

Программа
краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных
работников высшей школы по направлению «Наноинженерия» на базе
учебного курса
«Проектирование наносенсоров»

Цель: изучение основных видов сенсоров на базе МЭМС/НЭМС, их функционального состава, принципов работы, областей применения и основных методов проектирования и моделирования. Материал курса является основой для изучения и применения методов разработки наносенсоров при выполнении исследовательской части курсового проекта, курсовых работ по технологии производства ЭВС, квалификационной работы и дипломного проекта.

Категория слушателей: преподаватели, ведущие обучение по программе бакалавра/магистра по направлению «Наноинженерия»

Срок обучения: 36 часов (18 очная, 18 заочная)

Форма обучения: очно-заочная с дистанционным обучением заочной формы

Режим очных занятий: 6 часов в день – 3 дня с отрывом от работы

Задачами данного курса является изучение:

- Методические аспекты преподавания курса в рамках реализации программ подготовки бакалавров/магистров по направлению «Наноинженерия»
- Классификации сенсоров на базе МЭМС/НЭМС.
- Формализации элементной базы наносенсоров в зависимости от области применения.
- Видов, функционального состава, методов проектирования и области применения датчиков давления.
- Видов, функционального состава, методов проектирования и области применения акселерометров.
- Видов, функционального состава, методов проектирования и области применения акустических сенсоров.
- Видов, функционального состава, методов проектирования и области применения расходомеров.
- Видов, функционального состава, методов проектирования и области применения химических и биомедицинских сенсоров.

Требования к уровню освоения учебного курса

Обучаемые должны:

- Знать:
 - Классификацию сенсоров на базе МЭМС/НЭМС.
 - Функциональный состав сенсоров и методы их проектирования.
 - Датчики давления, акселерометры, акустические сенсоры, расходомеры, химические сенсоры, сенсоры для биомедицинских применений.
 - Основы применения сенсоров на базе МЭМС/НЭМС.
- Уметь:
 - Разрабатывать элементную базу наносенсоров, удовлетворяющих функциональным требованиям и областям применения.
 - Разрабатывать модели наносенсоров и проводить их исследования.

- Иметь навыки:
 - Классификации наносенсоров по области применения и функциональному составу.
 - Моделирования устройств на базе наносенсоров.
 - Разработки технологических процессов изготовления наносенсоров.
 - Оптимизации конструкции наносенсоров по критическим показателям.

Учебный курс «Проектирование наносенсоров» 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 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены основы проектирования наносенсоров. Теоретическая часть учебного курса состоит из семи лекций:

Лекция 1: Наносенсоры: основные понятия, определения и термины

Общие представления. Миниатюризация. Свойства. Области применения. Классификация наносенсоров по области применения: датчики давления, акселерометры, акустические сенсоры, расходомеры, биологические и медицинские сенсоры. Фотолитография. Микрообработка. Нанесение тонких пленок. Травление. *LIGA*. Сопутствующие технологии. Датчики столкновения. Акселерометры для управления и навигации. Сканеры отпечатков пальцев. Барометры. Другие применения: магнитные головки.

Лекция 2: Датчики давления

Области применения. Конструктивная реализация. Подходы к проектированию и изготовлению, их особенности, преимущества и недостатки. Типичный пьезорезистивный датчик давления. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Технология изготовления. Чувствительные элементы. Пьезорезисторы, мост Уитстона, принципы измерения напряжения растяжения и сжатия. Типичный ёмкостной датчик давления. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Технология изготовления. Паразитные ёмкости и методы их устранения. Конструктивная реализация рабочей полости датчика: абсолютные, монометрические и относительные датчики. Влияние температуры и нелинейности отклика на параметры датчиков. Понятие «центрального босса». Применение ультратонких мембран. Влияние на рабочий диапазон датчика и линейность выходной характеристики. Аспектное соотношение между толщиной мембраны и «центрального босса» и его влияние на параметры датчиков. Применение резонирующих микросистем. Резонирующие датчики давления. Принцип работы. Зависимость частоты колебаний от перепада давления. Абсолютные резонансные датчики, их применение, преимущества и недостатки. Добротность резонатора. Точность и чувствительность резонирующих датчиков. Увеличение степени интеграции. Разработка датчиков, работающих при повышенных температурах. Расширение рабочего диапазона. Увеличение точности и разрешения датчиков. Применение более сложных структур с использованием технологии микрообработки. Методы снижения стоимости производства. Уменьшение размеров датчиков.

Лекция 3: Акселерометры

Акселерометры на базе МЭМС/НЭМС. Основные характеристики. Классификация по технологии производства. Классификация по методу преобразования механического воздействия в электрический сигнал. Использование электрического поля в компонентах МЭМС. Принцип преобразования перемещений в изменение ёмкостей. Типичный ёмкостной микроакселерометр. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Методы повышения чувствительности и стабильности. Изготовление акселерометров по дифференциальной схеме. Информация об измеренном перемещении и способы её преобразования. Методы уменьшения погрешностей в работе акселерометров. Понятие опорного конденсатора и его применение. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Схема работы чувствительного элемента. Состояния акселерометра. Способ преобразования ускорения в выходной сигнал. Свойства. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Проблема стабильности и контролируемости механических соединений и методы её решения. Проблема повторяемости рабочих характеристик акселерометров и методы её решения. Виды термоакселерометров. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Микроакселерометр, основанный на конвекции. Тепловой микроакселерометр с инерционной массой: кондуктивная составляющая теплового потока; использование термодифференциала; выходное напряжение термоэлементов. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Конструкция и технология изготовления чувствительного элемента. Влияние напряжения сжатия и растяжения на сдвиг резонансной частоты колебаний. Чувствительность и рабочий диапазон резонирующих микроакселерометров. Туннельные микроакселерометры. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Принцип работы. Туннельный эффект. Система кремниевый зонд – металлический контакт. Использование системы обратной связи. Рабочий диапазон туннельных микроакселерометров. Современное состояние отрасли акселерометров. Области применения акселерометров. Тенденции развития: уменьшение массогабаритных показателей; уменьшение потребляемой мощности; возможность интеграции с микроэлектронными устройствами; снижение стоимости.

Лекция 4: Акустические сенсоры

Конфигурации. Принцип работы. Свойства. Пьезоэлектрические материалы и их применение. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Рабочий диапазон. Добротность резонирующего элемента. Используемые материалы. Температурные эффекты. Технология изготовления. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Чувствительность сенсоров. Рабочий диапазон. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Работа в жидкостях. Акустические волноводы. Направленные акустические волны. Сенсоры на волнах Лява. Температурные эффекты. Коэффициент связи. Принцип работы. Конструктивная реализация и особенности. Преимущества и недостатки. Поддерживающая мембрана. Весовой отклик. Материалы и технология изготовления. Применение для измерения температуры, силы, ускорения, крутящего момента, влажности, точки росы, потока, электронного шума. Методы измерения. Беспроводные конфигурации. Примеры жидкостных актуаторов (приводов).

Лекция 5: Расходомеры

Принцип работы. Конфигурации. Свойства. Области применения. Устройство и принцип работы. Поток газа. Теплотворная способность. Тепловые потери. Температурная компенсация. Линейность отклика. Устройство и принцип работы. Нагревательный

элемент и термосенсоры. Дрейф нуля. Чувствительность. Спаренные транзисторы. Конфигурации датчиков. Материалы и технология изготовления. Устройство и принцип работы. Нагревательный элемент. Тепловые импульсы и время отклика. Расходомер компании Ханиуэлл (*Honeywell*). Париленовый (*Parylene*) сеточный расходомер. Датчики потока и направления. Датчики потока газа, основанные на подъемной силе. Датчики скорости на основе ионочувствительных полевых транзисторов (*ISFET*). Снижение потребляемой энергии. Тепловая изоляция. Повышение чувствительности. Проектирование и оптимизация конструкции датчиков. Уменьшение размеров и стоимости.

Лекция 6: Химические и биомедицинские сенсоры

Принципы работы. Конфигурации. Свойства. Газовые сенсоры (структуры на основе канальных МОП транзисторов). Структуры на основе микро-нагревательных плит. Проблемы чувствительности, селективности и дрейфа. Чувствительность к ионам водорода. Применение ионочувствительных полевых транзисторов (*ISFET*). Области применения. Принципы работы. Конфигурации. Свойства. Материалы и принципы преобразования (потенциометрические, амперометрические, термические, оптические, гравиметрические). Процессы биораспознавания и иммобилизации. *ISFET*, *ENFET* (*Enzyme Field-Effect Transistor* – ферментный полевой транзистор), *IMFET* (*Internally Matched Field Effect Transistor* – внутренне согласованный полевой транзистор). Проблемы корпусировки. Области применения. Принципы работы. Диагностические системы. Системы направленной доставки лекарств. Разработка тканей. Терапия и хирургические устройства с минимальным воздействием. Примеры. Принципы работы. ДНК. ПЦР (полимеразная цепная реакция). Флуоресцентные методы. Рестрикционное расщепление. Электрофоретическая сепарация. Гибридизация. Проблемы масштабирования. Микросистемы для ПЦР, интегрированные микрочипы для анализа ДНК. Примеры.

Лекция 7: «Дорожные карты» развития наносенсоров

Рынок, основные игроки и тенденции развития. Поверхностная и объемная микрообработка. Усовершенствование технологий. Интеграция (системы на чипе), повышение точности (увеличение производительности), групповое изготовление (снижение стоимости), миниатюризация (портативность; прочность; низкое потребление энергии; простота внедрения, обслуживания и замены; снижение вреда для окружающей среды).

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в прохождении студентами лабораторного практикума. Все практические занятия проходят в компьютерном классе с использованием специализированного компьютерного программного обеспечения и мультимедийных средств.

Основные задания на лабораторный практикум:

- Моделирование элементов наносенсоров методом эквивалентных схем;
- Топологическое проектирование микро - и наносенсоров в *Cadence Virtuoso*;

Методические рекомендации по реализации учебной программы

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 18 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте nanolab.iu4.bmstu.ru. Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

Тестовые вопросы к курсу

«Проектирование наносенсоров»

Лекция 1: «Наносенсоры: основные понятия, определения и термины»

1. Основные компоненты МЭМС?

- А) Макросенсоры
В) Микроактуаторы
- Б) Макроэлектроника
Г) Макроструктуры

Ответ:

2. Основное преимущество устройств на базе МЭМС/НЭМС?

- А) Низкое потребление энергии
В) Дифференциация
- Б) Снижение времени на проектирование
Г) Автономность

Ответ:

3. Размеры устройств на базе МЭМС/НЭМС?

- А) 1м – 1 мм
В) 10 мкм – 10нм
- Б) 10 нм – 0,1нм
Г) 10мм – 10 мкм

Ответ:

4. Отрасль, получившая значительную выгоду от разработки наносенсоров и совершенствования технологий их изготовления?

- А) Сельское хозяйство
В) Судостроение
- Б) Автомобилестроение
Г) Авиация

Ответ:

5. Возбуждение резонатора в датчике столкновений осуществляется?

- А) Термически
В) Инерционно
- Б) Электрически
Г) Инерционно термически

Ответ:

Лекция 2: «Датчики давления»

1. Основные подходы к проектированию и изготовления датчиков давления?

- А) Пьезорезистивный и емкостной
В) Пьезорезистивный и индуктивный
- Б) Емкостной и индуктивный
Г) Пьезорезистивный и тепловой

Ответ:

2. Когда мембрана испытывает перепад давления, возникают напряжения?

- А) Растяжения
В) Сжатия
- Б) Изгиба
Г) Растяжения и сжатия

Ответ:

3. Резисторы, расположенные параллельно полю напряжения мембраны, испытывают напряжение?

- А) Сжатия
В) Растяжения
- Б) Изгиба
Г) Растяжения и сжатия

Ответ:

4. Что представляет собой «Центральный босс»?

- А) Значительное утончение центральной части мембраны
В) Значительное утолщение центральной
- Б) Незначительное утолщение центральной части мембраны
Г) Значительное утолщение периферийной

части мембраны

части мембраны

Ответ:

5. В зависимости от чего изменяется частота выходного сигнала в сенсорах на основе резонирующих микробалок?

А) От перепада температур

Б) От перепада напряжений

В) От перепада давления

Г) От изменения влажности

Ответ:

Лекция 3: «Акселерометры»

1. Из чего конструктивно состоят микроакселерометры?

А) Инерционной массы

Б) Ёмкостной массы

В) Термической массы

Г) Из всего вышеперечисленного

Ответ:

2. По какой схеме выполняются ёмкостные датчики перемещений для повышения чувствительности и стабильности?

А) По дифференциальной схеме

Б) По совместной схеме

В) По интегральной схеме

Г) По ёмкостной схеме

Ответ:

3. В спокойном состоянии замкнутого микроакселерометра ёмкости двух конденсаторов находятся в следующем соотношении?

А) $C_1 > C_2$

Б) $C_1 \geq C_2$

В) $C_1 = C_2$

Г) $C_1 \neq C_2$

Ответ:

4. Что лежит в основе принципа действия пьезорезистивных микроакселерометров?

А) Эффект туннелирования электронов

Б) Явление термоэффекта

В) Принцип суперпозиции полей

Г) Явление пьезоэффекта

Ответ:

5. Со скольких сторон подвешена инерционная масса в резонирующих микроакселерометрах?

А) С одной

Б) С трёх

В) С двух

Г) С четырёх

Ответ:

Лекция 4: «Акустические сенсоры»

1. Какой диапазон частот используется в акустических сенсорах?

А) 1 Гц – 1 кГц

Б) 100 кГц – 1 МГц

В) 10 кГц – 100 кГц

Г) 1 МГц – 10 ГГц

Ответ:

2. Самый большой потребитель акустических сенсоров?

А) Автомобилестроение

Б) Отрасль телекоммуникаций

В) Судостроение

Г) Сельское хозяйство

Ответ:

3. Какие структуры акустических сенсоров получили наибольшее распространение?

- A) RAW
 - B) SAW
- Ответ:

- Б) RWA
- Г) PWA

4. Какие материалы используют почти все акустические сенсоры для генерации акустических волн?

- A) Пьезоэлектрические
- B) Термоэлектрические

- Б) Диэлектрические
- Г) Все выше перечисленные

Ответ:

5. В акустических сенсорах наибольшее распространение получили следующие материалы пьезоэлектрических подложек?

- A) Кварц
- B) Карбон

- Б) Алмаз
- Г) Графит

Ответ:

Лекция 5: «Расходомеры»

1. Что является классическим подходом к проектированию расходомеров?

- A) Датчики с проводником высокого сопротивления
- B) Датчики с проводником низкого сопротивления

- Б) Датчики с проводником переменного сопротивления
- Г) Ни один из вышеперечисленных

Ответ:

2. От чего зависит отклик системы в датчиках с проводником высокого сопротивления?

- A) От температурного коэффициента расширения
- B) От температурного коэффициента сопротивления

- Б) От диэлектрической проницаемости среды
- Г) От коэффициента теплоотдачи

Ответ:

3. Что является измеряемой величиной для датчиков с проводником высокого сопротивления?

- A) Конвективные потери
- B) Диэлектрические потери

- Б) Изменение напряжения на термопарах
- Г) Плотность тока в проводнике

Ответ:

4. Какое значение температуры регистрирует чувствительный элемент в датчиках конфигурации «время полета»?

- A) Наименьшее
- B) Наибольшее

- Б) Среднеквадратичное
- Г) Среднее арифметическое

Ответ:

5. Что можно выделить среди основных недостатков датчиков конфигурации «время полета»?

- A) Низкая чувствительность
- B) Высокая себестоимость

- Б) Трудность реализации
- Г) Узкий диапазон измеряемых величин

Ответ:

Лекция 6: «Химические и биомедицинские сенсоры»

1. «Сенсорами Тагучи» это?

А) Сенсоры на основе окислов металлов

Б) Сенсоры на основе МОП транзисторов

В) Сенсоры на основе металлов

Г) Сенсоры на основе К-МОП транзисторов

Ответ:

2. На чём основан принцип работы «Сенсоров Тагучи»?

А) На уменьшении сопротивления

Б) На уменьшении температуры

порошкообразного слоя

порошкообразного слоя

В) На увеличении сопротивления

Г) На увеличении температуры

порошкообразного слоя

порошкообразного слоя

Ответ:

3. Наиболее развитой конфигурацией сенсоров на основе МОП транзисторов является полевой транзистор с затвором из ?

А) Золота

Б) Олова

В) Серебра

Г) Палладия

Ответ:

4. В биосенсорах, вещество распознается биологической системой, называющейся?

А) Биотранзистором

Б) Биорезистором

В) Биорецептором

Г) Биодиодом

Ответ:

5. Что является критически важным параметром биорецептора?

А) Чувствительность

Б) Инерционность

В) Избирательность

Г) Теплостойкость

Ответ:

Лекция 7: «Дорожные карты» развития наносенсоров»

1. Что не относится к отраслям с наиболее интенсивным применением МЭМС/НЭМС и сенсоров на их основе?

А) Электроника

Б) Медицина

В) Автомобилестроение

Г) Сельское хозяйство

Ответ:

2. Что относится к основным преимуществам МЭМС/НЭМС?

А) Интеграция

Б) Низкая себестоимость

В) Дифференциация

Г) Срок службы

Ответ:

3. Какой процент от стоимости изделия составляют операции сборки и тестирования?

А) 60%

Б) 80%

В) 90%

Г) 95%

Ответ:

4. Повышенного внимания к процессу контроля каких характеристик требует высокое соотношение между поверхностью и объемом для изделий МЭМС/НЭМС?

А) Электрических характеристик

Б) Объёмных характеристик

В) Поверхностных характеристик

Г) Диэлектрических характеристик

Ответ:

5. Каковы темпы роста мирового рынка акселерометров, гироскопов, микрофонов, датчиков давления, термодатчиков и осцилляторов?

А) 11%

Б) 13%

В) 12%

Г) 14%

Ответ:

Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 35 вопросов

1. Классификация наносенсоров по области применения.
2. Технологические процессы изготовления наносенсоров.
3. Применение датчиков столкновения.
4. Применение акселерометров для управления и навигации.
5. Применение сканеров отпечатков пальцев.
6. Применение барометров.
7. Датчики давления. Основные понятия.
8. Конструктивная реализация пьезорезистивных датчиков давления.
9. Конструктивная реализация ёмкостных датчиков давления.
10. Факторы, влияющие на параметры датчиков давления.
11. «Дорожные карты» развития датчиков давления.
12. Акселерометры. Основные понятия.
13. Ёмкостные микроакселерометры.
14. Замкнутые микроакселерометры.
15. Пьезорезистивные микроакселерометры.
16. Термоакселерометры.
17. Резонирующие микроакселерометры.
18. «Дорожные карты» развития акселерометров.
19. Акустические сенсоры. Основные понятия.
20. *TSM* структуры.
21. *APM* структуры.
22. *SAW* структуры.
23. *FPW* структуры.
24. Применение акустических сенсоров.
25. Расходомеры. Основные понятия.
26. Датчики с проводником высокого сопротивления.
27. Калориметрические и анемометрические датчики.
28. Конфигурация «время полета».
29. Примеры коммерческих расходомеров.
30. «Дорожные карты развития» расходомеров.
31. Химические и биомедицинские сенсоры. Основные понятия.
32. МЭМС/НЭМС для биомедицинского применения.
33. МЭМС/НЭМС для геномной диагностики.
34. «Дорожные карты» развития наносенсоров.
35. Ключевые направления развития наносенсоров.

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 «Проектирование наносенсоров»

1. Основные виды наносенсоров и области их применения

2. Термоакселерометры
3. Биологические сенсоры
4. Ключевые направления развития наносенсоров
5. Резонирующие микроакселерометры

Учебно-тематический план

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Семинары по тематике лекций (самостоятельное изучение, дистанционное общение преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Изучение материалов лекционных курсов и подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Проектирование наносенсоров»	36 ч.	18 ч.	.	18 ч.	Контрольные вопросы Реферат
1.	Лекция 1: Наносенсоры: основные понятия, определения и термины	1:	2 ч.	5 ч.		
2.	Лекция 2: Датчики давления		3 ч.	6 ч.		
3.	Лекция 3: Акселерометры	3:	3 ч.	6 ч.		
4.	Лекция 4: Акустические сенсоры	4:	3 ч.	6 ч.		
5.	Лекция 5: Расходомеры	5:	2 ч.	5 ч.		
6.	Лекция 6: Химические и биомедицинские сенсоры	6:	2 ч.	5 ч.		
7.	Лекция 7: «Дорожные карты» развития наносенсоров		2 ч.	5 ч.		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы		

Список литературы и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 13.

1. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. / Пер. Заболотная Ю.А.; Ред. пер. Свинцов Е.Л.- М.: Техносфера, 2006.
2. В.Варадан, К.Виной, К.Джозе «ВЧ МЭМС и их применение», М., «Техносфера», - 2004.
3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие./ Тул. Гос. университет. - Тула, 2002.
4. Мальцев П.П., Мальцева С.В., Мельников А.А. Введение в информационное обеспечение микросистемной техники: Учебное пособие. Микросистемная техника.

- Кн. 1. / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). – М., 2004.
5. Мальцев П.П., Никифоров А.Ю., Телец В.А. Микроактюаторы.: Учебно-методическая разработка / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)». – М, 2004.
 6. "The MEMS Handbook". Edited by M. Gad-el-Hak. CRC Press LLC (2002). ISBN 0-8493-0077-0.
 7. S.D. Senturia. "Microsystem design". Kluwer academic publishers (2002). ISBN 0-7923-7246-8.
 8. S.Beeby, G.Ensell, M.Kraft, N.White. "MEMS Mechanical Sensors". Artech House, Inc. (2004). ISBN 1-58053-536-4.
 9. S.E. Lyshevski. "Nano- and microelectromechanical systems: fundamentals of nano- and microengineering". CRC Press LLC (2001). ISBN 0-8493-916-6.
 10. N. Maluf. "An Introduction to MEMS Engineering". Artech House (2000). ISBN 0-89006-581-0.
 11. Информационный ресурс "MEMS and Nanotechnology Clearinghouse" (<http://www.memsnet.org/mems/>).
 12. Веб-сайт с бесплатной студенческой версией ПО *PSPICE* (<http://www.electronic-lab.com/downloads/schematic/013/>).
 13. Веб-сайт с бесплатным ПО *Layout Editor* (<http://sourceforge.net/projects/layout/>).

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части
учебного курса на сайте nanolab.iu4.bmstu.ru**