

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

УТВЕРЖДАЮ

Ректор РХТУ им. Д.И. Менделеева

_____ В.А. Колесников

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных
работников высшей школы

по направлению
«ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ»

на базе учебного курса
«Хемосенсорные наноматериалы»

Цель Ознакомление с современными технологиями химического детектирования на основе наноматериалов, анализ основных требований к свойствам и синтезу наноматериалов для химических сенсоров.

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения 24 часа

Форма обучения с частичным отрывом от работы

Режим занятий 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с современными технологиями химического детектирования на основе функциональных наноматериалов, анализ основных требований к чувствительным материалам, обзор методов синтеза.

Требования к уровню освоения учебного курса.

Преподаватели должны:

Знать:

- основные классы химических соединений, их физические и химические свойства;
- основы физико-химических процессов протекающих на границе раздела фаз;
- основы физико-химических методов анализа;
- основы гетерогенного катализа;
- основы физики полупроводниковых материалов;
- основы электрохимии.

Иметь навыки:

- синтеза веществ и материалов, их анализа, определения основных физико-химических характеристик;
- самостоятельно ориентироваться в литературе, посвященной химическим и физико-химическим аспектам нанотехнологии;

Иметь представление:

- о методах синтеза высокодисперсных систем;
- о строении вещества (в том числе кристаллическом);
- о поверхностных процессах;
- о супрамолекулярных структурах;
- о фазовых переходах вещества;

Научные работники должны:

Знать:

- основные классы химических соединений, их физические и химические свойства;
- основы физико-химических процессов протекающих на границе раздела фаз;
- основы физико-химических методов анализа;
- основы электрохимии.

Иметь навыки:

- синтеза веществ и материалов, их анализа, определения основных физико-химических характеристик;
- самостоятельно ориентироваться в литературе, посвященной химическим и физико-химическим аспектам нанотехнологии;

Иметь представление:

- о методах синтеза различных химических соединений;
- о строении вещества;
- о супрамолекулярных структурах;
- о фазовых переходах вещества;

Учебный курс «Хемосенсорные наноматериалы» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного курса обеспечивает слушателя необходимым объёмом знаний по выбранной тематике. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному обсуждению рефератов по выбранным темам и посещению специализированной лаборатории в РХТУ им. Д.И.Менделеева и (или) научно-образовательных центров в институтах Российской Академии наук и выполнению

специализированного лабораторного практикума. Дистанционная часть учебного курса составляет 12 часов учебной нагрузки и включает теоретическую часть (лекционную) и тестирование.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены теоретические основы процессов детектирования протекающих в химических сенсорах, рассмотрены основные вопросы применения наноматериалов сенсорике.

Теоретическая часть учебного курса состоит из пяти лекций.

Содержание лекционного курса

Лекция 1. Базовые понятия

Определение химического сенсора. Особенности химического сенсора: отсутствие пробоподготовки, квазинепрерывность процесса измерения, малое время отклика, возможность миниатюризации устройства детектирования, относительная дешевизна. Классификация основных типов химических сенсоров в зависимости от способа детектирования: проводимость, разность потенциалов, емкостное сопротивление, температура, масса, оптические константы. Характеристические параметры химических сенсоров: измеряемая величина, сигнал, чувствительность, время отклика, линейность и пр.

Основные физико-химические процессы, используемые в химических сенсорах. Основные особенности биосенсоров как химических сенсоров. Мультисенсорные анализаторы. Интеллектуальные системы «электронный язык», «электронный нос». Преимущества применения наноматериалов в сенсорике. Виды наноматериалов, применяемых для создания химических сенсоров и основные требования к «наноматериалам для хемосенсоров».

Лекция 2. Электрохимические сенсоры

Виды электрохимических сенсоров: потенциометрические, вольт-амперометрические, кулонометрические, кондуктометрические. Особенности использования электрохимических сенсоров. Твердоэлектродные сенсоры. Механизм проводимости в твердом электролите. Типы проводимости. Процессы переноса вещества на границах раздела фаз. Функциональные материалы для электрохимических сенсоров. Критерии выбора материалов для твердых электролитов. Методы получения нанотрубок, наностержней, нанолент и нанопроволок и других наноматериалов для электрохимических сенсоров.

Лекция 3. Оптические химические сенсоры

Основные принципы работы оптических химических сенсоров: поглощения света, отражения первичного (падающего) светового потока, люминесценции. Применение волоконной оптики для химических сенсоров. Использование наноразмерных пленок Ленгмюра—Блоджетт, самоорганизованных моно- и полислоев и других наноматериалов для оптических сенсоров. Синтез и требования к наноматериалам.

Лекция 4. Калориметрические сенсоры и полупроводниковые сенсоры

Сенсоры, основанные на измерении теплопроводности среды; сенсоры, использующие теплоту химических реакций в чувствительном слое (каталитические сенсоры). Кинетика гетерогенного катализа как обоснование возникновения отклика в сенсорной системе. Основные параметры сенсоров, особенности их применения.

Основные типы полупроводниковых сенсоров: сенсоры на основе систем металл-диэлектрик-полупроводник (полевые транзисторы и конденсаторы), диоды Шоттки, сенсоры проводимости на основе оксидных полупроводников. Катализ на оксидных полупроводниках. Классификация оксидных систем по полупроводниковым и каталитическим свойствам. Функциональные материалы для полупроводниковых сенсоров. Синтез и требования к наноматериалам на примере SnO₂.

Лекция 5. Масс-чувствительные химические сенсоры

Пьезоэлектрический эффект. Кварцевые резонаторы на поверхностных акустических волнах. Основные параметры масс-чувствительных химических сенсоров. Выбор чувствительного материала. Требования, предъявляемые к чувствительному покрытию. Методы нанесения чувствительного материала на пьезокварцевые резонаторы. Пленки Ленгмюра—Блоджетт, наноструктурированные рецепторные слои. Требования к наноматериалам для масс-чувствительных химических сенсоров.

Очная часть учебного курса представляет собой обсуждение рефератов по выбранным темам и ознакомительное посещение специализированной лаборатории в РХТУ им. Д.И.Менделеева и (или) научно-образовательных центров в институтах Российской Академии наук и выполнение специализированного лабораторного практикума. Задача очной части курса – углубление и закрепление информации, освоенной в ходе дистанционной части курса, включая знакомство с современной физико-химической лабораторией. Очная часть учебного курса составляет 12 часов учебной нагрузки.

Лабораторный практикум

Название работы. Система масс-чувствительный химический сенсор – атомно-силовой микроскоп – инструмент для детектирования аналитов примесей в потоке газа.

Цель работы и её основное содержание: ознакомление слушателей с наиболее типичными образцами кварцевых пьезовесов и атомно-силовым микроскопом. Продемонстрировать: технику нанесения наноматериала на кварцевые пьезовесы в качестве рецепторного слоя; провести эксперимент по регистрации паров аммиака в анализируемом воздухе; контроль состояния поверхности рецепторного слоя с помощью атомно-силового микроскопа.

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 12 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте www.nanoobr.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы к курсу «Хемосенсорные наноматериалы»

Лекция 1. Базовые понятия

Вопрос 1. Химический сенсор - это:

1 – любое устройство для детектирования химических веществ, 2 – устройство, избирательно реагирующее на конкретный химический объект путем химической реакции, 3 – устройство, реагирующее на изменение физических характеристик химических веществ, 4 – химическое соединение специфически связывающее аналит.

Ответ –

Вопрос 2. Не является преимуществом химического сенсора:

1 – компактность, 2 – дешевизна, 3 – селективность, 4 – малое время отклика

Ответ -

Вопрос 3. Трансдьюсер - это:

1 – блок сенсора, где происходит химическая реакция, 2 – детектируемое вещество, 3 – устройство для пробоподготовки, 4 – преобразователь аналитического сигнала в электрический.

Ответ -

Вопрос 4. Преимущество наноматериалов для хемосенсорики:

1 – малый размер может частиц, 2 – сравнительно небольшая масса, 3 – низкая стоимость, 4 – высокая чувствительность к заданному аналиту.

Ответ –

Вопрос 5. Преимущество полисенсорных анализаторов:

1 – возможность регистрации сигнала на компьютере, 2 – унификация схемных решений для различных сенсоров, 3 – создание хемосенсорных образцов анализируемых газовых смесей, 4 – повышение селективности, за счет комбинации различных методик

Ответ –

Вопрос 6. Требования к наноматериалам для хемосенсорики – характерный размер:

1. От 1 до 5 нм, 2 – до 50 нм, 3- до 100 нм.

Ответ -

Вопрос 7. Требования к форме кристаллитов:

1 – сфера, 2 - игольчатая, 3 – дисковидная, 4 - контролируемая и хорошо воспроизводимая форма частиц.

Ответ -

Вопрос 8. Требования к чистоте материала:

1 - нет специфических требований. 2 - Не ниже таковой для технических продуктов. 3 - Не ниже таковой для веществ реактивной квалификации. 4 – в соответствии со специфическими требованиями к материалу.

Ответ –

Вопрос 9. Требования к удельной площади поверхности:

1 - не предъявляются. 2 - Желательна максимальная площадь удельной поверхности 3 - Площадь удельной поверхности должна быть в диапазоне 90-200 м.кв/г, 4 - Площадь удельной поверхности должна быть в диапазоне 10-90м.кв/г.

Ответ –

Вопрос 10. Размерность измерения концентрации аналитов-примесей – PPM – означает:

1 - «частей на миллион», 2 - «частей на тысячу», 3 – «процентов на миллион», 4 – «процентов на тысячу».

Ответ -

Лекция 2. Электрохимические сенсоры.

Вопрос 1. К электрохимическим сенсорам относятся:

1 – вольт-амперометрические, 2 – термокаталитические, 3 – масс-чувствительные, 4 – атомно-эмиссионные.

Ответ -

Вопрос 2. К преимуществам электрохимических сенсоров может быть отнесена:

1 – высокая селективность, 2 – способность к быстрой регенерации при действии высоких концентраций аналита, 3 – низкая стоимость по сравнению с другими химическими сенсорами, 4 – наибольший срок службы по сравнению с другими химическими сенсорами.

Ответ -

Вопрос 3. При анализе смеси газов необходимо, чтобы электрохимические реакции посторонних компонентов:

1 – не имели места на данном электроде, 2 – протекали в области более высоких потенциалов, 3 – важны оба варианта 1 и 2, 4 – варианты 1 и 2 неверны.

Ответ -

Вопрос 4. Электрохимические сенсоры позволяют проводить анализ:

1 – газообразных сред, 2 – идеальных растворов, 3 – суспензий, 4 – все варианты правильные.

Ответ -

Вопрос 5. Сенсоры, в которых электрический сигнал преобразуется специфическим взаимодействием антиген – антитело называются:

1 – импедансометрический, 2 – потенциометрические, 3 – амперометрические, 4 – иммуноэлектрохимические.

Ответ -

Вопрос 6. В качестве индикаторных электродов в электрохимических сенсорах могут служить:

1 – инертные электроды, 2 – химически активные или модифицированные комплексными соединениями, 3 – ионселективные электроды, 4 – все перечисленные варианты.

Ответ -

Вопрос 7. Селективность электрохимического сенсора определяется выбором:

1 – подходящего материала электрода и рабочей области потенциалов, 2 – температуры эксперимента, 3 – объема пробы, 4 – все варианты верны.

Ответ -

Вопрос 8. Электролиты в электрохимических сенсорах могут быть:

1 – жидкими, 2 – твердыми, 3 – и жидкими, и твердыми, 4 – только жидкими буферными растворами.

Ответ -

Вопрос 9. Твердые электролиты в кислородных сенсорах должны обладать:

1 – высокой стойкостью к окислению, 2 – проводимостью по ионам O^{2-} , 3 – отсутствием фазовых переходов до 1000 °С, 4 – все варианты верны.

Ответ -

Вопрос 10. Применение углеродных нанотрубок в создании электрохимических сенсоров обусловлено в первую очередь:

1 – их малым размером, 3 – высокой проводимостью, 3 – высокой поверхностной энергией, 4 – высокой прочностью.

Ответ -

Лекция 3. Оптические химические сенсоры.

Вопрос 1. К достоинствам оптических сенсоров можно отнести:

1 – нечувствительность в электрических помехах, 2 – отсутствие необходимого электрода сравнения, 3 – возможность мгновенной передачи аналитического сигнала на расстояние, 4 – все перечисленные варианты.

Ответ –

Вопрос 2. Согласно закону Ламберта-Бугера-Бера зависимость интенсивности проходящего света от концентрации раствора:

1 – линейная, 2 – квадратичная, 3 – экспоненциальная, 4 – логарифмическая.

Ответ -

Вопрос 3. При проведении спектрофотометрии в видимой и ультрафиолетовой области раствор должен быть:

1 – окрашенным; 2 – гомогенным; 3 – оба критерия не имеют значения.

Ответ -

Вопрос 4. Оптодом называется:

1 – сенсор, имеющий в своей конструкции оптоволокно, 2 – сенсор, состоящий из твердого субстрата на поверхности которого иммобилизован аналитический реагент, 3 – любой оптический сенсор.

Ответ -

Вопрос 5. К принципам измерения в оптических сенсорах можно отнести:

1 – измерение поглощения света, 2 – измерение светоотражения, 3 – измерение люминесценции, 4 – все перечисленные варианты.

Ответ -

Вопрос 6. Диапазон действия рН оптодов по сравнению со стеклянными электродами:

1 – уже, 2 – шире, 3 – такой же, 4 – они работают в разных диапазонах рН.

Ответ -

Вопрос 7. Свечение под действием видимого и ультрафиолетового света называется:

1 – радиолюминесценция, 2 – фотолюминесценция, 3 – катодолюминесценция, 4 – сонолюминесценция.

Ответ -

Вопрос 8. Использование метода Лэнгмюра-Блоджет в оптических сенсорах обусловлено:

1 – зависимостью оптических свойств пленок от состава газа, 2 – удобством нанесения и контроля толщины покрытия, 3 – лояльностью к различным длинам волн света, 4 – все перечисленные варианты.

Ответ -

Вопрос 9. Перспективность квантовых точек для создания оптических сенсоров обусловлена:

1 – размером, много меньшим длины волны видимого света, 2 – высокой химической активностью, 3 – способностью к люминесценции, 4 – малой массой.

Ответ –

Вопрос 10. Полное внутреннее отражение в оптическом волноводе достигается при условии, когда индекс отражения основной части волновода:

1 – ниже индекса отражения оболочки волновода, 2 – выше индекса отражения оболочки волновода, 3 – равен индексу отражения оболочки волновода,

Ответ -

Лекция 4. Полупроводниковые сенсоры и калориметрические химические сенсоры.

Вопрос 1. К недостаткам полупроводниковых газовых сенсоров можно отнести:

1 – невозможность миниатюризации сенсора, 2 – низкая селективность, 3 – неспособность к регенерации поверхности после воздействия аналита.

Ответ –

Вопрос 2. В основу действия полупроводникового сенсора положено явление:

1 – изменения температуры при воздействии аналита, 2 – изменения химического состава чувствительного элемента при воздействии аналита, 3 – изменения электропроводности при воздействии аналита, 4 – все три предложенных варианта не верны.

Ответ –

Вопрос 3. Влияние воды на показания полупроводниковых сенсоров обусловлено тем, что:

1 – молекулы воды являются донорами электронов, 2 – молекулы воды являются акцепторами электронов, 3 – молекулы воды влияют на образование ионов кислорода при адсорбции молекулярного кислорода, 4 – нет верного варианта.

Ответ –

Вопрос 4. К достоинствам термистора относятся:

1 - большой температурный коэффициент сопротивления, 2 – простота устройства, 3 – стабильность характеристик во времени, 4 – все приведенные варианты.

Ответ –

Вопрос 5. Использование пористого алюминия наполненного тонкодисперсным катализатором в пеллесторах позволяет:

1 – уменьшить энергозатраты, 2 – увеличить селективность сенсора, 3 – уменьшить воздействие каталитических ядов, 4 – увеличить рабочий диапазон концентраций.

Ответ –

Вопрос 6. Аналитическим сигналом каталитического сенсора является:

1 – изменение химического состава аналита, 2 – выделение тепла в результате реакции горения аналита, 3 – изменение светового потока при горении аналита, 4 – изменение теплопроводности аналита.

Ответ –

Вопрос 7. В состав пеллистора входят:

1 – катализатор, 2 – спираль нагреватель, 3 – резистивный термометр, 4 – все перечисленные варианты верны.

Ответ –

Вопрос 8. Использование нанодисперсных оксидов в качестве материала полупроводниковых сенсоров позволяет:

1 – получить компактный сенсор, 2 – повысить селективность, 3 – повысить чувствительность, 4 – нет правильного ответа.

Ответ –

Вопрос 9 Как изменяется высота барьера Шоттки между частицами полупроводника n-типа в кислородной атмосфере с уменьшением размера частиц?

1 – увеличивается, 2 – уменьшается, 3 – барьер Шоттки не зависит от размера частиц

Ответ –

Вопрос 10 Какими недостатками обладают нанодисперсные оксиды для полупроводниковых сенсоров?

1 – отсутствие селективности, 2 – низкая термическая стабильность, 3 – низкая концентрация/скорость свободных носителей заряда, 4 – все варианты верны

Ответ –

Лекция 5. Масс-чувствительные химические сенсоры.

Вопрос 1. К недостаткам пьезо-кварцевых масс-чувствительных сенсоров относится:

1 – хрупкость, 2 – необходимость электронного блока для снятия аналитического сигнала, 3 – относительно узкий диапазон концентраций, 4 – все варианты верны.

Ответ –

Вопрос 2. Использование масс-чувствительных сенсоров возможно в:

1 – газообразных средах, 2 – жидких средах, 3 – оба варианта верны

Ответ –

Вопрос 3. В пьезомассметрии изменение частоты колебаний кристалла кварца зависит от изменения массы:

1 – экспоненциально, 2 – логарифмически, 3 – линейно, 4 – не зависит.

Ответ –

Вопрос 4. Для масс-чувствительных сенсоров характерны:

1 – высокая скорость отклика, 2 – высокая чувствительность, 3 – низкая селективность, 4 – все варианты верны.

Ответ –

Вопрос 5. В масс-чувствительных сенсорах повышение собственной частоты колебаний кристалла кварца приводит к:

1 – понижению порога обнаружения, 2 – увеличению диапазона измерения, 3 – повышению селективности, 4 – все перечисленные варианты верны.

Ответ –

Вопрос 6. Повышения селективности масс-чувствительного сенсора можно достигнуть:

1 – повышением площади сенсора, 2 – повышением собственной частоты кварца, 3 – подбором специфического материала покрытия, 4 – подбором техники нанесения покрытия.

Ответ –

Вопрос 7. Нанесение тонкопленочных покрытий на кварц является необходимым условием функционирования сенсора из-за:

1 – особой динамики адсорбции на тонких пленках, 2 – уменьшения вероятности «перегрузки» сенсора, 3 – снижения селективности покрытия, 4 – все варианты не верны.

Ответ –

Вопрос 8. Использование масс-чувствительного сенсора на акустических волнах позволяет:

1 – понизить порог обнаружения аналита, 2 – повысить селективность, 3 – повысить скорость отклика, 4 – нет правильного ответа.

Ответ –

Вопрос 9. В качестве материала для измерения влажности масс-чувствительным сенсором можно использовать:

1 – полимеры, 2 – молекулярные сита, 3 – силикагель, 4 – все варианты верны.

Ответ –

Вопрос 10. Нанесение чувствительного материала на кварцевый резонатор возможно следующими методами:

1 – золь-гель технологии, 2 – химического парофазного осаждения, 3 – Лэнгмюра-Блоджетт, 4 – всеми перечисленными методами.

Ответ –

Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 25 вопросов

1. Определение химического сенсора. Особенности химического сенсора
2. Основные физико-химические процессы, используемые в химических сенсорах.
3. Особенности и виды химических сенсоров
4. Каков принцип работы мультисенсорных анализаторов?.
5. Основные требования к «наноматериалам для хемосенсоров».
6. Виды электрохимических сенсоров и принципы их действия, особенности.
7. Электрохимический сенсор на кислород, принципиальная схема. Требования к твердым электролитам.

8. Электрохимические сенсоры на галогены принципиальная схема. Требования к твердым электролитам.
9. Потенциометрические, амперометрические и кондуктометрические ячейки как примеры использования твердых электролитов.
10. Критерии выбора материалов для твердых электролитов. Синтез материалов.
11. Виды оптических сенсоров и принципы их действия, особенности.
12. Волоконная оптика для химических сенсоров. Основы теории волноводов.
13. Принципы спектроскопических методов анализа для оптического детектирования.
14. Индекс отражения в оптических сенсорах.
15. Критерии выбора чувствительных материалов. Методы нанесения покрытий.
16. Виды калориметрических и полупроводниковых сенсоров. Принципы их действия, особенности.
17. Сходства и различия термокаталитических сенсоров и полупроводниковых сенсоров проводимости.
18. Катализ на оксидных полупроводниках.
19. Классификация оксидных систем по полупроводниковым и каталитическим свойствам.
20. Оксидные наноматериалы на основе SnO₂. Свойства, методы синтеза.
21. Пьезоэлектрический эффект.
22. Кварцевые резонаторы на поверхностных акустических волнах.
23. Основные параметры масс-чувствительных химических сенсоров.
24. Требования к наноматериалам для масс-чувствительных химических сенсоров.
25. . Пленки Ленгмюра—Блоджетт, наноструктурированные рецепторные слои

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для углубления усвоения всего учебного курса.

Темы контрольных рефератов в количестве 10 тем

1. Типы химических сенсоров: особенности конструкции и применение
2. Мультисенсорные анализаторы для анализа газовых сред
3. Мультисенсорные анализаторы для анализа жидкостей
4. Оксидные наноматериалы для хемосенсоров
5. Функциональные наноматериалы для электрохимических сенсоров
6. Синтез нанотрубок

7. Волоконно-оптические хемосенсоры
8. Термокаталитические хемосенсоры и наноматериалы для них
9. Функциональные наноматериалы для полупроводниковых сенсоров - на примере диоксида олова
10. Области применения масс- чувствительных хемосенсоров и наноматериалы для них

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 контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	“Хемосенсорные наноматериалы ”	24 ч.	10	2	12	1. Тесты для самотестирования 2. Контрольные вопросы (электронная зачётка)
	Лекция 1. Базовые понятия		2			
	Лекция 2. Электрохимические сенсоры		2			
	Лекция 3. Оптические химические сенсоры		2			
	Лекция 4. Полупроводниковые и калориметрические химические сенсоры		2			
	Лекция 5. Масс-чувствительные химические сенсоры		2			
	Итоговый контроль		1. Тесты для самотестирования	2. Контрольные вопросы (электронная зачётка)	3. Реферат	Реферат

Литература

а) основная

1. Роберт В. Каттрал. Химические сенсоры. М.: Научный мир, 2000. -144 с.
2. В.В. Малов. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. -272 с .
3. С. Н. Штыков, Т. Ю. Русанова. Наноматериалы и нанотехнологии в химических и биохимических сенсорах: возможности и области применения. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2008, т. LI, № 2 с. 92-100;

б) дополнительная

4. Peter Grundler. Chemical Sensors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
5. Нанотехнологии. Азбука для всех. Под. ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.

Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса на сайте www.nanoobr.ru