

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 нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ  
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**Физические основы микро- и наносистемной техники**

---

Уровень высшего образования  
бакалавриат

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника  
Направленность (профиль): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2023

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Материалы и методы нанотехнологии» относится к выборным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника».

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

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: микромеханические, термоэлектрические, оптические, химические и биологические сенсоры; микроакселерометры, микрогироскопы; актюаторы, микромеханические приводы движения, аналитические микро-и наносистемы.

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

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	
ПК-1. Способен применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем	ПК-1.1. Знает физические явления и процессы, лежащие в основе работы приборов и устройств электроники и микроэлектроники.  ПК-1.2. Умеет применять фундаменталь-	Знать фундаментальные основы проектирования и производства объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники.  Уметь выбирать нужный технологический процесс при создании приборов микро-	Вопросы по темам/разделам дисциплины.  Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.

и устройств электроники и нанoeлектроники.	ные представления о физических явлениях и процессах для достижения требуемых функциональных качеств приборов и устройств электроники и нанoeлектроники.	стемной техники;  Иметь навыки проектирования объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники.	Фонд тестовых заданий
ПК-2. Способен строить физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования, проектирования и конструирования.	<p>ПК-2.1. Знает принципы конструирования отдельных аналоговых блоков электронных приборов.</p> <p>ПК-2.2. Умеет строить физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения.</p> <p>ПК-2.3. Владеет навыками использования стандартных программных средств их компьютерного моделирования и проектирования.</p>	<p>Знать фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью, современные тенденции развития нанотехнологий.</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> <p>Фонд тестовых заданий</p>

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.	3	2			2	1
2. Основы анализа колебаний механических систем.	7	2	3		5	2
3. Демпфирование колебаний	11	6	3		9	2
4.Напряженно-деформированное состояние опорных элементов микросистемных приборов	11	4	3		7	4
5. Датчики давления	10	6			6	4
6. Микроакселерометры	8	4			4	4
7. Микрогироскопы	11	4	3		7	4
8. Технологии создания приборов микросистемой техники	10	4	4		8	2
Аттестация по дисциплине - зачет, 1 час						

## **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 работ и контроля самостоятельной работы (проверка заданий для лабораторных работ).

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

*Виды самостоятельной работы.* Самостоятельная работа в рамках курса выполняется в форме лабораторных работ по моделированию 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.

**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 оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения.  Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося	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 недоче-	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки  при решении нестандартных задач без ошибок и недоче-	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

	от ответа			тами		тов.	
--	-----------	--	--	------	--	------	--

Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<ul style="list-style-type: none"> <li>- воспроизводит термины и основные понятия физических явлениях в приборах, схемах и устройствах электроники и нанoeлектроники;</li> <li>- корректно объясняет суть физических явлениях в приборах, схемах и устройствах электроники и нанoeлектроники;</li> <li>- способен сопоставлять физические явления в приборах, схемах и устройствах электроники и нанoeлектроники.</li> </ul>
Базовый	<ul style="list-style-type: none"> <li>- выявляет взаимосвязь между структурой и свойствами;</li> <li>- применяет законы, правила, алгоритмы, теоретические модели и пр.;</li> <li>- знает фундаментальные основы процессов получения и функционирования приборов электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения;</li> <li>- знает предельные возможности технологий, применяемых при производстве приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения;</li> <li>- знает принципы выбора материалов для проведения технологических процессов.</li> </ul>
Высокий	<ul style="list-style-type: none"> <li>- знает современные технологические методы формирования приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения;</li> <li>- формулирует выводы;</li> <li>- оценивает соответствие теории и эксперимента;</li> <li>- оценивает научную и прикладную значимость результатов.</li> </ul>

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета (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.

Зачет проводится по итогам выполнения лабораторных работ и знания теоретических разделов дисциплины, запланированных для изучения в осеннем семестре. Результаты оформляются в виде отчетов по лабораторным работам.

**Критерии выставления оценки при сдаче зачета:**

Зачтено	<p>Выполнены все задания лабораторной работы. Отчеты оформлены правильно, полно и аккуратно. Представлены все необходимые рисунки, схемы и графики. Оформление графиков полностью соответствует общепринятым требованиям. Могут присутствовать незначительные недочёты, которые студент после замечания преподавателя способен исправить самостоятельно.</p> <p>Студент отвечает полностью на вопросы зачета, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.</p>
Не зачтено	<p>Не выполнены отчеты по лабораторным работам, одно или более заданий лабораторных работ. Отчеты выполнены с ошибками, не все рисунки и схемы представлены. Оформление графиков не соответствует общепринятым требованиям. Требования к оформлению отчетов не соблюдены.</p> <p>Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.</p>

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

Для получения зачета необходимо ответить на два вопроса.

*Вопросы для проведения зачета 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.

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 фундаментальных основах технологических процессов получения материалов и компонентов электроники и наноэлектроники.

### **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 микрогирискапа.

#### **6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.**

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, задаваемые в ходе выполнения лабораторных работ и при проверке выполненных рефератов.

### **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](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](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>

#### **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 нанoeлектроники. 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, микрогирометр, 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 11.03.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

Автор:

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

А.В. Кудрин

Рецензент:

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

В.А. Бурдов

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

Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ

А.А. Перов