ГУРТОВ В.А., БЕЛЯЕВ М.А., БАКШЕЕВА А.Г.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



2016 ГОД

Министерство образования и науки Российской Федерации ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г.

Микроэлектромеханические системы

Учебное пособие

Петрозаводск, Издательство ПетрГУ 2016 ББК

УДК 539.2

Рецензенты:

Лаборатория беспроводных технологий, IT-парк Петрозаводского государственного университета, заведующий к.ф.-м.н, доцент Мощевикин Алексей Петрович

Назаров Алексей Иванович – доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики Петрозаводского государственного университета

Berdova Maria – PhD, post-doctoral researcher, Industrial focus group XUV optics, University of Twente, the Netherlands

Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А.Г.

Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. – 171 с.

ISBN

Представлены материалы и базовые технологии, используемые в разработке и производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС). Рассматриваются физические основы работы датчиков и исполнительных механизмов в МЭМС-устройствах, методы аналогий для анализа МЭМС и пакеты для компьютерного моделирования. Описаны стандарты, используемые в производстве МЭМС, а также особенности корпусирования и герметизации, связанные с трехмерностью МЭМС. Рассмотрены особенности и подходы при разработке наноэлектромеханических систем (НЭМС).

Для студентов и аспирантов вузов, специализирующихся в области микроэлектроники, научных сотрудников и разработчиков элементной базы.

УДК 539.2

© Гуртов В. А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г., 2016

© 2016,

оригинал-макет, оформление

ISBN

	1	
Пр	едисловие	7
Вве	едение	9
1.	Микроэлектромеханические системы	9
	1.1. Структурные элементы МЭМС	9
	1.2. Области применения МЭМС	11
2.]	Гехнология изготовления МЭМС	17
	2.1. Объемная микрообработка	17
	2.2. Поверхностная микрообработка	18
3. I	Базовые материалы для МЭМС	21
	3.1. Монокристаллический кремний	21
	3.2. Двуокись кремния	23
	3.3. Нитрид и карбид кремния	25
	3.4. Другие материалы	26
4. I	Базовые технологии МЭМС	28
	4.1. Литография	28
	4.1.1. Фотолитография	28
	4.1.2. Фоторезисты	34
	4.1.3. Рентгеновская литография	37
	4.1.4. Лучевая литография	39
	4.1.5. Нанопечатная литография	42
	4.1.6. Зондовая литография	44
	4.2. Нанесение пленок и покрытий	45
	4.2.1. Термическое напыление	46
	4.2.2. Катодно-дуговое напыление	48
	4.2.3. Магнетронное напыление	49
	4.2.4. Химическое осаждение из газовой фазы	51
	4.3. Травление пленок и покрытий	53
	4.3.1. Параметры процесса травления	54
	4.3.2. Жидкостное травление	55
	4.3.3. Газофазное травление	56
5.	Физические основы работы МЭМС-устройств	61

	5.1. Механические и электрические параметры чувствительных элементов	61
	5.1.1. Удлинение консоли за счет пьезоэффекта	61
	5.1.2. Удлинение консоли при нагревании	62
	5.1.3. Изгиб консоли при воздействии внешней силы	62
	5.1.4. Изгиб биморфной консоли при нагревании	63
	5.2. Датчики давления	65
	5.2.1. Тензорезистивные датчики	65
	5.2.2. Емкостные датчики	69
	5.3. Акселерометры	70
	5.3.1. Ёмкостные акселерометры	71
	5.3.2. Пьезоэлектрические акселерометры	72
	5.4. Гироскопы	72
5.4.	.1. Роторный гироскоп	73
	5.4.2. Гироскоп с вибрирующим кольцом	74
	5.5. Исполнительные механизмы - актуаторы	79
	5.5.1. Биморфные микрозахваты	80
	5.5.2. Линейные и круговые движители	81
	5.6. Датчики температуры	83
	5.6.1. Датчики на основе термоэлектричества	83
	5.6.2. Резистивные датчики	86
	5.7. Оптические МЭМС	86
	5.7.1. Активные зеркала	87
	5.7.2. Лазерные гироскопы	89
6.	Биомедицинские (микрофлюидные) МЭМС	93
	6.1. Биохимические сенсоры	93
	6.2. Трансдьютеры	94
	6.3. Особенности реализации	96
7. N	Методы анализа электромеханических устройств	98
	7.1. Метод аналогий	98
	7.2. Электростатический датчик на основе конденсатора и пружины	102
	7.3. Датчик с диссипацией энергии из-за джоулева нагрева	109
8. F	Компьютерное моделирование МЭМС	115
	8.1. Моделирование в среде COMSOL	115
	8.2. Моделирование в среде SEMulator3D	117

9. Наноэлектромеханические системы					
9.1. Технология НЭМС	119				
9.2. Формирование нанонитей	119				
9.2.1. Самопроизвольный рост нанонитей	119				
9.2.2. Матричное формирование нанонитей	122				
9.2.3. Электроспиннинг	125				
9.3. Нанорезонаторы	128				
10. Герметизация и корпусирование МЭМС	135				
10.2. Системы упаковки	135				
10.3. Корпусирование отдельного чипа	138				
10.4. Корпусирование на уровне пластины	139				
10.5. Единый корпус для нескольких чипов	144				
11. Стандартизация и классификация МЭМС147					
11.1. Стандарты	147				
11.2. Классификация	152				
11.3. Условные обозначения	154				
12. Задачи	157				
Список литературы160					
Монографии и учебные пособия	160				
Интернет-ресурсы и презентации	165				
Предметный указатель168					
Сведения об авторах					

Предисловие

Учебное пособие «Микроэлектромеханические системы» разработано в рамках одноименной дисциплины, преподаваемой для студентов физико-технического факультета Петрозаводского государственного университета в рамках магистерской программы по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника». Эта дисциплина также изучается в других вузах при подготовке магистров и аспирантов по направлению 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» и 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Для успешного освоения дисциплины «Микроэлектромеханические системы» студентам необходимы базовые знания по университетскому курсу общей физики [1], твердотельной электронике [2] и физике твердого тела [3]. Структура учебного пособия построена таким образом, что последовательно излагаются основы технологии, физики И применения микроэлектромеханических систем. Для более глубокого изучения отдельных разделов дисциплины «Микроэлектромеханические системы» требуются знания по теории упругости [4], электрохимии [5], технологиям микроэлектроники [6], аналоговой и цифровой электронике [7].

Несмотря на то, что МЭМС устройства и сенсоры в течение последних десяти лет активно используются в различных высокотехнологичных отраслях промышленности, в русскоязычной литературе недостаточно представлены книги и учебники российских авторов, где бы рассматривались эти вопросы. Возможно, это связано с тем, что объем российского производства МЭМС в настоящее время незначителен, поскольку отечественный рынок для применения МЭМС обладает относительно небольшой емкостью. В 2015 году в Нижнем Новгороде прошла Пятая международная научнопрактическая конференция (организатор - Русская Ассоциация МЭМС), на которой рассматривались вопросы разработки, производства, корпусирования, тестирования, стандартизации и применения МЭМС. В числе участников конференции - российские и зарубежные производители и разработчики МЭМС. Отмечалось, что не существует российского журнала, в котором можно было бы публиковать научные работы по МЭМС, в том числе для обмена научно-техническим опытом и популяризации МЭМСтехнологий.

Мировое научное сообщество опубликовало значительное количество англоязычных монографий по микро- и наноэлектромеханических системам [8]- [13]. К сожалению, существуют переводы только некоторых книг на русских язык [14]- [17]. В русскоязычной литературе также представлено несколько отечественных монографий и учебных пособий

[18]- [22], но ограниченным тиражом, что затрудняет изучение студентами и аспирантами этой дисциплины. Значительная часть информации по проблематике МЭМС находится в оригинальных научных статьях зарубежных и российских авторов [23]-[54].

Разработка и публикация учебного пособия «Микроэлектромеханические системы» в какой-то мере расширяет информационные ресурсы и позволит студентам осваивать основы физики, технологии и применения микроэлектромеханических систем с меньшими затратами на информационных поиск. В учебном пособии приводится анализ распространённых типов МЭМС и НЭМС, сферы их применения, основные способы изготовления с описанием базовых технологических процессов, физические принципы, лежащие в основе работы МЭМС, а также способы компьютерного моделирования разрабатываемых устройств. В предлагаемом учебном пособии в разделах 1-4 представлены материалы и базовые технологии, используемые в производстве микроэлектромеханических систем. В разделах 5-8 рассматриваются физические основы в МЭМС-устройствах, методы аналогий для их анализа и пакеты для компьютерного моделирования. В разделе 9 представлены особенности и подходы для анализа наноэлектромеханических систем (НЭМС). 10 и 11 разделы посвящены корпусированию и стандартам в производстве МЭМС. В тексте учебного пособия при использовании специализированной МЭМС-терминологии приводится их англоязычный оригинал. В заключение текста представлен предметный указатель. В списке литературы наряду с книгами и научными статьями отдельно представлены Интернет-ресурсы со ссылками на сайты организаций, ведущих активные исследования в сфере МЭМС [58]-[84], а так же на презентации докладов по тематике МЭМС [85]-[98], которые могут быть полезными для студентов при подготовке к семинарским занятиям.

При разработке учебного пособия существенную помощь оказали выпускник кафедры физики твердого тела ПетрГУ - Мария Бердова, которая после магистратуры в ПетрГУ проходила дополнительное обучение в University of Lappenranta и O.V. Lounasmaa laboratory (Finland) по магистерской программе «Technical Physics and Technomathematics» со специализацией в области наноэлектромеханических систем.

Введение

B настоящее время кремниевая электроника приближается к физическим ограничениям миниатюризации, и дальнейшие интеграционные процессы могут быть обеспечены только новыми подходами к изготовлению электронных устройств. Среди таких подходов можно отметить интенсивно развивающиеся гетерогенные системы, состоящие из электрических и ряда других модулей (механических, оптических, электрохимических), изготовленные В В едином устройстве. таких системах электрическая составляющая систем позволяет сопрягать неэлектрические модули, несущие основную функциональную нагрузку, с традиционными электронными интерфейсами. Такого рода устройства в зависимости от функционала и размеров своих подсистем получили названия микроэлектромеханических (МЭМС) [4], оптических МЭМС, биомедициских МЭМС и наноэлектромеханических систем (НЭМС) [9]. В литературе используется также обобщенный термин – изделие микросистемной техники (микросистема), который включает в себя все вышеперечисленные системы. Примеры реализации микросистем различных компаний представлены в [62] – [66].

1. Микроэлектромеханические системы

1.1. Структурные элементы МЭМС

<u>Микроэлектромеханические системы</u> (МЭМС) – это системы, включающие в себя взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров. С помощью соединения процессов производства интегральной схем (чипа) и процессов микрообработки (micromachining), получаются МЭМС. Микроэлектромеханические системы состоят из механических элементов, датчиков, электроники, приводов и устройств микроэлектроники, расположенных на общей кремниевой подложке. Общая структурная схема МЭМС приведена на рисунке 1.1.



Рис. 1.1. Структурная схема МЭМС и приборная реализация МЭМС с указанием ее структурных элементов (чувствительный элемент - датчик МЭМС; операционный усилитель аналогового сигнала и аналого-цифровой преобразователь- интегральная схема; обработка цифрового сигнала- микроконтроллер).

К МЭМС относят системы, размеры которых лежат в пределах от долей микрометра до одного миллиметра. Важно, что существует совместимость технологии микросистемной техники с технологией микроэлектроники. Для изготовления МЭМС применяются те же технологии, что и для изготовления традиционных интегральных микросхем, дополняя последние механическими элементами, такими как микробалки, шестерни, диафрагмы, пружины. Несмотря на то, что изначально основным материалом для изготовления МЭМС был кремний, со временем стали использоваться другие полупроводниковые материалы, ферроэлектрики, керамики и полимерные материалы.

На основе МЭМС технологий было сделано большое количество устройств, таких как сопла струйного принтера, акселерометры, магнетометры, гироскопы, микромоторы и микрозахваты, аттенюаторы, микрозеркала, устройства для лаборатории-на-чипе (lab-onchip), датчики давления и расходомеры [4]. Некоторые из вышеуказанных устройств представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2. Изображение МЭМС-устройств, сделанное с помощью электронного микроскопа: a) трехосевой акселерометр; b) электростатический микродвигатель[65]

Данные устройства имеют механические подсистемы, которые либо преобразуют воздействие внешних сил в электрические сигналы (акселерометры, гироскопы, магнетометры, датчики давления или расходометры), либо сами движутся под действием электрических сигналов (микродвигатели, микрозахваты, микрозеркала) [10]. Комбинируя механические, оптические, электрохимические и электрические подсистемы можно создавать сложные микросистемные устройства в едином корпусе, позволяя тем самым добиться дополнительной миниатюризации и понизить затраты на производство. Технология МЭМС-устройств акцентирует свое внимание не только на изготовлении конкретного устройства, но и на применении новой стратегии интеграции различных классов приборов в одном модуле [10].

1.2. Области применения МЭМС

Сложно сказать, когда впервые появились МЭМС-устройства, так как их элементы неразрывно связаны с развитием интегральной электроники. В конце 1958 года были изготовлены первые прототипы интегральных схем (ИС). А в 1960 году Fairchuld Semiconductors уже занялись выпуском первых ИС. В том же году были изготовлены тензодатчики на основе кремния, в которых механические напряжения вызывали изменение сопротивления вследствие пьезорезистивного эффекта. Промышленный выпуск подобных датчиков был налажен National Semiconductors к 1974 году. К 1982 году термин микрообработка (micromachining) начал использоваться для обозначения процессов изготовления механических подсистем (диафрагм и микробалок) кремниевых

датчиков ускорения и давления. Механические модули изготавливались селективным травлением кремния. В 1986 году в одном из отчетов министерства обороны США был впервые использован термин "микроэлектромеханические системы", ставший в дальнейшем описанием различных интегральных устройств и технологий их производства.

Рынок МЭМС-устройств непрерывно развивается: объем рынка (на 2014 год) составляет порядка 13 млрд. долларов и будет иметь ежегодный рост порядка 13%, таким образом, прогноз на 2018 год составляет порядка 21 млрд. долларов. Основные производители МЭМС - STMicroelectronics, Texas Instruments, Robert Bosch, Analog Devices, InvenSense, Hewlett Packard, Panasonic, Denso, Avago technologies, Freescale, Canon, Murata. [77]-[84].

Микроэлектромеханические системы можно классифицировать в соответствие с областью их применения:

1. МЭМС для высокочастотной электроники (RF MEMS);

2. Оптические МЭМС;

3. Биомедицинские МЭМС;

Размер компонентов МЭМС находится в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм, а размер самого устройства МЭМС измеряется в диапазоне от 20 мкм до 1 мм.

К числу достоинств МЭМС-устройств относятся:

1. Малые размеры, масса, объем;

- 2. Низкое энергопотребление;
- 3. Относительно низкая стоимость;
- 4. Простота интеграции в системы;
- 5. Малая тепловая инерционность;

6. Устойчивость к вибрации, ударам и радиации;

7. Возможность изготовления большого количества (партий);

8. Хорошая переносимость теплового расширения;

МЭМС находят применение в различных областях техники, особенно в таких как автомобильные, авиационные и персональные навигационные устройства; системы мониторинга состояния здоровья и жизнеобеспечения людей. Одним из магистральных направлений применения МЭМС является создание роботизированных систем и киборгов (робот-механизированное устройство с машинным искусственным интеллектом; киборгбиологический организм с человеческим интеллектом, использующий различные дополняющие или заменяющие устройства для расширения функций жизнедеятельности организма). Классическим примером роботизированных систем являются беспилотные наземные и воздушные транспортные средства.

В автомобильной промышленности МЭМС позволяют реализовать различные опции, обеспечивающие роботизированное движение. Первое — создание умных помощников водителя, которые могут затормозить автомобиль в случае опасности и осуществляют адаптивный круиз-контроль. Второе направление — создание машин с дистанционным управлением. Третья система позволяет машине работать в режиме автопилота, когда водитель имеет необходимость отвлечься на некоторое время от управления грузовым автомобилем. На рисунке 1.3. приведена схема реализации беспилотного автомобиля с использованием МЭМС на примере российского КАМАЗа. Пространственное позиционирование автомобиля осуществляется с использованием GPS-ГЛОНАСС систем связи.



Рис. 1.3. Элементы МЭМС в реализации беспилотного КАМАЗа

В результате серийный КАМАЗ-5350 получил радары, лидар (то есть активный оптический сенсор, который испускает лазерные лучи в сторону цели во время движения транспорта), а также видеокамеры, системы связи и бортовые компьютеры. КАМАЗ оснащён 4 видеокамерами, по разным сторонам. Две камеры спереди и две сзади. Кроме того, установлено 3 радара. А роль лазерного сенсора выполняет уникальный лидар.

Для легковых автомобилей эти системы уже реализованы в различных странах и используют акселерометры для обеспечения большего количества компонентов в пассивной безопасности автомобиля, в том числе развёртывания подушки безопасности при столкновении; гироскопы для обнаружения отклонения от курса; инерционные стопсигналы; система автоматического выравнивания фар; активная система защиты при опрокидывании; автоматические дверные замки; активная подвеска.

Аналогичные системы МЭМС используются и в роботизированных беспилотных летательных аппаратах- дронах. На рисунке 1.4. приведен один из вариантов дрона – квадрокоптер.



Рисунок 1.4. Квадрокоптер, оснащенный МЭМС устройствами для беспилотного перемещения.

В медицинской промышленности, здравоохранении, при мониторинге индивидуального состояния человека, в биотехнологиях, в основном используются биомедицинские МЭМС со следующими функциями:

1. Микросистемы для высокопроизводительного скрининга и отбора лекарственных средств;

2. Биочипы для обнаружения опасных химических и биологических агентов;

3. Лаборатория-на-чипе в областях медицины и здравоохранения;

4. Микроинструменты (скальпели и пинцеты для работы с объектами микронных размеров, в том числе для нейрохирургии);

5. Микросистемы полимеризации цепной реакции (ПЦР).

На рисунке 1.5. приведены варианты применения МЭМС при исследовании показателей и поддержке жизнедеятельности человеческого организма.

Диагностика



Элементы жизнеобеспечения, импланты и стимуляторы



Рисунок 1.5. Применение биоМЭМС для мониторинга функций человеческого организма и поддержке жизнедеятельности.

Во всех странах развивается применение МЭМС в оборонной промышленности при конструировании и изготовлении военной техники нового поколения. Особое направление будущего, при экипировке солдата используются солдат когда системы позиционирования и навигации; сенсоры, позволяющие принимать и анализировать окружающую обстановку; системы обмена данными в режиме реального времени с системы командными пунктами, силами поддержки (танки. вертолеты); жизнеобеспечения, в том числе в критических ситуациях (экзоскелеты, инъекции лекарств). На рисунке 1.6. показана экипировка солдата будущего.



Рисунок 1.6. МЭМС в экипировке солдата «будущего»

Логичным развитием МЭМС-технологий стали наноэлектромеханические системы, представляя собой пример дальнейшей миниатюризации электроники [9]. Изготовление НЭМС-систем предполагает ряд новых подходов в связи со сложностью изготовления наноразмерных механических структур.

2. Технология изготовления МЭМС

Технологии изготовления МЭМС-устройств можно условно разделить на несколько типов, описываемых ниже. Несмотря на то, что они могут применять схожие технологические этапы в процессе изготовления, они различаются в подходах к изготовлению МЭМС: аддитивном (когда слои наращиваются на исходной подложке) и субтрактивном (когда из исходной подложки вытравливается необходимая структура). Также в этом разделе будут представлены основные используемые материалы и технологические процессы для изготовления МЭМС. Основные технологические процессы для изготовления мэмС. Основные технологические интегральных микросхем (литография, напыление тонких пленок и их травление).

Особенность технологических процессов производства МЭМС связано с формирование объемных трехмерных структур. Одним из основных отличий МЭМСтехнологии является использование жертвенного слоя для создания, так называемых свободностоящих (free-standing) структур. Образцом такой структуры является микромост – балка, присоединена к подложке с двух противоположных торцов. Для создания таких структур необходимо использовать промежуточный слой, называемый жертвенным, который будет механически поддерживать эту структуру на этапе нанесения пленкиосновы для моста. После выполнения всех необходимых операций напыления и литографии последним этапом изготовления является фаза высвобождения (release phase), во время которой жертвенный слой удаляется, и структура из планарной превращается в трехмерную. В качестве жертвенных слоев используются как неорганические (такие как поликристаллический кремний), так и органические (например, полиамиды) материалы. Для удаления их используют изотропное (равномерное во всех направлениях) селективное газофазное (сухое) и жидкое травление . Газофазное травление предпочтительно, так как при жидкофазном травлении в зазор между элементами структуры попадает жидкость, которая при высыхании может повредить свободностоящие пленки из-за сил поверхностного натяжения. А изотропия в сочетание с высокой селективностью травления позволяет добиться того, чтобы жертвенный слой был удален полностью во всех полостях МЭМС-устройства. Жертвенных слоев может быть несколько, что позволяет создавать довольно сложные трехмерные микрообъекты.

2.1. Объемная микрообработка

Объемная микрообработка (bulk micromachining) – это производственный процесс, идущий от поверхности материала-основы (например, кремниевой пластины) вглубь, при которой травлением последовательно удаляются ненужные объемы этого материала, в

результате чего остаются механические структуры необходимой формы [25]. С помощью литографических методов на поверхности формируется шаблон, защищающий те участки, которые необходимо оставить. Затем пластины проходят необходимый этап травления, в ходе которого незащищённые шаблоном области подвергаются удалению. На рисунке 2.1. представлены микрозахват и микробалки, полученные по технологии объемной микрообработки.



Рисунок 2.1. Кремниевый микрозахват (а) и ряд микробалок, полученных с помощью объемной микрообработки (b)

Технология объемной микрообработки возникла в начале 80-ых годов и применяется до сих пор, так как она относительно проста и недорога, и хорошо подходит для не слишком сложных приложений, критичных к цене производства. Ее основу составляют такие процессы как фотолитография и жидкостное травление кремния. Многие недорогие одно- и двухосевые акселерометры и датчики давления изготавливаются на основе объемной микрообработки. В дальнейшем технология включила в себя сухое травление, позволившее добиться большой анизотропии, такое как глубокое реактивно-ионное травление.

2.2. Поверхностная микрообработка

В противоположность объемной микрообработке, суть которой заключается в послойном удалении материала с поверхности пластины с помощью травления, при поверхностной микрообработке (surface micromachining) происходит последовательное наращивание слоев материала. Чаще всего в качестве основы используется кремниевая пластина. Типовой процесс включает в себя несколько циклов нанесение тонких (от нескольких нанометров до десятков микрометров) слоев материала, которые затем с

помощью литографии и последующего травления приобретает необходимую геометрическую форму [26] .

В качестве методов получения тонких пленок в основном используется химические (CVD) и физические (PVD) методы осаждения из газовой фазы [11]. Типичный процесс поверхностной микрообработки представляет собой повторяющуюся последовательность нанесения на поверхность пластины тонких пленок, формирования на пленке защитного шаблона методом литографии и травления пленки. Чтобы создать подвижные, функционирующие механизмы, в слоях чередуют тонкие пленки конструкционного материала и жертвенного слоя. Из конструкционного материала образуются механические элементы, а жертвенный слой заполняет пустоты между ними. На последнем этапе жертвенный слой удаляется селективным травлением, и конструкционные элементы приобретают подвижность и функциональность [3]. Поверхностная микрообработка является потомком технологии объемной микрообработки и требует большего количества технологических операций, что увеличивает ее стоимость. Однако она позволяет создавать более сложные механические элементы МЭМС подсистем (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2. Система зубчатой передачи (a) и подвешенный элемент тепловизионной матрицы (b), которые получены с помощью поверхностной микрообработки [59]

Если от технологий перейти к технологическому процессу и разбить его на отдельные этапы, то мы получим постоянно повторяющийся процесс нанесения пленок, литографии и травления. Упрощенно схема изготовления любого МЭМС устройства может быть выражена следующим образом (рисунок 2.3.).



Рисунок 2.3. Схема изготовления МЭМС-устройств

В качестве основы устройств, как уже упоминалось выше, могут быть использованы различные материалы. Конечным этапом всегда является упаковка готового устройства, которая для МЭМС очень важна, так как устройства могут требовать дополнительных условий (герметизация, заполнение рабочей области инертными газами).

3. Базовые материалы для МЭМС

3.1. Монокристаллический кремний

Ранее уже не раз упоминалось использование подложки в качестве исходной точки изготовления устройства, а при использовании объемной микрообработки и основного материала для механической подсистемы. Чаще всего при изготовлении устройства используются пластины кремния Si с электронным п-типом или дырочным р-типом проводимости [24]. Кристаллическая решётка кремния кубическая гранецентрированная типа алмаза с периодом 0.54307 нм. Для легирования кремния вводятся атомы элементов III (р-тип) или V (п-тип) группы, которые замещают в кристалле атомы кремния (IV группа). Расположение кристалла (кристаллографическая ориентация) относительно поверхности подложки может быть различным (см. рисунок 3.1.). Данное расположение называется базовой плоскостью и указывается производителем пластин. Они должно учитываться при изготовлении МЭМС, так как скорость жидкостного травления кремния может различаться в зависимости от направления кристалла.



Рисунок 3.1. Основные базовые плоскости в кристалле кремния

Кристаллический кремний является довольно популярным для изготовления МЭМС и использовался со времен появления этих устройств по ряду причин:

1. Используется в кремниевой электронике. Электрическая подсистема может быть легко создана на том же кристалле;

2. Механический устойчив, имеет большой модуль Юнга (до 200 ГПа), что позволяет использовать линейные приближения в механических деформациях при больших нагрузках. В сочетании с невысокой плотностью (2.3 кг/м³) это делает кремний отличным материалом для механических микроустройств;

3. Высокая температура плавления кремния (1400 °C) и низкий температурный коэффициент расширения кремния (3.1-5.4×10⁻⁶ °C⁻¹) делают его применимым в устройствах, предназначенных для работы при высоких температурах или с широким температурным диапазоном.

4. Методы обработки кремния хорошо отработаны в электронной промышленности, что позволяет эффективно интегрировать производственные процессы для МЭМС в имеющуюся производственную инфраструктуру.

Производство кремниевых пластин начинается с изготовление монокристаллической колонны методом Чохральского. Этот метод основывается на выращивании кристаллов путем вытягивания их от свободной поверхности расплава с инициализацией начала кристаллизации затравочным кристаллом. Тигель с расплавом находятся в инертной аргоновой атмосфере при давлении не более 30 мм рт. ст. Держатель с затравочным кристаллом и тигель с расплавом вращают в противоположных протравлениях. По мере роста кристалла держатель поднимают вверх, формируя тем самым кристалл цилиндрической формы (рисунок 3.2.). Диаметр кристалла может достигать 300 мм (12 дюймов), при этом имеются и другие стандартные диаметры: 100 мм (4 дюйма), 150 мм (6 дюймов), 200 мм (8 дюймов).



Рисунок 3.2. Кристалл кремния, выращенный по методу Чохральского

После этого кристалл разрезается поперек, производится шлифовка рабочих поверхностей и полировка одной или обеих сторон. С края пластины снимается фаска и

отмечается главная плоскость соответствующим срезом. В процессе правки в тигель могут быть добавлены примеси для придания нужного типа и значения проводимости.

Кроме монокристаллического кремния в изготовлении МЭМС устройств часто используется поликристаллический кремний, наносимый на выбранные подложки методом химического осаждения из газовой фазы (chemical vapor deposition - CVD) [12]. Для этого в камере при пониженном атмосферном давлении (от 25 до 150 Па) напускается смесь азота с силаном SiH₄ или трихлорсиланом SiH₃Cl, а подложка нагревается до температуры от 600 °C до 650 °C. Скорость осаждения пленки от 10 до 20 нм/мин, при этом происходят реакции разложения газов:

$$SiH_4 \to Si + 2H_2, \tag{3.1}$$

$$SiH_3Cl \to Si + H_2 + HCl. \tag{3.2}$$

Полученные пленки используются в электрических подсистемах (для создания резисторов) или в механических (для создания резистивных нагревателей). Также в последнее время используется в качестве жертвенного слоя для свободностоящих структур (freestanding structures) в процессе сухого травления с использованием дифторида ксенона XeF₂ (данный процесс будет описан ниже) [12].

3.2. Двуокись кремния

Помимо кремниевых пластин базовым материалов для производства МЭМС могут являться их производные: пластины кремний, пассивированный слоем SiO₂ и кремний на изоляторе (SOI) [8]. Для производства первого кремниевые пластины помещают в печь, в которую подаётся кислородная смесь, а пластины нагреваются до температуры от 800 °C до 1200 °C. Этот метод называется сухим оксидированием и позволяет получать более плотные и качественные слои SiO₂, однако скорость роста пленки невысока (< 100 нм/час). При окислении выполняется следующая химическая реакция:

$$Si + O_2 \to SiO_2. \tag{3.3}$$

Данный оксид обладает хорошей диэлектрической прочностью и малыми токами утечки и хорошо применяется для получения высококачественного изоляционного слоя. Оксид для механических структур обычно имеет толщины до 1 мкм и поэтому более применим метод влажного оксидирования с добавлением к смеси водяного пара, в ходе которого он поглощается и выделяется газообразный водород:

$$Si + 2H_2 O \rightarrow SiO_2 + 2H_2. \tag{3.4}$$

Скорость окисления достигает до 1 мкм/час. Получаемый оксид более рыхлый и обычно используется там, где некритичны электрические параметры пленки.

Для получения пластин кремния на изоляторе применяется два различных метода: ионная имплантация атомарного кислорода или методом склеивания двух пластин. В первом случае после имплантации атомов кислорода производится дальнейший нагрев пластин для инициализации процессов окисления. Во втором случае пластину термически окисляют, имплантируют водород, переворачивают и склеивают с помощью герметичного клея с еще одной пластиной кремния. Затем пластины нагревают, и происходит расслаивание кремниевой пластины в слое с имплантированным водородом. Таким образом, снова образуется две пластины – одна кремния на изоляторе и одна кремниевая. Оба процесса представлены на рисунке 3.3.

Пленки диоксида кремния SiO₂ могут быть получены и путем химического осаждения из газовой фазы (из смеси кислорода и силана SiH₄):

$$SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2. \tag{3.5}$$

Однако полученные пленки обладают более плохими электрическими характеристиками, поэтому основным применением является использование в качестве жертвенного слоя в процессе сухого и жидкостного травления с использованием плавиковой кислоты HF. Плавиковая кислота обладает высокой селективностью при травлении диоксида кремния по сравнению с кремнием (>100), поэтому данный процесс не затрагивает подложку или структуры из поликремния. Для ряда приложений (микроканалы, лаборатория-на-чипе) в качестве подложки используют пластины кристаллического SiO₂ (кварца) или кварцевое стекло [13].



Рисунок 3.3. Процессы изготовления подложек кремния на изоляторе:

(а) с помощью имплантированного кислорода, (б) с помощью склеивания двух пластин

3.3. Нитрид и карбид кремния

В механических подсистемах МЭМС-устройств применяются такие химически стойкие и механически стабильные материалы как карбид кремния SiC и нитрид кремния Si₃N₄. Они наносятся с помощью методов химического осаждения из газовой фазы.

Нитрид кремния Si_3N_4 кроме превосходных механических свойств (модуль Юнга до 385 ГПа, низкие механические напряжения, предел текучести до 14 ГПа), обладает барьерными свойствами для диффузии ионов металлов и химически стоек. Он служит как распространённым средством пассивации электрических цепей, так и элементом механических структур (микробалки, микромостики) в МЭМС. Малые коэффициент температурного расширения ($0.8 \times 10^{-6} \, ^{\circ}C^{-1}$) и коэффициент темплопроводности (0.19 Вт/см·°С) позволяют использовать его в качестве теплоизоляционного материала, например в МЭМС болометрах. Получают пленки нитрида кремния методом CVD, используя в качестве рабочего газа смеси силана SiH₄ и аммиака NH₃ или силана SiH₄ и азота N₂. Для осуществления реакции подложку нагревают до температуры порядка 600°С:

$$3SiH_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12H_2.$$
 (3.6)

Карбид кремния используется для устройств, работающих при высоких температурах (температура плавления 2730 °C). При его нанесении используется силан SiH₄ и этилен C₂H₄ в качестве прекурсоров реакции проходящей при высоких температурах (более 1500 °C):

$$2SiH_4 + C_2H_4 \to 2SiC + 6H_2. \tag{3.7}$$

Карбид кремния химически инертен, практически не повреждается большинством используемых растворителей (плавиковая кислота HF, гидроксид калия KOH и др.), стоек к механическому истиранию, и поэтому применим как защитное покрытие для устройств, работающих в экстремальных условиях (космические приложения).

3.4. Другие материалы

Кроме пластин на основе кремния в оптомеханических устройствах используются полупроводниковые подложки из таких соединений как арсенид галлия GaAs, фосфид галлия GaP, нитрид галлия GaN, индий-галлий арсенид InGaAs, фосфид индия InP [12]. Механические элементы подсистемы из них не изготавливают из-за более плохих параметров материалов по сравнению с нитридом кремния Si₃N₄ (например, модуль Юнга для кристаллического GaAs не более 80 ГПа, предел текучести не более 2.7 ГПа). Однако по сравнению с кремнием эти материалы обладают большей подвижностью носителей заряда (электронная подвижность для InGaAs достигает 10⁴ В/см·с) и являются прямозонными полупроводниками, и, следовательно, более эффективные электрические и оптоэлектрические устройства могут быть изготовлены с их использованием. Наиболее распространённым вариантом использования являются микроволноводы, оптические переключатели и управляемые оптические фильтры. Недостатком данных материалов являет дороговизна исходных материалов и оборудования для изготовления пленок. Для получения высококачественных кристаллических пленок из этих материалов используют методы молекулярно-лучевой эпитаксии при сверхвысоком вакууме.

Для изготовления микроканалов и биосовместимых устройств все чаще в последнее время используются полимерные материалы, такие как полидиметилсилоксан (ПДМС), парилен, SU-8 [12]. Они обладают рядом преимуществ: дешевизна, простота нанесения (в том числе центрифугирование, аэрозольное напыление, наноимпринт), химическая стойкость к ряду растворителей, высокая эластичность, прозрачность в видимом Из полимерных материалов легко изготавливать мембраны, диапазоне света. микрозахваты и производить герметизацию МЭМС-устройств. Биосовместимость позволяет использовать их в медицинских датчиках и микроустройствах. Полимерные материалы могут быть модифицированы под воздействием оптического излучения или электронного пучка с изменением своих химических и механических свойств, тем самым давая дополнительную гибкость их применения в МЭМС. Кроме того в полимер могут быть добавлены наночастицы и нанотрубки с заданными свойствами, что позволяет изготавливать структуры с улучшенной электропроводностью, чувствительностью к определенным газам или механическим нагрузкам. Например, полимер SU-8 с добавленными частицами ZnO позволяет получать структуры с пьезоэффектом.

4. Базовые технологии МЭМС

Как уже описано ранее процесс изготовления МЭМС устройств включают в себя ряд операций с исходными материалами: придания необходимой геометрической формы (литография), нанесения или удаление (травления). Ниже будут описаны различные вариации этих процессов, используемых в производстве МЭМС.

4.1. Литография

Под литографией понимают способ переноса некоторого шаблона на подложку. Способы переноса различаются по использованию вспомогательных материалов и физическому созданию целевой маски. По типу используемого физического воздействия различают следующие виды литографии:

- 1. Оптическая литография (фотолитография);
- 2. Электронно-лучевая литография;
- 3. Ионно-лучевая литография;
- 4. Рентгеновская литография;
- 5. Нанопечатная литография;
- 6. Литография с помощью атомно-силового микроскопа;

4.1.1. Фотолитография

Одним из первых и до сих пор самых распространённых способов является оптическая литография (фотолитография). Для переноса шаблона используется светочувствительный материал, называемый фоторезистом. В общем случае процесс фотолитографии состоит из ряда операций [25]:

- 1. Очистка подложки;
- 2. Нанесение фоторезиста;
- 3. Доэкспозиционная сушка фоторезиста;
- 4. Экспонирование;
- 5. Постэкспозиционная термическая обработка;
- 6. Проявление фоторезиста;
- 7. Промывка деионизованной водой и сушка подложки;

Первой подготовительной операцией является очистка подложки от возможных органических загрязнений, окислов и пылевых частиц. Так как литографические процессы чувствительны пылевому загрязнению, они проводятся в чистых помещениях, в которых регламентировано максимальное количество частиц на кубический метр воздуха. Основными мероприятиями по обеспечению необходимого класса чистоты является использование одно- и многоразовых безворсовых комплектов одежды (халатов, бахил,

масок), безпылевых покрытий стен, фальшполов, ламинарной вентиляции, воздушных шлюзовых камер на входе, систем подготовки воздуха. Органические загрязнения с пластин убираются при помощи последовательного использования различных органических растворителей, таких как метанол, ацетон и изопропиловый спирт. Наиболее распространенный метод - это использование Piranha solution: H₂SO₄ и H₂O₂. Окислы удаляются кислотами, например тонкий слой естественного окисла на кремнии может быть удален с помощью разбавленного раствора плавиковой кислоты. После использования растворителей подложку промывают в деионизованной воде и подсушивают. RCA clean для: 1) Удаление органических загрязнений 2) Удаление тонкого слоя оксида 3) Удаление ионного загрязнения. После этого на пластину наносится фоторезист.

В настоящее время на рынке представлено множество марок фоторезиста от различных фирм, различающиеся чувствительностью, контрастностью, вязкостью и стойкостью к различным травителям. Для нанесения фоторезиста, который представляет собой раствор с полимерным содержимым, существуют две различные методики: центрифугирование и распыление спреем. В первом случае пластину помещают на вакуумный или механический захват и раскручивают его с требуемой скоростью (рисунок 8). Затем с помощью диспенсера с регулируемым объемом подачи производят нанесение фоторезиста. Для более равномерного распределения диспенсер в некоторых моделях центрифуг может перемещаться от центра пластины к ее краям во время нанесения. В зависимости от вязкости и скорости вращения получаемая пленка фоторезиста имеет различную толщину. Кривые отношения скорости вращения и толщины пленки обычно поставляются с фоторезистом в виде технической спецификации (datasheet).

Нанесение спреем осуществляется также на вращающуюся подложку, для получения более равномерного распыления. Сверху от подложки под разными углами устанавливают несколько спреевых головок. При спреевом методе используется меньше фоторезиста, улучшается повторяемость результата и получается лучше покрывать сильнорельефные поверхности однородной по толщине пленкой. Спреевые головки соединяются с ультразвуковыми испарителями, в которых происходит процесс каплеобразования. В более простых моделях спрей образуется за счет подачи сжатого воздуха к головке.



Рисунок 4.1. Процессы нанесения фоторезиста при помощи центрифугирования

После нанесения фоторезист подвергается дополнительной сушке при температурном режиме, выбранном производителем (в технической документации этот процесс называется prebake). Это необходимо для полного удаления оставшегося после нанесения растворителя в фоторезисте и улучшения его чувствительности К При необходимости наносится экспонированию. второй слой с другой светочувствительностью для получения двухслойных масок (они лучше подходят для процесса обратной литографии, описываемой ниже). После этого происходит процесс экспонирования, который различается для масочной и безмасочной технологии [27].

Масочная литография предполагает присутствие некоторого шаблона: стеклянной пластины (mask) с нанесенным металлическим слоем (в основном Cr). Данный металлический слой является непрозрачным для оптического излучения. Такую пластину помещают в масочный фотолитограф (mask aligner). Под маской располагается держатель для подложки, который можно линейно перемещать по двум ортогональным осям и вращаться относительно центра в плоскости подложки. Это сделано для того, чтобы переносить первоначальный шаблон на нужную область подложки. В случае многослойных шаблонов (когда надо выполнить несколько последовательных процессов нанесения пленок и их травления в одном и том же участке подложки) последующие шаблоны выравниваются относительно предыдущих по так называемым реперным точкам – элементам шаблона, которые служат только для выравнивания слоев и не несут функциональной нагрузки. Для визуального совмещения у литографа имеются микроскопы с сильным увеличением (обычно это два микроскопа, разведенных по двум

разным точкам пластины). По виду оптической системы различают три вида литографов [26]:

1. В контактных литографах (contact mask aligner) пластину с маской после выравнивания совмещают с фоторезистом. Из минусов можно отметить постоянный механический износ пластины с маской (разрешение систем порядка 0.5 мкм);

2. В бесконтактных масочных литографах ближнего действия (proximity mask aligner) пластина находится на небольшом расстоянии (не более 25 мкм) от фоторезиста и не касается его. Из плюсов можно отметить отсутствие износа маски, из минусов – ухудшение результатов литографии из-за дифракции света (разрешение системы 1-2 мкм);

3. В бесконтактных проекционных литографах (projection mask aligner) между маской и подложкой имеется дополнительная оптическая подсистема, позволяющая минимизировать негативные эффекты удаления маски от фоторезиста (разрешение систем 65 нм и лучше). Для этого исходная маска содержит увеличенные в десятки раз изображения элементов микросхемы. В проекционной оптической подсистеме они уменьшаются и экспонируют нужный участок пластины. Последовательно меняя участки экспонирования и элементы шаблона, удается перенести всю литографическую маску на подложку.

После установки подложки с фоторезистом в масочный литограф и задания нужных координат начинается процесс экспонирования, который заключается во включении источника света внутри литографа. Один из основных параметров литографа является его разрешающая способность, которая определяется как расстояние между линиями, которые могут быть созданы на фоторезисте без слияния. Разрешающая способность литографического процесса зависит как от фоторезиста, так и от фотолитографа. Для масочных литографов, пренебрегая особенностями конструкции, можно сказать, что решающим фактором, влияющим на разрешающую способность, является дифракция света на шаблоне. Другими факторами могут являться аберрации линз, астигматизм оптической подсистемы и интерференция света в ней. Однако в современных системах все эти факторы не вносят основного вклада в точность воспроизведения шаблона.

Для того чтобы разобраться в дифракционном ограничении разрешающей способности представим, что имеется некоторая щель в маске малого размера на которой происходит дифракция света. Этот свет собирается круглой линзой, на которой также происходит дифракция (рисунок 4.2.), обусловливающая ограничение в разрешении фотолитографа. Маска находится далеко от линзы, поэтому можно воспользоваться формулами для обсчета дифракции Фраунгофера [26]. Критерий минимального

расстояния между двумя различимыми полосами, полученными литографомявляется критерий Релея:

$$R = 1,22 \cdot \frac{f \cdot \lambda}{d},\tag{4.1}$$

где R – диаметр центрального пятна, λ – длина волны источника излучения и f – фокусное расстояние собирающей линзы и d – диаметр линзы. Через синус угла α фокусное расстояние f можно выразить диаметр линзы d и подставить в уравнение (8). Если вместо воздуха используется иммерсионная жидкость с показателем преломления отличным от 1, то в уравнение 8 надо также подставить n:

$$R = 1,22 \cdot \frac{f \cdot \lambda}{2 \cdot n \cdot f \cdot \sin \alpha}.$$
(4.2)

Выражение $n \cdot \sin \alpha$ является числовой апертурой *NA* фокусирующей оптики. Индекс 0,61 применим только для идеального точечного источника света, в реальных условиях отличается от системы (обычно он равен ~0,75) и может быть обозначен за некоторую переменную *k*:

$$R = \frac{k \cdot \lambda}{NA}.$$
(4.3)



Рисунок 4.2. Часть оптической подсистемы проекционного фотолитографа

Выражение (10) показывает, что основным фундаментальным ограничением разрешения фотолитографа является используемая длина волны [17]. Чем она меньше, тем выше разрешение. Уменьшение длины волны предполагает не только изменение источника света, но и оптической подсистемы. Для современных фотолитографов различают несколько стандартных длин волн:

1. Линия G – 435 нм, в качестве источника освещения используется ртутная лампа;

2. Линия Н – 405 нм, в качестве источника освещения используется ртутная лампа;

3. Линия J – 365 нм, в качестве источника освещения используется ртутная лампа;

4. Глубокий ультрафиолет (DUV) 248 нм – используется эксимерный лазер на фториде криптона KrF;

5. Глубокий ультрафиолет (DUV) 198 нм – используется эксимерный лазер на фториде аргона ArF;

6. Экстремальный ультрафиолет (EUV) 13,5 нм – в качестве источника излучения используется синхротроны или сильно разогретая плазма;

Первые пять типов источников излучения используют схожую оптическую систему линз, аттенюаторов, фильтров для управление световым потоком, для EUV в качестве оптики используются не линзы, а многослойные зеркала, что связано с неэффективностью фокусировки и отражения традиционными методами. Эти зеркала основаны на межслойной интерференции. Шаблон в данном случае выполняется в виде отражающего элемента, а не просвечивающего как для остальных типов излучателей. При взаимодействии света с элементами оптической системы теряется до одной трети мощности, поэтому источники излучения должны быть очень мощными (для 200 Вт выходной оптической мощности требуется до 530 кВт суммарной мощности излучателя).

Вторым типом литографов являются безмасочные системы [16]. В них отсутствует маска, а вместо нее подложка перемещается относительно неподвижной оптической головки, имеющий узко сфокусированный пучок света нужной длины волны. В таких системах для осуществления экспозиции необходимо покрывать всю площадь пластины механически, что требует немалого времени, поэтому в крупносерийном промышленном производстве таки литографы не используются. Кроме того они имеют худшую разрешающую способность (не более 1 мкм). Однако отсутствие маски является несомненным плюсом для мелкосерийном промышленном производстве, В прототипировании и выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, где изготовление маски было бы или слишком дорого или вариант маски приходилось бы менять в ходе работы. В качестве источников излучения используются полупроводниковые лазеры, выходная мощность оптического излучения обычно не превышает 100 мВт.

После проведения экспозиции фоторезист помещают в раствор проявителя (обычно это слабощелочные растворы с рядом присадок) и выдерживают некоторое время, определяемое его концентрацией и растворимостью экспонированного фоторезиста. После этого его подложку промывают в деионизованной воде и сушат с помощью струй теплого воздуха или центрифугирования.

4.1.2. Фоторезисты

Как уже отмечалось ранее, важной частью процесса литографии является фоторезист. Он бывает разных типов: позитивный и негативный. У позитивного фоторезиста при экспонировании под действием излучения пленка становится растворимой в растворе проявителя, у негативного, наоборот, нерастворимой. Таким образом, при подготовки фотошалона необходимо учитывать с каким типом фоторезиста будет выполняться литографический процесс.

На разрешение и качество литографии влияет марка фоторезиста. Соответственно для фоторезиста есть ряд параметров, по которым он различается: чувствительность, разрешающая способность, контраст, стойкостью к травлению, дефектностью и адгезией [20]. Чувствительность – это величина, обратная дозе поглощенного излучения, необходимая для модификации фоторезиста. При этом часто различают интегральную чувствительность и спектральную. Интегральная характеристика определяет величину чувствительности для всех длин волн света, поглощаемого фоторезистом, спектральная же определяет ее для конкретной длины волны. Так как в современных литографических системах источники излучения имеют очень узкий спектр вблизи определенной длины волны, то спектральная чувствительность является более важной характеристикой. Зависимость спектральной чувствительности от длины волны часто указывается в технической документации для марки фоторезиста, например, как представленная на рисунке 10 для фоторезиста AZ-1350. Так как фоторезист может быть разной толщины график на рисунке 10 нормирован на 1 мкм.

В безмасочных литографических системах экспозиционная доза из-за специфики работы доза обычно рассчитывается экспериментально и определяется мощностью лазера, скоростью прохождения лазера по поверхности пластины, числом повторных проходов. В безмасочных системах определяется удельной мощностью излучателя (Вт/см²) и временем экспонирования. Кроме того, на время экспонирования в обоих случаях влияет толщина пленки. Для определения времени экспонирования необходимо найти величину, обратную произведению удельной мощности излучателя, спектральной чувствительностью фоторезиста и его толщины [17].



Рисунок 4.3. Спектральная чувствительность фоторезиста AZ-1350 [58]

Разрешающая способность фоторезиста показывает, какое число линий может быть в нем произведено литографическим методом на участке шириной 1 мм. На нее влияет как химический состав, так и толщина пленки. Чем меньше толщина, тем выше разрешающая способность, то есть тут важно также говорить об отношении минимальной ширины к линии к высоте [17]. Толщина фоторезиста является важной характеристикой для таких процессов как травление и обратная фотолитография, где малая толщина ограничивает глубину травления и толщины используемых пленок. Для современных фоторезистов с высокой разрешающей способностью хорошим показателем является отношение ширины линии к толщине фоторезиста как 1:4. Например, позитивный фоторезист AZ MiR 701 позволяет получать линии шириной в 0.3 мкм при толщине фоторезиста в 1.4 мкм. То есть при такой толщине разрешающая способность составляет порядка 3000 линий на 1 мм. Тесно связана с разрешающей способностью такая характеристика как контрастность γ . Она обратно пропорциональна логарифму отношения пороговой экспозиционной дозы D_c к экспозиционной дозе, при которой наблюдается минимальная толщина проявленного фоторезиста D_0 :

$$\gamma = \frac{1}{\log_{10}\left(\frac{D_c}{D_0}\right)}.\tag{4.4}$$

Пороговой дозой *D*_c называют дозу, при которой начинает происходить травление фоторезиста после облучения. Контрастность является мерой разрешающей способности, и показывает, насколько небольшое изменение в экспозиционной дозе приводит к

изменению в толщине фоторезиста после экспозиции и проявления. Профили зависимости толщины проявленного фоторезиста от экспозиционной дозы представлен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4. Профиль зависимости толщины проявленного фоторезиста от экспозиционной дозы: кривая 1 показывает слабоконтрастный фоторезист, кривая 2 сильноконтрастный

Показаны два различных профиля, по которым можно определить контрастность. В Случае кривой 2 она будет значительно больше таковой для кривой 1, так как разница отношение D_c к D_0 для этой кривой меньше. Контрастность также определяют через тангенс угла наклона касательной к дозовой кривой Чем больше угол, и, соответственно тангенс угла, тем выше контрастность.

Для улучшения контрастности после экспонирования фоторезист подвергают термической обработке (postbake), рекомендованной изготовителем, это уменьшает механические напряжения в пленке (релаксация механических напряжений), уменьшается неоднородность плотности резиста и улучшает твердость и стойкость резиста, что необходимо при дальнейших технологических процессов. Также могут применяться антиотражающие покрытия на подложке (например, оксид хрома) если это позволяет технологический процесс. Без использования такого покрытия отраженный свет интерферирует с падающим светом, вызывая дополнительную засветку фоторезиста.

фоторезиста является стойкостью к травлению: Другим параметром как жидкостному – прежде всего к кислотам. Кислотостойкость фоторезиста определяет насколько долго он выдерживает воздействие кислоты до тех пор, пока не начнут проявляться дефекты, связанные с отслаиванием от подложки, протравливанием подтравливанием границе фоторезиста, его на с подложкой. Аналогичной характеристикой по отношению к сухому травлению (травлению в плазме) является плазмостойкость. По отношению к любым процессам травления определяется такая характеристика фоторезиста как стойкость к травлению К:

$$K = \frac{h}{x} , \qquad (4.5)$$
Где *h* – глубина травления подложки, а *x* – боковое подтравливание на границе с фоторезистом. Чем больше значение *K*, тем большее соотношение глубины протравливаемых элементов к ширине.

Связанной с травлением характеристикой являет адгезия. В отношения фоторзиста она определяет его способность противостоять проникновению травителя к подложке, защищенной фоторезистом. Для примера фоторезиста Microposit S1818 за время 20 секунд проведенное в кислородной плазме (мощность генератора 200 Вт) боковой подтрав фоторезиста составляет около 1,6 мкм от его границы.

Еще одной характеристикой резиста является дефектность, показывающая какое количество микродефектов пленки на 1 см² появляется на пленке при процедуре нанесения, рекомендованной производителем. Эти дефекты не связаны с пылевыми частицами, имеющимися в воздухе и дефектами подложки.

Все вышеперечисленные параметры фоторезиста являются определяющими при его подборе для конкретного технологического процесса с учетом имеющегося литографического оборудование. Производители стараются учитывать потребности микроэлектронной промышленности и специально выпускают серии фоторезистов, имеющих повышенную разрешающую способность и контрастность, кисло- и плазмостойкость.

4.1.3. Рентгеновская литография

Другой разновидностью литографического процесса является рентгеновская литография [28]. Длины волн экспонирующего излучения в данном методе лежат в пределах от 0,4 до 5 нм. Уменьшение длины волны позволяет увеличить разрешающую способность, ограниченную во многом дифракционным пределом. Также малое поглощение волн данного диапазона резистами уменьшает проявление эффектов близости, то есть, нет необходимости внесения в литографический шаблон корректировок.

Одним из преимуществ данного типа литографического процесса является нечувствительность к органическому загрязнению подложки, что связано с также малым поглощением рентгеновских лучей компонентами с малым атомным номером. Поэтому при работе с такого рода процессами не возникает дефектов, связанных с локальным загрязнением. Также вследствие малого поглощения рентгеновского излучения резист большей толщины может быть однородно проэкспонирован, что особенно важно для применений в сфере МЭМС.

Так как изготовление рентгеновских оптических элементов связано с определенными трудностями, применение рентгеновской литографии ограничено негативной печатью. Разрешение, получаемое при использовании метода рентгеновской

литографии, ограничено геометрическими эффектами. Источником рентгеновского излучения с необходимой плотностью мощности являются синхротроны и источники на основе сильнонагретой (с помощью лазера или электронного пучка) плазмы.

На основе рентгеновской литографии был спроетирован процесс изготовления элементов с высоким соотношением латеральных размеров к толщине, названный LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung): последовательное применение глубокой рентгеновской литографии, гальванопластики и пресс-формовки для создания высокоаспектных микроструктур. Первые публикации по LIGA- технологии относятся к 1982 г. С тех пор LIGA-технология успешно применялась в различных исследовательских проектах [17]. На рисунке 4.5. представлены элементы оптического микропереключателя, полученные с помощью этого процесса.



Рисунок 4.5. Оптический микропереключатель, полученный с помощью LIGA [59]

Одной из основных особенностей LIGA является переход на более жесткое рентгеновское излучение (λ ~ 2Å). Это обеспечило большую глубину проникновения рентгеновского излучения. Основных этапов в LIGA три:

- Рентгеновская литография: слой резиста большой толщины облучают жестким рентгеновским излучением через маску из поглощающего вещества с последующим его проявлением;
- 2. После проявления полученная структура помещается в ванну с электролитом для проведения электрогальванопластики и создания печатной металлической формы. Отделение металлической формы осуществляется посредством растворения непроявленного резиста. Так как резистивная маска не является основной, то она должна быть инвертирована для получения нужной структуры

в металле. В качестве металлизирующего материала обычно используются никель, медь, золото и сплавы на их основе;

3. Отделенная металлическая форма служит шаблоном для массового тираживания полученного микрорельефа методом штамповки. Штамповкой можно изготавливать как конечные приборы, так и вторичные полимерные шаблоны. Во втором случае, исходный штамп, также называемый мастерштампом, используется только для создания полимерных копий, с которых создаются рабочие штампы. По мере тиражирования они истираются и заменяются новыми.

Разрешение LIGA-систем может достигать 0.1 мкм при толщине элементов в 4 мкм (отношение толщины к ширине линии - 40). Максимальное отношение ширины к толщине – порядка 100. В общем случае весь процесс LIGA представлен на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6. Этапы LIGA: 1. экспонирование резиста; 2. проявление резиста; 3. гальванопластика; 4. снятие резиста; 5. создание пресс-формы; 6. штамповка полимерных материалов с помощью полученной пресс-формы [44]

4.1.4. Лучевая литография

Кратко рассмотрим другие, менее распространенные, литографические методы. Электроннолучевая литография предполагает использование облучения чувствительного

материала электронами, разогнанными до энергий 20 - 40 кэВ [27]. Этот способ использовался для того, чтобы преодолеть дифракционные ограничения. Типовая схема электроннолучевой литографической установки представлена на рисунке 4.7.. По своему напоминает растровый принципу И устройству она электронный микроскоп. Литографическая подсистема может быть поставлена ко многим растровым электронным микроскопам в виде приставки внешнего управления разверсткой и механизма прерывателя пучка. Она должна иметь в своем составе источник свободных электронов (электронную пушку) - катод. Катод может быть термическим или полевым. Первые для создания электронной эмиссии нагреваются до высоких температур (например, на основе LaB₆), вторые для этих целей создают большие напряженности электрического поля. Электроны разгоняются за счет электростатического поля (разность потенциалов между катодом и анодом составляет 20-40 кВ). Для того, чтобы разгоняемые электроны не взаимодействовали с молекулами газов во время пролета вся конструкция микроскопа находится в герметичной камере, которая вакуумируется на время литографический операций. Разгоняемые электроны фокусируются проекционными и конденсорными линзами, которые фокусируют пучок электронов с помощью магнитного поля.



Рисунок 4.7. Схема типовой установки для электронно-лучевой литографии

Далее пучок может пройти через металлическую маску и с помощью нескольких проекционных линз быть отмасштабирован до нужных размеров. Однако этот способ не позволяет добиваться максимального разрешения электронной литографии. Чаще всего после этапа фокусировки в узкий пучок он откланяется с помощью электромагнитных (или электростатических) катушек и экспонирует необходимую область резиста. Разрешение в данном случае зависит от параметров и толщины резиста и диаметра пучка электронов. Диаметр пучка ограничивается аберрациями оптической системы и пространственным зарядом, аккумулируемым на пластине (на диэлектриках попадающие в пластину электроны не успевают стекать). Кроме того при прохождении через резист электрон претерпевает ряд столкновений с атомами вещества. Это приводит к изменению направления его движения и уширению экспонируемой области. Доза облучения D определяется площадью области облучаемой S, временем нахождения пучка в заданной области t и общим электронным током I:

$$D = I \cdot t/S. \tag{4.6}$$

С уменьшением размера экспонируемого элемента уменьшается и количество электронов, поглощаемых резистом при одной и той же дозе. Когда количество поглощаемых электронов достигает ~10000 на процесс экспонирования начинает влиять дробовый шум - флуктуация токов, обусловленная дискретностью носителей заряда. Для того, чтобы исключить его влияние, необходимо увеличивать поглощаемую дозу и уменьшать концентрацию проявителя. В качестве фоторезиста используется полиметилметакрилат (ПММА), водород-силсесквиоксана ([HSiO_{3/2}]n) и ряд других органических соединений. Для их характеризации применяются те же параметры, что и для фоторезистов для оптической литографии.

С помощью электронно-лучевой литографии были получены литографичские маски с разрешением около 2 нм при толщине резиста в 10 нм. Это значительно меньше максимального разрешения для традиционной оптики (0.1 - 0.2 мкм), но сравнимо с оптическими системами, работающими в экстремальном ультрафиолете (EUV). Однако в отличие от EUV время экспонирования резиста в установках по электронной литографии (из-за метода непосредственного экспонирования пучком и перемещения его по шаблону) значительно больше.

Модификацией электронно-лучевой литографии является ионно-лучевая [29]. В ионно-лучевой литографии для экспонирования полимерных резистов обычно используют легкие ионы - протоны, ионы гелия. Использование более тяжелых ионов (например галлия) позволяет легировать подложку или создавать на ней тонкие слои новых химических соединений. Различия между электронной и ионной литографией обусловлены большей массой иона по сравнению с массой электрона и тем, что ион является многоэлектронной системой. Тонкий пучок ионов имеет более слабое угловое рассеяние в мишени, чем пучок электронов, поэтому ионно-лучевая литография теоретически обладает более высоким разрешением, чем электронно-лучевая. Потери энергии ионного пучка в полимерных резистах примерно в 100 раз выше, чем потери энергии электронного пучка, поэтому чувствительность резистов к ионному пучку тоже выше. Это означает, что экспонирование резиста тонким ионным пучком происходит

быстрее, чем электронным лучом. Образование ионным пучком дефектов типа френкелевских пар "вакансия - межузельный атом" меняет скорость растворимости диэлектриков и металлов в некоторых растворителях примерно в пять раз. Это позволяет отказаться от полимерного резиста, так как слои материалов сами ведут себя как неорганические резисты. Ионно-лучевые системы литографии обеспечивают разрешение менее 10 нм, однако в настоящий момент литографические системы подобного класса находятся в стадиях разработки. Это связано с рядом проблем, например источником ионов, позволяющим создавать высокоинтенсивный пучок.

4.1.5. Нанопечатная литография

Еще одним методом литографии является нанопечатная литография (NIL). Ее основой является механическая модификация полимерного материала – термо- или фоторезиста при помощи штампа [24]. Этот штамп, так же обычно называемый мастерштампом, представлят собой подложку с микро- или нано-рельефом и впервые он был предложен Стивеном Чоу в 1995 году. В отличие от других литографических методов изменение формы резиста связано только с механическим воздействием, дальнейшее воздействия температуры или ультрафиолетового излучения лишь полимеризуют резист для предания ему необходимой механической прочности. Поэтому в нанопечтной литографии нет проблем, связанных с дифракционным пределом и данная технология особенно привлекательна для сфер применения связанных с необходимостью иметь высокое разрешение литографии при низкой стоимости оборудования. Также пюсом нанопечатной литографии является возможность использования, как кристаллических подложек кремния, сапфира, так и гибких полимерных подложек.

Как уже было сказано ранее для нанопечатной литографии требуется мастер-штамп. Такие штампы могут быть как жесткими, сделанными из кремния, кварца (модуль Юнга равен около 130 ГПа для кремния и 75 ГПа для кварцевого стекла). Основные материалы, из которых изготавливается жесткий штамп для нанопечати являются Si, SiO₂, SiC, нитрид кремния, металлы, сапфир. Процесс создания микро- и нанорельефа обычно производится за счет электронно-лучевой литографии и глубокого газофазного травления. Кроме жестких применяются и гибкими штампы, которые обыкновенно формируются из полидиметилсилоксана (ПДМС, модуль Юнга менее 2 МПа). Получение мягких штампов может быть произведено с жесткого штампа. Для этого ПДМС наносят на имеющийся жесткий штамп, полимеризуют и механически отделяют от подложки. Так как процессе литографии любой штамп постепенно загрязняется, то после появления критического количество дефектов он становится непригоден. Изготовление жестких штампов является дорогим ресурсоемким процессом, поэтому использование мягких штампов, полученных

от исходного жесткого, значительно увеличивает количество изготавливаемых с одного жесткого штампа структур. Процесс нанопечатной литографии с использованием гибких штампов штампы, часто называют «мягкой литографией» (soft lithography).

В технологии нанопечатной литографии можно выделить два основных направления: термическая нанопечатная литография и ультрафиолетовая нанопечатная литография [25]. В термической нанопечатной литографии чаще всего используется жесткий штамп, который вдавливается в термопластичную полимерный материал (резист). После этого полимер нагревается до температуры, превышающей температуру его стеклования, при этом меняются его механические свойства. При этом методе необходимы довольно значительное давление, лежащие в диапазоне от 10 до 50 кгс/см². После перенесения рельефа со штампа происходит охлаждение подложки до температуры, ниже температуры стеклования полимера. При этом полимерный материал вновь затвердевает и при отделении штампа сохраняет переданный ему рельеф (рисунок 4.8.). Нагрев в термической нанопечати может наносить вред пьезоэлектрическим и полимерным подложкам, что делает его применение более ограниченным.



Рисунок 4.8. Этапы термической нанопечатной литографии: 1. Нагрев подложки с нанесенным полимером, 2. прижатие штампа к подложке, 3. охлаждение и высвобождение штампа

При методе ультрафиолетовой нанопечатной литографии используется резист, меняющий механические свойства (упрочнение) под действием света с малой длиной волны. Такие резисты обычно имеют меньшую вязкость, чем термочувствительные, что позволяет уменьшить давление необходимое для печати. После нанесения резиста штамп вдавливается при комнатной температуре и давлении порядка 1 кгс/см². После этого образец подсвечивается ультрафиолетом и полимер затвердевает. Затем производится отделение штампа от подложки. Так как процесс изготовления требует экспонирования, то штампы изготавливаются из материалов прозрачных к ультрафиолету, таких как кварцевое стекло. Процесс полимеризации происходит быстрее, чем при методе термической нанопечати и более управляем, так как можно довольно точно регулировать поглощаемую дозу излучения.

Масштабирование при методе нанопечатной литографии довольно затруднительно. Одним из подходов для переноса серий литографических масок на большие подложки является пошаговая печать. Она представляет собой процесс при котором небольшой штамп последовательно проходит по всей поверхности пластины. Так как в термопечать требует нагрева, а подложка (например, кремний) часто обладает хорошей теплопроводностью, то этот метод неприменим для пошаговой печати из-за нагрева всей подложки. Поэтому при пошаговой печати используется только светочувствительные резисты, полимеризующиеся под действием ультрафиолета.

Важным параметром в температурной нанопечати является согласованность коэффициентов температурного расширения подложки и штампа. В процессе литографии температура подложки и штампа обычно превышает 100 °C, поэтому несогласованность коэффициентов могут привести к изгибу или сдавливанию шаблона при охлаждении. Это в свою очередь может привести к образованию локальных дефектов в полимере и ухудшить качество литографии. Поэтому при использовании данного метода стараются выбирать штампы из того же материала, что и подложка. При использовании метода ультрафиолетовой нанопечати процесс происходит при комнатной температуре и различием коэффициентов можно пренебречь. Разрешение литографических систем, основанных на нанопечати достигает 20 нм при примерно такой же толщине полимерного слоя.

4.1.6. Зондовая литография

Еще одним видом литографии является зондовая литография, выполняемая с помощью атомно-силового микроскопа [32]. Для выполнения литографических операций используется сам микроскоп, в состав которого входят зонды – кантилеверы, с помощью которых в измерительном режиме происходит изучение нанорельефа поверхности исследуемых образцов. Кантилеверы имеют очень малый радиус скругления (порядка нескольких нанометров) и изготавливаются из прочных материалов, таких как, нитрид кремния. При измерении такой кантилевер движется по поверхности образца,

прижимаемый пьезоэлектрическим сканером с некоторой небольшой силой, не вызывающей повреждений. Однако если образец достаточно мягкий и приложенная к кантилеверу сила превышает некоторый предел, при котором создается достаточное давление на его конце, то кантилевер начинает создавать повреждать поверхность и создавать нанорельеф. Существует несколько методов измерений с помощью атомносилового микроскопа, откуда проистекает несколько видов зондовой нанолитографии – контактный метод (наногравировка) или полуконтактный метод (наночеканка).

При наногравировке зонд перемещается по поверхности образца и в местах, где необходимо создать вдавливание рельефа сканер сильнее прижимает кантилевер к поверхности. Данная методика похожа на рытье канавок с помощью плуга при вспашке поля. Ширина таких канавок равна диаметру скругления кантилевера, а глубина зависит от силы прижима. Однако при слишком сильном прижатии катнилевера к подложке он может сломаться, поэтому именно механическими свойствами кантилевера и метариала образца обуславливается максимальная глубина нанорельефа. Если твердость образца больше твердости зонда, то литография будет невозможна. Желательно иметь небольшую шероховатость образца, не превышающую 10 нм. Для наногравировки в качестве материалов подложки хорошо подходят мягкие полимерные материалы (например, полиэтилен).

При использовании полуконтактного метода углубления формируются за счет удара колеблющимся зондом по поверхности образца. Такой метод позволяет избавиться от торсионных нагрузок на зонд, так как во время формирования рельефа зон не движется вдоль поверхности образца. Следствием этого является возможность более длительного использования зонда без его разрушения. Кратковременное воздействие также уменьшает влияние шероховатости поверхности. С помощью методов контактной и полуконтактной зондовой литографии можно получать структуры с разрешением в несколько десятков нанометров и глубиной до 10 нм.

4.2. Нанесение пленок и покрытий

Эта группа технологических процессов позволяет добавлять слой материалов к имеющимся слоям. Нанесение пленок при производстве МЭМС может быть разделено на две подгруппы:

1. Вакуумное напыление и химическое осаждение из газовой фазы [33];

2. Жидкостное химическое и электрохимическое нанесение покрытий [34];

Первая группа методов обычно делится на вакуумное напыление (PVD) и химическое осаждение из газовой фазы (CVD) и предполагает использование газа из

частиц, составляющих покрытие, транспортировку их до поверхности подложки и осаждение этих частиц с формированием пленки материала (в случае с химическим осаждением – только после химической реакции на поверхности).

Методы вакуумного напыления предполагают работу при более низком давлении, чем при химическом осаждении. В большинстве методов используются герметичные камеры, откачиваемые до необходимого разряженного давления с помощью насосов. Подача рабочих газов осуществляется с помощью натекателей, а давление при процессе напыления регулируется степенью открытия заслонки между реакционной камерой и откачной системой. Насосы для откачных систем бывают мембранные, диффузионные, турбомолекулярные и криогенные. Чаще всего используется комбинация из двух наносов – для низкого и высокого вакуума: вначале включается первый, а при достижении минимального для него уровня давления – второй. Типовым вариантом установки системы напыления тонких пленок является АЈА ORION 5, представленная на рисунке 4.9.. В левой части экрана представлена рабочая камера, справа – блок управления. В качестве откачной системы используется форвакуумный и турбомолекулярный насос. В качестве источника напыления может быть установлены термические, электроннолучевые и магнетронные распылители.



Рисунок 4.9. Система напыления тонких пленок AJA ORION 5

4.2.1. Термическое напыление

Один из наиболее распространённых методов вакуумного напыления является термическое испарение. Термическое напыление использует два физических процесса:

испарение нагретого исходного материала и конденсацию его на подложке. Похожим образом появляются капли воды на крышке кипящей кастрюли. Тем не менее, ключевым для процесса напыления является то, что он происходит в вакууме.

В высоком вакууме длина свободного пробега испарённых частиц больше расстояния до подложки, и они могут попадать на неё без рассеяния на молекулах остаточного газа (в отличии от приведённого выше примера с кастрюлей, где водяной пар должен сначала вытеснить из-под крышки воздух). При обычно используемом давлении 10^{-4} Па, частица диаметром 0,4 нм имеет длину свободного пробега 60 м. За счёт отсутствия столкновений, частицы испарённого материала сохраняют высокую температуру, что обеспечивает их необходимую подвижность для формирования на подложке плотного слоя. Вакуум также является защитной средой, позволяющий производить испарение химически активных материалов без нарушения их химического состава (например, окисления).

Испарённый материал осаждается неравномерно, если подложка имеет неровную поверхность, как это часто бывает с интегральными схемами. Поскольку испарённые частицы попадают на подложку преимущественно с одного направления, выступающие детали рельефа препятствуют попаданию материала на некоторые участки поверхности. Это явления называется «маскированием» или «затенением».

Если попытаться произвести процесс напыления при плохом вакууме, полученное покрытие будет, как правило, неоднородным, пористым из-за газовых включений и не сплошным. Цвет покрытия будет отличаться от чистого материала, и поверхность будет матовой (шероховатой) вне зависимости от гладкости подложки. Химический состав будет также отличаться от исходного за счёт образования оксидов, гидрооксидов и нитридов. Недостатком метода является сложность напыления материалов сложного состава из-за фракционирования, происходящего благодаря разнице в давлениях пара компонентов.

В качестве источника тепла для испарения материала могут использоваться [34]:

- Резистивные испарители, представляющие собой выполненную из проводящей керамики или тугоплавкого металла «лодочку» (называемую так благодаря своей форме), сквозь которую пропускается электрический ток, разогревающий её. Испаряемый материал помещается в углубление лодочки, где и испаряется (не обязательно из жидкой фазы).
- 2. Тигель с косвенным нагревом, электронным или индукционным. В первом случае нагрев осуществляется электронным потоком, поступающим на тигель с

кольцевого катода, расположенного вокруг тигля, во втором – вихревыми токами в самом тигле, возбуждаемыми индуктором.

- Электронный луч (электронно-лучевое испарение). В этом случае материал может нагреваться и испаряться локально, оставаясь в основной своей массе холодным, что позволяет иметь очень большой запас материала в тигле.
- 4. Лазерная абляция. Материал испаряется за счёт нагрева в фокусе лазерного луча большой мгновенной мощности. Температура в пятне нагрева может быть достаточно высокой для образования изотермической плазмы, то есть испарённые частицы материала ионизуются. Метод позволяет испарять тугоплавкие металлы и материалы сложного состава.

Для обеспечения равномерности напыления используют различные варианты вращающихся подложкодержателей. Как правило, также установка оснащается системой ионной очистки подложек или нагревателем для обеспечения требуемой чистоты поверхности и адгезии. Термическое испарения может быть модифицировано при введении в камеру рабочего газа (кислорода, азота) для получения оксидных и нитридных пленок. Однако данный метод чаще всего используется для получения слоев металлизации из-за высокой скорости распыления материала.

4.2.2. Катодно-дуговое напыление

Другим вариантом вакуумного напыления является катодно-дуговое осаждение. Данный метод предполагает нанесение тонких пленок в вакууме или среде активного газа из плазмы, создаваемой на катоде-мишени в катодном пятне дуги сильноточного разряда, который создается в парах материала электрода. Для создания этих паров необходимо первоначальное зажигание дуги. Обычно напряжения между катодом и анодом небольшое с высокими значениями тока в дуге. Такая дуга формирует на поверхности мишени (катода) одну или множество областей размерами от одного до нескольких десятков микрон катодных пятен – зон эмиссии с высокой плотностью мощности разряда. Из-за такой локализованности температура таких пятен очень высока и может достигать 15000 °C, что вызывает интенсивное испарение материала в этих зонах и образования высокоскоростных потоков плазмы, распространяющихся в окружающее пространство. Каждое катодное пятно живет ограниченное количество времени (порядка единиц микросекунд). После этого разряд, ассоциированный с данной областью погасает, оставляя на поверхности мишени небольшое углубление. После этого обычно происходит самозарождение нового катодного пятна в другой области катода, рядом с предыдущим углублением. Для более равномерной эрозии мишени обычно место возникновение нового

пятна определяется конфигурацией магнитного поля в камере, так что катодное пятно с помощью магнитных катушек перемещается по всей площади мишени.

Высокая плотность мощности позволяет получать высокоионизированную плазму (уровень ионизации может быть близок к 100 %), поэтому при использовании атмосферы с реакционными газами могут эффективно протекать реакции с образованием новых химических соединений. Например, при наличие в камере азота могут быть получены нитриды материала мишени.

Одной из проблем вакуумно-дугового испарения является наличие макрочастиц и макрокапель в продуктах испарения при длительной эмиссии из одной точки. Данные агломераты имеют плохую адгезию при осаждении, а в случае использования реакционной атмосферы – разный химический состав поверхности и объема. Если температура плавления материала катода невелика, то есть риск проплавления мишени до держателя и включения посторонней примеси в напыляемую пленку.

Для того, чтобы избежать подобных ситуаций обычно применяют большие, массивные катоды, имеющие большие линейные размеры, а катодное пятно быстро передвигают от одной части мишени к другой. При использовании цилиндрических катодов во время работы можно также производить вращательное движение катода.

Типовая установка по катодно-дуговому испарению обычно состоят из вакуумной камеры с откачной системой, натекателей реакционных газов и катодно-дугового испарителя. Последний представляет собой массивную цилиндрическую мишень из электропроводного материала, открытую с одного конца. Катод окружен экраном, который предохраняет рабочую камеру от воздействия дуги. Анодом обычно является стенка камеры или специальный электрод. Для зажигания дуги используется механическое соприкосновение анода и катода и плавное их разъединение. Получаемая дуга с помощью магнитного поля и движения катода образует эмиссионные зоны, равномерно перемещающиеся по площади открытого рабочего конца катода.

Такое нанесение покрытий возможно только из изначально проводящего материала катода. Хотя получаемые покрытия могут иметь плохую электропроводность в результате реакции с находящимися в камере газами. Оно активно применяется для напыления сверхтвердых и защитных покрытий, например, например нитрида титана и композитов на его основе. Также данные метод позволяет получать пленки алмазоподобного углерода (diamond like carbon).

4.2.3. Магнетронное напыление

Одним из самых распространенных методов нанесения как проводящих, так и диэлектрических тонких пленок сложного состава является магнетронное напыление [35].

Это метод напыления тонких пленок с помощью катодного распыления мишени в плазме диодного разряда (магнетронного) в скрещенных полях. Устройства, позволяющие реализовать такой разряд, называются магнетронами. Данный разряд является аномальным тлеющим разрядом. Электроны уходят с поверхности катода за счет ионноэлектронной эмиссии в результате бомбардировки ионами. Так как коэффициент этой эмиссии невелик, то ионный ток будет существенно превышать электонный, минимум на порядок. Для поддержания баланса заряженных частиц в плазме часть нейтральных атомов газа ионизируется электронами, разгоняемыми элктрическим полем в темном катодном пространстве. В отличие от тлеющего разряда, в котором электрон при отсутствии столкновений будет разгоняться электрическим полем, пока не покинет область темного катодного пространства, в магнетроне он будет искривлять свою траекторию вследствие силы Лоренца из-за поперечного магнитного поля. При достаточном значении силы Лоренца электрон описав дугу, вернется на катод с малой энергией и опять начнет ускоряться под действием электрического поля. Траектория электрона, таким образом, будет представлять циклоиду, и он будет смещаться в направлении, перпендикулярном обоим полям. Учитывая форму магнетрона, до столкновения с частицей газа, электрон будет находиться в своеобразной ловушке. За счет данной ловушки значительно возрастает эффективность ионизации эмитированными электронами, что позволяет добиться высокой плотности ионного тока, а значит скорости распыления даже при малых давлениях рабочего газа (менее 0.1 Па).

Данный ионный ток, порождаемый ионами рабочего инертного газа (чаще всего аргона), бомбардирующими поверхность катода-мишени приводит к распылению материала катода. При столкновении ионов с катодом происходит передача импульса, от иона газа к атому материала на поверхности. Этот атом отрывается от мишени и движется в произвольном направлении в сторону от катода. Среднее число атомов, выбиваемых одним ионом газа зависит от соотношения масс элементов, энергии иона, угла падения и энергии связи в материале катода. Если вместо мишени поместить подложку, то можно получить магнетронное травление. Однако если подложку расположить с другой стороны от мишени, то выбиваемый с ее поверхности материал будет осаждаться на подложке, образуя тонкую пленку материала. Общая схема установки представлена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10. Схема установки по магнетронному напылению тонких пленок [60]

Напыление металлов и сплавов производят в среде инертного газа, как правило, аргона. Для напыления сложных соединений, например оксидов и нитридов, применяется так называемое реактивное магнетронное напыление. К плазмообразующему газу (аргону) добавляют реактивный газ (например, кислород или азот). В плазме магнетронного разряда реактивный газ диссоциирует, высвобождая активные свободные радикалы, которые взаимодействуют с осаждёнными на подложку распылёнными атомами, формируя химическое соединение.

4.2.4. Химическое осаждение из газовой фазы

Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) отличается от выше описываемой группы процессов тем, что при нем происходит химическая реакция или же разложение исходного газа на поверхности нагретой подложки с осаждением на ней необходимого материала [38]. Образуемые продукты реакции удаляются из рабочей камеры через откачную систему. Продукты реакции могут быть ядовиты, поэтому часто на выходе имеется система фильтров. С помощью CVD можно получать аморфные, поликристаллические и эпитаксиальные пленки. В зависимости от давления газов в рабочей камере во время осаждения различаются три вида процессов:

- 1. Осаждение при атмосферном давлении (APCVD);
- 2. Осаждение при давлении от 10 до 10^{-4} мм. рт. ст. (LPCVD);
- 3. Вакуумное осаждение при давлении менее 10^{-4} мм. рт. ст. (UHVCVD).

Для получения более равномерных по толщине пленок используются высоковакуумные методы, однако пленки растут медленнее, чем при атмосферном давлении.

Рабочие газы могут подаваться из баллонов с помощью пьезоэлектрических натекателей, однако в качестве источников химических элементов могут использоваться также мелкодисперсные аэрозоли. Такие аэрозоли образуются с помощью

ультразвукового распылителя или с помощью инжектора, непосредственно распыляющего жидкость в рабочий объем камеры.

Общим для методов осаждения из химической фазы является высокая температура процесса, необходимая для протекания химических реакций на поверхности подложки. Данное обстоятельство является негативным для МЭМС и НЭМС, так как высокая температура может изменить электрические и механические свойства нанесенных ранее слоев. Для уменьшения температуры осуществляется поиск новых соединений целевого материала. Также используются методики плазменной модификации процесса химического осаждения (PECVD). Данный метод позволяет понизить температуру химической реакции и получать высококачественные пленки при относительно невысокой температуре.

С помощью метода осаждения из газовой фазы можно получать высококачественные пленки поликристаллического кремния Si, диоксида кремния SiO₂, нитрида кремния Si₃N₄, вольфрама W, и алмазоподобных покрытий C. Также с помощью аэрозолных прекурсоров получают соединения оксидов и сульфидов металлов, соединения теллура, ртути и кадмия.



Рисунок 4.11. Система химического газофазного осаждения пленок PlasmaPro 100 от Oxford Instruments [61].

На рисунке 4.11. представлена типовая установка по газофазному химическому осаждению тонких пленок PlasmaPro 100 от Oxford Instruments. Она оснащена загрузочной и рабочей камерой с источником плазмы мощностью 600 Вт и нагревателем подложкодержателя до 400 °C.

К химическим и электрохимическим методам так же обычно относят процессы, происходящие в реакционных жидкостях и растворах электролитов. При этом первая группа процессов предполагает создания необходимой концентрации и температуры раствора, а вторая – также протекание электрического тока через данный раствор. При электрохимическом осаждении обычно получают металлические пленки. Оно основано на разложении солей и окислов в растворах под действием постоянного тока. В растворе такая соль металла диссоциирует с образование катиона металла. Данный катион может быть осажден на отрицательно заряженном катоде, при этом забирая необходимое количество электронов. Данный метод применим для получения толстых (десятки микрометров) пленок, однако их качество существенно ниже, чем у пленок, получаемых вакуумным напылением. Однако высокая скорость осаждения, которая легко регулируется величиной протекающего тока и простота изготовления электрохимических ванн является существенным преимуществом данного метода.

Для ряда металлов в растворах электролитов (кислот) могут быть получены тонкие пленки оксидов. Для этого на анодируемую поверхность металла подается отрицательное напряжение. Получаемый слой оксида не обладает высокой диэлектрической прочностью, в отличие от таковых полученных методами вакуумного напыления, однако данный метод также отличается высокой скоростью нанесения и может быть использован для создания слоя пассивации. Для нанесения полимерных и золь-гель пленок часто также используется процесс центрифугирования. Данный процесс описывался выше как наиболее распространенный при нанесении резистов.

4.3. Травление пленок и покрытий

Последним классом процессов является травление пленок и покрытий [28]. Данный класс методов применяется в сочетании с нанесением литографическим способом защитной маски. Она может являться самим резистом, тогда такую маску называют мягкой (soft mask). Если же с помощью резиста изготавливают защитный слой из плохо стравливаемого материала (например, нитрида кремния или оксид алюминия), тогда такую маску называют жесткой (hard mask). Это связано с тем, что вне зависимости от

метода травления пленки, незащищенной маской, сама маска также повреждается во время этого процесса.

4.3.1. Параметры процесса травления

Отношения скоростей травления маски и стравливаемой пленки характеризуется селективностью травления [28]. Также селективность важна для остановки процесса травления при полном стравливании незащищенной маской пленки, т.е. травление не должно приводить к значительным повреждениям нижестоящих слоев при высокой селективности. Для любого процесса травления желательно иметь максимальную селективность. Для примера при травлении пленки диоксида кремния SiO₂, напыленного на подложку из кремния Si, часто применяются водные растворы фтороводородной кислоты. Отношение скоростей травления диоксида кремния кремнию в таких растворах составляет приблизительно 1 к 100. То есть за время травления 100 нм диоксида кремния подложка из кремния будет подтравлена только на 1 нм.

Другим параметром процесс травления является его скорость травления . Чем она выше, тем лучше. Однако обычно высокая скорость травления приводит к большей неоднородности травления по толщине и, как следствие, большей шероховатости поверхности травления. Скорость травления может сильно варьироваться в зависимости от вида процесса и зависит от разных параметров. Например, при жидкостном травлении диоксида кремния в водном растворе фтороводородной кислоты (1 к 6) при увеличении температуры с 18 до 26 °C скорость травления возрастает с 65 нм/мин до 120 нм/мин.

Третьим важным параметром является анизотропия процесса. Рассмотрим травление пленки диоксида кремния на подложке из кремния (рисунок 4.12.). Степень анизотропии процесса травления пленки по толщине показывает насколько мал подтрав пленки по ширине, т.е. во сколько раз вертикальная скорость травления отличается от горизонтальной. Подтрав пленки в горизонтальном направлении равен (W-W₀)/2, а толщина пленки равна d. То есть, выразив коэффициент анизотропности процесса A через выражение $1-(W-W_0)/(2\cdot d)$, получаем, что полностью изотропный процесс имеет коэффициент A равный 0, а полностью анизотропный процесс имеет A = 1. В большинстве процессов необходимо иметь наиболее анизотропное травление, хотя в В отдельных случаях изотропия необходима. частности. при изготовлении свободностоящих мембран их высвобождение может быть реализовано с помощью сильного горизонтального подтрава нижележащих слоев.



Рисунок 4.12. Травление пленки SiO₂, нанесенной на кремниевую подложку

4.3.2. Жидкостное травление

Процессы травления можно условно разделить на две группы – жидкостные и газофазные (сухие) [28]. Жидкостные процессы основаны на химической реакции, поэтому они более изотропные, чем газофазные, имеют большую скорость травления и могут быть более селективны. При травлении кристаллических слоев анизотропия жидкофазных процессов может быть обусловлена разной скоростью удаления слоев в различных кристаллографических направлениях. Например, для кремния Si при травлении в концентрированных водных растворах КОН отношение скоростей травления плоскостей {110} в происходит в 600 раз быстрее чем, для плоскостей {111}. (рисунок ниже). Данное свойство активно используется при производстве МЭМС и НЭМС на кремниевых подложках.



Рисунок 4. 13. Пример жидкостного анизотропного травления кремния

Для жидкофазного травления обычно применяются химические ванны, стойкие к травителю (например, для водных растворов фтороводородной кислоты – это тефлоновые контейнеры). Эти ванны обладают нагревательной системой с возможностью поддержания необходимой температуры в широком диапазоне. Так как в процессе травления концентрация активного вещества травителя постоянно уменьшается, то его необходимо или периодически обновлять или проводить процедуру рекуперации – доведения параметров концентрации до исходного значения и удаления продуктов реакции. Кроме того для увеличения скорости травления может быть использована ультразвуковая агитация. Для отвода продуктов реакции и уменьшения градиента концентрации травителя в растворе ванна обычно оснащается аэраторами, головки которых равномерно располагаются по дну ванны.

Несмотря на простоту, скорость и селективность процесса жидкофазного травления он имеет ряд недостатков [31]. Одним из самых важных в производстве МЭМС и НЭМС является проблема слипания и разрушения свободностоящих структур вследствие действия сил поверхностного натяжения жидкости. Данные силы появляются при образовании капель раствора внутри полостей и зазоров структур после извлечения из ванны пластины. На воздухе капли начинают высыхать и уменьшаться в объеме, тем самым "слепляя" механические элементы структуры. В отдельных случаях деформационные напряжения могут быть столь значительны, что происходит механическое повреждение отдельных элементов МЭМС и НЭМС. Поэтому последний этап изготовления структур – удаление жертвенных слоев (release phase) обычно производится с помощью газофазного травления.

4.3.3. Газофазное травление

Газофазные процессы травления работают за счет взаимодействия ионизированного газа (плазмы) с веществом, передавая свой момент импульса стравливаемому слою материала и "выбивая" атомы с поверхности [28]. Если ионы газа могут химически взаимодействовать с атомами стравливаемого слоя, то помимо физического взаимодействия удаление материала происходит и за счет химической реакции. Скорость травления в газофазных процесса ниже, чем в жидкофазных, но удаление материала проходит более равномерно по всей поверхности пластины (толщина стравливаемого слоя примерно одинакова). Анизотропия процесса повышается с увеличением энергии ионов плазмы и уменьшением давления. При этом уменьшается селективность, что обусловлено постепенным переходом от химического травления физическому. Предельным случаем является травление путем бомбардировки инертными ионами (например, аргона) с высокой энергией. При таком травлении анизотропия процесса

может быть велика, однако из-за того, что ионы инертны при травлении нет различия между материалом маски и травимой области.

Типовая схема установки газофазного травления представлена на рисунке 4.14.. Имеется откачная система, для создания в рабочей камере необходимого базового давления и электрически управляемая заслонка для поддержания рабочего давления в смеси газов. Подложкодержатель с водяным охлаждением (чтобы минимизировать плазменный нагрев и поддерживать постоянную температуру). Количество натекателей газа может различаться, так как в различных процессах может участвовать смесь из 2 - 4 газов. Для зажигания плазмы обычно используются высокочастостный генератор. В плазмо-химическом травления обычно используются газы, ионы которых проявляют высокую реакционную способность – такие как фториды (CF₄, SF₆, NF₃, CHF₃) и хлорсодержащие соединения (BCl₃, CCl₄, SiCl₄, CCl₂F₂). Они позволяют травить кремний, пленки оксидов, нитридов, металлов. Для удаления органических материалов используется кислородная плазма.





Рисунок 4.14. Типовая схема установки по газофазному травлению тонких пленок и ее внешний вид [64]

Для увеличения анизотропии травления в вертикальном направлении применяют модифицированные газофазные процессы, называемые глубоким плазмохимическим травлением (deep reactive ion etching - DRIE). Обычно это достигается двумя способами. Первый заключается в создании более плотной плазмы с помощью индукторов (катушек). Такая плазма называется индуктивно-связанной (inductive coupled plasma - ICP) и позволяет добиться заселенности в 10^{12} ионов/см³ при пониженном давлении газа в 10^{-3} - 10^{-2} мм рт. ст. Второй подход заключается в особом двухступенчатом техпроцессе, названным Bosch process (рисунок 4.15.).



Рисунок 4.15. Двухступенчатый процесс глубокого плазмохимического травления (Bosch process) [73]

Первым этапом в Bosch process является обычное газофазное травление (чаще всего в SF₆) после которого в камеру напускается газ (например, C_4F_8), плазма которого не травит пленку, а наоборот пассивирует ее тефлоноподобным покрытием. Притом пассивация производится примерно равным слоем, как на боковых стенках, так и на нижней поверхности стравливаемой пленки. Затем процесс травления с помощью первого газа начинается вновь. Из-за более низкого давления и большой энергии ионов, процесс травления имеет хорошую анизотропию скорости удаления материала в вертикальном направлении. Таким образом, не повреждая боковые стенки, происходит дальнейшее удаление материала с нижней границы. Данный процесс был изначально оптимизирован для кремния, однако в настощий момент используется для травления различных оксидных, нитридных и металлических пленок. Отношение ширины протравливаемых элементов к глубине может быть не хуже чем 1 к 66000 (Al₂O₃: Si).

Еще одним важным процессом при производстве свободностоящих структур для МЭМС и НЭМС является использование газового травления кремния в дифториде ксенона XeF₂. Это твердое вещество, которое при комнатной температуре образует газ (возгонка) с парциальным давлением в 3.8 мм рт. ст. Данный химически газ реагирует с кремнием с образованием летучих продуктов реакции:

$$2XeF_2 + Si \to 2Xe + SiF_4. \tag{4.7}$$

Травление сильно изотропное и селективное: скорость травления кремния по отношению к диоксиду кремния SiO_2 или его нитриду Si_3N_4 примерно в 1000 раз больше. Установки по травлению кремния на основе дифторида ксенона обычно осуществляют циклический его напуск в рабочую камеру и с последующей промывкой ее газообразным азотом. Для удаления продуктов реакции используется форвакуумный насос. Скорость травления кремния составляет ~ 250 нм/мин.



Рисунок 4.16. Свободностоящая гетероструктура на основе GaAs/AlAs, полученная с помощью DRIE и травления в XeF₂

Так как травление изотропное то данный процесс часто используется в качестве последнего шага в высвобождении свободностоящих структур. При этом кремний должен играть роль жертвенного слоя. Один из вариантов такой структуры показан на рисунке 4.16.

5. Физические основы работы МЭМС-устройств

5.1. Механические и электрические параметры чувствительных элементов

Во многих МЭМС-устройствах чувствительным элементом (датчиком) является консоль или мембрана, изменяющая свои характеристики в результате внешнего воздействия. Изменения параметров этих устройств обусловлено явлениями электрострикции, пьезоэлектрического эффекта, термического расширения [38]. Рассмотрим простейшие примеры, позволяющие понять суть физических процессов при использовании такого сорта чувствительных элементов в МЭМС-устройствах.

5.1.1. Удлинение консоли за счет пьезоэффекта

Рассмотрим консоль в виде прямоугольного стержня с одним жесткозакрепленным концом и другим – свободным. Геометрические размеры L – длина, а – ширина, b – толщина. Предполагается, что материал, из которого изготовлена консоль, обладает изотропным пьезоэлектрическим эффектом, выражающимся в изменении линейных размеров материала при приложении к нему электрического поля *E*.

При этом $\frac{\Delta L}{L} = K_{\Im C} \cdot E$, где $K_{\Im C}$ – пьезоэлектрический модуль, E – напряженность электрического поля. На рисунке 5.1. приведена структура рассматриваемой модели.



При приложении внешнего напряжения U вследствие электрострикции произойдет удлинение консоли на величину $\Delta L = K_{3C} \cdot L_0 \cdot E$.

Для примера рассмотрим кварцевую консоль, выполненную в виде балки длиной L = 5 мкм с квадратным сечением со сторонами a = b = 200 нм. Пьезоэлектрический модуль для кварца равен $K_{\Im C} = 2,31 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. При приложении к ее боковым сторонам напряжения U = 80 вольт, получаем

$$\Delta L = \frac{d \cdot V \cdot L}{K_{3C}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-12} \cdot 80 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-9}} = 4,6 \text{ hm}.$$

5.1.2. Удлинение консоли при нагревании

Рассмотрим тот же самый пример консоли в виде прямоугольного стержня с одним жесткозакрепленным концом и другим – свободным. Нагрев консоли от температуры T_0 на величину ΔT будет осуществляться за счет внешних воздействий, например за счет джоулева тепла, выделяющегося при протекании электрического тока. При нагревании произойдет удлинение консоли на величину $\Delta L = K_{TKP} \cdot L_0 \cdot \Delta T$.

Рассмотрим, чему будет равно удлинение ΔL при нагреве кремниевой консоли длиной $L_0 = 5$ мкм на $\Delta T = 10$ °К. Температурный коэффициент расширения кремния равен $K_{TKP} = 2,6 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹. Тогда

$$\Delta L = 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 0,13 \text{ нм}.$$

5.1.3. Изгиб консоли при воздействии внешней силы

Рассмотрим, как зависит величина изгиба y_0 консоли длиной L с жестко закрепленным концом под действием внешней силы F. Схема, используемая для расчета, приведена на рис. 5.2.



Рисунок 5.2. Изгиб консолей

Предполагаем, что поперечные размеры (ширина и толщина консоли) учтены путем использования упругих параметров консоли, J – момент инерции, E – модуль упругости.

Анализ на основе уравнений теории упругости показывает, что расчет изгиба консоли линий y = f(x) путем интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси консоли или применения графоаналитических методов существенно затрудняет получение аналитических формул. Авторы [14] для решения данной задачи используют метод начальных параметров в сочетании с принципами независимости действия сил и преобразования ступенчатых балок в эквивалентные постоянного сечения, что позволяет получить аналитические зависимости для упругих линий y = f(x) в следующем виде

$$y(x) = \frac{FL^3}{6EJ} \left(3\frac{x^2}{L^2} - \frac{x^3}{L^3}\right),$$
 (5.1)

Максимальный изгиб консоли у₀ будет равен

$$y_0 = \frac{1}{3} \frac{FL^3}{EJ}.$$
 (5.2)

Сила F, необходимая для такого изгиба, равна

$$F = \frac{3EJ}{L^3} y_0. (5.3)$$

Отметим, что зависимость изгиба консоли от расстояния до точки опоры x, описываемая уравнением (3), нелинейная. На половине длины консоли L/2 величина изгиба будет

$$y\left(x=\frac{L}{2}\right)=0,3y_0.$$

5.1.4. Изгиб биморфной консоли при нагревании

Рассмотрим консоль, состоящую из 2-х жестко соединенных материалов, имеющих различные значения коэффициента теплового расширения K_{TKP} . В условиях равновесия, например при комнатной температуре, биморфная консоль имеет длину L_0 , толщины а обоих слоев (1 и 2) одинаковы. При этом расстояние между центрами первого и второго слоев также равно а. Предполагаем, что коэффициент теплового расширения слоя 1 больше, чем слоя 2. В этом случае при равномерном нагреве биморфной консоли на величину ΔT длина обеих частей консоли увеличится на разную величину $\Delta L1 > \Delta L2$, что вызовет удлинение и изгиб консоли.

Схема приведена на рис. 5.3.



Рисунок 5.3. Иллюстрация изгиба консоли

Величина отклонения у₀ от горизонтального положения при условии малого отклонения будет определяться соотношением

$$\frac{y_0}{L_0} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2}{a} = \frac{L_0 (K_{\text{TKP}}^1 - K_{\text{TKP}}^2) \cdot \Delta T}{a}$$
(5.4.)

Или

$$y_0 = (K_{\text{TKP}}^1 - K_{\text{TKP}}^2) \cdot \frac{L_0^2}{a}.$$
 (5.5.)

Удлинение центра консоли

$$\Delta L = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{2} = \frac{K_{\text{TKP}}^1 + K_{\text{TKP}}^2}{2} \cdot L_0 \cdot \Delta T.$$
 (5.6.)

Для биморфной консоли из материалов «платина – кремний» коэффициенты теплового расширения равны

$$K_{\text{TKP}}^{Pt} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \ K_{\text{TKP}}^{Si} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}.$$

При значении длины $L_0 = 5$ мкм и толщины a = 200 нм величина изгиба y_0 будет

$$y_0 = (9,0-2,6) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 10}{200 \cdot 10^{-9}} = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{m} = 8 \text{ mm}$$

Рассмотрим ряд ключевых МЭМС-сенсоров(датчиков), использующих описанные выше эффекты.

5.2. Датчики давления

Принципом действия любого датчика давления является преобразование давления, применённого к чувствительным элементам, в электрический сигнал. Чувствительные элементы, входящие в состав датчиков давления, являются (механическими) устройствами, которые деформируются или передвигаются под действием внешнего воздействия, это и определяется в процессе измерений.

Такими устройствами могут быть подвесные и гофрированные диафрагмы, мембраны, сильфоны и другие. В настоящее время большинство датчиков давления такого типа изготавливаются с кремниевыми мембранами, методами микротехнологий.

Кроме чувствительного элемента, например, мембраны известной площади A, в состав датчиков давления обязательно входит детектор, выходной сигнал которого пропорционален приложенной силе F.

$$P = \frac{dF}{dA} \tag{5.1}$$

Существует несколько методов преобразования полученного отклонения мембраны или пластины в электрический сигнал, которые будут описаны ниже.

5.2.1. Тензорезистивные датчики

<u>В</u> тензорезистивных датчиках на кремниевую диафрагму помещены пьезорезисторные преобразователи в виде резисторов. После воздействия механического воздействия сопротивление резисторов вследствие пьезорезисторного эффекта меняется на величину ΔR , что приводит к изменению выходного напряжения у датчика.

Основным преимуществом монокристаллического кремния в датчиках является его хорошие характеристики упругости, высокий коэффициент тензочувствительности - k, а так же, в таком датчике отсутствует гистерезис и деформация, вызванная непрерывным воздействием (creep), даже при высоком давлении.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon, \tag{5.2}$$

где R – исходное сопротивление тензорезистора, ΔR – изменение сопротивления при деформации решётки тензорезистора, k – коэффициент тензочувствительности, ε – деформация.

Важно учитывать, что кремниевые тензорезисторы обладают довольно сильной температурной чувствительностью, поэтому всегда при разработке датчиков на их основе необходимо предусматривать цепи температурной компенсации.

Как правило, тензорезисторы включаются по мостовой схеме (рисунок 5.4.), выходное напряжение составляет несколько сотен милливольт, поэтому на выходе датчиков, как правило, ставятся усилители сигналов.



Рисунок 5.4. Измерительный мост датчика давления

Существует несколько способов производства кремниевых датчиков давления с одинаковой тензочувствительностью, но разным размером.

В одном из таких способов используется кремниевая подложка p-типа <100>, на которой создаётся эпитаксиальный слой n - типа для обеспечения изоляции. Дальше, методом ионной имплантации или диффузионным методом формируются пьезорезисторы p-типа.

Пьезорезисторы расположены так, что один из них R1 параллелен, а другой R2 перпендикулярен ориентации диафрагмы <110>. Такой порядок их расположения, как показывает рисунок 5.5., даёт сильный выходной сигнал.



http://datchikisensor.narod.ru/090.html

Из-за строения кристаллической решётки кремния, ориентации диафрагмы и типа пьезорезисторов,

Рисунок 5.5. Расположение пьезорезисторов на диафрагме

напряжение от приложенной силы будет разное по разным направлениям в кристалле. Чтобы учитывать это, используется тензор, куда входят все составляющие напряжения по всем направлениям. Например для резисторов, расположенных вдоль направления диафрагмы <110>, продольная и поперечная составляющая напряжения будут разные изза разных пьезорезистивных коэффициентов Π_l и Π_t . Множителем для этих коэффициентов являются $10^{-11}Pa^{-1}$. n - type: $\pi_l = -31.2$ $\pi_t = -17.6$ p - type: $\pi_l = 71.8$ $\pi_t = -66.3$

5.5. Из рисунке видно, что пьезорезисторы р-типа имеют большую чувствительность, чем n-типа, а пьезорезистивные коэффициенты имеют противоположные знаки и почти равные величины. Это свойство делает пьезорезисторы р-типа удобными для применения в конфигурации «полный мост».

В зоне подложки вокруг диафрагмы формируются другие элементы схемы датчика p-n переходы и резисторы, которые используются в целях компенсации температуры.

Ещё один способ изготовления диафрагм для датчиков давления базируется на методе сплавления двух подложек из монокристаллического кремния без применения промежуточных слоёв. Пирамидальная полость по размеру диафрагмы формируется в нижней закреплённой подложке методом анизотропного травления кремния. Верхняя



Рисунок 5.6. Изготовление кремниевой мембраны методом сплавления кремния: А — технологические этапы изготовления, Б — сравнение двух диафрагм, полученных по разным технологиям.

подложка состоит из кремния р-типа с нанесённым эпитаксиальным слоем n-типа. Методом сплавления вышеуказанные подложки соединяются друг с другом. Затем удаляется часть верхней подложки контролируемым травлением, до тонкого слоя из монокристаллического кремния, и оставшийся слой образует диафрагму датчика. После чего, методом ионной имплантации формируются резисторы и способом травления проделываются контактные отверстия. Для получения необходимой толщины устройства - порядка 140 мкм, нижняя подложка шлифуется и заземляется. Вышеуказанный изготовленный датчик имеет значительно меньшие размеры, чем традиционный кремниевый преобразователь давления.

Чтобы измерять абсолютное, дифференциальное и манометрическое давление используются три типа датчиков. Так, например, абсолютное барометрическое давление, измеряется относительно давления во встроенной, или внешней эталонной вакуумной камере. Так, в частности, чтобы измерить дифференциальное давление, к примеру давление в дифференциальных расходомерах, измеряется его перепад, при подаче давления с диафрагмы. одновременной двух сторон Для измерения манометрического давления необходимо некоторое эталонное значение, относительно которого производятся замеры. Так, на практике, измеряется кровяное давление, которое соотносится с атмосферным давлением. Манометрическое давление - это разновидность дифференциального давления. В вышеуказанных трёх типах датчиков применяются одинаковые конструкции диафрагм и тензодатчиков, при этом все они имеют различные корпуса. Так, в дифференциальном или манометрическом датчике, кремниевый кристалл располагается внутри камеры, в которой формируются два отверстия с двух сторон кристалла. Внутренняя часть корпуса заполняется силиконовым гелем, который изолирует поверхность кристалла и места соединений, но позволяет давлению воздействовать на диафрагму, так осуществляется защита устройства от вредного влияния окружающей среды. Следует отметить, что корпуса дифференциальных датчиков могут иметь разную форму. А также учитывать, что в некоторых случаях при работе с коррозионными жидкостями или с горячей водой, и т.д. обязательна физическая изоляция устройства и гидравлическая связь с корпусом датчика. Это обеспечивается дополнительными диафрагмами. Устройство датчика давления схематически показано на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7. Устройство датчиков давления: a – дифференциальный датчик давления; б – датчик абсолютного давления

В дифференциальном датчике давления (рис. 5.7. а) с одной стороны к мембране приложено давление p1, а с другой – p2, поэтому её растяжение определяется только

разностью давлений p1 – p2. В датчике абсолютного давления (рис. 5.7. б) с одной стороны мембраны устроена вакуумная камера.

5.2.2. Емкостные датчики

В ёмкостных датчиках давления также реализуются кремниевые диафрагмы, перемещение которых относительно опорной пластины меняет ёмкость между ними. Данный тип датчиков эффективно используется при невысоких давлениях. Максимальной стабильностью рабочих характеристик обладают монолитные ёмкостные датчики давления, изготовленные из кремниевых кристаллов. Перемещение диафрагмы может обеспечить изменение 25% ёмкости в широком диапазоне значений, что позволяет провести прямую оцифровку результатов измерений. В пьезорезитивных датчиках для диафрагм, необходимо обеспечивать максимальное механическое напряжение на краях, а в ёмкостных датчиках существенным является перемещение центральной части диафрагм. В ёмкостных датчиках диафрагмы могут быть защищены от избыточного механическими ограничителями с каждой стороны диафрагмы (для давления дифференциальных датчиков давления). В пьезорезистивных датчиках такой способ защиты, к сожалению, работает недостаточно эффективно из-за небольших перемещений, поэтому для них определяется давление разрыва, которое, как правило, в 10 раз превышает максимальное измеряемое давление. Следует отметить, что для ёмкостных преобразователей с механическими ограничителями эта величина в 100 раз больше. Это особенно важно при работе в области низких давлений, где возможны всплески высокого лавления.

Обеспечить хорошую линейность ёмкостных датчиков могут только диафрагмы, обладающие ровной поверхностью центральной части. Считается, что ёмкостные датчики обладают линейностью исключительно тогда, когда перемещения диафрагм значительно меньше их толщины. Добиться улучшения линейности позволяет использование гофрированных диафрагм, изготовленных методами микротехнологий. Планарные диафрагмы, как правило, обладают лучшей тензочувствительностью по сравнению с гофрированными тех же размеров и толщины. Вместе с тем, при наличии в системе механических напряжений, действующих в плоскости мембраны, её гофрированная форма позволяет минимизировать их воздействие, тем самым улучшая линейность и чувствительность этих датчиков.

Перемещение тонкой пластины или диафрагмы может быть небольшим при измерении низких давлений. Перемещение может быть таким маленьким, что тензодатчик, прикреплённый к диафрагме или встроенный в неё, будет выдавать очень низкий выходной сигнал, обработать который крайне сложно. Решить эту проблему

позволяет использование ёмкостного датчика, в котором отклонение диафрагмы измеряется по её положению относительно опорной пластины, а не по напряжению внутри материала. Ещё одним способом решения проблемы измерения очень низких давлений является применение магнитных датчиков.

Для кремниевых датчиков всегда характерна зависимость их характеристик от температуры. Коэффициент температурной чувствительности данных датчиков обычно отрицательный, поэтому для получения точных результатов его необходимо компенсировать. Как правило, достаточно бывает простой температурной компенсации, осуществляемой при помощи подключения к датчику последовательного или Для того чтобы настроить рабочий диапазон выходного параллельного резистора. напряжения датчика, подбирают резистор соответствующего значения. Вместе с тем, для осуществления более капитальной температурной коррекции в широком диапазоне температур, нужно применить более сложные компенсационные цепи, которые включают в себя детекторы температуры. Альтернативой аппаратной коррекции температуры выступает программная. С этой целью используется встроенный детектор температуры, измеряющий температуру датчика давления. В процессорную систему поступают данные с обоих датчиков, где проводится их соответствующая цифровая корректировка.

5.3. Акселерометры

Акселерометры - это электромеханические устройства, которые воспринимают либо статические, либо динамические силы ускорения. Статические силы включают в себя гравитацию, а динамические силы могут включать вибрацию и движение. Выходной сигнал датчика можно легко подвергнуть однократному или двукратному интегрированию, тем самым получить смещение или скорость. Акселерометры могут измерять ускорение по одной, двум или трём осям. Трёхосевые устройства становятся все более распространёнными, так как стоимость разработки для них уменьшается.

Все акселерометры состоят из специального инерционного элемента массой m, движение которого отстаёт от движения корпуса, упругой поддерживающей системы (пружина) k и демпфирующего устройства b (Рисунок. 5.8.).



Spring-mass-dashpot system

Equivalent circuit

Рисунок 5.8. Система «масса-пружина-демпфер» в механическом и электрическом представлении

Основное предназначение датчика ускорений любой конструкции заключается в обнаружении перемещения инерционной массы относительно корпуса устройства и преобразовании его в эквивалентный электрический сигнал. Детектор перемещений, измеряющий микроскопические амплитуды вибрационных колебаний или линейных ускорений, является частью всех акселерометров.

5.3.1. Ёмкостные акселерометры

Самым проверенным и надёжным методом преобразования перемещений в электрический сигнал является ёмкостной метод. Ёмкостной датчик ускорений состоит, по крайней мере, из двух пластин: стационарной, соединённой с корпусом, и свободно перемещающейся внутри корпуса датчика второй пластиной, к которой подсоединена инерционная масса. Вышеуказанные пластины формируют конденсатор, ёмкость которого зависит от расстояния между ними, а значит и от ускорения движения, испытываемого датчиком. Определяемое ёмкостным акселерометром максимальное перемещение редко превышает 20 мкм.

5.9. Ha рисунке изображён ёмкостной акселерометр, изготовленный с использованием методов микротехнологий. В кристалле кремния 1 вытравлен объём материала 2 таким образом, чтобы значительную инерционную массу 3 механически отделить частей акселерометра от других И соединение с ними лишь тонкими осуществить 4, которые играют роль перемычками упругих элементов. На малом расстоянии (~ 10 мкм) от Рис.



Рис. 5.9. Конструкция ёмкостного акселерометра

кристалла кремния, снизу и сверху, располагаются металлические электроды 5 и 6. Пространство между электродами и кремнием заполняет вязкая непроводящая жидкость, которая играет роль демпфера.

5.3.2. Пьезоэлектрические акселерометры

В пьезорезистивных акселерометрах чувствительным элементом является тензодатчик, который измеряет деформацию пьезорезистивных элементов,

поддерживающих инерционную массу в процессе измерения их сопротивлений, которые зависят от степени деформации. Данная деформация пропорциональна величине и скорости перемещения массы, а значит и ускорению. Эти устройства способны измерять ускорения в широком частотном диапазоне. Рамки применения данных приборов



Рисунок 5.10. Принцип пьезоэлектрического акселерометра

обусловлены перегрузками, которые могут быть критическими.

Пьезоэлектрический эффект, заключающийся в прямой трансформации механической энергии в электрическую в материалах, имеющих кристаллическую структуру с электрическими диполями, лежит в основе работы пьезоэлектрических акселерометров. Пьезоэлектрический сигнал в датчиках данного типа усиливается с помощью преобразователей заряд-напряжение или ток-напряжение для улучшения частотных характеристик. Данные датчики работают в широком температурном диапазоне до 260 0С и с высокой линейностью. Такие датчики работают в разном частотном диапазоне: при монтаже на печатную плату и в системах безопасности автомобиля - от 0 и до 5 Гц, для общего применения - от 0 и до 30 кГц.

Примером МЭМС, реализующих описанный выше функционал является ВМА455 акселерометр с цифровым интерфейсом, диапазоном измерения ускорения 0 до ±16g в трех плоскостях, производимый компанией Bosch Sensortec [79].

5.4. Гироскопы

Самым популярным навигационным датчиком является гироскоп, который является необходимым устройством для определения положения транспортных средств, когда геомагнитное поле либо отсутствует (как в космосе), либо сильно нарушено. Гироскоп в переводе - «хранитель направления», также как маятник в часах является «хранителем
времени». Работа гироскопов основана на законе сохранения угловых моментов: «В произвольной замкнутой системе (в которой отсутствуют внешние силы) сумма угловых моментов всех её частей относительно любой неподвижной точки пространства всегда остаётся постоянной».

5.4.1. Роторный гироскоп

Роторный гироскоп (рис. 5.11.) состоит из массивного диска (ротора), свободно поворачивающегося вокруг основной оси вращения, которая удерживается рамкой, способной вращаться относительно одной или двух осей.

Гироскопы имеют одну или две степени свободы в зависимости от количества осей вращения. Следует отметить, что: 1. Основная ось вращения свободного гироскопа не поменяет своё положение в пространстве, при отсутствии внешнего воздействия. 2. Крутящий момент гироскопа (его выходной сигнал) при соответствующем изготовлении пропорционален его угловой скорости вращения вокруг оси, перпендикулярной основной оси вращения. Свободно вращающийся диск всегда сохраняет своё осевое положение. При вращении платформы гироскопа вокруг входной оси у него возникает крутящий момент относительно перпендикулярной (выходной) оси, воздействующий на основную ось вращения, которая поворачиваться вокруг выходной оси. Называется это явление прецессией гироскопа и объясняется оно с помощью закона Ньютона для вращательного движения, который говорит о том, что производная во времени от углового момента количества движения относительно любой заданной оси равна сумме моментов всех сил механической системы, приложенных к данной оси. Следовательно, когда к входной оси

приложен момент T и скорость ω диска остаётся постоянной, изменить

угловой момент ротора можно только, повернув проекцию оси вращения относительно входной оси, тогда скорость движения оси вращения относительно выходной оси будет пропорциональна приложенному моменту:



Рисунок 5.11. Роторный гироскоп

$$T = I\omega\Omega, \tag{5.3}$$

где: Ω - угловая скорость вращения вокруг выходной оси, I - момент инерции ротора гироскопа относительно оси вращения. Для определения направления прецессии нужно руководствоваться следующим правилом: прецессия всегда имеет направление, при котором направления вращения ротора и приложенного механического момента совпадают.

Микрореализация роторного гироскопа с использованием кремниевой технологии показала ограниченность его использования в качестве датчика МЭМС - систем в связи с малой инерционной массой диска роторного гироскопа и необходимостью поддержки постоянной скорости вращения.

5.4.2. Гироскоп с вибрирующим кольцом

Более широкое распространение в МЭМС получил вибрационный гироскоп, модель CRM 100 с вибрирующим кремниевым кольцом, разработанный компанией Silicon Sensing (Англия).

Этот датчик измеряет угловую скорость с точностью до ± 1,0 рад/с и имеет два режима вывода: аналоговый сигнал напряжения, линейно-пропорциональный угловой скорости, и цифровой по протоколу SPI. Также, компанией разработчиком учитывались требования к низкой стоимости изделия и экономичному энергопотреблению. Он был разработан для систем навигации и наведения нового поколения.

Когда датчик подключён к системной плате, пользователь выбирает один из двух режимов вывода: аналоговый или цифровой.

Для того чтобы обеспечить надёжную работу и точное измерение скорости вращения даже в условиях сильной вибрации применяется технология сбалансированного вибрирующего кольца в качестве датчика угловой скорости, это является основной отличительной особенностью гироскопа.

Существует две основные конфигурации гироскопа, первая делает возможным определение угловой скорости по оси, параллельной плоскости системной платы, а вторая позволяет датчику измерять угловую скорость по оси, перпендикулярной к плоскости этой платы.

Комбинация этих двух конфигураций в одном устройстве гироскопов позволяет получить инерциальную систему, измеряющую угловую скорость по нескольким осям. Размеры датчиков в миллиметрах обеих конфигураций и оси измерения угловой скорости приведены на рисунок 5.12.



Рисунок 5.12. Размеры датчиков обеих конфигураций и оси измерения угловой скорости

Зачастую, датчики упаковываются и выпускаются в герметичном корпусе, этот датчик упакован в герметичный керамический корпус LCC, который в дальнейшем и устанавливается на плату.

Основные компоненты датчика показаны на рисунке 5.13. ниже. Ими являются:

- основание из кремния (Pedestal);
- кремниевый кольцевой МЭМС-сенсор (MEMS-ring);
- интегральная микросхема гироскопа (ASIC);
- корпус (Package Base);
- крышка (Lid);



Рисунок 5.13. Основные компоненты датчика

В герметичной части корпуса, заполненной азотом при пониженном давлении, размещены кремниевое основание, кремниевый кольцевой МЭМС-сенсор и микросхема. Герметичность корпуса даёт преимущества в чувствительности за счёт отсутствия влияния влажности среды на показания датчика.

Кремниевое МЭМС-кольцо изготавливают методом глубокого реактивного ионного травления объёмных кремниевых структур, его диаметр равен 3 мм, толщина – 65 мкм. Такой метод изготовления кольца позволяет получить хорошие геометрические свойства, необходимые для точного баланса и термической стабильности сенсорного кольца.

В центре кольца находится твёрдый концентратор диаметром 1 мм из которого исходят восемь пар симметричных спиц, поддерживающих это кольцо в свободностоящем состоянии.

Приведённые выше особенности обеспечивают стабильность работы датчика при вибрации, колебаниях температуры или ударе.

МЭМС-сенсор и ASIC соединены электрической цепью через золотые проводники. Выбор материала был сделан исходя из превосходной электро- и теплопроводности золота и малого количества интерметаллических фаз, образуемых при нагревании и влияющих на механические характеристики соединений. То, что ASIC и МЭМС-сенсор ещё и разделены физически, позволяет получить отличную электромагнитную совместимость и уменьшить шумовую нагрузку.

Корпус датчика изготовлен по технологии LCC - это многослойная оксидноалюминиевая конструкция с внутренними контактными площадками для соединения с

аналогичными интегральными внешними межсоединениями в крышке гироскопа и внешними контактными площадками, соединёнными через корпус с наружными контактами. Все внутренние и наружные контактные площадки покрыты слоем никеля и золота, нанесенных с помощью гальванизации.

Когда датчик начинает испытывать вращение, то совершающий колебания кольцевой резонатор (то есть, линейное движение от одной крайней точки к другой) должен испытывать силу Кориолиса. Воздействие этой силы является причиной радиального движения по периметру кольца, т. е. отклоняясь, кольцо показывает величину и направление угловой скорости. Сила Кореолеса образуется потом, что при нахождении в неинерциальной системе отчета для совершения прямолинейного движения нужно компенсировать внешние силы, т.е. в уравнениях движения должна учитываться сила инерции. Эта сила направленна вправо от направления движения тела, при вращении датчика против часовой стрелки, и влево - при вращении по часовой стрелке. По величине возникающего ускорения можно определить скорость движения, а по направлению ускорения – направление вращения.

По периметру кольца располагаются восемь приводов-преобразователей, из которых часть является приводами первичного движения, позволяющих возбуждать и контролировать первичную рабочую амплитуду и частоту вибрации (22 кГц). Вторичные снимающие преобразователи распознают радиальное движение, величина которого пропорциональна угловой скорости вращения.

Когда гироскоп подвергается воздействию угловой скорости, то на кольцо действуют силы Кориолиса по касательной, к периметру кольца относительно главных осей. Эти силы приводят к деформации кольца, что вызывает радиальное движение вторичных снимающих преобразователей. Данное движение, определяемое на вторичных снимающих преобразователях, пропорционально прилагаемой угловой скорости.



Рисунок 5.14. Действующие на кольцо силы Кориолиса

На рисунке 5.14. ниже показана блок-диаграмма функционирования и внешний вид МЭМС-гироскопа.



Рисунок 5.15. Блок-диаграмма и внешний вид МЭМС-гироскопа.

Датчики такого типа характеризуются миниатюрными габаритами (6,5 x 1,2 мм) при сверхнизком потреблении энергии (12 мВт). Так же, они обладают широким диапазоном измерения (до 900 градусов/сек), сверхмалым весом 0,08 грамм и высокой стабильностью работы. Такая конструкция гироскопов хороша для измерения скоростей вращения

объекта по трём осям в навигаторах; в системах отслеживания по трассе на сельскохозяйственной технике; для стабилизации антенн; в промышленной аппаратуре и робототехнике и других сферах. Так же, гироскопы данного вида оптимально подходят для использования в условиях, когда есть ограничения по габаритам, весу и стоимости изделия.

5.5. Исполнительные механизмы - актуаторы

В исполнительных механизмах (актуаторах) на основе МЭМС технологий обычно задействуются следующие компоненты:

1. Элементы на основе обратного пьезолектрического эффекта – можно получать большие величины силы, но величина смещения мала. Требует высоких электрических напряжений;

2. Биморфные элементы на основе двух материалов с разным температурным коэффициентом расширения. Можно получать большие величины силы и смещения, но процесс происходят медленно и им сложно управлять;

3. Электростатические элементы, работающие за счет электростатического притяжения и отталкивания между обкладками конденсатора. Небольшие величины силы и смещения, легко изготовить, но требуются большие значения электрического напряжения;

4. Элементы на основе магнитных катушек. Слабые величины силы, сложно изготовить.

Пример <u>пьезокерамического</u> исполнительного устройства, применяемого в сканерах атомносиловых микроскопов, приведен на рисунке 5.16. Пьезоэлемент позволяет за счет приложения к нему напряжения изменять положение иглы кантилевера и тем самым сканировать ей исследуемую область.



Рисунок 5.16. Пьезакерамический элемент сканера атомно-силового микроскопа.

5.5.1. Биморфные микрозахваты

<u>Биморфные элементы</u> часто используются в микрозахватах для фиксации микрокомпонентов, в зондовых станциях и автоматизированных линиях сборки гетерогенных МЭМС устройств. Принцип действия связан с нагревом (чаще всего электрическим током) двухслойной структуры, которая вследствие разных температурных коэффицентов расширения материалов деформируется тем или иным образом (рисунок 5.17.). Если сделать рядом два противоположно изгибающихся биморфных элемента (или просто добавить один неподвижный), то получим устройство простейшего микрозахвата. Нагрев биморфных элементов чаще всего осуществляется вследствие джоулева разогрева с использованием созданных рядом с ними резисторов. Таким образом, подавая напряжение на резистор, биморф приводится в действие, а снимая напряжение (вследствие охлаждения через подложку) – деактивируем. Подробное описание физических процессов в биоморфных элементах приведено в разделе 5.1.3.



Рисунок 5.17. Биморфный (Si - Al) элемент. Стрелкой показано направление изгиба при его нагреве.

5.5.2. Линейные и круговые движители

Электростатические актуаторы работают на основе силы кулоновского отталкивания или притяжения. Создавая на обкладках импровизированных конденсаторов заряд одного знака, мы вызовем взаимное отталкивание элементов конструкции, разноименные заряды вызовут взаимное притяжение. Таким образом, можно добиться как эффективного линейного, так и углового движения.

Электростатический актуатор содержит подвижный и неподвижный электроды (Рис. 5.18). В качестве подвижного электрода выступают упругие пластины и мембраны.

Принцип действия данных актуаторов основан на возникновении электростатической силы между подвижным и неподвижным электродами. При подаче напряжения на неподвижный электрод относительно подвижного, на последний начинает действовать электростатическая сила, определяемая выражением

$$F_{\Im\pi}=\frac{c}{d}\int_0^U U\cdot dU=\frac{CU^2}{2d},$$

где d – расстояние между подвижным и неподвижным электродами; C – емкость, создаваемая этими электродами.



Рис. 5.18. Электростатический актуатор

При подаче напряжения U между электродами возникает электростатическое взаимодействие, и подвижный электрод притягивается к неподвижному. По мере отклонения подвижного электрода от первоначального положения расстояние между электродами d будет уменьшаться, что приводит к увеличению электростатической силы F_{эл}. Следовательно, при расчете электростатической силы, действующей на подвижный электрод относительно неподвижного, необходимо учитывать уже совершенное отклонение, а также жесткость упругих пластин. [15]

$$F_{\Im \Pi} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{(d-y)^2} U^2,$$

где у – функция от длины электрода.

Перпендикулярное движение	Боковое движение
$C = \frac{\varepsilon_0 A}{x}$	$C = \frac{\varepsilon_0 yz}{d}$
$F_x = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 A}{x^2} U^2$	$F_{y} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{0} yz}{d} U^{2}$
Площадь: S + Q \downarrow +	$+ \bigcirc F_{y} + \bigcirc + \bigcirc f_{y} $

Существует несколько вариантов реализации электростатических актуаторов на основе плоскопараллельных конденсаторов (рис. 5.19.).

5.19. Варианты реализации электростатических актуаторов на основе плоскопараллельных конденсаторов [18]

Для генерации больших сил, которые будут совершать полезную работу такого устройства, необходимо, чтобы при изменении расстояния сильно изменялись емкости. Именно так и работают электростатические гребневые микродвигатели (рис. 5.20).

В качестве линейного актуатора часто применяется структура, получившая название «гребенка» (comb drive). Она представляет собой структуру, представленную на рисунке 5.20. (а) и состоит из двух обкладок сложной формы. Зубцы каждой из них помещаются в выемки другой. При приложении напряжения одного знака зубцы начинают выходить из выемок, отодвигая обкладки друг от друга, а при приложении напряжений разных знаков – обкладки наоборот приближаются друг к другу. Кроме того форма "расчески" избавляет такой актуатор от возможности смещения в направлении, перпендикулярном зубцам. После приложения напряжения появляется сила взаимодействия между штырями, и они начинают двигаться. Увеличение емкости пропорционально количеству штырей, поэтому для генерации больших сил, требуется большое количество штырей. Гребневые микродвигатели особенно распространены среди устройств, полученных поверхностной микрообработкой.

Двигатели качения названы так по действию раскачивания, положенному в основу их работы. На рисунке 5.20.(b) показан исполнительный механизм, обеспечивающий угловое движение. На элементах внешнего статора циклически меняется положительное и отрицательное относительно подвижного ротора напряжение, расположенные под диском ротора электроды последовательно включаются и выключаются. При этом напряжением обкладках статора оно чередуется. Диск последовательно притягивается к каждому электроду, и его край контактирует с диэлектриком, расположенным над электродами. Расположение обкладок статора и ротора сделано таким образом, чтобы эти циклические смены полярности вынуждали вращаться ротор. Диск медленно вращается по кругу, делая один оборот вокруг своей оси.



Рис. 5.20. Электростатические актуаторы: линейного движения (а), кругового движения (б)

Исполнительные механизмы линейного и кругового движения используются в микрозахватах, микродвигателях, управляемых зеркалах, варакторах, высокочастотных ключах и аттенюаторах.

5.6. Датчики температуры

Принцип работы этих датчиков основан на использовании физических закономерностей, определяемых тепловыми процессами. К этим датчикам относятся датчики термомеханического, терморезистивного и термоэлектрического типов, некоторые примеры этих датчиков будут рассмотрены ниже.

5.6.1. Датчики на основе термоэлектричества

Термоэлектрическими явлениями называется совокупность физических явлений, обусловленных взаимосвязью между электрическими и тепловыми в полупроводниках и металлах. К термоэлектрическим явлениям относятся: эффект Зеебека; эффект Пельтье; эффект Томсона.

Эффект Зеебека лежит в основе работы термоэлектрического генератора (на элементах Пельтье). Термоэлектрический генератор на основе этого эффекта состоит из

блока термопар, электрически соединённых между собой, нагревателя, обеспечивающего приток тепла к их горячим спаям, и системы охлаждения их холодных слоёв.

Эффект состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из различных материалов p- и п-полупроводников с различными коэффициентами Зеебека, возникает термо- ЭДС, если места контактов находятся при разных температурах. Если цепь состоит только из двух различных проводников, то такая цепь называется термоэлементом или термопарой. Величина возникающей термо-ЭДС зависит от материала проводников и температур горячего T_1 и холодного T_2 контактов. Для небольшого интервала температур термо-ЭДС Е принимают пропорциональной разности температур:

$$E = \alpha_{12} (T_2 - T_1), \tag{5.5}$$

где *а*₁₂ - коэффициент термо-ЭДС или термоэлектрическая способность пары.

Термоэлектрические микрогенераторы могут послужить альтернативой обычным и аккумуляторным батареям.

Некоторые преимущества:

- Гораздо выше отношения энергия к массе и энергии к объёму батареи;

- По сравнению с аккумуляторной батарейкой, перезаряжает гораздо быстрее;

- По сравнению с одноразовыми батареями, гораздо ниже стоимости за ватт/час;

– Практически бесконечный срок годности.

Недостатки:

- Недостаточно быстрое время включения и отключения;

- Нуждается в электрической энергии для собственной работы.

С учётом всего вышеперечисленного, наилучшим решением будет использовать комбинацию обычной батареи и микрогенератора.

Другим примером использования термопар в микро- и нанотехнологиях является зонды на основе термопар для сканирующей тепловой микроскопии, с помощью которой можно получить температурные карты (картографии), топографическое изображение и съёмку поверхности с высоким разрешением. Ещё зонды на основе термопар используются в портативных микропроцессорных цифровых измерителях температуры.

Другим термоэлектрическим явлениям является эффект Пельтье. Это явление, при котором при прохождении электрического тока в месте контакта двух разнородных проводников происходит выделение или поглощение тепла. Величина выделяемого тепла или холода зависят от вида контактирующих полупроводников, направления и силы протекающего электрического тока:

$$Q = (\Pi_1 - \Pi_2) \cdot I \cdot t, \tag{5.6}$$

где Q — количество поглощённого или выделенного тепла; I — сила тока; t — время протекания тока;П— коэффициент Пельтье, который связан с коэффициентом термо-ЭДС.



Рисунок 5.21. Элемент Пельтье на основе p-п перехода.

На основе этого эффекта создаются элементы Пельтье, рисунок 5.21., показан выше. Элементы Пельтье, могут использоваться в системах охлаждения для электронных устройств. Преимуществами этих элементов являются малые габариты, отсутствие движущихся деталей, возможность каскадного соединения для получения больших перепадов температур. На практики для увеличения эффекта, отдельные термопары (спаи двух различных материалов) собирают в группы, состоящие из десятков и сотен элементов. Кроме этого, эффект Пельтье обратим, если поменять полярность тока через модуль, охлаждение поменяется на нагревание. Используя это свойство на элементах Пельтье, модулях, реализуются системы точного поддержания температуры – термостаты.

Следующий эффект, относящийся к термоэлектрическим эффектам, является эффект Томсона, заключающийся в следующем: при пропускании постоянного электрического тока через неравномерно нагретый полупроводник (или проводник), в нем, помимо Джоулева тепла, в зависимости от направления тока будет выделяться или поглощаться дополнительное количество тепла (теплота Томсона).

В общем случае, количество тепла, выделяемое в объёме dV, определяется соотношением:

$$dQ^{T} = -\tau(\nabla Tj)dtdV, \qquad (5.7)$$

где τ – коэффициент Томсона; *j* – плотность тока; *t* – время за которое выделилось тепло; ∇T - градиент температуры вдоль образца; Коэффициент пропорциональности — коэффициент Томсона, — зависит от природы материала. Явление Томсона проявляется во всем объёме термоэлектрического вещества.

5.6.2. Резистивные датчики

К электрикотемпературным датчикам, также использующих термопары, относятся датчики, использующие терморезисторы или термистеры. Термистер - это полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от его температуры. Невысокая стоимость, малые размеры и вес, высокая чувствительность, которая позволяет создавать датчики с малым временем отклика, является основными достоинствами использования термисторов. Кремниевые датчики температуры используют зависимость сопротивления полупроводникового кремния от температуры. Диапазон измеряемых температур -50...+150 °C. Применяются в основном для измерения температуры внутри электронных приборов.

Термисторы делятся на два вида, использующих отрицательный температурный коэффициент когда электрическое сопротивление падает при повышении температуры и использующих положительный температурный коэффициент – когда электрическое сопротивление растёт с повышением температуры. Термисторы не имеют определённой температурной характеристики. Она зависит от конкретной модели датчика и области его применения.

5.7. Оптические МЭМС

Оптические МЭМС, часто называемые <u>микрооптоэлектромеханическими системами</u> (МОЭМС), вводят дополнительную оптическую компоненту в МЭМС систему [43]. В числе статичных элементов МОЭМС можно выделить всевозможные оптические линзы, зеркала, призмы и светофильтры. Некоторые из них представлены на рисунке 5.22. Большая часть из них может быть изготовлена с помощью объемной микрообработки. На основе этих элементов могут быть получены оптические приборы (например, интерферометр).



Рисунок 5.22. Элементы МОЭМС.

Помимо статических элементов, оптические компоненты МОЭМС систем могут быть использованы совместно с устройствами линейного и углового перемещений для получения возможности контролировать направление распространения оптического сигнала.

5.7.1. Активные зеркала

Важным элементов МОЭМС является активные зеркала, используемые, например, в технологии DLP (Digital Light Processing) – одной из первых технологий показа Основной элемент DLP-проектора - МЭМС зеркала, изображения в проекторах. расположенные в виде матрицы. Каждое такое зеркало представляет собой один пиксель в проецируемом изображении. Эти зеркала могут быстро позиционироваться, чтобы отражать свет либо на линзу, либо на радиатор (называемый также light dump, поглотитель света). Быстрый поворот зеркал (по существу переключение между состояниями "включено" и "выключено") позволяет DLP варьировать интенсивность света, которые проходит через линзу, создавая градации серого в дополнение к белому (зеркало в позиции "включено") и чёрному (зеркало "выключено"). Для отображения цветного изображения используется быстровращающийся диск с тремя светофильтрами (RGB), синхронизованный с микрозеркальной матрицей. Поворот микрозеркала осуществляется с помощью электростатических актуаторов, которые или наклоняют зеркало в сторону объектива, "включая" его, или отклоняют в сторону радиатора (рисунок 5.23.).



Рисунок 5.23. Микрозеркала.

Пример реализации компанией Texas Instruments оптической МЭМС - DLP3000, цифровое микрозеркальное устройство с пошаговой модуляцией света [78]. Совместно с микроконтроллером DLPC3000 это микрозеркальное устройство реализовано в чипсете DLP^R 0.3 WVGA Series 220 DMD, схема которого представлена на рисунке 5.23.1.



Рисунок 5.23.1. Схема чипсета DLP^R 0.3 WVGA

К оптическим МЭМС можно также отнести микроболометрические матрицы – датчики инфракрасного излучения. Инфракрасное излучение пройдя сквозь систему линз

попадает на поглощающий элемент, нагревая его. Рядом с этим элементов находится терморезистивная пленка (например, диоксид ванадия), меняющее свое сопротивление от нагрева. Так как температурные коэффициент изменения сопротивления при комнатной температуре невелик (порядка 2% на градус для диоксида ванадия) и избыточное тепло, полученное из оптической системы, быстро уходит в подложку, то, чтобы повысить чувствительность сенсорного элемента, необходимо снизить его теплопроводность и теплоемкость. Это делается за счет подвешивания элементов матрицы на мостовые структуры. Такие структуры изготавливаются путем поверхностной микрообработки с использованием жертвенного слоя из полиамида. В качестве основы используется нитрид кремния, обладающий хорошими механическими свойствами.

5.7.2. Лазерные гироскопы

Принцип работы оптических (кольцевых лазерных) гироскопов основывается на эффекте Саньяка. Суть данного эффекта заключается в том, что два лазерных луча противоположного направления внутри вращающегося со скоростью Ω оптического кольца радиусом R проходят разные пути, что бы сделать один оборот вокруг кольца (рис. 5.24). Разница между путями Δl составляет:

$$\frac{4\pi\Omega R^2}{n\cdot c} = \Delta l,\tag{5.4}$$

где n – коэффициент преломления оптической среды, с – скорость света. Также угловую скорость можно записать через функцию частотного состояния системы (ПСИ) и длину волны (лямбда).

Принцип работы оптических (кольцевых лазерных) гироскопов основывается на эффекте Саньяка. Суть данного эффекта заключается в том, что два лазерных луча противоположного направления внутри вращающегося со скоростью ω оптического кольца радиусом R проходят разные пути, что бы сделать один оборот вокруг кольца (рис. 5.25.).



Рис. 5.25. Иллюстрация эффекта Саньяка

$$t = \frac{L}{v} = \frac{2\pi R}{c} n;$$

Пусть t – время, за которое свет делает оборот внутри кольца, в кольце укладывается целое число длин волн λ , $L = 2\pi R = k\lambda$;

Если ω – циклическая частота вращения, тогда для скорости светового луча v_1 в направлении вращения платформы будет $v_1 = v_0 + \omega R = c/n + \omega R$ – увеличение скорости. Для скорости светового луча v_2 в направлении противоположном вращения $v_2 = v_0 - \omega R = c/n - \omega R$ будет уменьшение скорости.

Время, через которое лучи вернутся к точке входа

$$t_1 = \frac{L}{v_1} = \frac{2\pi R}{c/n + \omega R}; \quad t_2 = \frac{L}{v_2} = \frac{2\pi R}{c/n - \omega R}, \text{ больше, чем } t_1.$$
Запоздание $\Delta t = t_2 - t_1 = 2\pi R \left(\frac{1}{c/n - \omega R} - \frac{1}{c/n + \omega R}\right);$

За это время Δt световой луч пройдет расстояние ΔL , равное

$$\Delta L = v_0 \cdot \Delta t = 4\pi\omega R^2 \frac{v_0 c}{c^2/n^2 - \omega^2 R^2},$$

Поскольку скорость света в оптоволокие существенно больше линейной скорости вращения $v_0 \gg \omega R$, то

$$\Delta L = \frac{4\pi\omega R^2}{c/n},\tag{5.5.}$$

Так как Δt , $\Delta L > 0$ – в области ввода когерентных лазерных пучков будет наблюдаться сдвиг фаз встретившихся световых лучей, вносимый вращением платформы.

Поскольку в кольце укладывается целое число длин волн λ ,

$$L = k\lambda = k \cdot v \cdot T = k \cdot \frac{c}{n} \cdot \frac{1}{v}$$
, k – целое,

Тогда
$$dL = kd\lambda = -\frac{kc}{\omega} \cdot \frac{dv}{v}$$
, или
 $\frac{dL}{L} = \frac{d\lambda}{\lambda} = -\frac{dv}{v}$ (5.6.)

Уравнение (5.6.) показывает, что при распространении света в оптоволокне, расположенном на вращающейся платформе, происходит синфазное уменьшения длины полны λ и рост частоты v.

Это же уравнение для ΔL можно получить и другим методом, с позиции внешнего наблюдателя. Двум лучам, перемещающимся в противоположных направлениях, нужно пройти пройти разный путь до места встречи. Для движущегося против направления вращения луча путь L₁, а для луча движущегося по направлению вращения путь L₂. При этом

$$L_1 = L_0 + \omega R \cdot \Delta t; \quad L_2 = L_0 - \omega R \cdot \Delta t;$$

Время полного оборота луча t, разность длины хода ΔL

$$t = \frac{2\pi R}{hc}; \quad \Delta L = 2\omega R \cdot \Delta t;$$

Поскольку скорость света существенно больше линейной скорости вращения $v = nc; nc \ll \omega R; \Delta t \cong t$,

Получаем

$$\Delta L = 2\omega R \cdot \frac{2\pi R}{c/n} = \frac{4\pi\omega R^2}{c/n}.$$
 (5.7.)

 ΔL – это разность хода 2-х когерентных лучей в месте встречи.

В лазерных гироскопах для точного измерения угловой скорости ω путём корректного определения ΔL, или сдвига фаз, применяют три типа устройств: оптические резонаторы, интерферометры без обратной связи и интерферометры с обратной связью.

Гироскоп с оптоволоконной катушкой (рис. 5.2.5 б) состоит из источника света и детектора, связанных оптоволоконными световодами. Между детектором и вторым разветвителем размещается поляризатор. Он служит для обеспечения того, чтобы оба встречно направленных луча проходили одинаковый маршрут вдоль катушки [13]. Оба луча смешиваются и направляются на детектор, который регистрирует косинусоидальные изменения интенсивности излучения, вызванные меняющимся сдвигом фаз между лучами, возникающим из-за вращения катушки.



Рис. 5.26. Аналоговый гироскоп на основе оптоволоконной катушки (14)

Такие оптические гироскопы сравнительно недороги, имеют небольшие размеры и позволяют реализовывать датчики вращения с динамическим диапазоном до 10000. Оптические гироскопы используются для измерения отклонений от заданного направления движения, угла наклона, в системах стабилизации углового положения и также в системах навигации. Основным достоинством таких датчиков является их способность работать в суровых условиях окружающей среды, где не могут работать механические гироскопы.

6. Биомедицинские (микрофлюидные) МЭМС

Другой областью применения МЭМС-структур, связанной с электрохимическими и биомедицинскими измерениями, является микрофлюидика (или микрогидродинамика). В этой области исследуется поведение потоков жидкостей малых объемов в целях получения существенной экономии реагентов и автоматизации процессов определения параметров биохимических реакций [13]. Эта область науки возникла в начале 1980-х годов при исследовании цветной печати струйными принтерами, проведения химического анализа биоматериалов (в частности анализа ДНК) и исследования микродвигателей.

Для идентификации этого класса микросистем используют термин микрофлюидные (МФ) микроэлектромеханические системы, частью которых являются микроструйные МФ МЭМС и микродозаторы, биомедицинские (биоМЭМС) (англ. biomedical microelectromechanical systems).

6.1. Биохимические сенсоры

Отличительной особенностью биомедицинских диагностических и лечебных устройств с интегрированными микроэлектронными и микромеханическими компонентами, использующих технологии микрофлуидики и молекулярного узнавания, имеющих размер 20-1000 микрон, является использование вместо физических датчиков химических и биологических датчиков (сенсоров).

Химические сенсоры служат для качественного и количественного определения химических веществ. В зависимости от концентрации последних в сенсоре возникает химический или физический отклик разной величины;

Биосенсоры – отличаются от химических сенсоров лишь тем, что концентрация определяемого вещества измеряется в них с помощью материала биологической природы.

Сенсоры должны быть соединены с каким-либо устройством (трансдьюсером), получающим получить наблюдаемый сигнал. Важно отметить, что с помощью химических сенсоров можно определять вещества биологической природы, и наоборот. Определяемое сенсором вещество называют *субстратом*. Общее устройство сенсора схематически показано на рис 6.1.



Рис. 6.1. Схема биохимического сенсора [16]

Существуют различные способы, с помощью которых сенсор может распознавать определяемое вещество. В идеальном случае распознавание должно быть специфичным, то есть сенсор должен узнавать только один субстрат. Однако чаще можно говорить лишь о селективном распознавании. Это значит, что сенсор откликается не только на один субстрат, но и на посторонние вещества, хотя и в меньшей степени.

Распознающие элементы, отвечающие за распознавание ионов; молекул; биологических соединений, как правило, используют различные методики.

Для распознавания ионов используются ионоселективные электроды (ИСЭ). Их действие основано на возникновении ЭДС в концентрационной ячейке. ИСЭ представляют собой потенциометрические устройства, в которых логарифм возникающей ЭДС пропорционален концентрации субстрата. Селективность ИСЭ обеспечивается за счет мембраны, разделяющей раствор субстрата от раствора сравнения, который находится внутри электрода.

Распознавание молекул проводится химическим или спектроскопическими методами.

Распознавание биологических соединений проводится путем использования ферментов, антител, нуклеиновых кислот и рецепторов.

6.2. Трансдьютеры

Задача трансдьютера – преобразовать сигнал от распознающего элемента в электрический (иногда – в оптический, акустический) сигнал, который затем поступает в устройство для обработки информации. В биоМЭМС наиболее распространенными являются электрохимические трансдьютеры.

В зависимости от способа измерения сигнала электрохимические трансдьютеры могут быть трех типов [16] :

a) *потенциометрические*, в которых измеряется потенциал электрохимической ячейки при нулевом токе;

б) вольтамперометрические (или амперометрические), в которых измеряется ток окисления или восстановления электроактивных частиц, возникающий при наложении заданной разности потенциалов между электродами;

в) *кондуктометрические*, в которых измеряется электропроводность ячейки с помощью моста проводимостей.

Одним из популярных трансдьютеров являются химически чувствительные полевые транзисторы (ХЧПТ), схема которых показана на рис. 6.2.



Рис. 6.2. Схема полевого транзистора, в затворе которого имеется имеется «субстратчувствительная мембрана» (ХЧПТ).

1 – кремниевая подложка; 2 – диэлектрик; 3 – субстрат - чувствительная мембрана;

4,5– сток; исток; 6– изолирующая заливка; 7– раствор субстрата; 8– электрод сравнения

В этой конструкции субстрат-чувствительная мембрана (3) находятся в контакте с раствором определяемого вещества (7). Цепь замыкает электрод сравнения (8), который включен последовательно с источником напряжения смещения V_G.

Таким образом, V_G уменьшается на величину мембранного потенциала и потенциала раствора, меняется концентрация свободных носителей в инверсионном канале и изменяет ток стока. Ток стока измеряется напрямую при постоянном V_G с использованием схемы, показанной на рис. 6.3.

Помимо ХЧПТ различают также полевые транзисторы с ионоселективными электродами (ИСПТ) и ферментные полевые транзисторы (ФПТ), в затворе которых помещена ферментная система.



Рис. 6.3. Электрическая схема для измерения тока стока I_D при постоянном затворном напряжении V_G для ХЧПТ A – операционный усилитель; $R_1 = 1 \kappa O_M$; $R_2 = 470 O_M$. [15]

6.3. Особенности реализации

В биоМЭМС присутствовали жидкостные микроканалы, перемежающиеся друг с другом в реакторных камерах, где осуществлялась химическая реакция. Ход реакции определялся с помощью визуального осмотра или исследования продуктов реакции с помощью встроенных в микроканал датчиков. Типичными объемами жидкостей для микровлюидных приложений являются микролитры. В большинстве применений жидкость пассивно доставляется до реакторных камер под действием капиллярных сил, однако в некоторых применениях, где требуется точный контроль скорости распространения жидкости вдоль канала, используются микронасосы.

Микронасосы могут быть основаны на механическом движении мембраны, входящий в их состав, или на эффекте электроосмосе – движении жидкости при приложении к ней электрического поля. Для дополнительного управления потоком в микроканалы могут встраиваться электростатические и электромагнитные клапаны. Одним из отличий микропотоков является их высокая ламинарность, что связано с увеличением влияния сил поверхностного натяжения (и уменьшением числа Рейнольдса).



Комплексные системы, состоящие из большого числа микроканалов и оснащенные большим количеством специализированных датчиков,

)6

анализирующих продукты реакции, часто называют лабораторией-на-чипе (lab-on-chip).

Большинство микрофлюидных устройств, исследующих биохимические параметры человеческих жидкостей, являются одноразовыми сменными модулями и входят в состав более сложных систем. Одно из вариантов устройства с одной реакторной камерой и несколькими микроканалами представлено на рисунке 6.4.



Рисунок 6.4. Микроканальное МЭМС-устройство [65].

Имплантируемые биоМЭМС предназначены для контроля за параметрами внутренней среды организма с помощью биосенсоров и могут дозированно высвобождать лекарственные вещества или гормоны, например инсулин, при повышении содержания глюкозы в крови. Имплантируемые биоМЭМС оснащаются системой беспроводной связи с внешними устройствами. Разработаны устройства с интегрированной оптической системой (например, видео таблетка (video pill)), способные передавать изображения желудочно-кишечного тракта в реальном времени, делать биопсию ткани и высвобождать лекарственные вещества в ответ на радиосигнал. [32]

7. Методы анализа электромеханических устройств

7.1. Метод аналогий

Конструкция МЭМС обуславливает взаимодействие механических элементов (пластин, труб, мембран и т.п., которые обладают массой, гибкостью, потерями энергии на трение) и электрических элементов (катушек, конденсаторов, трансформаторов, резисторов). [66] Для анализа этого взаимодействия составляется и решается система уравнений, содержащая уравнения механики и электродинамики.

Для упрощения решения таких задач был разработан метод электромеханических аналогий, в котором происходит сопоставление некоторых механических и электрических величин. В свою очередь, математический аппарат для анализа электрических цепей хорошо разработан в радиотехнике. [64]

Прямым методом аналогий является представление механической системы в виде электрической цепи с последовательным соединением элементов. Этот метод аналогий -«прямая аналогия» хорошо подходит для систем, в которых проводится аналогия между силой и электрическим напряжением. Например, в пьезоэлектрических системах, генерируемое напряжение или заряд прямо пропорционально приложенной силе. Но такая аналогия имеет свои ограничения, в связи «переводом» механически параллельных конфигураций в соответствующие электрические - последовательные цепи.

Существует также другой метод аналогий – «инверсная аналогия». В этом методе механическую систему представляют в виде электрической цепи, где элементы соединены параллельно. Этот тип аналогии также имеет свой недостаток, а именно с ростом частоты увеличивается эффект влияния индуктивности и массы, одновременно ёмкости и упругости уменьшаются, т.е. частотные характеристики элементов цепей обратны.

Несмотря на то, что «прямая» аналогия нарушает конфигурацию эквивалентных цепей, и одновременно с этим «инверсная» аналогия нарушает закономерности относительно поведения системы при изменении частоты, метод аналогий остаётся эффективным методом анализа МЭМС устройств. Для согласования соотношений между механическими и электрическими аналогиями используется коэффициент электромеханической связи k_e , который является числовым показателем эффективности преобразования между электрической и механической энергиями. [64]

Существуют несколько подсистем для установки аналогий между разными энергетическими доменами. В одной из них тип потенциал (сила), принимается за электрическое напряжение V, а за тип потока принимается электрический ток. Существует и другие подсистемы, например тепловая, где за силу принимается -

изменение температуры ΔT , а за поток - поток тепла. Типы подсистем, фазовые переменные, параметры элементов для построения аналогий между разными подсистемами представлены ниже в таблице 7.1.

	Фазовые переменные		Параметры элементов		
Подсистема	Тип потенциал, V	Тип потока, і	С	L	R
Электрическая	Электрическое напряжение	Электрический ток	Электрическая ёмкость	Электрическая индуктивность	Электрическое сопротивление
Механическая поступательная	Сила	Скорость	Масса	Гибкость	Механическое сопротивление
Механическая вращательная	Момент силы	Угловая скорость	Момент инерции	Вращательная гибкость	Вращательное сопротивление
Тепловая	Изменение температуры	Тепловой поток	Теплоёмкость	-	Тепловое сопротивление

Таблица 7.1. Виды подсистем, соответствующие им фазовые переменные и параметры элементов.

В таблице 7.2., ниже представлено сопоставление механических величин с аналогичными им электрическими величинами для метода аналогий.

Механические величины	Электрические величины	
Сила - F	Напряжение - V	
Скорость - и	Ток - І	
Перемещение - х	Заряд - q	
Количество движения (импульс) - р	Магнитный поток - Ф	
Вязкое трение - Р	Сопротивление - R	
Macca - m	Индуктивность - L	
Упругость, жёсткость пружины - k	Ёмкость - С	

Таблица 7.2. Сопоставление механических величин с аналогичными им электрическими величинами для метода аналогий

Детализация метода аналогий для пружинного маятника и колебательного контура представлена в таблице 7.3.:

Пружинный маятник	Колебательный контур		
х - смещение	<i>q</i> - заряд		
$v = \dot{x}$ - скорость	$i = \dot{q}$ - сила тока		
$a = \ddot{x}$ - ускорение	$\frac{\partial i}{\partial t} = \ddot{q}$		
т - масса	<i>L</i> — индуктивность		
F— сила	V - ЭДС		
F = ma -	$V = L \frac{\partial i}{\partial t}$ - ЭДС		
Сила, характеризующая	характеризующая		
внешнее воздействие на	внешнее воздействие на		
систему	систему		
F = kx	$V = \frac{Q}{C}$		
k	$\frac{1}{C}$		
$\frac{kx^2}{2}$ – Потенциальная	$\frac{q}{2C}$ – энергия заряженного		
энергия	конденсата		
$\frac{mv^2}{2}$ – Кинетическая	$\frac{Li^2}{2}$ — энергия		
энергия	индуктивности		

Таблица 7.3. Суммирующая таблица для пружинного маятника и колебательного контура

Так как прямая и обратная аналогии имеют свои недостатки. Для некоторых устройств МЭМС, имеющих сложное строение, при построении электрического эквивалента используются специальные правила. Эти правила специфичны для каждой подсистемы отдельно.

При построении эквивалентной электрической цепи для механической системы надо использовать следующее правило: те элементы механической системы, которые делят смещение, располагаются последовательно, а те элементы, которые делят силу – параллельно. [64]

На рисунке 7.1. в качестве примера показана механическая система «пружина - демпфер – масса» и её эквивалентная электрическая схема.



Рис. 7.1. а) система «пружина - демпфер – масса» b) эквивалентная электрическая схема.

Используя второй закон Ньютона можно расписать силы системы :

$$-F_{\rm BHemss} + F_k + F_m + F_b = 0 (7.1)$$

Можно записать дифференциальное уравнение этой системы:

$$m_x \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k_x x = F_{\text{внешняя}} = m a_{\text{внешняя}}$$
(7.2)

и по аналогии написать уравнение для электрического контура:

$$L\frac{d^{2}q}{dt^{2}} + R\frac{dq}{dt} + \frac{1}{c}q = U(t).$$
(7.3)

При сопоставлении уравнений (2) и (3) видно, что эти уравнения, отличаются только обозначениями. Если знать решение одного из этих уравнений, то можно написать решение другого, просто изменив обозначения на эквивалентные в соответствии с таблицей 3., провести дальнейший анализ или найти желаемые величины. Также можно найти передаточную функцию, которая является одним из способов математического описания динамической системы.

Ниже рисунок 7.2., 7.3. представлен пример другой механической системы и соответствующей ей эквивалентной электрической схемы.





Рисунок 7.3. Эквивалентная электрическая схема

Расписываем систему уравнений:

Для
$$m_1: m_2 \ddot{x}_2 = F - k_2 (x_2 - x_1)$$
 (7.4)

Для
$$m_2: m_1 \ddot{x}_1 = k_2 (x_2 - x_1) - k_1 (x_1)$$
 (7.5)

7.2. Электростатический датчик на основе конденсатора и пружины.

Датчики – энергопреобразующие устройства. По определению, датчики взаимодействуют с двумя разными энергетическими подсистемами, всегда работают по крайней мере два энергетических домена. При их анализе используется метод, в котором для корректного моделирования посредством мультипортового элемента происходит соединение входов и выходов для разных типов энергий.

Рассмотрим, электростатический привод (датчик), построенный на основе конденсатора, к которому между подвижной пластиной (обкладкой) и опорой добавлена пружина. Конструктивно это означает, что если эта подвижная пластина перемещается вниз из положения покоя, то пружина создаёт силу противоположную ей по направлению, направленную вверх. Мы предполагаем, что в состоянии равновесия, когда сила от пружины равна нулю и заряд конденсатора равен нулю - расстояние между обкладками будет g_0 . На рисунке 7.4, ниже показан конденсатор с добавленной пружиной и эквивалентная схема, включающая в себя мультипортовый элемент, соединяющими и преобразовывающими механическую часть и электрической. Порты этого элемента изображают входы потоков от разных подсистем- электрической и механической. [64]



Рисунок 7.4.. Механическая и электрическая схемы базового электростатического сенсора

Если конденсатор заряжен, то между его обкладками существует сила, притягивающая верхнюю, незафиксированную обкладку конденсатора, тем самым провоцирующая разжимание пружины и возникновение противоположной механической силы. Существует два способа зарядить конденсатор: первый это зафиксировать расстояние между обкладками конденсатора и увеличивать напряжение, второй – соединить обкладки конденсатора, зарядить конденсатор и разделить обкладки.

Рассмотрим теперь работу этого привода, когда источник тока подключён к электрическим портам (рис. 7.5.), тем самым напрямую контролируется количество заряда конденсатора.



Рисунок 7.5.. Электростатический привод, подключённый к источнику тока

Где \dot{g} - смещение подвижной обкладки; \dot{z} – смещение (растяжение) пружины, i_{in} или i_{Bx} – ток от источника тока; W(Q,g) – энергия заряженного конденсатора; $\frac{1}{k}$ - жёсткость пружины, прикреплённой к подвижной обкладке конденсатора.

В этом случае, предполагая, что мы начали с первоначально незаряженного состояния t=0 и постепенно добавляем заряд, можем определить заряд на обкладках конденсатора:

$$Q = \int_0^t i_{\rm BX}(t) \, dt.$$
 (7.6)

Сила притяжения между обкладками определяется значением заряда *Q*:

$$F = \frac{Q^2}{2\varepsilon A},\tag{7.7}$$

где *є* – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющая пространство между пластинами; *А* — площадь пластины (обкладки) конденсатора.

Характеризуя пружину, определяем смещение её конца, которое будет:

$$z = \frac{F}{k'} \tag{7.8}$$

а зазор между пластинами получается из

$$g = g_0 + \int_0^t \dot{g} \, dt, \tag{7.9}$$

где g_0 - это расстояние между обкладками при отсутствии напряжения или силы со стороны пружины. Поскольку

$$\dot{g} = -\dot{z}.\tag{7.10}$$

И интеграл для *g* даёт - *z*. Поэтому,

$$g = g_0 - z, (7.11)$$

или

$$g = g_0 - \frac{Q^2}{2\varepsilon Ak}.\tag{7.12}$$

В итоге, напряжение на конденсаторе или можно сказать, напряжение на мультипортовом элементе, со стороны электрической подсистемы:

$$V = \frac{Qg}{\varepsilon A} = \frac{Q(g_0 - \frac{Q^2}{2\varepsilon Ak})}{\varepsilon A}.$$
 (7.13)

Очевидно, что по мере того, как заряд Q увеличивается, сила притяжения между пластинами увеличивается, как квадрат заряда Q^2 . При равновесии эта сила притяжения должна уравновешиваться силой от пружины, а для этого требуется растяжение пружины

из положения покоя. Чем больше заряд, тем больше пружина должна быть растянута, датчик контролируется зарядом.

Расстояние между обкладками конденсатора сводится к нулю при заряде \hat{Q} , найденному по формуле:

$$\frac{\hat{Q}^2}{2\varepsilon A} = kg_0. \tag{7.14}$$

Напряжение V также стремится к нулю, когда растояние между обкладками конденсатора стремится к нулю.

Рассмотрим работу этого привода, когда источник напряжения подключён к электрическим портам, рисунок 7.6.



Рисунок 7.6. Электростатический привод, подключённый к источнику напряжения

Где $W^*(V, g)$ – это Ко – энергия, не физическая величина, измеряемая в энергетических единицах, используемая в теоретическом анализе энергии в физических системах.[64]

Определяется как:

$$W^*(V) = QV - W(Q).$$
 (7.15)

Учитывая то, что подвижная пластина конденсатора - это нелинейный элемент, следует то, что энергия W(Q,g) и ко-энергия $W^*(V,g)$ системы не одинаковы. Поскольку мы контролируем напряжение, а не заряд, мы должны использовать ко- энергию системы, а не энергию.

В этом примере может быть сохранена как механически, так и электрически потенциальная энергия. Но определение ко-энергии для электрического домена остаётся такое же, до тех пор пока расстояние *g* между обкладками конденсатора будет использоваться как независимая переменная механического домена. То есть,

$$W^*(V,g) = QV - W(Q,g).$$
 (7.16)

Дифференцируя, получается

$$dW^{*}(V,g) = (QdV + VdQ) - dW(Q,g),$$
(7.17)

но полная энергия для конденсатора

$$W = \int_0^g F_{3\pi} dg_{3\pi} + \int_0^g F_{\text{Mex}} dg_{\text{Mey}} , \qquad (7.18)$$

далее

$$W(Q,g) = Fdg + VdQ, \qquad (7.19)$$

$$dW^*(V,g) = QdV - Fdg. (7.20)$$

из этого получаем выражения:

$$Q = \frac{\partial W^*(V,g)}{\partial V} \bigg|_g$$

$$F = -\frac{\partial W^*(V,g)}{\partial g} \bigg|_V.$$
(7.21)

В этом случае имеем смешанный набор переменных. Можно применить эти результаты, используя функцию ко-энергии, рассчитываемой при фиксированном расстоянии обкладок, чтобы получить

$$W^*(V,g) = \int_0^U Q dV = \int_0^U \frac{\varepsilon A}{g} V dV,$$
 (7.22)

$$W^*(V,g) = \frac{\varepsilon A V^2}{2g}.$$
(7.23)

Применяя дифференциальные соотношения, получаем

$$Q = \frac{\varepsilon A}{g} V, \tag{7.24}$$

что соответствует основному выражению Q = CU. А для силы получается

$$F = -\frac{\partial W^*(V,g)}{\partial g}\bigg|_V = -\left[-\frac{\varepsilon A V^2}{2g^2}\right] = \frac{\varepsilon A V^2}{2g^2}.$$
(7.25)

Это согласуется с предыдущим результатом $\frac{\hat{Q}^2}{2\epsilon A}$ следовательно, в любом случае является правильным. И также расстояние между обкладками получиться:

$$F = \frac{\varepsilon A V_{\text{BX}}^2}{2g^2},\tag{7.26}$$

$$g = g_0 - z, (7.27)$$

$$z = \frac{F}{k},\tag{7.28}$$

$$g = g_0 - \frac{\varepsilon A V_{\text{BX}}^2}{2g^2}.$$
(7.29)

Очевидно, что, изменяя входное напряжение U_{вх} можно контролировать расстояние между обкладками конденсатора. Также как стабильное расстояние между обкладками конденсатора идентифицируется, заряд находится из формулы:

$$Q = \frac{\varepsilon A}{g} V_{\rm BX}.$$
(7.30)

Когда повышается напряжение, расстояние между обкладками конденсатора уменьшается, и при достижении определённого значения напряжения V_{PI} (PI - Pull In - втягивание), пластины конденсатора схлопываются.

Контролируемый напряжением электростатический датчик на основе конденсатора с параллельно расположенными обкладками показывает важное поведение Pull In втягивание. Чтобы объяснить этот эффект, рассматривается устойчивое равновесие, которое должно существовать между электростатической силой, которая тянет плиту вниз и силой со стороны пружины, тянущей её вверх. Для этого анализа слегка меняется позиция верхней обкладки конденсатора, и тогда результирующая сила $F_{pe3}(F_{net})$ на верхней обкладке конденсатора при напряжении V и расстоянии между обкладками g (принимая во внимание позитивное направление силы, то при котором увеличивается расстояние между обкладками) будет рассчитываться по формуле:

$$F_{\rm pe3} = \frac{-\epsilon A V^2}{2g^2} + k(g_0 - g), \tag{7.31}$$

где g_0 - расстояние между обкладками при напряжении равном нулю и нулевом растяжении пружины. В точке равновесия системы F_{pes} равно нулю. Если незначительно изменить расстояние между обкладками, то результирующая сила будет:

$$\delta F_{net} = \frac{dF_{net}}{dg} \bigg|_{V} \delta g \tag{7.32}$$

Если δF_{pe3} положительна для положительных δg приращений, то это неустойчивое равновесие, так как небольшое увеличение δg создаёт силу, стремящуюся увеличить его дальше. Если δF_{pe3} является отрицательным, то это стабильная точка равновесия.

Выражаем

$$\delta F_{\text{pes}} = \left(\frac{\varepsilon A V^2}{g^3} - k\right) \delta g. \tag{7.33}$$

Для того, чтобы было стабильное равновесие, выражение в скобках должно быть отрицательным, это означает, что

$$k = \frac{\varepsilon A V^2}{g^3}.\tag{7.34}$$

Очевидно, что если расстояние между пластинами при равновесии уменьшиться, с увеличением напряжения, то будет определённое напряжение, при котором устойчивость равновесия потеряется.

$$k > \frac{\varepsilon A V_{PI}^2}{g_{PI}^3}.$$
(7.35)

И явление Pull In (втягивание) возникнет при:

$$g_{PI} = \frac{2}{3}g_0, \tag{7.36}$$

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon A}}.$$
 (7.37)

Этот вид анализа можно применять для разных систем. Пример электростатического привода на основе конденсатора с добавлением динамики представлен ниже.


Рисунок 7.7. Электростатический привод

7.3. Датчик с диссипацией энергии из-за джоулева нагрева

Джоулев нагрев (также называют резистивным или омическим нагревом) описывает процесс, в котором при прохождение электрического тока по проводнику, энергия электрического тока преобразуется в тепловую энергию и выделяется тепло. В некоторых случаях, джоулев нагрев полезен для МЭМС устройств, а в других, это является нежелательным эффектом. В обоих случаях, выделение энергии является необратимым диссипативным процессом. Ниже в таблице 7.4. представлены примеры диссипативных процессов в разных подсистемах.

Подсистема	Диссипативный процесс
Движение твёрдого тела	Трение при контакте
Эластичность материала	Внутреннее трение
Электрическая	Джоулев нагрев, потери от диэлектриков
Магнитная	Вихревые токи, гистерезис
Жидкости	Вязкость
Химическая	Диффузия, химическая реакция
Тепловая	Теплопередача

Таблица 7.4. Примеры диссипативных процессов в разных подсистемах

Примером нежелательного эффекта является самостоятельный нагрев полупроводниковых резисторов, используемых в датчиках, и их тепловое расширение. Изменение линейных размеров и формы полупроводниковых элементов может послужить причиной повреждений и возникновения дефектов, которые будут критичны для чувствительных элементов датчика. [68]

Таким образом, тепловая энергия играет особую роль среди всего многообразия энергетических систем, встречающихся в МЭМС устройствах.

Рассмотрим кремниевую балку прямоугольного сечения, закреплённую с двух концов, через которую проходит электрический ток, обуславливающий нагрев балки. Получим выражения для максимального тока, который может быть применён без потери устойчивости балки и соответствующее этому максимальное повышение температуры, которое может быть достигнуто вдоль балки. Предполагается равномерный нагрев балки в результате прохождения тока *I*через балку. Пусть балка имеет длину *L*, ширину *W* и высоту *H*. Оба конца балки находятся при постоянной температуре T_0 и также делаем упрощающее предположение, что балка не теряет тепло в окружающей среде по ее длине, а только на концах. Балка сделана из однородного кремния с теплопроводностью *K*и электрическим сопротивления ρ_e , оба параметра рассматривается как независимые от температуры в этом случае. [64]



Рисунок 7.8. Кремнёвая балка.

Тепловая энергия, подчиняется уравнению непрерывности, как результат сохранения энергии. Выражаем уравнение, которое является наиболее удобным для нормализации тепловой энергии в единице объёма.

$$\frac{dQ}{dx} + \nabla \cdot J_Q = \tilde{P}\Big|_{sources}$$
(7.38)

Где \tilde{Q} - тепловая энергии на единицу объёма, J_Q - тепловой поток с поверхности материала в [Вт/м²], \tilde{P} | sources- в единицах [Вт/м³], представляет сгенерированную тепловую энергию внутри материала вследствие, например, любого диссипативного процесса из других типов энергий. Далее будет обозначено как \tilde{P} |. (Виды этих типов энергий соответствующих им диссипативных процессов представлены в таблице № 7.4. выше). \tilde{P} соединяет тепловую энергию с другими типами энергий. Тепловой поток J_Q через граничную поверхность образца материала обусловлен разницей температур. Есть три важных механизма передачи тепла: теплопроводность, конвекция и излучение. Теплопроводность является наиболее важной в устройствах МЭМС. Определяющим уравнением для теплопроводности является уравнение Фурье:

$$J_0 = -k\nabla T, \tag{7.39}$$

где k – коэффициент теплопроводности, и имеет единицы Ватт/Кельвин-метр. Фундаментальные термодинамические ограничения k > 0. То есть, тепло никогда не течёт спонтанно из холодного тела к более горячему телу. Тепловой поток является необратимым процессом передачи энергии (второй закон термодинамики).

Если мы берем дивергенцию уравнения для теплового потока (предыдущее уравнение), получится:

$$\nabla * J_0 = -\nabla * k \nabla T \tag{7.40}$$

Если подставить этот результат в уравнение непрерывности, получается

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = \nabla \cdot k \nabla T + \tilde{P} \Big|_{sources}$$
(7.41)

Это уравнение теплового потока, дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее временное и пространственное изменение температуры в области тепловой энергии. Если предположить, что теплоёмкость является постоянной в интересующем диапазоне температур, и что она является величиной неизменной на протяжении всей пространственной области интересов, то это сводится к

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\tilde{C}} \nabla^2 T + \frac{1}{\tilde{C}} \left. \tilde{P} \right|_{sources},\tag{7.42}$$

где \tilde{C} - теплоёмкость на единицу объёма и $\frac{k}{\tilde{c}}$ соотношение, называемое коэффициентом температуропроводности, измеряющимся в [м²/c]. Это уравнение может быть решено, для того, чтобы найти зависимость распределения температуры во времени и пространстве. Это уравнение является также достаточно фундаментальным для распределённых диссипативных процессов в целом.

Для анализа задачи, условия которой описаны выше, уравнение переписывается:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\tilde{C}} \nabla^2 T + \frac{1}{\tilde{C}} \tilde{P}\Big|_{sources}$$
(7.43)

$$\frac{k}{\tilde{c}}\nabla^2 T + \frac{1}{\tilde{c}}\tilde{P}\big| = 0, \tag{7.44}$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} = -\frac{1}{k}\tilde{P}\Big| \tag{7.45}$$

И

$$\tilde{P} = \rho_e * J^2 = \frac{\rho_e * I^2}{A^2}, \tag{7.46}$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} = -\frac{\rho_e}{k} J^2,$$
(7.47)

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{\rho_e}{k} J^2 x + C_1, \tag{7.48}$$

$$T = -\frac{\rho_e}{2k}J^2x^2 + C_1x + C_{2,} \tag{7.49}$$

 C_1, C_2 – постоянные интегрирования

$$T\left(\frac{-L}{2}\right) = T\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \implies C_1 = 0.$$
(7.50)

*C*₁ = 0 из-за симметрии, тогда

$$T\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{\rho_e J^2}{2k} \frac{L^2}{4} + C_2 = T_0,$$
(7.51)

$$C_2 = T_0 + \frac{\rho_e J^2 L^2}{8k},\tag{7.52}$$

$$T(x) = T_0 + \frac{\rho_e J^2 L^2}{8k} - \frac{\rho_e J^2}{2k} x^2, \qquad (7.53)$$

$$T(x) = T_0 + \frac{\rho_e J^2}{2k} \left(\frac{L^2}{4} - x^2\right).$$
(7.54)

Когда получили распределение температуры, можно найти максимальный ток, который может быть применён к балке без потери её устойчивости и соответствующее этому току, значение максимальной температуры.

Когда кремниевая балка нагревается, возникает явление теплового расширения кремния и/или возникает продольное механическое напряжение вдоль оси х, но концы балки фиксированы, и от опор возникает сила реакции опоры из этого следует, что механическое напряжение, возникший в результате теплового расширения – имеет сжимающий (компрессионный) характер. (Явление поперечного механического напряжения не учитывается в этом случае.) Тогда выражение для механического напряжения будет:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x - E\alpha_T \Delta T, \tag{7.55}$$

где E – Модуль Юнга - модуль продольной упругости, ε_x – деформация, α_T - коэффициент линейного теплового расширения, ΔT – увеличение температуры.

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sigma_x dx = E \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \varepsilon_x dx - E \alpha_T \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \Delta T dx = 0.$$
(7.56)

Так как балка зафиксирована с обоих концов $E \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \varepsilon_x \, dx = 0$. Следовательно

$$\sigma_x = -E\alpha_T \Delta \overline{T}, \qquad \text{где } \Delta \overline{T} = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \Delta T dx \,. \tag{7.57}$$

Подставляя

$$\Delta \bar{T} = \frac{\rho_e J^2}{2k} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} dx \left(\frac{L^2}{4} - x^2\right) = \frac{\rho_e I^2}{12kA^2} L^2 = \frac{\rho_e}{12k} \left(\frac{L}{WH}\right)^2 I^2.$$
(7.58)

Выгибание балки или потеря устойчивости первоначальной формы тела начнётся, когда напряжение в балке будет больше критического механического напряжения. Критическое механическое напряжение вычисляется по формуле Эйлера:

$$\sigma_{\mathfrak{I} \check{\mathsf{h}} \mathsf{лера}} = -\frac{\pi^2}{3} E(\frac{H}{L})^2. \tag{7.59}$$

Максимальный ток будет:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{(-\sigma_{\Im \check{\mu} n e p a})^{12kA^2}}{\rho_e E \alpha_T L^2}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E H^2 12kW^2 H^2}{3L^2 \rho_e E \alpha_T L^2}} = 4\pi \frac{H^2 W}{L^2} \sqrt{\frac{k}{\rho_e \alpha_T}}.$$
 (7.60)

Соответствующее увеличение температуры:

$$\Delta T_{max} = \Delta T(0) = \frac{\rho_e l_{max}^2}{2kA^2} \frac{L^2}{4} = \frac{\rho_e L^2}{8kW^2H^2} \frac{16\pi^2 H^4 W^2 k}{L^4 \rho_e \alpha_T} = \frac{2\pi^2 H^2}{L^2 k \alpha_T}.$$
 (7.61)

При помощи теоретического анализа и математического моделирования были найдены критические условия, такие как максимальный ток - которой может пройти через балку и соответствующее увеличение температуры, что даёт информацию о корректной работе балки без потери её устойчивости или отказа.

8. Компьютерное моделирование МЭМС

8.1. Моделирование в среде COMSOL

Одновременно с физическими И математическими методами анализа микроэлектромеханических систем существуют и компьютерные методы анализа. К одному из таких методов относится моделирование процессов в среде COMSOL. COMSOLMultiphysics - программная среда, обеспечивающая все этапы моделирования (определение геометрических параметров, описание физики, визуализация), позволяющая моделировать любые физические процессы, которые могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений В частных производных [75]. Среди рассматриваемых дисциплин — механика конструкций, теплоперенос, инженерная химия (в том числе с учётом химической кинетики), электротехника, акустика, геофизика, связанные явления на микроуровне, оптические и высокочастотные эффекты.

СОМЅОLMultiphysics содержит так же модуль МЭМС, предназначенный для анализа физических явлений в сложных микроустройствах таких как, регуляторы, датчики, фильтры, ультра звуковые датчики, устройства БиоМЭМС, и многое другое. С точки зрения эксплуатации, разные физические явления из разных областей физики таких, как электромеханика, пьезоэлектричество, пьезорезистивный эффект, тепловые эффекты, физика жидкостей и газов, могут быть смоделированы с высокой точностью с помощью программного обеспечения. Для анализа механических конструкций следует использовать отдельный модуля StructuralMechanics.

Далее в качестве примера моделирования в среде COMSOLMultiphysics рассмотрим джоулевый нагрев для термического привода. При уменьшении размеров устройств сильно возрастает роль тепловых сил по сравнению с силами инерции. Это обеспечивает достаточно высокое быстродействие микроскопических термоприводов для применения в микромасштабе, однако, термические приводы обычно медленнее ёмкостных И пьезоэлектрических приводов. Термические приводы легко интегрируются с полупроводниковыми приборами, но обычно они потребляют намного больше энергии, чем электростатические и пьезоэлектрические устройства аналогичного назначения. Модуль MEMS можно использовать для моделирования джоулева нагрева И возникновения тепловых напряжений, включая детали распределения потерь на сопротивление.

На рисунке 8.1. внизу показан смоделированный термический привод. Верхняя часть изображения показывает температуру внутри смещённого термического привода с Джоулевым нагревом, а нижняя часть показывает распределение плотности тока.

115

		thread a strate tax and - PANPAL Malakalar	
File Home Definitions Geometry	Physics Mesh Study Results	termal, actuator, term.mpr - COMSOL Multiphysics Temperature (ht) Deductate Along Normal - 1) Cut Line Direction Compared and Along Normal - 1) Cu	
Plot Plot	Contour C	First Point for Cut Line () Cut Line () Cut Rane Normal Second Point for Cut Line () First Point for Cut Plane Normal () Cut Plane Normal Second Point for Cut Line () First Point for Cut Plane Normal () Cut Plane Normal	
Model Builder	3D Plot Group		~ 1
4 (thermal_actuator_tem.mph (root)	* Data	Surface: Temperature (K)	CO-001 - 10
Global Definitions Thermal Actuator (compl) Definitions	Data set: Solution 1		▲ 544.29
 ▷ A Geometry 1 ▷ III Materials 	 Title Plat Sattings 		500
Solid Mechanics (solid) Meat Transfer in Solids (ht) Selectric Currents (ec)	View: Automatic	×10 ³ 20	450
Multiphysics American Mesh 1	Show hidden objects	0 20	400
 Study 1 Results 	Color: Black	× ×10 ³⁰ 10	350
Data Sets Derived Values Tabler	Frame: Material (X, Y, Z)	z y 40 5 x10	▼ 293.15
Stress (solid) Control (ht)	Color Legend	Plot 1	* † ×
Isothermal Contours (ht)	Window Settings		
 E bettik Poetinal (ed) E port Reports 	Survice Current Bentily holm (kim)	▲ 1.0795×10° ×10°	
		x10 ³ 90 0 10 20 x10 ³ 30 0 5 x10 ³	0.7 0.6 0.5 0.4 0.2 0.1 ▼ 3.2431×10 ⁻⁶
		1.27 GB 1.34 GB	

Рисунок 8.1. Термический привод, смоделированный в среде COMSOL

Другим примером эффективного использования COMSOLMultiphysics является применения моделирования пьезо эффектов. Поле напряжений его для В пьезорезистивных датчиках, рассчитывается с использованием специального модуля MEMS для пьезорезисторных материалов. При моделирования пьезорезистивных датчиков в модуле MEMS предоставляется несколько специализированных физических интерфейсов для моделирования пьезорезистивного эффекта в твёрдых телах и оболочках, рисунок 3. В ходе совместного использования модуля MEMS и модуля StructuralMechanics (Механика конструкций) используется физический интерфейс пьезорезистивного эффекта для тонких оболочек рисунок 8.2.



Рисунок 8.2. Моделирование пьезо эффекта для тонких оболочек в среде COMSOL

Также в COMSOL можно симулировать и применять метод конечных элементов, рисунок 8.3. Метод конечных элементов - численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также решения интегральных уравнений, часто появляющихся при решении задач прикладной физики. Это метод получил широкое использование для решения задач включающих в себя механику деформируемого твёрдого тела, теплообмен, гидродинамика и электродинамика.



Рисунок 8.3. Метод конечных элементов реализованный в среде COMSOL

8.2. Моделирование в среде SEMulator3D

Другим примером пакетов для компьютерного моделирования является продукты, созданные компанией Coventor, которая предлагает среду SEMulator3D® ДЛЯ моделирования изготовления МЭМС и полупроводниковых технологий [75]. Предоставляет полную виртуальную среду изготовления, что является параллельным возможностям реальных лабораторий. SEMulator3D имеет возможность моделировать полный процесс интегрированных потоков, состоящих из сотен отдельных процессов. Также Coventor предлагает два взаимодополняющих продукта для проектирования и моделирования МЭМС, МЭМС+® и CoventorWare®, которые в совокупности обеспечивают комплексную платформу для развития МЭМС. Эти сложные инструменты поддерживают разнообразную физику и физические явления, которые происходят в МЭМС, в том числе механические, электрические, пьезоэлектрические, пьезорезистивные, жидкостные и эффекты важные на стадии упаковки чипа. Компания, в настоящее время, предлагает решения для совместного проектирования МЭМС, сопровождающих систем и электронных схем. Для этого была произведена интеграция технологий системного

моделирования и САПР-инструментов, которые часто используются в интегральных схемах и радиоэлектронике. МЭМС + ® представляет собой программную платформу, для разработки МЭМС устройств и интеграции МЭМС устройств с КМОП - схемами и технологиями упаковки. Этот модуль идеально подходит для проектирования и оптимизации базовых МЭМС компонентах для датчики движения (акселерометров и гироскопов), микрофонов, микро-зеркал, микро-переключателей. На рисунке 8.4., ниже изображён пример программной платформы МЭМС + ®.



Рисунок 8.4. Пример программной платформы МЭМС + ® компании Coventor. Дизайн двуосевого акселерометра, сформированного из модулей МЭМС

9. Наноэлектромеханические системы

9.1. Технология НЭМС

Технологии изготовления НЭМС-устройств также включает в себя два подхода [11]. Первый подход называют сверху-вниз (top-down) и он предполагает процессы изготовления схожие с поверхностной микрообработкой при изготовлении МЭМС устройств с той лишь разницей, что разрешение литографических систем лежит в нанометровом диапазоне (литографические методы будут рассмотрены ниже). Поэтому отдельно данный подход рассматривать не будет. Второй же подход включает в себя использование наноструктур, полученных с помощью ряда методик, при которых не используются традиционные литографические процедуры. Он называется «снизу вверх» (bottom-up) и изготовление НЭМС устройства начинается с изготовления наноструктур, к которым в дальнейшем с помощью традиционных методов структурирования тонких пленок добавляются новые элементы. При этом рабочим телом устройства является синтезированный нанообъект. Ввиду того, что на настоящий момент основным НЭМС устройством являются разнообразные нанорезонаторы на основе нанобалок, то основным элементом является одноразмерные нанообъекты – нанонити.

9.2. Формирование нанонитей

Нанонити (или нановолокна) – это структуры, размеры которых в двух измерениях лежат в диапазоне от единиц до сотен нанометров. Существующие методы изготовления нанонитей можно условно разделить на следующие группы:

- 1. Самопроизвольный рост нанонитей [40];
- 2. Изготовление на основе матриц (шаблона) [40];
- 3. Электроспиннинг [36,37,41];

9.2.1. Самопроизвольный рост нанонитей

Данную группу методов объединяет общий механизм роста нанонити – уменьшение свободной энергии Гиббса. Такое уменьшение может быть связано с фазовым превращением, уменьшением химического потенциала в результате химической реакции, изменением механических напряжений. Эти факторы должны влиять на рост кристалла так, чтобы он происходил преимущественно только в одном направлении, таким образом, сам кристалл примет формы нанонити. Методы данной группы будут описаны ниже.

Осаждение из газовой или жидкой фазы

Одним из первых методов изготовления нанонитей было осаждение из газовой или жидкой фазы [33]. Метод заключается в доставке испаренного или растворенного материала для нанонитей к поверхности подложки, имеющей температуру достаточно низкую для осаждения этого материала. Рост кристалла в таком случае можно условно разделить на несколько этапов:

1. Диффузия компонентов нанонити к поверхности подложки;

2. Адсорбция этих компонентов на поверхности;

3. Поверхностная диффузия к центрам роста кристалла;

4. Встраивание в кристаллическую решетку;

5. Десорбция и диффузия в объем паровой или жидкой фазы продуктов реакции (если таковая имела место).

Скорость роста в зависимости от концентрации реагента может быть ограничена адсорбцией или встраиванием в кристаллическую решетку. Анизотропия роста кристалла для разных материалов может быть обусловлена различными факторами, такими как неодинаковые скорости роста некоторых его граней, наличие дефектов в определенных направлениях или неравномерным накоплением примесей (в случае гетерогенной среды). Полученные этим методом нанонити обладают хорошей кристалличностью и небольшим количеством дефектов. Осаждением из газовой фазы были получены нанонити из фосфида индия диаметром около 200 нм и длиной более 6 мкм. Одним из существенных недостатков описываемого метода является высокие температуры подложки (больше 400 °C) и отсутствие возможности управлять местоположением и направлением роста нанонитей.

Осаждение под действием катализатора

Данный метод может иметь два механизма, называемых "пар-жидкость-кристалл" (ПЖК) и "раствор-жидкость-кристалл" (РЖК), которые отличаются по агрегатному состоянию компонентов нанонити (пар или раствору). Центром кристаллизации является капля жидкости катализатора, который направляет и ограничивает рост кристалла по определенному направлению. Перед процессом осаждения на поверхности подложки формируются островки катализатора, определяющие геометрическое расположение будущих нитей. В общем случае процесс ПЖК состоит из двух стадий (рисунок 9.1.), первой из которых является образование жидкой капли катализатора (например, плавление при разогреве подложки), а второй – рост нанокристаллической нити на границе подложки (или нижележащего кристалла) и капли под действием пара. Первоначально ввиду большого коэффициента аккомодации поверхности жидкости

120

происходит захват компонентов пара, которые при дальнейшей диффузии осаждаются на разделе двух сред.



Рисунок 9.1. – Процесс роста нанонити по механизму ПЖК

Существует ряд требований для каталитического роста нанонитей [42]:

- Катализатор должен образовывать жидкий раствор с материалом нанонити при температуре осаждения;
- Катализатор не должен полностью покрывать поверхность подложки;
- Испарение капли во время роста должно быть небольшим, иначе это приведет к постепенному истончению нити или даже прекращению роста при полном испарении катализатора;
- Катализатор должен быть химически инертным;
- Смачиваемость подложки катализатором влияет на диаметр нити: чем хуже смачиваемость, тем меньше диаметр;
- Для контролируемого однонаправленного роста граница раздела жидкостькристалл должна быть четко определена;

Исходя из вышеуказанных требований, в качестве катализаторов обычно используются наночастицы золота, платины, серебра, никель и ряд других металлов [41]

Метод ПЖК позволяет выращивать однокомпонентные и многокомпонентные нити, которые могут быть монокристаллическими, поликристаллическими или аморфными в зависимости от скорости роста и материала подложки. Форма кристалла может отличаться от цилиндрической за счет бескаталитического осаждения на боковой поверхности нити. При высоких температурах различие этих скоростей будет уменьшаться, что приводит к конической форме получаемых кристаллов. При понижении температуры различие между скоростями осаждения существенно увеличивается. В работе [42] описывается увеличение скорости роста кремниевых нанонитей в 60 раз при использование платинового катализатора, по отношению к бескаталитическому осаждению. Данный метод широко используется для выращивания упорядоченных массивов нанонитей из Si, SiC, Ge, GaN, ZnO, InP, InAs, GaP, GaAs и с диаметром не более 10 нм и длинной в единицы мкм. Рост нанонитей по механизму ПЖК отличается лишь методом подвода компонентов роста, механизм роста нанонитей схож, однако ограниченная растворимость прекурсов существенно снижает выбор материалов, однако в последнее время были изготовлены нанонити из GaAs, ZnTe, InP, InAs, CdTe с диаметром менее 5 нм и длинной до 10 мкм.

Рост под воздействием механических напряжений

Нановолокна могут быть получены также при рекристаллизации под воздействием механических напряжений. Механические напряжения могут быть получены при нагреве и охлаждении пленок на подложке в случае, когда их коэффициенты теплового расширения (КТР) сильно различаются [34, 44, 45]. При возникновении механического напряжения в произвольных участках пленки начинают образовываться дислокации, которые в дальнейшем служат точками роста. Диаметр и длина волокон отличаются зависимости от температуры нагрева и времени обжига. Такой способ получения применим к ограниченному количеству материалов, в настоящее время с помощью него получены волокна из Al, Cu₂O, Bi, PbTe [34, 44, 45] с диаметром от 15 до 300 нм и длинной несколько десятков микрон.

9.2.2. Матричное формирование нанонитей

Матричный метод получения заключается в заполнении заранее изготовленных матриц (пористых подложек) компонентами будущих наноструктур с помощью их растворов или расплавов. Если глубина пор значительно больше поперечного сечения, то с помощью таких матриц можно получать нановолокна. После заполнения пор матричный материал удаляется с помощью селективного жидкофазного или газофазного травления. В качестве материалов для матриц обычно используется анодный оксид алюминия [44] или трековые мембраны. Мембраны из оксида алюминия с однородными параллельными порами получают анодным окислением алюминиевых пластин в растворах серной, щавелевой и фосфорной кислот. Поры имеют правильное гексагональное расположение (рисунок 9.2.), их плотность пор достигает 10^{11} пор/см² при диаметре поры от 10 нм до 100 мкм [45].



Рисунок 9.2. – Пористая мембрана из оксида алюминия

Трековые мембраны изготавливаются с использованием полимерных пленок, которые облучаются потоком высокоэнергетичных тяжелых ионов (аргоном, криптоном, ксеноном) на ускорителях. Каждый ион вдоль своей траектории повреждает полимерные молекулы, оставляя скрытый след – трек. При дальнейшем облучении пленки УФ излучением и щелочном травлении, в ней сквозная цилиндрическая пора, диаметр которой прямо пропорционален времени травления. Поры расположены случайным образом, их диаметр обычно превышает 10 нм, а плотность - 10⁹ пор/см².

Для формирования нанонитей, матричные материалы должны смачиваться растворами или расплавами, материалы должны выдерживать температуры процесса нанесения без деформации пор, быть химически инертными по отношению к рабочему раствору или расплаву. Также материал должен подходить под процесс с конструктивной точки зрения (например, при электрохимическом осаждении матрица должна быть изолятором).

Электрохимическое осаждение

Электрохимическое осаждение – это один из видов электролиза, при котором происходит осаждение материала на электроде. Обычно процесс осаждения включает в себя диффузию заряженных ростовых компонентов через раствор при приложении внешнего электрического поля (катионов) и восстановление их на поверхности электрода. Для того, чтобы процесс продолжался после осаждение первых монослоев пленки на электроде, осаждаемый материал должен быть электропроводящим. Поэтому такой тип осаждения применим для нанесения металлов, полупроводников и проводящих полимеров.

Если металлический электрод, на котором происходит осаждение, покрыт нанопористым непроводящим материалом, то внутри пор будут формироваться нанонити или нанотробку в зависимости от условий осаждения. На рисунке 9.3. представлена типовая схема получения нанонитей электролитическим осаждением.



Рисунок 9.3. Схема для электрохимического способа получения нанонитей

Измеряя ток при электроосаждении, можно определить момент заполнения пор ростовыми компонентами. Этот момент соответствует резкому росту тока через электролит. Объясняется это тем, что после при заполнении нанопор, ростовой материал начинает осаждаться на краях поры, постепенно покрывая всю поверхность нанопористой структуры, и тем самым увеличивает площадь поверхности, на которой идет осаждение. Методом электрохимического осаждения были получены нанонити металлов (Ag, Cu, Pb, Bi, Au, Ni, Co), полупроводников (CdSe, CdTe, Bi₂Te₃, CuS) размерами от 10 до 200 нм и длинной в десятки мкм [45].

Электрофоретическое осаждение

Электрофорез – это направленное движение коллоидных частиц в коллоидном растворе или в золь-геле под воздействием внешнего электрического поля. В отличие от электрохимического осаждения, здесь происходит не перемещение ионов, а перемещение твердых частиц, окруженных двойным электростатическим слоем. При электрофоретическом осаждении не происходит переноса заряда, и проводимость жидкой фазы должна быть низкой. Размеры частиц, диэлектрическая проницаемость и вязкость

жидкой фазы определяют скорость осаждения. Дзета-потенциал определяет возможность электрофоретического перемещение и его направление (к аноду или катоду) [46].

Установка для электрофоретичекого осаждения соответствует той, что показана на рисунке 9.3. Напряжение, прикладываемое к электродам, определяет максимальную толщину пленки, так как скорость роста уменьшается с увеличением толщины уже осажденной пленки.

Одним из недостатков предыдущего метода заключается в невозможности формирования диэлектрических нанонитей, что осуществимо при электрофоретическом осаждении, также можно изоговить нановолокна из SnO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 с диаметром от 50 до 200 нм и длиной не менее 10 мкм.

Заполнение с помощью расплава или раствора

Заполнение нанопористых материалов может осуществляться не за счет внешнего электрического поля, а за счет избыточного давления. Для того чтобы изготовить нанонити матрицу дегазируют, помещают в расплав и создают избыточное давление газа (азот или аргон) или закачивают расплав с помощью гидравлического пресса в вакууме. Необходимые для процесса температура и давления определяются материалами матрицы и компонентов нанонити. С помощью этих методов были получены различные металлические нанонити Al, Bi, Sn с диаметром от 10 до 70 нм и длиной до 10 мкм. Во время остывания происходит кристаллизация нановолокон. Вместо расплава можно использовать растворы солей, однако такой способ потребует дополнительной просушки, химической обработки и отжига.

9.2.3. Электроспиннинг

Электроспиннинг - это простой и универсальный метод, который использует электростатические силы, чтобы получить тонкие полимерные волокна с диаметром от сотен до единиц нанометров [46]. Данный метод является очень распространённым, так как он относительно прост и позволяет использовать множество материалов для изготовления нанонитей, не требует дорогостоящего оборудования для нанесения. Во время электроспиннинга высоковольтное внешнее электрическое поле прикладывается соплу с жидким полимером, в результате чего из сопла происходит выброс непрерывной нити, которая движется в сторону противоположно заряженного электрода. До приложения электрического поля жидкость удерживается в сопле за счет сил поверхностного натяжения. При приложении поля силы поверхностного натяжения уравновешиваются электростатическими силами и капля удлиняется, образуя так называемый конус Тэйлора [54]. При достижении критического значения электрического

125

поля с конца конуса выбрасывается электрически заряженная нить полимера. Во время движения в воздухе растворитель испаряется из нити и на противоположно заряженный электрод оседает полимерное волокно. Недавние эксперименты и теоретические исследования показали, что струя, пройдя небольшое расстояние, становится неустойчивой и начинает изгибаться как следствие электростатического отталкивания струи, и взаимодействия с заряженных поверхностей ускоряющим внешним электрическим полем. Эти взаимодействия приводит к удлинению нити с одновременным уменьшением ее диаметра. Схема изготовления нанонитей методом электроспиннинга представлена на рисунке 9.4..



Рисунок 9.4. Схема элекстроспиннинга нанонитей

Жидкость к соплу подводится равномерно по времени чаще всего с помощью шприца и автоматизированного поршня. Такая система подвода жидкость позволяет настраивать объем жидкость подаваемый к соплу за единицу времени. Большинство растворимых полимеров могут быть использованы в качестве основы для электроспиннинга, при условии верного подбора параметров процесса, таких как:

- молекулярная масса полимера и распределение молекулярных масс;
- растворимость полимера;
- летучесть растворителя;
- температура плавления и стеклования полимера;
- вязкость, электропроводность и поверхностное натяжение готового раствора;
- материал осадительного электрода;
- напряженность электрического поля;
- скорость подачи жидкого раствора;

- расстояние между соплом и осадительным электродом;
- относительная влажность в камере осаждения.

Вязкость раствора полимера очень важна, поскольку она определяет осуществим ли процесс электроспиннинга. Если вязкость раствора недостаточна, то во время формирования нанонити из конуса Тэйлора она может распасться на отдельные капли изза сил поверхностного натяжения. Если же вязкость жидкости будет слишком высока, то процесс элекстроспиннинга будет невозможным. В общем случае с увеличением вязкости раствора будет увеличиваться толщина нановолокон [47]. Напряженность электрического поля также должна находиться в некотором диапазоне для получения длинных волокон.

Первоначальное увеличение напряжение между соплом и осадительным электродом до уровня, при котором происходит формирование нанонитей, характеризуется конусом Тэйлора, формирующимся на конце свисающей с сопла капли. Дальнейшее увеличения напряжения сдвигает конус к соплу и даже смещает его внутрь трубки, что приводит к образованию капель полимера на всей длине осажденных нанонитей. Зависимость морфологии нановолокна от некоторых параметров согласно работе [57] представлена в таблице 9.1.

Таблица 9.1. – Зависимость морфологии нанонитей от параметров процесса электроспиннинга

Параметр	Влияние		
Напряжение между соплом и	При увеличении напряжения сначала диаметр нити		
осадительным электродом	уменьшается, потом начинает возрастать		
Скорость подачи полимерного раствора	Диаметр нанонитей увеличивается с увеличением		
	скорости, при больших скоростях появляются капли		
	полимера на нитях		
Расстояние между соплом и осадительным электродом	При увеличении расстояния диаметр нитей		
	уменьшается, при слишком маленьком расстоянии		
	появляются капли полимера на нитях		
Электропроводность раствора	Диметр нитей уменьшается при увеличении		
	электропроводности		
Летучесть растворителя	Чем выше летучесть, тем выше пористость нановолокон		

В качестве полимеров используется большое количество материалов с большим молекулярным весом, таких как поликарбонат, поливиниловый спирт, оксид полиэтилена, полистирен, поливинилпироллидон и др. Растворители подбираются исходя из растворимости конкретного полимерного материала и необходимой пористости получаемых волокон.

Если в раствор для элекстроспининнга кроме полимерного материала добавить еще и прекурсор на основе Zn, Sn, Cu, Ni, Ti, Si, Co, Al, In, то можно получать полупроводниковые и металлические нанонити. Для этого после добавления и гомогенизации раствора его наносят на подложку с помощью электроспиннинга. Затем подложку помещают в печь для удаления полимерного соединения и кристаллизации нити.

При нанесении нити располагаются хаотически, если осадительный электрод представляет собой некоторую неподвижную плоскость. Для того чтобы получать предпочтительную ориентацию волокна используется различные осадительные электроды, в том числе вращающиеся (барабаны, диски), имеющие специальную форму (параллельные, крестообразные и кольцевые) и их комбинации. С помощью электроспиннинга были получены нанонити из ZnO, CuO, NiO, TiO₂, SiO₂, Co₃O₄, Al₂O₃, SnO₂, In₂O₃, Fe₂O₃.

9.3. Нанорезонаторы

Несмотря на то, что в настоящие время существует ряд устройств, относящихся к НЭМС, таких как нанозахваты (nanogrippers) или наноэлектромеханические реле, основным составным элементом НЭМС являются нанорезонаторы различной конфигурации. Это могут быть нанобалки или наномостики, то есть структурно это некоторый одномерный элемент наноразмерного диаметра с длиной порядка сотен нанометров имеющий одну или две точки прикрепления. Вариант такой структуры (наномостик) представлен на рисунке 9.5.



Рисунок 9.5. Нанорезонатор мостикового типа.

Данные типы резонаторов могут быть использованы как сверхчувствительные измерители малых сил (в том числе сил инерции), смещений и масс. Все эти измерения основываются этих физических величин на резонансную частоту. Чтобы понять принцип действия нанорезонатора обратимся к схеме на рисунке 9.6.



Рисунок 9.6. Схема измерений с помощью нанорезонаторовх.

Для того чтобы резонатор начал колебаться на некоторой резонансной частоте необходимо наличие внешних сил, приводящих колебательную систему в движение. Для этого применяют два способа, основанные на электростатических или электромагнитных силах. При этом эти способы также связаны также и со способом измерения резонансной частоты.



Рисунок 9.7. Нанорезонатор с электродвижущей схемой измерения.

В электродвижущем методе нанорезанатор начинает колебаться за счет сил электростатического притяжения и отталкивания между двумя параллельными плоскостями (рисунок 9.7). На рисунке изображен микромостик, рядом с перемычкой которого находится металлический контакт. Между этим третьим контактом (его можно назвать затвором) и балкой есть небольшой зазор, таким образом, этот контакт и балка представляют собой конденсаторную структуру с емкостью *Cg*. При приложении переменного напряжения *V*s между балкой и затвором за счет сил электростатического притяжения и отталкивания балка будет приводиться в колебательные движения. Электрическую схему подобного контура можно преобразовать в следующий вид:



Рисунок 9.8. Эквивалетная электрическая схема нанорезонатора с электродвижущей схемой измерения.

Емкость C_m , индуктивность L_m , и сопротивление R_m являются собственными характеристиками нанобалки. Изменяя частоту напряжения V_s и измеряя протекающий через балку ток можно на некоторой частоте можно увидеть его максимум, обозначающий резонансную частоту колебательного контура.

Другим методом генерации колебаний и измерения является магнитодвижущий метод. При этом методе резонатор помещается в постоянное магнитное поле и между его балкой подается переменное напряжение, вызывающее переменный ток. Под действием силы Лоренца балка начинает колебаться в плоскости, перпендикулярной линиям магнитного поля (вдоль оси у, рисунок 9.9). В данном случае эквивалентной схемой будет являться колебательный контур, где емкость C_m , индуктивность L_m и сопротивление R_m соединены параллельно. При достижении резонансной частоты сопротивление контура возрастает и ток, протекающий через него, уменьшается. По этому признаку можно измерить резонансную частоту нанорезонатора.



Рисунок 9.9. Нанорезонатор с магнитодвижущей схемой измерения.

Также существует другой метод измерения резонанса при магнитодвижущем или электродвижущем способе колебаний, основанном на оптических измерениях смещения балки. Для этого балку приводят в колебательное движения одним из описываемых ранее методов и встраивают в схему интерферометра Майкельсона, как одно из его плеч (рисунок 9.10). По получаемой интерференционной картине можно судить о том, на какой частоте будет происходить резонанс, который характерен максимальной амплитудой колебаний резонатора.



Рисунок 9.10. Оптический способ измерения резонансной частоты нанорезонатора.

Данная резонансная частота может быть оценена теоретически. Для основной моды колебаний микромостика с балкой, длина которой значительно больше толщины, можно получить следующую формулу для резонансной частоты f_0 :

$$f_0 = \sqrt{(E/\rho) * t/L^2},$$
(9.1)

где Е – модуль Юнга, ρ - плотность, t – толщина балки вдоль направления движения, L – длина балки. Для повышения чувствительности измерений величин с помощью нанорезонаторов необходимо уменьшить сторонние воздействия, прежде всего тепловые колебания (для температуры T=50 мК частота резонатора $\omega = k_B T/\hbar \sim 1 \Gamma \Gamma \mu$). Поэтому для нанорезонаторов требуется изготовления структур с максимальной резонансной частотой. Согласно формуле (9.1.) для этого требуется использовать наиболее упругие и легкие материалы. При этом требуется уменьшить длину балки и увеличить ее толщину. Для примера возьмем кремний, для которого E = 110 ГПа, $\rho = 2300$ кг/м³. Для комнатной температуры частота резонатора для уменьшения тепловых воздействий должна составлять порядка $\omega = k_B T/\hbar \sim 10 T \Gamma$ ц, что дает отношение ширины балки к квадрату длины $\sim 10^{10}$. То есть при длине балки в 100 нм ее толщина должна составить 100 мкм, что не вписывается в модель длинной балки. При уменьшении температуры до 50 мК необходимая резонансная частота падает до $\omega = k_B T/\hbar \sim 1 \Gamma \Gamma \mu$ и толщина балки уменьшается до 10 нм, что вполне вписывается в модель. Кроме сохранения геометрических пропорций необходимо учитывать, что уменьшение размеров балки ведет к увеличению влияния поверхностных эффектов, так как уменьшается соотношения объема балки к площади ее поверхности.

При наличии охлаждения нанорезонатора до гелиевых температур и сохранении геометрических размеров можно модулировать резонансную частоту подбором материала балки. Рассмотрим в таблице 9.2. наиболее распространеные материалы для изготовления нанобалок:

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Плотность, кг/м ³
Si	110	2400
SiC	440	3200
AlN	345	3300
Алмазоподобный углерод	1000	3500

Таблица 9.2. – Распространенные материалы для балок нанорезонаторов

Таким образом, наиболее подходящим материалом для изготовления нанобалок является алмазоподобный углерод, имеющий максимальное отношение модуля Юнга к

плотности. Однако сложность изготовления нанонитей из подобного материала побуждает исследователей к использованию более доступного карбида кремния и нитрида алюминия.

Важными параметрами нанорезонатора является добротность колебательного контура и потребляемая при измерении резонансной частоты мощность. Высокая добротность позволяет повысить разрешающую способность датчика на основе наорезонатора. Малая мощность является его преимуществом по сравнению с аналогичными МЭМС устройствами. В настоящий момент потребляемая мощность нанорезонаторов не превышает значений 1 мкВт. Добротность же колебательного контура довольно велика и достигает значений до 10⁴ (таблица 9.3.). Также в данной таблице представлена резонансная частота контура.

Таблица 9.3. –Добротность и резонансная частота нанорезонаторов на основе различных материалов

Материал НМР	Темпера- тура, К	Частота основной гармоники f ₀ , МГц	Доброт- ность <i>Q</i>
Si	4,2	70	2×10^4
Si	25	80	$1,3 imes 10^4$
Si	20	25,598	3×10^4
SiC	4,2	198	1×10^3
SiC	20	71,91	4000
SiC	4,2	190 - 1029	500 - 5200
Pt	4	105,3	8500
Au	4	39	5000
Au	4,2	54,38	7510
Ti	4,2	194,47	3180
Al	4,2	180,86	5320
SiN	293	0,133	$1,1 imes 10^6$

Принцип работы датчиков на основе нанорезонаторов основывается на изменении резонансной частоты. При этом можно измерить малые изменения масс, сил и смещений. Измерение малых масс основано на изменении массы балки и как следствие резонансной частоты. Такое изменение может быть связано с осаждением атомов и молекул исследуемого материала на поверхность балки. Увеличение массы балки приводит уменьшению резонансной частоты (в простом случае ее можно выразить как SQRT(k/m), где k- это коэффициент жесткости балки, а m – ее масса). В таблице 9.4. представлены ряд датчиков малых масс и их чувствительность по сдвигу резонансной частоты и минимально измеренная масса. Можно отметить, что минимально измеренная масса

приближается к 10² а.е.м., что позволяет измерять массу не молекул полимеров и белков, но и простых соединений.

Наименьшая измеренная масса, а.е.м.	Чувствитель- ность по сдвигу частоты $\delta f_0 / \delta M$, $\Gamma \mathbf{u} (10^{-21} \mathbf{r})^{-1}$	Резонанс- ная час- тота f ₀ , МГц	Доброт- ность резона- тора
$4,9 imes10^4$	12	428	
$1,52 imes 10^6$	$3 imes 10^{-3}$	32,8	3000
$4,0 \times 10^{3}$	1	133 190	5000
15×10 ³ (300 K) 840 (5 K)	11×10^3	143	50 (300 K) 865 (5 K)
200 (300 K)	0,104	328,5	1000 (300 K)
$2,35 \times 10^5$		13,36	8 500
50 (6 K)		300	200
$1,8 imes 10^9$	0,01		10000

Таблица 9.4. – Характеристики датчиков малых масс на основе нанорезонаторов

Измерения малых сил и смещений основано на изменении частоты колебательного контура в поле этой силы. Согласно следующей формуле можно измерить эту силу, зная коэффициент упругости балки *k* и измерив изменение резонансной частоты Δω:

$$\Delta \omega = \omega 0 * \sqrt{(1 - F'/k) - 1}, \qquad (9.2)$$

где ω_0 – исходная резонансная частота, F' – производная внешней силы по смещению вдоль оси движения балки. Если известны теоретические зависимости значения силы (например, силы Ван-дер-Вальса) от расстояния до некоторого движущегося объекта, то измеряя силу можно определить смещение этого объекта относительно изначального положения.

10. Герметизация и корпусирование МЭМС

10.1. Системы упаковки

Основными строительными технологическими блоками всех электронных продуктов, будь то персональный компьютер, DVD-плеер, мобильный телефон или подушка безопасности в машине, являются четыре основные технологии: микроэлектроника, радиочастотные беспроводные линии связи, фотоника и МЭМС.

Пятой технологией, которая объединяет все эти системы в готовый продукт, является система упаковки, изображенная на рисунке 10.1. [74]



Рисунок 10.1. Схема, иллюстрирующая интеграцию микросистемных технологий

Интегральная схема (ИС) определяется как микроэлектронное устройство, которое объединяет такие элементы, как транзисторы, резисторы, диэлектрики и конденсаторы в электрические цепи, обладающие определённой функцией (первый уровень).

Система упаковки – корпусирование, является мостом, который соединяет ИС и другие компоненты в систему на уровне системной платы для формирования конечного электронного продукта. Типичным применением системы корпусирования устройства является корпусирование микропроцессора в компьютере. По сути, любой электронный продукт содержит: (1) полупроводниковые устройства, такие как ИС, (2) систему упаковки, чтобы интегрировать эти ИС и другие устройства в компоненты и (3) системные платы, которые объединяют все эти компоненты в системные узлы, которые предоставляют все необходимые функции системы. Эти функции, как правило, электрические, такие как передача цифровых и аналоговых сигналов. Но при этом компоненты, обеспечивающие эти функции, должны также обеспечивать необходимые механические и химические функции. Микроэлектроника и система упаковки являются Рисунок частями всех этих компонентов. 10.2. иллюстрирует неотъемлемыми упаковочные системы второго уровня на уровне системной платы, содержащие процессор, память и другие микросхемы в персональных компьютерах (а), сотовых телефонах (б) и автотранспорте (с). [74]





(б)



Рисунок 10.2. Упаковочные системы в персональных компьютерах (a), в сотовых телефонах (б) и в автотранспорте (c).

Такие продукты как мэйнфреймы и суперкомпьютеры требуют очень большого количества микросхем. По сегодняшним меркам, одноуровневая системная плата не может вместить все компоненты, необходимые для формирования общей системы, так как некоторые из них требуют несколько процессоров, чтобы обеспечить чрезвычайно высокую пропускную способность транзакций. Эти типы систем могут быть использованы для управления большими объёмами данных, таких как системы бронирования авиабилетов или корпоративной сети ЭВМ, или процесса создания снимков с высоким разрешением, например для некоторых видов медицинского оборудования. В этом случае соединители и кабели обычно соединяют несколько плат вместе, чтобы создать необходимую систему. Это называется третий уровень упаковки. Иерархия трёх уровней упаковки показана на рисунке 10.3. [74]



Рисунок 10.3. Иерархия трёх уровней упаковки.

10.2. Основные компоненты, процессы и материалы технологии упаковки

10.2.1. Корпусирование отдельного чипа

Корпусирование отдельного чипа (Single chip package (SCP)) – это комплекс, поддерживающий единый микроэлектронный прибор так, чтобы его электрические, механические, термические, химические и производительные потребности были обслужены должным образом.

В микроэлектронном производстве корпусирование интегральной схемы является заключительным этапом изготовления полупроводникового устройства, в котором крошечный блок из полупроводникового материала, упакован для сохранения. Корпусирование предотвращает физические повреждения и коррозию. Корпусирование, или "упаковка", поддерживает и предоставляет доступ к электрическим контактам, с тем, чтобы подключить чип к монтажной плате. Термин корпусирование иногда путают с электронной упаковкой, являющейся монтажной (установочной) и соединительной между ИС и другими компонентами печатной платы. Блок упакован так, как это показано на рис. 10.4. Изначально, будучи частью кремниевой пластины с ИС на ней, чип аккуратно вырезается из пластины, затем корпусируется и подвергается контролируемым электрическим тестам (Burn-In) на испытание пригодности. Такой упакованный блок может содержать миллионы транзисторов или интегральных микросхем. [74]





Пример корпуса LGA-10L (2.5 x 2.5 x 0.76 mm) для МЭМС UVIS25 производство компании STMicroelectronics , которая использует цифровой датчик ультрафиолета солнечного излучения , приведен на рисунке 10.5.



Рис. 10.5. Корпус LGA-10L для МЭМС UVIS25

10.2.2. Корпусирование на уровне пластины

Корпусирование на уровне пластины (wafer-level packaging (WLP)) – технология упаковки интегральной схемы, когда она ещё является частью пластины, в отличие от более традиционного способа нарезки пластины на отдельные матрицы, а затем их упаковки. В большинстве случаев упаковочного процесса, сначала делается разрезание пластины (wafer dicing) на матрицы (dies), а затем упаковывают матрицу в индивидуальную пластиковый корпус, к которому присоединяются паянные шарики (шишки) – (solder bumps). Корпусирование на уровне вафли включает в себя крепления верхнего и нижнего наружных слоёв упаковки, также припаивание шариков – шишек (solder bumps) к ИС, все ещё находящейся на пластине и только после этого пластина режется. [74]

Соединение с печатной платой	Материал для инкапсуляции	Герметичность	Инкапсуляция
		Герметичный	1. Molding - Молдинг
Сквозное	Пиастиковий	(дорогой;	(отливка) негерметичное,
отверстие	Пластиковыи	надёжный;	используются как
		материалы:	термореактивные, так и

Таблица 10.1. Разные типы корпусирования для отдельного чипа.

		стекло,	термопластический
		керамика,	полимеры.
		металл)	2. Glob Тор – капля
Поверхностный	Керамический	Иа рарматични ий	полимера распределяется
монтаж		петерметичный	на поверхность чипа или
Массивом	Металлический	Около герметичный	соединение
			контактов/проводов.
			3. Lead sealing -
			герметичное
			запечатывание (Lid
			sealing) при помощи
			сварки, пайки, с
			использованием
			специального стекла.

За передачу и обработку, количество входящих и исходящих сигналов отвечают специальные контакты (штыри) (pins), присоединённые к корпусу.

Для расчёта количества входящих/исходящих соединений используется правило Рэнта. Это правило относится к организации вычислительной логики, а конкретно, отношение между количеством контактов для соединения внешних сигналов к логическому блоку с числом логических ворот в логическом блоке, и применяется к цепям, начиная от небольших цифровых схем на ЭВМ.

Основная формула:

$$N = K * M^p (1)$$

Где, К – среднее количество контактов в цепи, М –количество ворот / бит, N – количество контактов, Р – (pitch) шаг – номинальное расстояние между линиями сетки или центрами соседних объектов, на любом слое печатной платы. Чем меньше шаг, тем больше объектов расположено на чипе или печатной плате. На рисунке 10.6. показан pin pitch – расстояние между контактами. [65]

40-PIN DIP COMPARED TO 40-PIN CHIP CARRIER



Рисунок 10.6. Pin pitch – расстояние между контактами

Существует два типа расположения контактов на корпусе, Рисунок 10.7.



Рисунок 10.7. Типы расположения контактов на корпусе а) расстояние между контактами - pitch; b) расположение контактов на корпусе по периферии и по площади

Первый это расположение контактов по периферии корпуса. При таком расположении формула для расчёта количества контактов будет:

$$4a = p * N(2)$$

где а – площадь корпуса. Так же будут использоваться такие технологии как:

1. Metal Lead frame package - состоит из металлической конструкции - свинцовой рамы внутри корпуса чипа, через которую происходит передача сигнала из чипа наружу.

- 2. Керамический корпус.
- 3. Поверхностный монтаж или монтаж через сквозное отверстие.

Второй тип расположения контактов на корпусе – это расположение контактов по всей площади (Area Array). При таком расположении формула для расчёта количества контактов будет:

$$a^2 = p^2 * N(3)$$

Особенности и технологии:

- 1. Базируется на подложку.
- 2. Электрическое соединение:
- Электрические провода;

TAB (tape automated Автоматизированная соединяющая лента (Рисунок 10.7) это процесс, который устанавливает голые интегральные схемы на печатной плате (РСВ) путем присоединения их к мелким проводникам в полиимилной полиамидной или пленке, обеспечивая тем самым средства для прямого подключения к внешним цепям;



Рисунок 10.8. Автоматизированная соелиняющая лента

к

Flip Chip - методом перевернутого чипа, также известный как С4, рисунок 10.8., представляет собой способ для соединения полупроводниковых приборов, таких как

ИC, чипы И микро электромеханических систем (MEMS), внешних схемам с помощью формирования контаков ИЗ припоя (solder bumps), нанесенных на контакты плащадки (pins) чипа.

Способы подключения к Рисунок 10.9.Flip Chip – Перевернутый чип 3. печатной плате:

PGA – (Pin Grid Array) состоящий контактов массив, ИЗ штырьков. Используется технология поверхностного монтажа или монтаж в гнезда, как характеристика И преимущество, при таком виде монтажа упакованный чип/систему легко извлечь и заменить, что способствует увеличению надёжности всей системы.





Рисунок 10.10. PGA - массив, состоящий из контактов

• BGA - (Ball Grid Array) – массив, состоящий из контактов – шариков, сформированных их припоя. Преимущество этой технологии -более низкая цена по сравнению с предыдущей. Рисунок 10.11. представляет технологию электрического соединения на основе массива контактов – шариков представлена ниже.



Рисунок 10.11. BGA – массив, состоящий из контактов – шариков сформированных их припоя

Ещё одним способом электрического соединения чипа и подложки или печатной платы является использование проводящих клеёв. В технологиях корпусирования используются много разных типов клеев с разными свойствами и для разных целей, например клеи - электрические изоляторы, электрически проводящие клеи – заполненные металлическими частицами, теплопроводящие – заполненные керамическими частичками и т.п. [74]

Существует три разных вида клеев для систем упаковки:

1. На базе растворов, где полимер растворяется в растворяющем средстве, дальше растворяющее средство выпаривается. Особенность таких видов клеев то, что они могут быть удалены растворителем и нанесены снова.

 Клеи на основе термопластического полимера, т.е. клей который плавится под действием тепла и становится твёрдым при охлаждении. Характеристики: реверсивный процесс, возможность изменить – переделать.

 Клеи реактопласты— пластмассы, переработка которых в изделия сопровождается необратимой химической реакцией, приводящей к образованию неплавкого и нерастворимого материала. Характеристики: показывают хорошие механические, химические, тепловые свойства; могут быть одно или двух компонентные составы; отверждение пластмасс происходит под действием тепла или ультрафиолетового света. Могут быть проблемы связанные с несоответствием коэффициента теплового расширения корпуса и клея, что может привести к дефектам в работе.

Также клеи, используемые в микроэлектроники, можно разделить на подгруппы по их назначению, некоторые используются для изоляции, некоторые используются для заполнения пространства внутри корпуса или между чипом и подложкой (Underfill Epoxy) в этом случае обязательно учитываются законы жидкостной механики, вязкость, коэффициент теплового расширения т п. Некоторые клеи используются для обеспечения прохождения электрического сигнала, например в технологии монтажа Flip Chip. Такие клеи состоят из полимерной матрицы заполненной металлическими частицами. Они делятся на три вида по их электрическим свойствам: изотропно-проводящие клеи (ICA), анизотропно-проводящие клеи (ACA), непроводящие клеи (NCA). [74]

10.2.3. Единый корпус для нескольких чипов

Корпус для нескольких чипов (Multi Chip packaging (MCP)) является общим, в нем собраны вместе электронные компоненты, несколько интегральных схем (ИС), и / или другие дискретных компоненты, все это интегрировано, как правило, на объединяющей подложке, так что при использовании его обрабатывают, как будто это был один компонент (как бы большая ИС).

Отличительные характеристики корпуса для нескольких чипов:

- Вместимость ;
- Выполняет функции как системы так и подсистемы;
- Экономит количество контактов для входящих и исходящих сигналов;
- Экономит пространство.

Одним из ярких примеров использования единого корпуса для нескольких чипов и ИС является датчик содержащий несколько интегральных схем. Корпус такого датчика задействован для объединения дифференциальных сигналов в одиночный; выполняет температурную компенсацию; калибровку; предоставляет соединение для входящих и исходящих сигналов с интегральной схемой и т.д.
Традиционно корпус для нескольких чипов металлический или керамико-металлический представляет собой и называется - гибрид (Рисунок 10.12.), так как сочетает в себе использование нескольких технологий. [74]

Типично для гибридного корпусирования используются подложки из керамики : Al₂O₃;

AlN – обладает пьезоэлектрическими свойствами и высокой ценой; BeO – обладает теплопроводностью и ядовит.

Образование пассивных компонентов таких как конденсаторы, катушки индуктивности, резисторы происходит с использованием техники Thickfilm (Толстая плёнка). Эта техника заключается в том, что паяльная паста клей. обладающие или желаемыми свойствами, печатаются на подложке с использованием трафаретной печати. Высота



Рисунок 10.12. Корпус гибрид

компонентов определяется толщиной оборудования для печати. Довольно сложно добиться маленького расстояния между элементами, также вероятны случаи короткого замыкания из за несовершенства печати.

Существует другая техника образования пассивных компонентов и контактных дорожек - проводов (tracks), такая техника называется Thinfilm. (Тонкая плёнка). Эта техника включает в себя использование стандартных техник производства и травления тонких плёнок. Обычно дорожки на ИС выполнены из золота, так как даже оксид золота имеет хорошие характеристики электрической проводимости. Также при использовании этой техники расстояние между объектами на подложке ограничивается только возможностями и точностями фотолитографии и травления. В производстве сложных гибридов используется и комбинация этих двух способов, сначала используется техника Thinfilm, после которой печатаются необходимые элементы и компоненты, используя технику Thickfilm. [74]

Что касается электрического соединения, как было упомянуто выше, при помещении всех компонентов системы т.е. чипов, пассивных компонентов и т.д. и обеспечения их соединения и передачи сигналов между собой, также к/от корпуса используются несколько стандартных техник.

1. Распайка выводов. (wire bonding). В качестве материала обычно используют, хорошо доказавшие свои качества, алюминий, медь, золото, олово. В этой технике существует два способа создания контакта, первый это Ball bonding, второй wedge

145

bonding. Для создания и крепления проводков применяется лазерная, ультразвуковая сварка, а в качестве материала соединительных проводников обычно используют: алюминий, медь, золото. Для основания устройства: алюминий, медь, золото, олово.

2. TAB (tape automated bond) – Автоматизированная соединяющая лента.

3. Проводящий клей.

4. Flip Chip bonding - Метод перевёрнутого чипа. И обязательный к этому процесс, который называется Under Bump Metallization (UBM). Это специальная металлизация паяных шариков (bumps) необходимая для осуществления надежного контакта между чипом и подложкой. Это является важным шагом для процесса обеспечения надежности электронной аппаратуры. Например, если площадки для пайки аллюминиевые, то процесс пайки будет невозможен, для этого и применяется UBM. Суть способа в том, что эти металлические площадки покрываются пленками из разных металлов, которые выполняют разные функции, например титан и хром для улучшения адгезии между площадкой и следующим металлом, далее вольфрам, как барьерный слой, медь для смачивания, и последний слой из золота наверху, так как даже оксид золота хорошо проводит ток, обеспечивая этим электрическое соединение.[78]

Это лишь краткое описание некоторых техник, технологий и материалов, которые используются в технологическом процессе корпусирования любого устройства микро и Много вопросов, нюансов и эффектов надо учитывать при наноэлектроники. образования корпусировании. Например, ЛО сих пор актуальна проблема интерметаллических соединений при разных металлов. Эти сплаве двух интерметаллические соединения очень хрупки и могут повлиять на механические свойства всей системы, поэтому важно знать фазовые диаграммы сплавов металлов и продолжать исследования в этой сфере. Также учитывать силу поверхностного натяжения расплавленных металлов, смачивание, коэффициент теплового расширение и много многое другое. Технология корпусирование – это соединение нескольких дисциплин, начиная от микроэлектроники, схемотехники и заканчивая материаловедением, большая и нужная область современных технологий, которая постоянно развивается.

146

11. Стандартизация и классификация МЭМС

11.1. Стандарты

Для МЭМС еще не сформировалась устоявшаяся международная система стандартов в классификации, изготовлении и обозначении. В Российской Федерации определяющие приняты только стандарты, терминологию И классификацию микросистемной техники. На данном этапе в Российской Федерации введен в действие основопологающий стандарт ГОСТ Р 0159-002-2008, в рамках которого изделие микросистемной техники (микросистема) определено как совокупность микроэлектронных управляющих и функциональных исполнительных элементов и компонентов в едином конструктивном исполнении, принцип действия которых основан на электрофизических, электромеханических, электрохимических, электроннооптических, фотохимических процессах и явлениях с учетом эффектов масштабирования при переходе от макро- к микро- и наноразмерным уровням.

В числе принятых стандартов:

ГОСТ Р 54843-2011 "Изделия микросистемной техники. Элементы чувствительные микроэлектромеханических преобразователей физических величин. Общие технические условия"

Стандарт распространяется на чувствительные элементы, разрабатываемые и поставляемые в качестве компонентов микроэлектромеханических преобразователей физических величин производственно-технического назначения. Настоящий стандарт не распространяется на чувствительные элементы, предназначенные для применения в пьезоэлектрических приборах.

В области микросистемной техники специального назначения ранее были приняты три стандарта:

• ГОСТ Р 0159-002—2008. Микросистемная техника. Термины и определения.

• ГОСТ Р 0159-003—2008. Микросистемная техника. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

• ГОСТ Р 5962-003—2009. Микросистемная техника. Классификация и система условных обозначений.

В стадии согласования находятся еще два стандарта:

• ГОСТ Р 5962... Микросистемная техника. Преобразователи линейного ускорения микроэлектромеханические. Общие технические условия.

• ГОСТ Р 5962 — Микросистемная техника. Преобразователи угловой скорости микроэлектромеханические. Общие технические условия.

За рубежом многие универсальные стандарты МЭМС разработаны Техническим комитетом по микро- и наноэлектромеханическим системам (МЭМС/НЭМС) при Ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов (SEMI), предназначенные непосредственно для МЭМС-устройств и сенсоров; Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE); Международной электротехнической комиссией (IEC). Ниже, в таблицах 4-6 приведены наиболее популярные зарубежные стандарты в области МЭМС

Таблица 4. Стандарты IEEE Standards Association по тематике «Тестирование и испытание микроэлектромеханических устройств»

N⁰	Код текуший\ранее	Наименование, англ	Наименование, русское
1	IEEE 292-1969	IEEE Specification Format for Single- Degree-of-Freedom Spring-Restrained Rate Gyros	Спецификация для одноосевого подпружиненного гироскопического датчика угловой скорости
2	IEEE 293-1969	IEEE Test Procedure for Single-Degree- of-Freedom Spring-Restrained Rate Gyros	Методика испытаний для одноосевого подпружиненного гироскопического датчика угловой скорости
3	IEEE 517-1974	IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single- Degree-of-Freedom Rate- Integrating Gyros	Технические требования и методика испытаний для интегрирующего одноосевого подпружиненного гироскопического датчика угловой скорости
4	IEEE 671- 1985/Cor 1-2010	IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Nongyroscopic Inertial Angular Sensors: Jerk, Acceleration, Velocity, and Displacement	Технические требования и методика испытаний для безгироскопных инерциальных систем измерения параметров углового движения: рывка, ускорения, скорости и

			смещения
5	IEEE 813-1988	IEEE Specifica-tion Format Guide and Test Procedure for Two-Degree-of- Freedom Dynamically Tuned Gyros	Технические требования и методика испытаний для двухосевых динамически подстраиваемых гироскопов
6	IEEE 952-1997	IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single- Axis Interferometric Fiber Optic Gyros	Технические требования и методика испытаний для одноосевых интерферометрических волоконно-оптических гироскопов
7	IEEE 1431-2004	IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros	Технические требования и методика испытаний для вибрационных гироскопов на основе Кориолесовых сил
8	IEEE 1554-2005	IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis	Рекомендуемые технологии для инерциальных датчиков при их тестировании, проведении с их помощью измерений, получении измеренных данных и их анализа.

IEC (International Electrotechnical Commission)– международная электротехническая комиссия, является ведущей в мире организацией по подготовке и изданию международных стандартов для всех электрических, электронных и смежных технологий.

Таблица 5. Стандарты IEC по тематике « Полупроводниковые микроэлектромеханические устройства»

N⁰	Код	Наименование, англ	Наименование, русское
	текущий\ранее		
1	IEC 62047-1:2016	Terms and definitions	Термины и определения
2	IEC 62047-2:2006	Tensile testing method of thin film materials	Методика испытаний на растяжение тонких пленочных материалов
3	IEC 62047-3:2006	Thin film standard test piece for tensile testing	Стандартный тестовый тонкопленочный образец для

			испытания на растяжение
4	IEC 62047-4:2008	Generic specification for MEMS	Общие спецификации по МЭМС
5	IEC 62047-5:2011	RF MEMS switches	Высокочастотные МЭМС переключатели
6	IEC 62047-6:2009	Axial fatigue testing methods of thin film materials	Осевой метод испытаний на прочность тонких пленочных материалов
7	IEC 62047-7:2011	MEMS BAW filter and duplexer for radio frequency control and selection	МЭМС ОАВ фильтр и дуплексер для стабилизации и выбора радиочастот
8	IEC 62047-8:2011	Strip bending test method for tensile property measurement of thin films	Методика испытания изгиба полос для измерения эластичных свойств тонких пленок
9	IEC 62047- 9:2011/COR1:201 2	Wafer to wafer bonding strength measurement for MEMS	Измерения прочности соединения при склеивании пластин для MEMS
10	IEC 62047- 10:2011/COR1:20 12	Micro-pillar compression test for MEMS materials	Методика испытаний на сжатие МЭМС материалов
11	IEC 62047- 11:2013	Test method for coefficients of linear thermal expansion of free-standing materials for micro-electromechanical systems	Методика измерений коэффициентов линейного теплового расширения свободностоящих материалов для микро-электромеханических систем
12	IEC 62047- 12:2011	Bending fatigue testing method of thin film materials using resonant vibration of MEMS structures	Методика испытаний на прочность тонкопленочных материалов с использованием резонансной вибрации МЭМС структур
13	IEC 62047- 13:2012	Bend - and shear - type test methods of measuring adhesive strength for MEMS structures	Методика испытаний на сдвиг и изгиб для измерений прочности соединения для МЭМС структур
14	IEC 62047- 14:2012	Forming limit measuring method of metallic film materials	Методика измерений предела формовки металлических пленочных материалов
15	IEC 62047- 15:2015	Bend testing methods of thin film materials	Методы тестирование изгиба тонкопленочных материалов
16	IEC 62047- 16:2015	Electronic compasses	Электронные компасы

17	IEC 62047- 20:2014	Gyroscopes	Гироскопы
18	IEC 62047- 21:2014	Test method for Poisson's ratio of thin film MEMS materials	Методика измерений коэффициента Пуассона в тонких пленках МЭМС материалов
19	IEC 62047- 22:2014	Electromechanical tensile test method for conductive thin films on flexible substrates	Электромеханический метод испытания на растяжение для проводящих тонких пленок на гибких подложках

Интерес представляют стандарты технического комитета по микро- и наноэлектромеханическим системам (МЭМС/НЭМС) при Ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов (SEMI), предназначенные непосредственно для МЭМС-устройств и сенсоров.

N⁰	Код	Наименование, англ	Наименование, русское
	текущий\ранее		
1		Guide to Specifying Wafer	Руководство по совмещению,
	SEMI MS1-0812	Wafer Bonding Alignment	используемые при склеивании
		Targets	пластин.
2			Методика определения высоты
		Test Method for Step Height	ступенек тонких пленок
	<u>SEMI MS2-1113</u>	Measurements of Thin Films	
2	CEMING2 0207		
3	<u>SEMI MS3-0307</u>	Terminology for MIENIS	терминология для мэмс
	SEMI MS-9397.	Technology	технологии
4		Standard Test Method for	Стандартный тестовый метод
		Young's Modulus	определения модуля Юнга тонких
	<u>SEMI MS4-1113</u>	Measurements of Thin,	отражающих пленок
	SEMI MS4-1107	Reflecting Films Based on	на основе частоты
		the Frequency of Beams in	балок при резонансе
		Resonance	
5	SEMI MS5 0912	Test Method for Wafer	Тестовый метод для измерения
	<u>SENII NISS-0015</u>	Bond Strength	прочности склеивания пластин с
	SEMI MS5-1211	Measurements Using Micro-	помощью микрошевронных
	SEMI MSJ-1211	Chevron Test Structures	тестовых структур
6		Guide for Design and	Руководство по дизайну и
	SEMI MS6-0308	Materials for Interfacing	материалам устройств сопряжения
		Microfluidic Systems	микрофлюидных систем.
7	SEMI MS7-0708	Specification for	Спецификация по сопряжению
	<u>SEMII INIS/-0/00</u>	Microfluidic Interfaces to	микрофлюидных устройств с

Таблица 6. Стандарты SEMI по тематике « Микроэлектромеханические устройства»

		Electronic Device Packages	корпусами электронных приборов.
8	SEMI MS8-0309	Guide to Evaluating Hermeticity of MEMS Packages	Руководство по оценке герметичности корпусов МЭМС
9	<u>SEMI MS9-0611</u>	Specification for High Density Permanent Connections Between Microfluidic Devices	Спецификация для высокоплотных долговременных соединений между микрофлюидными приборами
10	<u>SEMI MS10-</u> 0912	Test Method to Measure Fluid Permeation Through MEMS Packaging Materials	Тестовый метод по измерению газопроницаемости материалов корпусов МЭМС

Достаточно подробное описание стандартов SEMI представлено в статье [47]. Отметим наиболее важные из них.

SEMI MS-9397 – стандарт, определяющий термины, используемые в опубликованных документах SEMI, касающихся проблем МЭМС. Это важно, поскольку термины, используемые для описания МЭМС, часто существенно отличаются от терминов полупроводниковой электроники.

SEMI MS8-0309, SEMI MS10-0912 – стандарты, устанавливающие метод оценки герметичности и газопроницаемости материалов корпусов МЭМС. В описании стандарта представлены формулировки всех аспектов герметичности. Корпуса МЭМС не должны препятствовать перемещению смонтированных в них элементов. Особое внимание уделено газопроницаемости материалов-уплотнителей, по значению которой определяется – годен или негоден этот материал для применения в качестве уплотнителя. Этот параметр имеет первостепенное значение для обеспечения герметичности корпуса.

SEMI MS7-0708 – промышленный стандарт на микрофлюидные средства сопряжения с корпусами электронных приборов. Рассмотрены особенности соединения и требования к сопряжению электрофлюидных интегральных схем (Electro-Fluidic Integrated Circuits, EFICs) и микроразмерных плат их соединения. Назначение стандарта – расширение возможностей технологии электронных приборов, сочетающих электронные и жидкостные устройства.

11.2. Классификация

При классификации микросистем используются различные подходы. Хотя для всех классификаций используется терминология МЭМС, в этот класс микросистем входят

наряду с микромеханическими также оптомеханические и биомеханические системы. Наиболее логически выстроенная система классификации представлена в работе[19].

К классификационным признакам МЭМС принято относить степень функциональности, вид конструктивно-технологического исполнения, вид входного сигнала (физической величины), вид выходного сигнала (воздействия), область применения и назначение.

По степени функциональности МЭМС подразделяют на полные и неполные микросистемы.

Полные микросистемы, как правило, содержат микроустройства или элементы, выполняющие функции приема, преобразования, хранения и передачи информации, энергии и движения, а также функции выработки управляющего воздействия в требуемых условиях эксплуатации на окружающую среду.

В неполных микросистемах одна из перечисленных функций отсутствует. К неполным микросистемам относятся информационно-управляющие микросистемы и микросистемы исполнения.

По виду конструктивно-технологического исполнения МЭМС подразделяют на интегральные, гибридные и модульные микросистмеы.

Интегральные микросистемы представляют собой устройства, элементы которых нераздельно выполнены и соединены в объеме и (или) на поверхности кристалла.

Гибридные микросистемы содержат компоненты, выполненные с использованием различных материалов и технологий и соединенные между собой на единой конструктивной основе.

Модульные микросистемы конструктивно объединяют несколько микроустройств в целях совместного применения для выполнения заданных функций.

По виду входного сигнала МЭМС подразделяют на микросистемы, воспринимающие температуру, давление, скорость, ускорение, силу, электрический сигнал, излучение, состав среды, концентрацию вещества и т.д.

По виду выходного сигнала МЭМС подразделяют на устройства с выходными сигналами: электрическими, оптическими, механическими, тепловыми, химическими (биохимическими) и т.д.

Классификация МЭМС по назначению и примеры представлены в табл. 11.1.

Таблица 11.1. Классификация МЭМС по назначению

Назначение	Примеры
Микроэлектромеханические системы	Микромеханизмы, микроприводы,

и машины	микродвигатели
Оптомеханические микросистемы	Микрооптика, оптомеханические интегральные схемы, микрозеркала
Биотехнические микросистемы	Автономные микросистемы для диагностики и лечения организма и замещения органов
Микросистемы энергообеспечения	Автономные миниатюрные источники энергии, микротурбины, микросистемы рекуперации энергии
Сенсорные микросистемы	Мультисенсоры, интеллектуальные сенсоры с обратной связью
Микроаналитические системы	Миниатюрные аналитические приборы
Технологические микросистемы	Микрореакторы, микроинструменты, микрорегуляторы, микронасосы
Мини- и микроробототехнические системы	Автономные многофункциональные диагностические и технологические мини- системы для специальных условий эксплуатации

11.3. Условные обозначения

Для системы условных обозначений МЭМС также нет единого стандарта.

Стандарты условных обозначений для интегральных схем, определенных ГОСТ 18725-83 «Микросхемы интегральные», состоит из четырех элементов.

Первый элемент - цифра, соответствующая классификации по конструктивнотехнологическим признакам: полупроводниковые-1, 5, 7; гибридные - 2, 4, 6; прочие (пленочные, керамические, вакуумные) - 3.

Второй элемент - две (три) цифры, присвоенные данной серии ИМС как порядковый номер разработки серии. Таким образом, первые два элемента в виде набора трех (четырех) цифр составляют полный номер серии ИМС.

Третий элемент - две буквы, обозначающие подгруппу и вид ИМС - функциональное назначение ИМС .

Четвертый элемент - порядковый номер разработки конкретной ИМС в данной серии, в которой может быть несколько одинаковых по функциональным признакам ИМС.

Первый и второй элементы вместе - серия ИМС.

Например, К2УН242 означает: К—микросхема, используемая в устройствах широкого применения; 2 — группа конструктивно-технологического исполнения; УН — усилитель низкой частоты; 242 — порядковый номер разработки серии.

По аналогии со стандартом для ИМС автором [18] предложена следующая система условных обозначений для МЭМС.

Условные обозначения МЭМС для полной технической идентификации типа должно состоять из следующего набора символов:

 $\underbrace{XXX}_{1} \underbrace{X}_{2} \underbrace{XXX}_{3} \underbrace{XXX}_{4} \underbrace{XX}_{5} \underbrace{X}_{6} \underbrace{X}_{7} \underbrace{X}_{8} \underbrace{X}_{9}$

 категория качества изделия (обозначается соответствующим набором из двух или трех буквенных знаков);

2 – вид исполнения: 1, 3, 5, 6, 7, 9 – интегральные изделия; 2, 4, 8 – гибридные изделия; 0 – гибридно-модульные изделия;

3 – номер разработки конкретного вида исполнения (состоит из трех цифр (от 000 до 999) или двух цифр (от 00 до 99); вторая и третья позиции в данном элементе условного обозначения в совокупности составляют номер серии изделия);

4 – обозначение вида изделия (МСТ – полная; МСУ – информационноуправляющая и МСИ – исполнительная микросистемы);

5 – номер разработки конкретного изделия в серии (состоит из одной или двух цифр (от 1 до 99));

6 – буквенное обозначение вида входного сигнала (физической величины или воздействия): А – акустическое давление; Б – биологические и одорантные факторы; Г – концентрация вещества в газовой среде; Д – давление (разность давлений и т.п.); Е – изменение емкости; Ж – концентрация вещества в жидкости; Л – линейное ускорение; М – механическое воздействие; О – оптический сигнал, световой поток; П – магнитное поле, магнитный поток; Р – радиационные излучения; С – сейсмическое воздействие; Т – температура, перепад температур, тепловой поток; У – угловая скорость; Х – химические, взрывчатые и отравляющие вещества, агрессивные среды; Э – электрический сигнал; И – иное;

7 – буквенное обозначение вида выходного согнала-воздействия: А – аналоговый электрический сигнал; Б – биологическое воздействие; М – механическое воздействие; О
– оптический сигнал; П– пиротехническое воздействие; Ц – цифровой электрический сигнал; Х – химическое воздействие; И – иное;

8 – буквенное обозначение, указывающее на отличие типономинала микросистемы
 в составе одного типа по условиям эксплуатации, значениям нормируемых параметров и

155

т.п. (содержит буквы русского алфавита от А до М (кроме 3 и Й), отсутствие обозначения указывает на отсутствие таких отличий для изделия конкретного типа);

9 – обозначение видов корпуса или бескорпусного исполнения (H – бескорпусное исполнение; Π – корпус 1-го типа; Р – корпус 2-го типа; С – корпус 3-го типа; Т – корпус 4-го типа; У – корпус 5-го типа; Φ – корпус 6-го типа). Типы корпусов приведены в соответствии с ГОСТ 17467. При использовании корпуса, разработанного для конкретного изделия, его обозначение не приводится.

Пример полного условного обозначения МЭМС: 1999МСТ2ТМАУ,

где 1 – исполнение интегральное; 999 – номер разработки; МСТ – полная микросистема; 2 – номер разработки в серии 1999; Т – входная физическая величина – температура; М – выходное воздействие – механическое; А – типономинал группы «А»; У – в корпусе 5-го типа.

12. Задачи

1. Кварцевая балка с квадратным сечением со стороной t=300 нм является частью одноосевого датчика ускорения и прикреплена к подвижному грузу массой m=50 микрограмм. Датчик был прикреплен к радиоуправляемой модели самолета, который при проведении маневра приобрел ускорении в направлении оси датчика a=10 м/c². Учитывая, сигнал датчика снимается с боковых граней балки, какое напряжении будет получено на его выходе? Модуль Юнга для кварца E_m = 76.5 ГПа, пьезоэлектрический модуль d = 2.31×10^{-12} Кл/H?

Решение:

$$E_m = \frac{F \cdot l}{S \cdot \Delta l} = \frac{m \cdot a \cdot l}{t^2 \cdot \Delta l} \qquad => \qquad \frac{\Delta l}{l} = \frac{m \cdot a}{t^2 \cdot E_m}$$
$$d = \frac{\Delta l/l}{E} = \frac{\Delta l/l}{V/t} = \frac{\Delta l \cdot t}{V \cdot l} \qquad => \qquad \frac{\Delta l}{l} = \frac{d \cdot V}{t}$$
$$V = \frac{m \cdot a}{d \cdot t \cdot E_m} \approx 9.4 \text{ B}$$

2. Балка из алюминия с квадратным сечением со стороной d=1 мкм и длиной 1=50 мкм одним концом прикреплена к материалу с малой теплопроводностью, а другим упирается в опору микрозеркала, задающего его наклон. Известно, что в начальный момент времени зеркало наклонено на 30 градусов относительно плоскости подложки, а изменение угла наклона $\Delta\theta$ от смещения опоры Δ l определяется линейным законом: $\Delta\theta=\beta\cdot\Delta$ l. На поверхности кремниевой балке расположены токопроводящие металлические электроды с суммарным сопротивлением R=100 Ом, по которым протекает электрический ток I = 1 мА, вследствие чего балка нагревается и расширяется. Какое время t потребуется для изменения угла наклона зеркала на $\Delta\theta = 10^\circ$, если считать, что вся поступаемся от нагревателя мощность, тратится на нагрев балки? Насколько измениться температура балки? Излучением и теплопроводностью можно пренебречь. Линейный коэффициент теплового расширения алюминия $\alpha = 2.2 \times 10^{-5}$ 1/°C, удельная теплоемкость алюминия C= 900 Дж/(кг·K), плотность $\rho = 2700$ кг/м³. Коэффициент $\beta = 30^\circ$ /мкм.

Решение:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta T \implies \Delta T = \frac{\Delta \theta}{\beta \cdot l \cdot \alpha} \approx 300 \text{ K}$$
$$E = l^2 \cdot R \cdot t = C \cdot \rho \cdot d^2 \cdot l \cdot \Delta T \implies t = \frac{C \cdot \rho \cdot d^2 \cdot l}{l^2 \cdot R} \cdot \Delta T \approx 360 \text{ мкс}$$

3. Вывести уравнение для вычисления минимального напряжения V_p , необходимого для включения электростатического МЭМС-ключа, представленного на рисунке. Ширина и длина нижней пластины равна W. Зазор между верхней и нижней пластиной ключа = g. Жесткость верхней пластины равна k. Считаем, что в зазоре между пластинами - вакуум.



Решение:

Найдем суммарную потенциальную энергию системы при приложении напряжения V отклонении верхней пластины на величину х:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \cdot W^2}{g - x} \cdot V^2$$
(1)

Найдем действующие силы, продифференцировав (1) потенциальную энергию по *x*:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \cdot W^2}{(g-x)^2} \cdot V^2 - kx$$
(2)

При приложении малых напряжений жесткость системы будет способна уравновесить силу электростатического притяжения и уравнение (2) будет иметь решение. Однако при увеличении напряжения до порогового V_p рациональное решение квадратного уравнения перестанет существовать, показывая, что система не может находиться в стационарном состоянии и при этом образуется нестабильность, при которой ключ замыкается. Найти это значение можно продифференцировав уравнение (2) по х и приравняв его нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\varepsilon_0 \cdot W^2}{(g-x)^3} \cdot V^2 - k = 0$$

Из уравнения (2) можно выразить часть $\frac{\varepsilon_0 \cdot W^2}{(q-x)^2} \cdot V^2$ через 2kx:

$$\frac{2kx}{g-x} - k = 0 \implies x = \frac{1}{3}g$$

То есть при приближении верхней балки на 1/3 ширины зазора происходит замыкание ключа. Найдем V_p при этом смещении (подставляя в уравнение (2)):

$$V_p = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{k \cdot g^3}{\varepsilon_0 \cdot W^2}}$$

4. Определить собственную частоту ω кремниевого кантилевера квадратного сечения со стороной d=500 нм, учитывая, что эффективная масса кантилевера m_{eff} составляет 33/140 от его действительной массы Длина кантилевера l= 10 мкм, модуль Юнга для кремния E_m= 109 Гпа, плотность кремния $\rho = 2330$ кг/м³.

Решение:

Для односторонне закреплённого кантилевера коэффициент упругости k вычисляется по формуле:

$$k = \frac{E_m \cdot d \cdot d^3}{4 \cdot l^3}$$
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}} = \sqrt{\frac{140}{33} \frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{140}{33} \frac{E_m \cdot d^4}{4 \cdot l^4 \rho \cdot d^2}} = \frac{d}{l^2} \sqrt{\frac{140}{132} \frac{E_m}{\rho}} \approx 35.2 \text{ MFm}$$

Список литературы

Монографии и учебные пособия

1.Сивухин Д.В. *Общий курс физики*. В 5 т. / Сивухин Д.В. 4-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. Том І. Механика,- 520 С. ; Т. 2, Термодинамика и молекулярная физика.- 551 С. ; Т.3. Электричество.- 687 С. ; Том 4. Оптика.- 752 С. ;

2. Гуртов В.А. *Твердотельная электроника.* – 3-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2008. – 512 с.

3. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. *Физика твердого тела для инженеров*. Издание 2-е, доп. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.

4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теория упругости*// 4-е изд., испр. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., -1987. - 248 С.

5. Б.Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. Электрохимия — 2е изд., испр. и перераб. — М.: Химия, КолосС, - 2006. — 672 с.

6. Технология СБИС Технология СБИС: В 2-х кн. Под ред. С. 3и.- М: Мир.-1986.-Т.1.- 453 С; Т.2.- 404 С.

7. Опадчий Ю.Ф. *Аналоговая и цифровая электроника*\ Учебник М.: Издательство: "Горячая Линия – Телеком»: 2000 .- 768 с

8. N. Maluf, An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering, Artech House, 2004, 304 pp.

9. C. T. Leondes, *MEMS/NEMS*, Springer : New York, 2006, 2188 pp.

10. M. Gad-el-Hak, MEMS: Applications, CRC Press, 2005, 568 pp.

11. A. D. Kelkar, D. J.C. Herr and J. G. Ryan, *Nanoscience and Nanoengineering: Advances and Applications*, CRC Press, 2014, 331 pp.

12. R. Ghodssi and P. Lin, MEMS Materials and Processes Handbook, Springer, 2011, pp. 1187.

13. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. Fifth Edition / J. Fraden. - Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 758 p.

14. В. Варадан, К. Виной и К. Джозе, "ВЧ МЭМС и их применение", Техносфера, 2004. - 263 стр.

15. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. - 592 с.

16. Эггинс Б. *Химические и биологические сенсоры* / Б. Эггинс. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.

17. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. *Композитные материалы. Механика и технология /* Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.

Мухуров Н.И., Ефремов Г.И. Электромеханические микроустройства
 [Электронный ресурс] / Н.И. Мухуров, Г.И. Ефремов. - Минск: Белорусская наука, 2012. –
 258 с.

19. Баршутина М.Н. *Микромехатроника* / М.Н. Баршутина. - Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 219 с.

20. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.

21. Васильев В.А. *Нано- и микроэлектромеханические системы:* учебное пособие / В.А. Васильев, Н.В. Громков, Т.Н. Рыжова.- Пенза: Изд-во ПГУ,- 2009.- 80 с.

22. Тимошенков С.П. *Микроэлектромеханические системы: уч. пособие*/ С.П Тимошенков, В.В. Калугин, С.А. Анчутин, Е.С. Морозова.- М.: МИЭТ, 2009.- 52 С /

23. W. Ehrfeld, F. Gotz, D. Munchmeyer, W. Schelb and D. Schmidt, LIGA process: sensor construction techniques via X-ray lithography, *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, USA, 6-9 June 1988.

24. S. Y. Chou, P. R. Krauss and P. J. Renstrom, Nanoimprint lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, 14, 6, 1996.

25. H. Lan, Y. Ding and H. Liu, *Nanoimprint Lithography: Principles, Processes and Materials*, Nova Science Publishing, 2011, pp. 73.

26. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Device*. Third Edition / S. M. Sze, K. Ng Kwok, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007. – 825 p.

27. J. Levinson, Principles of Lithography, SPIE Press, 2005, pp. 423.

28. Chris Mack, Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication, John Wiley & Sons, 2008, pp. 534.

29. S. Landis, *Lithography*, John Wiley & Sons, 2011, pp. 378.

30. M. J. Madou, Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, CRC Press, 2002, pp. 752.

31. Распопов В.Я. *Микромеханические приборы* / Учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. - 400 с.: ил.

32. Desai T., Bhatia S. BioMEMS and Biomedical Nanotechnology BioMEMS and Biomedical Nanotechnology // III: Therapeutic Micro/Nanotechnology. - Springer, 2007. - 1856 p.

33. K. Seshan, *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques*, William Andrew Publishing, 2002, pp. 629.

34. D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, William Andrew, 2010, pp. 792.

35. K. Wasa, Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-materials and MEMS, William Andrew, 2012, pp. 660.

36. H. O. Pierson, Handbook of Chemical Vapor Deposition, 2nd Edition, Second Edition: Principles, Technology and Applications, William Andrew, 2000, pp. 506.

37. W.-Y. Wu, J.-M. Ting, and P.-J. Huang, "Electrospun ZnO Nanowires as Gas Sensors for Ethanol Detection," *Nanoscale Res. Lett.*, 2009.4, 6, 513-517 pp.

38. Физика твердого тела: Энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Барьяхтар, Киев: Наукова думка, Т. 1, 1996, 656 с., Т. 2. 1998, 648 с.

39. E. Dimakis, J. Lähnemann, U. Jahn, S. Breuer, M. Hilse, L. Geelhaar, and H. Riechert, "Self-Assisted Nucleation and Vapor–Solid Growth of InAs Nanowires on Bare Si(111)," *Cryst. Growth Des.*, 2011.11, 9, 4001-4008 pp.

40. H.-B. Xu, H.-Z. Chen, W.-J. Xu, M. Wang, "Fabrication of organic copper phthalocyanine nanowire arrays via a simple AAO template-based electrophoretic deposition," Chem. Phys. Lett., 2005.412, pp. 294-298,

41. A. Khalil, B. S. Lalia, R. Hashaikeh, and M. Khraisheh, "*Electrospun metallic nanowires: Synthesis, characterization, and applications,*" J. Appl. Phys., 2013.114, pp. 171-301,

42. G. Cao and Y. Wang, *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications*, World Scientific, 2011, 581 p.

43. G.-C. Yi, Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Devices: Processing, Characterization and Applications, 2012, 338 p.

44. Википедия, страница «LIGA» [Эл.ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia – Электрон. дан. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/LIGA (дата обращения: 08.02.2016).

45. X-ray optics, страница LIGA process [Эл.ресурс] // X-ray optics – Электрон. дан.–URL:http://www.x-ray-optics.de/index.php?option=com_content&view=article&id=84&Itemid=52 (дата обращения:

08.02.2016).

46. ATC Orion Series Sputtering Systems [Эл.ресурс] // официальный сайт AJA International inc. – Электрон. дан. – URL: http://www.ajaint.com/atc-orion-series-sputtering-systems.html (дата обращения: 08.02.2016).

47. Гринберг Я.С., Пашкин Ю.А., Ильичёв Е.В. *Наномеханические резонаторы* // Успехи физических наук, 2012, Т. 182, №4, С. 407-436.

48. Урманов Д. Концепция развития производства МЭМС-изделий в России на период до 2017 года // Электроника: Наука, технология, бизнес. - 2013. - № 1 (123). - С. 192-199.

49. Васильев В.А., Запевалин А.И., Кондратьев А.В., Чернов П.С. Компьютерное моделирование нано- и микроэлектромеханических систем с использованием детерминированных моделей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. - 2013. - № 1 (5). – С. 131-136.

50. Белозубов Е.М., Васильев В.А., Громков Н.В., Чернов П.С. Датчики давления в России и за рубежом // Метрология. - 2010. - № 10. - С. 15-24.

51. Васильев В.А., Орехов Д.О., Чернов П.С. *Методы моделирования нано- и микроструктур, устройств и систем //* Инженерная физика. - 2013. - № 6. - С. 53-61.

52. Тузов А. Датчики для измерения параметров движения на основе MEMSтехнологии. Часть 1. Инерциальные датчики средней точности // Электроника: Наука, технология, бизнес. - 2011. - № 1 (107). - С. 72-78.

53. Северов Л.А., Золотарев С.К., Овчинникова Н.А., Панферов А.И., Пономарев В.К. Информационные характеристики микромеханических гироскопов на основе кремниевой технологии микроэлектромеханических систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2011. - Т. 54. № 8. - С. 12-22.

54. Фадеев С.И., Косцов Э.Г., Пиманов Д.О. Численное исследование математических моделей микроэлектромеханических резонаторов разного типа // Сибирский журнал индустриальной математики. - 2014. - Т. XVII. № 4. - С. 120-135.

55. Федирко В.А., Зенюк Д.А. *Математическое моделирование микроэлектромеханического конденсатора с подвешенным электродом* // Вестник МГТУ Станкин. - 2011. - № 3. - С. 126-131.

56. Аскерко А.Н., Бохов О.С., Лучинин В.В. Испытания и тестирование микроэлектромеханических компонентов и систем на их основе // Нано- и микросистемная техника. - 2013. - № 2. - С. 49-54.

57. Бабаевский П.Г., Жукова С.А., Обижаев Д.Ю., Гринькин Е.А., Турков В.Е., Резниченко Г.М., Рискин Д.Д., Бычкова Ю.А. *Вакуумплотное матричное корпусирование сенсорных микроэлектромеханических систем (аналитический обзор)* Часть 1. Процессы соединения и разрезания пластин, локальная герметизация (вакуумное капсулирование) чувствительных элементов сенсорных микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. - 2014. - № 3. - С. 3-12.

163

58. В.М.Козенков, В.А.Барачевский, И.Е.Гапоненко *Необратимые органические светочувствительные среды для голографии* // Материалы Седьмой Всесоюзной школы по голографии.- 1975.- URL: http://bsfp.media-security.ru/school7/24.htm

59. Скоростное ионно-плазменное вакуумное магнетронное распыление [Эл.ресурс] // Технологии и оборудование для нанесения покрытий. – официальный сайт компании "ИНАКОТЕК" – Электрон. дан.- 2006. – URL: http://www.inacotec.com/technology/sipmr/ (дата обращения: 08.02.2016).

60. NanoFab Equipment – Nanofabrication Facility The City University of New York Advanced Science Research Center. – Электрон. дан. .- 2015.– URL: http://nanofab.asrc.cuny.edu/equipment/ (дата обращения: 08.02.2016).

61. Селективное плазмохимическое травление - MBV ТМ ПЛАЗМА ПХТ-Т // Технологии и оборудование: Сухое травление. –официальный сайт ОАО Научноисследовательский институт точного машиностроения. – Электрон. дан. .- 2015.– URL: <u>http://www.niitm.ru/technology/dry_etching/selective_plasma_etching/details/v/model/m</u> vu_tm_plazma_pht-t/

62. ST Digital UV index sensor // STMicroelectronics- Sensor parameters and electrical specifications.- 2015.- 27 c.

63. Bosch Sensortec - BMX055 Small, versatile 9-axis sensor module. - Germany .-2014 . - № 10. - 172 c.

64. Analog Devices: Four Degrees of Freedom Inertial Sensor// ADIS16300. – Texas. - 2009. – 16 c.

65. Texas Instruments: DLP3000// Package option addendum. – №10. - 2014. – 38 c.

66. InvenSense: Product Specification // MPU-9150A-00. - 2013. - 50 c.

67. Stephen D. Senturia, "*Microsystems Design*," Massachusetts Institute of Technology, 2002.

68. Marc J. Madou, "Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology," third edition, 2009.

69. Dieter K. Schroder, "Semiconductor material and device characterization," Third Edition, New Jersey, 2006.

70. Rao Tummala, "Fundamentals of Microsystems Packaging," 1st Edition, Georgia Institute of Technology Atlanta.

71. Marc J. Madou, Fundamnetals of Microfabrication and Nanotechnology, Third Edition,2009

72. Suwanna Jittinorasett, Master Thesis, UBMFormation on Single Die/Dice for Flip Chip Applications, 1999, Blacksburg, Virginia

Интернет-ресурсы и презентации

73. Сайт «Русская Ассоциация разработчиков, производителей и потребителей микроэлектромеханических систем» [Эл.ресурс] // Русская Ассоциация МЭМС. – Электрон. дан. - 2015.– URL: <u>http://www.mems-russia.ru/</u>

74. Сайт SEMI - *Технический комитет по микро- и наноэлектромеханическим системам* (МЭМС/НЭМС) при Ассоциации производителей полупроводникового оборудования и материалов [Эл.ресурс] // Micro-electromechanical systems (MEMS)— Microsystems Technology (MST) . – Электрон. дан. - 2010.– URL: <u>http://regions.semi.org/en/Industries/MEMS</u>

75. Сайт IEC (International Electrotechnical Commission) [Эл.ресурс] // Международная электротехническая комиссия. - 2016.– URL: http://www.iec.ch/ 1.Сайт The IEEE Standards Association (США) - является ведущей организацией, которая питает, развивает и продвигает глобальные технологии . http://standards.ieee.org/

76. Сайт «ГОСТ Эксперт - база ГОСТов РФ» [Эл.ресурс] // Единая база ГОСТов РФ. - Электрон. дан. -2014.– URL: http://gostexpert.ru.

77. Сайт MEMS and Sensors [Эл.ресурс] // STMicroelectronics - европейский производитель датчиков, изготовленных по технологии микроэлектромеханических систем. - Электрон. дан. -2016.– URL: http://www.st.com/web/en/catalog/sense_power/FM89

78. Сайт Texas Instruments [Эл.ресурс] // DLP Overview- DLP® Products & MEMS американский производитель датчиков, изготовленных по технологии микроэлектромеханических систем. - Электрон. дан. -1995-2015.– URL: http://www.ti.com/lsds/ti/analog/dlp/overview.page

79. Сайт *Bosch Sensortec* [Эл.pecypc] // Products- немецкий производитель датчиков, изготовленных по технологии микроэлектромеханических систем. - Электрон. дан. – URL: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/products_overview

80. Сайт «*MEMS & Sensors Industry Group*» [Эл.ресурс] // Hewlett Packard. -Электрон. дан. -2016.– URL: http://www.memsindustrygroup.org/

81. Сайт «Panasonic» [Эл.ресурс] //Sensors - Industrial Devices & Solutions-японский производитель датчиков.-Электрон.дан.-URL:http://industrial.panasonic.com/ww/products/sensors

82. Сайт *Avago technologies* [Эл.ресурс] // Optical Sensors - сингапурская компания по разработке полупроводниковой продукции. - Электрон. дан. –2005- 2016.– URL: <u>http://www.avagotech.com/products/optical-sensors/</u>

83. Сайт *Analog Devices* [Эл.ресурс] // Крупная американская компания, производитель интегральных микросхем для решения задач преобразования сигналов (в

165

том числе аналого-цифровых преобразователей и цифровых сигнальных процессоров). - Электрон. дан. –1995- 2016. – URL: http://www.analog.com/ru/products/mems.html

84. Сайт «*Cognitive Technologies*» [Эл.ресурс] // Российский разработчик программного обеспечения. - Электрон. дан. –1993- 2016.– URL: http://www.cognitive.ru

85. Презентация. ГНЦ «*Технологический центр МИЭТ*» - 2016.– URL: http://www.tcen.ru/

86. Презентация. «COMSOL Multiphysics for MEMS Applications» Yeswanth Rao. COMSOL, Inc. - 2016.– URL: https://www.comsol.com/mems-module

87. Презентация «MEMS Multiphysics Simulation in ANSYS» Workbench David Harrar\OzenEngineering,Inc.-2016.-URL:http://www.ozeninc.com/downloads/PRESENTATION-Mulitiphysics Simulation for MEMS Using Workbench.pdf

88. Презентация «*MEMS & Microsystems Fabrication*.» Страница Technologies Overview [Эл.ресурс]: Invenios - официальный сайт компании. – Электрон. дан. .- 2016.– URL: <u>http://invenios.com/micro-fabrication/ (д</u>ата обращения: 08.02.2016).

89. Презентация . *Lise Bilhaut* [Эл.ресурс]// – профессиональный вебсайт Lise BILHAUT. – Электрон. дан. – URL: <u>http://lise.bilhaut.free.fr/</u> (дата обращения: 08.02.2016).

90. Презентация. «МЭМС. Дорожная карта развития в России». Урманов Д. М. /«Русская Ассоциация МЭМС» - 2016. – URL: http://www.semiconrussia.org/ru/node/676

91. Презентация «Introduction to MEMS » Li Shi, Department of Mechanical Engineering. The University of Texas at Austin- 2016.– URL: \www.me.utexas.edu/~lishi

92. Презентация «MEMS Fabrication». Т. Szychowski - 2016.– URL: http://slideplayer.com/slide/6004556/

93. Презентация. «*Микросистемная техника* « *Введение в МЭМС* »»\ Е.Н.Пятышев Санкт-Петербург СПбГПУ - 2016.– URL: http://www.myshared.ru/slide/100345/

94. Презентация. «U.S. Army Research, Development and Engineering Command» [Эл.pecypc]// CERDEC - Delivering Innovation . – Электрон. дан. – URL: <u>http://www.wpi.edu/Images/CMS/ECE/Paul_Olson_2012_Presentation.pdf</u>

95. Презентации по курсу "Разработка и изготовления МЭМС" для лекционного курса Maccaчуceтского института технологий (MIT): <u>http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-777j-design-and-fabrication-of-microelectromechanical-devices-spring-2007/lecture-notes/</u>

96. Презентации и видеолекции Индийского института технологий по курсу "MЭМС и микросистемы": <u>http://nptel.ac.in/courses/117105082/</u> 97.ПрезентацииУниверситетаМиннесотыпокурсу"МЭМС": http://me.umn.edu/courses/me8254/lectnotes.html

98. Презентации Университета Техаса по курсу "Основы МЭМС": http://www.uta.edu/utari/acs/jmireles/MEMSclass/MAINpage.htm

Предметный указатель

Акселерометр	Стандарты МЭМС
-емкостный	-российские
-пьезоэлектрический	-зарубежные
Актуатор	Солдат « будущего»
Беспилотный	Травление
-дрон	-газофазное
-KAMA3	-жидкостное
БиоМЭМС	-ионное
Датчик	Трансдьютер
-биологический	Фоторезист
-давления	Электроспиннинг
-емкостный	Элемент
-температуры	-биоморфный
-химический	-чувствительный
Гироскоп	Эффект Саньяка
-лазерный	LIGA
-вибрирующее кремниевое кольцо	
Жертвенный слой	
Зеркала активные	
Классификация	
Консоль	
Корпусирование	
Литография	
-ионно-лучевая	
-нанопечатная	
-оптическая	
-рентгеновская	
-электронно-лучевая	
Материалы	
-кремний	
-карбид кремния	
-нитрид кремния	
-двуокись кремния	
Микрозахват	
Микрообработка	
- объемная	
-поверхностная	
Микрофлюидика	
Микроэлектромеханические системы	
Моделирование	
-в среде COMSOL	
- в среде SEMulator3D	
Нанозахват	
Нанонити	
Нанорезистор	
Наноэлектромеханические системы	
Пьезорезистор	
Роботизированные системы	

Сведения об авторах



Валерий Алексеевич Гуртов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела Петрозаводского государственного университета, заслуженный деятель науки Республики Карелия, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.

В 1972 году окончил Петрозаводский государственный университет по специальности «Физика». С 1975 по 1979 год – аспирант Института физики полупроводников Сибирского отделения АН СССР.

С 1980 года по 2001 год – преподаватель, старший преподаватель, доцент, профессор кафедры физики твердого тела, декан физического факультета, проректор по научной работе Петрозаводского государственного университета. С 1993 года по настоящее время – заведующий кафедрой физики твердого тела. За этот период им опубликовано самостоятельно и в соавторстве около 500 научных работ, в том числе девять учебных пособий и два сборника задач.



Беляев Максим Александрович - аспирант кафедры физики твердого Петрозаводского государственного тела университета. В 2006 году поступил на физико-технический факультет ПетрГУ по специальности «Физическая электроника». В 2010 году получил в ПетрГУ степень бакалавра технологий, а в 2012 году – степень магистра по направлению "Информатика и вычислительная техника". В течение года проходил обучение в Технологическом университете г. Лаппенранта (Финляндия), где в 2012 году также получил степень магистра по направлению "Техническая физика". Автор и соавтор 5 научных работ.



Бакшеева Анна Германовна в 2002 году поступила на физикотехнический факультет ПетрГУ по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В 2008 году окончила ПетрГУ, получила квалификацию инженер по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». С 2012 года по 2015 год проходила дополнительное обучение по магистерской (трёхгодичной) программе «Micro-nanosystem technology» в университете

Вестфольда и Бускеруда (Норвегия). В настоящий момент это Юго-Восточный университет Норвегии. По окончанию учёбы получила степень магистра «Микро- и наносистемных технологий».

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Гуртов Валерий Алексеевич Беляев Максим Александрович Бакшеева Анна Германовна

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Редактор

Компьютерная верстка Оформление обложки Ширяева О.

Подписано в печать 15.03.16. Формат 70х100 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Уч.-изд. Л. 18. Тираж 300 экз. Изд. № ?.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» Отпечатано в типографии издательства ПетрГУ Ленина пр., д. 33, г. Петрозаводск, 185910