

Белорусский государственный университет



Регистрационный № УД- 3387 /уч.

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

Учебная программа для специальности:

1-31 05 01 Химия (по направлениям)

Направление специальности:

1-31 05 01-01 Химия (научно-производственная деятельность)

Минск  
2017 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 1-31 05 01-2013, утвержденного и введенного в действие Постановлением Министерства образования РБ от 30.08.13 № 87, и учебного плана специальности G-31-155/уч 2013 г.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

А. А. Савицкий, доцент кафедры физической химии БГУ, к.х.н., доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физической химии Белорусского государственного университета

---

протокол № 9 от 24.05 2017 г.

Учебно-методической комиссией химического факультета Белорусского государственного университета для спецкурсов

---

протокол № от 2017 г.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная дисциплина «Физическая химия и технология тонкопленочных химических сенсоров и микросистем» предназначена для студентов химического факультета, обучающихся по специальности 1-31 05 01 «Химия (по направлениям)», направлению специальности 1-31 05 01-01 «Химия (научно-производственная деятельность)» и является дисциплиной по выбору. Целью спецкурса является расширение и углубление знаний 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.

При изложении курса основной упор делается на физико-химическое рассмотрение процессов взаимодействия потоков частиц с поверхностью кремниевой подложки, использование понятия «константа равновесия» процессов высокотемпературного разложения силана и других соединений, используемых при производстве микросистем.

Знание физико-химических основ процессов эпитаксии позволит будущим специалистам легко освоить современное производство микросхем, а также воспринять новые нанотехнологические схемы производства.

В результате изучения дисциплины обучаемый должен знать:

- 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;
- конструировать новые микросистемы;

владеть:

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

Дисциплина «Физическая химия и технология тонкопленочных химических сенсоров и микросистем» является актуальной для специализации «Химия твердого тела», так как готовит студентов 4-го курса к самостоятельной и эффективной работе при выполнении курсовых, дипломных работ и последующей работе на предприятиях электронной промышленности.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен закрепить и развить следующие компетенции, предусмотренные образовательным стандартом высшего образования ОСВО 1-31 05 01-2013 «Химия (по направлениям)».

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 порождать новые идеи.

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

Социально-личностные компетенции:

СЛК-6. Уметь работать в команде.

Профессиональные компетенции в области научно-исследовательской деятельности:

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, современных ее направлений и физико-химических методов исследования.

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

Профессиональные компетенции в области производственно-технологической деятельности:

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

ПК-6. На основе анализа показателей режимов, параметров схемы и технического состояния оборудования выявлять причины не оптимальности технологических процессов и разрабатывать пути их устранения.

ПК-7. В составе группы специалистов разрабатывать технологическую документацию, принимать участие в разработке стандартов, технических условий и нормативов.

Профессиональные компетенции в области инновационной деятельности:

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

ПК-10. Оценивать конкурентоспособность и экономическую эффективность разрабатываемых технологических процессов.

Дисциплина преподается в 9 семестре пятого курса. Общее количество часов для изучения дисциплины – 36, аудиторных – 36 (лекции – 20, практические занятия – 14, УСП – 2).

Форма получения высшего образования – очная.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – зачет.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### **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.

### **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.

### **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.

### **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.

### **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.

### **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.

## **7. Метод электронно-лучевого испарения.**

Импульсные и реактивные методы электроннолучевого 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.

## **8. Методы твердофазной эпитаксии.**

ТФЭ со средой переноса и без среды переноса.

## **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.

## **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. Электролитография. Рентгенолитография. УФ-литография. Ионолитография. Голографическая литография.

## **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.

## **12. Носители информации о поверхности твердого тела.**

Фотоны, электроны, ионы, нейтральные частицы.

## **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.

## **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.

**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.

**16. Вторичные преобразователи и методы обработки информации.**

**17. Применение химических сенсоров.**

Области применения химических сенсоров:

- промышленность;
- научные исследования;
- космические исследования и технологии;
- водородная и ядерная энергетика.



## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение. Предмет и содержание курса. Области применения тонких пленок. Роль пленочной технологии в развитии миниатюризации (микро- нано-) электронных микросистем и химических сенсоров.	2						
2	Основные понятия о тонкой пленке, эпитаксии, эпитаксиальном слое. Виды эпитаксии: автоэпитаксия, гетероэпитаксия, хемозэпитаксия. Планарная технология производства микросхем. Классификация методов получения тонких пленок и эпитаксиальных слоев.	2						
3	Теоретические основы процессов нарастания тонких пленок и эпитаксиальных слоев. Механизм конденсации и неравновесные состояния в пленках. ПК и ПЖК- механизмы конденсации вакуумных конденсатов на	2						

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	изотропных подложках. Фазовая, структурная и субструктурная неравновесность в пленках.							
4	<p>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.</p>	2						

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	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.	2			2			Отчет по лабораторной работе
6	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.	2					1	Устный опрос

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	<p>Испарение сплавов и соединений. Метод дискретного испарения. Подложки. Методы подготовки и контроль качества подложек. Защита поверхности подложки.</p> <p>Метод катодного распыления. Конструкции установок катодного распыления. Преимущества и недостатки метода катодного распыления.</p> <p>Реактивное катодное распыление.</p> <p>Метод магнетронного распыления. Конструкции магнетронов. Особенности, преимущества и недостатки метода магнетронного распыления различных веществ. ВЧ и СВЧ магнетронное распыление диэлектриков.</p>	2			2			Отчет по лабораторной работе
8	<p>Метод электронно-лучевого испарения.</p> <p>Импульсные и реактивные методы электронно-лучевого испарения.</p> <p>Методы лазерного испарения веществ в вакууме.</p>	2						Устный опрос

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторских часов				Иное	Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Режимы непрерывной генерации и модулированной добротности. Конструкции установок. Методы ионно-лучевого травления, испарения, легирования поверхности и тонких пленок. Методы твердофазной эпитаксии. ТФЭ со средой переноса и без среды переноса.							
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.	2			2			Отчет по лабораторной работе

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	<p>Влияние основных факторов на этот процесс. Химизм, термодинамика, кинетика процесса автоэпитаксии кремния и германия. Литографические процессы в технологии микроэлектронных устройств. Назначение и методы фотолитографии. Контактная фотолитографии. 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.</p>	2						

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	УФ-литография. Ионолитография. Голографическая литография.							
11	<p>Методы исследования поверхности и тонких пленок. Требования, предъявляемые к идеальному методу анализа поверхности. Физические процессы возбуждения, используемые при анализе поверхностей.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-облучение фотонами</li> <li>-электронная бомбардировка</li> <li>-бомбардировка нейтральными частицами</li> <li>-наложение электрического поля</li> <li>-подведение тепловой энергии.</li> </ul> <p>Носители информации о поверхности твердого тела: фотоны, электроны, ионы, нейтральные частицы</p>						1	Устный опрос
12	<p>Перечень и сравнительная характеристика методов анализа поверхностей.</p> <p>Анализ поверхности методом Резерфордского обратного рассе-</p>							

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
		3	4	5	6			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС) Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия Оже-электронная спектроскопия Ядерные методы анализа Эллипсометрия							
13	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.							
14	Новые материалы для сенсоров и технологии их получения. Технологии получения тонких пленок оксидов олова, индия, циркония, титана, кремния, сложных оксидных фаз переменного состава,							



Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Иное	Количество часов УСП	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<p>силицидов, нитридов, углеродных алмазоподобных пленок, углеродных нанотрубок, нанопроводов. Получение темплатов на основе оксидов алюминия и титана. Вторичные преобразователи и методы обработки информации.</p> <p>Применение химических сенсоров. Области применения химических сенсоров:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-промышленность;</li> <li>-научные исследования;</li> <li>-космические исследования и технологии;</li> <li>-водородная и ядерная энергетика.</li> </ul>							
	Итого	20			6		2	

# ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## Рекомендуемая учебная литература

### *Основная:*

1. Киреев В., Столяров А. Технологии микроэлектроники. М. «Техносфера», 2006.
2. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. М. «Высшая школа», 1987.
3. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции. Под ред . Дж. Поута и др. М., «Мир», 1982.
4. Палатник Л.С., Папилов И.И. Эпитаксиальные пленки. М., «Наука», 1971.

### *Дополнительная:*

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

## **Темы лабораторных занятий**

1. Теоретические основы процессов нарастания тонких пленок и эпитаксиальных слоев.
2. Получение тонких пленок и эпитаксиальных слоев. Общая характеристика методов и их классификация.
3. Химические сенсоры. Состояние и перспективы исследований по химическим сенсорам. Классификация сенсоров. Принципы устройства и работы химических сенсоров.

## ПЕРЕЧЕНЬ ЗАДАНИЙ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

*Тема:* Основные понятия о тонкой пленке, эпитаксии, эпитаксиальном слое. Теоретические основы процессов нарастания тонких пленок и эпитаксиальных слоев.

*Задание 1.* Виды эпитаксии: автоэпитаксия, гетероэпитаксия, хемоэпитаксия. Планарная технология производства микросхем.

*Задание 2.* Классификация методов получения тонких пленок и эпитаксиальных слоев.

*Задание 3.* Механизм конденсации и неравновесные состояния в пленках. ПК и ПЖК – механизмы конденсации вакуумных конденсаторов на изотропных подложках. Фазовая, структурная и субструктурная неравновесность в пленках.

*Перечень средств диагностики:*

1. Устный опрос на лабораторном занятии.

*Тема:* Получение тонких пленок и эпитаксиальных слоев.

*Задание 1.* Общая характеристика методов и их классификация. Метод испарения и конденсации молекулярных пучков в вакууме.

*Задание 2.* Конструкции вакуумных установок и испарителей вещества.

*Задание 3* Испарение сплавов и соединений. Метод дискретного испарения.

*Перечень средств диагностики:*

1. Устный опрос на лекции и лабораторном занятии.

## **ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ**

1. Устный опрос в формате вопрос-ответ по теме 1 «Формы роста частиц вакуумных конденсатов на изотропных подложках», теме 2 «Метод электронно-лучевого испарения», теме 3 «Методы исследования поверхности и тонких пленок», теме 4 «Новые материалы для сенсоров и технологии их получения»
2. Устный зачет по дисциплине.
3. Отчет по лабораторной работе.

## 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 №9 от 24.05.2017 г.
Физическая химия твердого тела	Кафедра физической химии	Нет изменений	Вносить изменения не требуется. Протокол №9 от 24.05.2017 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 № 9 от 24.05.17 г.)

Заведующий кафедрой  
Доктор химических наук  
Профессор  
(ученая степень, ученое звание)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

В.В.Паньков  
(И.О.Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета  
Доктор химических наук  
Член-корр. НАН Беларуси  
(ученая степень, ученое звание)

(подпись )

Д.В.Свиридов  
(И.О.Фамилия)