

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной
деятельности

Е.М. Разинкина

«30» сентября 2019 г.

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ЭКЗАМЕНА
СПЕЦИАЛЬНАЯ ДИСЦИПЛИНА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ
28.06.01 – НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ**

Направленность (профиль):

1. Нанотехнологии и наноматериалы

Директор Института
машиностроения, материалов и транспорта

А.А. Попович

Руководитель основных
образовательных программ ИММиТ

О.В. Кочнева

г. Санкт-Петербург
2019

Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям)

Введение

В основу данной программы положены следующие вузовские дисциплины: кристаллография; методы исследования состава и структуры наноматериалов; физика и химия полупроводников, технология материалов электронной техники; физико-химические основы технологии микроэлектроники; процессы микро- и нанотехнологии. Программа разработана кафедрой физической химии, микро- и нанотехнологий

1. Физические и физико-химические свойства наночастиц и наноматериалов

Основы кристаллографии. Симметрия кристаллов и анизотропия их свойств. Атомные и ионные радиусы. Химическая связь. Соотношение ионных радиусов и структура кристаллов. Типы структур кристаллов. Структура и симметрия идеальных и реальных кристаллов; основные типы дефектов кристаллической структуры. Политипизм и полиморфизм. Диэлектрические и магнитные свойства твердых тел, оптические свойства, ферромагнетизм, сегнетоэлектричество, сверхпроводимость.

Электрические свойства металлов, диэлектриков и полупроводников. Зонная теория идеальных и реальных полупроводников. Распределение Ферми-Дирака. Электропроводность металлов, полупроводников и диэлектриков и их физическая природа. Собственные и примесные полупроводники. Доноры, акцепторы, глубокие центры. Диффузия и дрейф носителей, генерация и рекомбинация, электронно-дырочный переход; поверхностные электронные состояния, эффект поля.

Элементарные полупроводники. Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$. Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Получение широкозонных материалов – нитриды галлия, алюминия, бора. Применение соединений $A^{III}B^V$ в СВЧ-технике, оптоэлектронике, квантовой электронике. Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$ и $A^{IV}B^{VI}$. Физико-химические, электрофизические и оптические свойства. Области применения кристаллов $A^{II}B^{VI}$: лазеры, оптические модуляторы, акустоэлектронные приборы, ИК-фотоприемники. Аморфные полупроводники. Аморфный кремний и сплавы на его основе. Магнитные материалы. Металлы и сплавы, ферриты, магнитодиэлектрики, магнитные полупроводники, аморфные интерметаллические соединения.

Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Поглощение и отражение света. Эффект Фарадея. Фотопроводимость. Фотоэффект. Эмиссия света из полупроводников. Межзонная излучательная, безизлучательная и ударная рекомбинация. Катодо-, фото- и электролюминесценция. Излучательная рекомбинация.

Поляризация диэлектриков и ее физическая сущность. неполярные и полярные диэлектрики. Проводимость диэлектриков и ее физическая природа. Диэлектрические потери и их природа.

Элементарные процессы зародышеобразования и роста кристаллов. Существующие теории роста на атомно гладкой и атомно шероховатой поверхности, теории нормального и непрерывного роста. Теоретические основы кристаллизационных методов очистки и выращивания монокристаллов.

Термодинамическая стабильность наноразмерных материалов. Фазовые и структурные переходы в сверхтонких (поверхностных) системах. Теория зародышеобразования при формировании новой фазы на поверхности и в объеме твердого тела. Образование дисперсных структур на поверхности и в объеме при эпитаксии, ионной имплантации и термообработке.

Поверхность как особая область твердого тела. Идеальная и реальная поверхность твердого тела. Структурно-механические свойства поверхности: микро- и наношероховатость, микро- и нанопористость, микротрещины, краевые и винтовые дислокации, точечные дефекты. Броуновское движение, ансамбль наночастиц. Равновесие в макроскопическом ансамбле наночастиц в присутствии слабого поля. Поверхностная энергия ансамбля наночастиц.

Квантовые точки, проволоки и пленки, связь электронного спектра квантовой точки с ее размером. Металлические наночастицы, поверхностный плазмонный резонанс. Применение материалов с квантовыми точками и металлическими наночастицами.

Агломерация. Получение статистически распределенных по поверхности подложки нанокристаллитов агломерацией пленок нанометровой толщины.

2. Наноматериалы и наноструктуры электронной техники и технологии их получения

Общая классификация материалов по составу, свойствам и техническому назначению. Физическая природа электропроводности металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков и композиционных материалов; сверхпроводящие металлы и сплавы; характеристика проводящих и резистивных материалов во взаимосвязи с их применением в электронной технике.

Технологические и экспериментальные исследования процессов получения компактных наноматериалов и их обработки. Методы модифицирования поверхности материалов, облучением ускоренными частицами, термической и термомеханической обработкой. Методы модифицирования расплавов и получения из них материалов с нанокристаллической структурой. Аморфизация металлов и сплавов и их кристаллизация. Компактирование наночастиц. Виды процессов прессования: одноосное сжатие, всестороннее сжатие, динамическое и магнитоимпульсное прессование, горячее изостатическое прессование. Деформационные методы получения нанометаллов и сплавов: кручение, равноканальное угловое прессование, механическое истирание. Физико-химические основы получения нанопорошков соединений твердофазным восстановительным синтезом с использованием ультрадисперсных компонентов (ламповой сажи, аморфного бора и т. п.).

Типы эпитаксиальных процессов. Механизмы роста кристаллов при эпитаксиальных процессах. Молекулярно-лучевая эпитаксия, эпитаксия металлоорганических соединений из газовой фазы.

Золь-гель технология. Теоретические основы золь-гель метода. Получение наноматериалов золь-гель методом.

Методы молекулярного наслаивания. Сущность и закономерности процессов молекулярного наслаивания. Получение сверхтонких пленок различных материалов и

наноструктур методом молекулярного наслаивания. Синтетические возможности метода, способы и примеры осуществления.

Процессы формирования наноструктур на подложках методами нанолитографии, ионными и атомными пучками, зондовыми методами. Фоторезисты. Определение и классификация. Требования к фоторезистам. Разрешающая способность и химическая стойкость. Основные фототехнические характеристики фоторезистов. Позитивные и негативные фоторезисты. Фотохимические реакции в процессе фотолитографии. Материалы, используемые для производства фоторезистов и проведения процессов литографии. Электронорезисты и рентгенорезисты. Их характеристики. Технология производства.

Оптическая литография (фотолитография). DUV-литография (литография глубокого ультрафиолета). Источники когерентного излучения с длинами волн 193 нм и 157 нм. Материалы для оптических систем. Способы увеличения разрешающей способности (внеосевое освещение, коррекция эффекта близости, использование фазосдвигающих масок, двухслойных фоторезистов и др.).

Электронолитография и ионолитография. Сущность и сравнительная характеристика электронно-лучевой и ионно-лучевой вариантов литографии.

Механическая литография. Литография на основе переноса рисунка путем механического впечатывания в термопластичный резист (imprint-литография). Основные проблемы метода и пути их решения. Устранение сцепления резиста и маски. Использование двухслойных резистов. Модификации метода.

Вакуум. Уровни вакуума. Режимы течения. Число Кнудсена. Поток массы и проводимость. Скорость откачки. Расчёт требуемой производительности насосов. Фазы откачки. Измерение газовых потоков. Метод двух манометров.

Форвакуумные насосы. Диффузионные насосы. Сорбционные насосы. Молекулярные и турбомолекулярные насосы. Криогенные насосы и ловушки. Области применения.

Принцип действия насосов. Конструкция. Вакуумные масла. Техника безопасности при работе с вакуумными системами. Средства измерения давления в вакуумных системах. Испарение. Зависимость давления насыщенных паров от температуры. Газовый разряд.

Ионизация газов, ионизационный потенциал. Рекомбинация. Вольтамперная характеристика несамостоятельного разряда. Тлеющий, дуговой, искровой и коронный разряды. Плазма и ее свойства. Характеристики плазмы (изотермичная, неизотермичная, равновесная, неравновесная, высоко-, низкотемпературная, идеальная, неидеальная).

Ионизованный газ и плазма; элементарные процессы в плазме и на пограничных поверхностях; основные методы генерации плазмы; модели для описания свойств плазмы; типы газовых разрядов; общие свойства плазмы: явления переноса, плазма в магнитном поле, колебания, неустойчивости и эмиссионные свойства плазмы, излучение плазмы.

Получение наночастиц конденсацией паров металлов из газовой фазы. Термодинамика и кинетика процесса испарения. Уравнение Кнудсена. Испарение сплавов. Основные принципы метода получения наночастиц металлов испарением и конденсацией.

Вакуумные методы получения пленок металлов и диэлектриков. Термическое испарение в вакууме. Катодные методы распыления: катодное распыление, магнетронное распыление, распыление с ВЧ-смещением. Ионно-лучевое распыление. Механизм распыления

неорганических материалов. Процессы зародышеобразования и роста новой фазы при химическом осаждении из газовой фазы.

Основы процессов формирования нанообъектов термоактивированным химическим осаждением из газовой фазы (CVD-процессы), молекулярным напылением (ALD-процессы) и химическим взаимодействием твердого тела с газовой фазой.

Основные закономерности кинетики гетерогенных процессов. Стадийный характер гетерогенных процессов. Влияние основных технологических параметров на кинетику отдельных стадий.

Методы получения нанообъектов химическим осаждением из газовой фазы. Кинетические режимы протекания процессов химического осаждения из газовой фазы. Методы получения нанокпозиционных материалов химическим осаждением из газовой фазы. Осаждение в наноструктурированные матрицы.

Основы процессов получения наночастиц и наноматериалов плазмохимическими методами. Закономерности плазмохимических процессов. Методы синтеза нанопорошков плазмохимическими методами. Осаждение тонких пленок и покрытий различных материалов, формирование поверхностных наноструктур, фуллеренов, углеродных нанотрубок и материалов на их основе плазмохимическим осаждением из газовой фазы, основанным на использовании низкотемпературной плазмы, создаваемой при низких давлениях.

Углеродные наноматериалы. Стабильные и метастабильные формы углерода. Диаграмма состояния углерода. Фуллерены, их строение. Методы получения фуллеренов. Химическая связь в фуллеренах.

Углеродные нанотрубки. Структура трубок. Номенклатура. Одностенные и многостенные трубки. Физико-химические основы методов получения нанотрубок: электродугового, испарения графита, лазерной абляции, каталитического химического осаждения из пара, твердофазных процессов пиролиза и испарения.

Металлические нанопроволоки. Классические и квантовые нити. Методы получения металлических нанопроволок: электрохимическое восстановление в пористых матрицах, трековых мембранах, блочных сополимерах и анодном оксиде алюминия. Условия проведения процесса. Кинетика роста нитей. Химическое осаждение металла на одномерных объектах. Методы получения металлических квантовых нитей.

Классификация пористых сред по размеру пор. Методы определения пористости. Нанопористые и мезопористые системы. Цеолиты: методы синтеза и свойства. Мезопористые материалы и молекулярные сита: методы синтеза и свойства. Получение пористых полупроводников электрохимическим методом. Механизмы образования пористого кремния при жидкофазном анодировании. Область условий, в которой образуются поры. Получение электрохимической обработкой других пористых полупроводников. Получение пористого оксида алюминия методом анодирования алюминия.

Методы зондовой нанотехнологии. Использование зондовой сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии для формирования упорядоченных наноструктур. Основы процессов окисления, испарения, адсорбции, десорбции,

осаждения, и травления, локализованных под зондами туннельного и атомно-силового микроскопов.

Наноккомпозиты. Классификация наноккомпозитов (по химической природе матрицы, по химической природе, форме и характеру укладки наполнителей из наночастиц и др.). Методы получения наноккомпозитов *in situ* и *ex situ*.

Наноккомпозитные материалы на основе полимеров. Приготовление наноккомпозитов из нанопорошков. Взаимодействие между наночастицами и матрицей. Примеры наноккомпозитов: глина-полимер, углеродные нанотрубки-полимер и металл-полимер.

Керамические материалы и наноккомпозиты. Зависимость свойств керамики от размера зерен. Получение керамики спеканием. Особенности спекания нанопорошков, связанные со снижением температуры фазовых превращений в наносистемах. Прессование с последующим спеканием, горячая экструзия и др. Использование взрывного и магнитно-импульсного прессования.

Получение наноккомпозитов путем заполнения пустот в нанопорошках материалом матрицы. Приготовление наноккомпозитов путем одновременного или многократного последовательного осаждения фаз. Сверхтвердые композиционные нанопокрyтия. Магнитные жидкости.

Процессы самоорганизации и самоформирования в технологии наноструктур. Проблемы создания упорядоченных наноструктурированных материалов на большой площади.

3. Методы исследования наночастиц и наноматериалов

Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ поликристаллов. Оптические методы исследования. Спектроскопические методы анализа. Инфракрасная спектроскопия. Методы линейной оптики (эллипсометрия). Нелинейная оптика. Микроскопические исследования. Электронная микроскопия. Просвечивающая электронная микроскопия.

Разрешающая способность. Полевой ионный микроскоп. Масспектроскопический анализ. Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Рассеяние ионов на поверхности. Дифракция медленных электронов. Оже-спектроскопия. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса. Термические методы анализа.

Методы определения химического состава. Химические методы анализа: экстракция, хроматография, полярография, потенциометрия. Объемный анализ. Гравиметрия. Спектральный анализ. Атомно-адсорбционный анализ. Люминесцентный метод. Молекулярная спектроскопия. Рентгено-флуоресцентный анализ, лазерная и вторично-ионная масс-спектроскопия.

4. Физические основы приборов электронной техники

Кинетические явления в полупроводниках. Электро- и теплопроводность полупроводников. Эффект Холла. Термо-ЭДС. Эффект Пельтье.

Физические основы работы основных типов полупроводниковых приборов: диодов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, диодов Ганна.

Пьезоэффект. Основные принципы акустоэлектроники. Принцип работы пьезоэлектрических резонаторов и монолитных пьезоэлектрических фильтров.

Фотоэлектронные приборы, Фотоприемники и солнечные батареи. Полупроводниковые фотоприемники, полупроводниковые датчики, сенсорные устройства и преобразователи. Принципы действия и характеристики.

Квантово-размерные эффекты в полупроводниковых и диэлектрических нанокристаллах, их влияние на оптические свойства (люминесценция, поглощение, фононные спектры, двулучепреломление). Оптоэлектронные приборы на основе наноструктурированных полупроводников (квантовые точки и нити). Фотонные кристаллы.

Элементы микросистемной техники. Микромеханические сенсоры. Механические конструкции: объемные, мембранные, балочные, струнные. Виды преобразователей: пьезоэлектрические, тензорезистивные, емкостные. Датчики на основе микромеханических преобразователей: давления, расхода, пульсаций, смещения, силы, ускорения, крена, микрогирометры, микрофоны. Микромеханические приводы движения: пьезоэлектрические, емкостные, термомеханические, электромагнитные, пневматические актюаторы. Устройства микросмещения, микропозиционирования и микрозахвата. Микро- и наноманипуляторы.

5. Технология и оборудование производства наночастиц, наноматериалов и наноструктур

Методы проектирования технологического оборудования для получения субмикронных и наноразмерных структур. Системный подход к выбору оптимальных технических решений методами моделирования и формально эвристического проектирования. Системы контроля и управления процессами обработки в технологическом оборудовании нанесения и травления материалов.

Проблемы комплексной автоматизации производства на современном уровне. Техно-экономический анализ технологического и производственного процесса. Общие принципы автоматизации оборудования. Общие сведения об управлении технологическими процессами а оборудованием. ЭВМ и информационно-управляющие комплексы. Гибкие автоматизированные системы управления технологическими процессами и производством.

Методология проектирования технических систем. Основные компоненты и процедурная модель проектирования. Формализация основных процедур проектирования. Оптимальное проектирование технических систем. Методы оптимизации. Поисковые методы математического программирования. Общие методы многокритериальной оптимизации.

Обеспечение и поддержание в чистых помещениях среды с заданными параметрами. Экологические аспекты субмикронной и нанотехнологии. Принципы организации чистых производственных помещений. Создание средств технологической экологии при производстве наночастиц, наноматериалов и наноструктур. Кластерный принцип организации полупроводникового производства наночастиц, наноматериалов и наноструктур.

Образование и распространение аэрозольных частиц в технологических объемах микроэлектроники. Механизм разрушения трущихся поверхностей и интенсивность

генерации загрязняющих частиц узлами технологического оборудования. Перенос и диффузия аэрозольных частиц в среде. Моделирование теплопереноса в чистых объемах микроэлектроники. Физико-химические аспекты подлета, осаждения и удержания аэрозольных частиц на поверхности полупроводниковых пластин.

Методы очистки исходных материалов и структур; оборудование, применяемое для очистки.

Технология и оборудование для получения тонких пленок в вакууме: вакуум-термическое испарение, электронно-лучевое испарения, высокочастотное распыление диэлектриков, ПТ и ВЧ магнетронное распыление, реактивное ионное распыление, Осаждение пленок в плазме из парогазовых смесей. Особенности проектирования, расчета и моделирования узлов и систем технологического оборудования нанесения пленок. Методы и оборудование осаждения пленок сложного состава, реактивное распыление материалов.

Технология и оборудование для получения эпитаксиальных слоев. Принципиальные схемы проведения эпитаксиальных процессов. Промышленные методы эпитаксиального наращивания и виды применяемого оборудования. Эпитаксия при пониженных давлениях, молекулярно-лучевая эпитаксия. Технические требования, предъявляемые к оборудованию. Типы промышленных установок. Методы контроля и стабилизации параметров эпитаксиальных процессов. Микропроцессорное управление процессами эпитаксии. Моделирование работы эпитаксиального оборудования. Алгоритмы и программы расчета и моделирование процесса и основных элементов ТО эпитаксии.

Методы и оборудование травления наноструктур: ионное, реактивное ионное и плазмохимическое с использованием постоянного тока, ВЧ и СВЧ разрядов. Физика процессов, особенности проектирования и моделирования процессов, узлов и систем ТО. Системы с электронно-циклотронным резонансом. Методы анизотропного травления полупроводников (Bosh-процесс, ICP-процесс).

Современное аналитическое вакуумное оборудование. Методы получения высокого вакуума. Вторично-ионные масс-спектрометры, Оже-спектрометры, оборудование, использующее рентгеновское и лазерное излучение.

Литографические процессы в производстве наноструктур. Анализ точности литографического процесса и определение требований к ТО. Сопоставительный анализ предельных возможностей процессов и ТО литографии, основанных на применении ультрафиолетового, лазерного и рентгеновского излучений, электронных и ионных пучков. Схемы процессов проектирования и формирования изображений на пластинах в производстве интегральных микросхем.

Оборудование оптической литографии (генераторы изображений, фотоповторители, установки совмещения и экспонирования и др.). Влияние дифракции и аберраций оптических систем на качество изображения. Методы машинного расчета влияния аберраций. Прецизионные системы координатных перемещений. Алгоритмы и программы расчета оптических систем и систем координатных перемещений.

Электронная литография. Классификация и принципиальные схемы электронно-лучевых и проекционных установок электронной литографии. Влияние различных факторов на качество изображения: аберраций, рассеяния электронов, эффектов близости и т. д. Конструкции, методы проектирования, расчета и моделирования основных узлов ТО электронной литографии: электронных пушек, систем формирования, переноса и

отклонения пучков, систем совмещения, систем перемещения и позиционирования пластин. Современные проблемы и тенденции развития ТО электронной литографии.

Основные виды контрольно-измерительных операций на различных стадиях изготовления наночастиц, наноматериалов и наноструктур. Контролируемые параметры, методы и приборы неразрушающего контроля.

Вопросы к вступительному экзамену:

1. Структура и симметрия идеальных и реальных кристаллов; основные типы дефектов кристаллической структуры.
2. Электрофизические свойства полупроводниковых соединений АІІІВV.
3. Особенности физико-химических свойств аморфных полупроводников.
4. Существующие теории роста кристаллов
5. Теоретические основы зонной плавки как кристаллизационного метода очистки веществ
6. Термодинамическая стабильность наноразмерных материалов.
7. Поверхность как особая область твердого тела.
8. Деформационные методы получения нанометаллов и сплавов: кручение, равноканальное угловое прессование, механическое истирание
9. Типы эпитаксиальных процессов. Молекулярно-лучевая эпитаксия, эпитаксиальные процессы химического осаждения из газовой фазы.
10. Теоретические основы золь-гель метода. Получение наноматериалов золь-гель методом.
11. Сущность и закономерности процессов молекулярного наслаивания. Получение сверхтонких пленок различных материалов и наноструктур методом молекулярного наслаивания.
12. Формирование наноструктур на подложках методами электронной нанолитографии.
13. Формирование наноструктур на подложках методами фотолитографии нанолитографии, ионными и атомными пучками, зондовыми методами.
14. Формирование наноструктур на подложках зондовыми методами.
15. Методы получения вещества в виде наночастиц
16. Методы получения вещества в виде нанотрубок
17. Вакуумные методы получения пленок металлов
18. Наноккомпозиты. Классификация наноккомпозитов (по химической природе матрицы, по химической природе, форме и характеру укладки наполнителей из наночастиц и др.).
19. Наноккомпозитные материалы на основе полимеров.
20. Процессы самоорганизации и самоформирования в технологии наноструктур.

21. Принципы организации чистых производственных помещений. Создание средств технологической экологии при производстве наночастиц, наноматериалов и наноструктур.
22. Общая характеристика методов создания наноструктур ионным, реактивным ионным и плазмохимическим травлением.
23. Электронная микроскопия как метод исследования наноматериалов.
24. Общая характеристика методов исследования структуры наноматериалов.
25. Общая характеристика темплатных методов получения наноматериалов.

Основная литература

1. Чистяков Ю.Д., Райнова Ю.П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. М.: Металлургия, 1979.
2. Раскин А.А., Картушина А.А., Баровский Н.В. Технология материалов электронной техники. М.: МИЭТ, 1999.
3. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. Материаловедение / Под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002.
4. Будагян Б.Г., Шерченков А.А. Материалы твердотельной электроники. М.: МИЭТ, 1999.
5. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2001.
6. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
7. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
9. Кардона М. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002.
10. Чистые помещения / Под ред. И. Хаякавы. М.: Мир, 1990.
11. Смирнов Н.Н., Курочкина М.И., Волжинский А.И., Плесовских А.В. //Процессы и аппараты химической технологии (основы инженерной химии). Учебник для вузов. СПб.: «Химия», 1996, 407с.
12. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф.. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. М.: Высшая школа, 1983, 270 с.
13. Уфимцев В.Б., Лобанов А.А.. Гетерогенные равновесия в технологии полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1981, 215 с.
14. Нанотехнология в ближайшем десятилетии //под ред. Роко М.К., Уильямса Р.С., Аливисатоса П.. М.: Мир, 2002. 292 с.
15. Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology v.1 // Ed/ Hari Singh Nalwa, Academic Press, 2000, 645 p.
16. Михайлов М. Д. Современные проблемы материаловедения. Нанокompозитные материалы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 207 с.
17. В.Л. Балкевич. Техническая керамика. Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат. 1984. 256 с.
18. Новые материалы. Под ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС. 2002. 736 с.
19. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений // Андриевский Р.А., Рагуля А.В. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 192 с.
20. Елисеев А.А. Функциональные наноматериалы. Физматлит, 2010. 452 с.
21. Картер С., Нортон М. Керамические материалы. Свойства, технологии, применения, пер. с англ. Издательский Дом «Интеллект». 2011

22. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. Издательский Дом «Интеллект». 2010. 352 с.
23. C.C. Barry, N.M. Grant. Ceramic Materials / Science and Engineering. Springer. 2007. 716 p.
24. Dielectric Polymer Nanocomposites. Editor J. Keith Nelson. Springer Science+Business Media, LLC. 2010. 368 p.
25. Nanostructured Materials. Selected Synthesis Methods, Properties and Applications. Editors. Ph. Knauth, J. Schoonman. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. Kluwer Academic Publishers. 2004. 188 p.
26. Springer Handbook of Nanotechnology. Editor B. Bhushan. Springer Science+Business Media, Inc. 2007. 1916 p.