

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учебно-методическое объединение по образованию
в области информатики и радиоэлектроники

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Министра образования
Республики Беларусь

_____ А.Г. Баханович

Регистрационный № _____

«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»

**Примерная учебная программа по учебной дисциплине
для специальности**

6-05-0713-02 Электронные системы и технологии

СОГЛАСОВАНО

Председатель Учебно-методического
объединения по образованию
в области информатики
и радиоэлектроники

_____ В.А. Богуш

СОГЛАСОВАНО

Начальник Главного управления
профессионального образования
Министерства образования
Республики Беларусь

_____ С.Н. Пищов

СОГЛАСОВАНО

Проректор по научно-методической
работе Государственного учреждения
образования «Республиканский
институт высшей школы»

_____ И.В. Титович

Эксперт-нормоконтролер

Минск 2025

СОСТАВИТЕЛЬ:

А.А.Позняк, доцент кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кандидат физико-математических наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Кафедра физической, коллоидной и аналитической химии учреждения образования «Белорусский государственный технический университет» (протокол № 7 от 24.01.2025);

Ю.В.Радюш, ведущий научный сотрудник отраслевой лаборатории радиационных воздействий государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук по материаловедению», кандидат физико-математических наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ В КАЧЕСТВЕ ПРИМЕРНОЙ:

Кафедрой электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 8 от 09.12.2024);

Научно-методическим советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 7 от 21.02.2025);

Научно-методическим советом по электронным системам и технологиям Учебно-методического объединения по образованию в области информатики и радиоэлектроники (протокол № 6 от 19.02.2025)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

ХАРАКТЕРИСТИКА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Примерная учебная программа по учебной дисциплине «Физико-химические основы микро- и нанoeлектроники» разработана для обучающихся по специальности 6-05-0713-02 «Электронные системы и технологии» в соответствии с требованиями образовательного стандарта общего высшего образования и примерного учебного плана вышеуказанной специальности.

Новые направления в технологии производства радиоэлектронных устройств требуют от разработчиков понимания множества сложных физических и химических явлений и процессов. Без ясного представления о физической природе явлений, определяющих работу конструкций радиоэлектронных устройств и химических аспектов технологии их изготовления, без умения математически описать эти явления, невозможно заниматься проектированием как самих устройств, так и технологических процессов их изготовления. Для понимания принципов работы микро- и нанoeлектронных устройств, возможности их использования в новых разработках электронной аппаратуры студент должен овладеть необходимыми знаниями, включающими в себя качественное и количественное описание строения полупроводниковых материалов, энергетического спектра и статистики носителей заряда и фононов, теории переноса, оптических и фотоэлектрических свойств твёрдых тел и контактных явлений. С другой стороны, производственные процессы изготовления радиоэлектронных устройств в настоящее время основываются на современной физической химии, что подразумевает изучение физико-химических свойств используемых материалов, методов получения новых материалов с заданными свойствами.

Воспитательное значение учебной дисциплины «Физико-химические основы микро- и нанoeлектроники» заключается в формировании у обучающихся математической культуры и научного мировоззрения; развитии исследовательских умений, аналитических способностей, креативности, необходимых для решения научных и практических задач; развитии познавательных способностей и активности: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности; формировании способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации.

Изучение данной учебной дисциплины способствует созданию условий для формирования интеллектуально развитой личности обучающегося, которой присущи стремление к профессиональному совершенствованию, активному участию в экономической и социально-культурной жизни страны, гражданская ответственность и патриотизм.

ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели учебной дисциплины: овладение физико-химическими основами производства материалов устройств микро- и нанoeлектроники, понимание

характера взаимодействия различных веществ материалов, основанное на знании их физических, химических свойств и физико-химических закономерностях протекания процессов; освоение технологических подходов к выращиванию монокристаллов, нанесению и удалению различных слоёв на поверхности твёрдых тел, модифицированию твёрдотельных структур, образующих активные и пассивные электронные компоненты.

Задачи учебной дисциплины:

приобретение знаний в области теоретических основ и практики реализации различных способов получения и обработки материалов, обеспечивающих высокую эффективность, надёжность и долговечность функционирования приборов;

изучение физико-химических процессов, протекающие в твёрдом теле или на его поверхности при удалении и нанесении веществ в жидких, реактивных и инертных газовых средах, при термической диффузии, ионной имплантации, окислении, эпитаксии, в вакууме, газовой фазе, в растворах и расплавах;

освоение навыков использования математического аппарата и основных законов физики, химии в конструировании, технологии изготовления и эксплуатации электронных устройств;

формирование понимания физико-химической сущности явлений, происходящих в материалах при воздействии на них различных факторов в условиях производства и эксплуатации, и их влияния на свойства материалов;

изучение зависимости между химическим составом, строением и свойствами материалов;

овладение методами расчёта основных параметров технологических процессов изготовления электронных устройств, а также основных характеристик материалов.

Базовыми учебными дисциплинами для учебной дисциплины «Физико-химические основы микро- и наноэлектроники» являются «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Математический анализ», «Физика», «Химия». В свою очередь учебная дисциплина «Физико-химические основы микро- и наноэлектроники» является базой для таких учебных дисциплин, как «Технологические процессы интегральной электроники», «Технология производства электронных средств» (учебная дисциплина компонента учреждения образования), «Технология элементов конструкций электронных средств» (учебная дисциплина компонента учреждения образования).

ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате изучения учебной дисциплины «Физико-химические основы микро- и наноэлектроники» формируются следующие базовые профессиональные компетенции:

анализировать вещества, их свойства, строение и превращения, происходящие в результате химических реакций, рассчитывать результаты химических реакций в соответствии с законами химии;

применять основные понятия и законы физики для изучения физических явлений и процессов;

применять знания о физической природе явлений и химических процессов, определяющих технологию изготовления электронных устройств, физико-химические законы при разработке и производстве электронных устройств.

В результате изучения учебной дисциплины обучающийся должен:

знать:

основные понятия и теоретические положения физики твёрдого тела, основы электронной структуры твёрдых тел, позволяющие прогнозировать и объяснять комплекс электрических свойств металлов, полупроводников и диэлектриков и разрабатывать методы управления ими;

строение твёрдого тела, дефекты кристаллической структуры и их роль в формировании свойств материалов;

основы теории фазовых равновесий, позволяющие определять и изменять фазовое состояние системы в зависимости от внешних параметров, методы термодинамического анализа фазовых равновесий в различных системах;

закономерности физико-химических процессов и явлений, составляющих основу технологии микроэлектроники и производства радиоэлектронных средств;

новейшие достижения в области физики, химии, термические и нетермические физико-химические процессы, протекающие при изготовлении твердотельных электронных элементов в объёме или на поверхности твёрдого тела при взаимодействии полупроводников, металлов и диэлектриков, а также при воздействии на них различными методами;

уметь:

использовать достижения современных микро- и нанотехнологий в производстве изделий электроники; разработать технологию получения наноразмерных, аморфных и композиционных структур – наиболее перспективных современных материалов;

использовать методы теоретического и экспериментального исследования технологических процессов в практической деятельности;

использовать методы численной оценки порядка величин, характерных для создания конкретных изделий и их эксплуатации;

разработать технологию получения монокристаллических материалов –

основы современной микро- и оптоэлектроники, лазерной техники и др.;

иметь навык:

определения и расчёта основных характеристик материалов для электронных устройств;

расчёта параметров оксидных, диффузионных и ионно-легированных слоёв и тонких металлических плёнок;

расчётов коэффициента распыления материалов и параметров контакта металл-полупроводник.

Примерная учебная программа рассчитана на 216 учебных часов, из них – 80 аудиторных. Примерное распределение аудиторных часов по видам занятий: лекции – 48 часов, лабораторные занятия – 16 часов, практические занятия – 16 часов.

ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Наименование раздела, темы	Всего аудиторных часов	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия
Раздел 1. Особенности строения и свойств материалов электронной техники	40	24		16
Тема 1. Особенности строения твёрдых тел	6	4		2
Тема 2. Фазовые равновесия, диаграммы состояния	6	4		2
Тема 3. Волновые свойства микрочастиц. Виды химической связи	6	4		2
Тема 4. Физические процессы в проводниках и их свойства	4	2		2
Тема 5. Физические процессы в полупроводниках и их свойства	4	2		2
Тема 6. Диэлектрики. Физические процессы в диэлектриках	6	4		2
Тема 7. Магнитные материалы и их свойства	4	2		2
Тема 8. Физико-химические основы поверхностных процессов	4	2		2
Раздел 2. Физико-химические основы контактных явлений	6	2	4	
Тема 9. Физико-химические основы контактных явлений в микроэлектронике	6	2	4	-
Раздел 3. Физико-химические основы процессов формирования материалов и структурных элементов электронных устройств	34	22	12	
Тема 10. Классификация и физико-химические основы процессов синтеза и обработки материалов, формирования структур и элементов электронных устройств	4	2	2	-
Тема 11. Выращивание кристаллических материалов электронных устройств	4	4	-	-
Тема 12. Физико-химические основы диффузионных процессов	2	2	-	-
Тема 13. Физико-химические основы процессов термического окисления	4	2	2	-
Тема 14. Физико-химические основы процессов формирования ионно-легированных слоёв	2	2	-	-

Наименование раздела, темы	Всего аудиторных часов	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия
Тема 15. Физико-химические основы эпитаксиальных процессов	2	2	-	-
Тема 16. Физико-химические основы нанесения тонких плёнок в вакууме	6	2	4	-
Тема 17. Физико-химические основы химического осаждения плёнок. Электрохимическое окисление и осаждение	4	4	-	-
Тема 18. Физико-химические основы процессов удаления веществ с поверхности твёрдых тел	6	2	4	-
Итого	80	48	16	16

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

РАЗДЕЛ 1. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

ТЕМА 1. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Агрегатные состояния вещества. Строение твёрдых тел: аморфные, стеклоподобные, кристаллические. Симметрия в твёрдых телах. Виды симметрии. Сингонии. Кристаллические решётки. Решётки Браве. Основные виды решёток, характеристики. Обозначение узлов и направлений в кристаллах. Индексы Миллера. Дефекты структуры кристаллов, их классификации. Точечные дефекты (по Шоттки, по Френкелю, примесные). Дислокации, виды дислокаций их образование. Точечные, линейные, поверхностные, объёмные дефекты и их влияние на физические свойства материалов.

ТЕМА 2. ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ, ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

Термодинамические условия фазовых равновесий и переходов. Уравнение Клаузиуса-Клапейрона. Закон распределения Нернста-Шилова. Коэффициент распределения и сегрегации. Правило фаз Гиббса. Комплексный физико-химический анализ и его основные принципы. P – T диаграммы однокомпонентных систем. Термоанализ, T – x диаграммы бинарных систем и их основные типы. Диаграммы с простой эвтектикой, дистектикой и перитектикой. Диаграммы с ограниченной и неограниченной растворимостью компонентов в твёрдом состоянии. Диаграммы состояния полупроводниковых систем и их значение для микроэлектроники.

ТЕМА 3. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ. ВИДЫ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Волновые свойства микрочастиц. Уравнение Шрёдингера. Движение свободной частицы. Туннельный эффект. Виды химической связи. Образование ионной связи. Свойства ионных кристаллов. Образование и свойства ковалентной связи. Особенности химической связи в полупроводниках. Образование металлической связи. Свойства металлов. Молекулярная связь: способ образования и свойства. Элементы зонной теории. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны. Причины образования запрещённых зон в энергетическом спектре кристалла. Металлы, полупроводники и диэлектрики в свете зонной теории. Распределение электронов. Понятие о дырках. Примесные уровни в полупроводниках.

ТЕМА 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОВОДНИКАХ И ИХ СВОЙСТВА

Общие сведения о проводниках. Металлические и неметаллические проводящие материалы. Ионики. Композитные проводники. Физическая природа электропроводности металлов. Статистика электронов в металлах. Удельное сопротивление металлических проводников. Правило Матиссена.

Электрофизические свойства тонких металлических плёнок. Размерные эффекты. Сверхпроводимость. Сверхпроводники первого и второго рода. Эффект Джозефсона.

ТЕМА 5. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИХ СВОЙСТВА

Электропроводность полупроводников, её зависимость от внешних факторов. Механизмы рассеяния и подвижность носителей заряда в полупроводниках. Собственные, примесные, вырожденные полупроводники. Соотношение Эйнштейна. Основные и неосновные носители заряда. Механизмы рекомбинации. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Закон Бугера-Ламберта. Эффекты Ганна. Гальваномагнитные явления.

ТЕМА 6. ДИЭЛЕКТРИКИ. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Классификация диэлектриков. Поляризация диэлектриков. Механизмы поляризации. Диэлектрическая проницаемость. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты переменного поля. Электропроводность диэлектриков. Потери в диэлектриках. Виды диэлектрических потерь. Пробой диэлектриков. Неорганические диэлектрические материалы, их классификация. Керамика и стекло, ситаллы. Оксидные плёнки металлов. Стекловолоконные материалы, люминофоры. Основные свойства, получение, применение в устройствах электроники. Органические диэлектрические материалы. Полимерные диэлектрики. Композиционные порошковые пластмассы. Волокнообразные диэлектрики, лаки, клеи, битумы, компаунды. Состав, свойства, использование в изделиях устройствах электроники. Активные диэлектрики, их классификация и применение в электронных устройствах. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пирозэлектрики, электреты, жидкие кристаллы (ЖК). Классификация и свойства ЖК. Электрооптические эффекты жидких кристаллов.

ТЕМА 7. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Общие сведения о магнетизме. Классификация веществ по магнитным свойствам. Слабо- и сильномагнитные материалы. Зависимость магнитных свойств от температуры. Ферро- и ферримагнетики. Магнитомягкие и магнитотвёрдые (магнитожёсткие) материалы. Механизмы намагничивания в постоянном и переменном полях. Магнитострикционные материалы. Тонкие магнитные плёнки.

ТЕМА 8. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Поверхностные состояния. Уровни Тамма. Поверхностная проводимость и рекомбинация. Влияние состояния поверхности на параметры полупроводниковых приборов. Эффект поля. Адсорбционные процессы на поверхности твёрдого тела. Адгезия и когезия. Смачивание и растекание.

РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ТЕМА 9. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Работа выхода, термоэлектронная эмиссия. Классификация контактных явлений. Контактная разность потенциалов. Контакт двух металлов. Термоэлектрические эффекты в твёрдых телах. Контакт металл-полупроводник. Токоперенос в контакте с барьером Шоттки. Невыпрямляющий контакт. Электронно-дырочный переход. Равновесное состояние *p-n*-перехода. Выпрямление на *p-n*-переходе. Пробой *p-n*-перехода. Гетеропереходы.

РАЗДЕЛ 3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

ТЕМА 10. КЛАССИФИКАЦИЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ, ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР И ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Классификация процессов по природе, характеру их протекания и температурному диапазону: удаление веществ, диффузия, плавление, окисление, эпитаксия, спекание, термообработка, кристаллизация, рекристаллизация, фотолитография, сушка, обезгаживание и др. Основные способы передачи тепла в термических процессах: теплопроводность, конвекция, излучение. Базовые технологические процессы, стимулируемые температурой. Технологические процессы, осуществляемые при физическом воздействии: УФ-, микроволновое, радиационное облучение, воздействие ультразвуком и т.д.

ТЕМА 11. ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Процессы роста кристаллов. Методы и технологии выращивания кристаллов: одно- и двухтемпературные методы (вертикальный и горизонтальный), метод обменных реакций. Методы выращивания монокристаллов: Бриджмена-Стокбаргера, Чохральского, химических транспортных реакций, выращивание монокристаллов из расплава-раствора, метод бестигельной зонной плавки, метод Вернейля, сольвотермальные методы, в т.ч. с применением сверхкритических флюидов и др. Методы формирования микро- и нанокристаллических порошков.

ТЕМА 12. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Механизм диффузии примесей в идеальных и реальных кристаллах. Законы диффузии. Коэффициент диффузии. Зависимость коэффициента диффузии от температуры, концентрации примесей, электрического поля. Диффузия из бесконечного и конечного источников. Распределение примесей при диффузии. Влияние взаимной диффузии и реакций на характеристики

изделий микроэлектроники. Химия и физика границ раздела на поверхности и в объёме твёрдых тел. Монокристаллические и поликристаллические слои. Аморфные, мелко- и крупнокристаллические слои. Диффузия по границам зёрен. Электродиффузия в тонких слоях. Взаимодиффузия и реакции в контактах металл-металл, металл-полупроводник. Образование силицидов.

ТЕМА 13. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ

Законы роста оксидных слоёв. Кинетика процесса термического окисления кремния. Соотношение Дила-Гроува. Механизмы роста термического оксида кремния. Химические процессы при термическом окислении в сухом кислороде и в парах воды. Влияние примесей в кремнии на скорость роста оксидных слоёв. Плазменное окисление.

ТЕМА 14. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ

Пробеги ионов в аморфных и монокристаллических мишенях. Электронное и ядерное торможение. Эффект каналирования в монокристаллах. Пространственное распределение внедрённых ионов. Образование радиационных дефектов при ионной имплантации. Радиационно-стимулированная диффузия. Отжиг дефектов. Модификация структуры твёрдых тел под действием ионной бомбардировки.

ТЕМА 15. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Кинетика и механизмы процессов эпитаксии. Гомогенное и гетерогенное зарождение новой фазы. Влияние физико-химических факторов и параметров процесса на структуру и свойства эпитаксиальных слоёв. Автоэпитаксия и гетероэпитаксия из газовой и жидкой фаз. Эпитаксия соединений $A^{III}B^V$ и твёрдых растворов на их основе. Создание наноструктур с применением эпитаксиальных методов.

ТЕМА 16. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК В ВАКУУМЕ

Равновесное давление паров. Сублимация. Скорость и механизмы испарения. Термодинамика и кинетика процессов испарения простых и сложных веществ. Пространственное распределение испаряемых частиц. Состав конденсируемого слоя при испарении. Конденсация испарённых частиц на подложке. Методы испарения электронным лучом, лазерным пучком, испарение вакуумной дугой, ионное распыление, эпитаксия молекулярным лучом, магнетронное распыление и др. Особенности физико-химических процессов при электронно-лучевом испарении. Классификация и основные характеристики процессов электронно-лучевой технологии в микроэлектронике. Физические основы взаимодействия ускоренных электронов с веществом. Пробеги электронов в твёрдом теле. Тепловые

эффекты при электронно-лучевой технологии. Распределение температуры в твёрдом теле при электронно-лучевой обработке. Физико-химические основы нетермических электронно-лучевых процессов.

Характеристики разрядов в газах и основные параметры неравновесной плазмы. Физико-химические основы ионного распыления. Понятие о коэффициенте распыления. Зависимость коэффициента распыления от различных факторов. Пространственное распределение потока распылённых частиц при распылении аморфных и монокристаллических материалов. Распыление многокомпонентных материалов. Модель распыления бинарной системы. Особенности конденсации распылённых частиц. Реактивное ионное распыление.

ТЕМА 17. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЁНОК.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ И ОСАЖДЕНИЕ

Термодинамика химического осаждения плёнок. Кинетика химического осаждения плёнок. Связь физико-химических и технологических характеристик процесса осаждения. Процессы осаждения из газовой и жидкой фаз. Химическое осаждение из газовой фазы. Атомно-слоевое осаждение. Основные химические реагенты для осаждения плёнок в микроэлектронике. Механизм роста химически осаждаемых плёнок. Плёнки Ленгмюра-Блоджетт. Электрохимические методы создания металлических и оксидных плёнок. Термодинамика электрохимического осаждения металлов. Влияние физико-химических факторов и технологических параметров осаждения на структуру и свойства осаждаемых металлических плёнок. Создание оксидных плёнок методом электрохимического анодного окисления (анодирования). Анодирование вентильных металлов (Al, Ti, Zr, Hf, Ta и др.), формирование плотных, пористых и трубчатых анодных оксидов. Влияние различных факторов на структуру и свойства формируемых оксидных плёнок. Формирование наноструктурированных материалов анодированием многослойных композиций металлов. Формирование пористого кремния.

ТЕМА 18. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ УДАЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Термодинамика процессов, протекающих на поверхности раздела фаз. Физико-химические основы процессов очистки и отмытки пластин и подложек в жидкой и газовой фазах. Химические процессы в плазме и на поверхности. Физико-химические основы процессов химического и плазмохимического травления твёрдых тел. Кинетика процессов ионного травления.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ

1. Технология изделий интегральной электроники : учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов / Л. П. Ануфриев [и др.] ; под общей ред. А. П. Достанко, Л. И. Гурского. – Минск : Амалфея, 2010. – 536 с.
2. Барыбин, А. А. Физико-технологические основы макро-, микро- и нанoeлектроники / А. А. Барыбин, В. И. Томилин, В. И. Шаповалов ; под общ. ред. А. А. Барыбина. – Москва : Физматлит, 2011. – 784 с.
3. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники : монография / А. П. Достанко [и др.] ; под ред. А. П. Достанко, А. М. Русецкого. – Минск : Бестпринт, 2011. – 216 с.
4. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники : учебник : в 2-х т. : Т. 1 : Проводники, полупроводники, диэлектрики / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 448 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

5. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы / А. И. Гусев, А. А. Ремпель. – Москва : Физматлит, 2000. – 224 с.
6. Воробьёв, Л. Б. Оптические свойства наноструктур : учебное пособие / Л. Б. Воробьёв [и др.] ; под ред. Е. Л. Ивченко, Л. Е. Воробьёва. – Санкт-Петербург : Наука, 2001. – 188 с.
7. Зайцев, Ю. В. Расчёт физико-химических характеристик элементов проводников : методическое пособие / Ю. В. Зайцев, Т. К. Кузицина, Д. Е. Кустов. – Москва : МЭИ, 2001. – 8 с.
8. Андриевский, Р. А. Наноструктурные материалы / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. – Москва : Академия, 2005. – 192 с.
9. Пул, Ч. П. Нанотехнологии / Ч. П. Пул, Ф. Дж. Оуэнс. – Москва : Техносфера, 2005. – 336 с.
10. Шабанова, Н. А. Химия и технология нанодисперсных оксидов : учебное пособие / Н. А. Шабанова, В. В. Попов, П. Д. Саркисов. – Москва : Академкнига, 2006. – 309 с.
11. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва : Физматлит, 2009. – 416 с.
12. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик [и др.]. – Минск : БГУ, 2008. – 375 с.
13. Рамбиди, Н. Г. Физические и химические основы нанотехнологий / Н. Г. Рамбиди, А. В. Берёзкин. – Москва : Физматлит, 2008. – 456 с.
14. Рыжонков, Д. И. Наноматериалы : учебное пособие / Д. И. Рыжонков, В. В. Левина, Э. Л. Дзидзигури. – Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 365 с.

15. Гаврилов, С. А. Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники / С. А. Гаврилов, А. Н. Белов. – Москва : Высшее образование, 2009. – 257 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЩАЮЩИХСЯ

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- подготовка докладов к практическим занятиям;
- выполнение индивидуальных заданий к практическим занятиям;
- обработка результатов лабораторных работ и оформление отчётов;
- выполнение контрольных работ;
- выполнение интерактивных тестов в системе электронного обучения;
- самостоятельная работа с учебно-методической и научной литературой.

ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМЫХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЩАЮЩИХСЯ

Примерным учебным планом по специальности 6-05-0713-02 «Электронные системы и технологии» в качестве формы промежуточной аттестации по учебной дисциплине «Физико-химические основы микро- и нанoeлектроники» рекомендуется экзамен и зачёт. Оценка учебных достижений обучающихся производится по десятибалльной шкале в первом случае и по системе «зачтено/не зачтено» – во втором. Для текущего контроля по учебной дисциплине и диагностики компетенций могут использоваться следующие формы:

- устный опрос;
- тестирование;
- контрольные работы;
- письменный отчёт по лабораторным работам с его устной или письменной защитой.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕТОДЫ (ТЕХНОЛОГИИ) ОБУЧЕНИЯ

Основные рекомендуемые методы (технологии) обучения, отвечающие целям и задачам учебной дисциплины:

- объяснительно-иллюстративный метод;
- репродуктивный метод;
- метод проблемного изложения;
- частично-поисковый, или эвристический, метод;
- исследовательский метод.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

1. Изучение размерного эффекта в тонких металлических плёнках.
2. Исследование выпрямляющего контакта металл-полупроводник.
3. Исследование механизма и кинетики процесса термического окисления кремния.
4. Исследование механизма и кинетики процесса ионного распыления.
5. Исследование плазменного разряда в вакуумной камере.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Расчёт плотности упаковки кристаллической структуры, плотности веществ по параметрам кристаллической структуры, расчёт количества атомов в единице объёма.
2. Построение фазовых диаграмм. Обозначение фазовых полей. Определение состава фаз.
3. Расчёт неопределённости положения, энергии, дебройлевской длины волны микрочастиц.
4. Расчёты по статистике свободных носителей заряда в зоне проводимости различных металлов при различных температурах.
5. Расчёт вероятности появления дырок и электронов в валентной зоне и зоне проводимости при определённой температуре, числа уровней в разрешённой зоне, расчёт концентрации собственных носителей заряда в полупроводнике с известной шириной запрещённой зоны и т. п.
6. Активные и пассивные диэлектрики. Классификация и рассмотрение специфических свойств активных диэлектриков. Принцип действия, устройство и материалы твёрдотельных лазеров.
7. Магнитные материалы и механизмы, обуславливающие появление тех или иных магнитных свойств. Ферро-, ферри-, анитиферромагнетики. Методы и технологии получения магнитных материалов.
8. Расчёт основных показателей поверхностных явлений: скорость поверхностной рекомбинации, время жизни носителей заряда, поверхностное натяжение, силы когезии, силы адгезии.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ

(необходимого оборудования, наглядных пособий и др.)

1. Установка вакуумного напыления.
2. Оптический микроскоп.
3. Измеритель удельного сопротивления.
4. Трубчатая печь для нагрева образцов до температуры 1500 °С
5. Вакуумная камера для получения, наблюдения и исследования плазменного разряда.
6. Персональные компьютеры под управлением операционных систем *Windows* или *Linux* с установленными пакетами прикладных программ типа *Microsoft Office* или *LibreOffice*, программы *Origin* для обработки результатов лабораторных работ, подготовки отчётов по ним и подготовки докладов презентаций на предложенные преподавателем темы.