

СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

А. Н. Ухов, О. В. Баранова, С. В. Кононов

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Введение

Разработка современных перспективных приборов системы телеметрии требует применения передовых технологий и датчиков, в том числе прецизионных линейных акселерометров. В связи с постоянным уменьшением массогабаритных показателей перспективных приборов наиболее актуальными считаются кремниевые акселерометры, изготовленные по технологии микросистемной техники (далее МСТ).

Создаваемая в рамках направления МСТ продукция характеризуется инновационностью, наукоемкостью, конкурентоспособностью, передовыми характеристиками, широким рынком потребления.

В 2015 году в филиале ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (НИИИС) был создан участок изготовления серийных изделий МСТ. В настоящее время на нем изготавливаются различные чувствительные элементы микроэлектромеханических систем – преобразователи внешних физических воздействий в электрический сигнал. В номенклатуру изготавливаемых на участке изделий входят чувствительные элементы датчиков давления, гироскопов и акселерометров. Одним из приоритетных направлений развития участка является изготовление чувствительных элементов микроакселерометров (ЧЭ МА) вибрационно-частотного типа, разрабатываемых для применения в перспективной системе телеметрии. Данные ЧЭ МА имеют высокую точность измерения линейного ускорения, высокую стойкость к радиационному воздействию, высокую добротность, стабильность и воспроизводимость характеристик, которые обеспечиваются работой чувствительного элемента в условиях вакуума.

Разработка технологии изготовления ЧЭ МА

Существуют два основных направления в технологии изготовления чувствительных элементов для изделий МСТ: технология поверхностной микромеханики и технология объемной микромеханики.

В первом случае элементы конструкции располагаются на поверхности кремниевой пластины и формируются последовательно, слой за слоем.

Во втором случае элементы конструкции чувствительного элемента располагаются в объеме кремния и имеют развитую 3D структуру.

ЧЭ МА, представленные в данной работе, выполнены по технологии объемной микромеханики.

Разработанная технология включает в себя следующие основные блоки: подготовка пластин (утонение, шлифовка, полировка) [1], формирование выемок в пластине-основании (анизотропное плазмохимическое травление Si), гидрофильное сращивание пластины-основания и пластины с рабочим слоем, формирование металлических контактных площадок и соединений, формирование подвижной структуры в рабочем слое толщиной 100 мкм, (анизотропное плазмохимическое травление Si).

При использовании технологии сращивания рабочий слой ЧЭ МА с подвижными элементами формируется в одной пластине, а другая пластина является основанием с вытравленными полостями, обеспечивающими перемещение подвижных частей рабочего слоя. Рассмотрим подробнее технологию сращивания кремниевых пластин, основные преимущества которой приведены ниже.

1. Изготовление изделий МСТ с конструктивными элементами, недоступными для других технологий.

2. Отсутствие необходимости перфорации элементов конструкции ЧЭ МА для вытравливания жертвенного слоя, использующегося в технологиях поверхностной микромеханики.

3. Герметизация (корпусирование) на уровне пластины. При использовании технологий создания газопоглотителей (геттеров) становится возможным добиться вакуума в объеме, герметизируемом на уровне пластины. Данный технологический блок находится на стадии отработки в НИИИС.

4. Наличие выемок под подвижными элементами ЧЭ МА исключает вероятность возникновения эффекта прилипания.

5. Возможность трехмерной интеграции ЧЭ МА и схемы обработки на основе КМОП на уровне пластины, что позволяет изготавливать пластины раздельно и объединять только в конце маршрута.

По критериям стабильности получаемых соединений, доступности материалов и их совместимости с КМОП технологией определена приоритетность

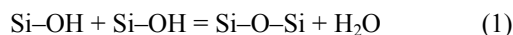
способа непосредственного гидрофильного сращивания пластин. Данный процесс заключается в приведении очень чистых и гладких кремниевых пластин в контакт при комнатной температуре и последующем их отжиге. Для обеспечения гидрофильного сращивания обе поверхности либо одна из них должна содержать слой SiO_2 .

Механизм сращивания заключается в трансформации слабых межповерхностных взаимодействий в ковалентную химическую связь при отжиге [2].

При непосредственном сращивании первичный контакт поверхностей осуществляется за счет слабых взаимодействий, на один-два порядка слабее ковалентного взаимодействия. Это главным образом взаимодействие через водородные связи и взаимодействие Ван-дер-Ваальса. Для наблюдения процесса первичного контакта пластин при комнатной температуре используют просвечивание пластин в инфракрасном (ИК) свете, с использованием камеры, чувствительной к длинам волн 0,9–1,7 мкм. Кремниевые пластины приводят в контакт, после чего слабым надавливанием в какой-либо точке инициируют начало сращивания (рис. 1). При этом по скорости продвижения волны сварки можно судить о качестве соединяемых поверхностей и поверхностной энергии.

Гидрофильная поверхность Si покрыта слоем SiO_2 . Гидрофильность поверхности обеспечена поляризованностью гидроксогрупп OH , входящих в состав силаноловых групп Si-OH . Самым распространенным способом улучшения гидрофильности поверхности является обработка в перекисно-аммиачном растворе (ПАР). Как правило, используется раствор в следующей концентрации $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}_2:5\text{H}_2\text{O}$. Температура обычно составляет 75°C .

Когда поверхности приводятся в контакт, молекулы воды формируют «мостик» между поверхностями (рис. 2а). При отжиге молекулы воды растворяются в окружающем материале, диффундируют во внешнюю среду по границе раздела, либо реагируют с кремнием, образуя новые силаноловые группы Si-OH . При полном удалении молекул воды, поверхности оказываются соединены только через силаноловые группы (рис. 2б). При дальнейшем отжиге силаноловые группы контактирующих поверхностей взаимодействуют между собой следующим образом:



Образовавшиеся в результате реакции молекулы воды диффундируют в SiO_2 (рис. 2в). Если молекулы

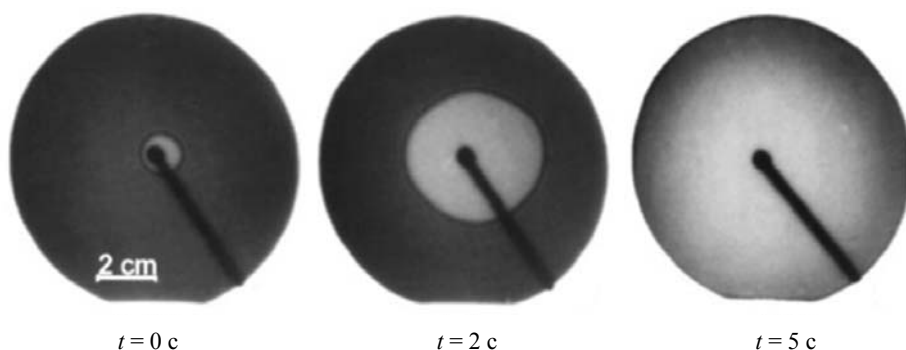


Рис. 1. Продвижение волны сварки при первичном соединении 100 мм кремниевых пластин при комнатной температуре, наблюдаемое с помощью камеры ИК-диапазона

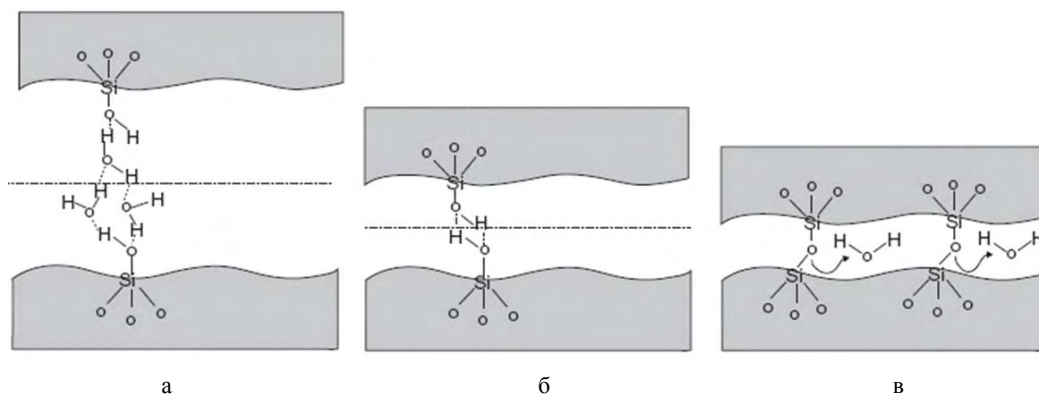
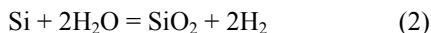


Рис. 2. Схема образования непосредственного соединения пластин через гидрофильные поверхности: а – первичное состояние после приведения поверхностей в контакт; б – формирование связей через силаноловые группы; в – формирование конечных связей

воды достигают поверхности кремния, то происходит окисление кремния согласно реакции:



На одной поверхности формируется слой термического SiO_2 , а на другой естественного – в таком случае реакция окисления идет достаточно быстро из-за малой толщины естественного оксида. Толщина слоя термического оксида должна быть не менее 50 нм. Это обусловлено необходимостью растворения водорода в слое SiO_2 . В противном случае образуются пустоты, обычно наблюдаемые при инспекции сборки с помощью ИК камеры или сканирующего акустического микроскопа. В общем случае количество SiO_2 , необходимое для полного растворения H_2 определяется количеством адсорбированной на контактирующих поверхностях воды. Содержание воды может быть отрегулировано изменением гидрофильности поверхности или сращиванием в вакууме.

Эта технология используется в частности при разработке и создании систем навигации: акселерометров и гироскопов [3].

На рис. 3 представлены результаты сращивания пластин с ЧЭ МА, полученные с помощью акустического микроскопа. Контроль проводится для оценки качества сращивания в процессе производства. Серые области на фотографии – выемки в пластине-основании.

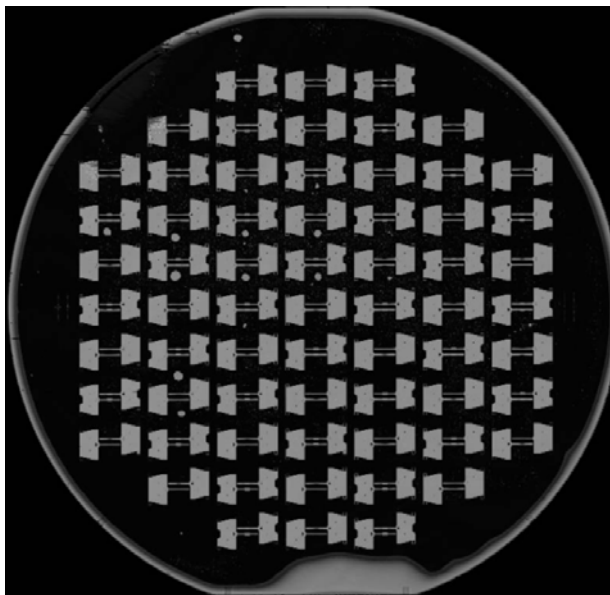


Рис. 3. Фотография пластины с ЧЭ МА после операции сращивания

Фотография скола пластин с ЧЭ МА, полученных с помощью непосредственного гидрофильного сращивания, представлена на рис. 4. Толщина слоя SiO_2 составила 83 нм.

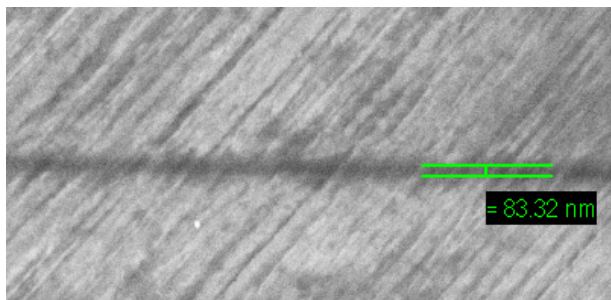


Рис. 4. Скол кремниевых пластин, соединенных через слой SiO_2

Непосредственное гидрофильное сращивание чрезвычайно требовательно к чистоте и качеству поверхностей. Это обусловлено короткодействующим характером сил, ответственных за приведение поверхностей в первичный контакт. Основными геометрическими параметрами пластин, влияющих на качество сращивания, являются волнистость и шероховатость. Для качественного сращивания необходимо обеспечить среднеарифметическую шероховатость $R_a = 0,5$ нм, хотя при определенных условиях гидрофильное сращивание может происходить и при шероховатости $R_a \approx 2$ нм [4].

Необходимые для качественного выполнения гидрофильного сращивания значения волнистости и шероховатости кремниевых пластин достигаются внедрением в технологический маршрут изготовления ЧЭ МА операции химико-механической полировки. Разработанные режимы данной операции позволили получить значение шероховатости пластин монокристаллического кремния КЭФ 4,5 порядка $R_a = 0,5$ нм.

Помимо исключительно механических факторов, на процесс непосредственной гидрофильной сварки существенно влияют химические загрязнения. Для получения прочных соединений необходимо проводить химическую обработку перед соединением пластин.

С целью обеспечения необходимых требований по качеству поверхностей пластин в технологический маршрут изготовления ЧЭ МА были введены операции химической обработки пластин в смеси Каро и ПАРе непосредственно перед процессом гидрофильной сварки. Межоперационное время составляет не более 2 часов.

Существенным недостатком стандартного гидрофильного сращивания является необходимость применения высокотемпературного отжига с температурой 1000–1100 °С. Поскольку приборный слой ЧЭ МА составляет 100 мкм использование в технологическом маршруте высокотемпературного отжига может привести к созданию дополнительных внутренних механических напряжений соответственно к деформации приборного слоя и искажению параметров ЧЭ МА [5].

В разработанном технологическом маршруте температура отжига снижена до 400 °С за счет при-

менения предварительной плазменной активации поверхности кремниевых пластин в плазме N_2 . Обработка в плазме поверхностей кремниевых пластин перед сращиванием вызывает следующие эффекты:

- удаление поверхностных загрязнений и увеличение энергии адгезии за счет создания нарушенных связей;
- увеличение количества силаноловых групп;
- увеличение скорости диффузии воды через SiO_2 ;
- увеличение «вязкости» SiO_2 при относительно низких температурах.

Технологический маршрут изготовления ЧЭ МА с приведен в таблице. Согласно данному маршруту была разработана маршрутная карта.

Технологический маршрут изготовления ЧЭ МА

1	Формирование партии
1.1	Утонение до толщины 420 мкм
1.2	Осаждение CVD SiO_2 , $d = 1,0$ мкм
2	Формирование знаков
2.1	ФЛГ «Знаки»
2.2	ПХТ SiO_2 до Si
2.3	АПХТ Si на глубину $1,5 \pm 0,5$ мкм
2.4	Удаление SiO_2
3	Формирование выемок
3.1	ФЛГ «Выемки»
3.2	ПХТ SiO_2 до Si
3.3	АПХТ Si на глубину 50 ± 5 мкм
3.4	Удаление SiO_2
4	Сращивание
4.1	Химическая обработка
4.2	Мегазвуковая обработка
4.3	Плазменная активация пластин
4.4	Совмещение пластин по базовому срезу
4.5	Отжиг 400 °C
4.6	Утонение рабочего слоя до 100 мкм
5	Формирование металлизации
5.1	ФЛГ «Контактные площадки»
5.2	Травление Al
6	Формирование рабочего слоя
6.1	ФЛГ «Рабочий слой»
6.2	АПХТ Si до слоя SiO_2

Графическое представление технологического маршрута приведено на рис. 5.

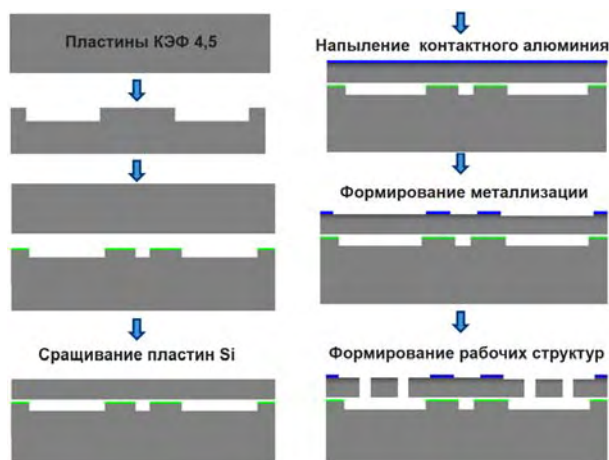


Рис. 5. Графическое представление технологического маршрута изготовления ЧЭ МА.

По данному технологическому маршруту были изготовлены несколько экспериментальных партий с ЧЭ МА. Выходных годных составил 64 %.

Проведение исследований ЧЭ МА

После изготовления экспериментальных образцов были проведены исследования и испытания ЧЭ МА. Для этого были разработаны программа и методики испытаний, включающие подтверждение расчетных характеристик, стойкость к механическим, температурным воздействиям, а также радиационному воздействию.

Для проведения исследований было разработано и изготовлено несколько единиц оснастки, которые позволили провести исследования ЧЭ МА в условиях вакуума 10^{-3} Па.

На рис. 6 приведены фотографии платы контроля и платы согласования, используемых в процессе исследований.

На рис. 7 показан процесс контроля характеристик ЧЭ МА с использованием вакуумной камеры и миниатюрного поворотного стенда.

В ходе проведения исследований были подтверждены расчетные характеристики ЧЭ МА (резонансная частота, масштабный коэффициент, добротность). Экспериментальные образцы ЧЭ МА успешно прошли все виды испытаний, установленных в техническом задании, включая испытания на стойкость к радиационному воздействию, подтвердили сохранение работоспособности в диапазоне температур от минус 60 до плюс 85 °C. Деградации параметров не выявлено.

Выводы

Коллективом авторов выполнен значительный объем работ по созданию современной наукоемкой

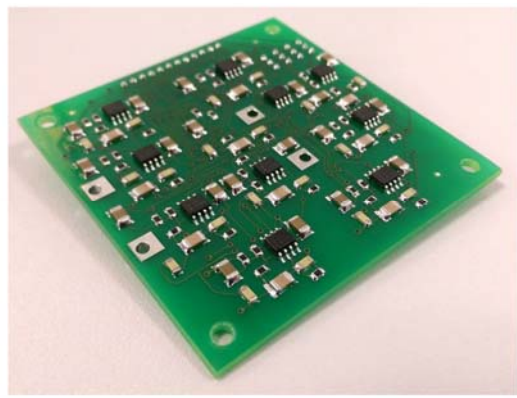
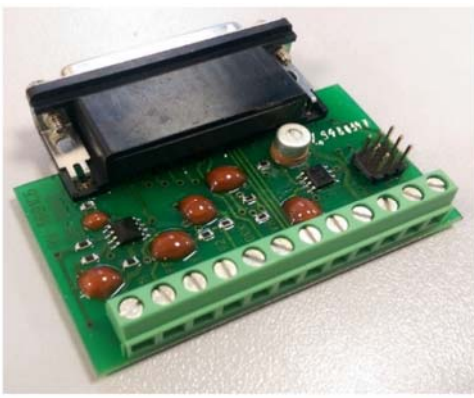


Рис. 6. Оснастка для проведения исследований ЧЭ МА

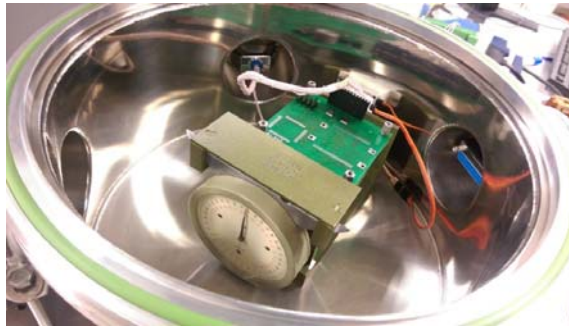


Рис. 7. Проведение исследований ЧЭ МА с использованием вакуумной камеры

технологии изготовления кремниевых ЧЭ МА, обеспечивающей высокую точность согласования расчетных моделей с результатами проведенных экспериментальных исследований. Подтверждена возможность изготовления кремниевых чувствительных элементов для высокоточных акселерометров нового поколения по технологии сращивания пластин с толщиной приборного слоя 100 мкм. Ключевыми операциями в разработанном технологическом маршруте стали утонение, шлифовка, химико-механическая полировка, анизотропное плазмохимическое травление Si, гидрофильное сращивание.

Изготовлены экспериментальные образцы ЧЭ МА, успешно проведены исследования и испытания. Проведенные испытания подтвердили все установленные требования к ЧЭ МА.

Литература

1. Никифорова-Денисова С. Н. Механическая и химическая обработка. М.: Высшая школа, 1989.
2. Tong Q.-Y., Gosele U. Semiconductor Wafer Bonding: Science, Technology. Wiley, New York. 1998.
3. Гироскопы и акселерометры для систем навигации. Тематическая подборка. М.: 2011. № 11/870117.
4. Шапорин А. Несколько технологий для высокоточных элементов МЭМС. Fraunhofer, 2011.
5. Hillerl K., Hahnl S., Kuchler M., Gebner T. MEMS technology for fabrication of electrostatic actuators and application examples // Zentrum fur mikrotechnologien, Reichenhainer Str. 70, 09126.