

Особенности применения электростатического соединения кремния со стеклом в микросистемной технике

08, август 2014

Синев Л. С.^{1,а}

УДК: 621.3.049.779:621.791.9:621.792.6

¹Россия, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова»

^аlenchik_inc@mail.ru

Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) — это микроминиатюрные интегральные устройства или системы, в которых комбинируются механические и электрические компоненты. Они изготавливаются на основе групповой планарной технологии обработки интегральных схем и могут иметь размеры от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Довольно важными операциями, определяющими работоспособность получаемого устройства, являются операции сборки. Наиболее распространены соединения с использованием деталей из кремния и стекла. Статья является обзором технологического процесса электростатического соединения и особенностей его применения в разработках МЭМС.

1. Сравнение методов соединения

Выбор подходящего метода соединения определяется различными факторами. Учитываются различные показатели, начиная с класса устройства (например, оптические устройства) и требований, определяемых принципом работы устройства (например, наличие герметичного шва), и заканчивая требованиями, определяемыми свойствами интегрируемых частей прибора (например, интеграция материалов с различающимися коэффициентами теплового расширения) [1, 2].

Соединение, сохраняющее герметичность в течение всего срока жизни прибора, важно для приборов, функционирование которых зависит от параметров среды внутри них. В качестве примера можно привести микроэлектромеханические устройства, в которых давление внутри прибора определяет характеристики демпфирования и амплитудно-частотные характеристики рабочих движущихся элементов: микроакселерометры, высокочувствительные МЭМС-гироскопы, высокочастотные резонаторы.

Соединение деталей прибора может использоваться как метод поддержания чистоты внутри собираемого устройства. Например, подложки могут быть соединены перед резкой для предупреждения повреждения хрупких или чувствительных элементов.

При выборе способа соединения следует также учитывать температурные ограничения. Это касается как ограничений по допустимой температуре нагрева металлизации соединяемых деталей, так и ограничений, связанных с разностью коэффициентов температурного расширения. Также следует учитывать накладываемые способом соединения ограничения на возможность создания электрических межсоединений между деталями в сборке. Присутствие свинца (соединение стеклоспаями), натрия (анодная посадка) или золота (эвтектическое соединение) должно быть учтено, если одна из соединяемых деталей содержит полупроводниковые структуры [3—5].

В табл. 1 приведено сравнение различных методов соединения с точки зрения различных требований с учетом описанных выше ограничений [1, 4—6].

Таблица 1. Сравнение методов соединения

Критерии сравнения (требования к процессу)	Анодная посадка	Стеклосплав	Эвтектическое соединение	Прямое соединение
Совместимость с КМОП	≈	≈	≈	+
Температура процесса <440°C	+	+	+	—
Температура процесса <200°C	≈	—	—	—
Требование механического прижатия	—	+	+	≈
Отсутствие требований к равномерности прижатия	+	—	≈	—
Герметичность соединения	+	+	+	+
Возможность формировать вертикальные электрические межсоединения	+	—	+	+
Требование низкой шерохова- тости соединяемых поверх- ностей (Ra0,05 и менее)	+	—	—	+
Допустимая высота выступов на поверхности, не более, мкм	0,05	2	1	0

Примечание. «+» — требование полностью выполняется; «—» — требование невыполнимо; «≈» — требование выполняется в некоторой степени с ограничениями или особенными условиями соединения.

Прямое соединение пластин это технология соединения двух кремниевых пластин без приложения электрического напряжения, обычно при комнатной температуре. Данный процесс основывается на химической реакции между группами OH^- , находящимися на поверхности исходного кремния или на образованном на подложке слое оксида кремния. Подложки с высоким качеством полировки после химической обработки предварительно соединяются, выравниваются и довольно сильно сжимаются в центральной точке поверхности. Соприкосновение двух гидрооксидных пленок на подложках приводит к установлению плотного контакта по всей поверхности кремниевых пластин. Последующая термообработка проводится при температуре 1100°C и создает долговременные ковалентные связи [7].

Распространенным методом соединения является эвтектическое соединение. Соединяемые материалы нагревают до температуры эвтектической точки, при которой начинается процесс взаимодиффузии металлов, входящих в эвтектический сплав [5]. После охлаждения сборки получают прочное и надежное соединение деталей. Температура эвтектической точки для системы кремний-золото составляет 370°C [8], для системы алюминий-германий составляет 424°C [9]. Процесс проведения эвтектического соединения требует приложения значительных усилий. Следствием этого является сложность соединения деталей большой площади, так как кроме обеспечения прижима необходимо обеспечить высокую степень чистоты и равномерности соединяемых поверхностей.

Соединение стеклосплавом проводится следующим образом. Паста, полученная в результате смешивания порошкообразных минералов с растворителями, наносится на одну из соединяемых деталей и, затем, тщательно высушивается. После этого, пластины соединяют при температуре большей, чем точка размягчения высушенной пасты. Типовая температура процесса находится в диапазоне от 400°C до 600°C [7]. Для получения высококачественного соединения необходимо равномерное приложение механического усилия.

2. Электростатическое соединение

Электростатическое соединение (анодная посадка) — это технология герметичного соединения материалов. Будучи изначально разработанной для соединения стекла с металлами [10], данная технология получила широкое распространение в микроэлектронике для соединения кремния со стеклом [1, 11, 12].

Металл или полупроводник соединяется со стеклом посредством приложения внешней разности потенциалов и одновременным нагревом до температур, совместимых с процессами микроэлектроники. Отрицательный заряд подводится к стеклу, а положительный — к металлу или полупроводнику (см. рис. 1). При повышенной температуре положительные ионы натрия в стекле дрейфуют к отрицательному электроду на стеклянной пластине и нейтрализуются [12]. Таким образом, вблизи анода формируется отрицательно заряженный слой. Электростатическая сила между этим отрицательно заряженным слоем и положительным зарядом, наведенным на аноде, плотно стягивает соединяемые поверхности. Соединение формируется за счет окисления полупроводника ионами кислорода, находящимися в плоскости соединения [13, 14].

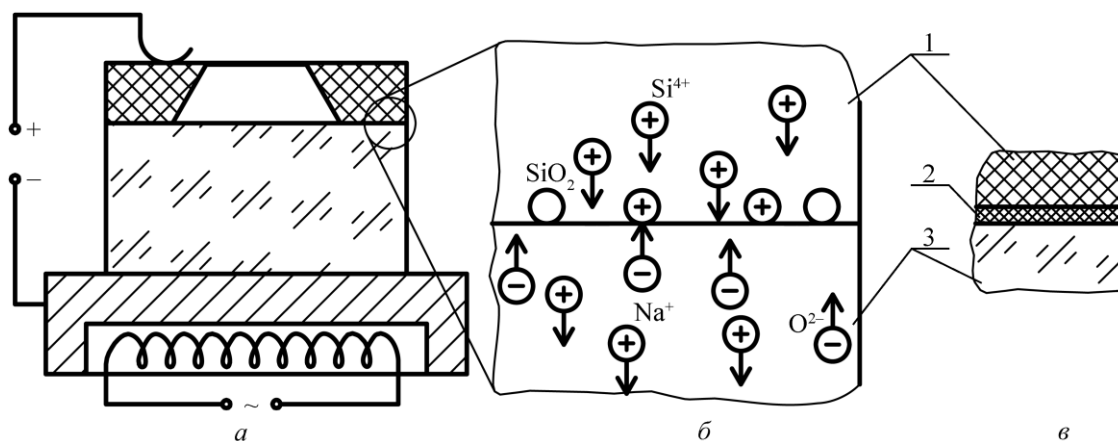


Рис. 1. Иллюстрация процесса электростатического соединения: *a* — схема подведения разности потенциалов; *б* — схема ионного взаимодействия во время проведения процесса; *в* — область соединения после завершения процесса. 1 — кремний (Si), 2 — оксид кремния (SiO_2), 3 — стекло

Для оценки зависимости электростатических сил, стягивающих соединяемые образцы, от приложенного напряжения используют модель, представленную на рис. 2 [15]. Здесь: R_1 — последовательное сопротивление стекла; R_2 — сопротивление утечки; C — емкость соединяемой пары; V — приложенная разность потенциалов. Определив заряд конденсатора в модели, можно определить получаемую силу притягивания соединяемых деталей.

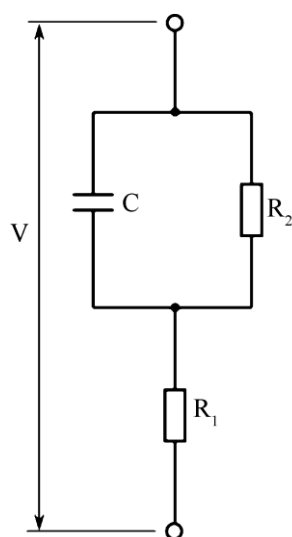


Рис. 2. Модель процесса электростатического соединения

Соединяют как отдельные кристаллы стекла и кремния, так и целые пластины. Соединение пластин предпочтительней, потому что оно обеспечивает более точное совмещение. Для получения качественного соединения необходимо обеспечить ряд требований: 1) качество соединяемых поверхностей должно быть высоким (следует обеспечить низкую шероховатость и высокую чистоту поверхностей); 2) температура процесса должна быть достаточной для обеспечения подвижности ионов, и, одновременно достаточно низкой, чтобы не ухудшить характеристики создаваемого прибора; 3) распределение температуры

и подводимого заряда по поверхности должно быть равномерным; 4) коэффициенты теплового расширения соединяемых материалов должны быть согласованы; 5) число подвижных ионов в стекле при рабочей температуре должно быть достаточным для проведения процесса.

Дать характеристику проходящему или уже завершившемуся процессу можно несколькими способами: наблюдением за параметрами процесса (за током), визуальным осмотром (область соединения имеет более темный оттенок серого цвета в отличие от несоединенных областей), проводя разрушающие испытания на отрыв или сдвиг, измеряя изгиб соединенных деталей. Механическая прочность соединения составляет 10–150 МПа [16—21]. Величина прочности зависит от материалов и метода измерения. Обычно соединенные детали разрушаются с вырывом кремния, либо стекла. К дефектам соединения относят: пустоты из-за посторонних частиц, несоединенные области из-за неплоскостности соединяемых поверхностей, погрешности совмещения.

Электростатическое соединение применяют при изготовлении чувствительных элементов датчиков давления, а также разнообразных микроэлектромеханических приборов, таких как микрореле, микроакселерометры, микрогироскопы и пр. В ряде случаев соединяются полированные поверхности без топологии, например, при изготовлении чувствительных элементов датчиков давления [22]. Однако, возрастающая сложность приборов обуславливает необходимость соединения деталей, поверхности которых уже обработаны и покрыты пленками различных материалов [5, 18, 23].

Наиболее часто процесс электростатического соединения проводят при постоянном напряжении, однако, в этом случае начальный скачок тока может вызывать локальный перегрев поверхностей и привести к большим остаточным напряжениям. Во избежание такого эффекта применяют ограничение процесса по току [24]. В течение процесса поддерживают относительно низкое значение тока за счет плавного роста напряжения. Это снижает риск локального перегрева поверхностей, но, в то же время, может увеличить длительность процесса.

Вследствие некоторой разницы в коэффициентах теплового расширения стекла и кремния вблизи зоны соединения образуются коэффициентные напряжения [25]. Для их снижения, кроме научно обоснованного выбора марки стекла и режима проведения процесса [26], применяют термообработку (отжиг) уже соединенных деталей, либо щадящие режимы охлаждения после соединения.

Для снижения коэффициентных напряжений в стекле автором проводилась отработка режимов проведения процесса, а также последующей термообработки. Величины коэффициентных напряжений в стекле измерялись до и после термообработки. Результаты экспериментов подтвердили возможность снижения внутренних механических напряжений при помощи термообработки и показали возможность совмещения процессов соединения и последующего отжига. То есть можно проводить управляемое охлаждение сборки после соединения с режимами, применяемыми для их отжига.

При применении анодной посадки для соединения деталей с подвижными элементами есть опасность того, что из-за сильного электростатического поля гибкая структура притянется к стеклу и соединится с ним. Нужно использовать как конструктивные, так и технологические решения, которые бы предотвратили контакт кремния со стеклом в нежелательных областях [11, 27]. К таким решениям при невозможности снижения прилагаемой разности потенциалов относятся либо защита поверхностей от соприкосновения, либо экранирование мест соединения. На практике, при сборке чувствительных элементов датчиков давления, автором применял локальное подтравливание стекла, в целях увеличения шероховатости в области потенциального соединения.

В некоторых видах МЭМС возникает необходимость вывода электрического контакта через зону соединения кремния и стекла (например, подведение электропитания, шин данных в герметичную область) [2]. Это можно сделать несколькими способами, у каждого из которых есть свои преимущества и недостатки [28, 29].

В первом из рассматриваемых способов (см. рис. 3а) на поверхности стекла или кремния вытравливают углубления, в которых затем формируют металлические дорожки. Защитив тем или иным способом дорожки от электрического контакта с противоположной деталью, осуществляют соединение. К преимуществам таких токоподводов относят их низкое сопротивление, однако без дополнительных операций сложно добиться герметичности соединения, а также есть опасность повреждения дорожек во время соединения. Большое значение для герметичности соединения имеет величина отклонения толщины нанесенного металла от номинала.

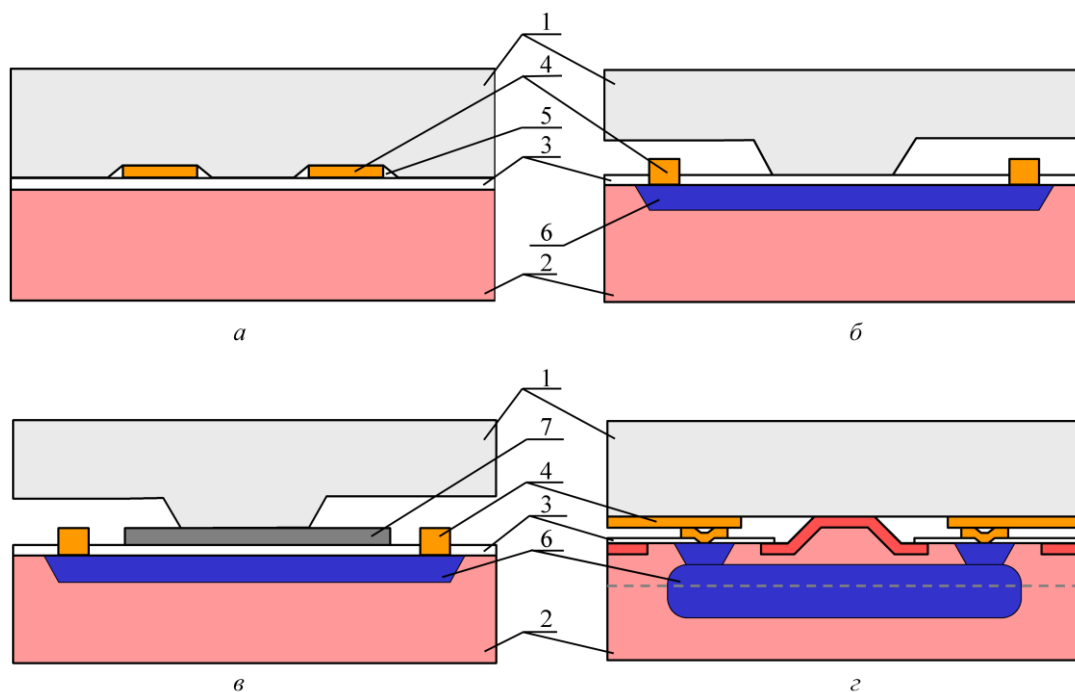


Рис. 3. Схематическое изображение способов вывода электрических контактов через область соединения [29]: *а* — вытравливанием каналов под проводники; *б* — диффузионный «приповерхностный» проводник; *в* — соединение с пленкой поликристаллического кремния; *г* — заглубленный диффузионный проводник. 1 — стекло, 2 — кремний (Si), 3 — оксид кремния (SiO₂), 4 — металлизация; 5 — вытравленный канал; 6 — легированный кремний (проводимость p+); 7 — слой поликристаллического кремния.

Следующий способ (см. рис. 3б) заключается в легировании приповерхностной области кремния с нанесением металлизации в областях будущей разварки и защитой оксидом в остальных местах. Этот способ сохраняет герметичность последующего соединения, однако сопротивление токопровода заметно выше, чем в предыдущем варианте. Кроме того, на ионных взаимодействиях в процессе соединения отрицательно сказывается наличие легированной области. Снизить негативные последствия возможно осаждением в области соединения поверх оксида слоя поликристаллического кремния (см. рис. 3в), на который в дальнейшем и производить электростатическое присоединение стекла.

В следующем способе (см. рис. 3г), после легирования приповерхностной области, осуществляют эпитаксиальное наращивание слоя кремния. Таким образом, проводящая область оказывается заглублена в области будущего соединения. Токоподвод к ней осуществляют через области еще одного легирования, которые осуществляют ее связь с поверхностью.

Заключение

Из приведенного обзора ясно, что технологический процесс электростатического соединения хорошо зарекомендовал себя и является отработанным для соединения полированных поверхностей без топологии. В то же время, для сложных конструкций МЭМС, где применяются гибкие подвижные элементы, где требуется обеспечивать соединение вблизи КМОП элементов или использовать герметичные электрические вводы, процесс разработки должен включать оптимизацию конструкции и режимов проведения процесса экспериментальными методами и методами математического моделирования с целью получения наиболее эффективных результатов.

Список литературы

1. Pargfrieder S., Kettner P., Dragoi V., Farrens S. New low temperature bonding technologies for the MEMS Industry // The 6th Korean MEMS Conference. Jeju, 2004. 5 p.
2. Yufeng J., Jiaxun Z. MEMS Vacuum Packaging Technology and Applications // 6th International Conference on Electronic Packaging Technology. 2005. 5 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEPT.2005.1564710>
3. Schjolberg-Henriksen K., Fjeldly T. A., Santander J., Plaza J. A., Hanneborg A. Modelling of charging effects caused by anodic bonding in packaged MOS devices // Electronics Letters. 2002. Vol. 38. №24. Pp. 1596—1597. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/el:20021044>
4. Farrens S. Wafer and Die Bonding Technologies for 3D Integration // Materials Research Society Proceedings E: Materials and Technologies for 3-D Integration. 2008. Режим доступа: http://www.suss.com/fileadmin/user_upload/technical_publications/WP_3D_WaferandDieBondingTechnologiesfor3D.pdf (дата обращения 24.02.2014).

5. Dragoi V., Pabo E., Burggraf J., Mittendorfer G. CMOS: compatible wafer bonding for MEMS and wafer-level 3D integration // *Microsystem Technologies*. 2012. Vol. 18. №7-8. Pp. 1065—1075. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-012-1439-7>
6. Бабаевский П. Г., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Гринькин Е. А., Турков В. Е., Резниченко Г. М., Рискин Д. Д., Бычкова Ю. А. Вакуумплотное матричное корпусирование сенсорных микроэлектромеханических систем (аналитический обзор) часть 1. Процессы соединения и разрезания пластин, локальная герметизация (вакуумное капсулирование) чувствительных элементов сенсорных микроэлектромеханических систем // *Нано- и микросистемная техника*. 2014. № 3. С. 3-12.
7. Stoger G., Satoshi F. S. Advanced Wafer Bonding Technology // *Semicon. Kansai*, 1999. 6 p.
8. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3 т. Т. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.
9. Строение и свойства двойных металлических систем. В 4 т. Т. 1. / А. Е. Вол, И. К. Каган; под руковод. Н. В. Агеева. М.: Гос. изд-во физ-мат. литературы, 1959.
10. Pomerantz D. I. Anodic bonding; patent no. 3397278 US. 1968.
11. Veenstra T. T., Berenschot J. W., Gardeniers J. G. E., Sanders R. G. P., Elwenspoek M. C., Van den Berg A. Use of selective anodic bonding to create micropump chambers with virtually no dead volume // *Journal of The Electrochemical Society*. 2001. Vol. 148. Pp. G68—G72. DOI: <http://dx.doi.org/10.1149/1.1339873>
12. Van Helvoort A. T. J., Knowles K. M., Holmestad R., Fernie J. A. Characterization of Cation Depletion in Pyrex during Electrostatic Bonding // *Journal of The Electrochemical Society*. 2003. Vol. 150, №10. Pp. G624—G629. DOI: <http://dx.doi.org/10.1149/1.1604116>
13. Wallis. G. Field Assisted Glass Sealing // *ElectroComponent Science and Technology*. 1975. Vol. 2, №1. Pp. 45—53. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/APEC.2.45>
14. Van Helvoort A. T. J., Knowles K. M., Holmestad R., Fernie J. A. Anodic oxidation during electrostatic bonding // *Philosophical Magazine*. 2004. Vol. 84, №6. Pp. 505—519. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14786430310001637015>
15. Anthony T. R. Anodic bonding of imperfect surfaces // *Journal of Applied Physics*. 1983. Vol. 54, №5. Pp. 2419—2428. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.332357>
16. Lee T. M. H., Hsing I.-M., Liaw C. Y. N. An improved anodic bonding process using pulsed voltage technique // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2000. Vol. 9, №4. Pp. 469—473. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/84.896767>
17. Guan R., Gan Z., Fulong Z., Wang X., Liu S. Anodic Bonding Study on Vacuum Micro Sealing Cavity // *7th International Conference on Electronic Packaging Technology*. 2006. Pp. 1—4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEPT.2006.359851>
18. Lee T. M. H., Lee D. H. Y., Liaw C. Y. N., Lao A. I. K., Hsing I.-M. Detailed characterization of anodic bonding process between glass and thin-film coated silicon substrates // *Sen-*

- sors and Actuators A: Physical. 2000. Vol. 86, №1—2. Pp. 103—107. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(00\)00418-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(00)00418-0)
19. Chen M. X., Yi X. J., Gan Z.Y., Liu S. Reliability of anodically bonded silicon–glass packages // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005. Vol. 120, №1. Pp. 291—295. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2004.11.031>
20. Hu Y.-Q., Zhao Y.-P., Yu T. Tensile tests of micro anchors anodically bonded between Pyrex glass and aluminum thin film coated on silicon wafer // *Microelectronics Reliability*. 2008. Vol. 48, №10. Pp. 1720—1723. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2008.04.016>
21. Villanueva G., Plaza J. A., González E., Bausells J. Transfer of small structures by bonding // *Microsystem Technologies*. 2006. Vol. 12, №5. Pp. 455—461. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-005-0041-7>
22. Андреев К. А., Милешин С. А., Цивинская Т. А. Анализ методов электростатической сварки кремния и стекла при производстве высокоточных датчиков // *Датчики и системы*. 2013. № 2 (165). С. 45-49.
23. Михайлов П. Г. Неразъемные соединения в микромеханических системах // *Микро-системная техника*. 2003. №2. С. 5—10.
24. Rogers T., Aitken N., Stribley K., Boyd J. Improvements in MEMS gyroscope production as a result of using in situ, aligned, current-limited anodic bonding // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005. Vol. 123—124. Pp. 106—110. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2005.03.009>
25. ОСТ 11 0041-85. Стекло электровакуумное. Термины и определения. Введ. 1986-01-01. 1985. 42 с.
26. Синев Л. С., Рябов В. Т. Согласование коэффициентов термического расширения при электростатическом соединении кремния со стеклом // *Нано- и микросистемная техника*. 2011. № 5. С. 24—27.
27. Yu H., Zhou G., Chau F. S. Yield improvement for anodic bonding with suspending structure // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008. Vol. 143. Pp. 462—468. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2007.11.009>
28. Бабаевский П. Г., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Гринькин Е. А., Турков В. Е., Резниченко Г. М., Рискин Д. Д., Бычкова Ю. А. Вакуумплотное матричное корпусирование сенсорных микроэлектромеханических систем (аналитический обзор). Часть 2. Формирование вакуумплотных электрических выводов, способы сохранения и контроля вакуума в рабочих полостях и общие тенденции развития технологии корпусирования С МЭМС // *Нано- и микросистемная техника*. 2014. № 4. С. 3-11.
29. Jakobsen H., Lapadatu A., Kittilsland G. Anodic Bonding for MEMS // *Symposium on Semiconductor Wafer Bonding*. San Francisco, 2001.