

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета радиотехники и электроники
_____ В.А. Небольсин /
подпись И.О. Фамилия
31 августа 2021 г

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины (модуля)
«Нано- микро- и оптомеханические системы»
наименование дисциплины (модуля) в соответствии с учебным планом)

Направление подготовки (специальность)
11.04.04 ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА
код и наименование направления подготовки/специальности

Профиль (специализация)
МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
название профиля/программы

Квалификация выпускника магистратура

Нормативный период обучения 2 года

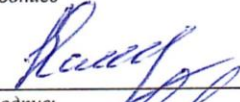
Форма обучения Очная

Год начала подготовки 2021

Автор(ы) программы


_____ **Калгин А.В.**
подпись

**Заведующий кафедрой
физики твердого тела**
наименование кафедры, реализующей дисциплину


_____ **Ю.Е. Калинин**
подпись

Руководитель ОПОП


_____ **А.В. Костюченко**
подпись

Воронеж 2021

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины: формирование у обучающихся наиболее общих представлений о современной нано-, микросистемной технике и оптомеханических системах, их технологической базе, физических принципах работы элементов этих систем

1.2. Задачи освоения дисциплины:

– изучение физических процессов в сенсорных и актюаторных элементах микросистемной техники и технологических основ их изготовления; базовые технологий и основных технологических операций нано-, микро- и оптомеханических систем;

– развитие умений использовать сведения о физических принципах работы, характеристиках и параметрах нано- и микро- и оптомеханических систем; давать общую характеристику базовым технологиям нано- и микро- и оптомеханических систем

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Нано- микро- и оптомеханические системы» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений (дисциплина по выбору) блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Нано- микро- и оптомеханические системы» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-1 - Способен аргументировано идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-1	знать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств
	уметь идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств
	владеть способностью идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Нано- микро- и оптомеханические

системы» составляет 3 з.е.

**Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий
очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		3
Аудиторные занятия (всего)	54	54
В том числе:		
Лекции	36	36
Практические занятия (ПЗ)	18	18
Самостоятельная работа	54	54
Виды промежуточной аттестации - зачет	+	+
Общая трудоемкость: академические часы	108	108
зач.ед.	3	3

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	СРС	Всего, час
1	Введение в дисциплину «Нано-микро и оптомеханические системы»	Цели и задачи курса «Нано- микро и оптомеханические системы». Основные понятия и термины	6	2	8	16
2	Объекты нано-, микро- и оптомеханической техники	Параметры и характеристики нано-, микро- и оптосистем. Классификация нано-, микро- и оптомеханических систем	6	2	8	16
3	Технологические основы изготовления нано-микро и оптомеханических систем	Технологические основы изготовления наномеханических систем. Технологические основы изготовления микромеханических систем. Технологические основы изготовления оптомеханических систем	6	2	8	16
4	Наномеханические системы	Наноманипуляторы. Наномеханические резонаторы	6	4	10	20
5	Микромеханические системы	Конструкции и принципы работы микромеханических приборов. Элементная база микромеханических приборов. Динамика чувствительных элементов микромеханических приборов. Измерительные свойства микромеханических приборов	6	4	10	20
6	Оптомеханические системы	Оптоэлектромеханические компоненты. Оптомеханические схемы. Оптомеханические микроприводы движения	6	4	10	20
Итого			36	18	54	108

5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-1	знать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств	Тест	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть способностью идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств			
--	---	--	--	--

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 3 семестре для очной формы обучения по двухбалльной системе:

«зачтено»

«не зачтено»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ПК-1	знать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств	Тест	Выполнение теста на 70-100%	Выполнение менее 70%
	уметь идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых функциональных материалов и устройств	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть способностью идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере электроники, проектирования, технологии изготовления и применения новых	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

	функциональных материалов и устройств			
--	---	--	--	--

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. *Кварцевое стекло как материал, обладающий минимальными потерями на внутреннее трение и гистерезис, максимальной добротностью при высокой стабильности физико-механических характеристик, используют для изготовления ответственных деталей микромеханических гироскопов (ММГ) и микромеханических акселерометров (ММА), в том числе маятника акселерометра. Кварцевое стекло в заготовках может быть получено несколькими технологическими способами:*

а) вакуумной плавкой минерального кристаллического сырья в печи с последующей осадкой расплава инертным газом;

б) выращиванием «були» путем наплавки в пламени кислородно-водородной горелки на подвижную мишень расплава минерального кристаллического сырья;

в) высокотемпературным парофазным гидролизом четыреххлористого кремния в пламени горелки.

Каждый из перечисленных способов производства стекла закладывает присущие ему и наследуемые в последующих операциях изготовления маятников свойства.

Какой процесс производства кварцевого стекла позволяет получить заготовки, в наибольшей мере удовлетворяющие функциональным требованиям маятниковых подвесов акселерометров, изготавливаемых изотропным травлением?

2. *Для изготовления подвесов ММГ и ММА необходимо иметь плоскопараллельную пластину из кремния с качественными торцами, поверхности которых должны быть обработаны таким образом, чтобы микрорельеф не превышал 0,05...0,1 мкм, измененный поверхностный слой был не более 1 мкм. Такие пластины с прецизионными поверхностями обрабатывают в сложном и длительном технологическом процессе, финишными операциями которого могут быть:*

а) суперфиниш с пастами или суспензиями на основе алмазных микропорошков зернистостью 1 мкм и менее;

б) химико-механическое полирование (доводка) суспензиями на основе микрозерен окиси кремния (силикозоли и силикогели, а также «Элплаз», «Аэросил»);

в) химико-динамическое полирование (доводка) в растворах кислот и окислителей.

Какой из финишных процессов обеспечивает лучшее качество поверхности у кремниевых пластин (минимальную высоту микронеровностей, минимальный нарушенный слой и сохранение геометрической точности пластин)?

3. Диэлектрические пленки диоксида кремния SiO_2 , нитрида кремния Si_3N_4 и фосфорсилкатного стекла используют для маскирования поверхности кремниевой пластины при формировании объемных структурных элементов изделий микросистемной техники, в том числе деталей ММА и ММГ.

Какая из перечисленных диэлектрических пленок обладает лучшей стойкостью к травителям, содержащим плавиковую кислоту?

4. Диэлектрические пленки диоксида кремния SiO_2 , нитрида кремния Si_3N_4 и фосфорсилкатного стекла используют для маскирования поверхности кремниевой пластины при формировании объемных структурных элементов изделий микросистемной техники, в том числе деталей ММА и ММГ.

Какая из перечисленных диэлектрических пленок обладает лучшей стойкостью к травителям, содержащим плавиковую кислоту?

5. Сборку прецизионных приборов ММГ и ММА необходимо вести в специальных помещениях, запыленность которых зависит от большого количества факторов. В число этих факторов входят параметры движения воздушных потоков. Характер и направление потоков воздуха в помещении должны быть такими, чтобы они способствовали ускорению процесса обеспыливания и не приводили к дополнительной генерации пыли в помещении и на отдельном рабочем месте.

Какой характер движения и направления потоков обеспечивает наилучшие условия обеспыливания отдельного рабочего места сборщика:

- а) горизонтальное ламинарное;
- б) горизонтальное турбулентное;
- в) вертикальное ламинарное;
- г) вертикальное турбулентное?

6. Формирование объемных структурных элементов при изготовлении деталей ММГ и ММА можно осуществить методами:

- а) микрообработки;
- б) планарной технологии;
- в) технологии LIGA;
- г) технологии SLIGA.

Какая технология позволяет формировать элементы с большим аспектным отношением (отношением ширины к высоте более 1:50) наиболее технологичным образом?

7. Микромеханические гироскоп и акселерометр содержат в своей конструкции подвижные элементы, которые с помощью внешних по отношению к ним элементов должны быть закреплены на высоте от нескольких до десятков микрометров над основанием, несущим датчик, считывающий информацию о положении подвижного элемента. Закрепление должно быть надежным, стабильным и прецизионным.

Какой технологический способ закрепления наилучшим образом обеспечивает выполнение перечисленных выше условий:

- а) пайка мягкими припоями;

- б) склеивание эпоксидными клеями;
- в) электроадгезионное сращивание;
- г) сварка?

8. Пайку проводников малого диаметра (менее 0,05 мм) и выводов микроэлементов можно выполнять с помощью:

- а) микропаяльников;
- б) струей горячего газа;
- в) лазерным лучом.

Какой способ пайки позволяет обеспечить минимальное силовое воздействие на соединяемые пайкой элементы конструкции, наибольшую локальность зоны нагрева и технологичность процесса?

9. Для формирования контактной маски на поверхности кремниевой пластины при изготовлении маятниковых акселерометров или подвесов гироскопов может быть использован позитивный или негативный фоторезист.

Какой из фоторезистов обеспечит более четкое формообразование краев у структурных элементов маски при оптимальной экспозиции?

10. Для стабилизации условий работы подвижных элементов и увеличения надежности ММГ и ММА герметизируют в корпусе, который вакуумируют или заполняют осушенным рабочим газом. Стабильность атмосферы в объеме корпуса зависит от качества выполнения герметизации, которое необходимо контролировать с помощью специальной техники.

Какой способ контроля герметичности микрокорпусов наиболее технологичен при обследовании малогабаритных приборов типа ММГ и ММА:

- а) способ теплового и ионизационного манометра;
- б) масс-спектрометрический метод;
- в) люминисцентный метод?

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Компоненты подвижной системы ММГ и ММА формируют из монокристаллического кремния с помощью специальной технологии, эти компоненты должны быть закреплены соответствующим образом на основании прибора, который можно изготовить из следующих материалов:

- а) кварцевого стекла;
- б) лейкосапфира;
- в) керамических материалов;
- г) ситаллов;
- д) нитрида кремния.

Какой материал из перечисленных выше материалов для изготовления основания прибора наилучшим образом согласуется по физико-механическим характеристикам с кремнием, обеспечивает наилучший теплоотвод и обладает хорошими технологическими свойствами?

2. В качестве защитных и маскирующих слоев на поверхности кремниевых пластин при формировании структурных элементов методами

травления и диффузии используют тонкие пленки диоксида кремния SiO_2 , которые могут быть сформированы различными способами, в том числе:

- а) термическим окислением в сухом кислороде;
- б) термическим окислением во влажном кислороде;
- в) окислением с помощью углекислого газа;
- г) пиролизом;
- д) с помощью химического переноса.

Какой из способов позволяет при минимальной температуре процесса и минимальной его длительности сформировать на поверхности кремниевой пластины пленку диоксида кремния SiO_2 достаточной для защиты толщины (более 0,3 мкм) с хорошим качеством (плотностью, близкой к 2,27 г/см³)?

3. Рабочие зазоры между подвижными и неподвижными элементами в ММА и ММГ не превышают 10...15 мкм, поэтому приборы изготавливают и собирают в специальных помещениях, где поддерживают особые условия, в том числе по содержанию, количеству и размеру механических частиц и пылинок в атмосфере помещения.

Какие условия по содержанию частиц и пылинок можно считать нормальными для обеспечения надежности сборки приборов:

- а) когда размеры частиц и их количество при оседании на детали и узлы не нарушают процесса сборки;
- б) когда общее количество частиц в атмосфере, независимо от их размера, не превышает определенной величины;
- в) когда диаметр частиц предельного размера не превышает половины размера (половины величины рабочего зазора, половины расстояния между проводниками электрической схемы и т. д.), определяющего функционирование прибора и количество этих частиц в единице объема атмосферы помещения ограничено, так же, как и количество частиц меньшего размера, чем предельный.

4. Для защиты поверхности пластин из кремния от механических повреждений при процессах фотолитографии часто используют слой диоксида кремния, который может быть сформирован несколькими процессами:

- а) химическим путем в жидком (травителе) электролите;
- б) высокотемпературным оксидированием в газообразных средах;
- в) ионным оксидированием в кислородной плазме (ионно-плазменный).

Ответьте на следующие вопросы:

1) какой процесс позволяет точно контролировать толщину оксидной пленки;

2) какой процесс обеспечивает наибольшую скорость формирования оксидной пленки?

5. При изготовлении деталей ММА и ММГ методами фотолитографии для переноса изображения структуры на подложку используют фотошаблоны на стеклянной основе с рабочим слоем, несущим функциональный технологический рисунок. Рабочий слой на поверхности фотошаблона может быть в виде тонкой пленки:

- а) из фоторезиста или фотоэмульсии;
- б) из металлического хрома;
- в) из окиси железа.

Фотошаблоны обладают различной технологической стойкостью к тиражированию и с различной точностью воспроизводят рисунок оригинала.

Ответьте на следующие вопросы:

- 1) какой фотошаблон обладает наибольшей стойкостью;
- 2) какой фотошаблон наиболее точно воспроизводит рисунок оригинала;
- 3) какой фотошаблон обеспечивает наибольшие удобства в работе (наиболее технологичен в серийном производстве деталей фотолитографией)?

6. Для формообразования элементов деталей ММГ и ММА путем вытравливания ненужных объемов в материале заготовки на ее поверхности формируют контактную защитную маску с соответствующим топологическим рисунком. Контактная маска может быть сформирована в слое фоторезиста, нанесенного на предварительно подготовленную поверхность заготовки. Нанесение фоторезиста может быть выполнено:

- а) центрифугированием;
- б) накатыванием валиком или нанесением с помощью штампов;
- в) вытягиванием.

Каждый из этих способов формирует слой фоторезиста с характерными особенностями его геометрических параметров, которые накладывают ограничения на предельное разрешение при фотолитографии.

Ответьте на следующие вопросы:

- 1) какой из перечисленных способов нанесения фоторезиста обеспечивает формирование слоя с минимальной толщиной и ее изменением по поверхности;
- 2) какой способ нанесения наиболее технологичен при необходимости формирования слоев фоторезиста на обеих сторонах кремниевой пластины;
- 3) какой способ следует применить при необходимости нанесения слоя фоторезиста равномерной толщины на криволинейную поверхность?

7. Чувствительный элемент ММГ или ММА содержит инерционную массу: ротор или лопасть, подвешенную на упругих элементах над основанием с зазором 4...6 мкм (до 12 мкм в некоторых приборах). Чтобы обеспечить свободное движение этой массы под воздействием привода движения или перемещение от внешнего воздействия (перегрузки), рабочий зазор в чувствительном элементе можно организовать несколькими способами:

- а) эпитаксиальным выращиванием слоя диоксида кремния на подложке с «жертвенным» слоем, который после формирования травлением узла из ротора (маятника) и упругих элементов подвеса удаляется селективным травлением;

б) формированием узла из ротора маятника с упругим подвесом в заготовке необходимой толщины и последующим присоединением узла к основанию (подложке) посредством анодной или диффузионной сварки;

в) присоединением заготовки (пластины диоксида кремния) к основанию в необходимых местах, последующей обработкой пластины до необходимой толщины и формообразованием в теле обработанной пластины элементов ротора (маятника) и подвеса травлением.

Какой из перечисленных способов формообразования чувствительных элементов обладает наибольшей технологичностью?

8. Для формообразования подвеса ММГ и ММА необходимо иметь заготовку из монокристаллического кремния с толщиной 10...30 мкм, чтобы в ней с помощью групповых процессов литографии сформировать все элементы подвеса. Заготовка может быть получена несколькими способами:

а) эпитаксильным выращиванием из газовой фазы на подложке из кремния;

б) молекулярно-лучевой эпитаксией на подложке из оксидированного кремния;

в) пиролитическим осаждением слоя кремния на подложку из аморфного материала с последующей перекристаллизацией (переводом поликристаллического слоя в монокристалл кремния).

Каждый из перечисленных способов формообразования заготовки вносит свои особенности и дефекты в монокристалл кремния, которые ограничивают возможности технологии и надежность подвеса, изготовленного из заготовки.

Ответьте на следующие вопросы:

1) какой процесс обеспечивает формирование заготовки с наиболее совершенной структурой выращенного слоя;

2) какой процесс обеспечивает возможность формообразования монокристалла кремния на аморфной подложке с наибольшей скоростью роста?

9. Формообразование профилей элементов у деталей ММГ и ММА в монокристаллическом кремнии может быть реализовано химическим травлением:

а) изотропным;

б) анизотропным;

в) селективным.

Каждый из перечисленных способов имеет свои характерные особенности в воспроизведении краевой зоны вытравленных элементов.

Ответьте на следующие вопросы:

1) какой из способов травления позволяет формировать краевые зоны в виде поверхностей, соответствующих кристаллографическим плоскостям кремния;

2) какой из способов позволяет реализовать самотормозящийся процесс травления и что для этого необходимо?

10. Скрытые «барьеры» для самоостановки растворения материала в процессе селективного травления кремния при формообразовании рельефных элементов на деталях ММГ и ММА могут быть сформированы несколькими методами:

- а) термодиффузией примеси через контактную маску;
- б) ионной имплантацией примеси с помощью установок типа «Везувий»;
- в) термомиграцией легирующей примеси.

Каждый из перечисленных методов имеет свои ограничения.

Ответьте на следующие вопросы:

1) какой метод создания «барьеров» для самоостановки селективного травления позволяет формировать скрытые профили с наибольшей точностью;

2) какой метод позволяет формировать сквозные каналы в пластинах кремния большой толщины?

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Вычислить жесткость упругого подвеса чувствительного элемента акселерометра (рис. 1).

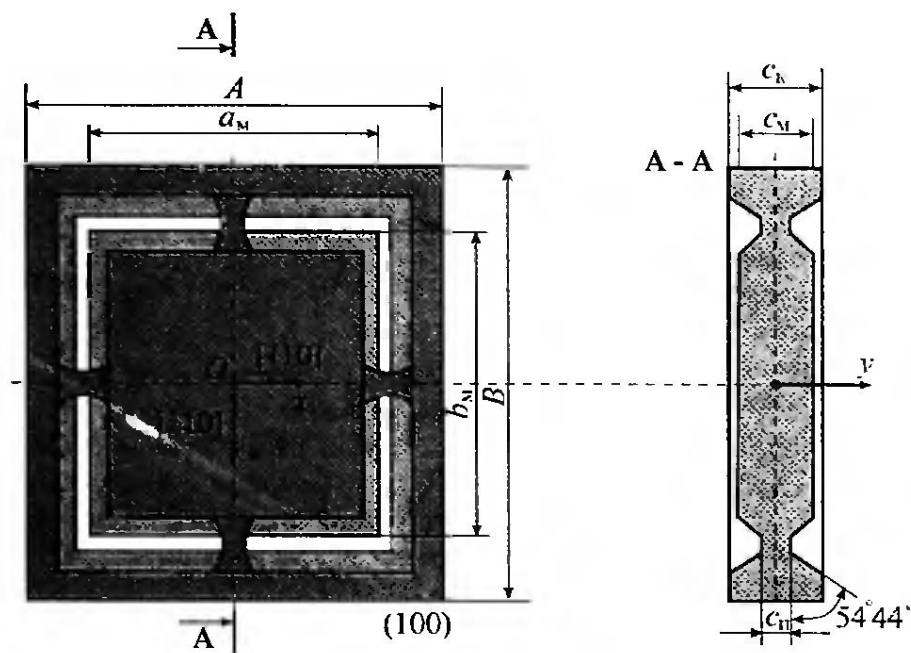


Рис. 1. Схема ЧЭ осевого микроакселерометра

Чувствительный элемент (ЧЭ) акселерометра изготовлен из кремниевой пластины толщиной c_k , плоскость xz которой совмещена с кристаллографической плоскостью (100), а оси xz сорентированы по кристаллографическим направлениям $[100]$.

С помощью анизотропного травления формируется симметричная лунка с наклоном граней $54^\circ 44'$, ориентированных в семействе четырех плоскостей (111). Инерционная масса (ИМ) чувствительного элемента выполнена в форме пластины с размерами a_m , b_m и c_m . Толщина упругого

элемента c_n , являющегося подвесом ИМ, может быть задана по времени травления. Упругий подвес сформирован в виде четырех симметрично расположенных перемычек (балок).

Исходные данные для материала: модуль Юнга $E_{(110)} = 1,68 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, модуль сдвига $G_{(110)} = 6,17 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.

Размеры пластины, м: $a_m = 9 \cdot 10^{-3}$; $b_m = 10^{-2}$; $c_m = 35 \cdot 10^{-5}$.

Поперечное сечение упругой балки, м: $b_n = 4 \cdot 10^{-4}$; $c_n = 25 \cdot 10^{-6}$; длина $l = 2 \cdot 10^{-3}$. Масса пластины $m_n = \rho a_m b_m c_m$, где ρ – плотность, г/см³.

а) $5,18 \cdot 10^{-6} \text{ Н·м}$;

б) $26,3 \cdot 10^{-7} \text{ Н·м}$;

с) $47,72 \cdot 10^{-5} \text{ Н·м}$;

д) $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Н·м}$.

2. Рассчитать коэффициент жесткости k_{11} для ЧЭ, схема которого показана на рис. 2.

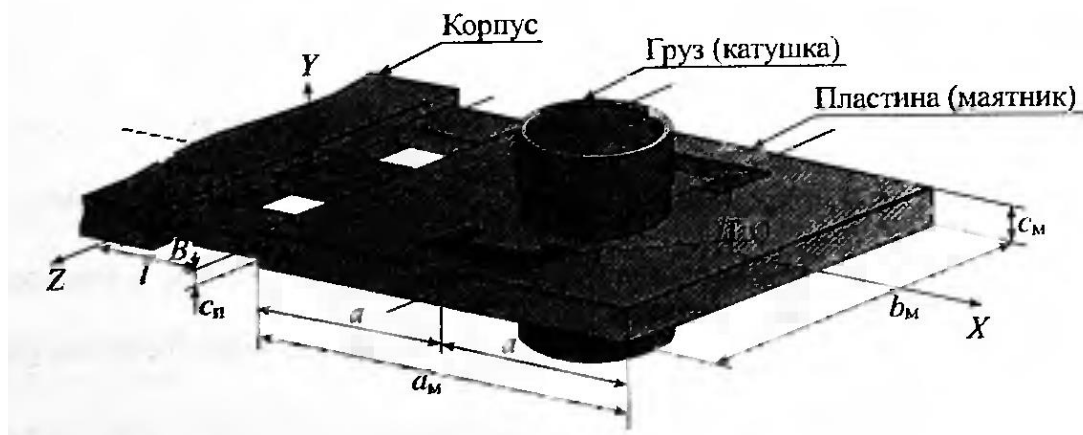


Рис. 2. Схема ЧЭ маятникового микроакселерометра

Чувствительный элемент представляет собой пластину с внешними размерами a_m , b_m и c_m , которая вместе с упругими элементами вытравлена из монокристалла, часть которого условно названа корпусом. В пластине выполнены перфорационные отверстия и в центре масс, совпадающем с геометрическим центром, расположена дополнительная масса (груз), которая может и отсутствовать. Для акселерометров компенсационного типа роль груза может выполнять катушка магнитоэлектрической обратной связи.

Упругие элементы (балки) могут иметь сложную конфигурацию как по высоте (c_n), так и по ширине (b_n). Здесь эти размеры приняты постоянными. Длина l и точки А и В соответствуют табл. 1.

Монокристаллический маятник изготовлен из кремния, для которого: $E_{(100)} = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $\rho = 2,33 \text{ г/см}^3$. Геометрические размеры пластины, м: $a_m = 4281,25 \cdot 10^{-6}$; $b_m = 9100 \cdot 10^{-6}$; $c_m = 350 \cdot 10^{-6}$. Размеры упругой балки, м: $l = 805 \cdot 10^{-6}$; $b_n = 400 \cdot 10^{-6}$; $c_n = 26,67 \cdot 10^{-6}$. Общая ИМ маятника [пластина с двумя грузами (катушками)] $m = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

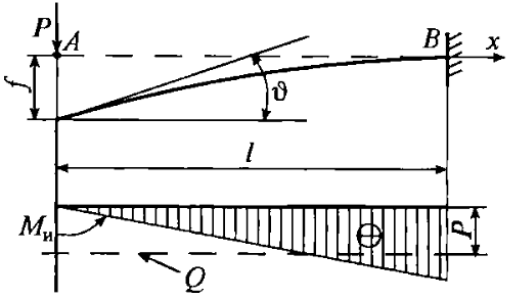
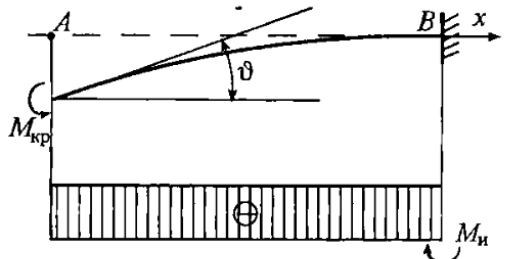
а) $2,036 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$;

б) $11,33 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$;

с) $0,881 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$;

d) $34,76 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$.

Таблица. Упругие элементы с одним свободным концом

Схемы нагружения; эпюры M и Q	Перемещения, моменты и перерезывающие силы
	$f = \frac{Pl^3}{3EI}; \quad \vartheta = -\frac{Pl^2}{2EI} \text{ (в точке A);}$ $Q = -P;$ $M_{\text{и}} = -Pl \text{ (в точке B)}$
	$f = \frac{M_{\text{кр}} l^2}{2EI}; \quad \vartheta = -\frac{M_{\text{кр}} l}{EI} \text{ (в точке A);}$ $Q = 0;$ $M_{\text{и}} = -M_{\text{кр}} \text{ (от точки A до точки B)}$

3. Вычислить КПД линейного микродвигателя по рис. 3.

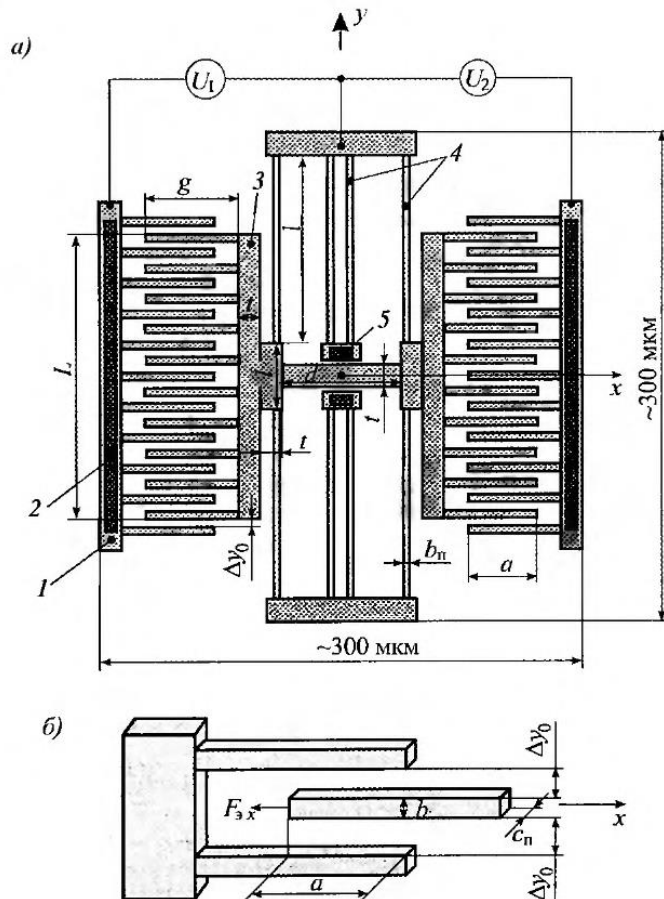


Рис. 3. Линейный микродвигатель:

а – принципиальная схема; б – элемент структуры; 1 – статор; 2, 5 – элементы (точки) крепления; 3 – ротор; 4 – упругие элементы подвеса

Микроструктура вытравлена из поликремния, имеющего $E = 1,4 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 2300$ кг/см³. Геометрические размеры по рис. 3: $c_n = 3,5$ мкм (толщина всей микроструктуры), $b = 4,0$ мкм (ширина пальца ротора, также и у статора), $a = 20$ мкм (взаимное перекрытие пластин конденсаторов), $\Delta y_0 = 2,0$ мкм (зазор между пальцами гребенчатых структур), $g = 30$ мкм (длина пальца ротора, также и статора), $L = 112$ мкм (длина ротора), $l = 120$ мкм (длина упругого элемента), $b_n = 2,0$ мкм (ширина упругого элемента), $d = 30$ мкм, $\ell = 24$ мкм, $t = 12$ мкм (размеры соединительных элементов).

Принять модули напряжений $U_{on} = U_x = 30$ В. Число пальцев ротора $n = 20$ шт.

- а) 2,5 %;*
- б) 10 %;*
- с) 45 %;*
- д) 80 %.*

4. Вычислить погрешность, вносимую линейной вибрацией основания в измерения перемещений ЧЭ микродатчика давления для исходных данных: $\Delta p_{max} = 10^4$ Н/м²; $\rho = 2,33 \cdot 10^3$ кг/м³; $c_m = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $y_s = y_{s0} \cos \omega t$ ($y_{s0} = 10^{-3}$ м, $\omega = 6,28 \cdot 10^2$ с⁻¹).

- а) 1,1 %;*
- б) 23,9 %;*
- с) 4,59 %;*
- д) 75 %.*

5. Рассчитать коэффициент демпфирования ЧЭ, ИМ которых имеет форму квадрата с $a_m = b_m = 9,48 \cdot 10^{-3}$ м. Демпфирующая среда – воздух; при $T = +20$ °С коэффициент динамической вязкости $\mu = 1,7 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с). Зазор $h_0 = 18 \cdot 10^{-6}$ м.

- а) 23,56 (Н·с)/м;*
- б) 16,12 (Н·с)/м;*
- с) 4,1 (Н·с)/м;*
- д) 0,6 (Н·с)/м.*

6. Рассчитать добротность, обусловленную внутренним трением в упругих элементах подвеса для МГ по рис. 4, при колебаниях ротора по координате β . Полагать, что ротор находится в вакуумированном корпусе.

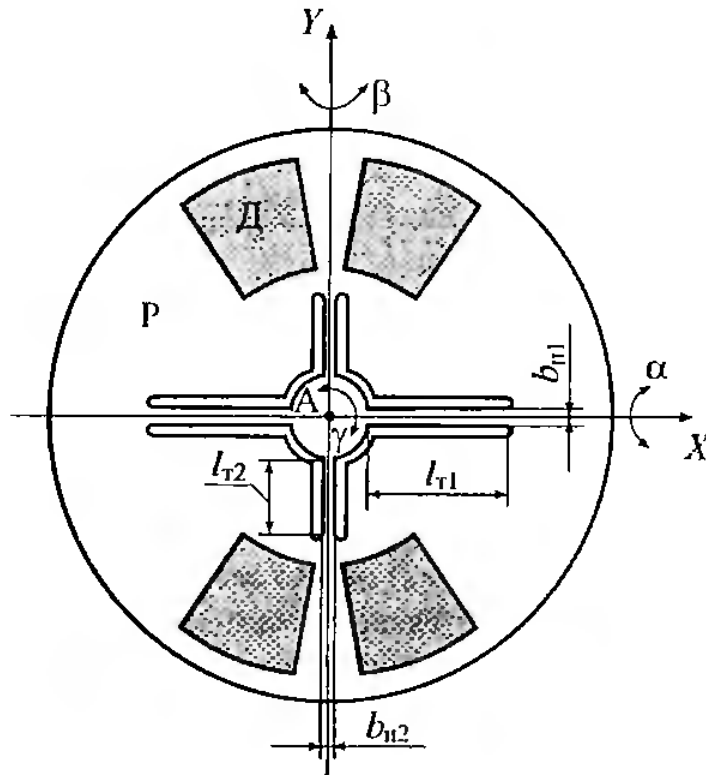


Рис. 4. Схема подвеса микрогироскопа RR-типа

Принять $c \approx c_r \approx 10^{-24} \text{ м}^4/\text{Н}^2$, $\Omega_x = 1 \text{ с}^{-1}$. Воспользоваться следующими исходными данными: момент инерции $J_0 = C_1 = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, экваториальный момент инерции ротора $J_\beta = 10^{-13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $b_{n1} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $l_{m1} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $b_{n2} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $l_{m2} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $c_n = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $E_{(100)} = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $G_{(100)} = 0,79 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $\omega_{\beta 0} = 1,73 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $p = \omega_{\gamma 0} = 1,32 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

- a) $1,45 \cdot 10^3$;
- b) $2,2 \cdot 10^4$;
- c) 0,007;
- d) 0,3.

7. Рассчитать максимальную амплитуду горизонтальной вибрации, измеряемой акселерометром с электростатической обратной связью.

Исходные данные: $m = 0,075 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$; $l + a \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $n = 3$; угол установки акселерометра $\gamma_0 = 270^\circ$; $k_{11} = 2,036 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $k_{12} = k_{21} = -0,819 \text{ Н}$; $k_{22} = 4,398 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$; коэффициент, определяющий расстройку частоты собственных колебаний ротора относительно частоты возбуждений ротора генератором колебаний, $\varepsilon = 1,00058$; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, $S = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; коэффициент передачи фильтра $K_\phi = 1$; опорное напряжение генератора $U_{on} = 5 \text{ В}$.

- a) $1,2 \text{ м/с}^2$;
- b) $0,55 \text{ м/с}^2$;
- c) $10,8 \text{ м/с}^2$;
- d) $0,02 \text{ м/с}^2$.

8. Вычислить крутизну рабочей характеристики микроакселерометра для следующих исходных данных: $m = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$; $a = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l + a \approx 5,3 \cdot 10^{-3}$

m ; $n = 3$; $k_{11} = 2,036 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $k_{12} = k_{21} = -0,819 \text{ Н}$; $k_{22} = 4,398 \cdot 10^{-4} \text{ Н·м}$; $h_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $U_1 = 2,7 \text{ В}$; $K_y = 8,5$; $R_H = 1000 \text{ Ом}$; $R_L = 160 \text{ Ом}$; $B_3 = 0,25 \text{ Тл}$; $L = 10 \text{ м}$.

- a) $6,2 \text{ В/(м/с}^2\text{)}$;
- b) $0,121 \text{ В/(м/с}^2\text{)}$;
- c) $0,03 \text{ В/(м/с}^2\text{)}$;
- d) $10,88 \text{ В/(м/с}^2\text{)}$.

9. Вычислить допустимую амплитуду линейного ускорения вибрации при измерении угловой скорости $\Omega_y = 100 \text{ }^\circ/\text{с} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$ для следующих параметров микрогироскопа: частота $\omega_{z0} = 4,06 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$; модуль кинетического момента ротора $H_0 = 0,86 \cdot 10^{-10} \text{ (кг·м}^2\text{)/с}$; масса ротора $m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$; коэффициент неравножесткости $K_{yz}^H = 0,997$.

- a) $0,03 \text{ мкм}$;
- b) 7 мкм ;
- c) $0,2 \text{ мкм}$;
- d) 63 мкм .

10. Выполнить сравнительную оценку возмущающего момента, обусловленного неравножесткостью подвеса относительно оси OZ, и момента двигателя возбуждения первичных колебаний ротора для следующих исходных данных: $J_0 = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ кг·м}^2$; $m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$; $\omega_{y0} = 80,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, угол поворота ротора в статическом режиме $\gamma_0 = 2,62 \cdot 10^{-2} \text{ рад.}$, $Q_\gamma = 10^4$, $\omega_{\tau 0} = 18,84 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{y0} = 88,14 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $W_x = W_y = 100 \text{ м/с}^2$.

a) возмущающий момент от неравножесткости подвеса на несколько порядков меньше момента двигателя возбуждения и его можно не учитывать;

b) возмущающий момент от неравножесткости подвеса равен моменту двигателя возбуждения;

c) возмущающий момент от неравножесткости подвеса на несколько порядков больше момента двигателя возбуждения.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

1. Что такое «микросистемная техника»? Основные термины и понятия.

Разновидности и типовая структура МЭМС.

2. Элементы и компоненты микросистемной техники.

3. Параметры и характеристики МСТ. Классификация сенсорных компонентов МСТ.

4. Технологические основы производства МСТ.

5. Виды классификация сенсоров.

6. Базовые конструкции элементов микромеханических сенсоров: объемные, мембранные, балочные, струнные.

7. Виды преобразователей: пьезоэлектрические, тензорезистивные, емкостные.

8. Датчики на основе микромеханических преобразователей: давления, расхода, пульсаций, смещения, силы, ускорения, крена, микрогироскопы, микрофоны.

9. Термоэлектрические сенсоры. Терморезистивные, термоэлектрические, термомеханические, пирозлектрические преобразователи.

10. Датчики: температуры, потока, уровня жидкости, вакуума; термонары, анемометры, болометры, термисторы, кондуктометры.

11. Оптические сенсоры: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фотосчетчики.

12. Датчики: светового потока (энергетические, спектральные), оптического поглощения, смещения, положения.

13. Магнитоэлектрические сенсоры: индуктивные преобразователи, магниторезисторы, магнитотранзисторы.

14. Датчики магнитного поля.

15. Химические сенсоры: электрохимические, термокаталитические, адсорбционные преобразователи.

16. Датчики состава жидкостей и газов, датчики влажности.

17. Биологические сенсоры.

18. Актюаторы. Микромеханические приводы движения: пьезоэлектрические, емкостные, термомеханические, электромагнитные, пневматические актюаторы. Устройства микросмещения, микропозиционирования, микрозахвата. Микро- и наноманипуляторы. Микроприводы движения на эффекте «памяти формы».

19. Термоактюаторы: микронагреватели, микрохолодильники.

20. Миниатюрные устройства с тепловыми связями.

21. Миниатюрные электрорадиомеханические и оптоэлектромеханические компоненты.

22. Управляемые микроэлектрорадиокомпоненты: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, микроантенны; микроэлектромеханические и микропневматические реле и коммутаторы.

23. Управляемые оптоэлектромеханические микрокомпоненты: резонаторы, зеркала, линзы, затворы, фильтры; оптопереключатели.

24. Микроустройства обработки, хранения и записи информации: оптомеханические и интегрально-оптические схемы, микродиски.

25. Микромеханизмы, микропривод, микромашины.

26. Микромеханизмы: механические зубчатые и фрикционные микропередачи, микрорычаги, муфты.

27. Микросистемы для генерации и преобразования энергии и движения: электростатические и электромагнитные микродвигатели, пьезодвижатели, микроэлектрогенераторы, микротурбины.

28. Микросопла, пневматические и оптомеханические микроприводы движения, микроприводы движения на эффекте «памяти формы», «интеллектуальные» конформные поверхности.

29. Микросистемы хранения и рекуперации энергии: микропружины и маховики, микротеплоаккумуляторы.

30. Компоненты технологических микросистем: микроклапаны, микронасосы, микродозаторы, микросмесители, микросепараторы,

микротранспортеры, микрореакторы.

31. Микроинструмент: микросхватыва, микроножи, микросверла, микросонды.

32. Наномеханические резонаторы.

7.2.5 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

Не предусмотрено учебным планом

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Зачет проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Не зачтено» ставится в случае, если студент набрал менее 14 баллов.

2. Оценка «Зачтено» ставится в случае, если студент набрал от 14 до 20 баллов.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Введение в дисциплину «Нано- микро и оптомеханические системы»	ПК-1	Тест
2	Объекты нано-, микро- и оптомеханической техники	ПК-1	Тест
3	Технологические основы изготовления нано-микро и оптомеханических систем	ПК-1	Тест
4	Наномеханические системы	ПК-1	Тест
5	Микромеханические системы	ПК-1	Тест
6	Оптомеханические системы	ПК-1	Тест

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи

компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

1. Липатов Г.И. Компоненты микросистемной техники [электронный ресурс]: учебное пособие. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2019.

2. Распопов В.Я. Основы построения и применение изделий микросистемной техники: Приложение. «Справочник. Инженерный журнал». – М.: ООО «Издательский дом «Спектр», 2014.

3. Распопов В.Я. Изделия микросистемной техники: Приложение. «Справочник. Инженерный журнал». – М.: ООО «Издательский дом «Спектр», 2014.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

Microsoft Word, Origin, Google Chrome.

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Учебная лаборатория кафедры физики твердого тела (226/1) с научно-исследовательскими измерительными стендами, комплексами и оборудованием.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Нано- микро- и оптомеханические системы» читаются лекции, проводятся практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета задач из разных разделов дисциплины «Нано- микро и

оптомеханические системы». Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.