

Термически изолированные ячейки в конструкциях преобразователей физических величин изготовленные электростатической анодной посадкой полупроводниковых и диэлектрических элементов

12, декабрь 2012

DOI: 10.7463/0113.0517471

Борзов А. Б., Лихоеденко К. П., Цыганков В. Ю., Тиняков Ю. Н., Андреев К. А., Цивинская Т. А.

УДК 621.363

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

borzov@rambler.ru

kost21v@rambler.ru

tsyganbow@mail.ru

tinjakov48@mail.ru

kost87@mail.ru

tsivinskaya_t@mail.ru

Введение

Кремниевые микроэлектромеханические (МЭМС) датчики физических величин все шире используются в автоматических информационных и управляющих системах. Надежность и качество работы датчиков определяются конструктивно-технологическими и схмотехническими решениями для определенных условий эксплуатации. Для использования в среде с высоким градиентом температур датчиков физических величин необходимо предусмотреть технические решения, обеспечивающие термокомпенсацию погрешностей измерительного канала как за счет схмотехнических решений, так и за счет конструктивно-технологических решений [1-4].

Конструктивно-технологические решения термически изолированных ячеек (ТИЯ), состоящих из полупроводниковых интегральных преобразователей и диэлектрической основы, будем рассматривать на примере ТИЯ датчиков давления, предназначенных для контроля и управления агрегатами космических аппаратов.

Кремниевая мембрана преобразователя давления обладает высокой чувствительностью к механическим напряжениям, возникающим в материалах

конструктивных элементов, что приводит к погрешностям параметров датчика. Диэлектрическая подложка обеспечивает изоляцию преобразователя давления от механических напряжений, вызванных различием коэффициентов температурного расширения материала корпусных элементов и кремниевого преобразователя. Поэтому необходимо подобрать материал диэлектрической подложки, её толщину и технологию соединения кремниевого преобразователя с подложкой.

Технологии изготовления ТИЯ основаны на разных методах. В большинстве используются клеевые соединения. При высоких и низких температурах клеевые соединения быстро деградируют и не могут применяться в ответственных изделиях. Поэтому для создания ТИЯ, работающих при градиенте температур в 400 и более градусов, необходимо и достаточно применение известного метода – электростатической анодной посадки, главным недостатком которого является низкий процент выхода годных. Поэтому разработка конструктивно-технологических решений изготовления термически изолированных ячеек датчиков давления на основе электростатической анодной посадки является актуальной научной и технической задачей.

Основная цель работы заключается в анализе причин малого процента выхода годных и методах его увеличения при электростатической анодной посадке интегральных преобразователей давления на диэлектрическую подложку – стекло при изготовлении термически изолированных ячеек.

1 Причины малого процента выхода годных ТИЯ

В качестве основного конструктивно-технологического решения изготовления ТИЯ с применением метода электростатической анодной сварки является вариант соединения целой кремниевой пластины, достигающей диаметра 150 мм, со стеклянной пластиной с последующим разделением на отдельные чувствительные элементы. Данный подход позволяет изготавливать ТИЯ при серийном и крупносерийном производстве, но имеет ряд недостатков, влияющих на процент выхода годных изделий.

Неплоскостность и шероховатость обеих пластин приводит к возникновению зазоров по поверхности пластин и плохому контакту между пластинами или большим механическим напряжениям при соединении пластин.

После процесса сварки соединённые пластины разрезают на отдельные ТИЯ. Учитывая, что разделять приходится хрупкие материалы различной толщины и строения, потери в результате разрушения составляют не менее 50 %. В результате операции разделения пластин возникают внутренние механические напряжения, которые очень

сложно нейтрализовать, и которые в приборах проявятся дефектами: нестабильностью показаний при долговременной работе, увеличением температурных погрешностей.

При изготовлении чувствительных элементов дифференциальных МЭМС датчиков давления проводится предварительное сверление стеклянной пластины. Все дефекты кромки отверстия негативно влияют на процесс соединения пластин. При этом трудно обеспечить необходимую точность в несколько микрометров совмещения кремниевого кристалла и соответствующего ему отверстия в стеклянной пластине.

В результате проведения технологической операции, описанной выше, выход качественных изделий составляет от 17 до 20 %.

Для обеспечения повышения процента выхода качественных изделий и удешевления производства ТИЯ с характеристиками на уровне характеристик исходного кристалла предлагается новый подход к электростатической анодной сварке пластин.

2 Разработка технических решений повышения процента выхода годных ТИЯ с применением метода электростатической анодной сварки

Техническое решение разрабатывалось из предположения, что необходимо соединять отдельные кристаллы и стеклянные заготовки - пьедесталы и решить задачу по фиксации соединяемых деталей с обеспечением номинального, но не жёстко фиксированного усилия прижатия. Также необходимо было найти возможность понизить до минимального значения анодное напряжение и время воздействия на соединяемые пластины.

Разработан новый подход, обеспечивающий выполнение условий для изготовления ТИЯ с повышенным выходом годных и включающий:

1. контроль качества кристалла перед операцией электростатической анодной сварки;
2. подготовку и очистку поверхности кремниевого кристалла и стеклянной заготовки;
3. уменьшение площади соединения;
4. повышение точности совмещения кристалла кремния и стеклянного пьедестала.

Оснастка для проведения электростатического анодного соединения разработана не только на много пар кристалл - пьедестал, но и обеспечивает вертикальное размещение этих пар в специальном керамическом ложе, исключая возможность смещения или перекоса и обеспечивающая равномерный прогрев (рисунок 1).

Это приспособление в разрезе показано на рисунке 2 и состоит из корпуса 1 изготовленного из теплостойкой стали. В корпусе против каждого отверстия уложены изоляторы 2 из керамики ХС-22 с прорезями под размер кристалла. По центру изоляторов помещён анод 7, брусок из теплостойкой стали с полированной поверхностью.

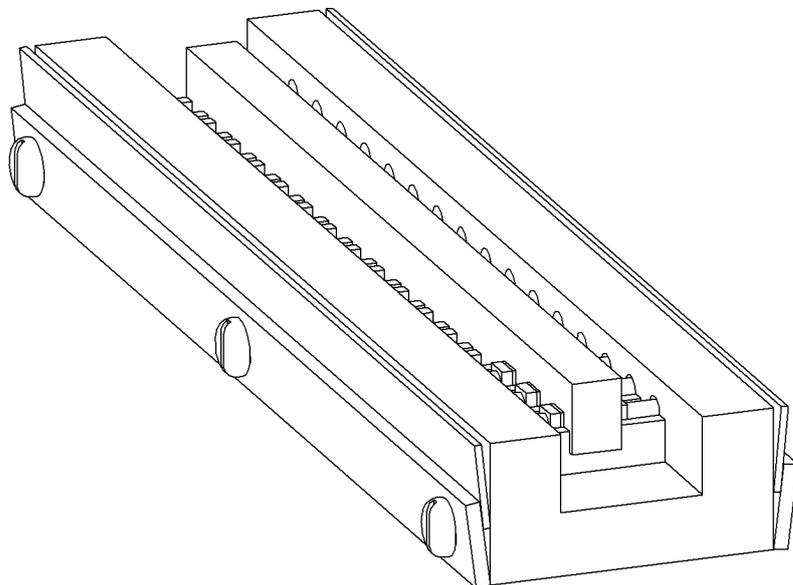
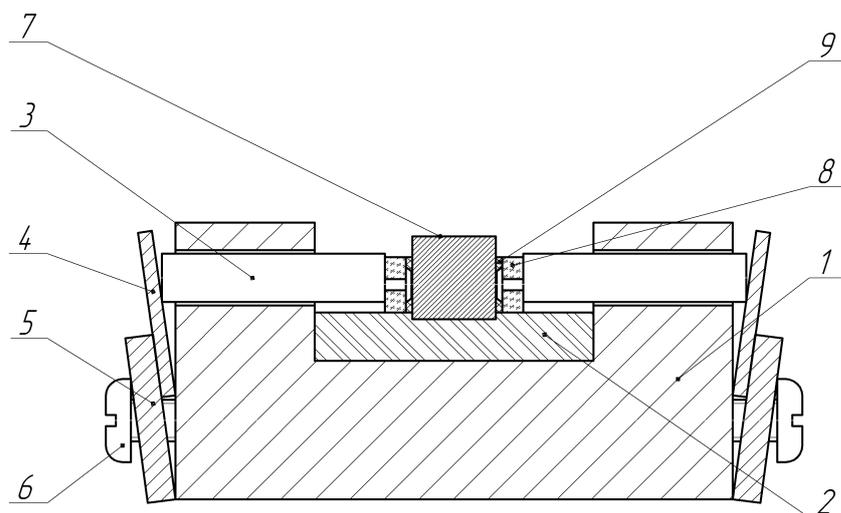


Рисунок 1 – Внешний вид приспособления для электростатической анодной сварки стекла и кремния

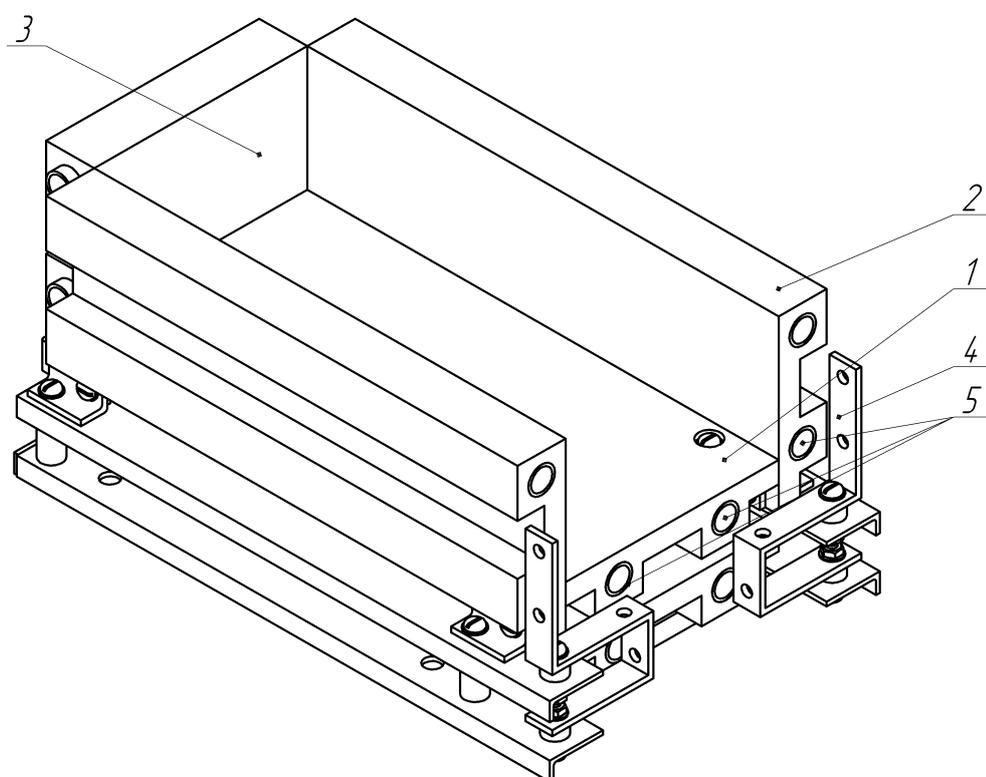
В прорези изолятора вплотную к поверхности анода планарной стороной помещается вертикально кристалл 9, затем полированной стороной к кремнию помещается стекло 8. В отверстия корпуса по направляющим изоляторов вставляются толкатели 3, концы которых выступают за пределы корпуса. На наружной стороне корпуса при помощи винтов 6 крепится прижимная планка. В зазор между планкой и втулкой вставляются пластинчатые пружинные зажимы 4. Сила прижатия стекла к поверхности кремния фиксируется затягиванием винта отвёрткой с фиксированным усилием.



1 – корпус; 2 – изоляторы из керамики; 3 – толкатели; 4 – пластинчатые пружинные зажимы; 5 – прижимная планка; 6 – винты; 7 – анод; 8 - стекло; 9 – кристалл

Рисунок 2 – Приспособление для проведения электростатической анодной посадки

Данное приспособление с парами кристалл - стекло для проведения процесса соединения необходимо поместить во второе разработанное приспособление – графитовый столик, который также служит катодом. Графитовый столик показан на рисунке 3.



1- основание; 2 – боковая стенка; 3 – задняя стенка; 4 - токовводы для нагревателя; 5 – нагреватели

Рисунок 3 - Графитовый столик для проведения процесса электростатической анодной посадки

Предлагаемая конструкция приспособления разработана для создания оптимальных условий для проведения процесса электростатического соединения кремния и стекла и обеспечения минимальных остаточных механических напряжений, возникающих из-за разности коэффициентов термического расширения и различной реакции кремния и стекла на повышение температуры. Данный положительный эффект обеспечивается материалом приспособления - графитом, и расположением нагревателей в графитовых элементах, обеспечивающих равномерный, медленный нагрев и медленное плавное охлаждение приспособления с парами кристалл – стекло – термически изолированными ячейками физических преобразователей.

3 Выбор технологических режимов

Электростатическая анодная сварка является важным методом герметизации датчика на уровне пластины или кристалла, позволяющим получать отдельные измерительные чувствительные элементы, состоящие из кристалла и стекла-пьедестала с параметрами, отвечающими требованиям технической документации и готовыми для герметичной вклейки в корпус любой конструкции. Стекло применяется для уменьшения влияния корпуса датчика и клеевых соединений на следующие характеристики чувствительного элемента: стабильность, температурный гистерезис, температурный дрейф, влияние на нулевой сигнал монтажных усилий.

Основные требования к свариваемым материалам заключаются в том, что стекло должно быть слегка проводящим при нагреве до температуры значительно меньшей, чем точка размягчения и иметь коэффициент теплового расширения, согласованный с коэффициентом теплового расширения кремния не только в рабочем диапазоне температур датчика, но и в температурном диапазоне технологической операции анодной сварки. Это требование обусловлено тем, что сварка происходит при повышенной температуре и несоответствие коэффициентов расширения вызывает растрескивание одного из материалов после охлаждения.

С этой целью для сварки с кремнием подобрано стекло марки «Пирекс». На рисунке 4 показаны свойства теплового расширения стекла «Пирекс» в сравнении с кремнием.

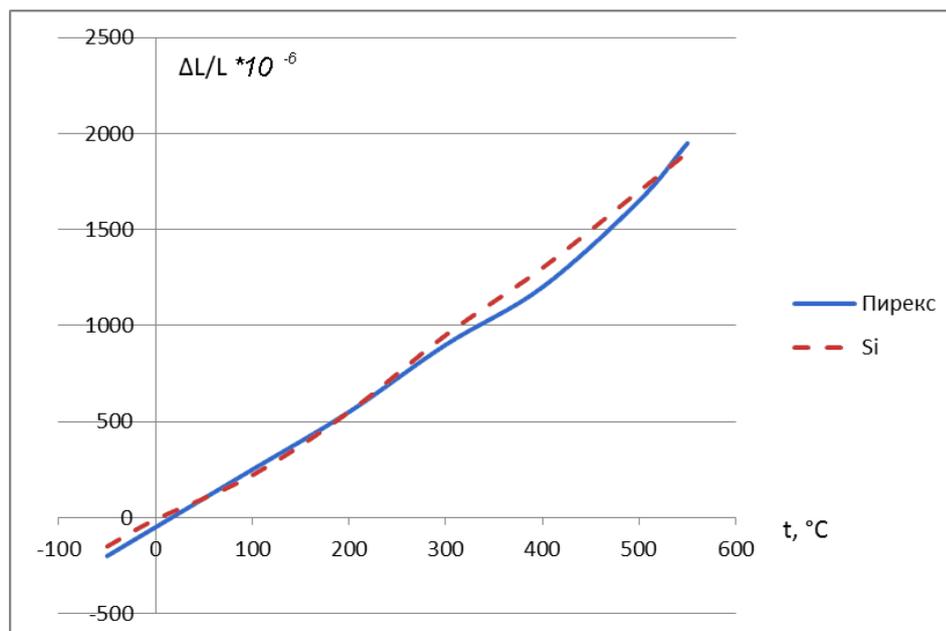


Рисунок 4 – Характеристики термического расширения стекла марки «Пирекс» и кремния

Видно, что при низких температурах они ведут себя одинаково. Однако, тепловое расширение стекла «Пирекс» отличается от характеристик кремния при температурах, превышающих 300 °C. Можно сделать вывод, что зона оптимальной температуры для проведения процесса сварки находится в пределах от 280 до 350 °C.

В разрабатываемых технологических режимах необходимо учесть, что:

1. критерием оптимальности технологического процесса является качество образующегося оксида кремния;
2. поверхность кремния с термически выращенным слоем оксида кремния может быть сварена со стеклом «Пирекс», если толщина оксида менее 0,46 мкм [5].;
3. анодное напряжение должно быть минимальным для проведения процесса сварки. Известно, что высокое напряжение (свыше 1000 В) разрушает полупроводниковые элементы на поверхности кристалла [4];
3. необходимо обеспечить минимальный зазор между кристаллом и стеклом.

Таким образом, основные параметры проведения процесса электростатической анодной сварки: температура, анодное напряжение, толщина диэлектрической подложки, время процесса и окружающая среда.

При соединении кремниевой и стеклянной пластины образуется оксид кремния – SiO₂.

Качество этого оксида определяет герметичность изготавливаемой ТИЯ.

Качество проведения анодной сварки легко определяется по измерению толщины окисла или стекла с высокой точностью на эллипсометре, не требующем предварительной подготовки образца.

На подготовленных тестовых образцах, которые отличались от реальных чувствительных элементов отсутствием мембран, а пьедесталы – отсутствием отверстий, после проведения анодной сварки с помощью описанных способа и устройства, при установлении технологических режимов, измерялась толщина образующегося окисла. Параметры дефектности, коэффициенты преломления окисла для оценки качества не являются необходимыми. Стабильность величины толщины окисла, замеренная в пяти точках по краям и в центре кристалла, является критерием хорошего качества технологического процесса. В таблице 1 приведены средние значения толщин окисла для тестовых образцов.

При отработке технологических режимов принималось во внимание, что требования к напряжению зависят от температуры, температура в свою очередь зависит от качества, размеров и толщины стекла: чем толщина и размеры стекла больше, тем выше температура [7, 8, 9]. При этом рассматривается диапазон температур от 70 до 500 °С и анодных напряжений от 50 до 1200 В.

Также необходимо учитывать, что толщина стекла должна быть достаточна для механической развязки с металлическими корпусными элементами и минимальна для проведения процесса анодной сварки при оптимальных условиях.

Результаты исследований сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры технологических режимов электростатической анодной посадки на тестовых образцах в вакууме

№№ п/п	Толщина стекла, мм	Прикладываемое анодное напряжение, В	Длительность операции, мин	Толщина окисла, мкм
1	2	3	4	5
1	1,6	350	10	0,23
2	1,6	380	10	0,25
3	1,6	420	10	0,24
4	1,6	450	10	0,25
5	1,6	480	10	0,25
6	2,0	380	12	0,25
7	2,0	420	12	0,27
8	2,0	460	12	0,32
9	2,0	500	12	0,35
10	2,0	550	12	0,34
11	3,2	500	15	0,40
12	3,2	550	15	0,41
13	3,2	600	15	0,43
14	3,2	650	15	0,44
15	3,2	700	15	0,45

Эти исследования показали, что при толщине пьедестала 1,6 мм температура сварки должна быть в пределах от плюс 300 до плюс 350 °С и при этом анодное напряжение 450 В.

Были проведены дополнительные исследования, значения зависимостей между толщиной стекла, анодным напряжением и продолжительностью процесса указаны в Таблице 2.

Таблица 2 – Влияние толщины стекла на технологические режимы электростатической анодной посадки

Толщина стекла, мм	Прикладываемое напряжение, В	Длительность операции, мин
1,6	450	10
2,0	500	11
2,4	540	12
2,8	570	14
3,2	600	15

Также необходимо учитывать, что толщина стекла должна быть достаточна для механической развязки с металлическими корпусными элементами и минимальна для проведения процесса анодной сварки при оптимальных условиях.

Подбор оптимальных значений температуры производился на экспериментальных образцах ТИЯ для дифференциальных датчиков давления. Качество сварки проверялось оптическим методом, при помощи микроскопа с 16-ти кратным увеличением. Затем образец клеивался в приспособление, подавалось давление через отверстие в стеклянной подложке на обратную сторону кремниевой мембраны. Тем самым проводилась проверка на отрыв кремниевого кристалла от стеклянной подложки. Постепенно давление наращивалось до разрушения образца. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты исследований образцов ТИЯ
полученных при электростатической анодной сварке кристалла кремния
и стеклянной подложки толщиной 2 мм

№	Температура, при которой проводилась сварка, °С	Максимальное давление, МПа	Примечание
1	300	11,5	Низкое визуальное качество слоя SiO ₂ , разрушение в области сварки
2	350	14	Низкое визуальное качество слоя SiO ₂ , разрушение в области сварки
3	400	24,5	Приемлемое визуальное качество слоя SiO ₂ , разрушение в области клееного соединения
4	450	23,5	Приемлемое визуальное качество слоя SiO ₂ , разрушение кремниевой мембраны
5	500	20	Приемлемое визуальное качество слоя SiO ₂ , разрушение кремниевой мембраны
6	550	14,5	Приемлемое визуальное качество слоя SiO ₂ , разрушение кремниевой мембраны
7	600	14	Низкое визуальное качество слоя SiO ₂ , разрушение кремниевой мембраны
8	650	-	Разрушение образца при охлаждении
9	700	-	Разрушение образца при охлаждении

Таким образом, при температурах до 400 °С наблюдалось низкое качество сварного слоя и соответственно невысокое давление, которое способен выдержать образец ТИЯ. При температурах свыше 500 °С наблюдалось разрушение кремниевой мембраны при невысоких давлениях вызванное механическими напряжениями в структуре кремний-стекло. При более высоких температурах происходило разрушение образца на этапе охлаждения после сварки (растрескивание стекла, разрушение мембраны)

Выбранные температурные режимы для стеклянной подложки толщиной 2 мм показаны на рисунке 5.

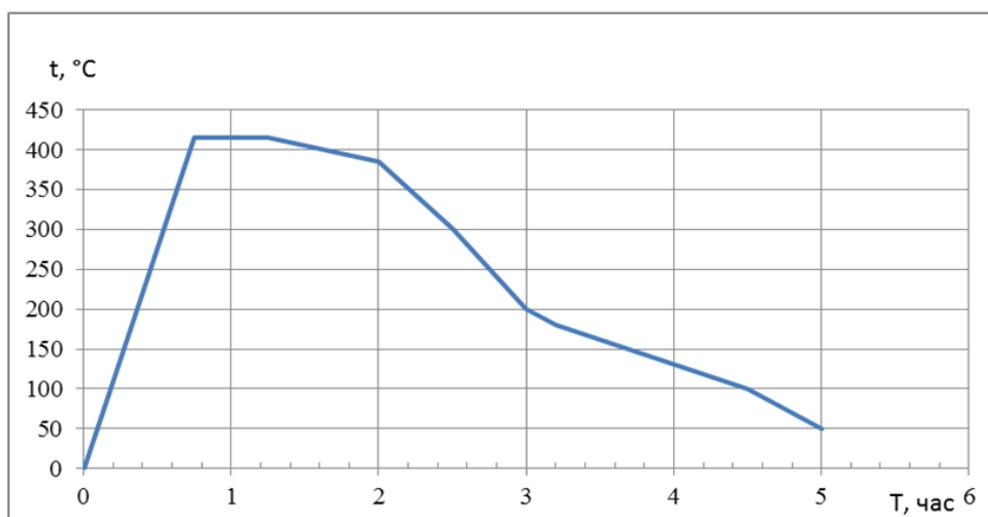


Рисунок 5 - График изменения температурного режима процесса электростатической анодной посадки

Электростатическая анодная посадка осуществляется в условиях вакуума.

Во время сварки температура и прилагаемое анодное напряжение выдерживаются постоянными. Очень скоро образуется область объемного заряда и происходит соединение пластин. Хотя соединение необратимо, обычно анодное напряжение прикладывают до тех пор, пока соединенные образцы не охладятся до температуры, близкой к комнатной.

4 Апробация технологических режимов изготовления ТИЯ

В процессе апробации разработанного способа и приспособлений для электростатической сварки было изготовлено около ста тысяч чувствительных элементов, которые использовались в датчиках давления типа ИПИ по сертификату РФ № 10997 с 1992 года. Датчики применялись в двигателях автомобилей «Газель», на испытательных стендах ЦАГИ, ООО «Севнефть», ООО «Теплоприбор», «Камов» и т.д. Общий процент выхода годных ТИЯ по всем видам изделий находится на уровне 75 %. Возврата датчиков из-за брака ТИЯ не было.

Заключение

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Чувствительные элементы, изготовленные по предлагаемой технологии с использованием специально разработанных приспособлений получают с улучшенными характеристиками временной стабильности параметров и уменьшением чувствительности

к изменениям температуры измеряемой и окружающей среды, что позволяет повысить точность измерений и надёжность датчиков изготовленных на базе данных чувствительных элементов.

2. Гипотеза о соединении отдельных кристаллов и стеклянных пьедесталов для повышения выхода качественных чувствительных элементов электростатической сварки получила подтверждение.

3. Изложенный в статье метод электростатической посадки позволяет стимулировать разработки и внедрение серийно выпускаемых отечественных конкурентноспособных изделий на базе кристаллов из монокристаллического кремния т.к. данный процесс в значительной степени тормозится из-за высокой стоимости получаемых чувствительных элементов, что обусловлено высоким процентом брака на этапе соединения кристалла и стекла, и высоким процентом брака изделий собранных на базе данных чувствительных элементов из-за временной и температурной нестабильности.

4. Переход на новый способ изготовления чувствительных элементов позволяет внедрить в производство серийный выпуск любого количества чувствительных элементов высокого качества для выпуска базовых элементов датчиков давления различных модификаций, температуры, силы, вибрации, взамен трудоёмкого, низкокачественного штучного изготовления.

Статья опубликована при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в процессе выполнения НИР «Исследование и разработка методов интегрирования наноструктурированных материалов и кремния и создание экспериментальных образцов микроэлектромеханических малогабаритных реактивных двигателей и датчиков давления для управления и контроля системами и агрегатами космических аппаратов» по ГК №16.513.11.3053 в рамках мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Список литературы

1. Синев Л.С., Рябов В.Т., Тиняков Ю.Н. Коэффициентные напряжения при электростатическом соединении кремния со стеклом // Наноинженерия. 2011. № 8. С. 16-19.

2. Козлов А.Г. Тепловые микросенсоры: конструктивные особенности // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 16-28.

3. Козлов А.Г. Тепловые микросенсоры: классификация, основные типы // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 4. С. 2-13.
4. Баринов И.Н. Конструкция и некоторые результаты исследований магнитодиодов при воздействии температур широкого диапазона // Компоненты и технологии. 2009. № 1. С. 18-21.
5. Телец В.А., Негина Ю.С., Орлов А.А. Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки // Нано- и микросистемная техника. 2004. № 3. С. 2-6.
6. Баринов И.Н. Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления на основе КНД-структуры // Компоненты и технологии. 2009. № 5. С. 12-15.
7. Евстратов А.А., Лукашенко Т.А., Тупик А.Н. Применение фотоотверждаемых оптических клеев для герметизации аналитических микрочипов // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 1. С. 29-38.
8. Kutchoukov V.G., Laugere F., van Der Vlist W., et al. Fabrication of Nanofluidic Devices Using Glass-to-Glass Anodic Bonding // Sensors and Actuators, A: Physical. 2004. Vol. 114, no. 2-3. P. 521-527.
9. Wei J, Nai S.M.L., Wong C.K., Lee L.C. Glass-to-Glass Anodic Bonding Process and Electrostatic Force // Thin Solid Films. 2004. Vols. 462-463. P. 487-491. DOI: [10.1016/j.tsf.2004.05.067](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.05.067)

Thermally isolated cells in designs of transducers of physical quantities made by an electrostatic anodic bonding of semi-conductor and dielectric elements

12, December 2012

DOI: 10.7463/0113.0517471

Borzov A.B., Likhoedenko K.P., Cygankov V. Yu., Tinyakov Yu.N., Andreev K.A., Civinskaya T.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

borzov@rambler.ru

kost21v@rambler.ru

tsyganbow@mail.ru

tinjakov48@mail.ru

kost87@mail.ru

tsivinskaya_t@mail.ru

The authors consider the main method of creating thermally isolated structures of sensors of physical quantities made according to MEMS technologies, that is electrostatic anodic bonding. It was shown that the main reason for a small percentage of production of suitable thermally isolated structures manufactured by a method of electrostatic anodic bonding is unevenness of physical and chemical properties across the whole surface of semi-conductor and corresponding glass plates. The authors propose improvement of the anodic bonding method; designs for adaptations were developed for implementing this improvement. The proposed designs were manufactured and probed. Results confirming the possibility of increase in percentage of production of suitable thermally isolated structures of sensors of physical quantities with the use of the method of electrostatic anodic bonding were obtained.

Publications with keywords: [silicon](#), [glass](#), [thermally isolated structures](#), [sensors of physical sizes](#), [electrostatic anode landing](#), [percent of the exit suitable](#), [technologies](#)

Publications with words: [silicon](#), [glass](#), [thermally isolated structures](#), [sensors of physical sizes](#), [electrostatic anode landing](#), [percent of the exit suitable](#), [technologies](#)

References

1. Sinev L.S., Riabov V.T., Tiniakov Iu.N. Koeffitsientnye napriazheniia pri elektrostatcheskom soedinenii kremniia so steklom [Coefficient strains at electrostatic combining of silicon and glass]. *Nanoinzheneriia*, 2011, no. 8, pp. 16-19.

2. Kozlov A.G. Teplovye mikrosensory: konstruktivnye osobennosti [Thermal microsensors: design features]. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 2008, no. 1, pp.16-28.
3. Kozlov A.G. Teplovye mikrosensory: klassifikatsiia, osnovnye tipy [Thermal microsensors: classification. basic types]. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 2006, no. 4, pp. 2-13.
4. Barinov I.N. Konstruktsiia i nekotorye rezul'taty issledovaniia magnitodiodov pri vozdeistvii temperatur shirokogo diapazona [The design and some results of researches of magnetic diodes under the influence of a wide range of temperatures]. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2009, no. 1, pp. 18-21.
5. Telets V.A., Negina Iu.S., Orlov A.A. Izgotovlenie trekhmernykh MEMS metodami termokompressionnoi svarki [Manufacturing of 3D-MEMS by the thermocompression welding]. *Nano- i mikrosistemnaia tekhnika*, 2004, no. 3, pp. 2-6.
6. Barinov I.N. Poluprovodnikovye tenzorezistivnye datchiki davleniia na osnove KND-struktury [Semiconductor tensor resistive pressure sensors based on silicon-on-insulator structure]. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2009, no. 5, pp. 12-15.
7. Evstratov A.A., Lukashenko T.A., Tupik A.N. Primenenie fotootverzhaemykh opticheskikh kleev dlia germetizatsii analiticheskikh mikrochipov [The use of optical photocurable adhesives for sealing analytical microchips]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific Instrument Engineering.], 2010, vol. 20, no. 1, pp. 29-38.
8. Kutshoukov V.G., Laugere F., van Der Vlist W., et al. Fabrication of Nanofluidic Devices Using Glass-to-Glass Anodic Bonding. *Sensors and Actuators. A: Physical*, 2004, vol. 114, no. 2-3, pp. 521-527.
9. Wei J, Nai S.M.L., Wong C.K., Lee L.C. Glass-to-Glass Anodic Bonding Process and Electrostatic Force. *Thin Solid Films*, 2004, vols. 462-463, pp. 487-491. DOI: [10.1016/j.tsf.2004.05.067](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.05.067)