

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”

ДЕКАН РЭФ

д.т.н. Хрусталева В. А.

“ ____ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Микроэлектромеханика

Образовательная программа: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, профиль:
Микросистемная техника

Курс: 4, семестр : 8

Факультет радиотехники и электроники,

		Семестр
№	Вид деятельности	8
1	Всего зачетных единиц (кредитов)	4
2	Всего часов	144
3	Всего занятий в контактной форме, час.	52
4	Лекции, час.	20
5	Практические занятия, час.	20
6	Лабораторные занятия, час.	0
7	из них в активной и интерактивной форме, час.	10
8	Аттестация, час.	2
9	Консультации, час.	10
10	Самостоятельная работа, час.	92
11	Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе)	РГЗ контр.
12	Вид аттестации	Э

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

ФГОС введен в действие приказом №177 от 06.03.2015 г. , дата утверждения: 31.03.2015 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, вариативная

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ППиМЭ, протокол заседания кафедры №5 от 20.06.2017

Утверждена на совете факультета радиотехники и электроники, протокол № 6 от 21.06.2017

Программу разработал:

доцент, к.т.н. Остертак Д. И.

Заведующий кафедрой:

с.н.с., д.ф-м.н. Гайслер В. А.

Ответственный за образовательную программу:

заведующий кафедрой Гайслер В. А.

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Компетенция ФГОС: ПК.1 способность проводить физико-математическое моделирование исследуемых процессов нанотехнологии и объектов нано- и микросистемной техники с использованием современных компьютерных технологий; в части следующих результатов обучения:
з10. Знать физические принципы, эффекты и процессы, лежащие в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем
з6. Знать особенности проявления эффектов и процессов, лежащих в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем в элементах с микронными размерами
у11. Уметь использовать основные методы и алгоритмы расчёта микроэлектромеханических систем с учётом условий реализации и границ применения
у2. Владеть навыками определения областей рационального использования микроэлектромеханических элементов и устройств
у6. Владеть навыками применения методов расчёта и исследования микроэлектромеханических элементов и устройств

2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)	Формы организации занятий
<i>Микроэлектромеханика</i>	
ПК.1.з10 Знать физические принципы, эффекты и процессы, лежащие в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем	
1. об основных тенденциях развития современной микросистемной техники	Лекции; Самостоятельная работа
ПК.1.у2 Владеть навыками определения областей рационального использования микроэлектромеханических элементов и устройств	
2. о классификации микроэлектромеханических систем, областях их применения	Лекции; Самостоятельная работа
ПК.1.з10 Знать физические принципы, эффекты и процессы, лежащие в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем	
3. физические принципы, эффекты и процессы, лежащие в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.1.з6 Знать особенности проявления эффектов и процессов, лежащих в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем в элементах с микронными размерами	
4. особенности проявления эффектов и процессов, лежащих в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем в элементах с микронными размерами	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.1.у11 Уметь использовать основные методы и алгоритмы расчёта микроэлектромеханических систем с учётом условий реализации и границ применения	
5. основные методы и алгоритмы расчёта микроэлектромеханических систем с учётом условий реализации и границ применения	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
6. использовать основные методы и алгоритмы расчёта микроэлектромеханических систем с учётом условий реализации и границ применения	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.1.у6 Владеть навыками применения методов расчёта и исследования микроэлектромеханических элементов и устройств	
7. применения методов расчёта и исследования микроэлектромеханических элементов и устройств	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
ПК.1.у2 Владеть навыками определения областей рационального использования микроэлектромеханических элементов и устройств	

8.определения областей рационального использования микроэлектромеханических элементов и устройств	Лекции; Самостоятельная работа
---	--------------------------------

3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

Темы лекций	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 8				
Дидактическая единица: Введение				
1. Основные понятия и определения. Основные тенденции развития современной микросистемной техники. Классификация микроэлектромеханических систем, области их применения.	0	1	1, 2	Вводная лекция
Дидактическая единица: Основы микромеханики и микроэлектромеханики				
2. Механические нагрузки. Виды механических нагрузок: статическая нагрузка, линейные ускорения, полигармонические нагрузки, случайные нагрузки, ударные нагрузки.	0	1	3	Лекция
3. Эффекты масштабирования в МЭМС. Масштабирование геометрических размеров и механических систем. Масштабирование температурных и флюидных систем. Масштабирование электрических систем. Свойства материалов при масштабировании. Новые физические явления при масштабировании. Вычислительные проблемы при масштабировании.	0	2	3, 4	Лекция
4. Динамические свойства элементов в МЭМС. Свободные колебания. Колебания механической системы с демпфированием. Вынужденные колебания механической системы.	0	2	3	Лекция
5. Механизмы демпфирования в МЭМС: конструкционное и флюидное. Вязкое демпфирование. Модели демпфирования в МЭМС. Демпфирование с выдавливанием слоя. Демпфирование со скользящим слоем: модель Стокса и Куэтта.	0	2	3, 4	Лекция
Дидактическая единица: Физические принципы функционирования основных видов микроэлектромеханических систем				

6. Достоинства и недостатки электростатических преобразователей. Электростатические силы при постоянном напряжении. Электростатические силы при постоянном заряде. Влияние краевых эффектов на электрическую ёмкость и электростатические силы в МЭМС.	0	2	3, 4, 5, 6, 7	Лекция
7. Плоскопараллельный актюатор. Эффект схлопывания и способы его устранения. Встречно-штыревые актюаторы. Виды конструкций и эффекты неустойчивости в них. Эффект электростатического размягчения в МЭМС.	0	2	3, 4, 5, 6, 7	Лекция
8. Достоинства и недостатки электромагнитных преобразователей. Электромагнитные силы. Магнитное и магнито-электромагнитное преобразование энергии.	0	2	3, 4, 5, 6, 7	Лекция
9. Достоинства и недостатки пьезоэлектрических преобразователей. Физическое и математическое описание эффекта пьезоэлектричества. Коэффициент электромеханической связи. Модель пьезоэлектрического балочного актюатора (пьезоэлектрический биморфный элемент). Свойства пьезоэлектрических материалов.	0	2	3, 4, 5, 6, 7	Лекция
Дидактическая единица: Устройства микроэлектромеханики и микромашины				

10. Принцип работы интегрального микромеханического реле. Принцип работы и виды электростатических микродвигателей. Скребущий шаговый микродвигатель. S-образный электростатический актюатор. Электростатический сегнетоэлектрический планарный двигатель. Электростатический зарядовый микроактюатор. Электростатический мускул. Встречно-штыревой актюатор для больших смещений. Принцип работы электростатического микронасоса. Принцип работы DLP-проекторных систем. Принцип работы GLV-проекторных систем. Емкостной МЭМС микрофон. Емкостные акселерометры. Конструкции и принцип работы. МЭМС гироскоп. Принцип работы одноосного гироскопа. Принцип работы двухосного гироскопа.	0	2	3, 8	Мультимедийная лекция
11. Электромагнитные актюаторы. Магнитоэлектрический двигатель. Магнитный балочный актюатор. Электромагнитный торсионный актюатор. Двухосный электромагнитный торсионный актюатор. Двухнаправленный магнитный балочный актюатор. Бистабильный магнитный актюатор.	0	1	3, 8	Мультимедийная лекция
12. Пьезоэлектрические акселерометры балочного и мембранного типов. Пьезоэлектрические акустические сенсоры балочного и мембранного типов. Полимерный пьезоэлектрический тактильный сенсор. Пьезоэлектрический датчик скорости потока. Линейные пьезоэлектрические микроактюаторы. Пьезоэлектрический шаговый двигатель. Биморфный пьезоэлемент. Пассивный и активный биморфные пьезоэлементы. Мембранные микроактюаторы. Технология пьезоструйной и термоструйной печати.	0	1	3, 8	Мультимедийная лекция

Таблица 3.2

Темы практических занятий	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 8				
Дидактическая единица: Основы микромеханики и микроэлектромеханики				
1. Обзор базовых электрических и механических концепций МЭМС	1	2	3, 5, 6, 7	Решение задач
2. Динамические характеристики микроэлектромеханических систем	2	4	3, 4, 5, 6, 7	Решение задач
3. Эффекты демпфирования в микроэлектромеханических системах	2	4	3, 4, 5, 6, 7	Решение задач
Дидактическая единица: Физические принципы функционирования основных видов микроэлектромеханических систем				
4. Электростатические сенсоры и актюаторы	2	4	3, 4, 5, 6, 7	Решение задач
5. Электромагнитные преобразователи	2	3	3, 4, 5, 6, 7	Решение задач
6. Пьезоэлектрические преобразователи	1	3	3, 4, 5, 6, 7	Решение задач

4. Самостоятельная работа обучающегося

№	Виды самостоятельной работы	Ссылки на результаты обучения	Часы на выполнение	Часы на консультации
Семестр: 8				
1	Контрольные работы	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	16	2
Подготовка к контрольным работам, проводимым в течение семестра: Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273				
2	РГЗ	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	24	2
Подготовка расчётно-графического задания, подготовка к его защите: Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273				
3	Подготовка к занятиям	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	20	2
Подготовка к практическим занятиям на основе лекционного материала: Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273				
4	Дополнительная учебная деятельность	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	5	2
Выполнение дополнительных заданий по дисциплине: Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273				
5	Подготовка к аттестации	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	27	2
Подготовка к экзамену: Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273				

5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Деятельность	Информационно-коммуникационные технологии
Информирование	e-mail
Консультирование	e-mail
Контроль	e-mail
Размещение учебных материалов	Портал НГТУ

Таблица 5.2

Активные и интерактивные формы проведения занятий

№	Наименование активных форм
1	Дискуссия
Краткое описание применения: Совместные дискуссии при решении задач на практических занятиях	
Подробная информация об использовании технологии приводится в "Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273 "	

6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставять оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS.

Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Подробная информация о БРС приводится в Приложении №2 к рабочей программе.

Таблица 6.1

Оцениваемые виды деятельности обучающихся	Мин. балл	Максимальный балл
Семестр: 8		
<i>Лекция:</i> Посещение	5	10
<i>Практические занятия:</i> Активная работа на занятиях	5	10
<i>Контрольные работы:</i> Выполнение	10	20
Контролирующие материалы приводятся в "Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273 "		
<i>РГЗ:</i> Выполнение и защита	10	20
Контролирующие материалы приводятся в "Организация самостоятельной работы студентов Новосибирского государственного технического университета : методическое руководство / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Ю. В. Никитин, Т. Ю. Сурнина]. - Новосибирск, 2016. - 19, [1] с. : табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234042 "		
<i>Экзамен:</i>	20	40
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273 "		

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

Коды компетенций ФГОС	Результаты обучения	Формы контроля		
		Контр. раб.	Защита РГЗ	Экзамен
ПК.1	з10. Знать физические принципы, эффекты и процессы, лежащие в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем	+	+	+
	з6. Знать особенности проявления эффектов и процессов, лежащих в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем в элементах с микронными размерами	+	+	+
	у11. Уметь использовать основные методы и алгоритмы расчёта микроэлектромеханических систем с учётом условий реализации и границ применения	+	+	+
	у2. Владеть навыками определения областей рационального использования микроэлектромеханических элементов и устройств			+
	у6. Владеть навыками применения методов расчёта и исследования микроэлектромеханических элементов и устройств	+	+	+

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

7. Литература

Основная литература

1. Техническая механика микросистем : учебное пособие [для вузов по направлению подготовки дипломированных специалистов 210100 "Электроника и микроэлектроника" по специальностям 210108 "Микросистемная техника" и 210104 "Микроэлектроника и твердотельная электроника"] / [Тимофеев В. Н. и др.] ; под ред. В. Н. Тимофеева. - М., 2011. - 176 с. : ил., табл.
2. Гридчин В. А. Физика микросистем. Ч. 1 : Учебное пособие для вузов / В. А. Гридчин, В. П. Драгунов; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2004. - 415 с. : ил.. - Режим доступа: http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2004/04_gridchin.pdf
3. Bao M. Analysis and design principles of MEMS devices / by Minhang Bao. - Amsterdam, 2005. - XII, 312 p. : ill.. - Пер. загл.: Анализ и принципы проектирования MEMS устройств.
4. Lobontiu N. Mechanics of Microelectromechanical Systems [electronic resource] // by Nicolae Lobontiu, Ephraim Garcia. - Boston, MA :, 2005. : v.: digital // Springer e-books. - Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1007/b100026>
5. MEMS : a practical guide to design, analysis, and applications / ed. by Jan G. Korvink and Oliver Paul. - Norwich, NY, 2006. - XXV, 965 p. : ill.. - Пер. загл.: MEMS (микро-электро-механические системы): практическое руководство для разработки, анализа и приложений.

Дополнительная литература

1. Maluf N. An introduction to microelectromechanical systems engineering / Nadim Maluf, Kirt Williams. - Boston, 2004. - xx, 283 p. : ill.. - Пер. загл.: Внедрение микроэлектромеханических систем.
2. Allen J. J. Micro electro mechanical system design / James J. Allen. - Boca Raton, 2005. - 465 p. : ill.. - Пер. загл.: Микроэлектромеханическая система проектирования.

3. Banks D. Microengineering, MEMS, and interfacing : a practical guide / Danny Banks. - Boca Raton, FL, 2006. - [24], 326 p. : ill.. - Пер. загл.: Микротехника, микроэлектромеханические системы и взаимодействие : практическое руководство.
4. Liu C. Foundations of MEMS / Chang Liu. - Upper Saddle River, NJ, 2006. - xxii, 530 p. : ill.. - Пер. загл.: Основы микроэлектромеханических систем.
5. Leondes C. T. MEMS/NEMS [electronic resource] : : Handbook Techniques and Applications / / edited by Cornelius T. Leondes. - Boston, MA :, 2006. : v.: digital // Springer e-books. - Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1007/b136111>
6. Lyshevski S. E. Nano- and micro-electromechanical systems : fundamentals of nano-and microengineering / Sergey Edward Lyshevski. - Boca Raton [et al.], 2005. - [10], 722 p. : ill.. - Пер. загл.: Нанозлектромеханические и микроэлектромеханические системы : основы нано- и микротехники.

Интернет-ресурсы

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znaniy.com" : <http://znaniy.com/>
5. :

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

1. Остертак Д. И. Микроэлектромеханика : учебное пособие / Д. И. Остертак ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 119, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000230273
2. Организация самостоятельной работы студентов Новосибирского государственного технического университета : методическое руководство / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Ю. В. Никитин, Т. Ю. Сурнина]. - Новосибирск, 2016. - 19, [1] с. : табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234042

8.2 Специализированное программное обеспечение

- 1 Microsoft Windows
- 2 MathCAD
- 3 Microsoft Office

9. Материально-техническое обеспечение

Презентационное оборудование

№	Наименование	Назначение
1	Презентационное оборудование (мультимедиа-проектор, экран, компьютер для управления)	Проведение лекционных занятий
2	Комплект мультимедийного оборудования	Проведение лекционных и практических занятий

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН РЭФ
д.т.н., профессор В.А. Хрусталеv
“ ” _____ г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Микроэлектромеханика

Образовательная программа: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, профиль:
Микросистемная техника

1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине Микроэлектромеханика приведена в Таблице.

Таблица

Формируемые компетенции	Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)	Темы	Этапы оценки компетенций	
			Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.)	Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)
ПК.1/НИ способность проводить физико-математическое моделирование исследуемых процессов нанотехнологии и объектов нано- и микросистемной техники с использованием современных компьютерных технологий	зб. Знать особенности проявления эффектов и процессов, лежащих в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем в элементах с микронными размерами	Динамические характеристики микроэлектромеханических систем Достоинства и недостатки пьезоэлектрических преобразователей. Физическое и математическое описания эффекта пьезоэлектричества. Коэффициент электромеханической связи. Модель пьезоэлектрического балочного актюатора (пьезоэлектрический биморфный элемент). Свойства пьезоэлектрических материалов. Достоинства и недостатки электромагнитных преобразователей. Электромагнитные силы. Магнитное и магнито-электромагнитное преобразование энергии. Достоинства и недостатки электростатических преобразователей. Электростатические силы при постоянном напряжении. Электростатические силы при постоянном заряде. Влияние краевых эффектов на электрическую ёмкость и электростатические силы в МЭМС. Механизмы демпфирования в МЭМС: конструкционное и флюидное. Вязкое демпфирование. Модели демпфирования в МЭМС. Демпфирование с выдавливанием слоя. Демпфирование со скользящим слоем: модель Стокса и Куэтта. Плоскопараллельный актюатор. Эффект схлопывания и способы его устранения. Встречно-штыревые актюаторы. Виды конструкций и эффекты неустойчивости в них. Эффект электростатического размягчения в МЭМС. Пьезоэлектрические преобразователи	Контрольная работа, задачи 1–10, РГЗ, разделы 1–2	Экзамен, вопросы 1–7

		Электромагнитные преобразователи Электростатические сенсоры и актюаторы Эффекты демпфирования в микроэлектромеханических системах Эффекты масштабирования в МЭМС. Масштабирование геометрических размеров и механических систем. Масштабирование температурных и флюидных систем. Масштабирование электрических систем. Свойства материалов при масштабировании. Новые физические явления при масштабировании. Вычислительные проблемы при масштабировании.		
ПК.1/НИ	з10. Знать физические принципы, эффекты и процессы, лежащие в основе функционирования микромеханических и микроэлектромеханических систем	Динамические свойства элементов в МЭМС. Свободные колебания. Колебания механической системы с демпфированием. Вынужденные колебания механической системы. Динамические характеристики микроэлектромеханических систем Достоинства и недостатки пьезоэлектрических преобразователей. Физическое и математическое описание эффекта пьезоэлектричества. Коэффициент электромеханической связи. Модель пьезоэлектрического балочного актюатора (пьезоэлектрический биморфный элемент). Свойства пьезоэлектрических материалов. Достоинства и недостатки электромагнитных преобразователей. Электромагнитные силы. Магнитное и магнито-электромагнитное преобразование энергии. Достоинства и недостатки электростатических преобразователей. Электростатические силы при постоянном напряжении. Электростатические силы при постоянном заряде. Влияние краевых эффектов на электрическую ёмкость и электростатические силы в МЭМС. Механизмы демпфирования в МЭМС: конструкционное и флюидное. Вязкое демпфирование. Модели демпфирования в МЭМС. Демпфирование с выдавливанием слоя. Демпфирование со	Контрольная работа, задачи 3–10, РГЗ, разделы 1–2	Экзамен, вопросы 8–14

		скользящим слоем: модель Стокса и Куэтта. Механические нагрузки. Виды механических нагрузок: статическая нагрузка, линейные ускорения, полигармонические нагрузки, случайные нагрузки, ударные нагрузки. Основные понятия и определения. Основные тенденции развития современной микросистемной техники. Классификация микроэлектромеханических систем, области их применения. Плоскопараллельный актюатор. Эффект схлопывания и способы его устранения. Встречно-штыревые актюаторы. Виды конструкций и эффекты неустойчивости в них. Эффект электростатического размягчения в МЭМС. Принцип работы интегрального микромеханического реле. Принцип работы и виды электростатических микродвигателей. Скребуший шаговый микродвигатель. S-образный электростатический актюатор. Электростатический сегнетоэлектрический планарный двигатель. Электростатический зарядовый микроактюатор. Электростатический мускул. Встречно-штыревой актюатор для больших смещений. Принцип работы электростатического микронасоса. Принцип работы DLP-проекторных систем. Принцип работы GLV-проекторных систем. Емкостной МЭМС микрофон. Емкостные акселерометры. Конструкции и принцип работы. МЭМС гироскоп. Принцип работы одноосного гироскопа. Принцип работы двухосного гироскопа. Пьезоэлектрические акселерометры балочного и мембранного типов. Пьезоэлектрические акустические сенсоры балочного и мембранного типов. Полимерный пьезоэлектрический тактильный сенсор. Пьезоэлектрический датчик скорости потока. Линейные пьезоэлектрические микроактюаторы. Пьезоэлектрический шаговый		
--	--	---	--	--

		двигатель. Биморфный пьезоэлемент. Пассивный и активный биморфные пьезоэлементы. Мембранные микроактюаторы. Технология пьезоструйной и термоструйной печати. Пьезоэлектрические преобразователи Электромагнитные актюаторы. Магнитоэлектрический двигатель. Магнитный балочный актюатор. Электромагнитный торсионный актюатор. Двуосный электромагнитный торсионный актюатор. Двунаправленный магнитный балочный актюатор. Бистабильный магнитный актюатор. Электромагнитные преобразователи Электростатические сенсоры и актюаторы Эффекты демпфирования в микроэлектромеханических системах Эффекты масштабирования в МЭМС. Масштабирование геометрических размеров и механических систем. Масштабирование температурных и флюидных систем. Масштабирование электрических систем. Свойства материалов при масштабировании. Новые физические явления при масштабировании. Вычислительные проблемы при масштабировании.		
ПК.1/НИ	у2. Владеть навыками определения областей рационального использования микроэлектромеханических элементов и устройств	Основные понятия и определения. Основные тенденции развития современной микросистемной техники. Классификация микроэлектромеханических систем, области их применения. Принцип работы интегрального микромеханического реле. Принцип работы и виды электростатических микродвигателей. Скребуший шаговый микродвигатель. S-образный электростатический актюатор. Электростатический сегнетоэлектрический планарный двигатель. Электростатический зарядовый микроактюатор. Электростатический мускул. Встречно-штыревой актюатор для больших смещений. Принцип работы электростатического микронасоса. Принцип работы	–	Экзамен, вопросы 15–21

		DLP-проеекционных систем. Принцип работы GLV-проеекционных систем. Емкостной МЭМС микрофон. Емкостные акселерометры. Конструкции и принцип работы. МЭМС гироскоп. Принцип работы одноосного гироскопа. Принцип работы двухосного гироскопа. Пьезоэлектрические акселерометры балочного и мембранного типов. Пьезоэлектрические акустические сенсоры балочного и мембранного типов. Полимерный пьезоэлектрический тактильный сенсор. Пьезоэлектрический датчик скорости потока. Линейные пьезоэлектрические микроактюаторы. Пьезоэлектрический шаговый двигатель. Биморфный пьезоэлемент. Пассивный и активный биморфные пьезоэлементы. Мембранные микроактюаторы. Технология пьезоструйной и термоструйной печати. Электромагнитные актюаторы. Магнитоэлектрический двигатель. Магнитный балочный актюатор. Электромагнитный торсионный актюатор. Двухосный электромагнитный торсионный актюатор. Двухнаправленный магнитный балочный актюатор. Бистабильный магнитный актюатор.		
ПК.1/НИ	уб. Владеть навыками применения методов расчёта и исследования микроэлектромеханических элементов и устройств	Динамические характеристики микроэлектромеханических систем Достоинства и недостатки пьезоэлектрических преобразователей. Физическое и математическое описание эффекта пьезоэлектричества. Коэффициент электромеханической связи. Модель пьезоэлектрического балочного актюатора (пьезоэлектрический биморфный элемент). Свойства пьезоэлектрических материалов. Достоинства и недостатки электромагнитных преобразователей. Электромагнитные силы. Магнитное и магнито-электромагнитное преобразование энергии. Достоинства и недостатки электростатических	–	Экзамен, вопросы 22–29

		преобразователей. Электростатические силы при постоянном напряжении. Электростатические силы при постоянном заряде. Влияние краевых эффектов на электрическую ёмкость и электростатические силы в МЭМС. Плоскопараллельный актюатор. Эффект схлопывания и способы его устранения. Встречно-штыревые актюаторы. Виды конструкций и эффекты неустойчивости в них. Эффект электростатического размягчения в МЭМС. Пьезоэлектрические преобразователи Электромагнитные преобразователи Электростатические сенсоры и актюаторы Эффекты демпфирования в микроэлектромеханических системах		
ПК.1/НИ	у11. Уметь использовать основные методы и алгоритмы расчёта микроэлектромеханических систем с учётом условий реализации и границ применения	Динамические характеристики микроэлектромеханических систем Достоинства и недостатки пьезоэлектрических преобразователей. Физическое и математическое описание эффекта пьезоэлектричества. Коэффициент электромеханической связи. Модель пьезоэлектрического балочного актюатора (пьезоэлектрический биморфный элемент). Свойства пьезоэлектрических материалов. Достоинства и недостатки электромагнитных преобразователей. Электромагнитные силы. Магнитное и магнито-электромагнитное преобразование энергии. Достоинства и недостатки электростатических преобразователей. Электростатические силы при постоянном напряжении. Электростатические силы при постоянном заряде. Влияние краевых эффектов на электрическую ёмкость и электростатические силы в МЭМС. Плоскопараллельный актюатор. Эффект схлопывания и способы его устранения. Встречно-штыревые актюаторы. Виды конструкций и эффекты неустойчивости в них. Эффект электростатического размягчения в МЭМС. Пьезоэлектрические	–	Экзамен, вопросы 30–36

		преобразователи Электромагнитные преобразователи Электростатические сенсоры и актюаторы Эффекты демпфирования в микроэлектромеханических системах		
--	--	--	--	--

2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по **дисциплине** проводится в 8 семестре - в форме экзамена, который направлен на оценку сформированности компетенций ПК.1/НИ.

Экзамен проводится в устной форме, по билетам.

Кроме того, сформированность компетенции проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 8 семестре обязательным этапом текущей аттестации являются расчетно-графическое задание (работа) (РГЗ(Р)), контрольная работа. Требования к выполнению РГЗ(Р), контрольной работы, состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ(Р), контрольной работы.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенции ПК.1/НИ, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

Общая характеристика уровней освоения компетенций.

Ниже порогового. Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками (*< 50 баллов*).

Пороговый. Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками (*50–72 баллов*).

Базовый. Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки (*73–95 баллов*).

Продвинутый. Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному (*96–100 баллов*).

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

Паспорт экзамена

по дисциплине «Микроэлектромеханика», 8 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в устной форме, по билетам. Билет формируется по следующему правилу: первый вопрос выбирается из диапазона вопросов 1–19, второй вопрос из диапазона вопросов 20–36 (список вопросов приведен ниже). В ходе экзамена преподаватель вправе задавать студенту дополнительные вопросы из общего перечня (п. 4).

Форма экзаменационного билета

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет РЭФ

Билет № 1

к экзамену по дисциплине «Микроэлектромеханика»

1. Динамические свойства элементов в МЭМС: свободные колебания незатухающей системы, механические колебания торсионной структуры.
2. Транзистор с резонирующим затвором. Принцип работы интегрального микромеханического реле.

Утверждаю: зав. кафедрой ППиМЭ _____ Гайслер В.А.

(подпись)

(дата)

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный билет считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопросы не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, не отвечает на дополнительные вопросы, оценка составляет <20 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопросы дает определение основных понятий, может показать причинно-следственные связи явлений, но при этом не отвечает на дополнительные вопросы, оценка составляет 21–29 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопросы формулирует основные понятия, законы, дает характеристику процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, может представить

качественные характеристики процессов, отвечает на практически все дополнительные вопросы, оценка составляет 30–35 *баллов*.

- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, отвечает на все дополнительные вопросы, оценка составляет 36–40 *баллов*.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины и составляют не более 40% итоговой оценки. При получении оценки «неудовлетворительно» на экзамене, независимо от количества баллов, накопленных в семестре, студент считается не прошедшим итоговую аттестацию. Ниже представлена таблица соответствия баллов, традиционной оценки и буквенной оценки ECTS.

Диапазон баллов рейтинга	Оценка ECTS	Традиционная (4-уровневая) шкала оценки	
98-100	A+	отлично	зачтено
93-97	A		
90-92	A-		
87-89	B+		
83-86	B	хорошо	
80-82	B-		
77-79	C+		
73-76	C		
70-72	C-	удовлетворительно	
67-69	D+	удовлетворительно	зачтено
63-66	D		
60-62	D-		
50-59	E		
25-49	FX	неудовлетворительно	незачтено
0-24	F		

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Микроэлектромеханика»

1. Динамические свойства элементов в МЭМС: свободные колебания незатухающей системы, механические колебания торсионной структуры.

2. Колебания механической системы с демпфированием, вынужденные колебания механической системы.

3. Вынужденные колебания механической системы, резонансная частота, фазовый сдвиг, добротность колебательной системы.

4. Эффекты масштабирования в МЭМС. Масштабирование геометрических размеров и механических систем.
5. Эффекты масштабирования в МЭМС. Масштабирование температурных и флюидных систем.
6. Масштабирование электрических систем. Свойства материалов при масштабировании. Новые физические явления при масштабировании.
7. Демпфирование колебаний в МЭМС. Механизмы демпфирования в МЭМС. Вязкое демпфирование.
8. Демпфирование со сдвливающимся слоем. Линейное уравнение Рейнольдса для «сжимаемого» и «несжимаемого» газов.
9. Демпфирование со сдвливающимся слоем для параллельных пластин. Демпфирование в случае «сжимаемого газа», частные случаи. Влияние демпфирования со сдвливающимся слоем на динамические характеристики колеблющихся систем.
10. Демпфирование со сдвливающимся слоем для параллельных пластин. Демпфирование в случае «несжимаемого газа», частные случаи. Влияние амплитуды колебаний пластины на коэффициент демпфирования.
11. Демпфирование со скользящим слоем. Базовые уравнения. Модели демпфирования Куэтта и Стокса.
12. Достоинства и недостатки электростатических преобразователей. Принцип функционирования. Электростатические силы в МЭМС при постоянном напряжении и заряде.
13. Влияние краевых эффектов на электрическую ёмкость и электростатические силы в МЭМС.
14. Плоскопараллельный актюатор. Эффект схлопывания и способы его устранения.
15. Встречно-штыревые актюаторы. Виды конструкций и эффекты неустойчивости в них. Эффект электростатического размягчения в МЭМС.
16. Достоинства и недостатки электромагнитных преобразователей. Принцип функционирования.
17. Магнитное и магнито-электромагнитное преобразование энергии. Примеры.
18. Достоинства и недостатки пьезоэлектрических преобразователей. Эффект пьезоэлектричества, математическое описание эффекта пьезоэлектричества. Коэффициент электромеханической связи.
19. Модель пьезоэлектрического балочного актюатора (пьезоэлектрический биморфный элемент). Примеры.
20. Транзистор с резонирующим затвором. Принцип работы интегрального микромеханического реле.
21. Принцип работы и виды электростатических шаговых микродвигателей.
22. Скребущий шаговый микродвигатель. Электростатический сегнетоэлектрический планарный двигатель.
23. Электростатический зарядовый микроактюатор.
24. Принцип работы электростатического микронасоса: прямой и инверсный режимы.
25. Принцип работы DLP-проекторных систем.
26. Емкостные датчик давления и МЭМС микрофон.
27. Емкостные акселерометры. Конструкции и принцип работы.
28. МЭМС гироскоп. Эффект Кориолиса. Принцип работы одноосного гироскопа.
29. МЭМС гироскоп. Принцип работы двухосного гироскопа.
30. Магнитоэлектрический двигатель. Магнитный балочный актюатор.
31. Электромагнитный торсионный актюатор. Двухосный электромагнитный торсионный актюатор.
32. Двухнаправленный магнитный балочный актюатор. Бистабильный магнитный актюатор.
33. Пьезоэлектрические акселерометры балочного и мембранного типов.

34. Пьезоэлектрические акустические сенсоры балочного и мембранного типов. Пьезоэлектрический датчик скорости потока.

35. Линейные пьезоэлектрические микроактюаторы. Пьезоэлектрический шаговый двигатель.

36. Биморфный пьезоэлемент. Пассивный и активный биморфные пьезоэлементы.

Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Микроэлектромеханика», 8 семестр

1. Методика оценки

Контрольная работа проводится по темам: динамические характеристики микроэлектромеханических систем, электростатические силы при постоянном напряжении, электростатические силы при постоянном заряде, плоскопараллельный актюатор, эффект схлопывания и способы его устранения, встречно-штыревые актюаторы, виды конструкций и эффекты неустойчивости в них, эффект электростатического размягчения в МЭМС, эффекты масштабирования в МЭМС, масштабирование геометрических размеров и механических систем. Включает 10 заданий, выполняется самостоятельно письменно на занятии.

2. Критерии оценки

Каждое задание контрольной работы оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если не было решено правильно достаточное количество задач. Оценка составляет <10 баллов.

Работа выполнена на **пороговом** уровне, если было решено достаточное для порогового уровня количество задач. Оценка составляет 10–12 баллов.

Работа выполнена на **базовом** уровне, если было решено достаточное для базового уровня количество задач. Оценка составляет 13–16 баллов.

Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если было решено достаточное для продвинутого уровня количество задач. Оценка составляет 17–20 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Пример варианта контрольной работы

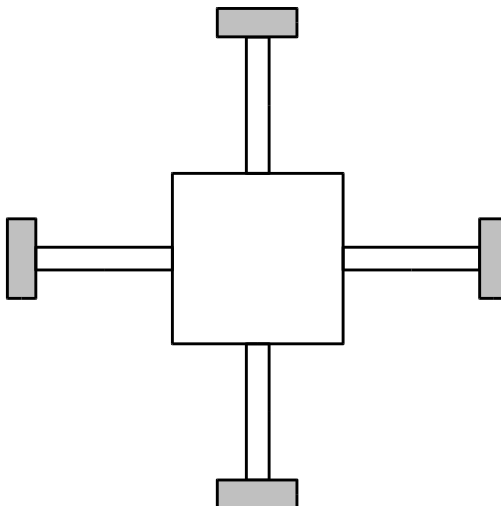
1. Для консольной балки длиной l , шириной w и толщиной t какое из следующих утверждений не является правильным, если одновременно уменьшить все размеры балки в 100 раз? (1 балл)

- а) Уменьшится коэффициент жёсткости балки;
- б) Увеличится резонансная частота колебаний;
- в) Уменьшится устойчивость к разрушению;
- г) Увеличится отношение площадь/объём.

2. Имеются две пластины плоскопараллельного конденсатора площадью 1 мм^2 , расстояние между ними 1 мкм заполнено воздухом. Одна из пластин неподвижная, другая держится на механическом упругом элементе с коэффициентом жёсткости 1 Н/м . Чему равна ёмкость конденсатора, если между пластинами не приложено напряжение? (1 балл)

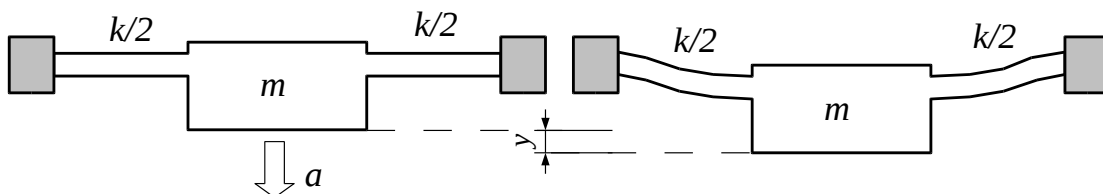
- а) 8.85 пФ ;
- б) 8.85 нФ ;
- в) 8.85 мкФ ;
- г) 0 Ф .

3. На рисунке ниже изображён плоскопараллельный конденсатор, имеющий четыре кремниевые упругие балки (вид сверху). Площадь одной обкладки 1 мм^2 , длина каждой балки 500 мкм , ширина 5 мкм и толщина 0.3 мкм . Каким коэффициентом силы упругости обладает плоскопараллельный конденсатор, если модуль упругости Юнга кремния принять 120 ГПа . (1 балл)

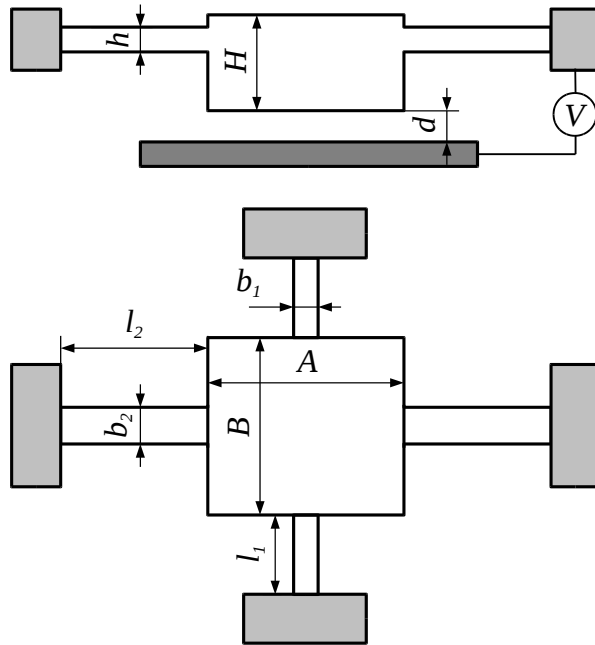


- а) 0.1 Н/м ;
- б) 0.4 Н/м ;
- в) 0.00013 Н/м ;
- г) 0.00052 Н/м ;
- д) 0.00003 Н/м .

4. Определить массу центральной части m , если при ускорении $a = 5g$ смещение y составляет 10 мкм , коэффициент жёсткости $k = 0.1 \text{ Н/м}$. (1 балл)



5. На рисунке ниже изображена кремниевая микроструктура, где $A = 2.4 \text{ мм}$, $B = 1.2 \text{ мм}$, $b_1 = 50 \text{ мкм}$, $b_2 = 100 \text{ мкм}$, $l_1 = 100 \text{ мкм}$, $l_2 = 150 \text{ мкм}$, $h = 5 \text{ мкм}$, $d = 3 \text{ мкм}$, $H = 250 \text{ мкм}$, модуль Юнга $E = 170 \text{ ГПа}$. Найти критическое напряжение (схлопывания) прикладываемое между подвижной и неподвижной пластинами $V_{кр}$. (2 балла)

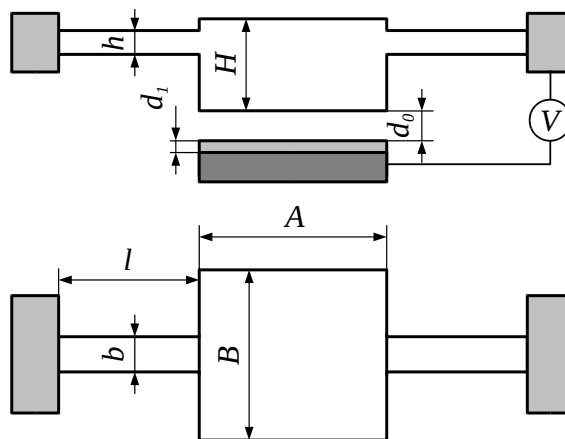


6. Как изменится резонансная частота колебаний микроструктуры в предыдущей задаче, если между электродами приложить напряжение?

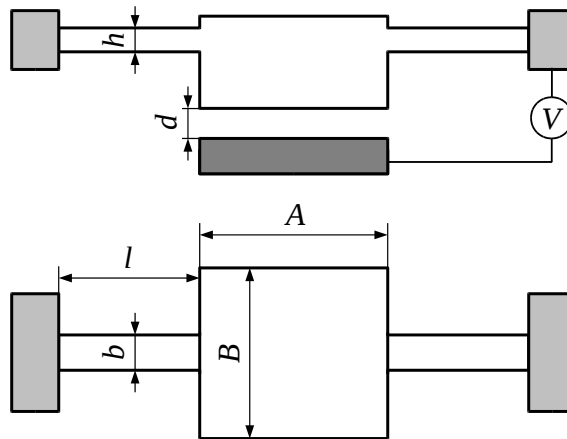
- а) Увеличится;
- б) Уменьшится;
- в) Не изменится.

Рассчитать резонансную частоту колебаний микроструктуры из предыдущей задачи, когда напряжение между электродами отсутствует и когда приложено напряжение $V = 0.9V_{кр}$. Плотность кремния $\rho = 2.33 \text{ г/см}^3$. (3 балла)

7. На рисунке ниже изображена кремниевая микроструктура, где $A = B = 2 \text{ мм}$, $b = 100 \text{ мкм}$, $l = 500 \text{ мкм}$, $h = 10 \text{ мкм}$, $d_0 = 4 \text{ мкм}$, $d_1 = 1 \text{ мкм}$ (SiO_2), модуль Юнга кремния $E = 170 \text{ ГПа}$, диэлектрическая проницаемость SiO_2 $\epsilon_1 = 3.8$. Найти: а) максимальное смещение $y_{\max}$; б) критическое напряжение (схлопывания) $V_{кр}$. (3 балла)



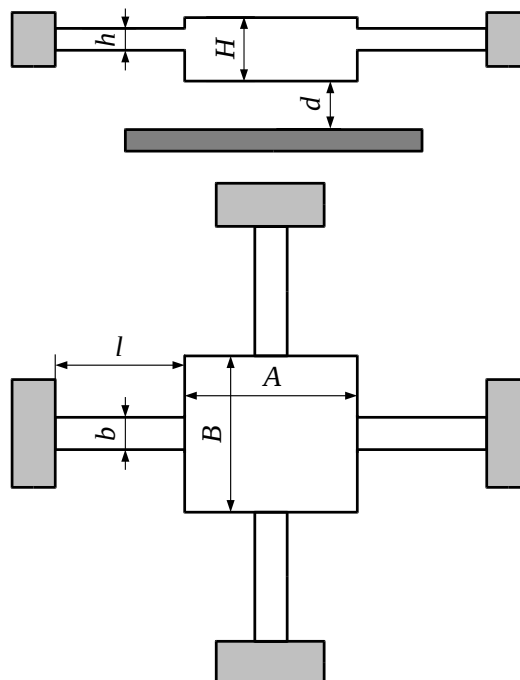
8. Найти напряжение V , которое сместит центральную часть на расстояние $y = d/4$, $d = 2 \text{ мкм}$, $b = h = 1 \text{ мкм}$, $l = 100 \text{ мкм}$, $A = B = 10 \text{ мкм}$, модуль Юнга кремния $E = 160 \text{ ГПа}$. (2 балла)



9. Определить критическое напряжение (схлопывания) $V_{кр}$, если при подачи отклоняющего напряжения $V = 0.5$ В подвижная часть смещается на величину $\Delta d = 0.01$ мкм, первоначальный зазор $d = 6$ мкм. (3 балла)



10. На рисунке ниже изображён кремниевый емкостной акселерометр, где $A = 100$ мкм, $B = 80$ мкм, $H = 2.5$ мкм, $d = 10$ мкм, $l = 300$ мкм, $b = 20$ мкм, $h = 0.1$ мкм, модуль Юнга $E = 170$ ГПа, плотность кремния $\rho = 2.33$ г/см³. Определить приложенное к сенсору ускорение, если после этого ёмкость увеличилась на 30%. (3 балла).



Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Микроэлектромеханика», 8 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны выполнить расчеты динамических характеристик элементов МЭМС. Эффекты демпфирования в МЭМ и эффектов демпфирования в МЭМС.

При выполнении расчетно-графического задания (работы) студенты должны провести анализ объекта, выбрать и обосновать способы расчета, убедиться в правильности расчета путем сравнения с литературными данными.

Обязательные структурные части РГЗ:

- введение;
- основная часть;
- выводы и заключение;
- список литературы.

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если уровень её выполнения работы не отвечает большинству основных требований, проблема не раскрыта, обнаруживается существенное ее непонимание, используются «не актуальные» литературные источники, в расчётах допущены принципиальные ошибки. Оценка составляет <10 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом уровне**, если в расчётах и при построении допущены не принципиальные ошибки, отсутствуют, необоснованны или некорректно сформулированы выводы и заключение, оценка составляет 10–12 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом уровне**, если в расчётах и при построении допущены не принципиальные ошибки, оценка составляет 13–16 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом уровне**, если работа выполнена в полном объёме, расчёты и построение не содержат ошибок, сделаны обоснованные выводы и заключение, оценка составляет 17–20 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

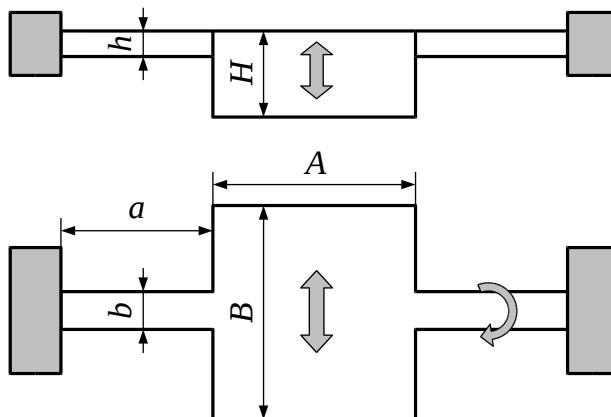
4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

Расчётно-графическое задание ч.1. Динамические характеристики элементов МЭМС

Для изображённой ниже кремниевой микроструктуры пренебрегая массой упругих элементов и деформацией центральной части найти:

1. Частоту собственных колебаний микроструктуры, когда колебания происходят а) по нормали к плоскости устройства (нормальные колебания), б) в плоскости устройства (латеральные колебания), в) вокруг оси упругих элементов (угловые колебания).

2. Частоту затухающих колебаний при заданном коэффициенте затухания c .
3. Амплитуду вынужденных нормальных колебаний при нулевой и резонансной частотах, если на систему действует внешняя сила $F = F_{\max} \sin(\omega t)$.
4. Добротность системы, если при резонансе колебательная система имеет фазовый сдвиг φ . (задача решается независимо от предыдущих).



Исходные данные для расчёта:

№	Студент	a , мкм	b , мкм	h , мкм	A , мм	B , мм	H , мкм	c , г/с	$F_{\max}$, мН	φ , °
1	Иванов И.И.	300	42	12	3.2	4	220	40	0.06	89.83

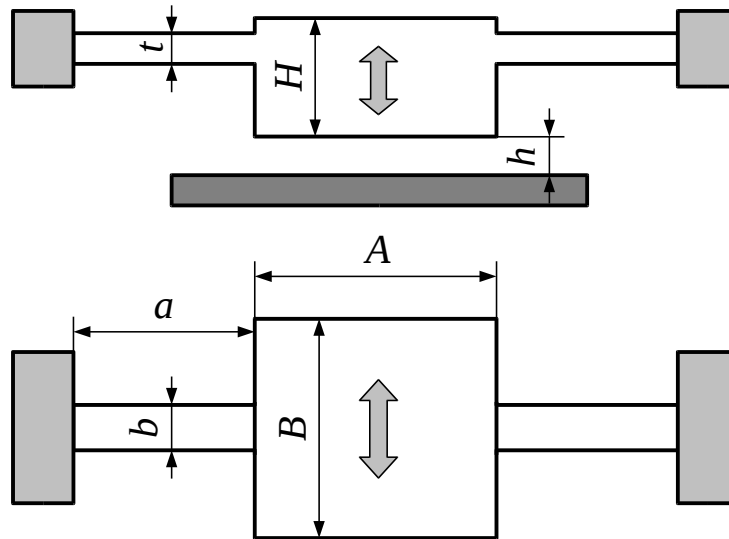
Постоянные величины для кремния:

- модуль Юнга $E_{\text{Si}} = 170$ ГПа;
- модуль сдвига $G_{\text{Si}} = 65$ ГПа;
- плотность $\rho_{\text{Si}} = 2.33$ г/см³.

Расчётно-графическое задание ч.2. Эффекты демпфирования в МЭМС

Для изображённой ниже кремниевой микроструктуры пренебрегая массой упругих элементов и деформацией центральной части найти:

1. Коэффициент сдвливания и коэффициент демпфирования при движении по нормали к плоскости устройства (нормальные колебания).
2. Резонансную частоту нормальных колебаний.
3. Добротность колебательной системы для нормальных колебаний.
4. Каким образом нужно изменить давление окружающей среды, чтобы увеличить добротность колебательной системы для нормальных колебаний в 200 раз? (Использовать модель Кристиана).
5. Каким образом нужно перфорировать пластину, чтобы увеличить добротность нормальных колебаний в 25 раз? Т.е. найти количество отверстий и их диаметр, необходимо, чтобы отверстия были распределены по пластине равномерно, в расчётах не учитывать сопротивление воздуха, проходящего через отверстия.
6. Добротность колебательной системы для латеральных колебаний.
7. Резонансную частоту латеральных колебаний.
8. Как изменится добротность колебательной системы для латеральных колебаний, если зазор между пластиной и подложкой уменьшить в 10 раз?



Исходные данные для расчёта:

№	Студент	a , мкм	b , мкм	t , мкм	A , мм	B , мм	H , мкм	h_0 , мкм
1	Иванов И.И.	300	42	12	4.0	3.2	220	36

Колебания происходят по закону $h = h_0[1 + \varepsilon \sin(\omega t)]$, где $\varepsilon = 0.1$, $\omega = 2\pi f$, $f = 1$ кГц, для латерального движения частота колебаний также равна f .

Постоянные величины, необходимые для расчётов:

- модуль Юнга кремния $E_{Si} = 170$ ГПа;
- плотность кремния $\rho_{Si} = 2.33$ г/см³;
- плотность воздуха $\rho_{air} = 1.2$ кг/м³;
- молярная масса воздуха $M_{air} = 28.98$ г/моль;
- число Авогадро $N_a = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;
- универсальная газовая постоянная $R = 8.314$ Дж/(моль·К);
- коэффициент вязкости для воздуха при н.у. ($P = 10^5$ Па, $T = 20^\circ\text{C}$) $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5}$ Па·с.