

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

Химический факультет



УТВЕРЖДАЮ:

И.о. декана химического факультета

*А.С. Князев*  
А.С. Князев

«*26*» *августа* 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

**Химия материалов электронной техники**

специальности

**04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия**

специализация:

**Фундаментальная и прикладная химия**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Химик. Преподаватель химии**

Год приема

**2022**

Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.1.ДВ.01.03.03

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

*В.В. Шелковников*  
В.В. Шелковников

Председатель УМК

*В.В. Хасанов*  
В.В. Хасанов

Томск – 2022

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ОПК-1. Способен анализировать и интерпретировать результаты химических экспериментов, наблюдений и измерений.

– ОПК-2. Способен проводить с соблюдением норм техники безопасности химический эксперимент, включая синтез, анализ, изучение структуры и свойств веществ и материалов, исследование процессов с их участием.

– ПК-1. Способен выбирать и использовать технические средства и методы испытаний для решения исследовательских задач химической направленности, поставленных специалистом более высокой квалификации.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-1.1. Систематизирует и анализирует результаты химических экспериментов, наблюдений, измерений, а также результаты расчетов свойств веществ и материалов.

ИОПК-1.2. Предлагает интерпретацию результатов собственных экспериментов и расчетно-теоретических работ с использованием теоретических основ традиционных и новых разделов химии.

ИОПК-1.3. Формулирует заключения и выводы по результатам анализа литературных данных, собственных экспериментальных и расчетно-теоретических работ химической направленности.

ИОПК-2.2. Проводит синтез веществ и материалов разной природы с использованием имеющихся методик.

ИПК-1.2. Готовит элементы документации, проекты планов и программ отдельных этапов НИР.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить основы строения твердых тел, типы и роли дефектов в твердых телах, взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов; теоретические основы способов очистки полупроводниковых материалов от примесей и их легирования; методы синтеза твердых веществ, принципы протекания твердофазных реакций;

– Научиться оценивать возможности направленного изменения тех или иных физических и физико-химических свойств материалов путем их модификации и выбора условий получения на основании использования знаний о составе, структуре и реакционной способности твердых тел.

– Владеть сведениями об областях применения металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов в опто- и электронной техники.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор. Дисциплина входит в модуль Химия материалов.

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

Семестр 7, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: неорганическая химия, аналитическая химия, органическая

химия, физическая химия, высокомолекулярные соединения, коллоидная химия, строение вещества.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часов, из которых:

– лекции: 32 ч.;

– практические занятия: 32 ч.;

в том числе практическая подготовка: 32 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Введение. Основные материалы электронной техники. Представления науки о твердом состоянии вещества. Связь свойств материалов со структурой и составом. Классификация твердых материалов по химическому составу, структуре, свойствам и функциональному назначению. Фундаментальные и прикладные проблемы электронного материаловедения.

### **Ч.1 Полупроводниковые материалы**

Тема 1. Классификация элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений.

Классификация твердых тел: металлы, изоляторы, полупроводники. Основные физические и химические свойства полупроводников. Распределение элементарных полупроводников в периодической системе Д. И. Менделеева. Двойные соединения, классификация их. Правила образования алмазоподобных полупроводников с тетраэдрической координацией атомов. Изозлектронные ряды. Тройные, четвертные и т.д. полупроводниковые соединения. Связь свойств соединений с положением в периодической системе. Фазы переменного состава. Твердые растворы. Природа химической связи, структура и координация атомов. Критерии полупроводимости.

Тема 2. Теория дефектного кристалла

Задачи статистической термодинамики и квантовой статистики в теории дефектного кристалла. Современная трактовка законов простых и кратных отношений и постоянства состава в применении к кристаллическим решеткам. Ближний и дальний порядок в кристалле.

Виды дефектов: точечные, плоские, объемные, протяженные. Классификация дефектов и дефектных структур: структуры смещения, разрыхления, взаимозамещения, деления, вычитания, замещения, внедрения. Собственный беспорядок в кристаллах (тепловые дефекты). Зависимость дефектов Френкеля и Шоттки от температуры. Термодинамический вывод устойчивости кристаллов с дефектами. Сложные дефекты. Виды взаимодействия дефектов в кристаллах. Примеры.

Полупроводники как фазы переменного состава. Критерии устойчивости фаз, область гомогенности. Классификация фаз переменного состава.. Понятие о термодинамическом р-п-переходе. Применение к фазам переменного состава правила фаз Гиббса.

Равновесия в дефектных кристаллах: гомогенное, гетерогенное, полное внутреннее равновесие, частичное или «квазиравновесное» состояние. Графический метод расчета равновесной концентрации дефектов (метод Крюгера и Винка).

Химические следствия существования дефектов в кристаллах. Влияние дефектов на физические свойства кристаллов.

Тема 3. Методы очистки полупроводниковых соединений

Требования чистоты в отношении полупроводниковых веществ. Классификация особо чистых веществ и материалов, применяемых в полупроводниковой технике. Нормирование микропримесей. Хранение особо чистых веществ.

Особенность методов получения особо чистых веществ. Основные проблемы глубокой очистки. Термодинамическая устойчивость кристалла с примесью. Основные термодинамические характеристики особочистых веществ.

*Физико-химические методы очистки веществ.* Экстракция. Соосаждение. Ионный обмен. Дистилляция. Ректификация. Электрохимические методы. Хроматографические методы. Принцип методов, основные законы и закономерности процессов, математические описания.

*Физические методы очистки.* Кристаллизация твердого вещества из расплава. Закон распределения. Коэффициент распределения  $K$ . Термодинамический вывод  $K$  и его зависимость от температуры и концентрации.

Метод зонной плавки (тигельной и бестигельный). Вывод уравнения Пфанна. Графическое распределение примесей вдоль стержня. Предельное распределение. Влияние различных факторов на степень очистки при зонной плавке. Зонное выравнивание.

Роль диффузионных процессов при зонной очистке. Равновесные и неравновесные условия кристаллизации. Графический способ определения  $K_{эф}$ .

Метод направленной кристаллизации. Сущность метода. Вывод уравнения. Критерии эффективности очистки кристаллизационными методами.

Тема 4. Синтез полупроводниковых соединений.

Прямой синтез соединений сплавлением рассчитанных количеств компонентов. Синтез соединений, имеющих легко летучий компонент. Температурная зависимость упругости пара. Равновесие в газовой системе, содержащей молекулы разного сорта. Термодинамический расчет условий получения стехиометрических кристаллов (на примере синтеза арсенида галлия). Полное равновесное описание диаграммы состояния Ga-As). Двух-, трехтемпературный синтез. Химические методы синтеза.

Тема 5. Методы выращивания монокристаллов

Общая характеристика методов выращивания. Общая термодинамическая теория роста кристаллов. Вероятность и термодинамические условия образования критических зародышей. Влияние пересыщения и поверхностно-активных веществ на величину зародыша кристалла.

*Выращивание из расплавов.*

Общая характеристика методов выращивания из расплава. Метод Чохральского. Технологические условия получения совершенных монокристаллов. Распределение и выравнивание примесей в растущем кристалле.

Метод зонной перекристаллизации. Методы направленной кристаллизации (метод Бриджмена, метод Чалмерса). Дефекты при выращивании монокристаллов. Температурная зависимость концентрации точечных дефектов.

*Выращивание из растворов.*

Требования к растворителям. Основные растворители. Выращивание из индифферентного раствора, из избытка исходного компонента.

*Рост кристаллов из газовой фазы.*

Простые и эпитаксиальные пленки; способы получения. Основные методы эпитаксиального наращивания.

Прямой синтез из паров. Термодинамический расчет парциальных давлений газов при росте стехиометрических кристаллов. Температурный режим и дефекты при выращивании монокристаллов. Равновесие растущего кристалла с паровой фазой. Расчет концентраций дефектов в кристалле в зависимости от давления паров летучего компонента. Получение монокристаллов заданного типа и величины проводимости.

Метод газотранспортных реакций. Термодинамические условия и выход транспортных реакций. Примеры получения эпитаксиальных слоев элементарных и двойных соединений.

Исследование несовершенств монокристаллических пленок. Термодинамический расчет концентрации примеси при транспорте. Использование газотранспортных реакций для очистки полупроводниковых соединений.

Тема 6. Легирование полупроводников

Физико-химические основы легирования полупроводников.

Легирование металлургическим сплавлением. Расчет лигатуры.

Поверхностное диффузное легирование. Законы Фика. Распределение концентрации диффундирующей примеси вглубь образца. Коэффициент диффузии ( $D$ ) как величина кинетическая и термодинамическая. Зависимость  $D$  от температуры, концентрации и типа дефектов.

Механизмы диффузии. Легирование элементарных полупроводников. Влияние концентрации дефектов на растворимость примеси. Легирование нестехиометрических соединений. Зависимость растворимости примеси от характера и концентрации дефектов и давления летучего компонента.

Электронное и ионное легирование (элионика). Сущность метода. Радиационно-стимулированная диффузия.

Тема 7. Нанотехнология полупроводниковых структур

Наноструктурированные кристаллы, их характерные размерные эффекты и отличие от объемных кристаллов. Основные полупроводниковые соединения, используемые в нанотехнологии – Ge, Si, соединения  $A^{III}B^V$  (GaAs, InAs),  $A^{II}B^{VI}$  (CdS, CdTe). Локализация электронов в наноструктурах и связанные с ней эффекты. Области применения нанотехнологии: полевые транзисторы с дискретным переносом энергии, лазеры на квантовых точках на основе диода  $p-n$  – GaAs, гетероэпитаксиальные структуры с нанослоями. Применение углеродных трубок (фуллерены) в технологии полупроводниковых приборов в качестве затворов, межслойных контактов и непосредственно полупроводников с различной шириной запрещенной зоны.

**Ч.II. Функциональные материалы (металлы, керамика, полимеры)**

Тема 8. Металлы и сплавы со специальными свойствами

*Теории металлического состояния:* теория свободных электронов, ее недостатки; квантово-механическая теория электронов; зонная теория твердых тел. Структура металлов. Фазы в металлических сплавах: твердые растворы, интерметаллические фазы. Искажения решеток (дислокаций) и дефекты структуры; связь между линейными дефектами и свойствами металлов; пути управления дислокационными дефектами.

*Электрические свойства металлов.* Физическая природа электропроводности металлов. Природа сопротивления металлов; центры рассеяния и правило Маттиссена. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников. Влияние примесей и других структурных дефектов на удельную проводимость металлов. Металлы, используемые в качестве проводников в электронной технике.

*Сверхпроводящие металлы и сплавы.* Основные свойства сверхпроводников: эффект Мейсснера – Оксенфельда, эффекты Джозефсона, сверхпроводники первого и второго рода, критические магнитные поля, критический ток. Природа явления сверхпроводимости, изотопический эффект, куперовские пары, фононный и экситонный механизм проводимости. Коммерческие материалы и приборы на основе сверхпроводимости: сильноточные и слаботочные технологии.

*Магнетизм металлических твердых тел.* Пара- и диамагнетики, ферромагнетики, магнитострикция, распределение магнитных моментов при помещении различных магнетиков в магнитное поле; влияние температуры: законы Кюри и Кюри-Вейсса; магнетизм коллективизированных электронов. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

#### Тема 9. Керамические материалы

*Общие сведения о керамических материалах (КМ).* Структура и свойства керамических материалов. Классификация и характеристика КМ: оксидная керамика, бескислородная керамика, керметы. Твердофазные реакции в синтезе керамических материалов: типы твердофазных реакций; специфические особенности механизма, кинетика и термодинамика твердофазных реакций и превращений.

*Электрические свойства керамики.*

Диэлектрическая керамика: механизмы поляризации керамики в электрическом поле; пьезо-, сегнето- и пироэлектрическая керамика, взаимосвязь между пьезо-, сегнето- и пироэлектрическими свойствами.

Высокотемпературная сверхпроводящая керамика: особенности кристаллохимии высокотемпературных сверхпроводников. Критические параметры ВТСП. Пути повышения критических характеристик ВТСП-материалов: Области применения ВТСП-материалов и ее перспективы в технике.

Ионные проводники. Критерии возникновения суперионного состояния твердых тел. Важнейшие типы проводников. Применение твердых электролитов.

*Керамические ферриты.* Классификация ферритов. Магнитомягкие ферриты со структурой шпинели. Ферриты с гексагональной кристаллической структурой (гексаферриты). Ферриты со структурой граната.

*Оптические свойства керамических материалов.* Характеристика оптических керамических материалов; методы получения прозрачной керамики; люминесценция и люминофоры, принцип работы лазера, общие требования к твердым материалам, используемым в лазерах.

#### Тема 10. Полимерные материалы

*Физико-химические принципы создание полимерных материалов с заданными свойствами.* Основные принципы химической и физической модификации полимеров. Полимерные композиционные материалы: классификация наполнителей, модель структуры наполненного полимера, модифицирующие действие наполнителей на полимеры. Молекулярные комплексы полимеров: свойства и способы получения. Металлорганические полимеры, полученные на основе металлсодержащих мономеров.

*Электрические свойства полимеров.* Химия проводящих полимерных соединений; типы проводящих полимерных веществ: полимеры с электронной проводимостью (наполненные проводящие полимеры, полимеры с системой сопряженных связей), полимеры с ионной проводимостью; механизм переноса заряда в проводящих полимерах. Отличительные особенности полимеров с системой сопряженных связей, твердых полимерных электролитов, их использование в современных устройствах.

*Оптические свойства полимеров.* Методы синтеза флуоресцирующих полимеров. Фотофизические процессы в полимерах: образование возбужденных состояний и перенос энергии, тушение флуоресценции добавками. Применение (люминесцентные солнечные концентраторы, материалы для лазерной техники).

*Жидкокристаллические (ЖК) полимеры.* Принципы молекулярного конструирования ЖК полимеров. Структура и особенности свойств ЖК полимеров. Использование в современных устройствах: создание новых типов тонкопленочных оптических материалов и электрически управляемых сред для записи и отображения информации.

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, выполнения теоретических и расчётных домашних заданий, тестов по лекционному материалу, и фиксируется в форме контрольной точки в семестре.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамен в седьмом семестре представляет собой тест из 46 вопросов разных типов (выбор одного ответа из списка, несколько ответов из списка, на соответствие) и проверяющих ИОПК-1.2., 1.3., 2.2., ИПК-1.2. На вопрос дается одна попытка. Время тестирования ограничено – 45 мин. Общее количество баллов за тест – 54.

Примерный перечень тестовых заданий

1. Концентрация равновесных носителей заряда в полупроводнике определяется:
  1. только уровнем легирования
  2. только температурой
  3. обоими факторами
2. Донорные примесные уровни в полупроводниках...
  1. захватывают электроны из зоны проводимости
  2. захватывают электроны из валентной зоны
  3. отдают электроны в зону проводимости
3. Указать соответствие теории металлического состояния приведенному признаку

1. Теория Друде	А) электроны в металле рассматриваются как электронный газ, к которому можно применить кинетическую теорию газов.
2. Теория Зоммерфельда	Б) простая квантовая модель поведения валентных электронов в атоме металла. Электроны металла рассматриваются в этой модели как Ферми-газ.
3. Зонная теория	В) электроны в атоме имеют определенные дискретные значения (уровни) энергии. При сближении атомов друг с другом при образовании кристалла происходит расщепление одинаковых атомных энергетических состояний электронов в энергетические зоны.
Ответ:	

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Результаты промежуточной аттестации зависят и учитывают результаты текущего контроля - выполнения теоретических и расчётных домашних заданий, тестов по лекционному материалу. Максимальное количество баллов за текущий контроль – 10.

Примеры расчётных заданий для текущего контроля:

1. Расчет эффективности зонной плавки.
2. Расчет условий синтеза полупроводников из газовой фазы

Ниже приводится шкала перевода суммы баллов за текущий контроль и экзамен в оценки:

Количество баллов	Уровень сформированности компетенций	Оценка
58–64 баллов	Компетенции сформированы полностью	отлично
46 – 57 баллов	Компетенции сформированы частично	хорошо
35 – 45 баллов	Компетенции сформированы фрагментарно	удовлетворит.
Менее 35 баллов	Компетенции не сформированы, рекомендуется повторное освоение дисциплины	неудовлетворит.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21493>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.
- в) План практических занятий по дисциплине.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

- а) основная литература:
  - Фахльман Б. Химия новых материалов и нанотехнологии. Пер. с англ. – М. : Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 464 с.
  - Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики: учебник для вузов – СПб. : Лань, 2015. – 442 с.
  - Александров С. Е., Греков Ф. Ф. Технология полупроводниковых материалов: учеб. пособие / С. Е. Александров, Ф. Ф. Греков – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2012. – 230 с.
- б) дополнительная литература:
  - Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники. – М. : БИНОМ, 2017. – 240 с.
  - Мокроусов Г. М., Зарубина О. Н., Бекезина Т. П. Межфазные превращения и формирование поверхности многокомпонентных полупроводников в жидких средах: учеб. пособие – СПб. : Лань, 2015. – 107 с.
  - Organic Optoelectronic Materials /edited by Y. Li: Springer, 2015. – 392 p.
  - Серова В. Н. Полимерные оптические материалы, СПб. : Научные основы и технологии, 2012.
  - Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения. В 2-х ч.М. : Мир, 1988.
- в) ресурсы сети Интернет:
  - Course [Plastic electronics | Coursera](#)
  - François Cardarelli. Materials Handbook. A Concise Desktop Reference / - Springer, Cham, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-38925-7>
  - Bradley D. Fahlman. Materials Chemistry/ - Springer, Dordrecht, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1255-0>

## 13. Перечень информационных технологий

- а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
  - Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
  - публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).
- 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/>
  - ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>



- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения практических занятий, 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.

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате («Актру»).

#### **15. Информация о разработчиках**

Изаак Татьяна Ивановна, канд. хим. наук, доцент, кафедра аналитической химии Национального исследовательского Томского государственного университета, доцент.

Гавриленко Наталия Айратовна, канд. хим. наук, доцент, кафедра аналитической химии Национального исследовательского Томского государственного университета, доцент.