

# Корпусирование МЭМС: проблемы и решения

А. Бойко, к. т. н.<sup>1</sup>, Д. Гаев, к. х. н.<sup>2</sup>, С. Тимошенко, д. т. н.<sup>3</sup>

УДК 621.3 | ВАК 05.27.01

Конструктивные требования к изделиям микросистемной техники непрерывно повышаются: микросистемы становятся все более «интеллектуальными» и многофункциональными, при этом сохраняется тенденция к миниатюризации. Одним из наиболее сложных этапов производства микросистем является корпусирование, которое до сих пор остается «бутылочным горлышком» при решении задачи массового выпуска новых изделий. В настоящей работе сфокусировано внимание на проблемах, возникающих при разработке технологии корпусирования, и способах их решения.

**П**родолжающаяся цифровая революция основывается на интеллектуализации технических систем, в том числе на расширении возможностей их взаимодействия с внешней средой. Устройства нано- и микросистемной техники (НМСТ) продолжают быть основой индустрии Интернета вещей, робототехники, беспилотных транспортных средств. Востребованность нано- и микросистем сохраняется и будет только увеличиваться в обозримом будущем, что привлекает в эту отрасль новых игроков. Однако начинающие разработчики сталкиваются с рядом барьеров, первый из которых связан с усложнением конструктивных требований, а второй обусловлен сложностью технологических задач корпусирования микросистем [1].

## УСЛОЖНЕНИЕ НАНО- И МИКРОСИСТЕМ

История микросистемной техники как отдельного технологического направления насчитывает более 50 лет. За точку отсчета можно взять создание в 1965 году полевого транзистора Натансона с трехмерным резонансным затвором [2]. Устройство, предназначавшееся для высокочастотной селективной селекции в кремниевых интегральных схемах, было создано на базовых принципах микросистемной техники: наличие трехмерных компонентов, групповая обработка, совместимость с технологиями кремниевых интегральных схем.

Эволюция МЭМС-устройств продолжается. От конструкций типа «одно устройство – одна функция» происходит переход к сложным комбинированным устройствам, объединяющим в единой конструкции

преобразовательные и исполнительные элементы разных типов, а также микропроцессоры. В микросистемах, в особенности для Интернета вещей, начинают применять искусственный интеллект и машинное обучение [3]. Схематично эволюция выпускаемых промышленно МЭМС-устройств изображена на рис. 1 [3]. Тренд к усложнению выполняемых функций (комплексирование) при одновременном повышении производительности и точности устройств приводит к необходимости увеличения затрат на разработку новых изделий.

## КОРПУСИРОВАНИЕ КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ БАРЬЕР

Корпусирование до сих пор остается сложным технологическим барьером, особенно при решении задачи массового выпуска новых изделий НМСТ, что объясняется рядом причин. Во-первых, в индустрии НМСТ до сих пор не созданы единые стандарты в области корпусирования, сборки и монтажа ввиду конструктивного разнообразия микросистем. Во-вторых, большинство МЭМС содержат подвижные компоненты, для функционирования которых необходимо предусматривать вакуум-плотное корпусирование и обеспечивать свободное внутреннее пространство. И наконец, для ряда высокочастотных конструкций датчиков требуется создавать и поддерживать вакуум внутри корпуса.

Хотя единые стандарты по корпусированию отсутствуют, некоторые конструктивно-технологические решения уже доказали на практике свою эффективность и могут рассматриваться при разработке технологий корпусирования. В частности, перед разработчиками может стоять выбор между герметизацией микромеханических компонентов в индивидуальных корпусах и интегральным капсулированием типа «пластина к пластине». Для

<sup>1</sup> НИУ МИЭТ, Институт НМСТ, доцент.

<sup>2</sup> КБГУ, Институт ИЭР, доцент.

<sup>3</sup> НИУ МИЭТ, Институт НМСТ, директор.

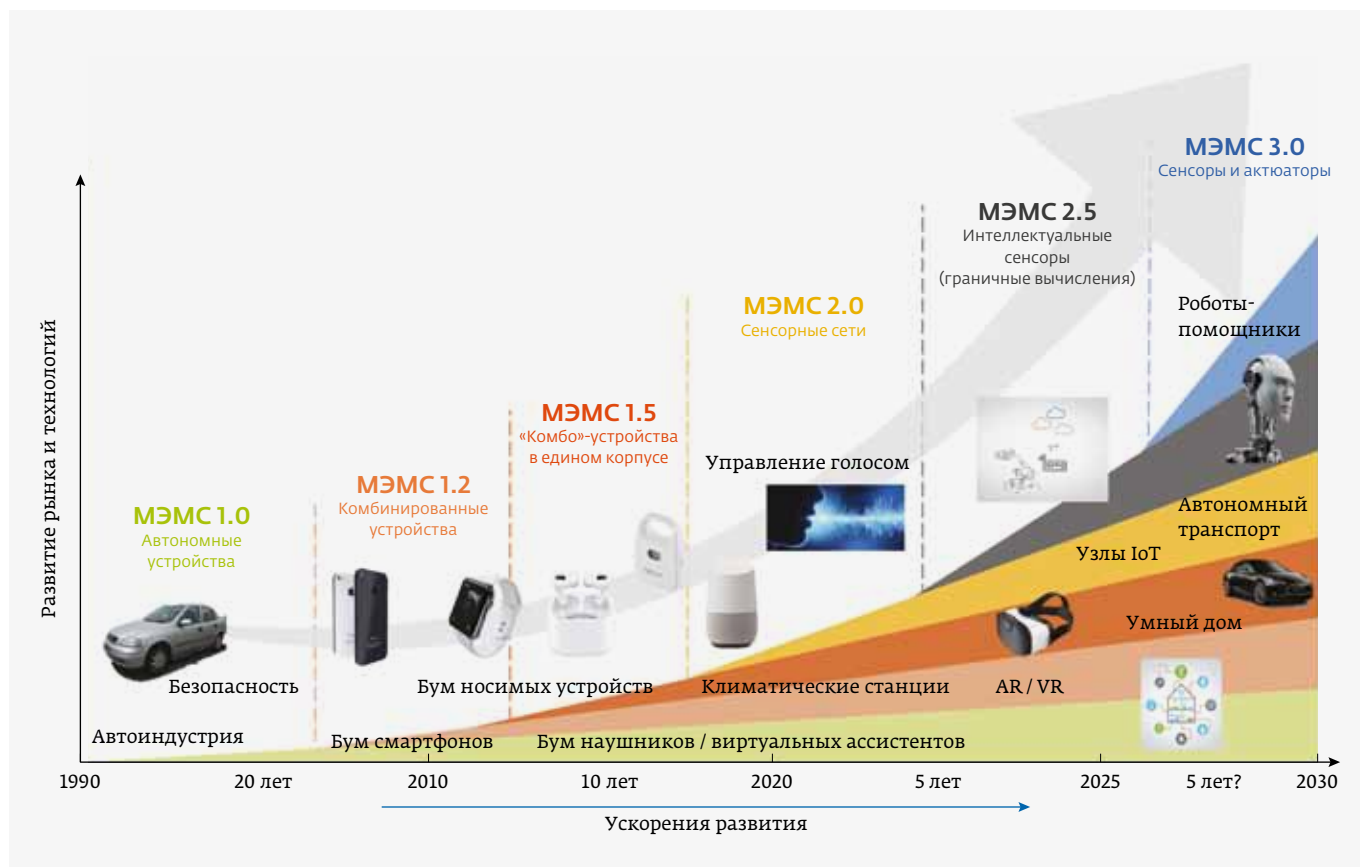


Рис. 1. Эволюция промышленно выпускаемых МЭМС-устройств

индивидуального корпусирования используются металлоглазанные или металлокерамические корпуса. Способ относительно прост и эффективен на стадии разработки изделий, так как позволяет использовать уже разработанные конструкции корпусов и отработанные технологические схемы. Однако в долгосрочной перспективе применение индивидуального корпусирования является, скорее, тупиковым решением из-за больших габаритов изделий и низкой производительности процессов герметизации, сборки и монтажа.

Интегральное корпусирование типа «пластина к пластине» уже является современной нормой в этой области и позволяет существенно уменьшить габариты микросистем. Помимо этого, капсулированные таким образом МЭМС-компоненты могут быть встроены в устройства более высокого уровня интеграции с применением современных технологий: 2,5D- и 3D-сборок, интерпозеров, сквозных межсоединений в подложке (TSV) и других. На рис. 2 схематично представлен микромеханический компонент, корпусированный с применением интегральных технологий.

Разрабатывая технологию корпусирования, можно выбирать способ соединения пластин и компонентов МЭМС. При использовании кремния и стекла как

основных конструкционных материалов возможно применение различных технологических приемов: прямого соединения, соединения через промежуточный слой, анодного соединения. Характерные особенности технологий представлены в табл. 1.

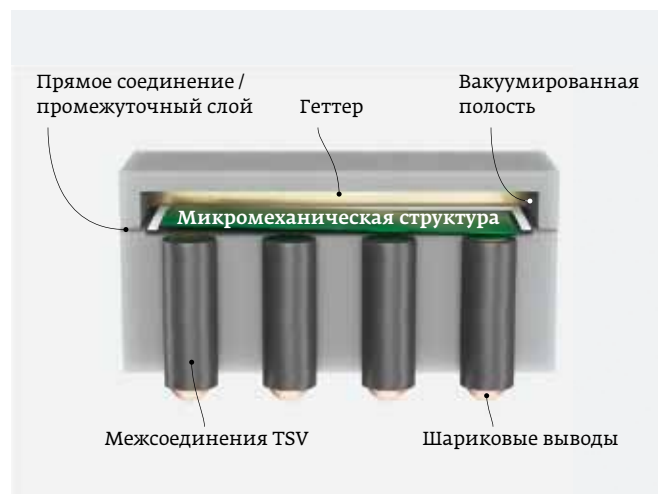


Рис. 2. Интегрально корпусированный микромеханический компонент с TSV-выводами

**Таблица 1.** Особенности процессов соединения материалов, используемых в технологии герметизации микросистем

Процесс		Характерная температура, °С	Примечание
Прямое соединение	Спекание	>1000	Очень высокая температура процесса ограничивает использование технологии
	Анодное соединение	300–450	Повышенные требования к шероховатости пластин, ограничения по типу соединяемых материалов
	Термокомпрессионное соединение	260–400	Высокие требования к шероховатости, требуется тщательная подготовка поверхности
Соединение через промежуточный слой	Пайка металлическими и эвтектическими припоями	120–400	Низкие требования к шероховатости, необходимость тщательного контроля параметров технологических сред для минимизации окисления
	Соединение стеклянной фриттой	350–600	Высокая температура процесса, низкие требования к шероховатости, большая площадь области соединения

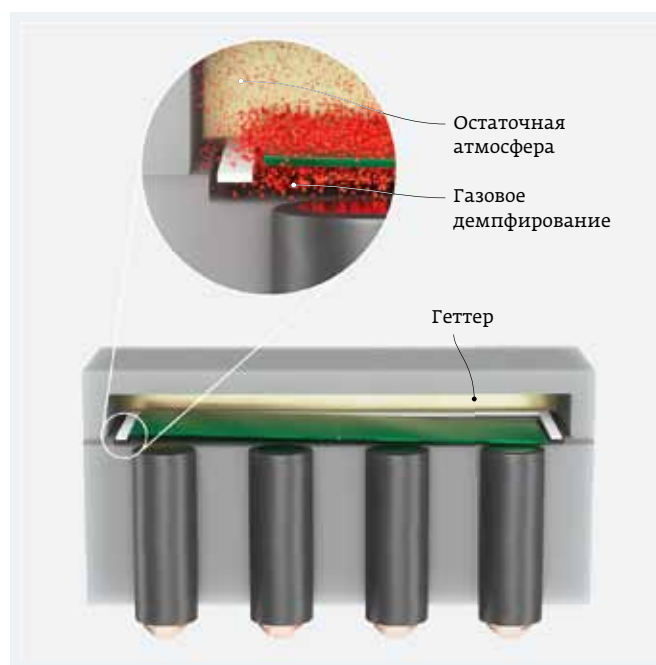
### ВАКУУМ-ПЛОТНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ И ВАКУУМИРОВАНИЕ

Уже на начальных этапах проектирования МЭМС необходимо определиться с выбором между вакуум-плотной и вакуумной герметизацией. Вакуум-плотным, согласно требованиям к корпусам микроборков [4], считается корпус, натекание в который не превышает  $5 \cdot 10^{-5}$  л · мкм рт. ст. / с. Данный уровень натекания обеспечивает незначительный газообмен между внутрикорпусной газовой средой и внешней атмосферой. Однако при необходимости вакуума внутри корпуса данный уровень натекания уже неприемлем, так как давление в корпусе МЭМС за короткое время возрастет на несколько порядков.

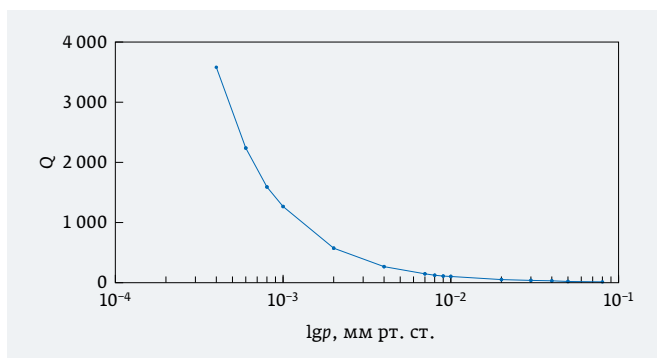
Герметизацию, обеспечивающую создание и сохранение вакуума во внутрикорпусном объеме, будем называть вакуумной герметизацией, или вакуумированием. Проведение такой герметизации микроприборов весьма затратно, так как требует тщательного выбора материалов корпуса и микроструктур, подбора соединительных материалов, а также высокого качества их подготовки и особых режимов проведения герметизации. Кроме того, может понадобиться использование газопоглотителей (геттеров) для создания и поддержания вакуума. Естественно, в данном случае речь не идет о газовых сенсорах и других датчиках, которым необходим контакт с внешней средой. Для подвижных механических структур, например акселерометров, гироскопов, микрофонов, ВЧ-переключателей, может потребоваться именно вакуумирование. Оно уменьшает рассеяние колебательной механической энергии в газовой среде, также называемое демпфированием сжатыми газовыми пленками (рис. 3). Соответственно, при вакуумировании увеличивается добротность резонансных механических структур, что важно для многих приложений. Помимо этого, уменьшается содержание влаги в корпусе, что снижает вероятность коррозии материалов,

а также негативного эффекта «залипания» миниатюрных компонентов [5].

На этапе разработки необходима оценка влияния остаточного давления на параметры преобразователя микромеханической системы. Для этого используются программные пакеты конечно-элементного моделирования МЭМС-компонентов. На рис. 4 представлена зависимость добротности от давления, построенная с использованием программного пакета ANSYS [6]. В качестве основных исходных данных при моделировании использовались размеры компонента, величина зазора между подвижной



**Рис. 3.** Схематическое изображение капсулированного объема с геттером



**Рис. 4.** Зависимость добротности  $Q$  микромеханического компонента от давления  $p$  в полулогарифмическом масштабе

структурой и неподвижным основанием, вязкость газа и коэффициент аккомодации поверхности (учитывает взаимодействие молекул газа с поверхностью). В нашем случае размер подвижного компонента составлял  $5,2 \times 5$  мм, зазор – 10 мкм. Результаты моделирования показали удовлетворительную корреляцию с данными, полученными при исследовании характеристик реальных структур. Следует отметить, что подобные модели являются упрощенными. В них не учитывается, например, мода колебаний. Поэтому результаты конечно-элементного

анализа являются приближенными. Тем не менее, предварительные расчеты позволяют оценить диапазон значений давления, оптимальных для работы устройства.

Отдельной задачей является контроль герметичности и остаточного давления в вакуумированных микроприборах. Способы оценки герметичности, применяемые в электронной промышленности, например метод опрессовки, обладают в данном случае недостаточной чувствительностью и могут применяться только для контроля технологического процесса и нахождения грубых течей. Поэтому необходимо выполнять предварительную калибровку микромеханических компонентов и проводить на этапе создания опытных образцов экспериментальные исследования зависимости параметров от давления. Это, во-первых, дает возможность скорректировать требования к рабочему внутрикорпусному давлению, а во-вторых, позволяет определять давление в устройстве после его корпусирования.

### ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ВАКУУМА

Для получения в капсулированном объеме среды с пониженным давлением необходимо проводить герметизацию в условиях вакуума и обеспечивать предварительный нагрев компонентов для удаления остаточных газов с поверхности и объема конструкционных деталей (операция

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 975 руб.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

Под ред. Джерарда К. М. Мейджера

При поддержке ОАО «Авангард»

Перевод с англ. под ред. д. т. н., проф. В.А. Шубарева

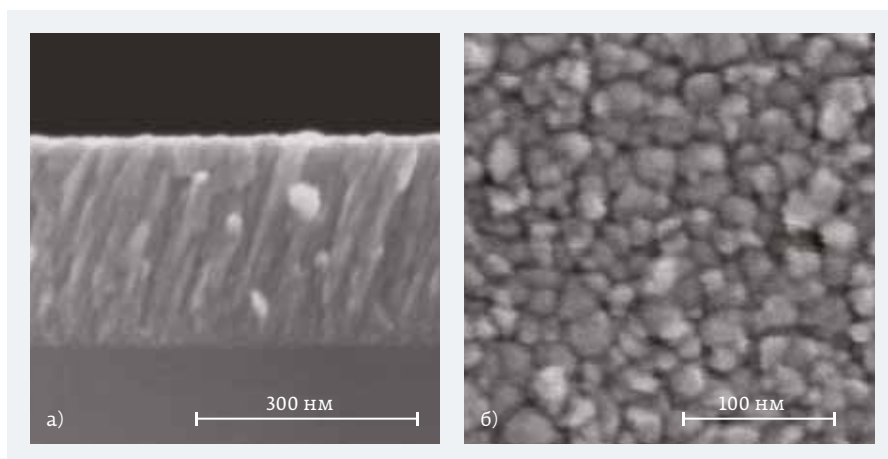
Книга посвящена направлению развития электроники – сенсорике, или, как принято в отечественной терминологии, микросистемотехнике. Содержание книги отражает теоретические и практические достижения в области сенсорики и сенсорных систем, уровень которых позволяет квалифицировать их как интеллектуальные.

Изложенный теоретический и практический материал станет основой для разработчиков микроэлектронной аппаратуры, а также будет полезен преподавателям, аспирантам и студентам технических университетов.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2011. — 464 с.,  
ISBN 978-5-94836-299-1

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)



**Рис. 5.** Изображения пленок  $Ti_{1-x}V_x$  на кремниевой подложке, полученные сканирующей электронной микроскопией [9]: а – торец; б – поверхность

дегазации). Однако выполнение этих условий в технологии микросистемной техники не обеспечивает получения в корпусе среднего и тем более высокого вакуума, а также его поддержания в течение длительного времени. Компоненты микроэлектромеханических систем чаще всего не выдерживают длительного нагрева до температуры выше 300–400 °С, при которой вероятно возникновение термомеханических напряжений. Из-за этого возможности температурной активации в случае микромеханики ограничены. Помимо этого, газы, растворенные в конструкционных материалах, будут диффундировать к поверхности и попадать затем во внутренний объем, что приведет к деградации вакуума. Поэтому для поддержания вакуума в микросистемах используют, как и в случае электровакуумных приборов, газопоглощающие материалы (getterы).

В микросистемной технике хорошо зарекомендовали себя геттерные пленки на основе Ti, Zr, V, Fe и других материалов, формируемые магнетронным или катодным распылением. Пленочные геттеры толщиной несколько микрометров могут быть относительно легко встроены в микромеханические приборы, в том числе с применением интегральных технологий типа «пластина к пластине» [7]. Активирование пленочных геттеров, то есть приведение их в рабочее состояние, может быть совмещено с основными способами соединения конструкционных материалов (табл. 1). Геттеры, изготавливаемые по порошковой технологии, как и распыляемые геттеры, неприменимы в МЭМС из-за больших габаритов и сложности встраивания в корпус.

Основные материалы, используемые для создания газопоглотителей, – это Ti, V и Zr. Применяемые индивидуально или в составе многокомпонентных пленок, они позволяют создавать материалы с температурой активирования от 180 °С [8]. В своих работах мы использовали геттерные пленки  $Ti_{70}V_{30}$  (ат. %), формируемые методом магнетронного

распыления [9]. Данный состав характеризуется относительно низкой температурой активации, от 300 °С, и высоким значением сорбционной емкости. Пленки обладают наноразмерной структурой с размером зерен от нескольких единиц до десятков нанометров (рис. 5а и б).

Наноструктурирование способствует увеличению поверхности межзеренных границ, что, в свою очередь, увеличивает скорость сорбции и удельную сорбционную емкость геттеров. Управление структурой геттерных пленок в случае магнетронного распыления возможно путем варьирования технологическими режимами (температурой подложки, давлением рабочего газа, скоростью напыления), а также углом наклона подложки относительно мишени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бородина И., Бойко А., Мильшина Ю., Вишневский К., Киселева Л., Пучков В.** Микро- и наносистемы становятся все меньше и все «умнее» // Глобальные технологические тренды. Информационный бюллетень, № 9, М.: НИУ ВШЭ, 2017. <https://issek.hse.ru/trendletter/news/208033243.html>.
2. **Nathanson H. C. et al.** The resonant gate transistor // IEEE Transactions on Electron Devices, vol.14, no.3, pp. 117–133, Mar 1967, DOI: 10.1109/T-ED.1967.15912.
3. The MEMS success story: a decade of evolving strategies leading to a bright MEMS future – An interview with Bosch Sensortec, STMicroelectronics and Yole Développement, <https://www.i-micronews.com/the-mems-success-story-a-decade-of-evolving-strategies-leading-to-a-bright-mems-future-an-interview-with-bosch-sensortec-stmicroelectronics-and-yole-developpement/>.
4. Корпуса микроборков. Технические условия ПИЖМ.430114.001.
5. **Тимошенков С. П., Бойко А. Н., Симонов Б. М., Заводян А. В.** Технологии вакуумной герметизации МЭМС // Известия вузов. Электроника, № 1, 2010. С. 11–24.
6. [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
7. **Скупов А.** Вакуумное корпусирование на уровне пластины – геттеры // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, № 5, 2016. С. 54–59.
8. **Benvenuti C., Chiggiato P., Costa Pinto P., Prodromides A., Ruzinov V.** Influence of the Substrate Coating Temperature on the Vacuum Properties of Ti-Zr-V Non-Evaporable Getter Films // Vacuum, Vol. 71, Issues 1–2, 2003, pp. 307–315.
9. **Бойко А. Н., Калмыков Р. М., Гаев Д. С., Сырчин В. К., Тимошенков С. П.** Нераспыляемые геттерные структуры для МЭМС // НАНОИНДУСТРИЯ. Спецвыпуск (74). 2017. С. 561–565.