

Обеспечение вакуума

при корпусировании на уровне пластины.

Геттеры



Текст: Александр Скупов



Большая номенклатура МЭМС, МОЭМС и других приборов для своей работы требует вакуума. Использование для их герметизации дискретных корпусов довольно дорогое и сложное решение, поэтому перспективным является применение корпусирования на уровне пластины. В данной статье приведен краткий обзор методов, с помощью которых возможно реализовать эту технологию, рассматривается вопрос сохранения требуемого уровня вакуума в течение длительного времени, что достигается оптимальным выбором материалов и внедрением геттеров в герметичный объём. Также в ней описаны основные технологические аспекты применения геттеров, их свойства и характеристики.



1 Иллюстрация идеи корпусирования на уровне пластины

Существует довольно обширный класс МЭМС, МОЭМС и устройств вакуумной микроэлектроники, которым для работы требуется пониженное давление — вакуум. Прежде всего, к таким устройствам относятся гироскопы, акселерометры, датчики абсолютного давления, матрицы микроболометров и приборы, принцип действия которых основан на движении свободных электронов в электрическом поле. Перечисленные изделия имеют широчайшую перспективную область применения: системы инерциальной навигации в автомобилях и летательных аппаратах, системы ночного видения, контроля потерь тепла на энергетических объектах и многое другое. При этом ключевым требованием к данным изделиям является минимальный размер и низкая стоимость при высокой долговечности и надёжности.

В настоящее время для создания вакуума для МЭМС и микроболометров часто используют специальные корпуса. Однако это существенно увеличивает стоимость устройств, а также удлиняет производственный цикл. Поэтому привлекательной идеей является применение так называемого корпусирования на уровне пластины (WLP — wafer level packaging). Этот метод основан на сварке пластин (wafer bonding), когда пластина со сформированными функциональными структурами совмещается и затем неразрывно соединяется с пластиной-крышкой. Данный процесс позволяет существенно упростить и удешевить технологию, поскольку корпусируются одновременно несколько устройств, расположенных на одной пластине **рис 1**.

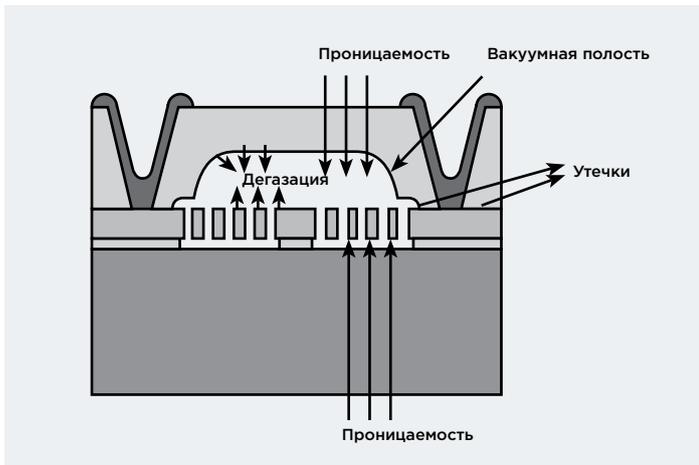
Сварка пластин может осуществляться как непосредственно (кремний-кремний, стекло-кремний), так и при помощи различных промежуточных слоёв: металлов

и сплавов, полимеров, стеклокерамических припоев. Задача обеспечения и поддержания определённого уровня вакуума при корпусировании на уровне пластины весьма сложная, поскольку ни одно соединение не является абсолютно герметичным, и приходится бороться с утечками и дегазацией. Особенно сильно данные проблемы проявляются, когда объём герметизируемого пространства очень мал, т.е. именно в случае корпусирования на уровне пластины. Часто для реализации такой технологии требуется использование геттеров, стеклокерамических припоев (например, Namics, Ferro), специальных сплавов и прочего. Успешное решение задачи по поддержанию требуемого уровня вакуума в течение всего периода эксплуатации устройства зависит от выбора материалов и методов сварки пластин, уровня вакуума, требований надёжности и долговечности.

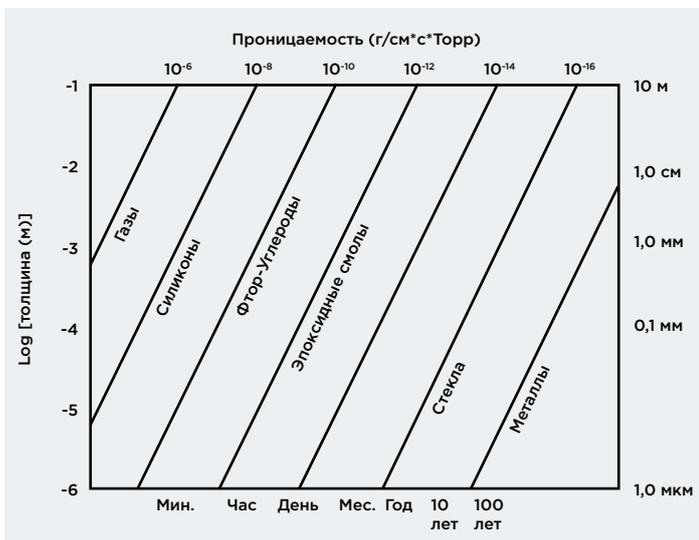
Причины деградации вакуума внутри герметичного объёма МЭМС и устройств микроэлектроники

После прекращения откачки внешним насосом давление внутри любой герметичной полости неизбежно изменится. Если внутри полости нет материалов, поглощающих газы (геттеров), то давление может изменяться исключительно в большую сторону. Это происходит по трём причинам **рис 2**:

- проницаемость материала для газа;
- утечки по соединению;
- дегазация.



2 Иллюстрация причин деградации вакуума в МЭМС¹



3 Проницаемость различных материалов для паров воды²

Т 1 Методы сварки пластин, пригодные для вакуумного корпусирования на уровне пластины по данным³

Приборная пластина	Пластина-крышка	Метод сварки	Возможность достижения высокого вакуума	Совместимость с КМОП
Кремний	Стекло	Через полимер	Нет	Да
Стекло	Кремний	Эвтектическая	Возможно	Нет
Стекло	Кремний	Анодная	Да	Нет
Кремний	Кремний/стекло	Через стеклокерамический припой (glass frit)	Да	Возможно

Т 2 Уровни вакуума, требуемые для работы различных устройств⁴

Прибор	Требуемое давление (Па)	Уровень вакуума
МЭМС-акселерометр	10 ² -10 ⁴	Низкий и средний
Датчик давления	10 ⁻² -10 ⁵	От низкого до высокого
МЭМС-гироскоп	10-10 ⁻²	Средний и высокий
МЭМС-радиочастотный переключатель	10-10 ⁻²	Средний и высокий
Микроболометр	<10 ⁻²	Высокий
Туннельные приборы	<10 ⁻¹	Высокий

Наилучшим образом проницаемости препятствуют металлы и сплавы рис 3. Стёкла также обладают приемлемой проницаемостью. Однако полимеры не способны противостоять проникновению через их толщину газов, что связано со структурой этих веществ. Поэтому в качестве наилучшего решения для вакуумного корпусирования рассматривают сварку через эвтектические сплавы (например, AuSn, AuSi), интерметаллические соединения (CuSn) и легкоплавкие металлы (например, In). Также вакуум-плотных соединений можно добиться при сварке пластин через специальную стеклянную пасту (коммерчески доступны от Ferro и Namics). При анодной сварке пластин и низкотемпературной непосредственной сварке также можно создавать герметичные соединения. В Т 1 перечислены методы сварки пластин и уровни вакуума, которых можно достигнуть с их помощью.

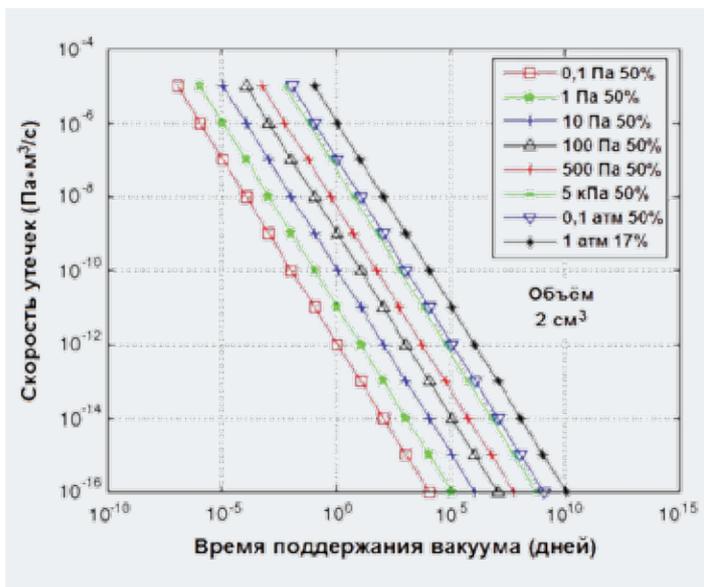
Утечки по границам материалов и дегазация являются главными факторами, вызывающими повышение давления внутри герметичного объёма. Их влияние проявляется тем сильнее, чем ниже степень вакуума, необходимая для работы устройства Т 2. Эти факторы не критичны, например, для МЭМС-акселерометров, датчиков давления и микроключей (MEMS RF switches), которые обычно работают при низком (>10³ Па) и среднем уровнях вакуума (10³ — 10⁻¹ Па). В этом случае изменение давления из-за дегазации может быть незначительным даже после многих лет эксплуатации. Совершенно иная картина наблюдается для устройств, требующих в своей работе высокого вакуума (ниже 10⁻¹ Па). К таковым относятся некоторые МЭМС-гироскопы, резонаторы, микроболометры и приборы вакуумной микроэлектроники. Высокий вакуум очень быстро нарушается после прекращения откачки рис 4, поэтому для его сохранения требуется интегрирование внутрь герметичной полости газопоглотителя (геттера).

1 G. Wu et al, Wafer level vacuum packaged resonator with in-situ Au-Al eutectic re-distribution layer, Journal of microelectromechanical systems, 2012

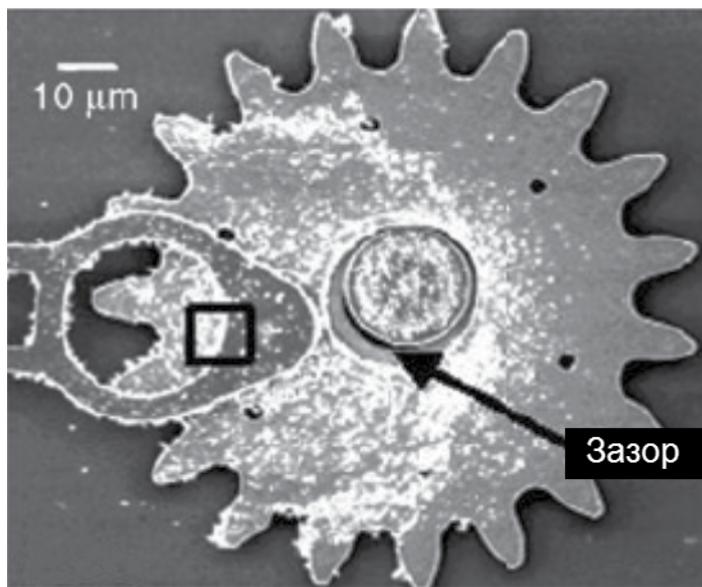
2 F. Niklaus et al, Adhesive wafer bonding, Journal of applied physics 99, 2006

3 D. Lemoine, Vacuum packaging at the wafer level for the monolithic integration of MEMS and CMOS, McGill University, 2009

4 Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies / Edited by V. Lindroos [and coauthors]. Burlington: Elsevier Inc., 2010, 636 p.



4 Изменение внутрикорпусного давления в % от начального в зависимости от скорости утечек и времени⁵



5 Износ оси вращения микрошестерни вследствие эксплуатации при повышенной влажности окружающего воздуха⁷

Геттеры

Есть два вида геттеров: распыляемые и нераспыляемые (NEG — non evaporable getter)⁶. В первом случае вещество нагревается в вакууме, в результате чего происходит испарение и переосаждение какого-либо компонента, который затем поглощает газ. Поскольку при таком технологическом решении неизбежно изменится масса чувствительных элементов МЭМС, оптические свойства МОЭМС и эмиссионные характеристики изделий вакуумной микроэлектроники, такой тип геттеров неприемлем для корпусирования всех перечисленных изделий на уровне пластины. Для этих целей применяются нераспыляемые геттеры. Такой тип материала поглощает газ сразу, но требует активации температурой при пониженном давлении.

Существуют два наиболее важных параметра, характеризующих эффективность любого геттера:

- сорбционная ёмкость — количество газа, которое может быть им поглощено за единицу времени;
- избирательность — те газы, по отношению к которым геттер проявляет активность.

При известных скоростях утечек по соединению, а также величине дегазации нужно выбирать такой тип геттера, сорбционная ёмкость которого обеспечит требуемый уровень давления внутри изделия на протяжении всего периода эксплуатации.

Очень важно знать состав остаточной атмосферы внутри герметичного объема МЭМС, МОЭМС и прочих

устройств микроэлектроники. Это позволяет понять, против каких газов необходимо применять геттеры, и насколько эффективно будет их использование.

Довольно часто значительную часть остаточной атмосферы составляют пары воды, кислород и азот, но их концентрация не соответствует таковой в нормальной атмосфере. Перечисленные газы не только увеличивают

Т 3 Состав остаточной атмосферы в герметичном объеме по данным⁸

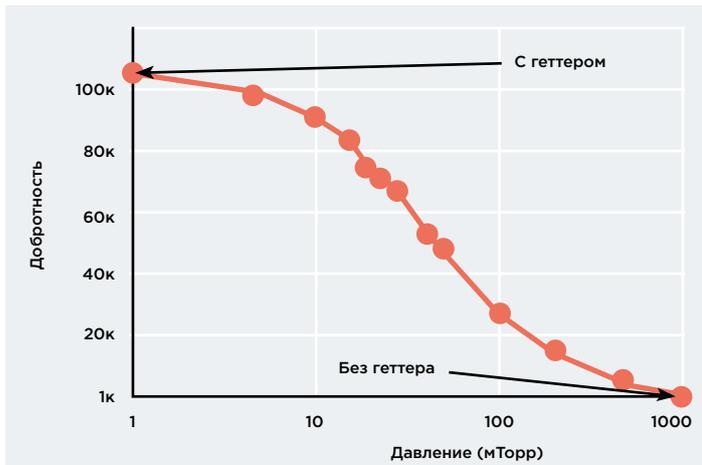
Газ	Парциальное давление, Па	%
H ₂	5,37·10 ¹	73,08
He	0,00	0,00
CO	1,36	1,85
N ₂	9,96·10 ⁻¹	1,36
CH ₄	1,51·10 ¹	20,55
H ₂ O	0,00	0,00
O ₂	0,00	0,00
C ₂ H ₆	1,23	1,67
C ₃ H ₈	4,43·10 ⁻¹	0,60
Ar	7,87·10 ⁻²	0,11
CO ₂	5,72·10 ⁻¹	0,78
Kr	0,00	0,00
Общ.	7,35·10 ¹	100

5 Z. Gan et al, Getter free vacuum packaging for MEMS, Sensors and Actuators A 149, 2009, pp. 159-164

6 R. Ramesham «Evaluation of Non-Evaporable Getters for High Vacuum Hermetic Packages», California Institute of Technology

7 K. Gilleo, MEMS/MOEMS Packaging. New York: McGraw-Hill, 2005, 220 p

8 V. Chidambaram, X. Ling, C. Bangtao « Titanium-Based Getter Solution for Wafer-Level MEMS Vacuum Packaging», Journal of Electronic Materials, No. 8, 2012



6 Зависимость добротности микрорезонатора от уровня окружающего давления⁹

давление в герметичном объёме, но также могут вызывать негативные последствия для функциональности устройств. Для примера в **Таблице 3** представлен состав остаточной атмосферы при вакуумной анодной сварке пластин стекла и кремния. Основным компонентом атмосферы в данном случае является водород. На **рис. 5** показан износ подвижного узла с микрошестернёй, вызванный избыточной концентрацией паров воды в корпусе. Данный пример показывает, что геттеры могут понадобиться не только для вакуумного корпусирования, но и для строгого контроля состава газовой среды внутри герметичного объёма.

На **рис. 6** показано влияние уровня вакуума на добротность МЭМС-гироскопа. Из графика очевидно, что увеличение давления вызывает существенное снижение добротности, т.е. КПД колебательной системы. Без геттера время жизни любого вакуумного устройства можно вычислить по формуле:

$$t = \frac{P_{\max} V}{P_{\text{atm}} v}, \text{ где:}$$

P_{\max} — максимальное давление внутри полости,
 V — объём полости,
 P_{atm} — атмосферное давление,
 v — скорость утечек.

Типичный объём МЭМС, корпусированных на уровне пластины, составляет порядка 10^{-3} см^3 , скорость утечек в лучшем случае — около $10^{-14} \text{ см}^3/\text{с}$. Таким образом, если гироскоп имеет максимальное внутрикорпусное

давление 1 Па, оно продержится менее месяца¹⁰. Очевидно, что в этом случае данное устройство нельзя применять в системе курсовой устойчивости автомобиля, где оно должно исправно работать несколько лет. Конечно, вышеупомянутая скорость не учитывает дегазацию, что ещё больше снижает время эксплуатации. Геттер же позволяет в значительной степени компенсировать как утечки, так и дегазацию.

Механизм действия геттера заключается в адсорбции газов поверхностью и последующим химическим связыванием **рис. 7**. Нераспыляемые геттеры формируются из металлических сплавов на основе Zr, Ti, V, Fe, Co. Наиболее часто используют соединения на основе Zr (например, продукты фирмы SAES Getters), поскольку прочие металлы вызывают некоторые избыточные сложности с формированием стойких поверхностных оксидов. Перечисленные металлы взаимодействуют с кислородом, водой и углекислым газом, образуя твёрдые соединения. Водород может быть поглощён внутри объёма металла с образованием гидридов.

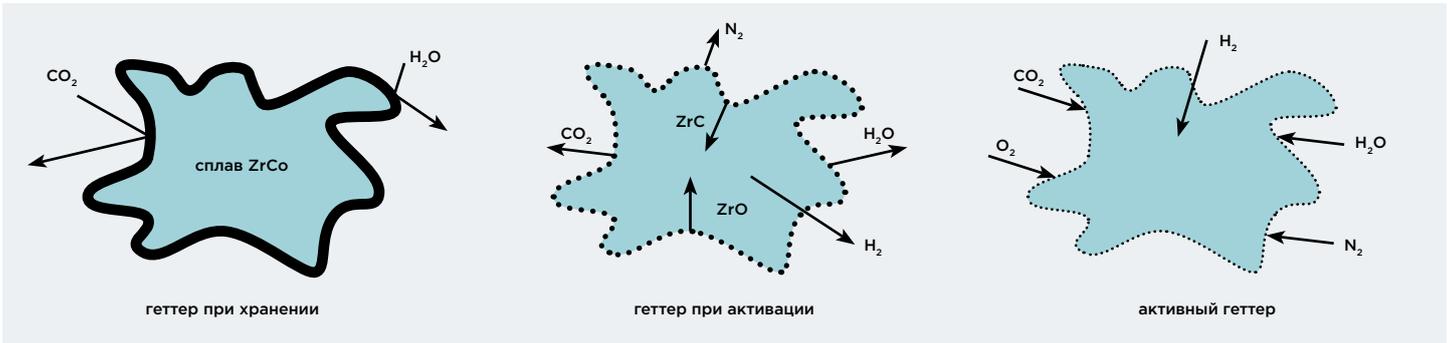
После контакта с атмосферой поверхность сформированной плёнки геттера загрязняется продуктами реакции металлов с различными газами. Поэтому для начала поглощения газов геттер необходимо подвергнуть специальной обработке, т.е. провести активацию. Общепринятым методом активации геттера является его нагрев при пониженном давлении. Данная процедура приводит к миграции кислорода в объём металла и десорбции молекул с поверхности. Температура активации геттеров обычно находится в диапазоне 300-450 °С. Указанные температуры полностью совместимы с большинством видов сварки пластин, а также с полупроводниковыми компонентами устройств. Как видно из **рис. 8**, полнота активации геттера зависит не только от температуры, но и от времени. Для практического применения геттер достаточно активировать на 85-90 % для сокращения времени процесса сварки пластин.

Для высокой эффективности геттер формируют с максимально большой площадью поверхности **рис. 9**.

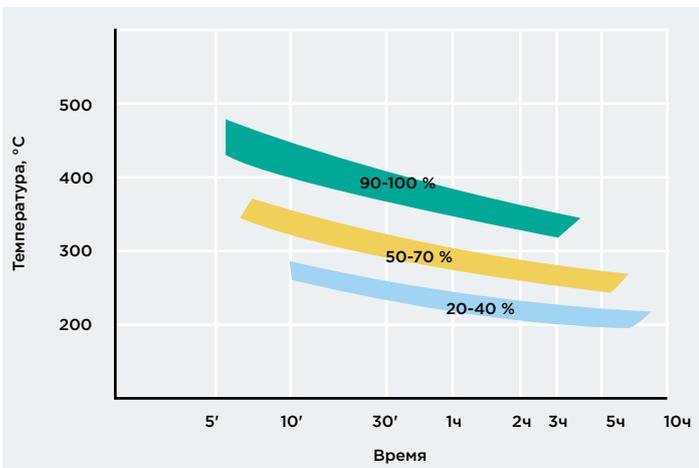
Коммерчески доступны геттеры, поставляемые в виде преформ определённого размера, которые помещаются в специально сформированную выемку в корпусе. Данные продукты имеет смысл использовать на стадии разработок. Для серийного производства существуют сервисы, позволяющие сформировать плёнку геттера на пластине заказчика согласно его требованиям и топологии (PageWafer on SAES Getters — **рис. 10**).

9 M.M. Torunbalci et al, A method of fabricating vacuum packages with vertical feedtroughs in a wafer level anodic bonding process, EUROSENSORS 2014, the XXVIII edition of the conference series, pp. 887-890

10 T. F. Marinis et al, Wafer Level Vacuum Packaging of MEMS Sensors, IEEE 2005 Electronic Components and Technology Conference

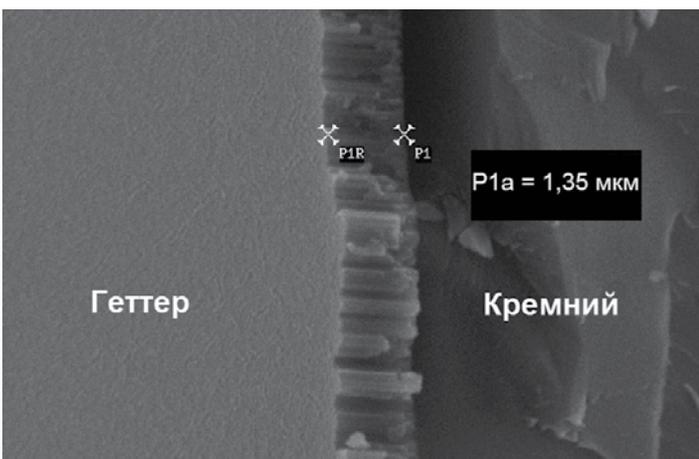


7 Иллюстрация активации геттера¹¹



8 Эффективность активации геттера при различных температурах¹²

Таким образом, геттеры позволяют решить проблему сохранения стабильного давления внутри герметично корпусированных МЭМС, МОЭМС и прочих устройств микроэлектроники. Этот результат достигается за счёт надёжного химического связывания молекул газов, составляющих основную часть остаточной атмосферы. Кроме того, в ряде применений геттеры могут быть полезны с точки зрения удаления определённых компонентов атмосферы.



9 Микрофотография плёнки геттера, сформированного на Si пластине¹³



10 Кремниевая пластина фирмы SAES Getters со сформированным рисунком тонкоплёночного геттера для корпусирования на уровне пластины¹⁴

11 W. Reinert, MEMS packaging, Advanced Solder Materials for High Temperature Application (HISOLD) Working Group Meeting, Vienna, 2008
 12. D. Muhs and P. Barnes, Controlling vacuum levels in discrete MEMS packages, SST International
 13. M. Moraja et al, New getter configuration at wafer level for assuring long term stability of MEMS, Proceedings of SPIE Vol. 4980, pp. 260-265
 14. <http://saesgetters.com>

Вакуумное корпусирование открывает широкие перспективы в создании таких устройств как МЭМС-гироскопы, акселерометры, датчики абсолютного давления, микроболометрические сенсоры и многие другие устройства.

Материалы для герметичного соединения пластин выбираются, исходя из требуемых уровней вакуума внутри устройства, требований к надёжности и условиям эксплуатации. Металлы позволяют создать наиболее герметичные соединения, позволяющие поддерживать внутри МЭМС, МОЭМС и прочих полупроводниковых устройств практически любой, достижимый в стационарных условиях, уровень вакуума. Стёкла также могут быть использованы в качестве материалов при сварке пластин для вакуум-плотной герметизации различных изделий на уровне пластины. К сожалению, полимеры в принципе не подходят для решения данной задачи.

Применение геттеров является единственным способом достижения внутри устройств высокого и среднего вакуума. Только нераспыляемые геттеры могут быть использованы при корпусировании МЭМС, МОЭМС и прочих полупроводниковых устройств на уровне пластины. Часто геттеры необходимы для контроля состава атмосферы, внутри устройств без жёстких требований к уровню внутреннего давления.

Сорбционные свойства геттера зависят от его состава и морфологии поверхности. В общем случае задача создания высокоёмких эффективных геттеров представляет существенную сложность и требует больших затрат на высококласное технологическое и измерительное оборудование, а также времени. Поэтому при разработке новых устройств, начале их серийного производства, выполнения перспективных ОКР целесообразным является использование коммерчески доступных геттеров. Материалы могут быть поставлены как в форме преформ, так и уже интегрированными на пластину для использования при сварке.

Группа компаний Остек поставляет оборудование и материалы для вакуумного корпусирования на уровне пластины для создания МЭМС, МОЭМС и других изделий микроэлектроники. Специалисты компании готовы оказать поддержку при выборе материалов — пластин, сплавов, высокочистых металлов, стеклокерамических припоев и геттеров, а также при отработке разнообразных технологий, необходимых для реализации вакуумного корпусирования на уровне пластины. 