

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет
Кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 4 от «14» декабря 2021г.

Рабочая программа дисциплины
Физические основы микро- и наносистемной техники

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника
Направленность (профиль): материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2022 год

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физические основы микро- и наносистемной техники» относится к обязательным дисциплинам основной образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

В рамках курса «Физические основы микро- и наносистемной техники» рассматриваются основные конструктивные элементы приборов, таких как микроакселерометр, микрогироскоп и основные виды движений этих элементов. Также рассматриваются основы технологических процессов, используемых при изготовлении приборов микросистемной техники, такие как различные виды нанесения материалов, фотолитографий и травления. Освоение курса «Физические основы микро- и наносистемной техники» опирается на знания, умения, навыки и компетенции, сформированные на двух предшествующих уровнях образования. Для усвоения данного курса необходимы знания по таким модулям и дисциплинам в рамках образовательной программы бакалавра как модуль «Математика», «Физика» и «Химия» базовой части цикла математических и естественнонаучных дисциплин, курсы «Физика конденсированного состояния» и «Физика полупроводников» базовой части профессионального цикла.

Цель изучения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Физические основы микро- и наносистемной техники» является формирование у студентов знаний в области методов создания и базовых физических принципах функционирования компонентов микро- и наносистемной техники.

Задачами курса является изучение физических основ функционирования компонентов микро- и наносистемной техники. В курсе изучаются технологии создания основных компонентов микро- и наносистемной техники, таких как: микроакселерометры, микрогироскопы; актюаторы, микромеханические приводы движения.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- Способен проектировать и сопровождать производство технических объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники (ОПК -7).
- Способность применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности (ОПК ОС -8).

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ОПК-7. Способен проектировать и сопровождать производство технических	ОПК-7.1. Знает основы проектирования и производства объектов, систем и процессов в области нано-	Знать фундаментальные основы проектирования и производства объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной	Вопросы по темам/разделам дисциплины.

объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники.	<p>технологий и микросистемной техники.</p> <p>ОПК-7.2. Умеет проектировать объекты, системы и процессы в области нанотехнологий и микросистемной техники.</p> <p>ОПК-7.2 Владеет навыками проектирования объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники.</p>	<p>техники.</p> <p>Уметь выбирать нужный технологический процесс при создании приборов микросистемной техники;</p> <p>Иметь навыки проектирования объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники.</p>	Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.
ОПК ОС-8 Способен применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности.	<p>ОПК ОС-8.1. Знает фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью.</p> <p>ОПК ОС-8.2. Знает современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности.</p> <p>ОПК ОС-8.3. Умеет применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности.</p>	<p>Знать фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью, современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности.</p> <p>Уметь применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности.</p>	<p>Вопросы по темам/разделам дисциплины.</p> <p>Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.</p>

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия лабораторного типа	32
- КСРИФ	2
самостоятельная работа	42 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	7 семестр – экзамен

3.2. Содержание дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Контактная работа, часов			Всего	
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Занятия семинарского типа		
1. Введение в микросистемную технику.	8	2			2	6
2. Основы анализа колебаний механических систем.	8	2			2	6
3. Демпфирование колебаний	12	6			6	6
4. Напряженно-деформированное состояние опорных элементов микросистемных приборов	18	4	8		12	6
5. Датчики давления	18	4	8		12	6
6. Микроакселерометры	18	6	8		14	4
7. Микрогироскопы	12	4	4		8	4

8. Технологии создания приборов микросистемной техники	12	4	4		8	4
Аттестация по дисциплине (экзамен) – 2 часа						
Самостоятельная подготовка к экзамену – 36 часов						

Содержание разделов дисциплины

1. Цели и задачи изучения дисциплины. Основные понятия и определения. Обзор базовых компонентов и конструкций элементной базы микро- и наносистемной техники. Классификация элементов по функциональному назначению и принципу действия.
2. Гармонические колебания. Собственные колебания. Вынужденные колебания.
3. Конструкционное и вязкостное демпфирование колебаний.
4. Деформация прямоугольной и круглой мембраны. Типы подвесов и особенности их деформации.
5. Датчики давления с прямоугольной и квадратной мембраной.
6. Микромеханические акселерометры. Емкостной преобразователь перемещений. Осевые и акселерометры с линейным перемещением. Маятниковые акселерометры с угловым перемещением. Оси чувствительности акселерометра.
7. Микрогироскопы. Гироскопы LL и RR типа. Оси чувствительности гироскопа.
8. Материалы микросистемной техники. Виды травления. Виды литографии.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме, в форме лабораторных практикумов и в форме контроля самостоятельной работы (проверка рефератов и задач по моделированию). На лабораторных практикумах студенты проводят моделирование элементов микросистемной техники с использованием программных пакетов автоматических инженерных расчетов. Исследуется получение сигнала с конечных устройств микросистемной техники (микроакселерометра, микрогироскопа).

Заданием для лабораторных работ является моделирование базовых элементов микросистемной техники в системах компьютерного моделирования (проектирования).

Задания для лабораторных работ:

1. Построить в программе FreeCAD модель консольной балки в виде прямоугольного параллелепипеда, закрепленного с одной стороны и нагруженного с противоположной. Рассчитать методом конечных элементов смещение нагруженного конца балки вдоль оси приложения силы. Исследовать величину смещения в зависимости от соотношения сторон параллелепипеда.
2. Построить в программе FreeCAD модель нагруженной двухопорной консольной балки в виде прямоугольного параллелепипеда. Рассчитать методом конечных элементов смещение центральной точки балки вдоль оси приложения силы.
3. Построить в программе FreeCAD модель нагруженной консольной ломаной Г-образной балочной опоры. Рассчитать методом конечных элементов смещение нагруженного конца балки вдоль оси приложения силы. Исследовать величину смещения в зависимости от соотношения длин балок Г-образной балочной опоры.

4. Построить в программе FreeCAD модель прямоугольной мембраны. Рассчитать методом конечных элементов смещение центра равномерно нагруженной мембраны вдоль оси приложения силы.

5. Построить в программе FreeCAD модель круглой мембраны. Рассчитать методом конечных элементов смещение центра равномерно нагруженной мембраны вдоль оси приложения силы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы. Самостоятельная работа в рамках курса направлена на закрепление знаний по компьютерному моделированию элементов микросистемной техники и законов их функционирования. Также в рамках самостоятельной работы выполняется подготовка рефератов. Темами рефератов по разделу математического моделирования являются: «Математические основы метода конечных элементов», «Применимость метода конечных элементов для математического моделирования физических объектов», «Особенность моделирования физических явлений с использованием метода конечных элементов» и др.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

включающий:

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оце-	При решении стандартных задач не продемонстрированы ос-	Продемонстрированы основные умения. Решены типо-	Продемонстрированы все основные умения. Решены	Продемонстрированы все основные умения. Решены все	Продемонстрированы все основные умения, решены	Продемонстрированы все основные умения, Решены все

	нить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	новые умения. Имели место грубые ошибки.	вые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	ны все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	ы все основные задачи с отдельными несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена (7 семестр) на котором определяются:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для выполнения конкретных заданий.

При выставлении экзаменационной оценки применяется семибальная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе бакалавра) трансформируется в пятибальную.

По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. Экзаменационный билет содержит два вопроса.

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена:

Семи-бальная шкала	Описание семибальной шкалы	Пяти-бальная шкала
--------------------	----------------------------	--------------------

5,5 превос- ходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.	5 отлично
5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.	
4,5 очень хо- рошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.	4 хорошо
4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).	
3 удовле- твори- тельно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовле- твори- тельно
2 неудовле- твори- тельно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовле- твори- тельно
1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.	1 плохо

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций.

Для сдачи экзамена необходимо ответить на два вопроса.

Вопросы для проведения экзамена по итогам освоения дисциплины:

1. Классификация приборов микросистемной техники по функциональному назначению и принципу действия.
2. Обзор базовых компонентов и конструкций элементной базы микро- и наносистемной техники.
3. Гармонические колебания. Собственные колебания.
4. Вынужденные колебания. Резонанс.
5. Типы демпфирования колебаний.

6. Микромеханические сенсоры. Чувствительные элементы: пьезорезистивные, пьезоэлектрические, емкостные.
7. Напряженно-деформированные состояния круглого и прямоугольного чувствительного элемента.
8. Микромеханические акселерометры. Емкостной преобразователь перемещений. Осевые и акселерометры с линейным перемещением. Маятниковые акселерометры с угловым перемещением. Оси чувствительности акселерометра.
9. Балки и торсионы в конструкциях микроакселерометров. Напряженно-деформированные состояния в консольных балочных опорах.
10. Моменты силы Кориолиса. Типы микрогироскопов. Оси чувствительности микрогироскопов.
11. Материалы микросистемной техники и их свойства.
12. Моно- и поликристаллический кремний. Методы нанесения и обработки.
13. Типы травления.
14. Типы литографических процессов.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде **знаний** используются индивидуальное собеседование по знанию современных тенденций развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий, физических явлений и процессов, лежащих в основе работы приборов, схем и устройств электроники, наноэлектроники, nano- и микросистемной техники, фундаментальных основ технологических процессов получения материалов и компонентов nano- и микросистемной техники.

Для оценивания результатов обучения в виде **умений и владений** используются практические контрольные задания:

Задания на установление правильной последовательности умения учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности;

Описания алгоритма выполнения действия по умению применять фундаментальные представления о физических явлениях и процессах для достижения требуемых функциональных характеристик приборов, схем и устройств электроники, наноэлектроники, nano- и микросистемной техники;

Указания возможного влияния факторов на последствия реализации умения использовать фундаментальные основы технологических процессов получения материалов и компонентов nano- и микросистемной техники в производстве.

Задания на оценку последствий принятых решений владения опытом использования измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности.

Задания на оценку эффективности выполнения действия владения опытом использования фундаментальных представлений о физических явлениях и процессах для достижения требуемых

мых функциональных характеристик приборов, схем и устройств электроники, наноэлектроники, нано- и микросистемной техники.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Задания на знания:

Является ли уменьшение технологического процесса тенденцией современной микроэлектроники?

Какие физические явления и процессы лежат в основе работы приборов микроэлектроники?

Какие физические явления и процессы лежат в основе работы приборов микросистемной техники?

Детально разобрать фундаментальные основы технологических процессов получения материалов и компонентов нано- и микросистемной техники.

Задания на умения и владения:

Детально представить правильную последовательность исторически научно и технологически непротиворечивой последовательности современной тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники.

Описания алгоритм выполнения действия по умению применять фундаментальные представления о физических явлениях и процессах для достижения требуемых функциональных характеристик датчика давления с круглой мембраной.

Указать возможное влияние факторов на последствия реализации умения использовать фундаментальные основы технологических процессов получения одноконсольной упругой балки из кристаллического кремния.

Устно и с использованием пояснительных рисунков показать правильные задания на оценку последствий принятых решений владения опытом использования аналогового двухосевого акселерометра.

Устно и с использованием пояснительных рисунков показать правильные задания на оценку эффективности выполнения действия владения опытом использования фундаментальные представления о физических явлениях и процессах для достижения требуемых функциональных характеристик цифрового микрогирскопа.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

1. Ефремова Н.Ф. Подходы к оцениванию компетенций в высшем образовании. Учеб. пособие. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. 2010. 216 с.

2. Положение о фонде оценочных средств, утверждённое приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 г. № 247-ОД.

3. Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского. Приказ ректора № 241-ОД от 13.05.2021. с изменениями, утвержденными приказом ректора ННГУ от 10.09.2021 № 496-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Техническая механика микросистем: учебное пособие / под ред. В.Н. Тимофеева. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 176 с.
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785996321155.html> -доступ с компьютеров ННГУ.
2. Введение в микросистемную технику [Электронный ресурс]: Учеб. пособие / О. С. Нарайкин, К. Г. Потловский, В. В. Холевин. - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - http://www.studentlibrary.ru/book/bauman_0489.html -доступ с компьютеров ННГУ.
3. Технология микросистемной техники. Ч.1. Методы микрообработки [Электронный ресурс] : Учеб. пособие / О.С. Нарайкин, В.В. Холевин, И.И. Данилов, В.А. Шалаев. - М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. - http://www.studentlibrary.ru/book/bauman_0467.html -доступ с компьютеров ННГУ.

б) дополнительная литература:

1. Проектирование микросистем. Программные средства обеспечения САПР: учебное пособие. Левицкий А.А., Маринушкин П.С. <https://e.lanbook.com/book/6046#authors> - доступ с компьютеров ННГУ.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Журнал «Нано- и микросистемная техника» <http://www.microsystems.ru>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

При выполнении лабораторных работ используются лаборатории кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники. При выполнении лабораторных работ для математического моделирования элементов микросистемной техники и их функционирования используются программные пакеты автоматических инженерных расчётов (Elmer FEM solver, свободный доступ). Используются микрочипы микромеханических преобразователей (микрокомпас, микрогироском, микроакселерометр) и системы сбора данных.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 28.03.01 "Нанотехнологии и микросистемная техника".

Автор:

к.ф.-мат. наук, доцент физики полупроводников,
электроники и наноэлектроники

А.В. Кудрин

Рецензент:

заведующий кафедрой
теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой
физики полупроводников,
электроники и наноэлектроники
д.ф.-м.н. профессор

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «14» декабря 2021 г.

Председатель Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

А.А. Перов