

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников**  
**высшей школы по направлениям «Композитные наноматериалы» и «Создание сенсоров**  
**и эффекторов на базе наноматериалов»**  
**на базе учебного курса**

**«Нанокompозитные материалы и их газовые сенсорные свойства»**

Цель: Целью изучения курса является получение фундаментальных знаний и практических навыков в области физико-химических свойств нанокompозитных материалов и возможностей использования этих свойств в химических сенсорных устройствах.

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения: 36 часов

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 8 часов в день

Курс относится к тематическому разделу “Электронные свойства органических и композитных наноматериалов”

*Целью изучения курса* является получение фундаментальных знаний и практических навыков в области физико-химических свойств нанокompозитных материалов и возможностей использования этих свойств в химических сенсорных устройствах – области знаний, имеющей большое значение для современного материаловедения, физики наноразмерных и молекулярных структур, физики и химии тонких пленок, для развития представлений об электронных свойствах нанокompозитных материалов и химических сенсорных устройствах. Задачи курса состоят в изучении основ физико-химических процессов, сопутствующих формированию и позволяющих использовать нанокompозитные материалы в качестве газовых сенсоров, и в получении практических навыков по формированию композитных наноматериалов и исследованию изменений их электропроводности в результате адсорбции молекул из газовой фазы.

### **Требования к уровню освоения учебного курса**

Преподаватели должны:

- 1.Знать:
  - основные принципы использования неорганических нанокompозитных материалов в газовых сенсорных устройствах;
  - основные принципы использования неорганических нанокompозитных материалов в газовых сенсорных устройствах;
- 2.Иметь навыки:
  - приготовления органических и композитных тонкопленочных материалов и лабораторных макетов сенсорных устройств на их основе;
  - проведения исследований электропроводности нанокompозитных материалов в результате адсорбции молекул из газовой фазы;
- 3.Иметь представление:
  - о материалах, используемых для химических газовых сенсоров;
  - основных методиках формирования нанокompозитных материалов;
  - возможностях применения композитных материалов в химических сенсорных устройствах.

Научные работники должны:

- 1.Знать:
  - основные принципы использования неорганических нанокompозитных материалов в газовых сенсорных устройствах;
  - основные принципы использования неорганических нанокompозитных материалов в газовых сенсорных устройствах;
- 2.Иметь навыки:
  - приготовления органических и композитных тонкопленочных материалов и лабораторных макетов сенсорных устройств на их основе;
  - проведения исследований электропроводности нанокompозитных материалов в результате адсорбции молекул из газовой фазы;
- 3.Иметь представление:
  - о материалах, используемых для химических газовых сенсоров;
  - основных методиках формирования нанокompозитных материалов;
  - возможностях применения композитных материалов в химических сенсорных устройствах.

Учебный курс «Нанокompозитные материалы и их газовые сенсорные свойства» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объёмом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории Электроники поверхности твердого тела, на Физическом факультете Санкт-Петербургского Государственного Университета. Дистанционная (теоретическая) часть учебного курса состоит из пяти лекций:

### **Лекция 1. Введение. Материалы для химических газовых сенсоров.**

Классификация и основные характеристики химических газовых сенсоров. Наноразмерные материалы для сенсорных датчиков: нано-структурированные и поверхностно-допированные образцы, нанокompозитные материалы.

### ***Лекция 2. Методы формирования нанокompозитных материалов.***

Нанокompозиты, содержащие металлы или полупроводники. Нанокompозиты из керамики и полимеров. Золь-гель метод для формирования полимерной матрицы – контейнера сенсорных элементов. Молекулярные композиты. Синтез неорганических наночастиц. Режимы роста тонких пленок. Формирование тонких пленок из одномерных наноструктур. Методы физического осаждения пленок. Термическое испарение, ионно-, электронно- и лазерно-стимулированное испарение. Методы химического осаждения пленок. Химические газотранспортные реакции. Методы осаждения из жидкой фазы. Осаждение из раствора. Фотолитография.

### **Лекция 3. Неорганические нанокompозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах.**

Сенсоры на основе одномерных структур – нанопроволок. Детектирование кислорода с помощью транзисторов на основе одномерных структур - нанопроволок. Схемы расположения электродов в устройствах тонкопленочных газовых сенсоров. Характерные вольт-амперные отклики сенсоров в схемах с омическими контактами и с барьерами Шоттки. Электропроводность в массивных и в поликристаллических слоях оксидов металлов при адсорбции окисляющих газов. Композиты оксидов металлов с металлическими добавками. Влияние частиц Au сенсорные характеристики слоя  $TiO_2$ .

Фильтрующие покрытия для сенсорных устройств. Структурирование неорганических композитных пленок в процессе отжига.

#### **Лекция 4. Органические нанокомпозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах.**

Поверхности органических материалов, используемые для газовых сенсоров. Ковалентная связь поверхности сенсора с молекулами для детектирования. Физический и химический захват молекул для детектирования. Самосборка молекул в сенсорном слое. Сенсоры на основе молекул с дендримерной структурой. Протеины, антитела и ферменты в составе наноразмерных сенсоров. Обратимая деформация  $\pi$ -электронного облака молекулы в составе сенсорного слоя, сенсоры многократного применения. Композиты наночастиц оксидов металлов с малыми сопряженными органическими молекулами.

#### **Лекция 5. Примеры применения композитных материалов в сенсорных устройствах.**

Изменение электропроводности сенсорного слоя, металлоксидные сенсоры Тагучи. Сенсоры на основе полупроводниковых приборов. Фотолюминесцентные характеристики сенсорного слоя. Регистрация изменений флуоресценции для детектирования кислорода с помощью оптических сенсоров. Детектирование изменения массы, кварцевый резонатор, массив сенсоров. Сенсоры изменения массы на основе серии политиофеновых пленок и их композитов для детектирования летучих органических соединений.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в получении практических навыков по формированию композитных наноматериалов и исследованию их электропроводности в результате адсорбции молекул из газовой фазы. Основные задания лабораторного практикума:

#### **Лабораторная работа 1. Полупроводниковые композитные сенсоры. Формирование газочувствительных покрытий, их реакция на летучие органические соединения.**

Цель работы: получение практических навыков по приготовлению органических и композитных наноматериалов, лабораторных макетов сенсорных устройств на их основе и исследованию изменений электропроводности нанокомпозитных материалов в результате адсорбции молекул из газовой фазы.

### **Методические рекомендации по реализации учебной программы**

На дистанционную, очную часть учебного курса и самостоятельную работу отводится 10, 15 и 11 часов, соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru). Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

#### **Тестовые вопросы к курсу**

#### **«Нанокомпозитные материалы и их газовые сенсорные свойства»**

#### **Лекция 1. Введение. Материалы для химических газовых сенсоров.**

Вопрос 1. Изменение поверхностных характеристик (работа выхода, проводимость) при взаимодействии с тестируемыми частицами используется в следующих видах сенсоров.

Ответ 1.1. Электрохимических и микроакустических сенсорах.

Ответ 1.2. Микроэлектронных и электрохимических сенсорах.

Ответ 1.3. Полупроводниковых сенсорах.

Вопрос 2. Что называют чувствительностью газового сенсора?

Ответ 2.1. Относительное изменение измеряемой величины (например, сопротивления датчика  $R$ ) при заданных значениях температуры и парциального давления тестируемой газовой компоненты.

Ответ 2.2. Относительное изменение измеряемой величины (например, сопротивления датчика) при минимальном значении давления тестируемой газовой компоненты, которое вызывает сигнал сенсора.

Ответ 2.3. Минимальное значение давления, которое вызывает сигнал сенсора, равный уровню шума регистрирующей системы.

Вопрос 3. Что показывает переходная характеристика сенсора?

Ответ 3.1. Показывает, как изменяется во времени регистрируемый сигнал при включении и выключении экспозиции тестируемого газа.

Ответ 3.2. Показывает условия установления адсорбционно-электронного равновесия и скорость достижения максимального значения сигнала.

Ответ 3.3. Показывает скорость очистки поверхности сенсора при импульсным прогреве.

Вопрос 4. К наноструктурированным материалам относятся следующие.

Ответ 4.1. Материалы, изготовленные путем вакуумной конденсации металлического допанта на поверхность полупроводника.

Ответ 4.2. Тонкие пленки дендримеров и сопряженных олигомеров

Ответ 4.3. Нанопористые, нанокристаллические и порошковые образцы с характерным размером частиц порядка 1-100 нм.

Вопрос 5. Каким образом создают нанокompозитный материал?

Ответ 5.1. Путем сборки массивного образца из наноразмерных частиц разных материалов с использованием физико-химических технологий.

Ответ 5.2. Путем прессовки дисперсных частиц с их последующим отжигом.

Ответ 5.3. Путем проведения каталитических реакций на поверхностях нанопорошковых  $TiO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $SrTiO_3$  образцов.

## **Лекция 2. Методы формирования нанокompозитных материалов.**

Вопрос 1. Как изменения происходят при изменении размеров от макрокристалла CdS к нанокристаллу с характерным размером порядка 10 нм?

Ответ 1.1. Ширина запрещенной зоны уменьшается от 4.5 до 2.5 эВ, время жизни на нижнем возбужденном уровне увеличивается от пикосекунд до нескольких наносекунд.

Ответ 1.2. Увеличивается ширина запрещенной зоны,

Ответ 1.3. Время жизни на нижнем возбужденном уровне увеличивается от пикосекунд до нескольких наносекунд, от 1600 до 400 °С понижается температура плавления.

Ответ 1.1. ПРАВИЛЬНЫЙ.

Вопрос 2. Каким образом формируют композиты на основе матрицы, приготовленной золь-гель методом?

Ответ 2.1. Золь-гель реакция не требует высокой температуры, поэтому в реакционные схемы удается включать органические соединения, как в виде активных олигомеров, так и готовых полимеров.

Ответ 2.2. В результате реакции поликонденсации гидроксидов образуется керамика из неорганической трехмерной сетки, которую называют матрицей.

Ответ 2.3. Сначала алкогольаты кремния (титана, циркония, алюминия или бора) подвергают гидролизу. Затем проводят реакцию поликонденсации гидроксидов.

Вопрос 3. Как проводят химическое восстановление производных золота(III) является в процессе синтеза наночастиц?

Ответ 3.1. Приготавливают обратные мицеллы с двумя видами исходных растворов  $\text{HAuCl}_4$ . Затем растворы смешивают, между мицеллами происходит обмен содержимого, и формируются наночастицы.

Ответ 3.2. Для восстановления к  $\text{HAuCl}_4$  в водной среде добавляют амфифильные поверхностно-активные молекулы, что приводит к формированию наночастиц с приблизительными размерами 20 нм.

Ответ 3.3. Путем восстановления  $\text{HAuCl}_4$  в водной среде. В качестве восстановителя используют тринатрийцитрат, в качестве стабилизатора – меркаптопропионат натрия.

Вопрос 4. Каковы критерии выбора жидкого катализатора в методе испарения-конденсации?

Ответ 4.1. Катализатор образует капельки жидкости при нагреве, которые предоставляет узловые точки для конденсации. Требуется отсутствие взаимодействия с частицами для роста и выращенными кристаллами.

Ответ 4.2. Катализатор образует капельки жидкости при нагреве, они смешиваются частицами для роста, растворенными в жидкости. Затем проводят конденсацию.

Ответ 4.3. Надо, чтобы катализатор способствовал разветвлению наностанг в процессе конденсации на выбранной поверхности.

Вопрос 5. Что представляет собой процедура травления в процессе фотолитографии?

Ответ 5.1. Химическая реакция в фотозащитном слое, при которой фотозащитный слой либо полимеризуется, либо разлагается.

Ответ 5.2. Погружение в растворитель, который вымывает непокрытую фотополимером часть пленки. Сам фотополимер не подвергается воздействию этого растворителя.

Ответ 5.3. Процесс заключается в переносе структурированного образца с фотомаски на поверхность подложки.

### **Лекция 3. Неорганические нанокompозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах.**

Вопрос 1. Каковы возможности использования явления сегментации одномерной наноструктуры в результате адсорбции в сенсорных устройствах?

Ответ 1.1. Набор сегментов демонстрирует физико-химические свойства, отличающиеся от свойств целостной наноструктуры. В случае если длина сегментов сопоставима с 1 нм, то одномерная наностанга переформируется в систему последовательно соединенных 0D структур – квантовых точек.

Ответ 1.2. Сегментация приводит к формированию ультатонкой пленки с повышенной площадью поверхности, что увеличивает чувствительность.

Ответ 1.3. В случае если длина сегментов сопоставима с 1 нм, то в одномерной наностанге возможно наблюдать ступенчатую зависимость тока от напряжения.

Вопрос 2. Чем объясняется сдвиг порогового напряжения в сторону положительных значений и уменьшение наклона характеристик в линейной области при исследовании детектирования кислорода сенсором на основе  $\text{ZnO}$  нанопроволок?

Ответ 2.1. Изменением конформации цепочек  $\text{ZnO}$  нанопроволок.

Ответ 2.2. Сегментацией  $\text{ZnO}$  нанопроволок и преобразованием в систему последовательно соединенных 0D структур – квантовых точек.

Ответ 2.3. Формированием отрицательно заряженных ионов ( $O^-$ ,  $O_2^-$ ), что соответствует сужению канала проводимости ZnO материале.

Вопрос 3. На основе чего изготавливают сенсоры Тагуччи?

Ответ 3.1. На основе поверхностно-допированных оксидов металлов.

Ответ 3.2. На основе прессованных и спеченных порошкообразных твердых материалов, обладающих зернистой структурой, например, полупроводящих оксидов металлов с проводимостью n-типа.

Ответ 3.3. Основой такого сенсора является двухконтактная схема расположения электродов с сетчатым контактом.

Вопрос 4. Как изменяются свойства поликристалла SnO<sub>2</sub> при легировании посредством катализатора Nb в концентрации 0.1 mol%?

Ответ 4.1. Это приводит к десятикратному повышению сопротивления материала.

Ответ 4.2. Это приводит к росту поликристалла SnO<sub>2</sub> при температурах около 900 оС.

Ответ 4.3. Легирование приводит к уменьшению характерного размера микрокристаллита от 220 нм до 30 нм.

Вопрос 5. В чем, в основном, выражается структурирование неорганических композитных пленок в процессе отжига?

Ответ 5.1. При отжиге происходит сегментация микрокристаллитов среднего размера.

Ответ 5.2. При отжиге происходит объединение малых частиц, микрокристаллитов и кластеров в более крупные.

Ответ 5.3. При отжиге происходит разветвление структуры материалов, изготовленных на основе нанопроволок и нанопроволок.

#### **Лекция 4. Органические нанокompозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах.**

Вопрос 1. Какие устройства называют органическими сенсорами?

Ответ 1.1. Устройство, использующее органический элемент для детектирования наличия тестируемого вещества или каких-либо физико-химических изменений в окружающей среде.

Ответ 1.2. Устройство, приготовленное в результате отжига при температурах менее 500°С.

Ответ 1.3. Устройство, изготовленное из прессованных и спеченных порошкообразных твердых материалов, обладающих зернистой структурой.

Вопрос 2. Что происходит при физическом захвате молекул для детектирования?

Ответ 2.1. Внутренние участки поверхности пористой мембраны образуют ковалентные связи с захваченными молекулами.

Ответ 2.2. Используют полупропускающие мембраны, материал которых не образует ковалентные связи с захваченными молекулами.

Ответ 2.3. Происходит формирование одинаковых химических связей между каждой молекулой и определенными инвариантными точками поверхности сенсора.

Вопрос 3. Каковы основные стадии процесса формирования самособранного монослоя (SAM) в сенсорном устройстве?

Ответ 3.1. Молекулы взаимодействуют между собой и сами собираются в структуры любой заранее заданной формы.

Ответ 3.2. Последовательное формирование одинаковых химических связей между каждой молекулой и определенными инвариантными точками поверхности подложки.

Ответ 3.3. Нанесение раствора амфифильных молекул, адсорбция молекул на узловых точках поверхности, упорядочение молекул в монослое.

Вопрос 4. В чем состоит недостаток использования ферментов в наноразмерных сенсорах?

Ответ 4.1. Ферменты, проводящие реакцию окисления-восстановления, в составе тонкой пленки плохо участвуют в процессах переноса электрического заряда с электродами, что приводит к ухудшению характеристик сенсора.

Ответ 4.2. Ферменты присоединяются к одному или нескольким лигандам, а затем конвертируют его в процессе химической реакции.

Ответ 4.3. В случае использования ферментов, процесс присоединения к лиганду является лишь первой стадией их действия, что снижает быстродействие сенсора.

Вопрос 5. Какие свойства компонент композита молекул CuPc и PTCDA с оксидами металлов SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> определяют распределение электронной плотности в этих композитах?

Ответ 5.1. Молекулы CuPc обладают электрон-акцепторными свойствами по отношению к оксидам титана и олова, в то время как молекулы PTCDA являются донором электронов.

Ответ 5.2. Молекулы CuPc обладают электрон-донорными свойствами по отношению к оксидам титана и олова, в то время как молекулы PTCDA являются акцептором электронов.

Ответ 5.3. Молекулы CuPc и PTCDA обладают электрон-донорными свойствами по отношению к оксидам титана и олова.

### **Лекция 5. Примеры применения композитных материалов в сенсорных устройствах.**

Вопрос 1. Как сенсор на основе SnO<sub>2</sub> реагирует на экспозиции в CO?

Ответ 1.1. Проводимость сенсора растет пропорционально парциальному давлению газа.

Ответ 1.2. Для спеченных образцов с зернистой структурой, изменяется характерный размер зерна.

Ответ 1.3. Проводимость сенсора зависит от парциального давления газа CO как степенная функция парциального давления, где показатель функции лежит в интервале от 0.3 до 0.8.

Вопрос 2. Как используют диоды в качестве сенсорных устройств?

Ответ 2.1. Регистрируют изменения вольт-амперной характеристики диода при воздействии молекул тестируемого газа. Причиной изменения характеристики служит изменение ширины и формы обедненного пограничного слоя.

Ответ 2.2. Регистрируют время релаксации носителей заряда, обусловленное основными носителями заряда, с характерным значением порядка 10 пкс.

Ответ 2.3. Сравнивают значения тока при напряжении 0.2-0.4 В и при напряжении 0.7 В.

Вопрос 3. Что соответствует понятию люминесценции?

Ответ 3.1. Свечение, избыточное над тепловым излучением тела, а также отражение и рассеяние света.

Ответ 3.2. Свечение, избыточное над тепловым излучением тела, если сохраняется связь между фазами колебаний поглощенного и излученного света.

Ответ 3.3. Свечение, избыточное над тепловым излучением тела, если это избыточное излучение продолжается после прекращения возбуждения в течение времени, превышающего период световой волны.

Вопрос 4. На чем основано детектирование кислорода с помощью оптических сенсоров?

Ответ 4.1. На том, что в волоконных световодах сердцевина окружена оболочкой с несколько большим показателем преломления.

Ответ 4.2. На том, что интенсивность люминесценции прямо пропорциональна интенсивности возбуждения.

Ответ 4.3 Кислород, проникающий из газовой или жидкой среды в чувствительное покрытие, гасит его флуоресценцию. Степень гашения связана с концентрацией кислорода.

Вопрос 5. Как регистрируется реакция сенсора в сенсорах изменения массы?

Ответ 5.1. Увеличение массы при адсорбции тестируемого вещества приводит к понижению частоты колебаний резонатора.

Ответ 5.2. Увеличение массы при адсорбции тестируемого вещества увеличивает частоту колебаний резонатора.

Ответ 5.3. Сенсорный слой наносят на поверхность металлических контактов и свободную часть поверхности кристалла и регистрируют изменения электропроводности между этими металлическими контактами.

### **Контрольные вопросы для проверки материала**

#### **Вопросы к Лекции 1. Введение. Материалы для химических газовых сенсоров.**

1. Каков принцип действия полупроводниковых газовых сенсоров, микроэлектронных сенсоров, электрохимических сенсоров, микроакустических сенсоров
2. Понятие о чувствительности сенсора, предельной чувствительности и избирательности
3. Понятие о переходной характеристике сенсора
4. Каково значение выбора температурного режима работы сенсора
5. Сравните определения нанопористых, порошковых и тонкопленочных наноструктурированных материалов.
6. Сравните химический и электронный механизмы влияния допанта на процессы сенсорного отклика в поверхностно-допированных материалах.
7. Приведите несколько примеров нанокompозитных материалов на основе смеси и неорганических и органических молекул и наночастиц.
8. Проведите оценку количества атомов в составе модельного нанокристаллита, кластера кубической формы с длиной ребра  $D = 10$  нм и при межатомных расстояниях  $d = 0.3$  нм.

#### **Вопросы к Лекции 2. Методы формирования нанокompозитных материалов**

1. Как изменяется величина ширины запрещенной зоны в полупроводниковых материалах при изменении размеров от макрокристалла CdS к нанокристаллу с характерным размером порядка 10 нм? Рассмотрите пример CdS.
2. Каковы основные этапы формирования керамической или полимерной матрицы золь-гель методом, этапы формирования композита на основе такой матрицы.
3. Поясните фазовую диаграмму для системы, состоящей из молекул матрицы с гибкими цепями и полимера с жесткими стержнями, Рис.2.2.
4. Как происходит формирование наночастиц CdS с использованием обратных мицелл?
5. Каков принцип синтеза наночастиц путем химического восстановления производных золота(III)?
6. Опишите схематически следующие три режима роста пленок: рост островков, рост островков и слоев, послойный рост.



7. Опишите процедуру формирования тонких пленок из одномерных наноструктур методами испарения-конденсации и растворения конденсации.
8. Основные принципы методов физического осаждения пленок. Сравните методы испарения, напыления, ионно-, электронно- и лазерно-стимулированного испарения.
9. Приведите схему методики термического испарения путем осаждения в газовом потоке.
10. Приведите схему методики испарения с помощью электронного пучка.
11. Основные стадии в процессе осаждения методом химических газотранспортных реакций, характерные режимы давления, температурные режимы.
12. Сравните процессы нанесения пленок из раствора методами вращательного полива, капельного полива, погружного полива и распыления.
13. Основные стадии процесса фотолитографии, особенности ее применения для нанесения элементов полупроводниковых устройств.

### **Вопросы к Лекции 3. Неорганические нанокompозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах.**

1. Причины сегментации одномерной наноструктуры в результате адсорбции тестируемых молекул. Возможности использования этого в сенсорных устройствах.
2. Изобразите схематически конструкцию транзистора на основе одномерных структур - нанопроволок.
3. Как изменяются характеристики транзистора на основе нанопроволок ZnO при экспозиции к кислороду?
4. Изобразите следующие схемы расположения электродов в сенсорных устройствах: а) Классическая схема (сенсорный слой на поверхности цилиндра, нагреватель внутри), б) двухконтактная латеральная, в) четырехконтактная, г) двухконтактная поперечная (омический контакт или Шоттки), д) двухконтактная с сетчатым контактом, е) латеральная, взаимопроникающие электроды.
5. Изобразите схематически изменения вольт-амперных характеристик, как реакцию на экспозицию к тестируемому газу сенсорных устройств в схемах с омическими контактами, с одним барьером Шоттки и с двумя барьерами Шоттки.
6. Механизм влияния адсорбции кислорода на электропроводность металлоксидных сенсоров для случаев поверхности массивного материала, межзеренного пограничного слоя и наноструктурированного материала.
7. Какие различия чувствительности зернистых металлоксидных сенсоров можно наблюдать в случаях, когда размер кластера материала а) меньше и б) больше длины экранирования Дебая в материале.
8. На примере легирования SnO<sub>2</sub> атомами Nb поясните, каково влияние добавления металлического компонента на электропроводность и размер микрокристаллитов в композитах оксидов металлов с металлическими добавками.
9. Как влияют наночастицы Au сенсорные характеристики пленок TiO<sub>2</sub>?
10. Роль фильтрующих покрытий для сенсорных устройств. Назовите характерные материалы, используемые для фильтрующих покрытий.
11. Каковы основные стадии структурирования неорганических композитных пленок в процессе отжига.

### **Вопросы к Лекции 4. Органические нанокompозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах.**

1. Укажите характерные виды поверхностей органических материалов, используемые для газовых сенсоров.

2. Приведите примеры формирования ковалентной связи поверхности сенсора с молекулами для детектирования.
3. Опишите механизмы физического и химического захвата молекул для детектирования в сенсорных материалах мембранного типа.
4. Понятие о самосборке молекул в сенсорном слое. Самособранные монослои (Self-assembled monolayers - SAMs) и стадии процесса их формирования.
5. Принципы действия сенсоров на основе молекул с дендримерной структурой.
6. Возможности использования протеинов в составе наноразмерных сенсоров. Опишите схематически взаимодействие протеин - лиганд.
7. Схема процесса взаимодействия антител с молекулами инородного вещества – антигенами. Конвертация лиганда ферментами. Формирование композитного материала путем совместного нанесения пленки ферментов и наночастиц золота.
8. Опишите схематически процесс деформации  $\pi$ -электронного облака сопряженной молекулы под воздействием детектируемой акцепторной молекулы.
9. Понятие о композитах наночастиц оксидов металлов с малыми сопряженными органическими молекулами.
10. Опишите механизм сенсорной чувствительности при адсорбции молекул, имеющих явно выраженные восстанавливающие свойства, в случаях композитов диоксида олова с а) электрон-донорным органическим компонентом и б) электрон-акцепторным органическим компонентом.

#### **Вопросы к Лекции 5. Примеры применения композитных материалов в сенсорных устройствах.**

1. Принцип действия сенсоров Тагуччи. Роль межзеренных интерфейсов в металлоксидных сенсорах.
2. Какие электронные свойства полупроводникового перехода могут быть подвержены изменению в результате экспозиции к молекулам тестируемых газов?
3. Изобразите схематически возможное изменение вольт-амперной характеристики диода Шоттки при экспозиции к тестируемому газу.
4. Изобразите схематически характерный отклик вольт-фарадной характеристики диода Шоттки со слоем оксида при экспозиции к тестируемому газу.
5. Понятие о люминесценции. Сравните механизмы флуоресценции и фосфоресценции. Спектральная зависимость фотолюминесценции, ее взаимосвязь со спектром поглощения.
6. Перечислите свойства люминесценции, обычно используемые для химического сенсорного анализа.
7. Опишите возможный состав чувствительного слоя в композитном оптическом датчике и схему работы оптического сенсорного устройства, регистрирующего гашение люминесценции в присутствии кислорода.
8. Принцип действия сенсоров изменения массы. Взаимосвязь изменения массы и изменения частоты колебаний резонатора.
9. Оцените толщину пленки политиофена, после осаждения которой на резонатор с базовой частотой 10 МГц, суммарная частота уменьшилась на 30 КГц. Плотность политиофена в пленке можно принять  $1.5 \text{ г/см}^3$ .
10. Изобразите схематически результат обработки данных массива сенсоров, показывающий возможность различить тестируемые газы.

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

**Темы контрольных рефератов по курсу  
«Нанокompозитные материалы и их газовые сенсорные свойства»**

1. Формирование композитных пленочных материалов методами осаждения из жидкой и газовой фаз, с помощью золь-гель метода.
2. Влияние адсорбции акцепторных молекул на поверхностную проводимость и работу выхода полупроводника n-типа.
3. Наноструктурирование поверхностных композитов в процессе допирования и термической обработки, отжига
4. Сенсоры на основе композитов с использованием низкоразмерных структур, наночастиц, нанопроволок.
5. Методика регистрации изменений фотолюминесценции пленок комплексов рутения в силикатной матрице для определения адсорбции газовых молекул
6. Сенсоры на основе кварцевых резонаторов и методы анализа экспериментальных данных системы нескольких сенсоров.

**Учебно-тематический план**

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов с контрольные вопросы, выполнение реферата	Очный практикум, включая подготовку и отчет	
	« Нанокompозитные материалы и их газовые сенсорные свойства»	36 ч.				
1	Лекция 1. Введение. Материалы для химических газовых сенсоров. Лекция 2. Методы формирования нанокompозитных материалов Лекция 3. Неорганические нанокompозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах. Лекция 4. Органические нанокompозитные материалы, используемые в сенсорных устройствах Лекция 5. Примеры применения композитных материалов в сенсорных устройствах.		10	3		1. Контрольные вопросы (электронная зачётка) 2. Дополнительные вопросы
2	Лабораторная работа 1. Полупроводниковые композитные сенсоры. Формирование газочувствительных покрытий, их реакция на летучие органические соединения.				15	Отчет
3	Выполнение реферата			8		Реферат
Итоговый контроль			Итоговый зачет			

**Список литературы (основной и дополнительной),  
а также других видов учебно-методологических материалов и пособий,  
необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных  
дисков и др.).**

**Список литературы  
и др. дополнительных источников информации.**

***Основная литература***

1. Мясников И.А., Сухарев В.Я., Куприянов Л.Ю., Завьялов С.А., Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях. М: Наука. 1991, -327 с. Пер.: Handbook of sensors and actuators 4. Semiconductor Sensors in Physical-Chemical Investigations. Ed. L.Yu. Kupriyanov. Elsevier. New-York, 1996, - 400 с.
2. Gruendler P. Chemical Sensors An Introduction for Scientists and Engineers, Springer, Berlin, 2007, -273p.
3. Fraden J. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications.–3rd ed. Springer, Berlin, 2004, -589p.
4. Kalantar-zadeh K., Fry B., Nanotechnology-Enabled Sensors, Springer, Berlin, 2007, -491p

***Дополнительная литература***

5. Лучинин В.В., "Нанотехнологии. Физика. Процессы. Диагностика. Приборы", Физматлит, 2006
6. В. Bushman, Handbook of Nanotechnology, Springer, Berlin, 2004
7. Sze, S.M., Kwok K., Physics of semiconductor devices, Wiley, NY, 2004
8. Holland L. Vacuum Deposition of Thin Films, Chapman and Hall: London, 1966 , -540 p.
9. F. Baldini, A.N. Chester, J. Homola, S. Martellucci Eds., Optical Chemical Sensors, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Springer, Berlin, 2006, 535p
10. W.R. Salaneck, K. Seki, A. Kahn, J.-J. Pireaux, Conjugated Polymer and Molecular Interfaces: Science and Technology for Photonic and Optoelectronic Applications, Marcel Dekker, New York, 2002.
11. Sylvester-Hvid K. O. and Ratner M. A., Simplified Charge Separation Energetics in a Two-Dimensional Model for Polymer-Based Photovoltaic Cells. *J. Phys. Chem. B* 2005, Vol. 109, p. 200-208.

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части  
учебного курса на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru)**