

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Технологии микроэлектроники

по направлению подготовки

03.03.03 Радиофизика

Направленность (профиль) подготовки :
Радиофизика, электроника и информационные системы

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
М.Л. Громов

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;

ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники..

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

ИПК 3.1 Понимает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.

ИПК 3.2 Проводит радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля.

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить материал курса, а именно содержание основных технологических операций и их последовательность при изготовлении полупроводниковой приборной структуры.

– Научиться применять понятийный аппарат для конструирования приборов микроэлектроники, а также для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор. Дисциплина входит в модуль Модуль «Твердотельная электроника».

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Шестой семестр, зачет

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: «Физика», «Материалы микро- и нанoeлектроники», «Введение в физику полупроводников».

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

-лекции: 24 ч.

-лабораторные: 12 ч.

-практические занятия: 6 ч.

в том числе практическая подготовка: 12 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Введение

Основные тенденции развития полупроводниковой электроники и полупроводниковой технологии. Понятие об интегральной микросхеме (ИМС). Планарная технология.

Тема 2. Технологические среды

Понятие «чистое помещение». Классификация, особенности конструкций, материалы для чистых помещений. Требования к воде и газам для микроэлектронного производства. Степени очистки химических реактивов. Вакуум

Тема 3. Производство полупроводниковых пластин

Выращивание слитков монокристаллического кремния методом Чохральского. Послеростовая обработка слитков. Резка на пластины. Шлифовка-полировка пластин.

Тема 4. Эпитаксиальное выращивание полупроводниковых слоёв

Классификация методов эпитаксиального выращивания. Газофазная эпитаксия кремния в технологии интегральных микросхем. Физические и химические методы газофазной эпитаксии. Принцип и схема метода. Жидкофазная и твердофазная эпитаксия.

Тема 5. Фотолитография

Этапы очистки и подготовки поверхности пластин. Фотолитография. Фотошаблоны. Последовательность основных операций при фотолитографии. Классификация методов экспонирования фоторезиста.

Тема 6. Легирование полупроводников

Принципы легирования. Диффузионный процесс. Уравнение диффузии. Механизмы диффузии примеси в полупроводниках. Способы осуществления диффузии.

Ионная имплантация примеси. Принцип метода. Распределение внедренных ионов. Эффект каналирования. Отжиг радиационных дефектов

Тема 7. Формирование тонких плёнок

Методы нанесения металлических плёнок. Принцип и схема действия термических методов. Магнетронное нанесение плёнок. Химическое и электрохимическое осаждение металлических плёнок.

Применение диэлектрических слоёв в микроэлектронике. Термическое окисление (оксидирование) кремния. Химические методы нанесения диэлектрических плёнок на полупроводниковые материалы (плазмохимическое осаждение SiO_2 , Si_3N_4 , пиролиз).

Тема 8. Травление слоёв

Жидкое травление. Селективность травления. Изотропность и анизотропность травления. Классификация и принципы действия методов сухого травления.

Тема 9. Базовые технологии создания интегральных схем

Основные этапы стандартной эпитаксиально-планарной технологии биполярной ИМС. Способы электрической изоляции элементов ИМС (разделительная и коллекторная изолирующая диффузия, EPIC-процесс, технология кремний-на-сапфире, изопланарный метод). Основные этапы технологии МДП- (МОП-) интегральной микросхемы.

Поверхностный монтаж. Разделение пластин на кристаллы. Проволочная микроразварка. Флип-чип бондинг. Корпусирование приборов.

Тема 10. Современные методы технологического моделирования.

Системы автоматизированного проектирования TCAD, моделирование процессов эпитаксии, ионной имплантации, диффузии.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, тестов по лекционному материалу, выполнения практических заданий и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Изучать материал курса рекомендуется последовательно, двигаясь от первой темы к последней.

Первая тема является вводной и знакомит обучающихся с основными понятиями современной микроэлектронной технологии и историей развития элементной базы.

Во второй теме дается представление о технологических помещениях и средах, используемых при изготовлении полупроводниковых приборов. Обучающийся должен усвоить параметры чистых помещений и основные требования по поведению в чистых помещениях, а также запомнить основные среды и их характеристики.

Третья тема посвящена технологии изготовления полупроводниковых слитков и их последующей обработке. Обучающемуся необходимо запомнить основные этапы роста слитков методом Чохральского, а также порядок действий, необходимых для получения полупроводниковых пластин с высоким качеством поверхности.

В четвертой теме даются понятия эпитаксиальным процессам и их разновидностям. Необходимо усвоить разницу физических и химических методов газофазной эпитаксии, понимать каким образом выращиваются монокристаллические и аморфные плёнки, а также знать преимущества методов твердо- и жидкофазной эпитаксии.

В пятой теме обучающиеся знакомятся с процессом подготовки полупроводниковых пластин к операциям напыления и фотолитографии. Основой раздела является изучение операции фотолитографии. Приступая к изучению раздела, необходимо запомнить основную терминологию: актиничное излучение, позитивный и негативный фоторезист, фотошаблон, метки совмещения, экспонирование. Следует обратить внимание на различие методов нанесения фоторезиста и методов экспонирования.

В шестой теме представлены технологии легирования полупроводниковых структур методами диффузии и ионной имплантации. При изучении ионной имплантации следует обращать внимание на принцип действия установки, а также на причины приводящие к эффекту каналирования и необходимости отжига готовых структур. В процессе изучения данного раздела обучающимся предлагается решить несколько задач, посвященных расчету параметров легируемых структур. Перед тем, как приступить к решению задач, следует усвоить основные уравнения, описывающие диффузию из бесконечного и ограниченного источника, а также последовательность операций легирования методом диффузии.

В седьмой теме обучающийся знакомится с технологиями роста тонких металлических и диэлектрических пленок, требованиями, предъявляемыми к плёнкам в микроэлектронной промышленности. Требуется освоить основы процессов термического и электронно-лучевого напыления металлических пленок, магнетронное напыление как металлических, так и диэлектрических пленок, основные методы оксидирования кремния и создания слоев нитрида кремния.

В восьмой теме приводятся основные методы травления тонких пленок и составы травителей плёнок оксида и нитрида кремния, а также самого кремния. Обучающийся должен понимать отличия методов сухого травления и знать требования, предъявляемые к жидким травителям.

Приступая к изучению девятой темы, обучающийся должен повторить материалы 4 – 8 тем и быть готовым составить последовательность представленных в данных разделах операций для создания полупроводниковых транзисторов. В данной теме даются примеры изготовления биполярных и полевых транзисторов по различным технологиям. В конце раздела представлены завершающие операции: разделение чипов, микросварка и бондинг, корпусирование готовых чипов. В результате обучающийся должен знать типы сварки и уметь различать их.

В десятом разделе проводятся лабораторные работы по фотолитографии и технологическому проектированию стандартных процессов полупроводниковой микроэлектроники: эпитаксия, ионная имплантация, диффузия примесей.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в шестом семестре проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Первый и второй вопросы в каждом билете сформулированы для проверки сформированности компетенций: ОПК-1 и ПК-3.

Примерный перечень теоретических вопросов

1. Интегральная схема, планарная технология. Зачем увеличивать диаметр пластин. Типы ИС.
2. Чистое помещение, какие среды контролируются, как достигается чистота в помещении, особенности проектирования.
3. Основные технологические среды, их оптимальные параметры для обеспечения технологического процесса производства ИС.
4. Технологии роста полупроводниковых слитков. Метод Чохральского в индустрии микроэлектроники.
5. Этапы подготовки пластин кремния. Методы удаления нарушенного слоя и его контроль.
6. Процесс создания эпитаксиальных пленок. Основные виды эпитаксии.
7. Газофазная эпитаксия. Типы химических реакций, использующихся при ГФЭ. Основные стадии процесса осаждения эпитаксиального слоя из газовой фазы. Эпитаксия кремния в технологии интегральных микросхем.
8. Молекулярно-лучевая эпитаксия (принцип метода; схема установки; преимущества метода МЛЭ при получении квантово-размерных структур, структур с модулированным легированием и сверхрешеток).
9. Эпитаксия из металлоорганических соединений (принцип метода; схема установки; преимущества при получении квантово-размерных структур).
10. Диффузионные уравнения Фика. Диффузия при постоянной концентрации атомов примеси на границе полупроводника с внешней средой (граничные условия, распределение примеси, глубина залегания р–n-перехода).
11. Проведение диффузии открытой трубе и в замкнутом объеме.
12. Диффузионные уравнения Фика. Диффузия атомов примеси из бесконечно тонкого легированного слоя полупроводника (граничные условия, распределение примеси, глубина залегания р–n-перехода).
13. Ионная имплантация примеси. Взаимодействие иона с подложкой. Радиационные дефекты. Кластеры. Роль после имплантационного отжига. Каналирование

ионов примеси в монокристаллической подложке. Преимущества метода ионной имплантации легирующей примеси.

14. Использование фотолитографии в технологии полупроводниковых приборов и ИМС. Позитивный и негативный фоторезисты. Фотошаблоны. Последовательность операций при фотолитографии.

15. Функции диэлектрических слоев в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Получение слоев SiO_2 термическим окислением кремния. Основные стадии процесса. Отличие свойств слоев диоксида кремния, полученных окислением в сухом кислороде и в атмосфере влажных газов.

16. Функции диэлектрических слоев в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Получение слоев Si_3N_4 . Преимущества Si_3N_4 перед SiO_2 , особенности их применения.

17. Требования к металлическим контактам и покрытиям. Принцип работы магнетрона. Химическое осаждение (виды осаждения, основные этапы).

18. Требования к металлическим контактам и покрытиям. Создание металлизации методами термического распыления

19. Удаление металлических и диэлектрических слоев. Требования к методам проведения травления. Процессы жидкого травления.

20. Виды ионного травления. Ионно-плазменное, плазмохимическое и реактивное ионно-плазменное травление. Преимущества и недостатки сухого и жидкого методов травления.

21. Финальные стадии изготовления элементов ИС. Корпусирование.

22. Стандартная технология полупроводниковой биполярной ИМС (последовательность основных операций, изменение структуры и профилей легирования подложки в процессе обработки).

23. Стандартная технология изготовления МДП-интегральной микросхемы (последовательность основных операций, изменение структуры подложки в процессе обработки).

Примеры задач:

1. В течение 20 с при температуре 1200°C осуществлялась диффузия фосфора в подложки р-типа проводимости, удельное сопротивление которых составило $\approx 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Определить глубину залегания примеси и интегральное количество введенной примеси, поступившей на единицу площади.

2. Термическая диффузия фосфора проходила при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$. Концентрация носителей заряда в исходной подложке составляла $N_\phi = 1,3 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Определить время диффузии и дозу легирования, если глубина залегания примеси составила 5,6 мкм.

3. Первым этапом проводилась термическая диффузия фосфора в подложку кремния при температуре $T = 925^\circ\text{C}$. Концентрация доноров в подложке $N_\phi = 3,4 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Требуемая глубина загонки примеси $x_0 = 0,26 \text{ мкм}$. Вторым этапом проводилась разгонка примеси на глубину 5,6 мкм при температуре 1125°C . Определить время загонки и разгонки, а также концентрацию примеси на поверхности.

Результаты промежуточной аттестации по дисциплине характеризуются оценками «зачтено» или «не зачтено» в соответствии с таблицей.

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
		Не зачтено	Зачтено
ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.	ИОПК-1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.	Не имеет представления об основных технологических операциях и их последовательности, необходимой для изготовления полупроводникового прибора. Не способен проанализировать строение полупроводниковой приборной структуры.	Имеет полное представление об основных технологических операциях и их последовательности, необходимой для изготовления полупроводникового прибора. Способен проанализировать строение полупроводниковой приборной структуры.
ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники.	ИПК 3.1 Понимает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.	Не способен построить последовательность основных технологических операций для изготовления приборной структуры.	Способен построить последовательность основных технологических операций для изготовления приборной структуры
	ИПК 3.2 Проводит радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля.	Полное непонимание принципа измерения параметра или характеристики полупроводниковой поверхности. Не понимает принципа работы измерительной установки. Отсутствие навыков работы с измерительными приборами. Неспособность выполнить эксперимент.	Полностью понимает смысл измеряемого параметра или характеристики полупроводниковой поверхности, а также принцип работы измерительной установки. Успешное владение навыками измерения морфологии поверхности с использованием современных измерительных приборов.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=13004>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (п. 9, 10).

в) Методические указания по проведению лабораторных работ: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=13004>

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Воротынцев В. М. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники: учебное пособие: / В. М. Воротынцев, В. Д. Скупов. - Москва: Проспект, 2019. - 519 с.
2. Васильев, В. Ю. Современное производство изделий микроэлектроники : учебное пособие / В. Ю. Васильев. — Новосибирск : НГТУ, 2019. — 88 с. — ISBN 978-5-7782-3907-4. — Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). — URL: <https://e.lanbook.com/book/152235>
3. Технология микросборок : учебное пособие / М. Н. Пиганов, М. П. Калаев, А. М. Телегин, К. И. Сухачев. — Самара : СамГУ, 2020. — 188 с. — ISBN 978-5-7883-1552-2. — Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). — URL: <https://e.lanbook.com/book/189028>
4. Бондаренко, Г. Г. Основы материаловедения: учебное пособие / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко. — 3-е изд. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 763 с. — ISBN 978-5-00101-755-4. — Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). — URL: <https://e.lanbook.com/book/151570>

б) дополнительная литература:

1. Каменская А. Основы технологии материалов микроэлектроники: Учебно-методическая литература / Новосибирский государственный технический университет. - Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 2010. - 96 с.. URL: <http://znaniyum.com/catalog/document?id=64968>.
2. Капустин В. И. Материаловедение и технологии электроники: учебное пособие: / В. И. Капустин, А. С. Сигов. - Москва : ИНФРА-М, 2014. – 425.
3. Барыбин, А. А. Физико-технологические основы макро-, микро- и нанoeлектроники: учебное пособие / А. А. Барыбин, В. И. Томилин, В. И. Шаповалов. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 784 с. — ISBN 978-5-9221-1321-2. — Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). — URL: <https://e.lanbook.com/book/5258>

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office 2010 Russian Academic Open, Microsoft Windows Professional 7 Academic Open (Лицензия №47729022 от 26.11.2010);
- пакет программного обеспечения PTC MathCad Education (Договор поставки №7193 от 14.10.2015;
- пакет SMath Studio для решения задач на практических занятиях (в свободном доступе).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ — <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ — <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Лаборатории, оборудованные персональными компьютерами и программным обеспечением TCAD для проведения технологического моделирования производственных процессов микроэлектроники.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Adobe Connect»).

15. Информация о разработчиках

Лозинская Анастасия Дмитриевна, Радиофизический факультет ТГУ, старший преподаватель.