

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Сердитова Наталья Евгеньевна
Должность: проректор по образовательной деятельности
Дата подписания: 21.08.2025 10:48:08
Уникальный программный ключ:
6cb002877b2a1ea640fdebb0cc541e4e05322d13

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Е.В. Барабанова



«26» июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

Твердотельная электроника

Направление подготовки

03.04.03. Радиофизика

профиль

Физика и технология материалов и устройств радиоэлектроники

Для студентов

2 курса очной формы обучения

Составитель:

Тверь, 2025

I. Аннотация

1. Цель и задачи дисциплины

Цели – изучение физических основ работы твердотельных полупроводниковых приборов и технологий их изготовления. Представлены основные понятия о микроэлектронных устройствах и о методах изготовления микросхем и отдельных элементов микросхем.

Задачи – умение планировать проведение современного физического эксперимента в области физики конденсированного состояния с целью исследования физических процессов в полупроводниковых приборах различного типа, применение методов расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования электронных приборов и устройств твердотельной электроники.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Твердотельная электроника» относится к модулю Полупроводники и диэлектрики Блока 1 «Дисциплины» части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Является логическим развитием курса «Физика полупроводников».

Для успешного освоения дисциплины «Твердотельная электроника» *необходимы знания*, полученные в рамках общего курса физики, курсов теоретической механики, электродинамики, квантовой механики, физики твердого тела, диэлектриков, металлов.

3. Объем дисциплины: 3 зачетных единицы, 108 академических часов, в том числе:

контактная аудиторная работа: лекции 26 часов, практические занятия 13 часов;

самостоятельная работа: 69 часов, в том числе контроль 27 часов.

4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2. Способен проводить разработку и внедрение современных технологических процессов, освоение нового оборудования.	ПК-2.4. Определяет целесообразность внедрений новой техники и технологий.
ПК-3. Способен обеспечить функционирование радиоэлектронных комплексов	ПК-3.2 Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных комплексов, вносит предложения по улучшению эксплуатационных характеристик радиоэлектронных комплексов; ПК-3.3. организует и проводит ремонт радиоэлектронных комплексов и их составных частей.

5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Экзамен в 3 семестре

6. Язык преподавания: русский.

II. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.

1.Для студентов очной формы обучения

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)				Самостоятельная работа, в том числе Контроль (час.)
		Лекции		Практические занятия		
		всего	в т.ч. практическая подготовка	всего	в т.ч. практическая подготовка	
1. Рекомбинация носителей заряда. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда	24	2				22

Равновесные и неравновесные носители заряда. Скорость генерации и рекомбинации носителей заряда. Квазиуровни Ферми для электронов и дырок. Биполярная генерация носителей заряда. Время жизни носителей заряда при линейной и квадратичной рекомбинации. Монополярная генерация носителей заряда. Максвелловское время релаксации. Виды рекомбинации. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная ударная рекомбинация. Рекомбинация носителей заряда через центры захвата. Изменение числа носителей заряда при наличии процессов диффузии и дрейфа. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи при наличии градиента концентрации носителей заряда. Коэффициент диффузии электронов и дырок. Соотношение Эйнштейна. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной генерации. Дебаевский радиус экранирования. Движение неосновных носителей заряда. Диффузионная длина для неосновных носителей. Глубина затягивания носителей по полю и против поля. Инжекция и экстракция носителей заряда. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при биполярной генерации. Коэффициент амбиполярной диффузии. Амбиполярная дрейфовая подвижность.						
2. Основы твердотельной электроники. Микросхемы и технологии их изготовления. Материалы для электронных приборов: кристаллы, методы получения. Выращивание монокристаллов. Получение пластин. Изготовление фотошаблонов. Полупроводниковые микросхемы: структура и топология, формирование топологических слоёв. Электрический монтаж кристаллов ИМС. Проволочный монтаж. Ленточный монтаж. Монтаж с	17	4		3		10

помощью жестких объемных выводов. Микросварка. Изготовление системы ленточных перемычек. Изготовление системы объемных выводов.						
3. Полупроводниковая технология получения микросхем. Диффузионное легирование Распределения примеси по глубине. Диффузия из постоянного внешнего источника (одностадийный процесс). Диффузия из конечного поверхностного источника (двухстадийный процесс). Оборудование. Расчет режимов термической диффузии: двухстадийный процесс; одностадийный процесс. Легирование методом ионной имплантации. Особенности процесса легирования методом ионной имплантации. Распределения примеси по глубине. Оборудование. Расчет режимов ионной имплантации. Оценка удельного поверхностного сопротивления легированных слоёв. Проектирование полупроводниковых резисторов в ИМС. Процесс фотолитографии. Подготовка поверхности. Нанесение фотослоя. Совмещение и экспонирование. Проявление. Травление.	22	12		5		5
4. Основы плёночной технологии получения элементов микросхем. Осаждение тонких плёнок в вакууме: термическое вакуумное напыление; катодное распыление; режимы катодного распыления; другие виды распыления. Общие сведения о толстоплёночной технологии получения микросхем. Толстоплёночные пасты. Трафаретная печать. Вжигание. Тонкопленочные резисторы: материалы для тонкопленочных резисторов; варианты технологии.	18	8		5		5
Экзамен	27					27
ИТОГО:	108	26		13		69

III. Образовательные технологии

Учебная программа-наименование разделов и тем	Вид занятия	Образовательные технологии
1. Рекомбинация носителей заряда. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда Равновесные и неравновесные носители заряда. Скорость генерации и рекомбинации носителей заряда. Квазиуровни Ферми для электронов и дырок. Биполярная генерация носителей заряда. Время жизни носителей заряда при линейной и квадратичной рекомбинации. Монополярная генерация носителей заряда. Максвелловское время релаксации. Виды рекомбинации. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная ударная рекомбинация. Рекомбинация носителей заряда через центр захвата. Изменение числа носителей заряда при наличии процессов диффузии и дрейфа. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи при наличии градиента концентрации носителей заряда. Коэффициент диффузии электронов и дырок. Соотношение Эйнштейна. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при монополярной генерации. Дебаевский радиус экранирования. Движение неосновных носителей заряда. Диффузионная длина для неосновных носителей. Глубина затягивания носителей по полю и против поля. Инжекция и экстракция носителей заряда. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при биполярной генерации. Коэффициент амбиполярной диффузии. Амбиполярная дрейфовая подвижность.	<i>Лекции,</i>	<i>1.Изложение теоретического материала (презентация)</i> <i>2.Решение задач</i> <i>3.Самостоятельное изучение теоретического материала</i>
2. Основы твердотельной электроники. Микросхемы и технологии их изготовления. Материалы для электронных приборов: кристаллы, методы	<i>Лекция, практические занятия</i>	<i>Активное слушание. Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач</i>

получения. Выращивание монокристаллов. Получение пластин. Изготовление фотошаблонов. Полупроводниковые микросхемы: структура и топология, формирование топологических слоёв. Электрический монтаж кристаллов ИМС. Проволочный монтаж. Ленточный монтаж. Монтаж с помощью жестких объемных выводов. Микросварка. Изготовление системы ленточных перемычек. Изготовление системы объемных выводов.		
3. Полупроводниковая технология получения микросхем. Диффузионное легирование Распределения примеси по глубине. Диффузия из постоянного внешнего источника (одностадийный процесс). Диффузия из конечного поверхностного источника (двухстадийный процесс). Оборудование. Расчет режимов термической диффузии: двухстадийный процесс; одностадийный процесс. Легирование методом ионной имплантации. Особенности процесса легирования методом ионной имплантации. Распределения примеси по глубине. Оборудование. Расчет режимов ионной имплантации. Оценка удельного поверхностного сопротивления легированных слоёв. Проектирование полупроводниковых резисторов в ИМС. Процесс фотолитографии. Подготовка поверхности. Нанесение фотослоя. Совмещение и экспонирование. Проявление. Травление.	Лекция, практические занятия	Активное слушание. Групповое решение задач. Решение индивидуальных задач
4. Основы плёночной технологии получения	Лекция, практические занятия	Активное слушание. Групповое решение

элементов микросхем. Осаждение тонких плёнок в вакууме: термическое вакуумное напыление; катодное распыление; режимы катодного распыления; другие виды распыления. Общие сведения о толстоплёночной технологии получения микросхем. Толстоплёночные пасты. Трафаретная печать. Вжигание. Тонкопленочные резисторы: материалы для тонкопленочных резисторов; варианты технологии.		<i>задач. Решение индивидуальных задач</i>
---	--	---

IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации

Форма проведения промежуточного контроля: студенты, освоившие программу курса «Твердотельная электроника» могут сдать экзамен по итогам семестровой аттестации согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.).

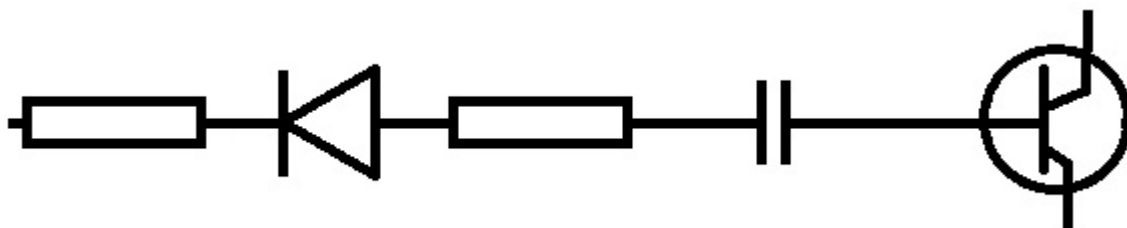
Для проведения текущей и промежуточной аттестации:

ПК-2. Способен проводить разработку и внедрение современных технологических процессов, освоение нового оборудования:

ПК-2.4. Определяет целесообразность внедрений новой техники и технологий.

Задание:

Представить топологическую схему микросхемы, выполненной по полупроводниковой технологии, согласно схеме электрической цепи:



Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

Высокий уровень: ответ целостный, верный, теоретически обоснованный.

Ключевые понятия и термины полностью раскрыты. Факты и примеры в полном объеме обосновывают выводы

средний уровень: теоретическая аргументация неполная или смысл ключевых понятий не объяснен;

низкий уровень: допущены ошибки, приведшие к искажению смысла, термины используются неправильно;

ниже минимального уровень: допущены ошибки, свидетельствующие о непонимании темы, ошибки в терминологии;

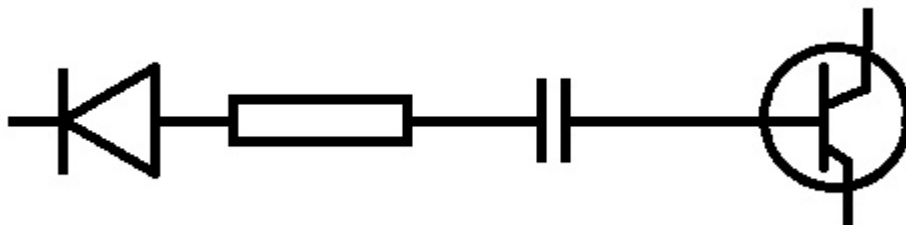
ПК-3. Способен обеспечить функционирование радиоэлектронных комплексов:

ПК-3.2 Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных комплексов, вносит предложения по улучшению эксплуатационных характеристик радиоэлектронных комплексов;

ПК-3.3. Организует и проводит ремонт радиоэлектронных комплексов и их составных частей.

Задание:

Представить топологическую схему микросхемы, выполненной по гибридной технологии, согласно схеме электрической цепи:



Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

Высокий уровень: ответ целостный, верный, теоретически обоснованный. Ключевые понятия и термины полностью раскрыты. Факты и примеры в полном объеме обосновывают выводы

средний уровень: теоретическая аргументация неполная или смысл ключевых понятий не объяснен;

низкий уровень: допущены ошибки, приведшие к искажению смысла, термины используются неправильно;

ниже минимального уровень: допущены ошибки, свидетельствующие о непонимании темы, ошибки в терминологии;

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

1) Рекомендуемая литература

а) основная литература:

1. Шалимова, К. В. Физика полупроводников : учебник / К. В. Шалимова. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 384 с. — ISBN 978-5-8114-0922-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210524>.
2. Степанов, Н. П. Физические характеристики полупроводников, используемых в твердотельной электронике : учебное пособие / Н. П. Степанов. — Чита : ЗабГУ, 2021. — 126 с. — ISBN 978-5-9293-2953-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/271922>
3. Червяков, Г. Г. Электронная техника: учебное пособие для вузов / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 235 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-18226-2. — Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/534566>

б) дополнительная литература

1. Легостаев, Н.С. Твердотельная электроника : учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. - Томск : Эль Контент, 2011. - 244 с. - ISBN 978-5-4332-0021-0 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208951>
2. Легостаев, Н.С. Твердотельная электроника : методические указания / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. - Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 51 с. - ISBN 978-5-4332-0030-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208948>
3. Каплунов И.А., Колесников А.И. Введение в технологию микроэлектронных изделий (учебное пособие). Тверь: ТвГУ, 2007. 60 с.
 - 2) Программное обеспечение
Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
Adobe Acrobat Reader
Google Chrome
Notepad++
Многофункциональный редактор ONLYOFFICE
OpenOffice
 - 3) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы
1. Электронная библиотека издательства Лань: <http://e.lanbook.com/>
2. Университетская библиотека ONLINE: <http://www.biblioclub.ru/>
3. Сайт издательского дома ЮРАЙТ: <http://www.biblio-online.ru/>
- 4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины

1) Методические рекомендации по решению задач

1. Рекомбинация носителей заряда

Если в полупроводнике за счет внешнего воздействия (например, освещения) возникают дополнительные носители, не находящиеся в состоянии термодинамического равновесия, такие носители являются *неравновесными*. Их появление приводит к существованию в полупроводнике неравновесной концентрации носителей n . После устранения причины, вызывающей появление избыточных неравновесных носителей Δn , система за счет процессов рекомбинации носителей, возвращается в равновесное состояние за время, называемое *временем жизни неравновесных носителей заряда*.

В зависимости от механизма различают три **основных вида** рекомбинации:

- I. Прямая (межзонная) рекомбинация.
- II. Рекомбинация через локальные центры захвата (ловушки).
- III. Поверхностная рекомбинация.

В зависимости от того, как расходуется энергия, выделяемая в процессе рекомбинации, различают три **типа** рекомбинации:

- 1) Если энергия излучается в виде кванта света, то такая рекомбинация называется *излучательной* (фотонной) рекомбинацией.
- 2) Если энергия расходуется на образование фононов, то говорят о *безизлучательной* (фононной) рекомбинации.
- 3) Если в процессе рекомбинации энергия передается свободному носителю заряда, то такая рекомбинация называется *ударной* или *рекомбинацией Оже*.

При рекомбинации через центры захвата время жизни неравновесных носителей заряда равно

$$\tau = \tau_{po} \frac{n_o + n_1 + \Delta n}{n_o + p_o + \Delta n} + \tau_{no} \frac{p_o + p_1 + \Delta n}{n_o + p_o + \Delta n}, \quad (1.1)$$

где $\tau_{po} = \frac{1}{\nu_p N_t}$; $\tau_{no} = \frac{1}{\nu_n N_t}$; $n_1 = N_C \exp\left(\frac{E_t - E_C}{kT}\right)$ – равновесная концентрация электронов в зоне проводимости, когда уровень Ферми совпадает с уровнем ловушек; $p_1 = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_t}{kT}\right)$ – равновесная концентрация дырок в валентной зоне, когда уровень Ферми совпадает с уровнем ловушек; $\nu_{n(p)}$ – коэффициент захвата неравновесных электронов (дырок) ловушками; N_t – концентрация ловушек, E_t – энергетический уровень ловушек.

При освещении поверхности полупроводника неравновесные носители диффундируют вглубь полупроводника. Коэффициент диффузии определяется соотношением Эйнштейна:

$$D_{n(p)} = \frac{kT}{e} \mu_{n(p)}. \quad (1.2)$$

2. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда

Изменение числа электронов в полупроводнике может происходить за счет четырех процессов: генерации, рекомбинации, диффузии и дрейфа носителей заряда. Изменение концентрации носителей описывается уравнением непрерывности

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= G + \frac{1}{e} \operatorname{div}(\vec{j}_n) - \frac{n - n_0}{\tau_n} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= G - \frac{1}{e} \operatorname{div}(\vec{j}_p) - \frac{p - p_0}{\tau_p}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где G – число генерируемых пар электрон-дырка, j – плотность тока, τ_n и τ_p – время жизни неосновных носителей заряда.

В случае, когда освещается часть полупроводника, распределение концентрации неосновных носителей в темной части проводника равно:

1. при монополярной генерации:

$$\Delta n = \Delta n(0) \exp(-x/l_n) = \Delta n(0) \exp(-t/\tau_n), \quad (2.2)$$

где l_D – дебаевский радиус экранирования, τ_μ – максвелловское время релаксации;

2. в примесном полупроводнике (в отсутствие электрического поля):

$$n\text{-типа:} \quad \Delta p = \Delta p(0) \exp(-x/L_p) \quad (2.3)$$

$$p\text{-типа:} \quad \Delta n = \Delta n(0) \exp(-x/L_n). \quad (2.4)$$

Здесь $L_{n(p)} = \sqrt{D_{n(p)}\tau_{n(p)}}$ – постоянная спада (длина затягивания).

В уравнение непрерывности описывающее полупроводник с проводимостью близкой к собственной, помещенный во внешнее электрическое поле, входят коэффициенты амбиполярной дрейфовой подвижности

$$\mu_E = \frac{p_o - n_o}{n_o/\mu_p + p_o/\mu_n} \quad (2.5)$$

и амбиполярной диффузии

$$D = \frac{kT}{e} \frac{n_o + p_o}{n_o/\mu_p + p_o/\mu_n} = \frac{kT}{e} \mu_D, \quad (2.6)$$

где $\mu_D = \frac{n_o + p_o}{n_o/\mu_p + p_o/\mu_n}$ – амбиполярная диффузионная подвижность.

2) Вопросы к экзамену

1. Равновесные и неравновесные носители заряда.
2. Биполярная генерация носителей.
3. Монополярная генерация.
4. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная ударная рекомбинация..
5. Материалы для электронных приборов: кристаллы, методы получения.
6. Полупроводниковые микросхемы: структура и топология, формирование топологических слоёв.
7. Электрический монтаж кристаллов ИМС.
8. Полупроводниковая технология получения микросхем.

9. Диффузионное легирование. Распределения примеси по глубине.
10. Диффузия из постоянного внешнего источника (одностадийный процесс).
11. Диффузия из конечного поверхностного источника (двухстадийный процесс).
12. Расчет режимов термической диффузии: двухстадийный процесс; одностадийный процесс.
13. Легирование методом ионной имплантации: особенности процесса легирования; распределения примеси по глубине; расчет режимов ионной имплантации.
14. Проектирование полупроводниковых резисторов в ИМС.
15. Процесс фотолитографии.
16. Основы плёночной технологии получения элементов микросхем.
17. Осаждение тонких плёнок в вакууме: термическое вакуумное напыление; катодное распыление; режимы катодного распыления; другие виды распыления.
18. Толстоплёночная технология получения микросхем. Толстоплёночные пасты. Трафаретная печать. Вжигание.
19. Тонкопленочные резисторы: материалы для тонкопленочных резисторов; варианты технологии.

VII. Материально-техническое обеспечение

Наименование специальных* помещений	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, Лекционная аудитория № 28 (170002 Тверская обл., г. Тверь,	1 Экран настенный Screen Media 153x203 2. Комплект учебной мебели на 24 посадочных места 3. Меловая доска 4. ПК 5. проектор EPSON EB-X05 с потолочным креплением	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows Adobe Acrobat Reader Google Chrome Notepad++ Многофункциональный редактор ONLYOFFICE OpenOffice

Садовый пер., д. 35)		
----------------------	--	--

VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			