

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям

«30» июня 2021 г.

Регистрационный № 01-001/2021 уч.



**«Физическая химия и технология тонкопленочных
химических сенсоров и микросистем»**

Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:

1-31 0501 Химия (по направлениям)

Направление специальности:

1-31 0501-01 Химия(научно-производственная деятельность)

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 05 01-2013, учебного плана №G31-155/уч. от 30.05.2013 г.

СОСТАВИТЕЛЬ:

А. А. Савицкий, доцент кафедры физической химии химического факультета Белорусского государственного университета, кандидат химических наук.

РЕЦЕНЗЕНТ:

Клындюк А.И. , доцент кафедры физической, коллоидной и аналитической химии БГТУ, кандидат химических наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой физической химии

(протокол №9 от 28 мая 2021)

Научно-методическим Советом БГУ

(протокол № 7 от 30 июня 2021)

Зав. кафедрой



Блохин А.В.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цель данной учебной дисциплины – расширить и углубить знания студентов о механизме формирования и роста пленок различных материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков) на изотропных и поликристаллических подложках, физических, химических и электрофизических свойствах тонкопленочных структур, методах их получения и использования для создания химических сенсоров и микросистем в электронной и радиоэлектронной промышленности.

Раскрыть физический смысл и принципы конструирования различных типов химических сенсоров и микросистем, научить студентов видеть области применения сенсорных преобразователей, их принципиальные возможности при решении конкретных научных и технологических проблем.

Задачи данной учебной дисциплины:

- ознакомить студентов с основными тенденциями развития сенсорики будущего, принципами конструирования и использования сенсоров и микросистем,
- сформировать навыки самостоятельной работы с учебной и специальной литературой, проведения химического эксперимента, умения обобщать и обсуждать экспериментальные результаты;
- научить студентов анализировать научную и техническую информацию по проблемам тонкопленочных сенсорных систем, проводить расчеты физико-химических параметров различных сенсорных устройств; конструировать макетные варианты различных исследовательских аналитических систем.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к циклу дисциплин специализации компонента учреждения высшего образования.

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Физическая химия и технология тонкопленочных химических сенсоров и микросистем»

Должнообеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций:

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-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение жизни.

социально-личностные компетенции:

- СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.
- СЛК-4. Владеть навыками здоровьесбережения.

профессиональные компетенции:

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

ПК-2. Принимать участие в научных исследованиях, связанных с совершенствованием и развитием химии, экологии и физико-химических методов исследования.

ПК-3. Формулировать цели и задачи научно-исследовательской деятельности, осуществлять ее планирование, принимать участие в подготовке отчетов и публикаций.

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

ПК-17. Готовить доклады, материалы к презентациям и представлять на них.

ПК-18. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать:

- принципы конструирования новых микросистем;
- механизмы гетерогенного зародышеобразования;
- стадии роста пленок различных материалов на изотропных и поликристаллических подложках;
- методы получения тонкопленочных структур;
- химические и электрофизические свойства тонкопленочных структур;
- методы исследования поверхности тонких пленок;
- принципы работы химических сенсоров и микросистем;
- основы нанoeлектроники;

уметь:

- целенаправленно выбрать метод получения твердотельных структур с заданными свойствами;
- использовать современную аппаратуру и технологии производства микросхем;
- прогнозировать свойства тонкопленочных структур на основании физико-химической информации;
- проводить расчеты физико-химических параметров различных типов сенсоров;
- конструировать макетные варианты различных исследовательских сенсорных систем.

владеть:

- расчетными методами физической химии, используемыми при создании материалов современной техники;
- методами планирования при организации производства микро- и нано- систем.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 5 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Физическая химия и технология тонкопленочных химических сенсоров и микросистем» отведено:

– для очной формы получения высшего образования – 96 часов, в том числе 48 аудиторных часов, из них: лекции – 28 часов, семинарские занятия – 16 часов, управляемая самостоятельная работа – 4 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетных единицы.

Форма текущей аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение.

Предмет и содержание курса. Области применения тонких пленок. Роль пленочной технологии в развитии миниатюризации(микро-нано-) электронных микросистем и химических сенсоров.

Тема 1. Основные понятия о тонкой пленке, эпитаксии, эпитаксиальном слое.

Виды эпитаксии: автоэпитаксия, гетероэпитаксия, хемоэпитаксия. Планарная технология производства микросхем. Классификация методов получения тонких пленок и эпитаксиальных слоев.

Тема 2. Теоретические основы процессов нарастания тонких пленок и эпитаксиальных слоев.

Механизм конденсации и неравновесные состояния в пленках. ПК и ПЖК-механизмы конденсации вакуумных конденсатов на изотропных подложках. Фазовая, структурная и субструктурная неравновесность в пленках.

Тема 3. Формы роста частиц вакуумных конденсатов на изотропных подложках.

Формы роста конденсатов легкоплавких металлов, процесс коалесценции. Формы роста конденсатов тугоплавких металлов. Формы роста аморфных конденсатов. Влияние структуры подложки на формы роста конденсатов. Формирование текстур на изотропных подложках. Влияние температуры подложки на образование текстурированных пленок. Текстуры роста, текстуры зарождения. Роль свободной поверхностной энергии, направления молекулярного пучка, скорости конденсации и степени подвижности осажденных атомов на ориентацию металлических пленок на аморфных подложках.

Тема 4.Современные представления о поверхности твердого тела. Локализованная и нелокализованная адсорбция. Процессы взаимодействия частиц газа с твердым телом. Влияние структуры поверхности кристаллической подложки на эпитаксиальный процесс. Адсорбция и образование скоплений на инородной подложке. Теории гетерогенного образования зародышей. Скорость образования и размер критических зародышей. Механизм роста эпитаксиальных слоев на подложке. Дефекты и процессы дефектообразования в тонких пленках.

Тема 5.Получение тонких пленок и эпитаксиальных слоев.

Общая характеристика методов и их классификация. Метод испарения и конденсации молекулярных пучков в вакууме. Конструкции вакуумных установок и испарителей вещества. Испарение сплавов и соединений. Метод дискретного испарения.

Тема 6. Подложки. Методы подготовки и контроль качества подложек. Защита поверхности подложки.

Метод катодного распыления. Конструкции установок катодного распыления. Преимущества и недостатки метода катодного распыления.Реактивное катодное распыление. Метод магнетронного распыления. Конструкции магнетронов. Особенности, преимущества и

недостатки метода магнетронного распыления различных веществ. ВЧ и СВЧ магнетронное распыление диэлектриков.

Тема 7. Метод электронно-лучевого испарения.

Импульсные и реактивные методы электронно-лучевого испарения.

Методы лазерного испарения веществ в вакууме. Режимы непрерывной генерации и модулированной добротности. Конструкции установок.

Методы ионно-лучевого травления, испарения, легирования поверхности и тонких пленок.

Тема 8. Методы твердофазной эпитаксии.

ТФЭ со средой переноса и без среды переноса.

Тема 9. Методы транспортных химических реакций.

Применение транспортных химических реакций для получения пленок и ЭС полупроводниковых соединений. Получение ЭС в открытых и закрытых процессах. Получение монокристаллических слоев GaAs методом транспортных реакций в проточной системе. Химизм процесса. Влияние основных факторов на процесс. Получение ЭС кремния и германия восстановлением из хлоридов водородом в проточной системе. Влияние основных факторов на этот процесс. Химизм, термодинамика, кинетика процесса автоэпитаксии кремния и германия.

Тема 10. Литографические процессы в технологии микроэлектронных устройств.

Назначение и методы фотолитографии. Контактная фотолитография. Позитивные и негативные фоторезисты. Основные параметры фоторезистов. Обработка поверхности подложек. Нанесение и сушка слоя фоторезиста. Совмещение и экспонирование. Проявление слоя фоторезиста. Сушка проявленного рельефа. Химическая жидкостная обработка подложек. Химическая сухая обработка подложек. Проекционная фотолитография. Оптические эффекты при фотолитографии. Перспективные методы литографии. Электронолитография. Рентгенолитография. УФ-литография. Ионолитография. Голографическая литография.

Тема 11. Методы исследования поверхности и тонких пленок.

Требования, предъявляемые к идеальному методу анализа поверхности. Физические процессы возбуждения, используемые при анализе поверхностей. Облучение фотонами, электронная бомбардировка, бомбардировка нейтральными частицами, наложение электрического поля, подведение тепловой энергии.

Тема 12. Носители информации о поверхности твердого тела.

Фотоны, электроны, ионы, нейтральные частицы.

Тема 13. Перечень и сравнительная характеристика методов анализа поверхностей.

Анализ поверхности методом Резерфордского обратного рассеяния легких ионов.

Масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС).

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Оже-электронная спектроскопия. Ядерные методы анализа. Эллипсометрия.

Тема 14. Химические сенсоры.

Состояние и перспективы исследований по химическим сенсорам.

Классификация сенсоров. Потенциометрические, биосенсоры, оптосенсоры, акустосенсоры, мультисенсорные системы (электронный нос, электронный язык). Принципы устройства и работы химических сенсоров.

Тема 15. Новые материалы для сенсоров и технологии их получения.

Технологии получения тонких пленок оксидов олова, индия, циркония, титана, кремния, сложных оксидных фаз переменного состава, силицидов, нитридов, углеродных алмазоподобных пленок, углеродных нанотрубок, нанопроводов. Получение темплатов на основе оксидов алюминия и титана.

Тема 16. Вторичные преобразователи и методы обработки информации.

Применение химических сенсоров.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА

№п/п	Наименование разделов, тем	Количество часов			
		Аудиторные			
		Лекции	Семинар.	УСР	Формы контроля
	Введение.	2			
1	Основные понятия о тонкой пленке, эпитаксии, эпитаксиальном слое.	2	2		устный опрос
2	Теоретические основы процессов нарастания тонких пленок и эпитаксиальных слоев.	2	2	1	устный опрос, решение задач
3	Формы роста частиц вакуумных конденсатов на изотропных подложках.	2	2		отчеты по домашним практическим упражнениям с их устной защитой,
4	Современные представления о поверхности твердого тела.	2			
5	Получение тонких пленок и эпитаксиальных слоев.	2	2	1	коллоквиум
6	Подложки. Методы подготовки и контроль качества подложек. Защита поверхности подложки.	2			
7	Метод электронно-лучевого испарения.	2	2		устный опрос
8	Методы транспортных химических реакций.	2	2		тестовые задания
9	Литографические процессы в технологии микроэлектронных устройств.	2	2		устный опрос
10	Методы исследования поверхности и тонких	2	2		коллоквиум

	пленок.				
11	Перечень и сравнительная характеристика методов анализа поверхностей.	1			Дискуссия
12	Носители информации о поверхности твердого тела.	1			Дискуссия
13	Перечень и сравнительная характеристика методов анализа поверхностей.	1			Дискуссия
14	Химические сенсоры.	1		1	Дискуссия, ответы на вопросы
15	Новые материалы для сенсоров и технологии их получения.	1		1	Дискуссия, ответы на вопросы
16	Вторичные преобразователи и методы обработки информации. Применение химических сенсоров.	1			Дискуссия
	Всего	28	16	4	

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

- Палатник Л.С., Папилов И.И. Эпитаксиальные пленки. М., «Наука», 1971.
1. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции. Поуред . Дж. Поута и др. М., «Мир», 1982.
 2. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. М. «Высшая школа», 1987.
 3. Киреев В., Столяров А. Технологии микроэлектроники. М. «Техносфера», 2006.
 4. Маскаева Л.Н., Федорова Е.А., Марков В.Ф. Технология тонких пленок и покрытий. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2019, 236 с.

Перечень дополнительной литературы

1. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. М. «Мир», 1991.
2. Хокинг М, Васантасри В., Сидки П.М. Металлические и керамические покрытия. М., « Мир», 2000.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

В качестве формы итогового контроля по учебной дисциплине предусмотрен экзамен.

Для текущего оценки достижений и контроля качества усвоения знаний студентами используется следующий диагностический инструментарий: устный опрос, отчеты по домашним практическим упражнениям с их устной защитой, письменные тестовые задания, проведение коллоквиума.

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- устный опрос – 20%;
- отчеты по домашним практическим упражнениям с их устной защитой – 20%;
- письменные тестовые задания – 20%;
- проведение коллоквиума – 40%;

При формировании итоговой оценки используется рейтинговая оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения.

Рейтинговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости и экзаменационной оценки с учетом их весовых коэффициентов. Вес оценки по текущей успеваемости составляет 30 %, экзаменационной оценки – 70 %.

При изучении учебной дисциплины самостоятельная работа на аудиторных занятиях предусматривает выполнение типовых расчетных

заданий с консультациями преподавателя. Внеаудиторная работа предполагает самостоятельную работу с учебниками, учебными и учебно-методическими пособиями, материалами научных публикаций по изучаемым темам учебной дисциплины, а также подготовку к семинарским и практическим занятиям по предложенным преподавателем вопросам. выполнение домашних заданий, решение расчетных задач.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

1. Химические сенсоры.(1 час).
Принципы построения сенсорных систем
Пеллисторные керамические чувствительные элементы. Пленочные планарные мультисенсорные системы.
(Форма контроля - устные ответы на вопросы).
2. Теоретические основы процессов нарастания тонких пленок и эпитаксиальных слоев. Теории гетерогенного зародышеобразования (1 час)
Термодинамическая теория Гиббса-Фольмера. Статистическая теория Уолтона-Родина.
(Форма контроля - решение задач).
3. Получение тонких пленок и эпитаксиальных слоев (1 час).
Газофазная, жидкофазная, твердофазная эпитаксия. Вакуумное напыление. Химические транспортные реакции.
(Форма контроля --коллоквиум. работа с литературой).
4. Новые материалы для сенсоров и технологии их получения (1 час).
Оксидные материалы. Углеродные нано материалы.
(Форма контроля - устные ответы на вопросы).

Примерная тематика семинарских занятий

- 1.Тенденции развития микро и нано электроники.
2. Методы получения тонких пленок.
- 3.Техника и технология вакуумного напыления пенек.
4. Применение достижений нанотехнологии в области создания сенсоров.
- 5.Современные и перспективные методы исследования тонких пленок

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется *метод учебной дискуссии*, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и/или согласования существующих позиций по определенной проблеме.

Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания изучаемой темы, применение знаний (теорий, концепций) при решении проблем, определение способов их решения.

При организации образовательного процесса *используется метод группового обучения*, который представляет собой форму организации учебно-познавательной деятельности обучающихся, предполагающую функционирование разных типов малых групп, работающих как над общими, так и специфическими учебными заданиями.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

Презентации по темам размещаются на электронной платформе Moodle.
Работа с литературными источниками.

Темы реферативных работ

1. Планарные технологии и их применение при создании химических сенсоров.
2. Эпитаксия как метод создания тонкопленочных сенсорных структур.
3. Теории гетерогенного зародышеобразования.
4. Химические транспортные реакции и их использование при создании химических сенсоров.
5. химические сенсоры – классификация, устройство и принципы работы.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Основные понятия о тонкой пленке, эпитаксии, эпитаксиальном слое. Виды эпитаксии: Планарная технология производства микросхем. Классификация методов получения тонких пленок и эпитаксиальных слоев.
2. Теоретические основы процессов нарастания тонких пленок и эпитаксиальных слоев. Механизмы конденсации и неравновесные состояния в пленках.
3. Формы роста частиц вакуумных конденсатов на изотропных подложках. Текстуры роста, текстуры зарождения. Роль свободной поверхностной энергии, направления молекулярного пучка, скорости конденсации и степени подвижности осажденных атомов на ориентацию металлических пленок на аморфных подложках.

4.Современные представления о поверхности твердого тела.Локализованная и нелокализованная адсорбция. Процессы взаимодействия частиц газа с твердым телом. Влияние структуры поверхности кристаллической подложки на эпитаксиальный процесс.

5.Теории гетерогенного образования зародышей. Скорость образования и размер критических зародышей. Механизм роста эпитаксиальных слоев на подложке.

6.Дефекты и процессы дефектообразования в тонких пленках.

7.Получение тонких пленок и эпитаксиальных слоев.

Общая характеристика методов и их классификация. Метод испарения и конденсации молекулярных пучков в вакууме.

8.Конструкции вакуумных установок и испарителей вещества.

9.Подложки. Методы подготовки и контроль качества подложек.

Защитаповерхности подложки.

10.Метод катодного распыления.

Конструкции установок катодного распыления.

11.Метод электронно-лучевого испарения.

Импульсные и реактивные методы электроннолучевого испарения.

12.Методы лазерного испарения веществ в вакууме. Режимы непрерывной генерации и модулированной добротности. Конструкции установок.

13.Методы твердофазной эпитаксии.

14.Методы транспортных химических реакций.

Применение транспортных химических реакций для получения пленок и ЭС полупроводниковых соединений.

15.Литографические процессы в технологии микроэлектронных устройств.

Назначение и методы фотолитографии.

16. Методы исследования поверхности и тонких пленок.

17.Перечень и сравнительная характеристика методов анализа поверхностей.

Анализ поверхности методом Резерфордского обратного рассеяния легких ионов.

Масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС).

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Оже-электронная спектроскопия. Ядерные методы анализа. Эллипсометрия.

18. Химические сенсоры. Состояние и перспективы исследований по химическим сенсорам.

19.Классификация сенсоров. Потенциометрические, биосенсоры, оптосенсоры, акустосенсоры, мультисенсорные системы (электронный нос, электронный язык). Принципы устройства и работы химических сенсоров.

20.Новые материалы для сенсоров и технологии их получения.

21.Вторичные преобразователи и методы обработки информации. Применение химических сенсоров.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Физическая химия	Кафедра физической химии	Нет изменений	Вносить изменения не требуется. Протокол

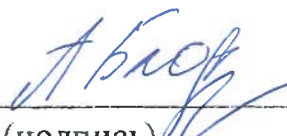
ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО

на _____ / _____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры физической химии (протокол № _____ от _____ 202__ г.)

Заведующий кафедрой
д.х.н., профессор
(степень, звание)



(подпись)

А.В. Блохин

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
д.х.н., профессор
(степень, звание)

(подпись)

Д.В. Свиридов