

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
и образовательным инновациям

\_\_\_\_\_ И.Е. Прохоренко

«30» июня 2023 г.

Регистрационный № УД- 12751 /уч.



**ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ КРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:

**1-31 05 04 Фундаментальная химия**

2023 г.

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта высшего образования ОСВО 1-31 05 04-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 87 и учебного плана G31-147/уч. 2013

**СОСТАВИТЕЛИ:**

А. Е. Усенко, заведующий кафедрой физической химии, кандидат химических наук

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

О. В. Контява, доцент кафедры общей химии УО «Белорусский государственный медицинский университет», кандидат химических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физической химии Белорусского государственного университета  
(протокол № 10 от 12 апреля 2023 г.)

Учебно-методической комиссией химического факультета Белорусского государственного университета

(протокол № 7 от 15 июня 2023 г.)

Заведующий кафедрой



А.Е.Усенко

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Основным объектом изучения учебной дисциплины «Физическая химия кристаллов полупроводников» являются реальные (дефектные) кристаллические полупроводники, нашедшие практическое применение, прежде всего, в твердотельной микроэлектронике; сами дефекты и процессы разупорядочения кристаллов, связанные с их выращиванием и технологической обработкой.

**Цель дисциплины** состоит в приобретении навыков сравнительного анализа зависимости совершенства структуры (дефектного состава) и физико-химических свойств различных полупроводниковых материалов от условий выращивания и технологических способов обработки, применяемых для создания современных полупроводниковых устройств.

### **Задачи дисциплины:**

1. Сформировать систему знаний и представлений у студентов о реальной структуре кристаллических полупроводниковых материалов и их свойствах.
2. Научить студента анализировать дефектный состав кристаллов полупроводников в зависимости от условий выращивания и обработки с привлечением классических физико-химических моделей.
3. Сформировать у студента навыки самостоятельной работы с учебной и специальной литературой, включающие поиск, систематизацию и анализ информации.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина «Физическая химия кристаллов полупроводников» является дисциплиной по выбору для студентов специальности 1-31 05 04 «Фундаментальная химия».

**Связи** с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Изучаемый курс носит междисциплинарный характер. В данном курсе особое внимание уделяется умению применять знания, полученные в рамках дисциплины «Физическая химия», для изучения и более глубокого понимания свойств реальных полупроводниковых кристаллов, а также процессов, позволяющих варьировать эти свойства. Поэтому названия разделов тематического плана могут дублировать некоторые разделы общего курса, однако их содержание охватывает вопросы, касающиеся преимущественно природы и свойств полупроводниковых кристаллических материалов. Содержательная часть курса включает актуальные результаты исследований, проводимые, в том числе,

научными сотрудниками химического факультета и научно-исследовательского института физико-химических проблем БГУ.

Студент должен закрепить и развить следующие компетенции, предусмотренные Образовательным стандартом высшего образования ОСВО 1-31 05 04 «Фундаментальная химия»:

#### **академические компетенции**

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-5. Быть способным вырабатывать новые идеи (креативность).

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

#### **социально-личностные компетенции**

СЛК-6. Уметь работать в команде.

#### **профессиональные компетенции**

ПК-1. Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, анализировать перспективы и направления развития отдельных областей химической науки.

ПК-5. Формулировать и решать задачи, возникающие в ходе производственно-технологической деятельности

ПК-8. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективам развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

ПК-9. Работать с научной, технической и патентной литературой, электронными базами данных.

ПК-16. Готовить доклады, материалы к презентациям и председательствовать на них.

ПК-17. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

В результате изучения дисциплины обучаемый должен

**знать:**

– особенности химической связи и строения реального кристалла полупроводника;

– типы дефектов, образующихся в современных бездислокационных кристаллах, причины их возникновения.

**уметь:**

– применять классические физико-химические модели при изучении динамики точечных дефектов в кристаллах простого полупроводника и соединений с нестехиометрическим составом.

**владеть:**

– навыками анализа и прогнозирования дефектного состава и свойств полупроводникового материала в зависимости от условий выращивания и технологических способов обработки.

Полученные знания и навыки необходимы в различных областях физической химии твердого тела, являются базисными для решения прикладных задач в сфере полупроводниковой технологии.

Дисциплина преподается в 7 семестре четвертого курса. Трудоёмкость дисциплины составляет 2 зачётных единицы.

Для студентов специальности 1-31 05 04 «Фундаментальная химия» общее количество часов, отводимое на изучение курса по выбору – 70, аудиторных – 38, из них: лекции – 18 часов, практические занятия – 16 часов, УСР – 4 часа.

Форма получения высшего образования – очная дневная.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – зачёт.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

**1. Введение. Основные понятия.** Определение понятия «полупроводник». Отличие полупроводников от металлов и диэлектриков. Классификация кристаллических полупроводников. Органические полупроводники.

**2. Кристаллохимия элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений.** Кристаллическое состояние вещества. Кристаллы идеальные и реальные. Химическая связь в кристаллах полупроводников. Кристаллохимические критерии полупроводниковых свойств. Валентное правило Мозера-Пирсона (соединения нормально-валентные  $A^{IV}B^{IV}$ ,  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^I B^{VII}$ ; «полианионные»  $A^{II}B^V$ ,  $A^{II}B_2^V$  «поликатионные»  $A^{III}B^{VI}$ ). Кристаллические структуры полупроводниковых соединений. Основные структурные типы: алмаз, сфалерит, вюртцит, NaCl, перовскит.

**3. Несовершенства строения кристаллов полупроводников.** Классификация дефектов (по Зейтцу и ван Бюрену). Фононы. Электронные дефекты. Экситоны. Точечные (собственные и примесные), линейные (краевые и винтовые дислокации), двумерные (малоугловые границы, двойники, поверхность, реконструкция) и объемные дефекты (поры, включения новой фазы, кластеры точечных дефектов). Причины образования дефектов и соответствующая классификация дефектов: ростовые, или биографические дефекты, термические дефекты, дефекты пластической деформации, радиационные дефекты.

**4. Точечные дефекты.** Вакансии и их свойства. Собственные междоузельные атомы. Примеси (замещения, внедрения, вычитания). Разупорядочение по Френкелю, Шоттки. Антиструктурное разупорядочение. Комплексы точечных дефектов. Символика Крегера-Винка. Зарядовое состояние точечных дефектов. Донорно-акцепторные свойства точечных дефектов. Отображение донорно-акцепторных свойств точечных дефектов в зонной схеме полупроводника. Примеси электрически активные и неактивные. «Мелкие» и «глубокие» примесные уровни.

**5. Образование и превращение точечных дефектов. Термодинамика точечных дефектов.** Уравнения образования, превращения точечных дефектов и правила их записи. Закон действующих масс для квазихимических реакций между точечными дефектами. Условия равновесия дефектов и электронейтральности в кристалле.

Термодинамика точечных дефектов. Применение закона действующих масс к равновесию дефектов в кристаллах полупроводников (элементарных и соединений). Концентрация электронов при полном равновесии. Метод Броуэра

при рассмотрении равновесия дефектов в кристаллах элементарных полупроводников и соединений.

Температурная зависимость концентрации нейтральных и заряженных точечных дефектов в кристаллах полупроводников.

Разупорядочение в нестехиометрических кристаллах. Односторонние и двусторонние фазы. Диаграммы Броуэра и зависимость собственной проводимости нестехиометрических соединений на примере оксидов металлов (стехиометрическая область, область высокого/низкого парциального давления  $O_2$  на диаграммах Броуэра).

**6. Методы выращивания совершенных кристаллов полупроводников и кристаллизационные методы очистки.** Классификация чистых веществ. Требования к чистоте материалов, применяемых в полупроводниковой технологии.

Диаграммы состояния бинарных систем с неограниченной, ограниченной растворимостью компонентов, диаграммы состояния с химическими соединениями. Неравновесные диаграммы состояния (понятие о процессе ликвации, образование метастабильной фазы).

Кристаллизация расплава полупроводника, содержащего примеси. Коэффициент разделения примесей: равновесный и эффективный.

Выращивание элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Особенности синтеза соединений  $A^{III}B^V$  на примере антимонидов, арсенидов, фосфидов (учет давления пара анионообразующего компонента в точке плавления соединения). Условия выращивания и дефектность монокристаллов. Неравновесные дефекты и неоднородности состава (точечные дефекты, дислокации, малоугловые границы, двойники, дефекты упаковки, преципитаты, включения, поры).

**7. Примеси и особенности их диффузии в полупроводниках.** Примеси внедрения, замещения, амфотерные примеси и механизмы их диффузии. Самодиффузия и гетеродиффузия. Диффузия примесей в простых полупроводниковых кристаллах и соединениях.

Изо-/гетеровалентные примеси в кристаллах полупроводников, ионизация примесей. Метод контролируемой дефектности. Примеси и изменение типа проводимости на примере оксидов NiO, ZnO.

**8. Методы легирования полупроводниковых материалов.** Легирование в процессе выращивания кристаллов из жидкой фазы. Общие принципы введения

примесей через расплав. Легирование готовых кристаллов. Легирование методом диффузии. Получение и легирование структур методом эпитаксиального наращивания.

Ионное легирование кристаллов. Физические процессы, лежащие в основе ионного легирования. Распределение ионов в имплантированных слоях. Зависимость глубины имплантации от ускоряющего напряжения. Каналирование ионов. Возникновение радиационных дефектов при имплантации. Термический и лазерный отжиг в имплантированных слоях.

Методы ядерного легирования полупроводников. Виды облучения



# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов		Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6
1	<b>Введение. Основные понятия. Кристаллохимия элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений.</b>	4	4	1	Устный опрос, коллоквиум, реферат
2	<b>Несовершенства строения кристаллов полупроводников</b>	2	2		Устный опрос, коллоквиум
3	<b>Точечные дефекты</b>	2			Устный опрос, реферат, коллоквиум
4	<b>Образование и превращение точечных дефектов. Термодинамика точечных дефектов</b>	6	4	2	Устный опрос, коллоквиум
5	<b>Методы выращивания совершенных кристаллов полупроводников и кристаллизационные методы очистки</b>	1	2		Устный опрос, реферат
6	<b>Примеси и особенности их диффузии в полупроводниках. Влияние на электропроводящие свойства материала.</b>	2	2	1	Устный опрос, реферат, коллоквиум
7	<b>Методы легирования полупроводниковых материалов.</b>	1	2		Устный опрос, реферат
<b>Итого:</b>		18	16	4	



# ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

### ОСНОВНАЯ:

1. Воробьева, Т. Н. Химия твердого тела : учебник для студ. учреждений высш. образования по хим. спец. / Т. Н. Воробьева, А. И. Кулак, Т. В. Свиридова. - Минск : БГУ, 2011. - 320 с.
2. Мурашкевич, А. Н. Теория и методы выращивания монокристаллов : учеб. пособие / А. Н. Мурашкевич, И. М. Жарский ; УО "БГТУ". - Минск : БГТУ, 2010. - 213 с.
3. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы : учебное пособие для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. — 11-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2023. — 480 с.— Адрес доступа: <https://e.lanbook.com/book/284045>.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ:

4. Гилевич М. П., Покровский И. И. Химия твердого тела. – Мн. : изд-во «Университетское», 1985. – 192 с.
5. Ормонт Б. Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников. – М. : Высш. шк., 1982 . – 528 с.
6. Горелик С. С., Дашевский М. Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М. : МИСИС, 2003. – 480 с.
7. Случинская И. А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. – М.: МИФИ, 2002.– 376 с.
8. Ю. П., Кардона М. Основы физики полупроводников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002.– 560 с.
9. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб. : Лань, 2003. – 424 с.
10. Пичугин И. Г., Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов – М. : Высш. школа, 1985. – 288 с.
11. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
12. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. – М. : Мир, 1984. – 475 с.

13. Мушников Н. В. Магнетизм и магнитные фазовые переходы : учеб. пособие /— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 168 с.
14. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. – М. : Наука, 1990. – 216 с.
15. Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и  $\alpha$ -частицами. // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, вып. 7. – С. 769 – 795.
16. Усенко А. Е., Юхневич А. В. Выявление микродефектов в совершенных монокристаллах кремния методом селективного растворения // Изв. высш. уч. зав. Материалы электронной техники.– 2009. – № 2. – С.38–43.
17. Identification of Defects in Semiconductors. // Semiconductors and semimetals. 1999. – Vol. 51A, Vol. 51B / Ed. by M. Stavola. – San Diego : Academic press.
18. Bulk crystal growth of electronic, optical and optoelectronic materials. Ed. by P. Capper. – West Sussex : Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications, 2005. – 541p.

## **ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМЫХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ И МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИТОГОВОЙ ОТМЕТКИ**

Текущий контроль качества усвоения знаний по учебной дисциплине осуществляется с использованием следующих форм диагностики компетенций:

1. Устный опрос.
2. Письменные коллоквиумы по разделам № 1–3; № 4; 6.
3. Рефераты по темам практических занятий и по выбору студента.
4. Устный зачет по дисциплине.

Защита реферата предполагает подготовку доклада с презентацией. При оценивании содержания реферата (доклада) обращается внимание на полноту раскрытия темы, последовательность изложения, источники и их интерпретацию, корректность оформления.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Физическая химия кристаллов полупроводников» учебным планом предусмотрен зачёт.

### **Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов**

**Раздел 1. «Введение. Кристаллохимия элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений»**

**Раздел 2. «Несовершенства строения кристаллов полупроводников (1 час)**

1. Каким набором данных необходимо обладать для расчёта ширины запрещённой зоны органических полупроводников – аценов? Приведите пример расчёта для произвольно выбранных членов гомологического ряда.

2. Поясните термины «гомодесмичный» и «гетеродесмичный» кристалл. Каким образом можно спрогнозировать для кристаллов элементарных полупроводников наличие/отсутствие «гетеродесмичности» по положению элемента в ПСХЭ.

3. Разделите перечисленные ниже кристаллические фазы на три группы: «нормально-валентные», «поликатионные» и «полианионные» полупроводники:  $\text{CoAs}_3$ ,  $\text{CdSb}$ ,  $\text{GeP}$ ,  $\text{GaP}$ ,  $\text{CuBr}$ . Подтвердите свой выбор с помощью соответствующих расчётов.

4. Назовите и опишите структурный тип бинарных полупроводников класса  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ .

5. При помощи системы Крёгера-Винка запишите символы точечных дефектов и укажите их эффективный заряд для следующих случаев: атом меди в междоузлии  $\text{Cu}_2\text{O}$ , вакансия селена в  $\text{HgSe}$ .

6. Продемонстрируйте принцип сохранения числа узлов на примере  $\text{Cu}_2\text{O}$  при условии того, что оксид выдерживался в атмосфере с высоким парциальным давлением кислорода.

Форма контроля: Устный опрос, коллоквиум, реферат.

### Раздел 3. «Точечные дефекты», Раздел 4. «Образование и превращение точечных дефектов. Термодинамика точечных дефектов» (1 час)

1. Каковы условия образования антиструктурных дефектов? Приведите уравнение такого разупорядочения применяя символику Крёгера-Винка.

2. Опишите все теоретически допустимые процессы разупорядочения точечных дефектов в кристалле  $\text{ZnS}$  при помощи символики Крёгера-Винка.

3. При температуре 350 К энтальпия образования дефектов Френкеля в катионной подрешётке в соединениях типа  $\text{A}^{\text{Ib}}\text{B}^{\text{VII}}$ ,  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ ,  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  равна 165, 127 и 88 кДж / моль. Какое соединение имеет наибольшее число междоузельных атомов. Подтвердите ответ расчётами.

4. Как изменится равновесная концентрация вакансий в элементарном полупроводнике при повышении температуры от 800 до 1000 °С, если при 800 °С эта концентрация равна  $9,1 \times 10^{-6}$  ат.д.?

5. Изобразите диаграмму Броуэра в координатах  $\lg(\text{концентрация})-\lg(1/T)$  (две температурные области) для простого полупроводника с разупорядочением по Шоттки, если известно, что ширина запрещенной зоны – 0,9 eV, энтальпия образования вакансии – 1,6 eV, энергия ионизации вакансии – 0,2 eV.

6. При температуре 1000 °С зависимость удельной электропроводности оксида металла МО от парциального давления кислорода приведена в таблице. Предположите, какой тип собственного разупорядочения оксида имеет место и обоснуйте наблюдаемую зависимость электропроводности.

Электропроводность, $\text{Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$	Давление $\text{O}_2$ , атм
22,15	1,0
19,62	0,355
14,44	0,079
7,10	0,0126
6,23	$8,91 \cdot 10^{-4}$
5,18	$2,24 \cdot 10^{-4}$

4,98	8,91 10 <sup>-5</sup>
------	-----------------------

Форма контроля: Устный опрос, коллоквиум, реферат.

**Раздел 5. «Методы выращивания совершенных кристаллов полупроводников и кристаллизационные методы очистки». Раздел 6 «Примеси и особенности их диффузии в полупроводниках. Влияние на электропроводящие свойства материала». Раздел 7 «Методы легирования полупроводниковых материалов.» ( 2 часа)**

1. Изобразите и охарактеризуйте диаграмму «плавкости» двухкомпонентной системы для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии с перитектикой.

2. Для примесей А, В, С в кремнии коэффициент сегрегации составляет: 0,02; 1; 2,68. В каком случае целесообразно применять направленную кристаллизацию для очистки полупроводника? Ответ обоснуйте. Как определить на практике коэффициент сегрегации.

3. Запишите квазихимические уравнения легирования оксида  $TiO_2$  оксидом  $Nb_2O_5$  (а); оксида  $Mn_3O_4$  оксидом  $NiO$  (б);  $MgO$  оксидом  $Cr_2O_3$  (в).

4. Как повлияет на проводимость оксида никеля введение оксида хрома (III)? Проиллюстрируйте процессы разупорядочения соответствующими квазихимическими уравнениями. Изобразите график зависимости удельной электропроводности оксида от концентрации легирующей примеси.

5. В ГЦК элементарного проводника с параметром решётки  $a=4 \text{ \AA}$ , энергии образования и миграции вакансии имеют одинаковое значение 105 кДж/моль. Найти при  $T = 900 \text{ K}$ :

- а) Скорость вакансии и атома.
- б) Путь, пройденный вакансией и атомом, за 2 часа.
- в) Диффузионный путь, пройденный вакансией и атомом, за 2 часа.

6. Приведите принципиальную схему установки для ионного легирования кристаллов. Как распределение примеси по глубине кристалла зависит от величины ускоряющего напряжения? Перечислите достоинства и недостатки такого способа введения примесей в зависимости от конкретной технологической задачи.

7. Проанализируйте физические процессы, сопровождающие взаимодействие кристаллического полупроводника с потоком нейтронов/протонов/альфа-частиц. Объясните термины «радиационно-стимулируемая диффузия», «ионно-стимулированное перемешивание», «радио-стимулированное формирование химических соединений».

Форма контроля: Устный опрос, коллоквиум, реферат.

## **Примерная тематика практических занятий**

### *Практические занятия № 1–2.*

«Типы кристаллических полупроводников», «Кристаллохимия элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений»

### *Практические занятия № 3–5.*

«Образование и превращение дефектов в кристалле», «Термодинамика точечных дефектов»

### *Практическое занятие № 6.*

«Примеси в полупроводниках»

### *Практические занятия № 7–8.*

«Методы выращивания полупроводниковых кристаллов». «Методы легирования кристаллов»



## **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

При организации образовательного процесса используется *практико-ориентированный подход*, который предполагает:

- освоение содержание образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- использование процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

## **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся**

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- поиск и обзор литературы и электронных источников при подготовке реферата и по заданной проблеме курса;
- выполнение домашнего задания.

Обучающиеся могут воспользоваться материалами созданного на портале [educhem.bsu.by](http://educhem.bsu.by) курса «Физическая химия кристаллов полупроводников».

## **ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ**

1. Транзистор: устройство и принципы работы
2. Определение ширины запрещенной зоны полупроводников.
3. Органические полупроводники: ацены и металлорганические комплексы.
4. Органические полупроводники: молекулярные комплексы с переносом заряда.
5. Органические полупроводники: поликонъюгированные полимеры.
6. Полупроводники-сегнетоэлектрики.
7. Магнитные полупроводники.
8. Положение кислорода, углерода, бора, азота, фосфора, водорода, металлов и халькогенов в кристаллической решетке элементарного полупроводника и их влияние на свойства полупроводника (на примере Si).
9. Термодоноры в полупроводниках (на примере Si).

10. Классификация МД и причины их возникновения на примере монокристаллов Si.
11. Методы обнаружения дефектов в полупроводниках (качественный состав).
12. Методы выявления структурных дефектов.
13. Методы и приёмы выращивания кристаллов на границе твердое тело – твёрдое тело: девитрификация; отжиг для снятия напряжения; полиморфный фазовый переход; осаждение из твёрдого раствора.
14. Методы и приёмы выращивания кристаллов на границе жидкость – твёрдое тело: выращивание из расплава (методы Бриджмена-Стокбаргера; Кирополуса; Чохральского; Вернейля; зонные методы).
15. Низкотемпературные методы выращивания монокристаллов из раствора.
16. Гидротермальные методы выращивания кристаллов.
17. Методы и приёмы выращивания кристаллов на границе твердое тело – газ.
18. Влияние структурных несовершенств, состава, природы полупроводника и диффузанта на скорость и параметры диффузии.
19. Виды термообработки и ее назначение (отжиг, перекристаллизация, геттерирование, закалка).
20. Метод эпитаксиального наращивания как способ легирования полупроводника.
21. Методы ядерного легирования полупроводников.

### **Примерный перечень вопросов к зачёту по дисциплине «Физическая химия кристаллов полупроводников»**

1. Кристаллическое состояние вещества. Кристаллы идеальные и реальные.
2. Химическая связь в кристаллах полупроводников.
3. Кристаллохимические критерии полупроводниковых свойств. Валентное правило Мозера-Пирсона (соединения нормально-валентные  $A^{IV}B^{IV}$ ,  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^I B^{VII}$ ; «полианионные»  $A^{II}B^V$ ,  $A^{II}B_2^V$  «поликатионные»  $A^{III}B^{VI}$ ).
4. Кристаллические структуры полупроводниковых соединений. Основные структурные типы: алмаз, сфалерит, вюрцит, NaCl, перовскит
5. Классификация дефектов (по Зейтцу и ван Бюрену).
6. Фононы.
7. Электронные дефекты. Экситоны.
8. Точечные (собственные и примесные), линейные (краевые и винтовые дислокации), двумерные (малоугловые границы, двойники, поверхность,

реконструкция) и объемные дефекты (поры, включения новой фазы, кластеры точечных дефектов).

9. Причины образования дефектов и соответствующая классификация дефектов.

10. Вакансии и их свойства.

11. Собственные междоузельные атомы.

12. Примеси (замещения, внедрения, вычитания).

13. Разупорядочение по Френкелю, Шоттки. Антиструктурное разупорядочение.

14. Комплексы точечных дефектов.

15. Символика Крегера-Винка. Зарядовое состояние точечных дефектов. Донорно-акцепторные свойства точечных дефектов.

16. Отображение донорно-акцепторных свойств точечных дефектов в зонной схеме полупроводника.

17. Примеси электрически активные и неактивные. «Мелкие» и «глубокие» примесные уровни.

18. Уравнения образования, превращения точечных дефектов и правила их записи.

19. Закон действующих масс для квазихимических реакций между точечными дефектами.

20. Условия равновесия дефектов и электронейтральности в кристалле.

21. Термодинамика точечных дефектов. Применение закона действующих масс к равновесию дефектов в кристаллах полупроводников (элементарных и соединений).

22. Концентрация электронов при полном равновесии.

23. Метод Броуэра при рассмотрении равновесия дефектов в кристаллах элементарных полупроводников и соединений.

24. Температурная зависимость концентрации нейтральных и заряженных точечных дефектов в кристаллах полупроводников. Разупорядочение в нестехиометрических кристаллах. Односторонние и двусторонние фазы.

25. Диаграммы Броуэра и зависимость собственной проводимости нестехиометрических соединений на примере оксидов металлов (стехиометрическая область, область высокого/низкого парциального давления  $O_2$  на диаграммах Броуэра).

26. Классификация чистых веществ. Требования к чистоте материалов, применяемых в полупроводниковой технологии.

27. Диаграммы состояния бинарных систем с неограниченной, ограниченной растворимостью компонентов, диаграммы состояния с химическими соединениями. Неравновесные диаграммы состояния (понятие о процессе ликвации, образование метастабильной фазы).

28. Кристаллизация расплава полупроводника, содержащего примеси. Коэффициент разделения примесей: равновесный и эффективный.
29. Выращивание элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Особенности синтеза соединений  $A^{III}B^V$  на примере антимонидов, арсенидов, фосфидов (учет давления пара анионообразующего компонента в точке плавления соединения). Условия выращивания и дефектность монокристаллов. Неравновесные дефекты и неоднородности состава (точечные дефекты, дислокации, малоугловые границы, двойники, дефекты упаковки, преципитаты, включения, поры.).
30. Примеси внедрения, замещения, амфотерные примеси и механизмы их диффузии.
31. Самодиффузия и гетеродиффузия.
32. Диффузия примесей в простых полупроводниковых кристаллах и соединениях. Изо-/гетеровалентные примеси в кристаллах полупроводников, ионизация примесей.
33. Метод контролируемой дефектности. Примеси и изменение типа проводимости на примере оксидов NiO, ZnO.
34. Легирование в процессе выращивания кристаллов из жидкой фазы. Общие принципы введения примесей через расплав.
35. Легирование готовых кристаллов. Легирование методом диффузии. Получение и легирование структур методом эпитаксиального наращивания.
36. Ионное легирование кристаллов. Физические процессы, лежащие в основе ионного легирования. Распределение ионов в имплантированных слоях. Зависимость глубины имплантации от ускоряющего напряжения. Каналирование ионов. Возникновение радиационных дефектов при имплантации. Термический и лазерный отжиг в имплантированных слоях.
37. Методы ядерного легирования полупроводников. Виды облучения.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола) <sup>1</sup>
Химия твердого тела	Кафедра неорганической химии	Нет изменений	Вносить изменения не требуется. Протокол № 10 от 12.04.2023 г.

## ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

на \_\_\_\_ / \_\_\_\_ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры физической химии Белорусского государственного университета (протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.)

Заведующий кафедрой

кандидат химических наук \_\_\_\_\_ А.Е. Усенко  
(ученая степень, ученое звание) (подпись) (И.О.Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ

кандидат химических наук,  
доцент \_\_\_\_\_ А.В. Зураев  
(ученая степень, ученое звание) (подпись)  
(И.О.Фамилия)