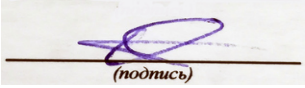
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике
в ЯФ ФГБУН «Физико-технологический институт» РАН

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета



И.С.Огнев

«_23_» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
«Физика и технология микроэлектромеханических систем»

Направление подготовки
11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Направленность (профиль)
«Интегральная электроника и наноэлектроника»

Форма обучения
очная

Программа одобрена
на заседании кафедры
от «30» марта 2023 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК
физического факультета
протокол № 5 от «25» апреля 2023 года

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Физика и технология микроэлектромеханических систем» является изучение принципов работы, основных конструкций и технологии изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС), а также формирование у обучающихся знаний об их применении.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физика и технология микроэлектромеханических систем» относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, и является дисциплиной по выбору.

Для освоения данной дисциплиной студенты должны знать основы механики, электричества, молекулярной физики и оптики, иметь представление об основных понятиях физики конденсированного состояния и микроэлектроники, владеть математическим аппаратом векторного и тензорного анализа, линейной алгебры, уметь решать основные типы дифференциальных уравнений.

Полученные в курсе «Физика и технология микроэлектромеханических систем» знания необходимы для изучения последующих профильных дисциплин, а также для продолжения обучения в магистратуре по направлению Электроника и наноэлектроника.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ООП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	**Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)**	**Перечень планируемых результатов обучения**
Общепрофессиональные компетенции		
ПК-1 Способен строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их	**ИД_ПК-1.1** Умеет строить физические и математические модели процессов, приборов, блоков в области электроники и наноэлектроники	**Знать:** - принципы работы различных микроэлектромеханических систем (МЭМС); - конструктивные особенности и способы изготовления МЭМС. **Уметь:** - воспроизводить ключевые физические принципы, лежащие в основе работы МЭМС; - определять корректность использования тех или иных физических предположений, применяемых при построении моделей МЭМС.

компьютерного моделирования	**ИД_ПК-1.2** Обладает навыками компьютерного моделирования	**Уметь:** - работать со стандартными программными средствами компьютерного моделирования; - строить двух- и трехмерные модели МЭМС. **Владеть навыками:** - создания геометрии МЭМС в графических редакторах, входящих в состав средств компьютерного моделирования; - разбиения геометрии на конечные элементы; - задания свойств материала, постановки граничных условий и описания внешних воздействий на структурные элементы МЭМС; - нахождения деформации структурных элементов МЭМС и механических напряжений в них под действием внешних сил.

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единиц, 72 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости Форма промежуточной аттестации *(по семестрам)* *Формы ЭО и ДОТ (при наличии)*
			Контактная работа					самостоятельная работа	
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания		
1	Введение	7	2					1	Задания для самостоятельной работы
	в том числе с ЭО и ДОТ								
2	Сенсоры на основе микрокантилевервов	7	2	3				5	Задания для самостоятельной работы
	в том числе с ЭО и ДОТ							*2*	*Онлайн курс «Физика и технология микроэлектромеханических систем»*
3	Микромеханические акселерометры	7	3	3				6	Задания для самостоятельной работы
	в том числе с ЭО и ДОТ							*2*	*Онлайн курс «Физика и технология микроэлектромеханических систем»*
4	Микромеханические гироскопы	7	3	3				6	Задания для самостоятельной работы
	в том числе с ЭО и ДОТ							*2*	*Онлайн курс «Физика и технология микроэлектромеханических систем»*
5	Датчики давления	7	2	3				5	Задания для самостоятельной работы
	в том числе с ЭО и ДОТ							*2*	*Онлайн курс «Физика и технология микроэлектромеханических систем»*
6	Сборщики энергии	7	2	2				5	Задания для самостоятельной работы
	в том числе с ЭО и ДОТ							*2*	*Онлайн курс «Физика и технология микроэлектромеханических систем»*
7	МЭМС-переключатели	7	3	3				5	Задания для самостоятельной работы

	в том числе с ЭО и ДОТ							*2*	*Онлайн курс «Физика и технология микроэлектромеханических систем»*
						3	0,3	1,7	Зачет
	Итого за 7 семестр 72 часа		**17**	**17**		**3**	**0,3**	**34,7**	
	в том числе с ЭО и ДОТ					***1***		***18***	
	ИТОГО		**17**	**17**		**3**	**0,3**	**34,7**	
	в том числе с ЭО и ДОТ					***3***		***2***	

Примечание: объем (в часах) самостоятельной работы в рамках установленного данной РПД количества часов, выполняемой студентом с применением ЭО и ДОТ (в ЭУК «Физика и технология микроэлектромеханических систем» в LMS Moodle), определяется каждым студентов в зависимости от уровня его подготовки и способов выполнения данного вида работ.

Содержание разделов дисциплины:

1. Введение.

1.1. Микроэлектромеханические системы (МЭМС): общее описание и особенности.
1.2. История развития МЭМС, динамика рынка, основные производители МЭМС.
1.3. Классификация МЭМС, области применения.
1.4. Базовые технологии и материалы для МЭМС.

2. Сенсоры на основе микрокантилевервов.

2.1. Кантилевер как простейшая структура МЭМС, методы его изготовления и свойства.
2.2. Принципы работы сенсора на основе кантилевера: статический, динамический и тепловой режимы.
2.3. Методы регистрации изгиба кантилевера: оптический, пьезорезистивный, пьезоэлектрический.
2.4. История развития сенсоров на основе микрокантилеверов. Области применения сенсоров. Примеры коммерчески доступных изделий.

3. Микромеханические акселерометры.

3.1. Принцип работы МЭМС-акселерометра. Сравнение с традиционным исполнением. Уравнение движения инерционной массы.
3.2. Виды подвесов инерционной массы: параллельный, крестообразный, Г-образный.
3.3. Емкостной метод регистрации перемещения инерционной массы: принцип действия, типы конструкций. Одно-, двух- и трехосевой акселерометр.
3.4. Пьезорезистивный метод регистрации перемещения инерционной массы.
3.5. Тепловой акселерометр, особенности его конструкции и рабочие характеристики.
3.6. История развития МЭМС-акселерометров. Области применения.

4. Микромеханические гироскопы.

4.1. Принцип работы вибрационного МЭМС-гироскопа. Сравнение с традиционным исполнением. Уравнение движения инерционной массы.
4.2. Виды подвесов инерционной массы: Г-образный, спаренный Г-образный, с промежуточной рамкой.
4.3. Емкостной метод регистрации перемещения инерционной массы.
4.4. Гироскоп с промежуточной рамкой: типы конструкций и особенности.

4.5. Технология изготовления гироскопа.
4.6. История развития МЭМС-гироскопов. Области применения.

5. Датчики давления.
5.1. Принцип работы датчика давления на основе технологии МЭМС. Сравнение с традиционным исполнением.
5.2. Мембрана как чувствительные элемент датчика давления. Типы мембран, уравнение движения.
5.3. Пьезорезистивный метод регистрации изгиба мембраны. Технология изготовления пьезорезистивных датчиков давления.
5.4. Емкостной метод регистрации изгиба мембраны. Сравнение с пьезорезистивным методом.
5.5. История развития МЭМС-датчиков давления. Области применения.

6. Сборщики энергии.
6.1. МЭМС-устройства для сбора энергии механических колебаний. Принципы работы.
6.2. Преобразование энергии механических колебаний в электричество: электромагнитный, электростатический и пьезоэлектрический методы.
6.3. Пьезоэлектрический сборщик энергии. Типы конструкций, основные пьезоэлектрические материалы.
6.4. Технология изготовления сборщиков энергии.
6.5. Коммерчески доступные сборщики энергии и их применение.

7. МЭМС-переключатели.
7.1. МЭМС-переключатель в сравнении с классическим электромагнитным и полупроводниковым переключателем. Его преимущества и недостатки.
7.2. Принципы работы МЭМС-переключателя: электромагнитный, пьезоэлектрический, термический и электростатический. Сравнение рабочих характеристик переключателей различных типов.
7.3. Переключатель с электростатическим управлением. Уравнение движения подвижного электрода, напряжение срабатывания.
7.4. Анализ конструкции коммерчески доступных МЭМС-переключателей. Технология изготовления.
7.5. История развития МЭМС-переключателей. Области применения.

5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

Вводная лекция – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

Академическая лекция с элементами лекции-беседы – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что

позволяет привлекать внимание студентов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

Практическое занятие – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

Задействованы:

– решение задач;

– коллективная мыслительная деятельность, в т.ч. мозговой штурм;

– анализ конкретных ситуаций.

Консультации – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

Электронный учебный курс «Физика и технология микроэлектромеханических систем» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ, в котором:

- представлены материалы лекций по отдельным темам дисциплины;
- представлены задания для самостоятельной работы обучающихся по темам дисциплины;
- представлен список учебной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- посредством форума осуществляется синхронное и (или) асинхронное взаимодействие между обучающимися и преподавателем в рамках изучения дисциплины.

6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов:

- универсальная программная система конечно-элементного анализа Ansys Student (свободно распространяемая);

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- Adobe Acrobat Reader.

7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT» http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины

а) основная литература

1. Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007.

2. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016.

3. Калинкина М.Е., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л., Комарова А.В., Микроэлектромеханические системы и датчики – СПб: Университет ИТМО, 2020.

4. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. - М.: Техносфера, 2004.

б) дополнительная литература

1. В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков, Введение в расчетную платформу Ansys Workbench: Лабораторные работы. Часть 1 – СПб: Университет ИТМО, 2019.

2. Винокуров А.А., Арсентьев А.В., Плотникова Е.Ю. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы моделирования и оптимизации» – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

Доцент базовой кафедры нанотехнологий в электронике, к.ф.-м.н.		И.В. Уваров
должность, ученая степень	*подпись*	*И.О. Фамилия*

Приложение № 1 к рабочей программе дисциплины
«Физика и технология микроэлектромеханических систем»

Фонд оценочных средств
для проведения текущего контроля успеваемости
и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине

1. Типовые контрольные задания и иные материалы, используемые в процессе текущего контроля успеваемости

Задание по теме № 2 «Сенсоры на основе микрокантилевервов» Расчет собственных частот кантилевера

Целью задания является освоение моделирования микроэлектромеханических систем (МЭМС) в универсальной программной системе конечно-элементного анализа Ansys Student. Освоение выполняется на примере простейшей МЭМС-структуры – кантилевера. Порядок выполнения задания:

1. Создать новый проект, добавить вид анализа Modal, выполняющий расчет колебательных мод.

2. В разделе Engineering Data создать материал Silicon (кремний). Задать свойства материала: плотность 2330 кг/м^3, модуль Юнга 170 ГПа, коэффициент Пуассона 0,22. Также можно импортировать материал из ранее созданной библиотеки, находящейся в разделе Engineering Data Sources.

3. В разделе Geometry создать геометрию кантилевера. Кантилевер имеет форму прямоугольного параллелепипеда размерами 100x10x1 мм^3. Для создания геометрии использовать чертежный модуль Space Claim.

4. Перейти к этапу Model. Во вкладке Materials выбрать ранее созданный материал Silicon и присвоить этот материал всему объему кантилевера.

5. Разбить модель на конечные элементы. Для этого в разделе Sizing установить значение параметра Resolution (качество), равное 6, и сгенерировать сетку. Результат должен выглядеть так, как показано на рис. 1.

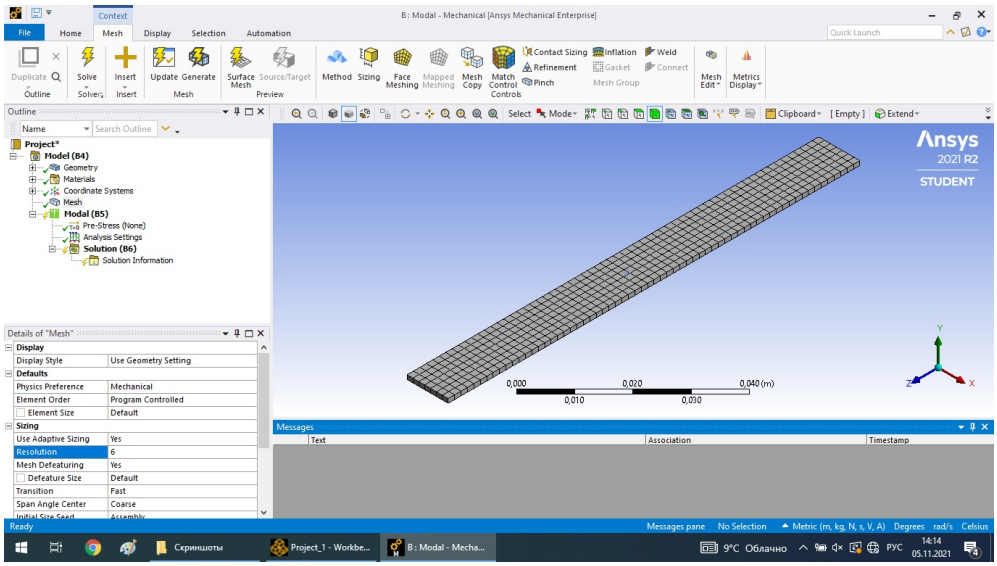


Рис. 1. Разбиение кантилевера на конечные элементы.

6. Зафиксировать один конец кантилевера. Для этого во вкладке Modal добавить пункт Fixed Supports и выделить требуемый конец.

7. Получить форму первой (основной) колебательной моды кантилевера. Для этого во вкладке Solution добавить пункт Total Deformation и нажать клавишу Solve. Запустить анимацию процесса колебаний.

8. Рассчитать колебательные моды более высокого порядка. Для этого в разделе Total Deformation добавить пункт Create Results At All Sets. Затем нажать правой кнопкой мыши на раздел Solution и выбрать Evaluate All Results. Получить список результатов для шести мод, см. рис. 2. Запустить анимацию для этих мод, оценить форму колебаний.

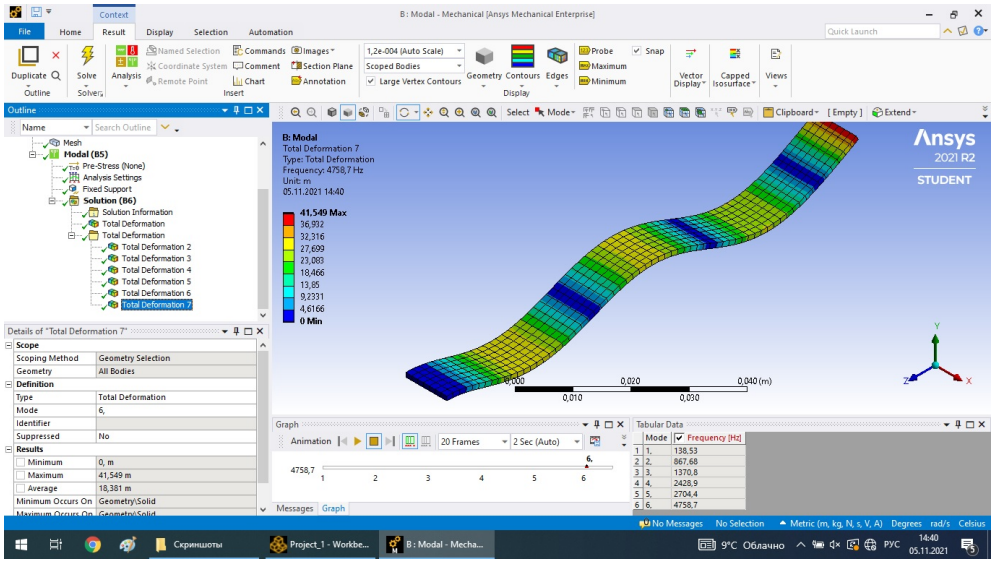


Рис. 2. Изображение шестой колебательной моды кантилевера.

9. Рассчитать собственные частоты колебательных мод, соответствующих изгибным колебаниям, используя следующее выражение:

$$f_n = \frac{(\beta_n L)^2}{4\pi} \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}}, \tag{1}$$

где L и t – длина и толщина кантилевера, E и ρ – модуль Юнга и плотность материала. Значение коэффициента $\beta_n L$ зависит от порядка моды n и указано на рис. 3.

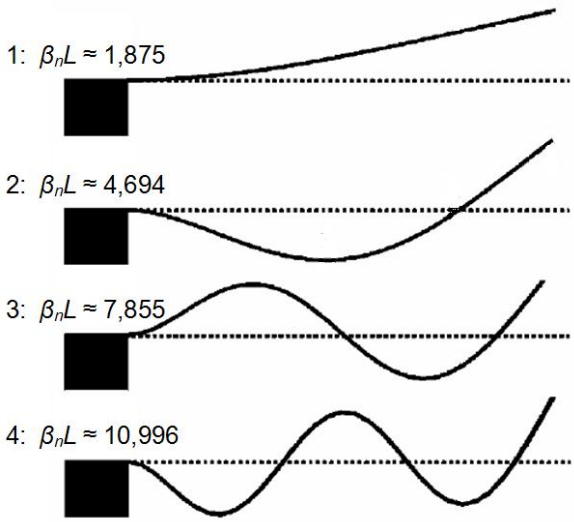


Рис. 3. Собственные моды, соответсвующие изгибным колебаниям, и значения коэффициента $\beta_n L$.

10. Сравнить результаты расчетов с собственными частотами, полученными в программе Ansys Student. Оценить расхождение и сделать соответствующие выводы.

11. Составить отчет, содержащий порядок выполнения задания, проведенные расчеты и таблицы с данными.

Задание по теме № 3 «Микромеханические акселерометры»
Проектирование МЭМС-акселерометра

Чувствительный элемент (ЧЭ) МЭМС-акселерометра схематично изображен на рис. 4. Он представляет собой сборку из трех кремниевых пластин: центральной пластины с ИМ, закрепленной на гибких подвесах, и двух внешних пластин с металлическими электродами (рис. 4а). Центральная пластина имеет толщину t_m. ИМ при наблюдении сверху имеет форму квадрата со стороной L_m (рис. 1б). Она крепится к неподвижной рамке с помощью N балок прямоугольного сечения длиной L_b, шириной w_b и толщиной t_b. Внешний размер кристалла составляет $L_f \times L_f$. При нулевом ускорении воздушный зазор между ИМ и электродами имеет величину d. Размеры конструкции представлены в таблице 1. Материал конструкции – кремний плотностью ρ, модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν.

Порядок выполнения задания:

1. Вычислить коэффициент упругости подвесов, обеспечивающий предельное перемещение ИМ при ускорении a_{max}. Предельным перемещением считать величину $0{,}9d$. Исходные данные для расчетов взять из таблицы 2.

2. Подобрать величины t_b и w_b, обеспечивающие требуемый коэффициент упругости. Соблюдать соотношение $w_b > t_b$.

3. Выполнить моделирование центральной пластины методом конечных элементов в программе Ansys Student. Внешняя рамка зафиксирована. Построить зависимость перемещения ИМ и максимального механического напряжения в конструкции от ускорения в диапазоне 0… a_{max} с шагом $0{,}1a_{max}$. Сравнить напряжение с пределом прочности матриала.

4. Составить отчет о выполнении задания, содержащий описание конструкции ЧЭ с указанием размеров подвеса, выполненные расчеты, графики и таблицы с данными.

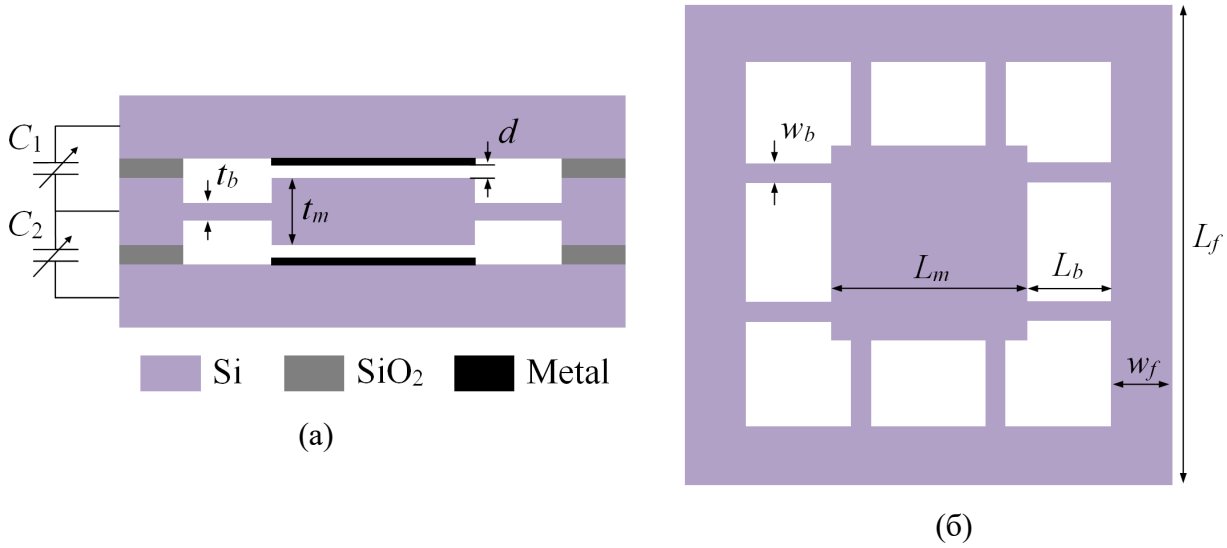


Рис. 4. Схематичное изображение ЧЭ: (а) поперечное сечение; (б) вид центральной пластины сверху.

Таблица 1. Размеры ЧЭ и свойства материала.

t_m	380 мкм
L_m	1500 мкм
L_b	250 мкм
L_f	2400 мкм
ρ	2320 кг/м^3
E	160 ГПа
ν	0,22

Таблица 2. Исходные данные к работе.

Вариант №	a_{max}, g	d, мкм	N	Тип подвеса
1	100	1	4	крестообразный
2	100	1	4	параллельный
3	100	1	8	крестообразный
4	200	1	8	параллельный
5	200	1	12	крестообразный
6	200	2	12	параллельный
7	300	2	16	крестообразный
8	300	2	16	параллельный
9	300	2	20	крестообразный
10	400	2	20	параллельный

2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

Для прохождения промежуточной аттестации по дисциплине обязательно выполнение всех заданий, предлагаемых студентам в ходе практических занятий и самостоятельной работы.

Список заданий к зачету

1. Задание по теме «Сенсоры на основе микрокантилевервов»
2. Задание по теме «Микромеханические акселерометры»
3. Задание по теме «Микромеханические гироскопы»
4. Задание по теме «Датчики давления»
5. Задание по теме «Сборщики энергии»
6. Задание по теме «МЭМС-переключатели»

Примеры заданий представлены в п.1 настоящего приложения.

На зачете проверяется сформированность компетенции ПК-1. Зачет выставляется при условии выполнения всех заданий. Правила выставления оценки за задание представлены ниже.

Правила выставления оценки

Показатели	На «Зачтено»	На «Не зачтено»
Формулировка решаемой проблемы *(проверка сформированности ПК-1, индикатор ИД_ПК-1.1)*	Конкретная, четкая, с использованием терминологии МЭМС	В формулировке проблемы допущены ошибки, отсутствует владение терминологией
Построение модели в программе Ansys Student *(проверка сформированности ПК-1, индикаторы ИД_ПК-1.1 и ИД_ПК-1.2)*	Корректно указана геометрия модели и граничные условия. Аргументирован выбор размеров конечных элементов.	Геометрические размеры модели не совпадают с данными задания, граничные условия указаны неверно, сетка конечных элементов выбрана произвольно
Результаты моделирования *(проверка сформированности ПК-1, индикатор ИД_ПК-1.2)*	Результаты моделирования представлены наглядно и интерпретированы верно. Студент владеет различными видами анализа результатов.	Результаты представлены и интерпретированы неверно. Отсутствует анализ результатов.
Ответы на смысловые вопросы *(проверка сформированности ПК-1, индикаторы ИД_ПК-1.1 и ИД_ПК-1.2)*	Даны развёрнутые, корректные ответы на все вопросы, аргументация логичная. Студент демонстрирует знание принципов работы МЭМС и физических законов, лежащих в ее основе.	Ответы отсутствуют. Студент демонстрирует незнание принципов работы МЭМС и физических законов, лежащих в ее основе.

Приложение № 2 к рабочей программе дисциплины
«Физика и технология микроэлектромеханических систем»

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Физика и технология микроэлектромеханических систем» являются лекции. Материал лекций представлен в ЭУК в LMS Moodle «Физика и технология микроэлектромеханических систем». По темам лекций предусмотрены практические занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем применения его к конкретным задачам. Также на практических занятиях студенты приобретают навыки компьютерного моделирования МЭМС методом конечных элементов в программе Ansys Student.

Для успешного освоения дисциплины большое значение имеет выполнение определенного количества заданий, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры заданий разбираются на практических занятиях, при необходимости по наиболее трудным темам проводятся дополнительные консультации. Основная цель выполнения заданий – изучение принципов работы МЭМС и освоение компьютерного моделирования. Задания для самостоятельного решения формулируются на практических занятиях. Программа Ansys Student является свободно распространяемой, поэтому в случае необходимости студенты могут пользоваться ей на домашних компьютерах.

Для самостоятельной работы рекомендуется использовать учебные пособия «Введение в расчетную платформу Ansys Workbench: Лабораторные работы. Часть 1» (авторы Пронин В.А., Жигновская Д.В., Цветков В.А., 2019 год издания) и «Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы моделирования и оптимизации»» (авторы Винокуров А.А., Арсентьев А.В., Плотникова Е.Ю., 2017 год издания). Данные пособия содержат задания, в ходе выполнения которых студенты изучают основные разновидности МЭМС и осваивают современное программное обеспечение. Каждое задание включает в себя краткое изложение теоретического материала, порядок выполнения, иллюстрации основных этапов и результата.

Дисциплина изучается в течение одного семестра. В конце семестра студенты сдают зачет, который выставляется по итогам выполнения шести заданий, посвященных основным разделам дисциплины. На зачете проверяются знания принципов работы, основных структурных элементов и назначения МЭМС. Также оценивается умение строить математические модели МЭМС и создавать их в современном программном обеспечении.