

УДК 621.791. 313.7

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-47-52

**ТЕХНОЛОГИЯ ВАКУУМНОПЛОТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ  
КОРПУСОВ МИКРОБОЛОМЕТРОВ****А. Э. ВИДРИЦКИЙ***(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск);***д-р техн. наук, проф. В. Л. ЛАНИН***(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

*Приведены характеристики различных конструкций корпусов микроболометров, выбран материал преформы для создания герметичного соединения методом пайки. Представлены характеристики геттерных покрытий и описана их польза при нанесении на внутрикорпусную сторону германиевого окна. Разработан метод создания полностью герметичных корпусов приемников ИК-излучения с германиевыми окнами в условиях вакуума.*

**Ключевые слова:** микроболометр, геттер, герметизация, пайка, германиевое окно, преформа, припой, герметичность.

**Отличительные черты создания вакуумноплотного соединения в процессе герметизации микроболометра.** Матричные микроболометрические фотоприемники (ФПУ), работающие в спектральном диапазоне 8–14 мкм, не требуют охлаждения для своего функционирования и позволяют отказаться от использования дорогих и сложных микрокриогенных систем и специальных криостатов, применяемых для поддержания низкой рабочей температуры современных охлаждаемых фотонных приемников ИК-излучения на основе антимоноида индия, тройного соединения теллурида – кадмия – ртути или многослойных гетероструктур с квантовыми ямами [1].

Микроболометрические ФПУ находят широкое применение в тепловизионных системах ближнего наблюдения для автомобильного, железнодорожного и речного транспорта, системах экологического и противопожарного контроля, автоматической охранной сигнализации, тепловизионных системах наблюдения за электрическими и энергораспределительными сетями, системах контроля технологических процессов на разных производствах, в научных исследованиях и т. д.

Специальное применение микроболометрические ФПУ найдут в системах наблюдения и обеспечения безопасности в антитеррористической деятельности, персонального тепловизионного наблюдения для МЧС, персональных системах наблюдения и мониторинга [2].

Герметизация приемников инфракрасного излучения является одним из ключевых этапов их сборки. Она может осуществляться путем соединения крышки и корпуса в вакууме. Однако уровень достигаемого вакуума может ограничиваться процессами газовой выделенности, в частности, газами, выделяемыми материалами, используемыми в качестве адгезива для крепления кристалла, загрязнениями или остатками атмосферы в глубине керамической структуры. Влага, присутствующая в составе атмосферы подкорпусного объема, негативно воздействует на параметры как интегральных схем в составе микроболометров, так и микромеханических чувствительных элементов. Воздействие влаги вызывает не только разрушение материалов, но и серьезную проблему «склеивания» микроэлементов. Молекулы воды на поверхности микроэлементов действуют как клей, по мере уменьшения размеров компонентов и деталей проблема «склеивания» становится все более важной, а при переходе к наномасштабу – одной из главных.

Герметизация в вакууме не только улучшает работу подвижных чувствительных элементов оборудования, уменьшая газовое демпфирование, но и помогает снизить содержание влаги в корпусе, что может улучшить характеристики и продлить срок службы оборудования. Что касается вакуумной герметизации, то это означает создание герметичной среды, которая поддерживает стабильный уровень вакуума внутри микромеханического устройства на протяжении всего срока его эксплуатации.

Корпуса микроэлектронных устройств должны быть герметичными и предотвращать натекание воздуха больше, чем  $6,7 \cdot 10^{-7}$  мбар · л/с. Это обеспечивает небольшой обмен газами между внутренним пространством корпуса и внешней атмосферой и гарантирует работоспособность устройства на протяжении продолжительного времени при условии отсутствия значительных перепадов давления. Если же разница давлений возрастает, натекание становится больше и может привести к отказу устройства.

Если же для функционирования микроприбора требуется наличие вакуума внутри корпуса, а условия эксплуатации подразумевают перепад давлений, то такой уровень натекания уже неприемлем, так как давление в корпусе микроэлектромеханической системы (МЭМС) возрастет на два-три порядка в течение всего лишь нескольких недель или месяцев [3].

Рисунок 1 демонстрирует конструкцию микроболометрического датчика. Для герметизации таких устройств используется высокий вакуум, который предотвращает попадание газов, образующихся в ходе герметизации, с поверхностей компонентов в подкорпусной объем.

Основание корпуса изготавливается из вакуум-плотной керамики ВК-94-1, диапазон рабочих температур составляет от  $-60$  °С до  $+155$  °С, теплопроводность составляет  $13,4$  Вт/м·К, 36 контактных площадок, 44 выводные площадки, покрытие токопроводящих элементов – химический никель.



Рисунок 1. – Внешний вид корпуса микроболометра

**Выбор типа сплава преформы.** Для гарантирования бесперебойного технологического процесса сборки и общей надежности изделия требуется осуществлять процесс герметизации с применением припоя, у которого разница температур плавления с припоем для крепления кристалла составляет не менее  $70-100$  °С.

Материал для преформы герметизации должен отвечать следующим критериям:

- хорошее смачивание: материал должен легко и равномерно растекаться по поверхности ободка корпуса для создания плотного и однородного шва;
- отсутствие дефектов: в паяном шве не должно быть пустот и трещин, которые могут привести к утечке или коррозии.

В таблице 1 представлены некоторые материалы, применяемые в качестве припоев для герметизации.

Таблица 1. – Материалы, применяемые в качестве припоев для герметизации

Состав материала	Температура плавления °С		Плотность, г/см <sup>3</sup>	Характеристика
	Солидус	Ликвидус		
80In15Pb5Ag	149	154	7,85	Сводит к минимуму выщелачивание золота, обладает хорошими характеристиками термической усталости
70Sn18Pb12In	154	167	7,79	Припой общего назначения с хорошими физическими свойствами
96.5Sn3.5Ag	Эвтектика, 221		7,37	Бесвинцовый высокотемпературный припой, обладает отличными свойствами термической усталости. Не рекомендуется для пайки золота толщиной более 0,5 мкм
81Pb19In	260	275	10,27	Обладает хорошими характеристиками термической усталости, устойчив к коррозии
80Au20Sn	Эвтектика, 280		14,51	Прочный припой с отличной устойчивостью к термической усталости, обладает высокой теплопроводностью

Индиевые сплавы, особенно сплав 80In15Pb5Ag, считаются наиболее подходящими материалами для использования в качестве преформ при герметизации. Этот выбор основан, в том числе, на прочности сплава и его низкой температуре плавления, составляющей  $154$  °С.

Процесс герметизации микроболометра требует предварительной фиксации преформы на основании корпуса. Чтобы предотвратить попадание загрязнений в область паяного шва и улучшить процесс растекания преформы по поверхности золотого покрытия (точки непропая способны вызвать отсутствие герметичности у готового изделия), проведена отмывка преформ в трихлорэтилене и сушка в потоке осушенного азота. Крепление преформы осуществлялось с помощью контактной сварки на установке УС.ИМ-227СК.

**Выбор типа и конструктивного исполнения геттера.** Для поддержания вакуума в подкорпусном объеме микроболометра используются геттеры. Они обеспечивают продолжительное время работы изделия и соответствующие условия эксплуатации. Геттеры – это проверенные технические решения, широко используемые в промышленности.

Требования к давлению для устройств с вакуумом в подкорпусном объеме, таких как микроболометры, акселерометры и др., весьма строгие, т. к. из-за процесса десорбции газа с внутренних элементов устройства, внутренний вакуум имеет свойство снижаться с течением времени и в крайнем случае может привести к отказу устройства. Использование особого геттерного слоя служит значимым методом поддержания и обеспечения функциональности таких устройств. Предыдущие варианты геттерных структур были исполнены в виде отдельного устройства. Наиболее оптимальным вариантом является создание геттерной пленки на внутрикорпусной стороне германиевого окна. Геттер характеризуется способностью улавливать загрязнения, образующиеся из-за процессов газовой выделенности внутри корпуса, и регулировать возможные микротечи, гарантируя этим продолжительный период эксплуатации. Геттер выполнен на базе таких металлов, как цирконий и титан, химический состав был оптимизирован с целью максимального повышения сорбционных свойств и получения материала, применимого для активации в определенных условиях герметизации. Средняя толщина геттерной пленки равняется нескольким микрометрам. Геттер активируется непосредственно в процессе герметизации в вакууме.

Зачастую значительную долю оставшейся атмосферы составляют водяные пары, кислород и азот, однако их плотность не соответствует плотности в обычной атмосфере. Указанные газы не только создают избыточное давление, но и могут негативно сказаться на работоспособности изделий. Эффективность геттера определяют два основных показателя:

- объем газа, который может быть поглощен геттером в течение определенного времени;
- способность геттера улавливать определенные газы.

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 [4].

**Дефекты паяных соединений.** Различные дефекты в паяном шве ослабляют соединение и могут привести к его быстрому разрушению. К основным дефектам паяного соединения германиевого окна с основанием корпуса относятся:

- низкая прочность шва;
- отсутствие галтелей припоя у кромок соединений;
- наплывы или натеки припоя;

Низкая прочность шва вызывается в основном двумя причинами: плохим смачиванием и плохим затеканием припоя. Плохое смачивание припоем поверхности металла происходит вследствие некачественной очистки зоны пайки от жира, оксидной пленки и других загрязнений. При плохом смачивании шов получается непрочным, так как припой свертывается в шарик и не растекается. Отсутствие требуемой прочности паяного шва может привести к его разрушению и разгерметизации готового изделия.

Плохое затекание припоя в зазоры между поверхностями деталей происходит в результате слишком малого или большого зазора между паяемыми деталями, а также перекосов в соединении. При этом зазор заполняется припоем не полностью и шов получается непрочным.

Отсутствие галтели припоя у кромок соединения происходит вследствие недостаточной смачиваемости торцов окна из-за отсутствия металлизации, недостаточного количества припоя, превышения заданной температуры нагрева, а также слишком длительного нагрева зоны пайки. Отсутствие надлежащей галтели снижает прочность соединения. Наплывы или натеки припоя в месте соединения возникают в результате недостаточного нагрева спаиваемых поверхностей. Они также снижают качество шва [5].

**Герметизация.** Герметичность играет критически важную роль в работе устройства, и ее отсутствие может привести к серьезным проблемам. Во многих устройствах требуется вакуум или строго контролируемая атмосфера для обеспечения правильной работы и продления срока службы. Однако в процессе достижения нужного уровня вакуума или определенной чистоты наполнения газом можно столкнуться с проблемами из-за малых размеров этих устройств и большой площади их поверхности относительно объема.

Герметизация оснований корпусов проводится в высоковакуумной печи SST 3150. На рисунке 2 показаны основания корпусов микроболометров, загруженные в установку герметизации.

На основании характеристик припоя, параметров и режимов активации геттера проведена герметизация оснований корпусов микроболометров с активацией геттера. Для герметизации использовано стандартное окно со слоем металлизации под пайку на внутренней стороне.

В таблице 2 представлены технические характеристики печи для герметизации.

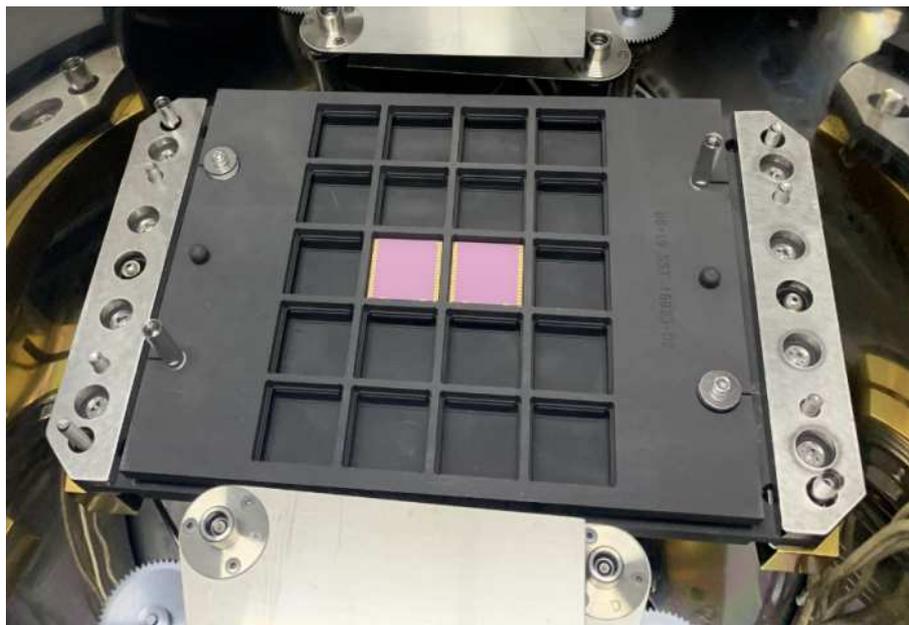


Рисунок 2. – Основания корпусов загруженные в установку герметизации

Таблица 2. – Технические характеристики печи для герметизации

Параметр	Значение параметра	Примечание
Минимальный уровень вакуума, мбар	$1,3 \cdot 10^{-7}$	
Максимальная рабочая температура, °C	500	
Площадь рабочей зоны, см <sup>2</sup>	160	
Номинальная высота рабочей зоны, см	95	Настраиваемая
Метод нагрева	Резистивный	С использованием сменной графитовой оснастки
Используемые газы	Азот	Возможность подачи двух дополнительных газов

На рисунке 3 показана динамика изменения температуры и давления в процессе герметизации: линией 1 отмечена динамика изменения температуры германиевых окон, линией 2 – оснований корпусов с кристаллами, линией 3 – давления.

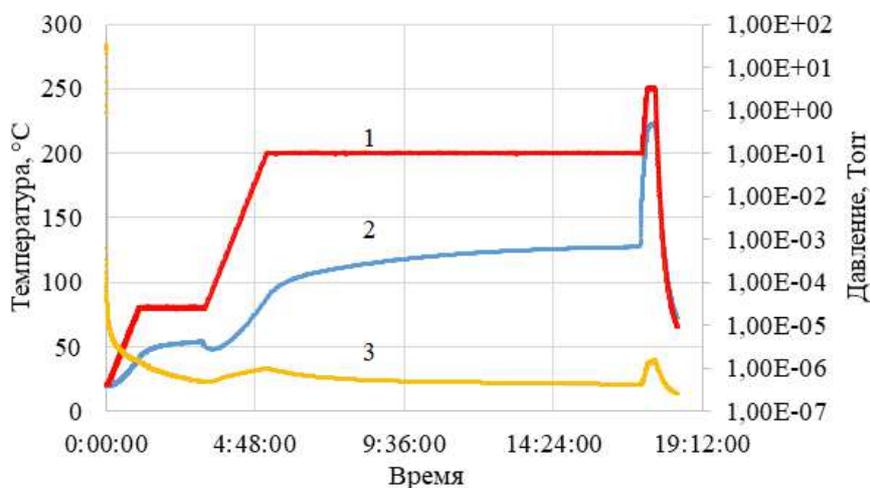


Рисунок 3. – Динамика изменения температуры и давления в процессе герметизации

На рисунке 4 показан внешний вид паяного шва после герметизации.

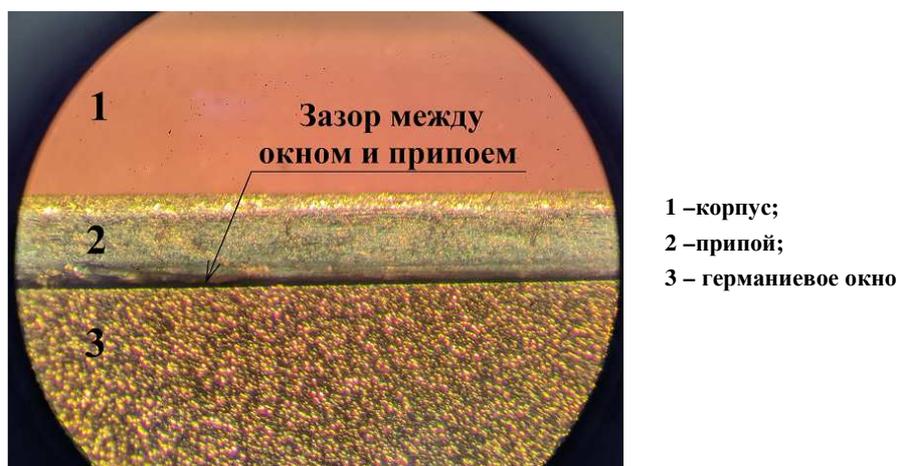


Рисунок 4. – Внешний вид паяного шва после герметизации

На рисунке 5 схематично показано растекание припоя в процессе герметизации.



Рисунок 5. – Схематичное изображение растекания припоя

Как видно из рисунков 4 и 5 материал припоя отлично смачивает ободок основания корпуса, но в то же время не происходит его растекания по боковой стенке германиевого окна, что позволило бы повысить надежность паяного соединения. Для решения этой задачи на установке электронно-лучевого напыления STE EB71M на боковые стенки (торцы) германиевого окна нанесена металлизация Ti/Ni/Au общей толщиной 650 нм и проведен процесс герметизации с применением припоя 80In15Pb5Ag при температуре 230 °С. Внешний вид паяного шва при герметизации корпуса микроболометра схематично показан на рисунке 6.

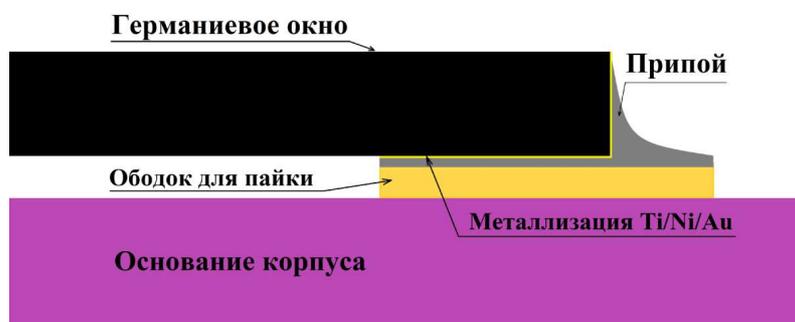


Рисунок 6. – Схематичное изображение растекания припоя с металлизацией на торцах окон

Как видно из рисунка 6, нанесение металлизации на боковую стенку германиевого окна способствует образованию галтели, что в свою очередь повышает прочность паяного соединения и снижает вероятность забракования изделия по герметичности.

После изготовления экспериментальных образцов корпусов микроболометров, загерметизированных в вакууме, проведена оценка качества герметизации по следующим критериям:

- смещение окна относительно основания корпуса не более 50 мкм;
- внешний вид паяного шва на отсутствие утяжек и выплеска припоя;
- оценка качества паяного шва с помощью УЗ-микроскопа и рентгена;
- оценка герметичности (не более  $10^{-7}$  мбар · л/сек).

Для подтверждения устойчивости паяного шва к воздействию внешних температурных факторов проведена операция «температурное циклирование» для трех герметичных образцов в следующих режимах:  $T = +105^{\circ}\text{C}$ ,  $-65^{\circ}\text{C}$ , 10 циклов по 15 мин. Повторная проверка показала, что герметичность не утрачена.

**Заключение.** Паяный шов экспериментального образца однородный и не имеет пор, всплесков припоя, подтеков. Нанесение металлизации на боковую стенку германиевого окна способствует образованию галтели, что в свою очередь повышает прочность паяного соединения и снижает вероятность забракования изделия по герметичности. Результаты проведения оценки скорости натекания положительные (от  $1,5 \cdot 10^{-10}$  до  $2,9 \cdot 10^{-10}$  мбар · л/с), что соответствует установленным требованиям. Разработанную технологию целесообразно применять при герметизации электронных модулей приемников инфракрасного излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ovsyuk V., Shashkin V., Demyanenko M. et al. Uncooled microbolometer IR FPA on sol-gel VOx // Proc. of SPIE. – 2005. – Vol. 5834. – P. 47–54. – DOI: [10.1117/12.628663](https://doi.org/10.1117/12.628663).
2. Чистохин И. Б., Демьяненко М. А. Определение тепловых параметров микроболометров из электрических измерений // Прикладная физика. – 2006. – № 1. – С. 91–95.
3. Тимошенко С. П., Бойко А. Н., Симонов Б. М. и др. Технологии вакуумной герметизации МЭМС // Изв. вузов. Электроника, 2010. – № 1(81). – С. 11–23.
4. Скупов А. Вакуумное корпусирование на уровне пластины – геттеры // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2016. – № 5. – С. 54–59.
5. Джуринский К., Либеров Б. Дефекты пайки коаксиальных радиочастотных компонентов в корпуса изделий и способы их устранения // Технологии в электронной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 43–46.

#### REFERENCES

1. Ovsyuk, V. Shashkin, V., Demyanenko, M., Fomin, B., Vasil'ieva, L., & Soloviev, A. (2005). Uncooled microbolometer IR FPA based on sol-gel VOx. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, (5834), 47–54. DOI: [10.1117/12.628663](https://doi.org/10.1117/12.628663).
2. Chistohin I. B., Dem'yanenko M. A. (2006). Opredelenie teplovykh parametrov mikrobolometrov iz jelektricheskikh izmerenij [Determination of Thermal Parameters of Microbolometers from Electrical Measurements]. *Prikladnaja fizika [Applied Physics]*, (1), 91–95. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Timoshenkov, S. P., Bojko, A. N., Simonov, B. M., & Zavodjan, A. V. (2010). Tehnologii vakuumnoj germetizacii MjeMS. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Jelektronika [Proceedings of Universities. Electronics]*, 1(81), 11–23. (In Russ.).
4. Skupov, A. (2016). Vakuumnoe korpusirovanie na urovne plastiny – gettery [Vacuum Wafer Level Packaging: The Getters]. *Jelektronika: Nauka, tehnologija, biznes*, (5), 54–59. (In Russ.).
5. Dzhurinskij, K., & Liberov, B. (2016). Defekty pajki koaksial'nyh radiochastotnykh komponentov v korpusa izdelij i sposoby ih ustraneniya. *Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti*, (1), 43–46. (In Russ.).

Поступила 18.12.2023

#### TECHNOLOGY OF VACUUM TIGHT SEALING OF MICROBOLOMETER PACKAGE

**A. VIDRITSKY**

(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk);

**V. LANIN**

(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

*The features of the design of micro bolometer packages are considered, the choice of preform material for sealing the package with a soldered seam is made. The characteristics of getter films and the advantages of applying them to the reverse side of a germanium window are presented. A technique for vacuum-tight sealing of micro bolometer packages with germanium windows has been developed.*

**Keywords:** microbolometer, getter, sealing, soldering, germanium window, preform, solder, tightness.