, $N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2} = 1150^{\circ}\text{C}$, $t_{a2} = 70$ мин

8. Какое количество сурьмы необходимо для выращивания кристалла германия n -типа с удельным сопротивлением $\rho = 0,01$ Ом·м из расплава мас-сой $m = 4$ кг в предположении равномерного распределения примеси по объему кристалла. Коэффициент распределения сурьмы между жидкой и твердой фазами $K = 3 \cdot 10^{-3}$, плотность расплава $d = 5600 \text{ кг/м}^3$, подвижность электронов $\mu = 0,38 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

9. Определить количество бора необходимое для выращивания кристалла германия p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 0,05$ Ом·м из расплава массой $m = 1$ кг в предположении равномерного распределения примеси по объему кристалла. Коэффициент распределения бора между жидкой и твердой фазами $K = 20$, плотность расплава $d = 5600 \text{ кг/м}^3$, подвижность дырок $\mu = 0,19 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

10. Оценить удельное сопротивление при 300 К кремния легированного сурьмой, если в 1 кг материала содержится 22 мг сурьмы, подвижность электронов $0,19 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Примесь распределена равномерно.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Определить количество атомов бора, которое необходимо ввести в структуру методом ионной имплантации для создания области базы, и режим разгонки T_{a2} , t_{a2} , а также количество атомов фосфора N_d , которое необходимо ввести с помощью ионной имплантации для создания эмиттерной области, и режим разгонки T_d , t_d если концентрация донорной примеси в исходном эпитаксиальном слое кремния с электропроводностью n -типа составляет $C_B = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $x_{j3} = 1$ мкм, $x_{jk} = 2$ мкм, $C_{0a} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $C_{0d} = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

1. $T_d = 1010^{\circ}\text{C}$, $t_d = 56$ мин, $N_B = 2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $N_F = 1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2} = 1150^{\circ}\text{C}$, $t_{a2} = 17$ мин

2. $T_d = 1110^{\circ}\text{C}$, $t_d = 56$ мин, $N_B = 2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $N_F = 1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2} = 1150^{\circ}\text{C}$, $t_{a2} = 17$ мин

3. $T_d = 1010^{\circ}\text{C}$, $t_d = 56$ мин, $N_B = 2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $N_F = 1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{a2} = 1100^{\circ}\text{C}$, $t_{a2} = 17$ мин

2. Рассчитать средний полный пробег ионов бора с энергией $E = 100$ кэВ в кремнии

1. 0,5 мкм

2. 1,5 мкм

3. 1 мкм

3. Рассчитать R_P и ΔR_P ионов $^{11}\text{B}^+$ с энергией 100 кэВ в кремнии.

1. $R_P = 0,34$ мкм, $\Delta R_P = 0,09$ мкм

2. $R_P = 0,5$ мкм, $\Delta R_P = 0,07$ мкм

3. $R_P = 0,24$ мкм, $\Delta R_P = 0,05$ мкм

4. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в транзисторной структуре, образованной имплантацией $^{11}\text{B}^+$ и $^{31}\text{P}^+$ в кремний с электропроводностью n-типа, если $C_B = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $E_a = 100$ кэВ, $N_a = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $E_d = 200$ кэВ, $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

5. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора равен 29 мА, ток базы равен 500 мкА. Чему равен коэффициент передачи тока эмиттера?

Решение.

Коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером определяется выражением $\beta = I_K / I_B = 58$.

Коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером связан коэффициентом передачи по току в схеме с общим эмиттером α следующим соотношением $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$.

Откуда находим $\alpha = 0,98$.

6. Рассчитайте контактную разность потенциалов n-p⁺-гомоперехода, сформированного на контакте двух кристаллов с уровнем легирования $5 \cdot 10^{14}$ и $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре.

Ответ:

$\Phi_0 = 0,12$ В.

7. Рассчитайте контактную разность потенциалов гомоперехода, сформированного на контакте двух невырожденных полупроводников p- и n-типа: а) PbS б) Si. $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Ответ: а) $\Phi_0 = 0,20$ В; б) $\Phi_0 = 0,79$ В.

8. Используя данные из приложения 1 рассчитайте разрывы зон проводимости ΔE_C и валентной зоны ΔE_V а также диффузионный потенциал Φ_0 для гетероперехода n-Si-p-Ge. Постройте энергетическую диаграмму.

Концентрацию мелких доноров в кремнии примите равной $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрацию мелких акцепторов в германии $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Ответ: $\Delta E_C = 0,12$ эВ, $\Delta E_V = 0,34$ эВ, $\Phi_0 = 0,41$ эВ.

9. Рассчитайте для идеального гетероперехода n-Si-p-Ge из предыдущей задачи толщину обедненных слоев, напряженности полей на границе раздела и контактные разности потенциалов, приходящиеся на каждый материал. Постройте энергетическую диаграмму. Определите, какой высоты потенциальные барьеры стоят на пути встречного движения через переход основных носителей.

Ответ: со стороны n-Si: $Q_1 = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2 = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $d_1 = 0,3$ мкм, $E_1 = 2,25 \cdot 10^4$ В, $\Phi_1 = 0,35$ эВ; со стороны p-Ge: $Q_1 = -1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $d_2 = 0,075$ мкм, $E_2 = 1,69 \cdot 10^4$ В, $\Phi_1 = 0,35$ эВ. Барьер для движения электронов из кремния в германий равен $\Phi_1 = 0,35$ эВ, для движения дырок из германия в кремний равен $\Phi_0 + \Delta E_V = 0,75$ эВ.

10. Используя правило Андерсона вычислите разрывы зоны проводимости и валентной зоны для гетероперехода а) GaAs - AlAs и б) InAs - GaSb. Как найденные величины согласуются с экспериментальными данными?.

Ответ: а) $\Delta E_C = 0.56 \text{ эВ}$, $\Delta E_V = -0.17 \text{ эВ}$; б) а) $\Delta E_C = 0.86 \text{ эВ}$, $\Delta E_V = -0.46$.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом

7.2.5 Примерный перечень вопросов к экзамену

- 1 Кристаллическая и зонная структура полупроводников.
- 2 Собственные дефекты в полупроводниках.
- 3 Примеси в полупроводниках.
- 4 Методы определения параметров примесных центров.
- 5 Явления переноса.
- 6 Сложные полупроводники.
- 7 Гетероструктуры в современной микроэлектронике.
- 8 Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов.
- 9 Физические явления в классических гетероструктурах.
- 10 Односторонняя инжекция.
- 11 Сверхинжекция.
- 12 Диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле.
- 13 Электронное ограничение.
- 14 Оптическое ограничение.
- 15 Эффект широкозонного окна.
- 16 Диагональное туннелирование через гетерограницу.
- 17 Полупроводниковые приборы на основе классических гетероструктур.
- 18 Низкопороговые полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре,
- 19 Лазеры с распределенной обратной связью и с распределенными брэгговскими зеркалами, поверхностно-излучающие лазеры,
- 20 Инфракрасные лазеры на гетероструктурах II-го рода.
- 21 Высокоэффективные светоизлучающие диоды.
- 22 Солнечные элементы и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна.
- 23 Полупроводниковая интегральная оптика, основанная на полупроводниковых РОС и РБЗ лазерах.
- 24 Гетеробиполярные транзисторы с широкозонным эмиттером.
- 25 Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала.
- 26 Мощные диоды и тиристоры.
- 27 Преобразователи света из инфракрасного в видимый диапазон.
- 28 Эффективные холодные катоды.
- 29 Полупроводниковые наноструктуры.
- 30 Квантовые ямы, проволоки и точки.
- 31 Напряженные слои. Сверхрешетки.
- 32 Лазеры на полупроводниковых квантовых ямах.
- 33 Поверхностные лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL).
- 34 Лазеры на напряженных структурах с квантовыми ямами.
- 35 Лазеры на квантовых точках.
- 36 Фотодетекторы на квантовых ямах и сверхрешетках.
- 37 Модуляторы на квантовых ямах.

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

(Например: Экзамен проводится по билетам, каждый из которых

содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 10 баллов

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 15 баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.)

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Структура и свойства сложных полупроводниковых материалов	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест, контрольная работа,
2	Полупроводниковые гетероструктуры, их особенности и применение	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест, контрольная работа,
3	Способы формирования гетерогенных полупроводниковых структур	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест, контрольная работа.
4	Приборы и устройства на основе полупроводниковых гетероструктур	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест, контрольная работа.
5	Монолитные интегральные схемы на основе полупроводниковых гетероструктур	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Тест, контрольная работа.

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении

промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература

1. Смирнов, Ю.А., Соколов С.В., Титов Е.В.. Основы nano-и функциональной электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / -Электрон. дан. - СПб.: Лань, 2013.
2. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. - СПб.: Лань, 2011.
3. Пантелеев В.И. Физика и технология полупроводниковых гетеропереходных структур. - Воронеж: ВГТУ, 2000,
4. Щука А.А. Электроника / под ред. А.С. Сигова. - СПб. :2005,БХВ-Петербург, 2005.
5. Введение в процессы интегральных микро -и нанотехнологий [Текст] : учебное пособие для вузов: в 2 т. / ред. Ю. Н. Коркишко. -М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, (Нанотехнологии). 2010 -2011.

Дополнительная литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микроэлектронная техника: Учебное пособие М.: Высш. шк. 2005.- 622с.;
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. , перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с.: ил..2001, печатн.
3. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И.. Микроэлектроника. учеб. пособие для вузов М.: Высш. шк. 1986. 464 с.
4. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин М.Т. Основы микроэлектроники. Учебник для вузов. М.:Радио и связь. 1991. 288 с
5. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике: Монография / Н. И. Боргардт [и др.] ; ред. Ю. А. Чаплыгин ; Московский государственный институт электронной техники. -М. : Техносфера, 2005. -446 с.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Microsoft Word, Microsoft Excel, Internet Explorer.

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Для проведения лабораторных занятий необходима аудитория, оснащенная стендами для проведения лабораторных работ, компьютерный класс. (аудитории 226, 226а первого корпуса ВГТУ)

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Физические основы применения полупроводниковых соединений и гетероструктур на их основе» читаются лекции, проводятся практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета электронных приборов на основе гетероструктур. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: <ul style="list-style-type: none">- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;- выполнение домашних заданий и расчетов;- работа над темами для самостоятельного изучения;- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;- подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом три дня эффективнее всего использовать для

повторения и систематизации материала.