



МИР ЭЛЕКТРОНИКИ

В.Д. Вавилов
С.П. Тимошенко
А.С. Тимошенко

Микросистемные датчики
физических величин:
монография в двух частях

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2018

УДК 629.7.05.06:531.781.2(075.8)

ББК 39.42-01

В12

Рецензент:

Адамов Ю.Ф. – д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник ИППМ РАН

В12 Вавилов В.Д.

Микросистемные датчики физических величин: монография в двух частях

/ Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С.

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 550 с. ISBN 978-5-94836-498-8

В книге изложены современные принципы построения, методы расчета и проектирования микросистемных датчиков физических величин и измерительных систем на их основе. Приведены примеры разработок новых изделий.

Направления «Электроника и нанoeлектроника», «Радиотехника», «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Информатика и вычислительная техника», «Конструирование и технология электронных средств» предназначены для студентов.

Также книга может быть полезной студентам смежных специальностей, аспирантам, инженерам и научным работникам, связанным с созданием первичных приборов информации на интегральных принципах.

Рис.: 313. Табл.: 42. Библиогр.: 110 назв.

УДК 629.7.05.06:531.781.2(075.8)

ББК 39.42-01

© 2018, Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С.

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-498-8

Содержание

Введение	9
ЧАСТЬ 1	12
Глава 1. Конструкторско-технологические вопросы разработки микросистемных датчиков	12
1.1. Краткий исторический очерк развития микросистемной техники.....	12
1.2. Кремний — универсальный материал для микросистемной техники.....	14
1.3. Сухое травление кремния.....	23
1.4. Методы глубокого вертикального травления кремния.....	30
1.5. Пористый кремний в микросистемотехнике.....	36
1.6. Обобщенный закон Гука для анизотропных сред.....	41
1.7. Чувствительные элементы интегральных датчиков.....	43
1.8. Корпусирование интегральных датчиков.....	49
Вопросы для самопроверки.....	56
Глава 2. Элементы и узлы микросистемных датчиков	57
2.1. Емкостный преобразователь перемещений.....	57
2.2. Метод трех генераторов для измерения микроперемещений.....	60
2.3. Исключение влияний друг на друга осевого и углового движений микромаятника.....	61
2.4. Преобразователь перемещений на полевом эффекте.....	62
2.5. Магниторезистивный преобразователь перемещений.....	71
2.6. Магниторезистивный датчик перемещений на гигантском магниторезистивном эффекте.....	72
2.7. Оптоэлектронный преобразователь перемещений.....	75
2.8. Датчик перемещений на принципе автоэлектронной эмиссии.....	76
2.9. Диффузионные и эпитаксиальные тензопреобразователи.....	78
2.10. Преобразователи на поверхностных акустических волнах.....	84
2.11. Струнные тензопреобразователи.....	86
Вопросы для самопроверки.....	88
Глава 3. Параметры и характеристики микросистемных датчиков	90
3.1. Расчет жесткостей однослойных упругих подвесов с криволинейными обводами.....	90
3.2. Расчет жесткостей многослойных упругих подвесов микросистемных датчиков.....	95
3.3. Оценка продольной устойчивости упругих подвесов интегральных маятников акселерометров.....	99

3.4. Противоударный демпфер для микросистемных акселерометров.....	102
3.5. Газодинамическое демпфирование интегральных подвижных узлов.....	103
3.6. Демпфирование перфорированных чувствительных элементов.....	110
3.7. Оптимизация газодинамического демпфирования подвижного узла.....	112
3.8. Магнитоэлектрическое демпфирование в микросистемных акселерометрах и гироскопах.....	113
3.9. Гистерезисное демпфирование в интегральных датчиках.....	115
3.10. Демпфирование с помощью электрического контура.....	118
3.11. Демпфирование с помощью механических поглотителей виброэнергии.....	122
Вопросы для самопроверки.....	128
Глава 4. Микросистемные обратные преобразователи.....	129
4.1. Электростатический преобразователь силы.....	129
4.2. Диаманитный преобразователь силы.....	131
4.3. Магнитоэлектрический преобразователь силы.....	134
4.4. Электромагнитный преобразователь силы.....	144
Вопросы для самопроверки.....	147
Глава 5. Интегральные термопреобразователи.....	148
5.1. Линеаризация R-T-характеристики полупроводниковых терморезисторов.....	148
5.2. Интегральные датчики температуры.....	150
5.3. Интегральный термоанемометр постоянной температуры.....	154
5.4. Интегральный термоанемометр с переносом тепловых меток.....	159
Вопросы для самопроверки.....	164
Глава 6. Передаточные функции микросистемных датчиков.....	165
6.1. Применение вариационного принципа Гамильтона для определения передаточных функций микромеханически чувствительных узлов.....	165
6.2. Построение передаточных функций электрических схем.....	169
6.3. Электрические схемы типовых динамических звеньев.....	171
Глава 7. Схемотехника микросистемных датчиков.....	174
7.1. Линейные электрические схемы интегральных датчиков.....	174
7.2. Нелинейные электрические схемы интегральных датчиков.....	183
7.3. Источник опорного напряжения.....	189
7.4. Релаксационный преобразователь сопротивления тензодатчиков в частоту.....	194
7.5. Преобразователь напряжения в частоту.....	197
7.6. Интегральные датчики с цифровым выходом.....	199

7.9. Микроконтроллеры в интегральных датчиках.....	205
Вопросы для самопроверки.....	208
Глава 8. Интегральные акселерометры.....	210
8.1. Акселерометр с электростатической обратной связью.....	210
8.2. Акселерометр с магнитоэлектрической отрицательной обратной связью.....	226
8.3. Акселерометр с электромагнитной обратной связью.....	237
8.4. Акселерометр с импульсной обратной связью.....	241
8.5. Осевой микросистемный акселерометр.....	245
8.6. Угловой микросистемный акселерометр.....	247
8.7. Емкостный акселерометр прямого измерения с гребенчатой конструкцией чувствительного элемента.....	252
8.8. Оценка погрешности интегральных акселерометров от воздействия вибровозмущений.....	255
8.9. Аппаратные методы снижения погрешностей акселерометров.....	257
Вопросы для самопроверки.....	262
Глава 9. Микрогироскопы.....	263
9.1. Гироскопический принцип измерения угловой скорости.....	263
9.2. Математическая модель чувствительного элемента микросистемного ДУС с двухкоординатным подвесом.....	269
9.3. Математическая модель чувствительного элемента микросистемного ДУС типа «угловой вибратор».....	278
9.4. Математическая модель чувствительного элемента микросистемного ДУС типа «линейный вибратор».....	286
9.5. Камертонный микрогироскоп.....	290
9.6. Микрогироскоп с резонирующим кольцом.....	294
9.7. Влияние анизотропии свойств кремния на параметры кольцевого резонатора.....	305
9.8. Математическая модель микросистемного гироскопа с обращенным кардановым подвесом ротора.....	312
Вопросы для самопроверки.....	318
Библиографический список для первой части.....	319
ЧАСТЬ II.....	322
Глава 10. Микросистемные пьезорезонансные датчики.....	322
10.1. Физические и информационные свойства кварца.....	322
10.2. Общая математическая модель для пьезоэлектрических сред.....	328
10.3. Пьезорезонансный датчик времени.....	331
10.4. Кварцевые микровесы.....	333

10.5. Пьезорезонансный датчик температуры.....	337
10.6. Пьезоэлектрический виброакселерометр.....	338
10.7. Пьезорезонансный датчик перемещения.....	339
10.8. Конструктивные схемы пьезоэлектрических гироскопов.....	341
10.9. Цилиндрический пьезогироскоп.....	344
10.10. Пьезогироскоп типа «гантель».....	347
10.11. Дисковый пьезогироскоп.....	350
Вопросы для самопроверки.....	357
Глава 11. Микромагнитометры.....	359
11.1. Датчик магнитной индукции.....	359
11.2. Микроэлектромеханический датчик магнитного поля.....	362
11.3. Устройство для измерения индукции переменного магнитного поля.....	365
11.4. Импульсный магнитометр.....	366
11.5. Магнитометр на основе анизотропного магниторезистивного эффекта.....	368
11.6. Магнитометр на основе <i>p-n</i> -перехода.....	373
11.7. Магнитометр на ПАВ-структуре.....	375
Вопросы для самопроверки.....	376
Глава 12. Интегральные датчики давлений и влажности.....	378
12.1. Расчет прогибов и деформаций интегральных чувствительных элементов датчиков давлений.....	378
12.2. Динамическая модель интегральной мембраны с жестким центром.....	381
12.3. Определение параметров передаточной функции интегральной мембраны.....	385
12.4. Условия проявления мембранного эффекта.....	388
12.5. Датчик давлений с емкостным преобразователем.....	390
12.6. Датчик давлений с электростатической обратной связью.....	397
12.7. Датчик давлений с магнитоэлектрической обратной связью.....	400
12.8. Датчики давления с полным тензорезисторным мостом.....	404
12.9. Сверхминиатюрный датчик акустических давлений.....	409
12.10. Интегральный высотометр.....	411
12.11. Резонаторный датчик давлений.....	412
12.12. Датчик влажности на полевом эффекте.....	416
12.13. Гигрометр на основе оксида алюминия.....	419
12.14. Интегральный СВЧ-влажномер.....	420
Вопросы для самопроверки.....	421



Глава 13. Интегральные расходомеры жидкостей и газов	423
13.1. Термоанемометрический расходомер.....	423
13.2. Вихревой расходомер.....	426
13.3. Доплеровский расходомер.....	427
13.4. Компенсационный расходомер жидкостей и газов.....	429
13.5. Электромагнитный расходомер.....	433
Глава 14. Микроактюаторы. Тепловые микроактюаторы	440
14.1. Классификация микроактюаторов.....	440
14.2. Электростатические микроактюаторы.....	441
14.3. Тепловые микроактюаторы.....	444
14.4. Применение тепловых микроактюаторов.....	448
14.5. Тепловые микроактюаторы на основе линейного расширения.....	451
14.6. Тепловые актюаторы на основе многослойных балок.....	452
14.7. Конструкции теплового микроактюатора на основе биморфной структуры.....	453
14.8. Расчет стрелы прогиба биморфной балки в зависимости от температуры.....	455
14.9. Распределения перегрева по длине балки микроактюатора.....	459
Глава 15. Оптимизация характеристик интегральных датчиков	466
15.1. Оптимизация конструктивных параметров по динамическому критерию.....	466
15.2. Оптимизация по квадратичному критерию качества.....	469
15.3. Оптимизация конструктивных параметров датчиков с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа.....	471
15.4. Оптимизация отношения сигнал/шум.....	476
15.5. Подавление тепловых шумов полупроводников.....	477
15.6. Защита микросистемных чувствительных элементов от вибрационной и ударной нагрузки.....	479
15.7. Статистический подход к оптимизации передаточных функций интегральных датчиков.....	483
15.7. Применение фильтра Калмана для снижения случайных погрешностей микродатчиков.....	488
Вопросы для самопроверки.....	492
Глава 16. Испытания и тарировка интегральных датчиков	493
16.1. Многофакторные испытания статических характеристик акселерометров.....	493
16.2. Калибровка интегральных датчиков по экспериментальным данным.....	496

16.3. Идентификация передаточных функций интегральных датчиков по экспериментальным АЧХ.....	497
16.4. Испытания интегральных датчиков давлений.....	503
16.5. Испытания интегральных датчиков перемещений.....	505
16.6. Испытания интегральных термоанемометров.....	506
Вопросы для самопроверки.....	509
Глава 17. Надежность элементов и компонентов микроэлектромеханических систем.....	510
17.1. Виды и категории испытаний.....	510
17.2. Оценка надежности микромеханических акселерометров.....	512
17.3. Анализ механических напряжений.....	517
17.4. Оценка надежности ММА с электронным преобразователем.....	521
17.5. Оценка надежности чувствительного элемента микромеханического гироскопа.....	526
Библиографический список для второй части.....	541
Приложения.....	545

Введение

В последнее десятилетие в технически развитых странах мира в авиационно-космическом приборостроении наметилась устойчивая тенденция к разработке микросистемной техники и технологии (МСТ). К МСТ относят интегральные датчики для измерений электрических и неэлектрических величин, например параметров движения летательных аппаратов, ориентации в пространстве и наведения, микромеханических роботов, медицинского микроинструмента, микросамолетов и т. д.

Современную научно-техническую революцию в приборостроении сделали цифровые схемы, а именно микропроцессоры. Достигнуты значительные результаты в совершенствовании аппаратной части цифровых вычислителей, программного обеспечения, алгоритмизации численных методов вычислений, а также в применении микропроцессоров для обработки измерительной информации и в системах автоматического управления различными процессами. Однако реальный физический мир в нашем восприятии является аналоговым. Например, входные воздействия — температурные поля, давления в жидкостях и газах, перемещения, скорости и ускорения различных объектов — это чаще всего непрерывные функции координат и времени.

Посредниками между миром аналоговым и миром цифровым служат технические органы чувств — первичные датчики. В свою очередь, широкое применение микропроцессоров ужесточило требования к характеристикам первичных датчиков. Для улучшения точности первичных датчиков и снижения их себестоимости используют методы интегральной микротехнологии. Интегральные микродатчики совместили в себе чувствительные элементы со встроенными электронными схемами обработки и становятся все более похожими на интегральные схемы.

С 30 марта 2002 года в России микросистемная техника официально объявлена критической технологией. В перечне критических технологий, утвержденном президентом России, приведена следующая формулировка: «Сверхминиатюрные механизмы, приборы, машины с ранее не достижимыми массогабаритами, энергетическими показателями и функциональными параметрами, создаваемые интегрально-групповыми экономически эффективными процессами микро- и нанотехнологии».

Интегральная микротехнология является многообещающей в решении сложных вопросов датчикоостроения, однако, несмотря на значительные успехи в электронной микротехнологии, процесс создания и внедрения интегральных датчиков является весьма специфичным, трудоемким и длительным. Во-первых, необходимо преодолеть инерцию и психологический барьер при переходе от неинтегральных технологий в датчикоостроении к интегральным. Во-вторых, требуется время и средства на проведение исследований, разработку типового ряда измерительных приборов и подготовку соответствующего производства и специалистов. При этом следует подчеркнуть, что перенос опыта микротехнологии из производства чисто электронных приборов в область датчикоостроения произошел не один к одному, а с принципиальным развитием. Так, топологический расчет фотомаслонов для изготовления упругих чувствительных элементов в виде мембран, маятников, струн и т. д. имеет свои специфические особенности, заключающиеся в следующем. Выбор формы упругих подвесов, плоскостей и травителей тесно связан с получением оптимальных характеристик разрабатываемых микродатчиков. В готовых изделиях должны быть максимально устранены влияния дефектов пластин, обусловленных предысторией механической обработки, неоднородностями состава и дислокациями. Температурные напряжения, связанные с локальными диффузиями примесей проводимости, выполняемыми в силу конструктивной необходимости, например, при изготовлении тензорезисторов, также должны быть максимально снижены.

Интегральные микродатчики, несмотря на кажущуюся простоту, в научно-техническом плане представляют собой сложные приборы, поскольку их разработка и исследование осуществляются на стыке многих наук: физики кристаллов, химии, теории электрического

поля в полупроводниках, теории упругости анизотропных сред, аэрогидродинамики и др. Большие трудности при разработке интегральных микродатчиков связаны с их чувствительностью к побочным параметрам окружающей среды, не подлежащим измерению, например к температуре. Ввиду многообразия применения и сложности, обусловленной большим числом измеряемых физических величин, в основу работы интегральных микродатчиков положено множество принципов. Изложенное, а также высокая стоимость теоретических исследований и необходимость проведения экспериментально-опытных работ делают интегральные микродатчики пока еще довольно дорогим товаром.

При разработке интегральных датчиков нужно учитывать механические свойства кремния, которые могут показаться удивительными тем, кто не знаком с этим материалом. В своем кристаллическом состоянии кремний имеет предел разрушения 1 ГПа, что выше, чем у большинства сталей. В сочетании с низкой плотностью 2330 кг/м^3 это дает очень прочный по отношению к собственному весу материал.

Научеомкие инновации являются ключевым фактором технического прогресса. В настоящее время в науке и технике развитых стран одной из востребованных областей является микросистемная техника. В свою очередь, синергетический эффект в микросистемной технике находится в прямой зависимости от взаимодействия конструктивной структуры датчика, технологии производства и метода обработки сигналов.

Определение интегрального датчика. Современный датчик первичной информации представляет собой микроэлектромеханическую систему, предназначенную для измерения той или иной физической величины. В состав датчика в любом случае входят чувствительный элемент, реагирующий на измеряемую физическую сущность, и предварительный электронный преобразователь. Например, упругую мембрану для датчика давлений или маятник на упругих подвесах для акселерометра. В минимальном случае электронный преобразователь состоит из тензорезисторного или емкостного моста или какого-либо другого устройства, разбалансирующегося под влиянием измеряемой величины. Выходные сигналы датчиков стандартизируются по диапазонам напряжения, тока, частоты или кода, соответствующих пределам изменения контролируемых величин.

Датчики как технические органы чувств являются единственными устройствами, позволяющими получать информацию о состоянии объектов и протекании различных процессов. После обработки информации датчиков она становится руководством для соответствующего выполнения действий машинами или живыми существами, например, в летательных аппаратах для их ориентации в пространстве, в энергетических установках для оптимизации алгоритмов работы, в автомобилях в системах безопасности и экономичности работы двигателей и многих других применениях. Современные датчики представляют собой сложные системы и, как правило, имеют микроминиатюрные размеры при удовлетворительной точности [1].

Структура датчика. Первичный датчик информации может быть совмещен с интерфейсом связи и другими сервисными устройствами, выполняющими, например, функции тестирования, самокалибровки или слияния информации от других датчиков, и с дополнительными датчиками адаптации к внешним условиям эксплуатации. В таком случае его называют интеллектуальным. Примером интеллектуального датчика является турбинный расходомер газа, в составе которого имеются дополнительные датчики температуры и давления, по сигналам которых осуществляется корректировка погрешностей, связанных с изменениями температуры измеряемых сред. Еще одним примером интеллектуального датчика может служить акселерометр со встроенными датчиками температуры и дополнительными акселерометрами по поперечным осям, при обработке совместной информации точность основного акселерометра возрастает.

На рис. 1.1 приведена обобщенная функциональная схема компенсационного датчика. Обратная связь может быть цифровой, аналоговой или той и другой одновременно. Все узлы интеллектуального датчика, как правило, размещены в одном корпусе. Тем не менее, для того чтобы обеспечить возможность использования датчиков предыдущих поколений, в которых на аппаратном уровне осуществлено усиление, масштабирование

до стандартного уровня, линейризация и т.д., интерфейс связи выполняют отдельно и только ему придают интеллектуальные свойства. В этом случае речь идет об *интеллектуальном* интерфейсе. Он может содержать программируемый микроконтроллер, выполняющий функции обработки, например корректирование температурных и инструментальных погрешностей, линейризацию и интегрирование. При этом точность интеллектуального датчика определяется в цифровом варианте точностью ЦАП, а в аналоговом — точностью звена обратной связи.

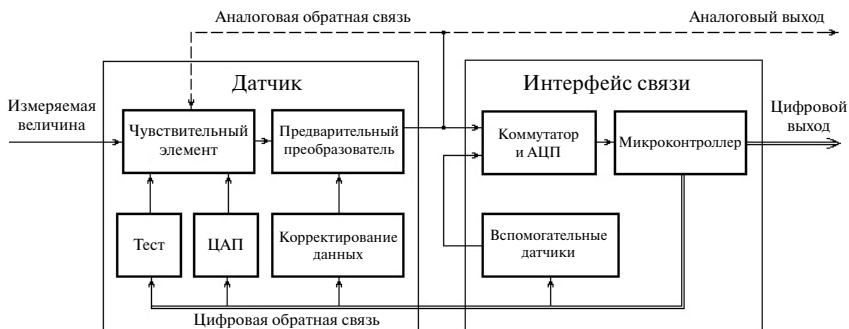


Рис. 1.1. Интеллектуальный датчик и интерфейс

Минимальная структура первичного датчика может состоять только из чувствительного элемента и предварительного электронного преобразователя. Такой датчик называют датчиком *прямого измерения*. Его погрешность определяется суммой погрешностей чувствительного элемента и электронного преобразователя.

Математические модели. Для описания свойств приборов первичной информации и их узлов чаще всего применяют линейные модели. С одной стороны, это ограничивает полное соответствие характеристик моделей и природы, а с другой стороны, позволяет при проектировании рассчитать полностью статические, динамические и точностные характеристики с приемлемой точностью. Дело в том, что, принимая динамические системы приборов и датчиков как линейные системы, например описывая их с помощью передаточных функций, параметры передаточных функций в зависимости от конструктивных и физических свойств все равно считают нелинейными, но на ограниченных пределах изменений [2]. Для существенно нелинейных процессов, например для зависимости сопротивления разогретой нити или пленки от скорости ее обтекания внешним потоком, осуществляют линейризацию посредством сокращения пределов изменений, затем к линейрированным системам применяют преобразования Лапласа и теорию передаточных функций. В некоторых простых случаях удается составить нелинейные дифференциальные уравнения, например для источника опорного напряжения, и найти их решения, которые далее используются при расчетах для конкретных применений.

Для описаний механических чувствительных элементов применяют дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода, порядок которых определяется числом степеней свободы подвижных узлов (одной степени свободы соответствует два порядка). Далее от дифференциальных уравнений переходят к операторным и уже из них определяют передаточную функцию.

По оценкам западных технических экспертов, в датчикостроении в обозримом будущем будут преобладать интегральные разработки на основе монокристаллического кремния с использованием в составе конструкций и других материалов, например арсенида галлия, кварца, полимеров с пьезоэлектрическими свойствами, стекла пирекс и др.

Часть I

ГЛАВА I

КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ МИКРОСИСТЕМНЫХ ДАТЧИКОВ

I.1. Развитие микросистемной техники

Нано и микроэлектромеханические системы (НЭМС и МЭМС) в настоящее время переживают период бурного развития, который во многом будет определять вектор технического прогресса в области нано- и микросистемной техники в ближайшем будущем. Нанотехнологии являются фактором, непосредственно определяющим качественные стороны электронных, механических, а также оптоэлектромеханических элементов сложнофункциональных систем.

Технологии изготовления подобных микро- и наносистем очень разнообразны и находятся в стадии интенсивного развития. Наиболее значительные результаты по изготовлению МЭМС, НЭМС и МОЭМС (НЭМС и МОЭМС — наноэлектромеханические системы и микрооптоэлектромеханические системы) достигнуты благодаря различным нано- и микроэлектронным технологиям, технологиям интегральной оптики, а также успешно развиваемым технологиям капсулирования, трехмерной сборки, высокоплотной интеграции с использованием различных новых материалов и новых технологических процессов.

Микроэлектромеханические датчики и системы на их основе стали одними из наиболее востребованных технических продуктов, используемых повсеместно. Современные микроэлектронные системы развиваются стремительными темпами и могут состоять из множества сложнофункциональных блоков, содержащих электронные, оптические, микромеханические приборы и подсистемы, которые обеспечивают выделение и преобразование необходимой информации, что дает в итоге расширенные интеллектуальные возможности системы в сочетании с ее малыми массогабаритными показателями. Это, в свою очередь, позволяет расширить области применения таких систем.

Очевидно, что в области робототехники и мехатроники востребованы микрооптоэлектромеханические приборы и компактные радиоэлектронные устройства, обеспечивающие

работоспособность сложных механических систем, функционирующих в различных условиях. Известно, что самые популярные механические устройства — автомобили содержат огромное количество датчиков и преобразователей, а также различных сложнфункциональных электронных блоков. Соответственно, и любые перспективные робототехнические и мехатронные системы должны и будут содержать огромное количество распределенных сенсорных, управляющих и исполнительных устройств, обеспечивающих их корректное функционирование, в том числе и в автономном режиме. Наиболее востребованными в этих устройствах являются микромеханические системы, обеспечивающие выделение информации преобразователями физических величин (различными датчиками). С помощью микроэлектромеханических систем (МЭМС) возможно решение задач ориентации, стабилизации и даже автономной навигации. Использование подобных систем, комплексированных с другими системами (спутниковыми навигационными системами (СНС), системами радиокоррекции, геомагнитными системами и т. п.), может существенно повысить точность определения координат объекта и решить многие задачи с определением параметров движения в сложных условиях эксплуатации. В МИЭТ ведутся перспективные разработки различных микромеханических систем, таких как микроакселерометры, микрогироскопы, инклинометры, курсовертикали, гиротаксометры, инерциально-измерительные модули, бесплатформенные инерциальные навигационные системы, микроповоротные зеркала (матрицы зеркал и сканирующие зеркала), датчики удара, микрореле, микроэлектронные и микрооптоэлектронные переключатели, микроанометрические датчики потока (расхода) жидких и газообразных сред и т. д.

Одним из важнейших направлений развития микросистемной техники является разработка инерциальных микромеханических датчиков и систем на их основе (МЭМС). Использование при создании этих устройств материаловедческой и технологической базы современной твердотельной микроэлектроники позволяет обеспечить малые габариты и вес, высокую надежность и низкую стоимость микромеханических датчиков.

Приборы, выполненные по МЭМС-технологии, имеют встроенные элементы управления и обработки информации, малое потребление энергии, большую устойчивость к внешним воздействиям. При производстве чувствительных элементов инерциальных микромеханических датчиков применяют различные материалы, такие как монокристаллический и поликристаллический кремний, плавный кварц, различные стекла, пьезокристаллы,

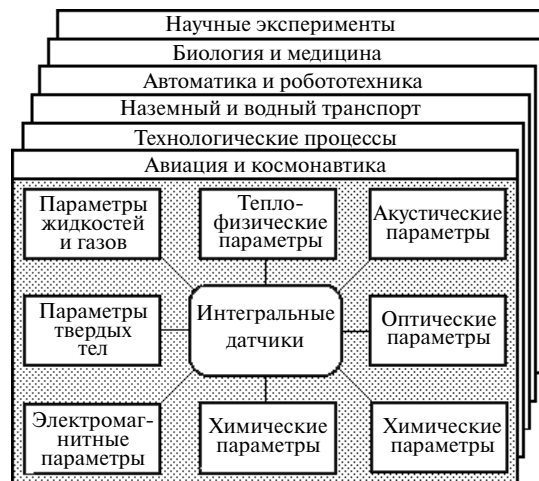


Рис. 1.2. Области применения интегральных датчиков

многослойные структуры и т. д. Одним из наиболее перспективных материалов для изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков является монокристаллический кремний. Благодаря его использованию возможна более глубокая интеграция электронных и механических элементов и их совместимость с широко применяемой микроэлектронной технологией. Интегрированные и объединенные в единый кристалл микроэлектромеханические системы называют интеллектуальными iMEMS. Однако остается большое количество хороших МЭМС, собранных на основе гибридных технологий, а также 2- и 3D-сборок.

Наиболее важным фактором совершенствования МЭМС, наряду с разработкой совершенных конструкций микромеханических элементов и электронных схем управления и обработки сигнала, является высокоплотная интеграция элементов (компонентов) различного функционального назначения и интеллектуализация систем и устройств, достигаемая с использованием встроенных (интегрированных) сенсорных устройств, схем выделения и обработки сигналов, логических вычислителей и приемопередающих устройств. Подобные системы очень важны в медицине и микроробототехнике для проведения сложных хирургических операций, а также в различных технических устройствах в области химии и биологии, например для разработки и изготовления микроаналитических систем, микрофлюидных устройств, различных дозаторов, тактильных датчиков и специализированных микромеханических устройств.

Перспективным является использование элементов МЭМС в биомедицинских целях. В настоящее время широко используются МЭМС-датчики для определения параметров сердцебиения. Актуальной задачей также является создание системы определения параметров опорно-двигательного аппарата человека как при движении, так и в стационарных условиях. Это необходимо для медицинских и спортивных тренажеров, для реабилитации больных, для создания искусственных протезов. Немаловажной задачей является навигация (ориентация) инструмента и крепежных деталей при проведении специальных хирургических операций.

В последнее время актуальны исследования в области возобновляемых источников энергии. Наиболее широкие исследования в данной области посвящены созданию устройств преобразования механической энергии на основе различных физических эффектов и новых композитных материалов.

На рис. 1.2. представлены области применения интегральных датчиков.

1.2. Кремний — универсальный материал для микросистемной техники

Химический элемент кремний Si по распространенности на Земле занимает второе место после кислорода. Его содержание в земной коре оценивается в 27,6%. Важнейшее достоинство кремния заключается в том, что во многих его разновидностях — монокристаллической, поликристаллической или аморфной — всегда проявляются его полупроводниковые свойства. В настоящее время монокристаллический кремний (с-Si) (рис. 1.3) представляет собой основной материал микроэлектронной технологии. На базе с-Si выпускаются разнообразные полупроводниковые приборы от дискретных диодов и транзисторов до сверхсложных интегральных схем и контроллеров.

Мировое производство кремния для нужд полупроводникового приборостроения составляет около 5000 т/год поликристаллического кремния и около 3000 т/год монокристаллов (2000 гт.). Выбор в качестве конструкционного материала кремния позволил применять



Рис. 1.3. Кристаллический монокремний (с-Si), выращенный по методу Чохральского [61]

для изготовления первичных датчиков известные из микроэлектроники групповые методы обработки, такие как литография, локальное травление, диффузия, эпитаксия и окисление. Однако выбор этого материала определяется не технологией, а его физическими свойствами. Известно, что монокристаллический кремний реагирует предсказуемым образом на различные физические воздействия, имеет большой предел упругости, больший, чем у нержавеющей стали, но плотность его сравнима с плотностью алюминия. Кремний может многократно подвергаться воздействию циклических механических напряжений, не проявляя при этом эффекта усталости, имеет широкий рабочий диапазон температур и высокую коррозионную стойкость. Низкий температурный коэффициент расширения, отсутствие гистерезиса и возможность выражения большинства известных физических эффектов обусловили выбор кремния в качестве конструкционного материала. Но главным достоинством его является отличная воспроизводимость физических свойств.

Малая плотность при высоких упругих качествах кремния позволяет выполнять чувствительные элементы с малой массой, имеющие рабочий диапазон частот до нескольких мегагерц, способные выдерживать давления свыше 350 мПа и линейные ускорения до 100000 g. Во многих микромеханических узлах полупроводниковые свойства кремния не используются, например в акселерометрах и датчиках давлений с емкостными преобразователями перемещений.

Кремниевая пластина (рис. 1.4) имеет скругленный край по периферии, который при выполнении технологических операций предотвращает появление сколов и трещин, а также позволяет избавиться от возникновения краевого утолщения при нанесении фоторезиста.

Кремниевые пластины-заготовки обозначаются следующим образом:

$$1A2 \text{ КЭФ} - 4,5 - 100,$$

где 1A2 — группа изготовления; КЭФ — состав (К — кремний, Э — электронная проводимость, Д — дырочная проводимость, Ф — легирование фосфором, Б — легирование бором, С — легирование сурьмой); 4,5 — объемное сопротивление; 100 — ориентация; диаметр обозначается в скобках: 76–100–150–200–250–300 мм ... (толщина пластин кремния для различных микромеханических датчиков может быть различной, чаще всего

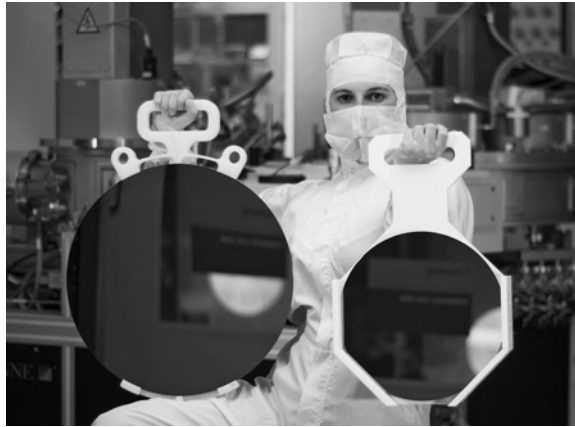


Рис. 1.4. Кремниевая пластина-заготовка

от 100 мкм, 300 мкм до стандартизованных (или принятых на производстве в соответствии с техническими условиями — обычно 380 ± 20 мкм, 480 ± 20 мкм и т. п.).

Ниже приведены некоторые параметры кремниевых пластин диаметром 100, 150, 200 мм, используемых для МЭМС.

Параметр	Диаметр пластин, мм		
Допуск на диаметр, мм	$100 \pm 0,5$	$150 \pm 0,5$	$200 \pm 0,5$
Толщина, мкм	480–525	650–700	700–750
Допуск толщины, мкм	± 25	± 50	± 75
Клиновидность, мкм	—	—	—
Прогиб, мкм	60	60	65
Неплоскостность, мкм	—	—	—
Длина срезов, мкм	—		
Базового	30–35	55–60	—
Дополнительного	16–20	35–40	—

На рис. 1.5 приведены обозначения кристаллографических осей и направлений для монокремния. Как любой кристалл, кремний — материал анизотропный. Его кристаллографическая структура является кубической. Направление осей и плоскостей в кристаллах определяют индексами Миллера. Например, для кремния начало координат располагают в каком-либо узле решетки, а оси прямоугольной системы координат — параллельно граням элементарной ячейки. Называют такие оси x , y , z кристаллографическими. Если рассмотреть какую-либо плоскость $A_x B_y C_z$ в кристаллографических осях, то видно, что она отсекает отрезки $0A_x$, $0B_y$ и $0C_z$ (рис. 1.5, а). Выберем одинаковые единицы измерения по всем осям: $0A_1 = 0B_1 = 0C_1$. Положение заданной плоскости $A_x B_y C_z$ в кристаллографических осях можно определить, составив следующие соотношения:

$$\frac{0A_x}{0A_1} : \frac{0B_y}{0B_1} : \frac{0C_z}{0C_1} = m : n : p.$$

Для нахождения индексов Миллера записывают обратные соотношения:

$$\frac{0A_1}{0A_x} : \frac{0B_1}{0B_y} : \frac{0C_1}{0C_z} = \frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p}.$$

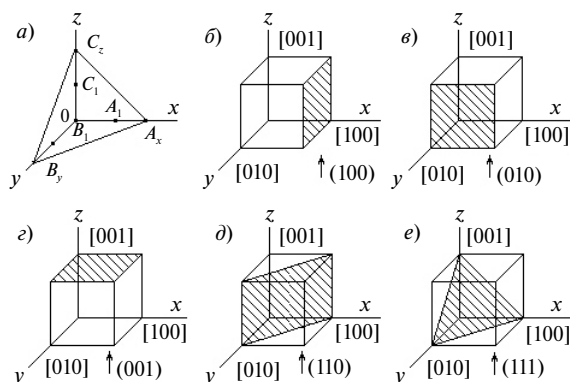


Рис. 1.5. Кристаллографические индексы Миллера

Далее дроби $1/m$, $1/n$, $1/p$ приводят к общему знаменателю, при этом получаются целые числа, которые и называют индексами Миллера: h , k , l . На рис. 1.5, б–е показаны характерные ориентации плоскостей. Причем если какая-либо плоскость не пересекает ту или иную ось, то значение индекса Миллера на соответствующей позиции равно нулю.

При обозначении плоскостей индексы Миллера заключают в круглые скобки, осей — в квадратные, семейства направлений — в угловые, а семейства плоскостей — в фигурные (табл. 1.1).

Количественные соотношения для модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона в произвольных направлениях определяются из обобщенного закона Гука для анизотропных сред.

Чаще всего для получения чувствительных элементов микродатчиков кремниевые заготовки в виде пластин ориентируют в плоскостях (100), (110), (111). Срез у пластины-заготовки (рис. 1.5) задает ориентацию по направлению $\langle 110 \rangle$. Направления, ортогональные к этому срезу, также соответствуют направлению $\langle 110 \rangle$. Пластины кремния вначале подвергают механической шлифовке, затем осуществляют технологическую подготовку поверхности. На подготовленную и отмытую поверхность пластины наращивают защитную пленку в виде двуокиси кремния SiO_2 . Пленку нужной толщины получают в процессе окисления.

В технологическом цикле изготовления кремниевых ЧЭ используется фотолитографический процесс, обеспечивающий относительное смещение рисунка топологии на лицевой и обратной сторонах кристалла не более $\pm(2-3)$ мкм. В приборостроении в основном используется метод двухстороннего совмещения по сквозным отверстиям (табл. 1.2). Точность совмещения достигается за счет сохранения при анизотропном травлении кремния реперного знака квадратной формы, относительно которого обеспечивается взаимное расположение электронных и механических компонентов. Для уменьшения общего времени травления процесс формирования сквозных реперных меток делят на два этапа: 1) затравливание на величину, равную толщине мембраны; 2) одновременное травление мембран

Таблица 1.1

Координатные оси	Координатные плоскости	Семейство плоскостей	Семейство направлений
$x \Rightarrow [100]$ $y \Rightarrow [010]$ $z \Rightarrow [001]$	$y0z \Rightarrow (100)$ $x0z \Rightarrow (010)$ $x0y \Rightarrow (001)$	$\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$, $\{210\}$ и т. д.	$\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, $\langle 210 \rangle$ и т. д.

и меток. Кремний в затравленных метках вытравливается на всю толщину пластины. Для уменьшения дефектности на всех фотолитографических операциях на лицевой стороне пластины формируется слой тугоплавкого металла высокой твердости Ti или TiW. После операции плазмохимического травления нитрида кремния слой металла удаляется вместе с фоторезистом в кислотном-аммиачном растворе.

На поверхность окисленной пластины наносят фоторезист и с помощью фотолитографического процесса образуют топологический рисунок датчика. В местах, где необходимо произвести травление чувствительного элемента или диффузии электронных элементов, фоторезист удаляют специальными растворами, а в защитной пленке из двуокиси кремния вскрывают окна. Вскрытие окон осуществляется изотропными травителями.

В качестве защитной маски при изготовлении микромеханических деталей из кристаллического монокремния широко используется оксид кремния (SiO_2). Из оксида кремния выполняют многослойные маски и путем многоступенчатого анизотропного травления получают необходимые профили. Распространение многослойных масок обусловлено простотой получения пленки SiO_2 на поверхности исходных кремниевых пластин посредством термической обработки в среде, содержащей кислород и пары воды ($t \approx 1000^\circ\text{C}$). При расчете необходимой исходной толщины пленки и величины ступенек между вытравленными в ней масками нужно учитывать, что при анизотропном травлении кремния слой оксида также травится, но с меньшей скоростью. Толщина термически выращенного оксида имеет разброс по площади пластины, а поверхность пленки имеет субмикронные дефекты, которые учитываются специальными припусками. Параметры многоступенчатого травления, такие как величины ступенек маски, время их травления и необходимая исходная толщина пленки, связаны между собой простым соотношением. Число ступенек маски эквивалентно числу фотошаблонов при традиционной технологии. Величина ступеньки маски H_i определяется по следующей формуле:

$$H_i = \psi H_k + h_0,$$

где $\psi = v_0/v_k$ — отношение скорости травления оксида кремния v_0 к скорости травления монокремния v_k в щелочном травителе; H_k — необходимая глубина травления кремния; h_0 — технологический запас на субмикронные дефекты.

Время травления ступеньки определяется выражением

$$T_i = H_i/v_0.$$

Необходимая исходная толщина исходной окисной пленки рассчитывается с учетом неравномерности толщины

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} H_i + h_T,$$

где h_T — неравномерности толщины исходного оксидного слоя.

Рассмотрим пример расчета трехступенчатого шаблона в щелочном травителе кипящего раствора КОН при концентрации 25%. Исходные данные к расчету приведены в табл. 1.2, а табл. 1.3 — результаты расчетов по рассмотренной выше методике.

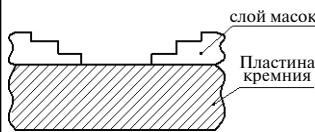
Процесс травления основан на растворении исходных слоев, не защищенных масками. Травление может осуществляться как в жидких, так и в газообразных средах. Различают следующие виды химического травления:

- изотропное травление полупроводника с одинаковой скоростью растворения по всем направлениям, которое применяют для удаления нарушенного слоя или полирования поверхности (рис. 1.6, а);

Таблица 1.2

v_k , МКМ/МИН	v_0 , МКМ/МИН	h_0 , МКМ	h_T , МКМ	H_{k1} , МКМ	H_{k2} , МКМ	H_{k3} , МКМ
3,6	0,035	0,1	0,2	25	120	20

Таблица 1.3

Номер ступеньки	Топология сечения	Требуемая глубина в кремнии, МКМ	Время травления, МИН.	Величина ступеньки в маске, МКМ
Структура масок перед анизотропным травлением		—	—	—
Структура после первого травления		25	3,81	0,343
Структура после второго травления		120	13	1,17
Структура после третьего травления		20	2,15	0,194

- анизотропное травление полупроводника с различной скоростью растворения по разным кристаллографическим направлениям монокристалла (рис. 1.6, б);
- сухое ионно-плазменное травление с вертикальными боковыми стенками (рис. 1.6, в).

Изотропное травление — это травление, скорость которого не зависит от направления. Существуют два вида изотропного травления:

1) травление без перемешивания раствора, которое дает плоское дно лунки травления, и подтравливание под маску со скоростью, равной скорости травления в глубину (рис. 1.7, а);

2) травление с перемешиванием раствора; в этом случае дно лунки близко к сферическому или эллиптическому за счет поступления свежих доз травителя в зону травления (рис. 1.7, б).

Углы и выступы травятся быстрее, чем углубления, ввиду разности скоростей подачи травителя. Изотропное травление, как правило, используют для выполнения отверстий на мембранах и шлифовки.

Разновидностью рассмотренных выше травлений являются селективное и локальное травления. Селективное травление — это растворение полупроводника с различной скоростью на разных участках поверхности с различным химическим составом, а локальное — это удаление материала со строго ограниченных и заданных участков полупроводника, которое обеспечивает получение заданного рельефа поверхности.

Размерное травление, например, сквозных щелей производят щелочными травителями. Для получения прецизионных фигурных областей со сложной формой микропрофиля применяют анизотропные травители, чаще всего водные растворы едкого калия. Для большинства кристаллографических направлений скорость травления максимальна при 33 %-й

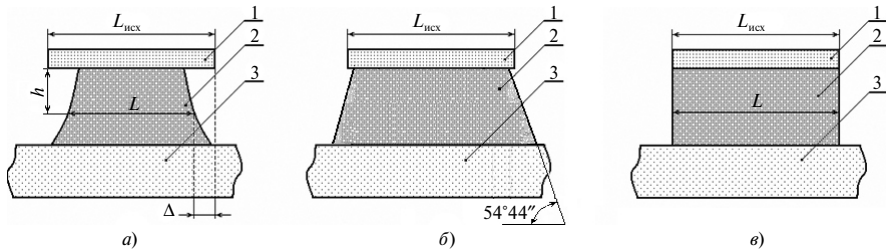


Рис. 1.6. Виды травления кремния: а) изотропное; б) анизотропное; в) сухое; 1 — маска; 2 — монокремний; 3 — подложка; Δ — подтравка под маску

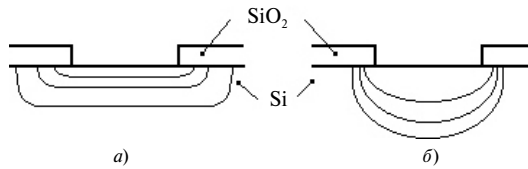


Рис. 1.7. Изотропное травление

концентрации КОН и температуре 50–95 °С. Скорость травления в зависимости от кристаллографического направления соответствует следующему ряду:

$$V_{[110]} > V_{[100]} > V_{[210]} > V_{[211]} > V_{[221]} > V_{[111]}$$

На рис. 1.8, а приведен пример чипа для травления канавок в плоскости (100). Внешние ребра чипа ориентированы в семействе направлений <110>. Достоинством пластины рассматриваемой ориентации является то, что все внутренние и внешние грани канавок травления ориентированы в семействе плоскостей (111). Это благоприятно сказывается на живучести изделия, так как прочность в направлении [111] является максимальной.

Внутренние прямые углы при анизотропном травлении выдерживаются точно, а у внешних углов имеет место подрезка в семействе плоскостей (211), поскольку скорость травления $V_{[211]}$ меньше скорости $V_{[100]}$ в среднем лишь в два раза. Анизотропное травление в плоскости (100) характеризуется тем, что полученные фигуры травления ограничиваются следами плоскости (111), т. е. представляют собой лунки травления, имеющие квадратные или прямоугольные формы, а в глубину — пирамидальное строение. При этом подтравливания под маску практически не происходит. Внешние углы травятся быстрее (подрезаются), так как они не принадлежат плоскости (111). Устранение подрезки внешних углов возможно с помощью топологических маскирующих припусков-компенсаторов (рис. 1.8, б). Размеры компенсаторов определяются глубиной травления кремния в плоскости (100) и отношением скоростей травления в основном и дополнительных направлениях. Типичное отношение скорости травления в направлении [100] к скорости в направлении [111] составляет

$$V_{[100]} : V_{[111]} = 400 : 1. \tag{1.1}$$

Общее правило травления канавок (или сквозных щелей) в плоскости (100) можно сформулировать следующим образом. При достаточно длительном травлении анизотропным травителем через окно произвольной формы вытравливается пирамидальное углубление с боковыми гранями в семействе плоскостей (111), наклоненными к исходной плоскости (100) под углом 54° 44'.

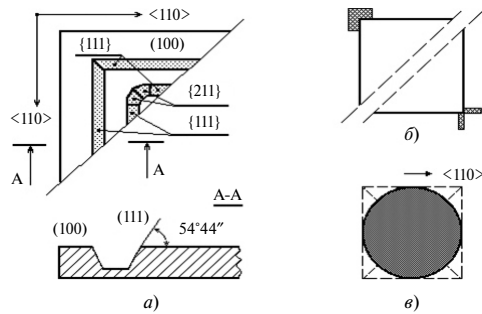


Рис. 1.8. Анизотропное травление кремния в плоскости (100)

Исходное произвольное окно в маске точно вписывается в прямоугольник, ориентированный сторонами в семействе направлений $[110]$ (рис. 1.8, *з*). В частном случае для круглой маски результирующей фигурой травления является квадрат (рис. 1.8, *б*). Таким образом, при неточной ориентации сторон прямоугольных масок с направлением $[110]$ всегда имеет место подтравливание под маску на величину этой неточности.

Выбор среза кремния в плоскости (100) для изготовления интегральных датчиков с глубокими сквозными травлениями обусловлен тем, что именно здесь пересекаются плоскости (100), (111) и (211) с регулярной симметрией. Для специальных применений известны разнообразные методы травления канавок с вертикальными гранями, например, в плоскостях (110) и (111).

Скорость травления защитной пленки из двуокиси кремния при тех же режимах в среднем на порядок ниже скорости травления самого монокремния и составляет доли микрометров в минуту, в то время как скорость травления монокремния составляет единицы микрометров в минуту. Известно также, что при травлении кислотными травителями соотношение для ряда скоростей травления в зависимости от кристаллографического направления является таким же, как и для щелочных. На скорость травления значительное влияние оказывают концентрация примесей и их тип в кремнии. Поэтому при травлении *p*- и *n*-кремния в составы анизотропных травителей вводят различные присадки. Разработаны также разнообразные самотормозящиеся виды травлений. Например, для травителя из одной части 48 %-го раствора HF, восьми частей 99,5 %-го раствора CH_3COOH и трех частей 70 %-го HNO_3 для обоих типов проводимости скорость травления зависит от удельного сопротивления. Так, при $\rho < 10^{-2}$ Ом·см скорость травления составляет 0,7–3 мкм/мин, а при $\rho < 6,8 \cdot 10^{-2}$ Ом·см она падает почти до нуля. Комбинируя предварительные диффузии с анизотропными и изотропными травителями, можно получать с заданной размерной точностью достаточно сложные объемные микроформы чувствительных элементов. Процесс анизотропного травления чувствительного элемента представляет собой поэтапное удаление атомных слоев (слой за слоем) с поверхности кристалла, т. е. в процессе травления на поверхности кристалла образуются микроскопические ступеньки. Анизотропное травление не дает зеркальных поверхностей, тем не менее при нем точно выдерживаются боковые поверхности в микропрофилях. Затем чувствительный элемент обрабатывают в течение 30 с в полирующем растворе изотропного травителя, состоящем из смеси плавиковой, уксусной и азотной кислот, взятых в пропорции 1:1,2 : 6,2.

Обработка в полирующем растворе сглаживает микронеровности, остающиеся после анизотропного травления, в результате чего предел прочности повышается в три-четыре раза [20]. В прил. 2 приведены виды и характеристики травления кремния.

Для полупроводникового кремния из-за наличия на поверхности стабильного оксида SiO_2 выбор травителей ограничен, поэтому для кремния в основном используют травители на щелочной основе или на основе растворов с содержанием фтористоводородной кислоты. Механизм травления в щелочных травителях является химическим, а в растворах с содержанием фтористоводородной кислоты имеет ярко выраженный электрохимический тип.

Контроль глубины травления, а также воспроизводимости размеров упругих элементов осуществляют различными методами (рис. 1.9), среди которых распространение получили следующие.

1. Контроль по времени травления: $V_{\text{тр}} = h/t$, где $V_{\text{тр}}$ — скорость травления; h — глубина травления; t — время травления. Его основное достоинство — простота, а недостаток — низкая воспроизводимость (± 1 мкм) из-за нестабильности процессов. Применяется для небольших глубин и размеров (до 10 мкм).
2. Оптический метод (рис. 1.9, а) пригоден для упругих элементов толщиной до 25 мкм. О толщине пластины судят по изменению ее цвета, определяемого цветоанализатором.
3. Метод предварительного подтравливания осуществляется со стороны, противоположной глубокому травлению (рис. 1.9, а), и со стороны глубокого травления (рис. 1.9, б). Этот метод эффективен для датчиков давлений с несимметричной мембраной.
4. Применение самотормозящих видов травления (рис. 1.9, в). Когда травитель доходит до бора, скорость травления снижается в 50 раз. Точность травления определяется точностью диффузии, ионной имплантации. Достоинства — высокая точность и независимость от толщины пластины. Недостатки — годится только для тонких мембран и односторонних упругих элементов, меняются свойства кремния из-за внедрения бора (происходит шелчок при работе мембраны — релейный переход).
5. Метод контрольных окон. Практический метод. Окошечки травят с обеих сторон пластины на глубину $0,5 h$ (при двухстороннем травлении) или h (при одностороннем травлении) (рис. 1.9, г). В каждом последующем слое эти четыре окошечка травятся в конечном итоге до тех пор, пока не протравятся насквозь.

В процессе размерного травления происходит подтравливание под защитную маску. Глубина подтравливания зависит от времени травления и соотношения скоростей травления в основном и боковом направлениях:

$$\Delta = V_{[100]} t / A \sin \alpha,$$

где $V_{[100]}$ — скорость травления в направлении, перпендикулярном плоскости (100); t — время травления; $A = V_{[100]}/V_{[111]}$; $V_{[111]}$ — скорость травления в направлении, перпендикулярном плоскости (111).

Для жидкостного травления полупроводникового кремния разработаны составы травителей с различными свойствами. Они обеспечивают разные скорости травления, обладают различной степенью токсичности, требуют комнатной или повышенной температуры. Например, при травлении полупроводникового кремния в плоскости (100) в 30 %-м растворе этилендиамина в деионизованной воде при температуре травителя 100°C $V_{[100]} = 100$ мкм/ч, $V_{[111]} = 0,5$ мкм/ч, соответственно $A = 200$. Чтобы осуществить сквозное травление на пластине толщиной 0,38 мм с двух сторон, требуется время травления около двух часов.

Подставляя известные значения в формулу $\Delta = V_{[100]} t / A \sin \alpha$, получим величину подтравливания $\Delta = 1,224$ мкм. Следовательно, фактический размер a при травлении относительно рассматриваемого окна (рис. 1.10) будет уменьшен на 2Δ .

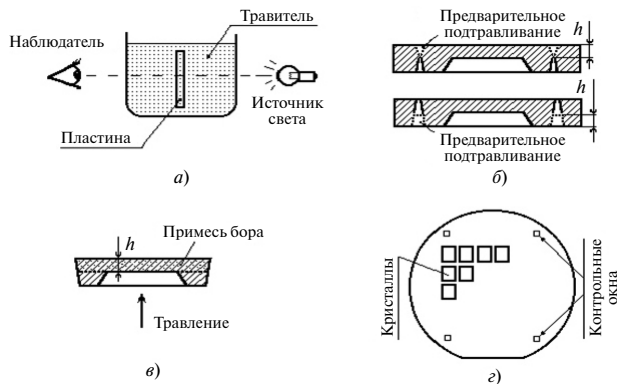


Рис. 1.9. Методы контроля глубины травления: оптический (а); предварительное подравливание (б); самотормозящийся (в); контрольных окон (г)

Для чувствительной массы размерами $A_m = 1$ мм, $B_m = 1$ мм погрешность от подравливания составляет около 0,24 %, для $A_m = 2$ мм, $B_m = 2$ мм — около 0,122 %, для $A_m = 3$ мм, $B_m = 3$ мм — 0,081 %. При размерном травлении кремния широко используются щелочные травители на основе КОН, NaOH. Эти травители менее токсичны, имеют неограниченный срок хранения, просты в обращении и обеспечивают более высокую воспроизводимость размеров при травлении, чем травители на основе этилендиамина. Водный раствор КОН (350 г/л) при температуре 100 °С обеспечивает скорость растворения кремния в плоскости (100) $V_{(100)} = 192$ мкм/ч, в плоскости (111) $V_{(111)} = 6,6$ мкм/ч. Скорость травления защитной пленки $V_{SiO_2} = 0,48$ мкм/ч. Отношение скоростей следующее:

$$A = V_{(100)}/V_{(111)} = 30, V_{SiO_2}/V_{(100)} = 0,0025.$$

Процесс травления кремниевых пластин толщиной 0,38 мм с двух сторон с использованием водного раствора КОН для получения сквозных щелей занимает около 1 ч.

Ребра прямоугольных или квадратных несущих пластин ЧЭ ориентируют в направлении [110], которое на исходных заготовках указывается в виде среза. При этом в протравленных сквозных отверстиях боковые поверхности оказываются ориентированными в направлении [111] и, соответственно, на них имеет место наибольшая плотность упаковки кристаллических центров. Для кремния в направлении [111] модуль упругости является максимальным, что придает элементам конструкций в этом направлении наибольшую прочность.

Альтернативой объемной микротехнологии является поверхностная. При ее использовании (рис. 1.11) заготовки для ЧЭ применяют трехслойные:

- слой поликремния, в котором выполняют ЧЭ;
- жертвенный слой из двуокиси кремния (стекла);
- слой монокремния, служащий основанием.

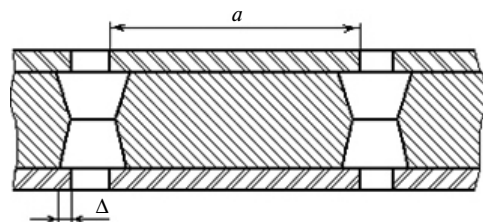


Рис. 1.10. Схема подравливания под защитную маску

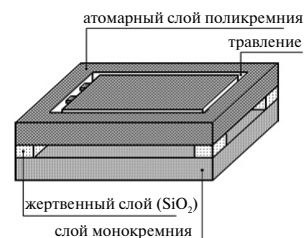


Рис. 1.11. Поверхностная микротехнология

1.3. Сухое травление кремния

Рассмотрим особенности сухого травления как перспективного метода (рис. 1.12).

Для технологического процесса изготовления микросистемных элементов и устройств наиболее подходящим является сухое травление. Этот процесс называется ионно-плазменным. Он основан на использовании компонентов низкотемпературной газоразрядной плазмы — ионов, электронов и возбужденных атомов. Существует несколько типов сухого травления: 1 — ионное травление (ИТ); 2 — ионно-плазменное травление (ИПТ); 3 — ионно-химическое травление (ИХТ); 4 — реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ); 5 — реактивное ионно-лазерное травление (РИЛТ); 6 — плазменное травление (ПТ); 7 — реактивное травление (РТ). Ионно-плазменное травление является базовым и благодаря возможности анизотропного травления обуславливает высокое разрешение при переносе рисунка.

Кремниевые пластины сначала очищают в водном растворе растворителей с ксилолом, изопропилового спирта или других. Очищенные пластины высушиваются и загружаются в кварцевый держатель, называемый лодочкой. Затем пластины помещают в кварцевую трубу или ячейку диффузионной печи для окисления. Через входной конец трубы подается поток «сухого» кислорода для выращивания на поверхности кремниевой пластины диоксида кремния.

Для каждой разновидности ионно-плазменного травления кремния, отмеченных на рис. 1.12, разработаны специализированные установки. Наиболее простой установкой является диодная схема рис. 1.13, при которой между анодом и катодом прокачивается аргон.

Плазменное травление — метод травления кремния под действием компонентов газоразрядной плазмы. Преимуществом всех видов сухого травления по сравнению с жидкостным является высокая анизотропия процесса. А для плазменного травления положительным свойством является еще и отсутствие необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей, содержащихся в исходных реагентах.

Катод по размерам выполнен значительно меньше анода, к тому же катод экранирован, а экран соединен со стенками камеры и одновременно заземлен. Плазма занимает весь объем камеры. Поэтому для увеличения концентрации реагента около подложки вся внутренняя поверхность рабочей камеры является анодом.

Наиболее эффективной для сухого травления является универсальная установка, показанная на рис. 1.14. Установка состоит из вакуумной камеры 1 и газоразрядного реактора 4. В методе ионно-лучевого травления источником ионов обычно является разряд постоянного тока, ограничиваемый полем постоянных магнитов 5, причем область разряда физически

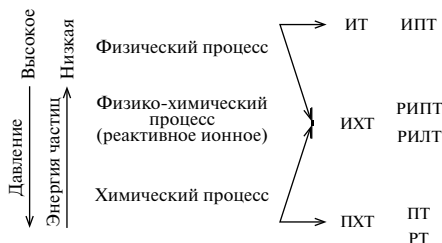


Рис. 1.12. Классификация процессов сухого травления от сочетания давления и энергии ионов плазмы

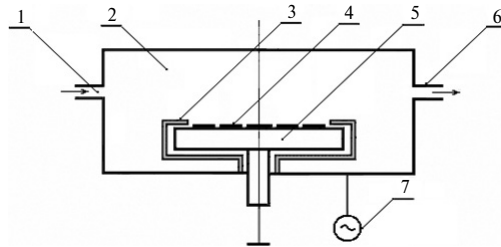


Рис. 1.13. Диодная схема сухого травления: 1 — патрубок подачи аргона; 2 — плазменная камера; 3 — экран у катода; 4 — подложка; 5 — катод; 6 — патрубок отвода реактанта; 7 — высоковольтный источник напряжения

отделена от стравливаемой подложки 2 системой сеток (электродов) 3 и 9, на которые подаются потенциалы смещения, обеспечивающие экстрагирование ионного пучка (обычно Ag^+) из разряда. Для обеспечения используемых на практике плотностей тока пучка ($\leq 1 \text{ мА/см}^2$) требуется сообщать ионам энергию выше 500 В. Для нейтрализации ионного пучка на его пути размещается разогреваемая нить накала 8, инжектирующая в анод 7 электроны низких энергий. Стравливаемая подложка размещается на поворотном столике 10.

Активными частицами в травлении кремния являются атомы фтора и его радикалы SF_3 . Вклад последних в скорость травления составляет около 30%. Скорость травления подложки при всех составах плазмы прямо пропорциональна концентрациям атомов фтора и разности потенциалов поверхности. При низких давлениях, когда потенциал смещения образца относительно плазмы велик и энергия ионов составляет порядка 100 эВ, скорость травления пропорциональна потоку ионов, а травление названо ионно-стимулированным. Скорость травления легированного кремния зависит также от степени и типа его легирования.

Однако в плазме эффект ионного стимулирования вуалируется другими причинами: переосаждением распыляемых материалов с электродов и стенок на поверхность образцов. В результате возникает ее пассивация, которая снижает скорость травления. Такое же влияние оказывает окисление поверхности кремния атомами, образующимися за счет диссоциации молекул кислорода из примесей в плазмообразующем газе, натекающем из атмосферы.

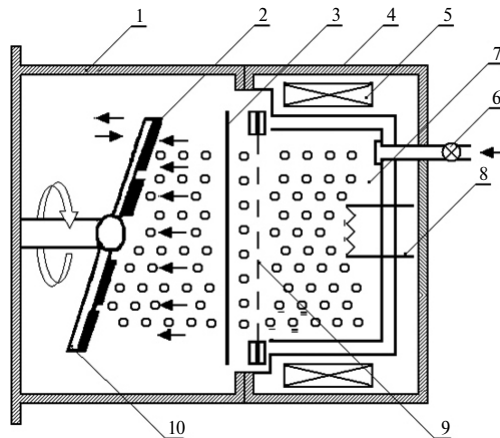


Рис. 1.14. Установка сухого травления с отдельным реактором: 1 — вакуумная камера; 2 — подложка; 3 — нейтрализатор; 4 — газоразрядный реактор; 5 — магнит; 6 — натекающая; 7 — анод; 8 — катод; 9 — система линз; 10 — поворотный столик

Основной продукт, испаряющийся с поверхности травления, — насыщенный фторид SiF_4 . Вследствие высокой летучести SiF_4 толщина фторированного слоя на поверхности травления мала (~1 нм) и состоит из ненасыщенных фторидов SiF_x ($x = 1-3$), что свидетельствует о последовательном протекании реакций фторирования.

С помощью рассматриваемой установки сухое травление кремния может осуществляться также посредством хлорсодержащей плазмы. При этом пассивация поверхности проявляется за счет атомов хлора. А вследствие ионной бомбардировки обеспечивается анизотропия травления, которая увеличивается по мере роста энергии ионов (низкое давление, низкая частота поля, наложение дополнительного смещения потенциалов от независимого источника или самосмещение). Однако по мере увеличения анизотропии увеличивается и опасность ухудшения качества поверхности после травления — нарушенная структура, состав, встроенный поверхностный заряд и др.

Скорости травления увеличиваются по мере роста давления газа и мощности разряда. При больших площадях поверхности экспонируемых образцов наблюдается изменение состава плазмы за счет больших потоков продуктов, а также обеднения плазмы активными частицами. Это приводит к так называемому эффекту большой загрузки — снижению скорости травления с увеличением площади образцов.

В хлорсодержащей плазме, как и при ионно-стимулированном травлении, травление происходит только за счет ионной бомбардировки и наблюдается высокая анизотропия при низких скоростях травления. При использовании фторхлорсодержащей плазмы анизотропия за счет пассивации хлором сохраняется, а скорость травления увеличивается за счет бомбардировки атомарным фтором.

Использование структур «кремний на изоляторе» (КНИ) для изготовления чувствительных элементов микроакселерометров и микрогироскопов (а также датчиков давления и других МЭМС) дает существенные преимущества как в упрощении технологии изготовления конечного изделия, так и при интеграции элементов микромеханики и электроники. Благодаря полной диэлектрической изоляции всех элементов МЭМС на структурах КНИ возможно создание интегрированных (интеллектуальных) систем в одном кристалле (например микроакселерометров) с несколькими осями чувствительности. На рис. 1.15 приведена схема изготовления ЧЭ на структуре КНИ.

В дополнение к предыдущим двум технологическим методам развивается метод, использующий 3D-технологии и послойное выращивание объекта на основе разработанной 3D-модели. Подобная 3D-технология может

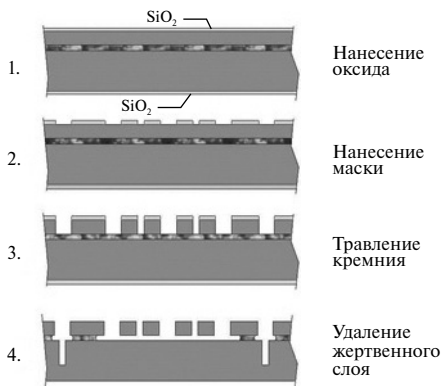


Рис. 1.15. Схема изготовления ЧЭ на структуре КНИ

осуществляться различными способами, в том числе с использованием различных материалов, таких как пластики, жидкое стекло, порошковый поликремний, металлы, керамика и др. 3D-принтеры развиваются не только в виде установок прототипирования, но и как перспективные инструментальные установки для создания (сборки) трехмерных структур, включающих элементы датчиков, коммутационные проводники, изолирующие слои, расстановку и сборку пассивных и активных электронных (оптических) элементов и компонентов.

В зависимости от технологии 3D-принтер может использовать один, два и более

материалов. В основе любого из методов лежит принцип послойного выращивания твердого слоя (объекта) с помощью компьютерной программы. Процесс 3D-технологии является обратным по сравнению с объемным травлением. При травлении, например, кремниевых структур слой кремния или иного материала (металла, диэлектрика и т. п.) удаляются, а при 3D-технологии — наращиваются. Точность получаемых деталей при этих двух методах неодинаковая. Если при травлении получаемая точность в основном зависит от точности фотошаблона, то при наращивании — от точности позиционирования и диаметра экструзионного жиклера. На рис. 1.16 приведена фотография 3D-принтера, включающего следующие узлы: 1 — экструзионная головка с хромоникелевым жиклером; 2 — канал подачи расходного материала; 3 — остов принтера; 4 — акриловая печатная платформа. Чаще всего применяют две экструзионные головки, одна из них — для подачи основного формирующего материала, другая — для подачи легкоудаляемого материала, например для поддержки висячих маятников в пустых камерах. При 3D-методе применяются две принципиально различные технологии: лазерная и струйная. При лазерной технологии используется жидкий фотополимер (лазерная стереолитография) или порошки (лазерное спекание).

Из специального жидкого фотополимера объект формируется посредством затвердевающего микрообъема под действием ультрафиолетового лазерного излучения. Луч лазера постепенно, пиксель за пикселем, засвечивает жидкий фотополимер. При этом он затвердевает и превращается в достаточно прочный пластик, после чего объект погружается в фотополимер на толщину одного слоя, чтобы лазер мог приступить к формированию следующего слоя.

При спекании лазер выжигает в порошке из легкоплавкого пластика слой за слоем контур будущей детали. После этого лишний порошок стряхивается с готовой детали. Возможно также использование ламинирования, при котором детали склеиваются из большого числа слоев расходного материала, при этом лазер вырезает в каждом слое контур сечения будущей детали.

При струйном методе из расходного жиклера выдавливаются на охлаждаемую платформу капли разогретого термопластика. Капли быстро застывают и слипаются друг с другом, формируя слои будущего объекта. Возможно применение нескольких струйных головок для осуществления окраски формируемых деталей.

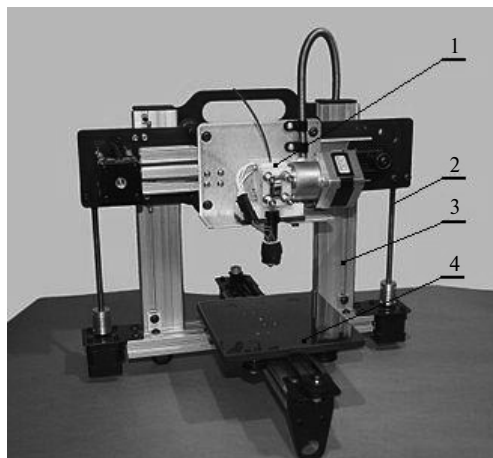


Рис. 1.16. 3D-принтер

Ответственной технологической операцией в конструкциях интегральных датчиков является соединение кремниевых чувствительных элементов с металлическими корпусными деталями. При этом должны быть обеспечены высокая механическая прочность соединения и согласование соединяемых элементов по температурным коэффициентам линейных расширений (ТКЛР). Известные из микроэлектроники методы соединения при помощи стеклянных спаев, фритов, многослойных оксидных пленок, эвтектических сплавов в интегральных датчиках имеют ограниченное применение в связи с тем, что требуемая температура соединения должна быть 700°C и выше. Допустимая температура нагревания элементов с запыленными алюминиевыми контактными площадками, а также электродами емкостных датчиков составляет порядка 450°C . Применение в качестве напыляемого металла золота расширяет допустимый диапазон температур до 800°C .

Перспективным методом соединения кремниевых элементов (или металлических корпусных деталей) с боросиликатными или другими ионосодержащими стеклами является метод диффузионной сварки в электрическом поле (рис. 1.17).

Метод основан на том, что при нагревании до температуры свыше 300°C боросиликатные стекла становятся электрическими проводниками. Качество сварки зависит от подбора стекла (ЛК5, ЛК105) с ТКЛР, близким к кремнию. Необходимые условия для успешного проведения сварки следующие:

- 1) качественная полировка кремния и стекла, желательно на оптический контакт (по кольцам Ньютона);
- 2) рекомендуемая температура косвенного разогрева при сварке равна 450°C , так как происходит одновременная стабилизация алюминиевых проводников;
- 3) при малых воздушных зазорах в интегральных датчиках следует выбирать минимальное напряжение из-за возможной деформации упругого элемента. В месте контакта при максимальном токе разогрева температура повышается до 560°C , что вполне достаточно для надежного соединения.

Процесс диффузионной сварки состоит из следующих основных стадий:

- образование физического контакта посредством сближения свариваемых поверхностей, при этом удельное давление в местах сварки должно составлять 10^5 – 10^6 Па [19];
- активизация свариваемых поверхностей для протекания химических реакций, при этом свариваемые поверхности нагревают до температуры порядка 400°C ;
- распространение эффектов взаимной диффузии. Необходимая величина адгезионной силы создается электрическим полем за счет притяжения свариваемых поверхностей как некоторых электродов в микроконденсаторе. Электрический потенциал, подводимый к свариваемым поверхностям, составляет 50–5000 В. Полярность подключения возбуждающего напряжения к свариваемым деталям большого значения не имеет, тем не менее в существующих приспособлениях групповой сварки предусмотрена возможность смены полярности. Сварку осуществляют в течение 10–30 мин. Толщина свариваемого слоя составляет 10–500 нм и зависит от начального удельного давления, температуры и величины электрического потенциала.

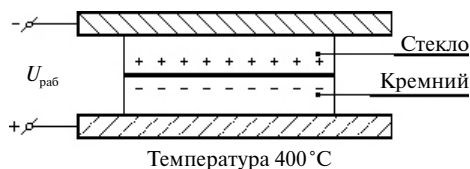


Рис. 1.17. Электростатическая диффузионная сварка

Известно успешное применение диффузионной сварки в электрическом поле при серийном производстве кремниевых акселерометров. Для соединения кремния с кремнием на поверхности одной из свариваемых деталей предварительно выращивают слой борсодержащего диоксида кремния, а для соединения кремния с металлами и сплавами применяют промежуточные слои (или пластины) из ионосодержащих стекол. Широкое распространение в последнее время находит соединение кремниевых пластин с использованием алюминиевого подслоя (рис. 1.18).

Основными преимуществами этого способа являются:

- 1) отсутствие изменений зазоров в соединяемых пластинах;
- 2) исключение как поверхностных, так и объемных токов утечки, так как места соединений являются локальными, т. е. электрически никак не связаны со всеми соединяемыми пластинами;
- 3) отсутствие механических напряжений между соединенными пластинами.

При разработке интегральных датчиков часто приходится сталкиваться с различными противоречивыми требованиями. Например, не всегда может быть решена конструктивным путем задача сведения к минимуму жесткости упругих элементов при достаточно эффективном пределе прочности. Для снижения жесткости нельзя беспредельно уменьшать толщину подвеса, так как микронеровности становятся соизмеримыми с рабочими толщинами, а это приводит к резкому снижению предела прочности. Неприемлемо также для снижения жесткости увеличение длины подвесов, поскольку при этом повышается вероятность на большой длине проявиться большему числу врожденных дислокаций, а это, в свою очередь, снижает выход годных элементов. Компромиссное решение данного вопроса — использование полирующих растворов для сглаживания микронеровностей на тонких упругих перемычках.

Основное препятствие широкого внедрения интегральных датчиков до сих пор — технологические трудности получения заданной точности в групповых изделиях на одной пластине, а также в изделиях от пластины к пластине, поскольку исходные заготовки кремния в виде пластин не являются идеальными, а имеют локальные дефекты в виде неоднородностей структуры, неплоскопараллельности (выпуклости, вогнутости), остаточных напряжений после механической обработки, температурных напряжений, возникающих от разницы ТКЛР между исходными базовыми областями и диффузионными областями (или слоями). Различные виды дефектов пластин-заготовок показаны на рис. 1.19.

Неоднородность исходных пластин по толщине приводит к разбросу расчетных характеристик получаемых интегральных датчиков. Найдены частичные решения этой

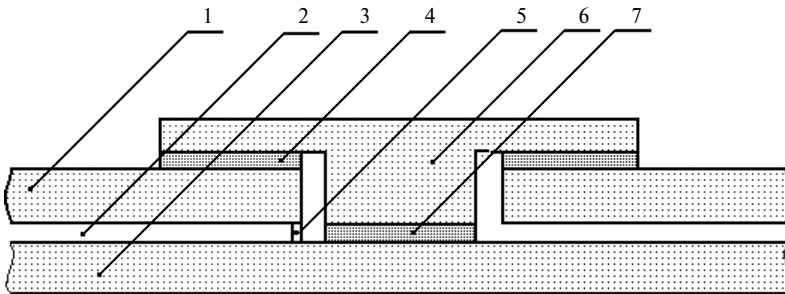


Рис. 1.18. Фрагмент соединения кремниевых пластин с использованием алюминиевого подслоя: 1, 3 — соединяемые кремниевые детали; 2 — зазор между пластинами; 4, 7 — алюминиевый подслой; 5 — технологическая перемычка; 6 — узел соединения

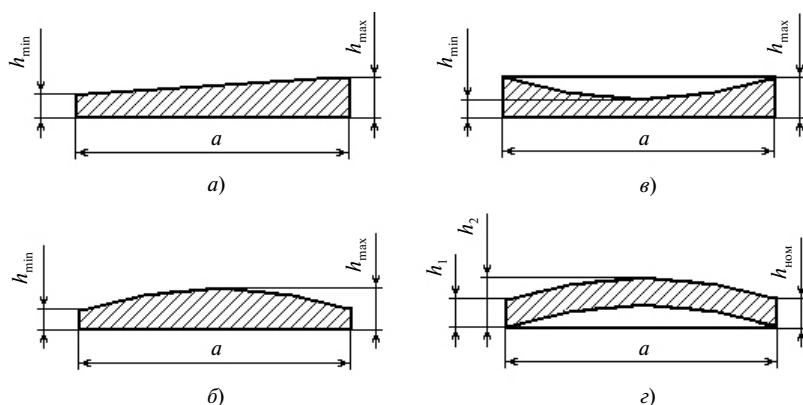


Рис. 1.19. Дефекты кремниевых пластин: а) неплоскопараллельность; б) выпуклость; в) вогнутость; г) коробление

проблемы в виде предварительного анализа исходных пластин и последующего управляемого травления [33].

Для обеспечения большего процента выхода годных изделий пластины-заготовки после механической обработки подвергают химико-технологической доводке. При этом после контроля толщины пластины по всей поверхности применяют анизотропное выравнивание, учитывая зависимость скорости травления от освещенности. В первом приближении эта зависимость является линейной. По результатам измерения толщины подбирают светотеневые маски, что обеспечивает различную локальную скорость травления. Одним из недостатков этого способа является необходимость многократного промежуточного контроля толщин пластины.

При производстве интегральных датчиков контролируют также глубину. Большой проблемой в начальный период разработок микродатчиков, особенно маятниковых чувствительных элементов с малой жесткостью упругих подвесов, стал эффект электростатического «залипания». Силы электростатического притяжения подвижных узлов к неподвижным оказались настолько значительными и неуправляемыми, что чувствительные элементы в непредсказуемые моменты времени становились практически полностью неработоспособными.

Был найден [14] простой и эффективный метод исключения «залипания» посредством выполнения охранных заземленных контуров проводимости на неподвижных пластинах. Расположение охранных контуров должно быть против острых ребер и кромок подвижных узлов, т. е. в местах концентрации электрического поля, в целях отвода блуждающих зарядов на «землю».

1.4. Методы глубокого вертикального травления кремния

В основе плазменного травления лежит влияние ионной бомбардировки на поведение нейтральных частиц, особенно на стимуляцию их химического травления поверхности с образованием летучих продуктов. Так как направление электрического поля в катодной области перпендикулярно поверхности пластины, то инжектируемые из плазмы ионы движутся вдоль поля, что приводит к возрастанию скорости травления по вертикали относительно

скорости травления по горизонтали; этот эффект называют анизотропным травлением. Электроны и фотоны также попадают на пластину, но не направленно, и их энергия намного меньше. Так как задачей травления в производстве микроструктур является точное воспроизведение элементов изображения маски, то анизотропное травление обладает большим преимуществом вследствие уменьшения подтравливания маски из-за бокового травления. Вследствие значительных преимуществ в уменьшении размеров микросхем анизотропия травления является наиболее важным фактором применения плазменного травления. Для объяснения механизма травления, стимулированного ионной бомбардировкой, предложено много моделей. Наиболее вероятно, что с изменением химических условий в системе изменяется и механизм ускоренного травления. На рис. 1.20 [8] показан профиль структуры после анизотропного травления, иллюстрирующий один из предложенных механизмов, при действии которого радикалы, образующиеся в плазме, осаждаются на пленке, либо защищая ее от воздействия радикалов травителя, либо рекомбинируя с ними и тем самым дезактивируя их. Эти центры пассивации-рекомбинации сохраняются на боковой стенке структуры, но десорбируются с ее основания под действием ионной бомбардировки, что стимулирует травление. При определенных условиях в плазме наблюдают переход от осаждения к травлению, если на пластину подано отрицательное смещение, чтобы энергия ионов возрастала. В этом случае ионы очищают поверхность, что облегчает протекание самопроизвольной химической реакции травления. Ионная бомбардировка может также активировать реакцию травления, которая самопроизвольно не идет. Активация может быть обусловлена удалением при бомбардировке плотно хемосорбированных продуктов травления, что открывает доступ реагента к поверхности, или же возникновением на поверхности химически активных радиационных нарушений.

Следует заметить, что механизм анизотропного травления, изображенный на рис. 1.20, имеет ограничения по глубине травимой канавки до нескольких мкм.

Для проведения процессов травления канавок в кремнии на глубину до 100 мкм и более с вертикальными стенками был предложен так называемый Bosch-процесс. Его суть состоит в многократном повторении двухстадийного цикла травления [60]. В первой стадии цикла производится травление кремния через маску на сравнительно небольшую глубину

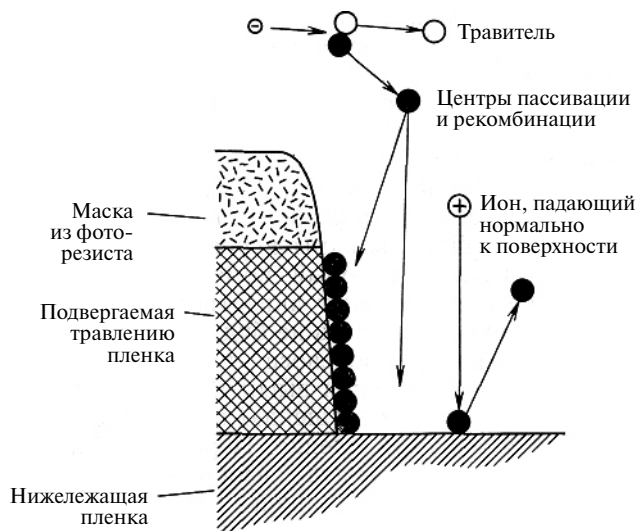


Рис. 1.20. Иллюстрация механизма анизотропного травления

в среде элегаза (SF₆) (рис. 1.21, *а*). Во второй стадии цикла производится пассивация стенок протравленного профиля с помощью, например, разряда на основе хладона-318 (C4F8) (рис. 1.21, *б*). В следующем цикле травления ионная компонента разряда удаляет пассивирующий слой полимера со дна канавки и углубляет ее, в то время как боковые стенки канавки остаются защищенными маскирующим слоем полимера (рис. 1.21, *в*). Далее снова проводится пассивирующая стадия и т. д. В результате травление идет только в вертикальном направлении с небольшими периодическими подтравками в боковых направлениях.

В настоящее время существует ряд плазменных источников, которые могут быть использованы для травления кремния. Основными из них являются реактивное ионное травление (RIE — Reactive Ion Etching), реактивное ионное травление с концентрацией магнитным полем (MERIE — Magnetically Enhanced Reactive Ion Etching), электронный циклотронный резонанс (ECR — Electron Cyclotron Resonance), индуктивно связанная плазма (ICP — Inductively Coupled Plasma) и т. п. Не все из них применимы для глубокого травления кремния с высоким аспектным соотношением. Возможность использования плазменного источника для этих целей можно наилучшим образом оценить с точки зрения их критических действующих параметров. Одним из ключевых параметров является давление, от которого в значительной мере зависят физические свойства плазмы, химические процессы, происходящие в объеме плазмы. Существует тенденция к понижению давления с сохранением качества и воспроизводимости травления, особенно для травления узких профилей и/или профилей с высоким аспектным соотношением. Уменьшение давления приводит к уменьшению числа столкновений иона с нейтральными атомами и молекулами, что увеличивает поступление ионов в зону реакции. Кроме того, появляются такие преимущества, как, например, повышение энергозависимости побочных продуктов реакции и уменьшение концентрации газовой фазы, а также отсутствие поверхностной полимеризации. Дополнительные преимущества — это уменьшение остатков продуктов реакции, уменьшение вероятности повторного осаждения продуктов реакции.

Стандартная емкостная система разряда, состоящая из двух параллельно расположенных электродов, не может быть применена при низком давлении из-за уменьшения плотности ионов ($n_i < 10^9 \text{ см}^{-3}$) с уменьшением давления (p). Это возникает из возрастающего преобладания деионизации плазмы по мере увеличения среднего свободного пробега ионов, который определяет механизм генерации ионов и радикалов. Источники высокой плотности, механизм которых основан на резонансной передаче энергии, и повышенная степень плазменной концентрации могут преодолеть эти недостатки, обеспечивая при низком давлении и высокую скорость травления. Отклонение траектории движения ионов

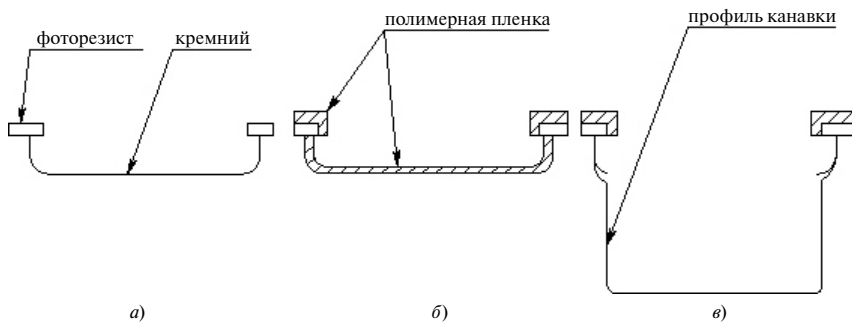


Рис. 1.21. Иллюстрация Bosch-процесса: *а*) 1-й цикл (стадия травления); *б*) 1-й цикл (стадия пассивации); *в*) 2-й цикл (стадия травления)

в результате столкновений ионов с нейтральными атомами в приповерхностном слое может повлиять на профиль боковой стенки. Высокие ионные плотности уменьшают толщину приповерхностного газового слоя, вследствие чего, в свою очередь, уменьшается рассеяние ионов на нейтральных атомах, что потенциально улучшает формирование необходимого профиля. Так, например, такое явление при использовании источника RIE, как уменьшение глубины травления с уменьшением ширины канавки, зависит от многих параметров, включая вероятность столкновений.

Для процесса RIE вертикальный характер боковой стенки канавки обусловлен ионами, траектория пролета которых находится под углом менее чем 2° к поверхности. Такие траектории ионов могут иметь место при низком давлении (10 мТорр) в источнике плазмы высокой плотности. Таким образом, низкое давление (< 10 мТорр) и высокая плотность ионов ($n_i > 10^{11}$ см $^{-3}$) являются критическими параметрами для плазменных источников, применимых для изготовления МЭМС.

Возбуждение плазмы в различных источниках может быть обеспечено с использованием как радиочастотного диапазона волн, так и микроволнового. При этом способ индуктивного возбуждения плазмы в настоящее время признан как, возможно, самый простой и управляемый. ICP-процесс основан на простом принципе функционирования: период изменения осевого магнитного поля (при подаче тока ВЧ на катушку) порождает азимутальное электрическое поле, которое эффективно ограничивает плазменный поток. При этом плазменный поток не пересекает стенки камеры, что обеспечивает минимальное поступление загрязняющих веществ в реакционный объем. Область плазмы высокой интенсивности расположена вплотную к боковым стенам камеры, и амбиполярная диффузия обеспечивает очень однородную плазму внутри камеры. Энергия ионов, попадающих на поверхность подложки, может независимо управляться путем подачи ВЧ-смещения на электрод с образцом. Этот простой принцип функционирования допускает изменение режимов обработки в широком диапазоне и обеспечивает удобство в управлении технологическим процессом, что невозможно при использовании таких способов, как, например, RIE и MERIE. Также нет необходимости в использовании сложных катушек магнитных полей, микроволновых компонентов для возбуждения плазмы, что значительно снижает стоимость оборудования, использующего источник ICP.

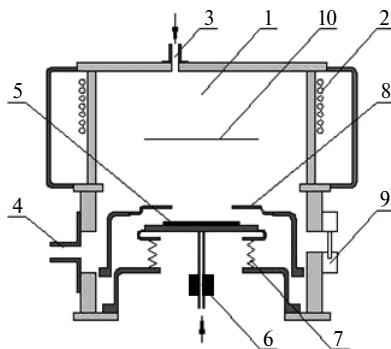


Рис. 1.22. Схема ICP-реактора с цилиндрическим индуктором: 1 — камера; 2 — индуктор (13,56 МГц); 3 — ввод газовой смеси; 4 — магистраль откачки камеры; 5 — электрод с обрабатываемой пластиной; 6 — ввод газа для охлаждения электрода и контакт подачи высокочастотного смещения на электрод; 7 — система контроля и управления температурой охлаждения электрода; 8 — подвижный фиксатор электрода; 9 — клапан для герметизации камеры; 10 — рабочее положение обрабатываемой пластины

Как следует из вышеизложенного, ICP является наиболее оптимальным плазменным источником для глубокого анизотропного травления кремния с высоким аспектным отношением. На рис. 1.22 приведена схема ICP-реактора с цилиндрическим индуктором [8].

В соответствии с рисунком в камере поз. 1 установки образуется плазма при подаче высокочастотного напряжения на катушку индуктивности поз. 2. Давление газа в камере регулируется дозированной подачей газа через газовый ввод поз. 3 и откачкой продуктов реакции механическим насосом через магистраль откачки камеры поз. 4. Охлаждение образца осуществляется путем создания теплопроводящей газовой прослойки между пластиной и охлаждаемым электродом (канал поз. 6 на рис. 1.22). Температура образца контролируется и регулируется системой управления поз. 7.

Один из типовых режимов травления глубоких канавок в кремнии с использованием Bosch-процесса включает следующие параметры:

расход газа SF₆ 300 см³/мин,
расход газа C₄F₈ 150 см³/мин,
скважность подачи газов 7 с / 2,5 с,
давление газа 3 Па,
мощность ICP разряда 2000 Вт,
мощность смещения 100 Вт,
температура подложкодержателя 10 °С.

С использованием данного режима травления получен профиль гребенки, показанный на рис. 1.23. Ширина выступов составляет 10 мкм, высота — 100 мкм. Вертикальность профиля — 90±0,5 мкм.

Но следует заметить, что глубокое травление кремния на структуре КНИ имеет важную особенность, приводящую к подтраву профиля в его нижней части. Этот эффект обусловлен отражением ионов от диэлектрической прослойки структуры КНИ вследствие накопления электростатического заряда на диэлектрической поверхности и известен под названием «notching-эффект». Принцип его возникновения показан на рис. 1.24 [62].

Один из практических примеров проявления notching-эффекта представлен на рис. 1.25.

Вследствие проявления «апертурного» эффекта, т. е. зависимости скорости травления от ширины щели, в широких канавках (левая канавка на рис. 1.25) поверхность диэлектрика, достигается раньше, чем в узких (правая канавка на рис. 1.25). И, пока идет дотравливание узкой канавки, на дне широкой проявляется notching-эффект, в соответствии с механизмом, показанным на рис. 1.24.

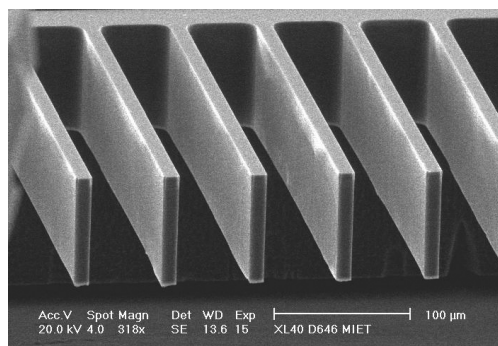


Рис. 1.22. Профиль сквозного травления структуры типа гребенки в типовом режиме травления

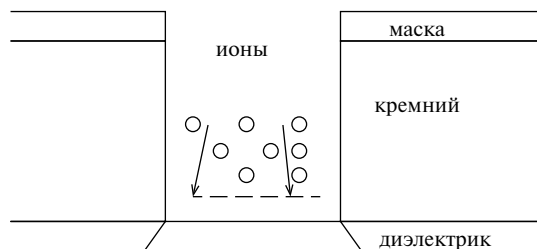


Рис. 1.24. Принцип возникновения notching-эффекта

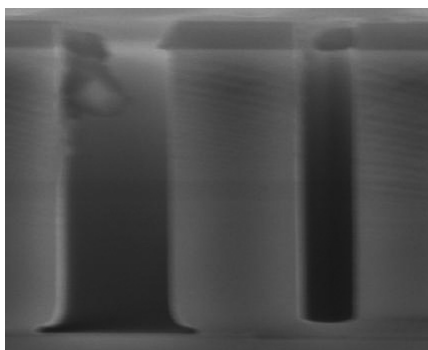


Рис. 1.25. Пример проявления notching-эффекта

Один из способов значительного ослабления или даже исключения notching-эффекта предполагает использование в качестве источника смещения, подаваемого на обрабатываемую подложку, не высокочастотного генератора, а генератора со сравнительно низкой частотой. Кроме того, напряжение смещения подается на электрод — подложкодержатель не непрерывно, а в виде коротких импульсов. Это приводит к «рассасыванию» электростатического заряда на поверхности диэлектрика и к предотвращению notching-эффекта.

Один из примеров глубокого травления кремния в составе структуры КНИ без notching-эффекта показан на рис. 1.26.

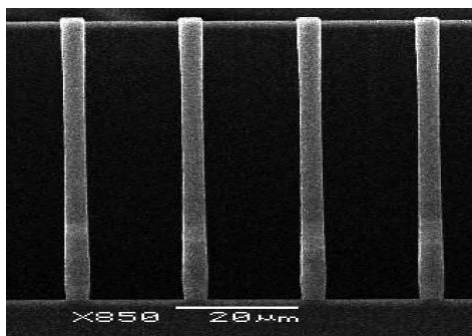


Рис. 1.26. Пример глубокого травления кремния в составе структуры КНИ без notching-эффекта

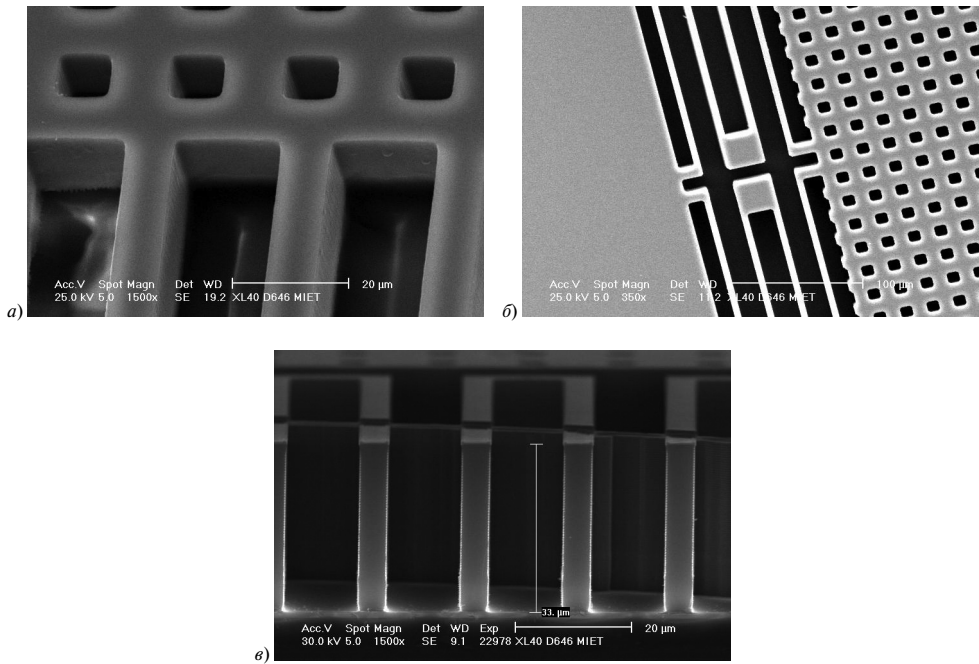


Рис. 1.27. Фотографии структур чувствительного элемента

При формировании структур чувствительного элемента был использован режим глубокого травления кремния без notching-эффекта. В результате были получены структуры с профилями, показанными на рис. 1.27.

1.5. Пористый кремний в микросистемотехнике

Впервые пористый кремний был получен в середине 20-го столетия в процессе исследований электрохимической полировки поверхности кремния в водных растворах HF. Длительное время пленки пористого кремния считались лишь лабораторным курьезом и детально не изучались. Необычайный интерес исследователей к пористому кремнию вызвал обнаруженный в 1990 году эффект излучения света при комнатной температуре в видимой красно-оранжевой области спектра при облучении лазером. Интерес к люминесценции материалов на основе кремния вызван тем, что вся полупроводниковая промышленность основана на монокристаллическом кремнии, который не может быть использован для создания светоизлучающих устройств, так как его излучательная способность ничтожно мала (менее 0,001 %).

В основе стандартного способа формирования пористого кремния лежит процесс электрохимического травления пластин c-Si в водном растворе плавиковой кислоты HF. Важнейшей характеристикой пористого кремния является степень пористости, которая определяет большинство его физических параметров и определяется выражением

$$\Pi = \frac{\rho_{Si} - \rho_{por}}{\rho_{Si}},$$

где ρ_{Si} и $\rho_{\text{por-Si}}$ — плотности монокристаллического и пористого кремния соответственно.

Пористый кремний классифицируют по размеру пор:

микропористый кремний — $R < 2$ нм,

мезопористый кремний — $2 \text{ нм} < R < 50$ нм,

макропористый кремний — $R > 50$ нм.

Степень пористости образца с погрешностью порядка 10 % определяется обычно гравиметрическим методом (взвешиванием). Определение пористости этим методом проводится в три этапа:

1. Взвешивание монокристаллической кремниевой пластины.

2. Вытравливание на ней пористого слоя и взвешивание получившегося образца.

3. Удаление пористого слоя путем стравливания его с кремниевой подложки и повторное взвешивание образца. В настоящее время значения пористости могут варьироваться от 5 до 95.

При положительном потенциале на кремниевом электроде (аноде) протекают многоступенчатые реакции растворения и восстановления кремния. Вторым электродом (катодом) обычно служит платиновая пластина. При подходящем выборе плотности электрического тока на поверхности с-Si происходит формирование пористого слоя. Установлено, что толщина пленки пористого кремния практически линейно зависит от времени травления и может меняться от долей до сотен микрометров. Структура пористого слоя определяется плотностью тока, концентрацией HF в электролите и характером легирования кремниевой подложки. Так, например, для кремния с электронным типом проводимости (n-Si) или сильно легированного дырочного кремния (p+ -Si) поры имеют вид перпендикулярных поверхности каналов диаметром в десятки нанометров с более мелкими боковыми ответвлениями. Для образцов слабо легированного дырочного кремния (p-Si) или при освещении n-Si формируется структура в виде губки или коралла (см. рис. 1.28). Размеры пор и непротравленных участков при этом очень малы и составляют всего несколько нанометров.

В пористом кремнии в основном сохраняется порядок расположения атомов, унаследованный от подложки. Непосредственно после получения поверхность кремниевго скелета образцов пористого кремния покрыта адсорбированным в различных формах водородом. Выдержка на воздухе, особенно сопровождающаяся освещением, приводит к значительному окислению материала. Обобщая различные модели, можно отметить следующее. Поверхность Si при контакте с водными растворами HF насыщается водородом и становится химически инертной по отношению к электролиту. Если на электроды подать разность потенциалов, то дырки в кремниевой пластине начинают мигрировать к поверхности раздела кремний — электролит. При этом атомы Si освобождаются от блокирующего их водорода, начинают взаимодействовать с ионами и молекулами электролита и переходят в раствор. Если электролиз проводят при высокой плотности тока, то к поверхности

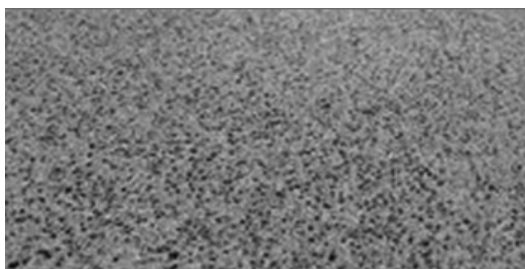


Рис. 1.28. Пористый кремний при стократном увеличении

электрода поступает большое количество дырок. Они движутся к границе раздела сплошным фронтом и обеспечивают реакционную способность практически каждому атому Si. Поскольку микровыступы имеют большую поверхность, чем ровные участки, то они растворяются быстрее. Таким образом, поверхность кремниевого анода постепенно выравнивается. Это и есть режим электрохимической полировки.

С электрической точки зрения материал с пористостью более 50 % полностью обеднен носителями заряда и характеризуется удельным сопротивлением более 107 Ом/см при значении этого параметра у подложки 1–10 Ом/см. Если же электролиз проводить при низкой плотности тока, то количества дырок не хватает для организации сплошного фронта, и поэтому происходит локальное растворение кремния на поверхности. Согласно различным моделям зарождение пор может начинаться на микроуглублениях, дефектах структуры, механически напряженных участках или локальных возмущениях потенциального поля поверхности. С течением времени появившиеся поры продолжают свой рост в глубь электрода за счет дрейфа дырок к кончикам пор, где напряженность электрического поля выше.

Характерной чертой пористого кремния является большая суммарная площадь его внутренней поверхности. В зависимости от величины пористости и геометрии пор она может составлять для макропористого кремния от 10 до 100 м²/см³, для мезопористого — от 100 до 300 м²/см³ и для нанопористого — от 300 до 800 м²/см³. Пористый кремний в зависимости от условий травления обладает широким интервалом величин удельного сопротивления 10⁻²–10¹¹ Ом·см. Теплопроводность высокопористого кремния более чем на порядок ниже, чем у монокристаллического (~10 W/mK при 300 K). Оптические свойства пористого кремния также существенно отличаются от таковых для объемного материала.

При определенных условиях при наличии окислителя пористый кремний имеет тенденцию к воспламенению и детонации при механических, электрических, термических воздействиях. Этот эффект впервые был отмечен в 1992 г. МакКордом, Ю и Бардом (P. McCord S.-L. Yau and A. J. Bard, Science 257 (1992)). Энергия детонации пористого наноструктурированного кремния приблизительно в четыре раза превосходит энергию детонации тротила. В последнее время предлагается использовать детонацию пористого кремния для инициации подушек безопасности в автомобилях, в кассетных реактивных двигателях микросистемных летательных аппаратов.

Высокая удельная энергия при взрыве открывает принципиально новые возможности для использования пористого кремния. На рис. 1.29 показаны этапы процесса разделения кремниевой пластины на отдельные чипы при помощи взрыва слоя пористого кремния [63]. По сравнению с традиционными методами лазерного и алмазного разделения кремниевых пластин данный метод имеет ряд преимуществ:

- 1 — ширина разделительной дорожки может быть уменьшена до 40 мкм;
- 2 — при помощи этого метода можно вырезать кремниевые кристаллы любой формы, в том числе и круглые, и овальные, так как линия разреза формируется при помощи операций фотолитографии.

К другим возможным практическим применениям процесса взрыва пористого кремния следует отнести изготовление самоуничтожающихся кремниевых чипов, а также экологически безопасных пиротехнических схем.

На рис. 1.29,а приведен чип, в котором в маске 1 в кремниевой пластине 3 с помощью метода электрохимического анодирования создана ячейка 2 из пористого кремния. При наличии окислителя, например KNO₃, пористый кремний становится микроисточником 4 энергии, рис. 1.29,б. Его активизация может осуществляться электрическим, термическим или механическим сигналом. Интересно, что при толщине слоя пористого кремния

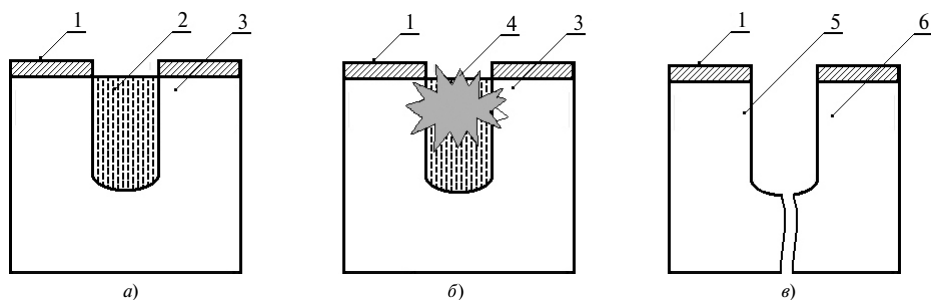


Рис. 1.29. Процесс разделения кремниевой пластины на чипы при помощи взрыва в пористом кремнии

меньше 60 мкм наблюдается процесс горения. А при толщине больше 60 мкм происходит взрыв, сопровождаемый световой вспышкой. На рис. 1.29, в приведен результат разделения исходного одиночного чипа на два — 5 и 6.

Полезным применением пористого кремния является создание на его основе преобразователя радиоактивного β -излучения в электроэнергию (рис. 1.30). Преобразователь состоит из двух сплошных металлических электродов: 1 — анода и 6 — катода. На катоде размещена монокремниевая пластина, диффундированная бором. Над p -пластиной 3 размещен каркас пористого кремния; в свою очередь, каркас выполнен из монокремния электронной проводимости. Поры в каркасе заполнены радиоактивным изотопом 2 никель-63. Возможно также заполнение пор кремния тритием или тем и другим одновременно. Между p - и n -слоями проходит условная граница раздела 4 pn -перехода, показанная тонкими линиями.

Работа происходит в виде образования электрон-дырочных пар при кулоновском взаимодействии проникших в объем полупроводника бета-частиц с электронами атомов кристаллической решетки.

Количество образовавшихся неравновесных носителей заряда пропорционально энергии и интенсивности потока падающих бета-частиц. Вывод электроэнергии осуществляется от сплошных электродов (-) и (+).

За счет большой площади соприкосновения радиоактивного вещества с каркасом пористого кремния увеличивается мощность преобразователя.

Для создания кремниевых приборов, работающих при высоких напряжениях, существует необходимость в толстых диэлектрических слоях толщиной более 10 мкм. Однако диэлектрические пленки SiO_2 , получаемые окислением обычного кремния, не могут быть толще нескольких микрон. Оказалось, что пористый кремний хорошо подходит для

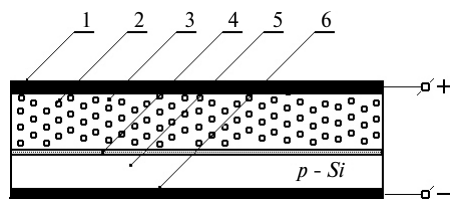


Рис. 1.30. Преобразователь β -излучения в электроэнергию: 1 — положительный электрод; 2 — пора, заполненная радиоактивным изотопом никель-63; 3 — пористый кремний; 4 — pn -переход; 5 — монокремний p -проводимости; 6 — отрицательный электрод

решения этой задачи. Если этот материал подвергнуть термическому окислению, то за счет развитой системы пор молекулы кислорода способны проникнуть на всю толщину пористого кремния и привести к полному его окислению. Оптимальными для этих целей являются слои с пористостью около 50%. Важно отметить, что процесс формирования диэлектрических пленок с использованием пористых слоев происходит при температурах, более низких, чем при традиционном термическом окислении кремния.

С усложнением функциональных возможностей интегральных схем плотность элементов в них увеличилась настолько, что потребовалось найти способ исключить токи утечки между ними через кремниевую подложку. Для этого была предложена структура «кремний на изоляторе» (КНИ). КНИ-структура представляет собой основу из диэлектрического материала с выращенным монокристаллическим слоем кремния. В этом случае элементы интегральных схем формируются в объеме слоя, после чего выполняется операция локального окисления по их периметру и каждый элемент становится изолированным от своих соседей. В качестве изолирующей основы структур КНИ хорошо зарекомендовал себя окисленный пористый кремний.

Кремний с пористостью меньше 30% оказался эффективным буферным слоем при эпитаксии монокристаллических пленок других полупроводников на кремнии. Основным условием выращивания качественных слоев является близость величин постоянных решеток кремния и наносимого материала. Однако можно выращивать слои с большим рассогласованием решеток, если использовать промежуточные буферные слои. Использование буферного слоя пористого кремния позволило решить задачу выращивания качественных пленок полупроводников GaAs, PbS, PbTe и др. при выращивании структур на подложке кремния.

В пористом кремнии в ходе электрохимического травления возможно получать элементы с различной фрактальной размерностью, квантовые точки, квантовые нити. Поэтому пористый кремний с пористостью больше 50% следует рассматривать как один из материалов нанoeлектроники. Более того, перспективным может оказаться заполнение пор другими химическими соединениями, что даст возможность формировать дополнительные низкоразмерные элементы в объеме пористого кремния.

Образцы пористого кремния, в которых пористость превышает 50%, эффективно люминесцируют. Фотолюминесценция может достигать эффективности до десятков процентов. Длиной волны излучения можно управлять, изменяя условия анодирования. Оказалось возможным получать красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев.

Наиболее заманчивые перспективы практического использования пористого кремния как материала для создания светоизлучающих устройств — светодиодов и плоских цветных дисплеев, связаны с электролюминесценцией. Основной трудностью на пути разработок было выяснение причин старения, приводящих к быстрой деградации структур. Современные электролюминесцентные приборы имеют срок службы несколько лет при квантовой эффективности порядка 10^{-1} %. Это стало возможным в результате введения в рабочий объем атомов углерода или железа.

Для целей интегральной оптики применяются планарные световоды, представляющие собой пленочную структуру, в которой проявляется эффект полного внутреннего отражения. Свет распространяется в слое с высоким показателем преломления, ограниченном с двух сторон слоями с меньшим показателем преломления. Для пористого кремния этот показатель зависит от пористости: чем больше пористость, тем меньше показатель преломления, и поэтому формирование многослойных структур с разной пористостью позволяет

получать на их основе волноводные элементы с низким уровнем потерь. Потери на поглощение можно дополнительно уменьшить окислением слоев пористого кремния. Подобные световоды можно также получить на основе пористого стекла.

Поскольку пористый кремний обладает очень высокой удельной поверхностью, то его можно использовать для создания датчиков влажности, газовых, химических и биологических сенсоров. Принцип действия таких датчиков основан на влиянии внешних молекул на электронное состояние поверхности, что в случае пористого кремния приводит к высокой чувствительности. Обычно такие датчики фиксируют изменение емкостных свойств. Ограничением является высокая химическая активность в окислительной среде, что требует периодической сложной калибровки таких датчиков.

Было обнаружено, что фотовозбужденный пористый кремний может генерировать синглетный кислород. Поскольку кремний сам по себе не является токсичным для организма, его применение в этой области очень перспективно. Кремний быстро окисляется, превращаясь в химически инертный оксид кремния, чего нельзя сказать о современных препаратах, используемых в фотодинамической терапии.

Обсуждаются удивительные свойства слоев пористого кремния, сформированных на подложках из монокристалла Si в электрохимическом процессе. Особое внимание уделяется росту на пять порядков величины квантового выхода фотолюминесценции в таком материале по сравнению с исходной подложкой. Наблюдаемый эффект связан с проявлением квантового размерного ограничения в структурах кремниевого скелета и с пассивацией подавляющего числа дефектов на поверхности этих структур. Кроме того, широко используется высокая фоточувствительность кремния, выражающаяся в изменении электропроводности при освещении, что позволяет преобразовывать световую энергию в электрическую. Этот эффект находит применение в кремниевых фотоприемниках и солнечных батареях.

1.6. Обобщенный закон Гука для анизотропных сред

В анизотропных средах связь между механическими напряжениями и деформациями устанавливается обобщенным законом Гука, который в тензорной записи можно представить в одной из двух форм:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{km}, \quad \varepsilon_{km} = s_{kmij} \sigma_{ij},$$

где σ_{ij} , ε_{km} — тензоры напряжений и относительных деформаций, имеющие второй ранг; c_{ijkl} — тензор модулей упругости четвертого ранга; s_{kmij} — тензор податливости четвертого ранга; i, j, k, m — индексы, принимающие каждый последовательно значения 1, 2, 3.

В общем случае для определения всех напряжений анизотропного материала требуется 81 компонента c_{ijkl} . Однако из условия статического равновесия ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) следует, что тензор модулей упругости является симметричным по первым двум и последним двум индексам, откуда число компонент может быть снижено до 36. Из условия взаимности деформаций следует, что перестановка первых двух индексов со следующими двумя не меняет значения модуля упругости, поэтому число его компонент снижается до 21. Далее можно воспользоваться сокращенной формой записи тензорных индексов, исходящей из того, что внутри пары индексов их можно переставлять между собой, а также пару индексов можно заменять одним по следующему правилу: 11→1, 22→2, 33→3, 23→4, 13→5, 12→6. В результате для кристаллов с кубической симметрией в кристаллографической системе координат [100],

[010], [001] матрица модулей упругости определяется всего лишь тремя независимыми компонентами:

$$c_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix}.$$

Между модулями упругости и коэффициентами податливости в кристаллографической системе координат существует следующая связь:

$$c_{11} = \frac{s_{11} + s_{12}}{(s_{11} - s_{12})(s_{11} + 2s_{12})}, \quad c_{12} = \frac{-s_{12}}{(s_{11} - s_{12})(s_{11} + 2s_{12})}, \quad c_{44} = \frac{1}{s_{44}}.$$

Значения независимых компонент модуля упругости для различных полупроводниковых материалов приведены в табл. 1.4.

Переход от кристаллографической системы координат к произвольной осуществляется с помощью преобразования

$$x'_i = l_i[100] + m_i[010] + n_i[001], \quad i = 1, 2, 3,$$

где x'_i — оси новой системы координат; l_i, m_i, n_i — направляющие косинусы углов между i -й осью новой системы координат и кристаллографическими осями.

Введем для упрощения записи следующие обозначения:

$$c_A = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}, \quad F_i = l_i^2 m_i^2 + m_i^2 n_i^2 + n_i^2 l_i^2, \quad F_{ij} = l_i^2 l_j^2 + m_i^2 m_j^2 + n_i^2 n_j^2, \\ P_{ij} = l_i l_j^3 + m_i m_j^3 + n_i n_j^3, \quad P_{ijk} = l_i l_j l_k^2 + m_i m_j m_k^2 + n_i n_j n_k^2, \quad i, j, k = 1, 2, 3.$$

Таблица 1.4

Материал	$C_{11} \cdot 10^{11}, \text{Н/М}^2$	$C_{12} \cdot 10^{11}, \text{Н/М}^2$	$C_{44} \cdot 10^{11}, \text{Н/М}^2$
Si	1,657	0,639	0,796
Ge	1,284	0,482	0,668
InSb	0,673	0,368	0,430

Таблица 1.5

Модуль упругости	Выражение	Аналогичные по структуре коэффициенты
c'_{22}	$c_{11} - 2c_A F_2$	c'_{11}, c'_{33}
c'_{23}	$c_{12} + c_A F_{23}$	c'_{12}, c'_{13}
c'_{24}	$c_A P_{32}$	$c'_{15}, c'_{16}, c'_{26}, c'_{34}, c'_{35}$
c'_{25}	$c_A P_{312}$	$c'_{14}, c'_{36}, c'_{45}, c'_{46}, c'_{56}$
c'_{44}	$c_{44} + c_A F_{23}$	c'_{55}, c'_{66}

В табл. 1.5 представлены выражения для перехода к значениям модулей упругости в новой системе координат.

Для осуществления расчетов вместо модулей упругости можно использовать привычные определения для изотропной среды:

- 1) модуль Юнга $E'_i \equiv \sigma'_i / \epsilon'_i$;
- 2) коэффициент Пуассона $\nu' \equiv -\epsilon'_j / \epsilon'_i$ при $i, j = 1, 2, 3$ и $i \neq j$;
- 3) модуль сдвига $G'_r \equiv \sigma'_r / \epsilon'_r$ при $\sigma'_q = 0$, $r = 4, 5, 6$, $q = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ и $r \neq q$.

1.7. Чувствительные элементы интегральных датчиков

В зависимости от требований технического задания при конструировании интегральных акселерометров могут быть использованы различные принципы построения: принцип прямого измерения ускорений и принцип измерения с силовой компенсацией. Подвижные узлы могут быть осевого либо маятникового типа, а для выявления их движений используются датчики перемещений или деформаций. Последние чаще всего применяются в приборах прямого измерения, так как для создания деформаций, ощутимых тензопреобразователями, нужны упругие подвесы большой жесткости, что в конечном итоге требует значительных мощностей от датчиков силовой обработки. В конструкциях интегральных акселерометров нашли применение два типа датчиков силовой обработки: магнитоэлектрические и электростатические.

Линейные и угловые акселерометры прямого измерения с тензорезисторными преобразователями обладают невысокой точностью (порядка 5% от диапазона), поэтому их применение ограничено. Интегральные акселерометры прямого измерения с емкостными преобразователями перемещений имеют несколько лучшие характеристики (точность порядка 1%) и для случая газового демпфирования обладают оптимальными значениями относительного коэффициента демпфирования [15].

Первичные чувствительные элементы (ЧЭ) акселерометров и датчиков давлений представляют собой микромеханические преобразователи ускорений (или давлений) в перемещения или деформации упругих подвесов. В интегральных датчиках электронные преобразователи перемещений (или деформаций) конструктивно выполняют на одном узле с ЧЭ, при этом степень интеграции определяется числом функциональных элементов, объединенных в одном узле.

На рис. 1.31 приведены обобщенные варианты кремниевых ЧЭ линейных и угловых акселерометров.

Каждый из них может быть видоизменен по топологии в соответствии с конкретным конструкторским заданием, т. е. может быть выполнен симметричным и несимметричным как в плане, так и относительно упругих подвесов. Симметричная форма подвижной массы относительно упругих подвесов наиболее рациональна в случае применения емкостных преобразователей перемещений, а также преобразователей на полевом эффекте. При использовании тензорезисторных преобразователей упругий подвес, как правило, выполняется смещенным относительно середины толщины подвижного узла. Это делается для того, чтобы поверхность корпусной пластины, поверхность подвижной массы и деформируемая поверхность упругого подвеса были в одной плоскости, т. е. расположены планарно.

Все варианты ЧЭ пригодны для конструирования линейных акселерометров. Варианты (рис. 1.31, а, б) являются универсальными: при симметричном выполнении подвижной массы относительно оси качания эти ЧЭ применимы для угловых акселерометров, а при

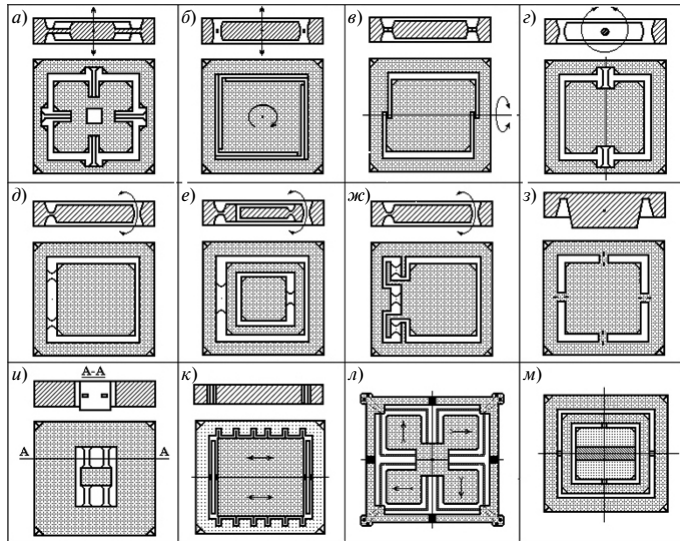


Рис. 1.31. Обобщенные варианты кремниевых ЧЭ линейных и угловых акселерометров

смещении оси качания относительно оси симметрии подвижной массы они могут применяться для линейных акселерометров. Все варианты ЧЭ (рис. 1.31) имеют внешние подвесы относительно подвижной массы.

Чувствительный элемент, представленный на рис. 1.31, *а*, является чисто осевым. С таким ЧЭ и емкостным преобразователем, встроенным в корпус акселерометра, фирмой Epeveco (США) выпускается серийно один из лучших акселерометров в мире. Его масса вместе с выводным кабелем — 11,5 г. Габаритные размеры: 25 × 16 × 10 мм. Предел измерения: 0,5–10³ g. Демпфирование — газодинамическое. Полоса пропускания: до 1000 Гц. Точность в зависимости от заказа и стоимости: 5; 1; 0,1 % от максимального диапазона.

Имеются и отечественные разработки акселерометров с осевым ЧЭ. Например, пензенский НИИФИ выпускает мелкими сериями аналогичный акселерометр, но с тензорезисторным преобразователем и с жидкостным демпфированием.

Механическая жесткость четырех балок упругого подвеса для вариантов рис. 1.31, *а*, *б* рассчитывается по следующей формуле:

$$G = 4E_{[100]}c_n^3b_n/a_n^3, \quad (1.2)$$

где $E_{[100]}$ — модуль упругости кремния для направления [100]; a_n , b_n , c_n — соответственно длина, ширина и толщина балки упругого подвеса, выполненного в виде прямоугольного параллелепипеда. Перемещение подвижного узла в направлении измерительной оси определяется выражением

$$y = mja_n^3/(4E_{[100]}b_nc_n^3), \quad (1.3)$$

где m — величина подвижной массы; j — действующее ускорение.

Упругий подвес на рис. 1.31, *а* может быть вырожден в сплошную тонкую перемычку между подвижной массой и корпусной пластиной. Это имеет место для акселерометров на пределы свыше 100 g. Расчет жесткости и перемещения при этом выполняют как для мембраны с жестким центром, заземленной по внешнему контуру.

В случае несимметричного расположения упругих подвесов относительно подвижной массы, т. е. в случае смещения центра тяжести относительно подвесов, в варианте рис. 1.31, з возможно построение трехкомпонентного линейного акселерометра. Одна из компонент осевая, а две другие — маятниковые в перпендикулярных направлениях к первой, возникающих от изгибающих моментов соответствующих компонент инерционных сил. Преобразователи в электрический сигнал могут быть как тензорезисторными, так и емкостными. Для построения рассмотренного ЧЭ применяется глубинное анизотропное травление.

Чувствительный элемент, изображенный на рис. 1.31, б, используется для низкопределных акселерометров ($0,1-10^{-3} g$). Снижение жесткости достигается удлинением подвесов без увеличения площади кристалла в плане. Следует учитывать, что в этой конструкции кроме осевого перемещения подвижная масса имеет еще вращательное движение. При использовании емкостных преобразователей перемещений исключение влияния вращательного движения возможно путем уменьшения площади неподвижных электродов по сравнению с площадью подвижной массы, являющейся одновременно проводящим подвижным электродом [6].

В варианте рис. 1.31, г упругий подвес маятника работает на кручение. Специальными технологическими приемами профиль поперечного сечения подвеса можно выполнить в виде шестигранника. Например, плоскость корпусной пластины совмещают с кристаллографической плоскостью (100), а боковые грани чипа — с семейством направлений $\langle 110 \rangle$.

Вначале осуществляют двухстороннее несквозное травление по всему контуру маятника. Толщина непротравленной перемычки должна равняться толщине будущего подвеса. Далее в местах подвеса с обеих сторон наносят маскирующие дорожки шириной, равной стороне шестигранника. Затем выполняют сквозное анизотропное травление, при этом четыре остальные грани по отношению к двум, маскированным в плоскости (100), будут вытравлены под углами $54^\circ 44'$ в семействе плоскостей $\{111\}$. Окончательную доводку до углов, близких к 60° , производят с помощью изотропных полирующих травителей.

Характерной особенностью шестигранного подвеса является то, что сдвиговые напряжения на всех ребрах равны нулю, а максимальные значения напряжений имеют место вдоль средних линий боковых граней. Значение жесткости на кручение определяется для шестигранного подвеса по следующей формуле:

$$G_{кр} = 4\sqrt{3}E_{[100]}a_{ш}^4/[32(1+\nu)a_n], \quad (1.4)$$

где $a_{ш}$ — размер стороны шестигранника; ν — коэффициент Пуассона.

Вариант рис. 1.31, з перспективен для конструирования ЧЭ не только угловых акселерометров, но и при смещении оси качания — линейных акселерометров. В практике акселерометрии широко распространен маятниковый несимметричный ЧЭ по варианту рис. 1.31, д. По этой схеме был построен первый отечественный интегральный прибор, так называемый балочный акселерометр с планарным расположением подвеса, корпусной пластины и подвижной массы [16]. Упругий подвес по существу представлял собой концентратор механических напряжений, выполненный методом несквозного одностороннего анизотропного травления, прямоугольный в плане. На противоположной от углубления плоскости был расположен полный тензометрический мост. Эта конструкция продолжает совершенствоваться в основном по линии термокомпенсации тензочувствительного моста.

Другой разновидностью ЧЭ по варианту рис. 1.31, д является симметричный подвес с криволинейными обводами в плане и по толщине подвеса. В качестве датчика перемещений применяется емкостный преобразователь. Демпфирование — газодинамическое. Электронный преобразователь — встроенная в корпус датчика гибридная схема.

Для упругого подвеса с прямолинейными обводами расчетная формула для угловой жесткости имеет вид

$$G_y = \frac{M}{\alpha} = \frac{E_{[100]}J}{a_n}, \quad (1.5)$$

где $J = b_n c_n^3 / 12$ — момент инерции прямоугольного сечения подвеса; a_n , b_n , c_n — размеры массы маятника.

Одним из основных требований, предъявляемых к интегральным подвесам, является условие минимума жесткости при максимальной живучести, т. е. при максимуме стойкости подвесов к разрушению. В связи с этим для интегральных подвесов ставятся оптимизационные задачи, а в качестве критерия принимают постоянство изгибных напряжений в сечениях подвеса по его длине, т. е. условие отсутствия концентрации напряжений, особенно около жестких монолитных заделок с корпусной пластиной и подвижной массой.

Для расчета предельных углов отклонения маятника используется следующая формула:

$$\theta_{\max} = m j_{\max} l_{\text{цм}} / G_y, \quad (1.6)$$

где j_{\max} — ускорение верхнего предела проектируемого акселерометра.

Чувствительный элемент (рис. 1.31, е) представляет собой двойной маятник (маятник в маятнике). Эта конструкция разработана в целях снижения жесткости упругих подвесов без уменьшения прочности подвесов и увеличения общих размеров чипа. Применяется двойной маятник для построения компенсационных акселерометров с силовой обработкой, а также компенсационных указателей вертикали.

Разновидностью ЧЭ с криволинейными подвесами является конструктивная схема (рис. 1.31, ж). Ее особенностью является исключение возможной потери устойчивости подвеса при продольном нагружении: например, в компенсационных акселерометрах при стремлении к снижению жесткости подвеса за счет увеличения его длины при одновременном уменьшении площади поперечного сечения растяжек подвеса может иметь место потеря продольной устойчивости отдельно рассматриваемой растяжки. В этом случае применяют три растяжки, которые работают на растяжение от действия ускорений вдоль подвеса. В направлении измерительной оси они подвержены поперечному изгибу и имеют малую жесткость, обеспечивая получение необходимых характеристик акселерометра.

Все рассмотренные ЧЭ акселерометров могут быть выполнены по обращенной конструктивной схеме, в которой подвес является внутренним, а подвижный узел внешним. В качестве примера на рис. 1.31, и приведен обращенный ЧЭ осевого типа, применяемый для построения как линейных, так и угловых акселерометров.

Вариант ЧЭ акселерометра (рис. 1.31, к) является чисто осевым и может применяться для построения как акселерометров, так и микрогироскопов. Компания Analog Devices с 1991 года изготавливает семейство акселерометров ADXL, выполняемых по планарной технологии со встроенными схемами обработки. На корпусной пластине выполнены неподвижные электроды емкостного датчика перемещений гребенчатого типа. Неподвижные электроды приварены к корпусной пластине через изоляционные анкеры на молекулярном уровне. Чувствительная к ускорениям масса подвешена на восьми упругих растяжках. На чувствительной массе выполнены подвижные электроды, входящие в зазоры между неподвижными электродами. Подвижные электроды и неподвижные преобразователя перемещений служат одновременно электродами электростатического преобразователя силы.

Вся корпусная пластина имеет размеры 3×3 мм, а размеры чувствительной массы составляют 1×1 мм. Площадь корпусной пластины, за исключением чувствительной массы, занята электрическими схемами обработки.

Особенностью конструкции микромеханического датчика угловых скоростей (ДУС) по конструктивной схеме (рис. 1.31, л) является то, что подвижная чувствительная масса подвешена на восьми Г-образных упругих подвесах. Такая подвеска позволяет чувствительной массе иметь линейные и угловые перемещения только в одной плоскости x и y .

Все ЧЭ (рис. 1.31) могут быть выполнены на жесткой рамке, консольно закрепленной внутри несущей пластины (рис. 1.32). Такое решение применяют для того, чтобы снизить влияние контактных напряжений, передаваемых на его упругие подвесы от площадок соединения несущей пластины с основанием. Оценка величины контактных напряжений осуществляют по формуле Буссинеска. Для интегральных ЧЭ формула для оценки величины контактных напряжений, возникающих от любых силовых воздействий в местах соединений, имеет следующий вид:

$$\sigma_i = p \frac{(1 - \nu^2)S}{(1 - \nu^2)S + y_0 L}, \quad (1.7)$$

где p — давление на контакт; ν — коэффициент Пуассона; S — площадь контакта; L — расстояние от точки приложения сосредоточенной силы до заданного сечения; y_0 — толщина пластины с ЧЭ. Из формулы (1.7) видно, что с уменьшением размеров площадки соединения и с увеличением расстояния до упругих подвесов маятника влияние контактных напряжений снижается.

Технологические погрешности изготовления ЧЭ интегральных акселерометров определяются погрешностями линейных размеров фотошаблонов, которые трансформируются в погрешности геометрических параметров чувствительной массы и упругих подвесов, и совмещением их с кремниевой подложкой. Так, выражения для расчета максимального и минимального значений чувствительной массы с учетом анизотропии и выше отмеченных погрешностей имеют вид

$$m_{\max} = \gamma(a_n + \Delta a_n)(b_n + \Delta b_n)(c_n + \Delta c_n) + 0,5\gamma c_n^2 \operatorname{tg} \alpha (a_n + \Delta a_n)(b_n + \Delta b_n),$$

$$m_{\min} = \gamma(a_n - \Delta a_n)(b_n - \Delta b_n)(c_n - \Delta c_n) + 0,5\gamma c_n^2 \operatorname{tg} \alpha (a_n - \Delta a_n)(b_n - \Delta b_n),$$

где γ — плотность кремния; a_n , b_n , c_n — соответственно длина, ширина и толщина чувствительной массы; $\pm \Delta a_n$, $\pm \Delta b_n$ — погрешности линейных размеров и совмещения длины и ширины соответственно; α — смежный угол угла травления.

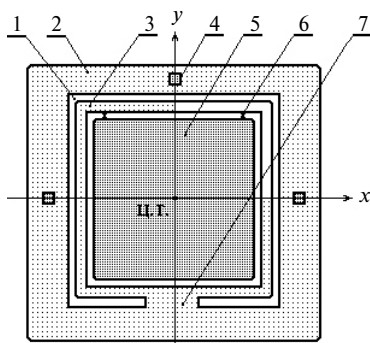


Рис. 1.32. Маятниковый ЧЭ акселерометра, выполненный на консоли: 1 — сквозное травление; 2 — несущая пластина; 3 — жесткая рамка; 4 — точка крепления несущей пластины к основанию; 5 — тело маятника; 6 — упругий подвес; 7 — консоль

Для расчета осевой и угловой жесткостей с учетом технологических погрешностей имеют место следующие зависимости:

$$G_0 = 4E_{[100]}(c_n \pm \Delta c_n)^3(b_n \pm \Delta b_n)/(a_n \pm \Delta a_n)^3,$$

$$G_{кр} = 4\sqrt{3}E_{[100]}(a_{ш} \pm \Delta a_{ш})^4/[32(1+\nu)(a_n \pm \Delta a_n)].$$

В качестве преобразователей перемещений чаще всего применяют емкостные, а в качестве датчиков момента — электростатические и магнитоэлектрические преобразователи. Собственно ЧЭ датчиков, выполненные по любому из рассмотренных вариантов, вносят ошибку в диапазоне температур от -60 до $+85^\circ\text{C}$ не более $0,05\%$ от диапазона измерений. Ошибка в основном обусловливается наличием дислокаций в кремниевых заготовках и деформацией корпусных пластин, вызванной несоответствием значений ТКЛР кремния и стеклянных крышек. Дальнейшее снижение ошибки возможно совершенствованием исходного материала и технологического процесса электростатической сварки.

Значительно большую долю в суммарную ошибку вносит электронная часть (более чем на порядок по сравнению с ЧЭ). В настоящее время наметилась тенденция построения цифровых датчиков ускорения в виде линейки предельных ЧЭ с двоичным весом. Каждый ЧЭ несет контактную пару, которая срабатывает при достижении заданного ускорения.

Отсутствие в подобных схемах аналоговых электронных элементов, склонных к температурным ошибкам, выгодно отличает такие цифровые устройства. Однако здесь есть проблемы в динамике ЧЭ и устранении дребезга механических контактов. На рис. а изображены распространенные варианты интегральных ЧЭ датчика давлений. Чувствительный элемент на рис. 1.33, а — это плоская интегральная мембрана с полным тензорезисторным мостом.

Чаще всего мембрану выполняют из *n*-кремния в плоскости (100), прямоугольной в плане, а диффузионные (имплантированные) или эпитаксиальные тензорезисторы — из кремния *p*-проводимости. С такими ЧЭ возможно построение датчиков для измерения абсолютных, избыточных и разностных давлений. С корпусными деталями ЧЭ соединяют

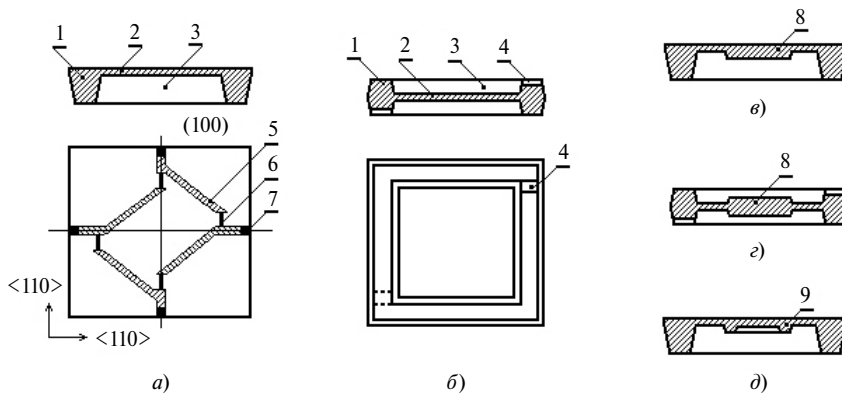


Рис. 1.33. Варианты интегральных ЧЭ датчика давлений: а) несимметричная мембрана; б) симметричная мембрана; в, з) мембраны с жестким центром; д) двойная мембрана с жестким кольцом; 1 — корпусная пластина; 2 — мембрана с жесткой заделкой по контуру; 3 — подмембранная камера; 4 — каналы подвода давлений; 5 — проводящая дорожка; 6 — интегральный тензорезистор; 7 — контактная площадка; 8 — жесткий центр; 9 — жесткое кольцо

посредством промежуточных боросиликатных стеклянных пластин диффузионной сваркой в электрическом поле.

Верхний предел измеряемых давлений распространяется до 250 МПа, а точность измерения — на уровне 1 %. Дальнейшее совершенствование рассмотренного ЧЭ возможно при установлении аналитической зависимости деформации интегральной мембраны от прикладываемых давлений, что позволит поставить оптимизационные задачи при конструировании интегральной мембраны в совокупности с тензопреобразователем.

Чувствительный элемент на рис. 1.33, б является разновидностью варианта, приведенного на рис. 1.33, а, и представляет собой симметрично расположенную относительно корпусной пластины плоскую мембрану.

Применение этого ЧЭ предусматривается вместе с дифференциальными емкостными датчиками перемещений. Упругие характеристики симметричной мембраны, а также технологические процессы ее изготовления аналогичны предыдущему варианту.

Разновидностью интегральных мембран являются мембраны с жестким центром (рис. 1.33, в, з), а также мембраны с жестким кольцом (рис. 1.33, д). Назначение жесткого центра зависит от типа применяемого преобразователя деформации (или перемещения) в электрический сигнал. Так, при использовании тензорезисторного преобразователя для интегральной мембраны с жестким центром повышается концентрация напряжений в тонкой перемычке и существенно улучшается линейность характеристики [44]. В случае использования емкостного преобразователя перемещений жесткий центр выполняет роль подвижного электрода дифференциального емкостного датчика, что в конечном итоге позволяет получить идеально линейную характеристику. Недостатком применения жесткого центра является то, что датчик давлений становится чувствительным к линейным и угловым ускорениям. Для полного исключения влияния ускорений выполняют два идентичных датчика давлений на одной корпусной пластине, причем второй датчик закрыт от воздействия давлений, т. е. реагирует только на ускорения. Полезный сигнал выделяют посредством электронной схемы в виде разностного значения.

Снижение влияния ускорений возможно в конструкции ЧЭ с жестким кольцом или в так называемой мембране с двойной оправой, хотя основное назначение такой мембраны — исключение температурных напряжений, возникающих в месте соединения внешней оправы с металлической корпусной деталью. Тонкая перемычка между внешней и внутренней оправой гасит температурные напряжения. Внутренняя мембрана, оправой которой служит плавающее жесткое кольцо, является рабочей. Тензорезисторный преобразователь при этом размещают на внутренней мембране аналогично варианту рис. 1.33, а.

Улучшение линейности достигается за счет совместной деформации внутренней и внешней мембран от измеряемых давлений в местах их заделки с внутренним кольцом. Другое применение двухоправной мембраны возможно в качестве двухпредельного ЧЭ, при этом тензорезисторные преобразователи выполняют как на внешней, так и на внутренней мембране. Жесткости внешней и внутренней мембран рассчитывают в соответствии с заданными пределами давлений.

1.8. Корпусирование интегральных датчиков

Интегральный датчик состоит из трех узлов: ЧЭ, электронного блока и корпуса, рис. 1.34. Можно корпусировать один ЧЭ для защиты от внешних воздействий.

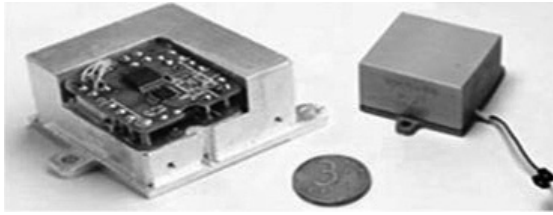


Рис. 1.34. Корпус акселерометра со встроенным электронным блоком

Однако при этом снижается коэффициент интеграции и появляется дополнительная погрешность от влияния линий связи ЧЭ с электронным блоком. Имеются конструкции датчиков, когда ЧЭ устанавливается в стандартный корпус микросхемы или транзистора. В электронной промышленности для корпусирования гибридных интегральных схем существует целый ряд стандартных корпусов. В датчикостроении требования к корпусам более жесткие, поскольку кроме общих, например массогабаритных и защиты от внешних воздействий, накладываются еще требования точности базирования на объектах. Конструкции корпусов интегральных датчиков определяются главным образом их назначением, т. е. типы корпусов для акселерометров не могут быть унифицированы с корпусами для датчиков давлений.

К материалам для корпусов интегральных датчиков также предъявляются особые требования как с точки зрения прогрессивности технологического процесса, так и с точки зрения достижения необходимых эксплуатационных характеристик. Широкое распространение в качестве универсального материала для корпусов интегральных датчиков авиационного назначения получил сплав типа ковара (29НК). Связано это с тем, что ковар имеет ТКЛР ($5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), близкий со многими материалами, используемыми в интегральных датчиках, например со стеклом, кремнием, ситаллом и др. Кроме того, ковар хорошо сваривается со стеклом и отличается удовлетворительной коррозионной стойкостью, хорошей обрабатываемостью давлением, резанием, химическими реактивами и относительной дешевизной.

Рассмотрим наиболее распространенные корпуса в зависимости от их назначения. На рис. 1.35 изображен двухкамерный корпус с цилиндрическими отсеками, применяемый как для компенсационных акселерометров, так и для акселерометров прямого измерения. Наиболее приемлемым способом соединения элементов ЧЭ является термосоединение в электрическом поле. Собранный ЧЭ неподвижно соединяется с корпусом в специальной нише. При сборке ЧЭ ориентируют по установочной плоскости корпуса.

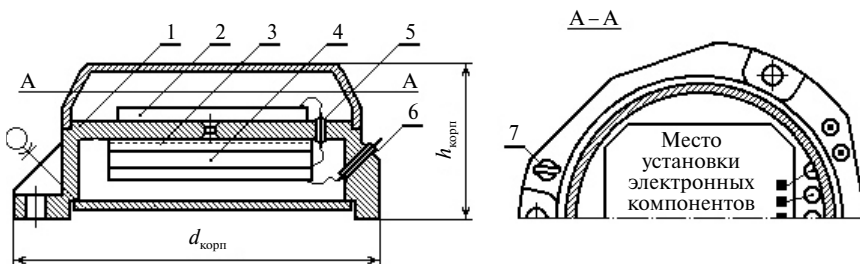


Рис. 1.35. Корпус акселерометра с цилиндрическими отсеками: 1 — основание; 2 — электронная плата; 3 — стеклянный слой; 4 — ЧЭ; 5, 6 — проходные изоляторы; 7 — трубка для заполнения