

# Вакуумплотная герметизация микроболометров

А. Видрицкий<sup>1</sup>, В. Ланин, д. т. н.<sup>2</sup>

УДК 621.791.313.7 | ВАК 05.27.06

Устройства с использованием тепловизоров позволяют осуществлять наблюдение в условиях плохой видимости, обнаруживать скрытые объекты, вести целеуказание. Они используются в системах технического зрения, для обеспечения безопасности авиа- и судовождения, контроля и охраны любых объектов. МЧС применяет такие устройства при спасательных работах во время ликвидации пожаров, для определения наиболее опасных участков с высокой температурой и пр.

Большинство тепловизоров состоит из стандартного набора узлов (рис. 1), среди которых одним из наиболее ответственных является чувствительный элемент – микроболометр. Основная задача, которая решалась в данной работе, состояла в разработке технологии герметизации микроболометров, а главной ее сложностью стало создание и поддержание вакуума определенной величины в подкорпусном объеме микросборки микроболометра.

**И**звестные преимущества инфракрасной техники по сравнению с оптическими, радиотехническими и радиолокационными системами привели в последнее десятилетие к значительному расширению применения ИК-систем и приборов в науке, технике, промышленности и в военном деле. Современная инфракрасная техника обладает внушительным арсеналом разнообразных средств, отличающихся как областью применения, так и особенностями конструкции.

Производство инфракрасной техники, приборов и систем в развитых странах достигло огромных размеров и превратилось в самостоятельные отрасли промышленности. Объем затрат на создание и выпуск ИК-приборов только военного назначения исчисляется миллиардами долларов в год. Сотни электронных, космических, машиностроительных, авиационных, химических и других концернов и фирм работают в этом направлении.

Одной из важнейших операций технологического цикла сборки приемников ИК-излучения является герметизация.

Микроболометры содержат чувствительные элементы, на работу которых оказывает влияние газовое демпфирование. Вакуумная герметизация таких приборов способствует увеличению их чувствительности и стабильности параметров.

На раннем этапе изготовления микроболометров в основании корпуса предусматривалось наличие откачной трубки (рис. 2а), с помощью которой производится



Рис. 1. Устройство тепловизора

<sup>1</sup> ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ведущий инженер, Avidritskiy@integral.by.

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, профессор, Vlanin@bsuir.by.

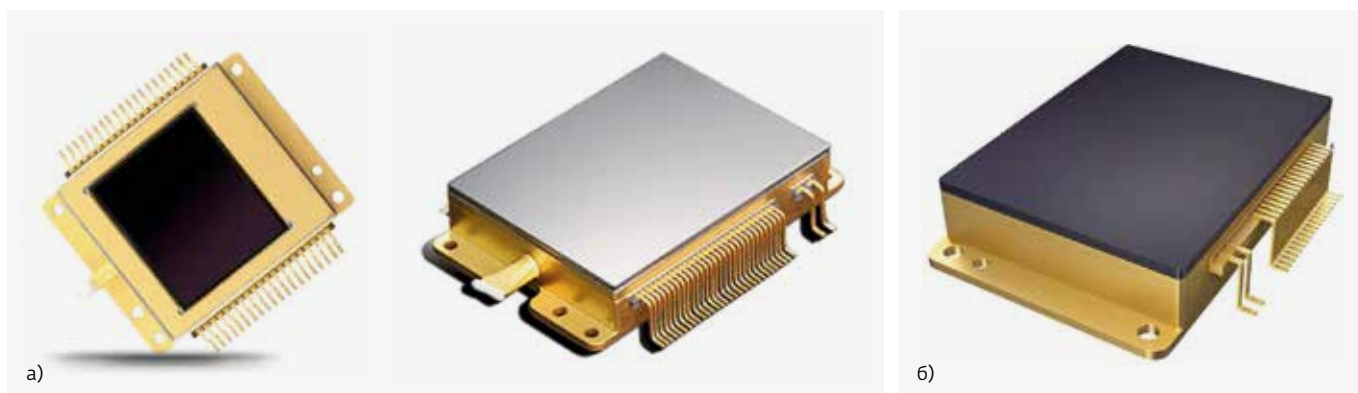


Рис. 2. Корпуса микроболометра с откачной трубкой (а) и без нее (б)

дегазация микрообъема и затем герметизация заделкой откачной трубки, которая может быть осуществлена пайкой, лазерной сваркой, напылением металла на откачное отверстие.

В настоящее время герметизация корпусов микроболометров проводится на специализированном технологическом оборудовании, благодаря которому отсутствует необходимость наличия откачной трубки в основании корпуса. Корпус микроболометра без откачной трубки представлен на рис. 2б. Герметизация таких корпусов проводится в высоком вакууме, что позволяет исключить попадание выделяющихся в процессе герметизации газов с поверхностей деталей в микрообъем корпуса.

### ОСОБЕННОСТИ ГЕРМЕТИЗАЦИИ КОРПУСОВ МИКРОБОЛОМЕТРОВ

Герметизация микрообъема может осуществляться непосредственно соединением крышки и основания корпуса

в вакууме, однако уровень вакуума ограничивается в этом случае процессами газовой выделением. «Газиты» могут материалы, используемые в качестве адгезивов для монтажа кристалла, загрязнения и остатки атмосферы в глубоких слоях керамики (корпуса). Влага, присутствующая в составе атмосферы подкорпусного объема, негативно воздействует на параметры как интегральных схем в составе микроболометров, так и микромеханических чувствительных элементов. Воздействие влаги является причиной не только деградации материалов, но и существенной проблемы «залипания» микроэлементов. Молекулы воды на поверхности могут играть роль клея, а в микромире сила взаимодействия контактирующих поверхностей сравнима с силой, управляющей подвижными элементами. С уменьшением размеров элементов и деталей миниатюрных приборов проблема «залипания» становится всё более актуальной, а при переходе в область наноразмеров – одной из основных.

Таблица 1. Основные параметры соединений, формируемых с помощью различных технологий герметизации [1]

Параметр	Технология формирования соединения				
	Анодное соединение	Низкотемпературное прямое соединение	Эвтектическое соединение	Пайка припоями	Соединение стеклянной фриттой
Температура, °С	400	200–400	>280	120–300	430–600
Прочность соединения	Высокая	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Размеры области применения	>20 мкм	>30% поверхности	>60 мкм	>100 мкм	>250 мкм
Топографическая норма	50 нм	–	<1 мкм	<3 мкм	<2 мкм
Интеграция геттера	Возможна	Ограничена	Возможна	Возможна	Возможна
Натекание	Низкое	–	Очень низкое	Очень низкое	Низкое

Вакуумная герметизация позволяет не только уменьшить влияние газового демпфирования на параметры подвижных чувствительных элементов, но и добиться существенного снижения содержания влаги в корпусе. Под вакуумной герметизацией, называемой в англоязычной литературе vacuum packaging или fully hermetic packaging, понимают герметизацию, обеспечивающую сохранение заданного уровня вакуума внутри корпуса микромеханического прибора в течение срока хранения и эксплуатации.

Согласно требованиям к корпусам микросборок, вакуумплотным считается корпус, натекание в который не превышает  $5 \cdot 10^{-7}$  мбар л/с. При таком уровне натекания обеспечивается незначительный газообмен между подкорпусной газовой средой и атмосферой, гарантируется работоспособность прибора в течение длительного времени, но только при отсутствии значительного перепада давлений. 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 МЭМС возрастет на два-три порядка в течение всего лишь нескольких недель или месяцев.

Современные производства используют различные технологии герметизации – соединения крышки корпуса с его основанием; основные параметры этих соединений представлены в табл. 1.

В процессе работы была выбрана технология герметизации пайкой. Выбор обусловлен относительно невысокой температурой плавления используемого припоя, отличными показателями герметичности и ожидаемой высокой воспроизводимостью процесса.

## ВЫБОР ОКНА (КРЫШКИ) КОРПУСА

На сегодняшний день в качестве ИК-пропускающих окон для сборки корпусов микроболометрических матриц используются преимущественно окна из кремния и германия.

**Кремниевое окно.** Обычно монокристалл кремния используется для изготовления ИК-оптики в спектральном диапазоне от 3 до 5 мкм, а также подложек для производства лазерных зеркал. Спектр пропускания монокристаллического кремния приведен на рис. 3. Лазерные зеркала на кремниевой подложке легкие и обладают хорошей теплопроводностью. Но фактически монокристалл кремния может использоваться в ИК-оптике в области спектра от 1,2 до 20 мкм и более. Конкретная спектральная характеристика пропускания монокристаллического кремния зависит от типа проводимости, сопротивления и технологии изготовления материала.

Монокристаллический кремний выращивается методом Чохральского и содержит некоторое количество



Рис. 3. Спектр пропускания монокристаллического кремния

кислорода, в спектре которого имеются полосы поглощения при длине волн 5,8, 9,1 и 19,4 мкм. Кремний, выращенный методом зонной плавки, более чистый, чем полученный методом Чохральского. Такой материал имеет слабо выраженные полосы кислородного поглощения.

В общем случае оптический кремний является слабо легированным материалом (удельное сопротивление от 5 до 40 Ом·см), что обеспечивает наилучшую прозрачность в диапазоне выше 10 мкм. Высокоомный кремний имеет длинноволновую полосу пропускания в диапазоне 30–100 мкм.

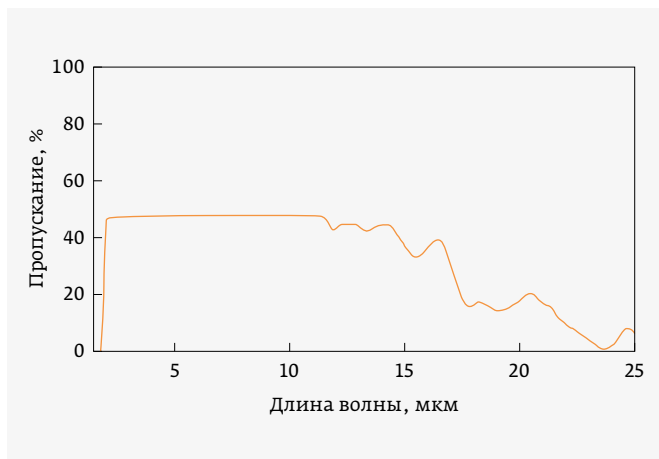
Данные свойства кремниевого окна не удовлетворяют требованиям технического задания на изготовление микроболометров с заданными характеристиками.

**Германиевое окно.** Самым распространенным материалом для изготовления объективов тепловизионных приборов является монокристаллический германий.

Германий – металл с полупроводниковыми свойствами. Оптические и электрические свойства германия зависят от степени легирования и вида кристаллической структуры. Германий сверхвысокой чистоты (ГМО) используется в изготовлении инфракрасной оптики. Спектральная полоса пропускания ГМО находится в диапазоне от 1,8 до 23 мкм (рис. 4).

Благодаря прозрачности германия в диапазоне 8–14 мкм оптика из монокристалла Ge широко используется в оптических системах для тепловидения. Также из монокристаллического оптического Ge изготавливают подложки для светофильтров ИК-диапазона. Оптика из Ge используется в CO<sub>2</sub>-лазерах.

Монокристаллический германий удовлетворяет заданным характеристикам и является предпочтительным материалом при производстве микроболометров.



**Рис. 4.** Спектр пропускания монокристаллического германия

**Просветляющие покрытия.** ГМО – оптический материал с высоким показателем преломления ( $n=4,1-4,0$  в зависимости от длины волны излучения). Френелевский коэффициент отражения от одной полированной грани равен 0,36, поэтому из германия изготавливают светоделители с пропусканием оптической детали порядка 50% без нанесения светоделительного покрытия. С другой стороны, высокий коэффициент отражения от полированной поверхности оптики из германия требует использования антибликового (просветляющего) покрытия.

Для уменьшения коэффициента отражения от поверхности германия используются широкополосные просветляющие покрытия: как традиционные инфракрасные просветляющие покрытия, так и однослойное алмазоподобное просветляющее покрытие из твердого углерода с показателем преломления  $n=2,0$ . Алмазоподобное покрытие наносится по специальной технологии. Это покрытие называется DLC (Diamond Like Coating). DLC-покрытие сочетает просветляющие качества с хорошими защитными свойствами от воздействия внешней среды и обладает очень высокой абразивной износостойкостью.

Основным просветляющим покрытием для ГМО является ZnS, а на сегодняшний день и другие материалы.

## ГЕТТЕР

Требования к подкорпусному давлению вакуумных устройств, таких как гироскопы, акселерометры, микроболометры и цифровые зеркала, очень жесткие (табл. 2).

Из-за явлений десорбции газов с внутренних поверхностей деталей вакуум внутри таких устройств имеет тенденцию ухудшаться со временем и, в худшем случае, может повлиять на правильную работу устройства.

Для поддержания вакуума внутри корпуса микроболометра, обеспечения длительного срока службы и надлежащих условий эксплуатации технически проверенными и промышленно хорошо реализуемыми решениями являются геттеры.

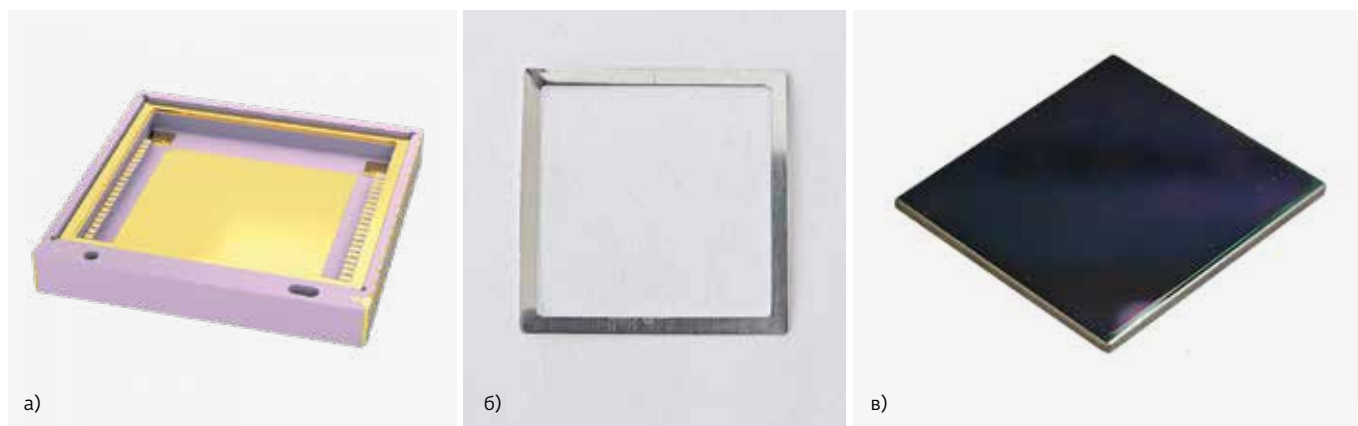
Прежние конструкции геттера были исполнены как отдельное устройство в виде резистора в подкорпусном объеме; активация геттера проводилась путем подачи на него напряжения 15 В. Более технологичным решением стало формирование пленки геттера на внутренней стороне германиевого окна в процессе его изготовления. Типичная толщина геттерных пленок составляет несколько микрон.

Геттеры позволяют решить проблему сохранения стабильного давления внутри герметично корпусированных микроболометров, МЭМС, МОЭМС и прочих устройств микроэлектроники. Этот результат достигается за счет надежного химического связывания молекул газов, составляющих основную часть остаточной атмосферы. Кроме того, в ряде применений геттеры могут быть полезны с точки зрения удаления определенных компонентов атмосферы. Геттеры также обладают свойством адсорбировать загрязнения, возникающие в результате газовой выделенности на внутренних поверхностях, и, в некоторой степени, управлять возможными микротечками, обеспечивая тем самым надлежащий срок службы изделия.

Эффективность любого геттера характеризуют два наиболее важных параметра: сорбционная емкость – количество газа, которое может быть им поглощено за единицу времени, и избирательность – виды газов, по отношению к которым геттер проявляет активность. При

**Таблица 2.** Уровни вакуума, требуемые для работы различных устройств

Тип прибора	Требуемое давление, Па	Уровень вакуума
Микроболометр	$<10^{-2}$	Высокий
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
Туннельные приборы	$<10^{-1}$	Высокий



**Рис. 5.** Некоторые комплектующие для изготовления микроболметра: а – основание корпуса; б – преформа для герметизации из материала 80In15Pb5Ag; в – германиевое окно

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

Для решения поставленной задачи был выбран геттер ST707. Он состоит из специального сплава на основе Zr, химический состав которого был оптимизирован для достижения максимальных сорбционных характеристик и получения материала, пригодного для активизации в конкретных условиях герметизации или склеивания. Основными газами, которые могут быть поглощены пленкой выбранного геттера, являются  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$  и  $O_2$ . Перечисленные газы не только увеличивают давление в герметичном объеме, но также могут вызвать негативные последствия для функциональности устройств.

Геттер активируется в процессе герметизации.

## КОНСТРУКЦИЯ МИКРОБОЛОМЕТРА

Разработанная конструкция крышки микроболметра представляет собой германиевое окно с антиотражающим покрытием на лицевой стороне и пленкой геттера на обратной (за исключением мест над активной зоной пикселей). По краю окна на внутренней стороне нанесена металлизация Ti/Ni/Au для пайки к ободку основания корпуса в процессе герметизации.

Конструкция разработанного микроболметра состоит из следующих комплектующих:

- основание корпуса (рис. 5а);
- преформа из припоя для монтажа кристалла;
- кристалл – приемник ИК-излучения;
- преформа из припоя для герметизации (рис. 5б),
- германиевое окно, оно же выступает в роли крышки корпуса (рис. 5в).

На рис. 5 показаны некоторые комплектующие для изготовления микроболметра.

## ПРЕФОРМЫ ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ КОРПУСА

Современным решением является нанесение припоя в виде преформ. Преформы представляют собой отформованный припой, высеченный штамповкой с жесткими допусками, чтобы обеспечить точный объем припоя и высокую повторяемость технологического процесса. Для того чтобы обеспечить технологический процесс сборки и надежность изделия в целом, процесс герметизации необходимо проводить с использованием припоя, имеющего разницу температур плавления с припоем для монтажа кристалла не менее 70–100 °С. Характеристики материала преформ для герметизации должны учитывать следующие требования:

- обеспечение смачиваемости поверхности ободка корпуса материалом преформы;
- отсутствие пустот, микротрещин в паяном шве.

Кроме того, при выборе материалов, используемых в качестве промежуточных слоев, таких как преформы, необходимо учитывать следующие параметры:

- прочность на разрыв;
- сопротивление сдвигу;
- усталостная прочность;
- вязкость разрушения (сопротивление развитию трещин);
- коэффициент термического расширения;
- теплопроводность;
- возможности дегазации;
- стоимость [2].

Наиболее оптимальными материалами в качестве преформ для герметизации являются индиевые сплавы, в частности, сплав 80In15Pb5Ag. Выбор этого материала для изготовления преформ при производстве микроболметров



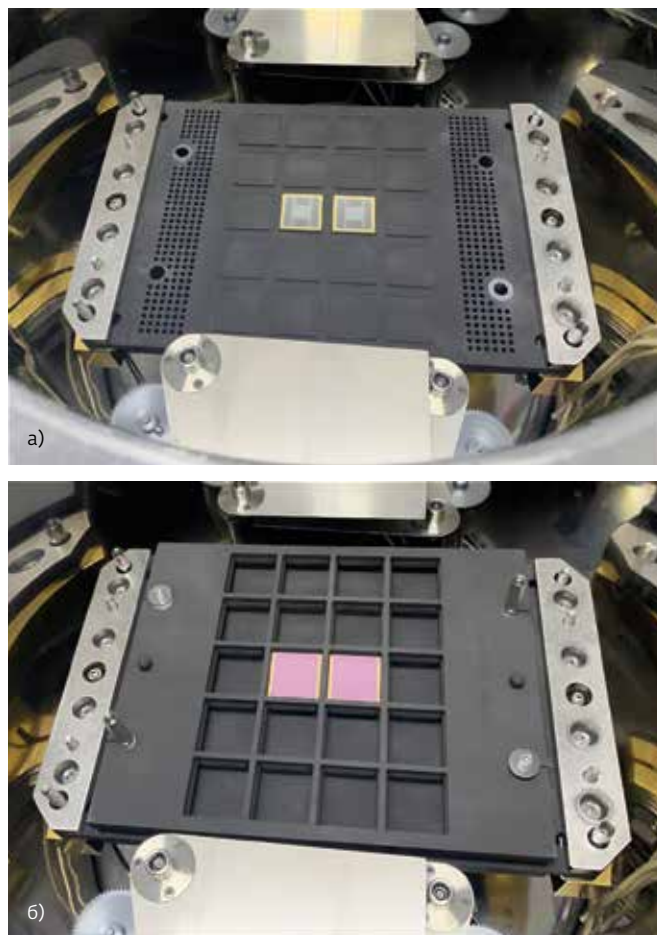
**Рис. 6.** Высоковакуумная печь герметизации модели 3150 SST International

обусловлен, в том числе, прочностными характеристиками сплава и низкой температурой плавления (154 °С).

**ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСА МИКРОБОЛОМЕТРА**

Герметизация является ключевой технической задачей, поскольку многие устройства требуют вакуума или хорошо контролируемой атмосферы для правильной работы и увеличения срока службы. Основные проблемы в достижении подходящего уровня вакуума или соответствующей чистоты газового наполнения связаны с малым объемом устройств этого типа и высоким отношением поверхности к объему.

Процесс герметизации корпуса микроболометра предусматривает предварительное закрепление



**Рис. 7.** Технологическая оснастка для герметизации микроболометров в вакууме: а – оснастка для загрузки германиевых стекол; б – оснастка для загрузки оснований корпусов

преформы на ободке основания. Для предотвращения внесения загрязнений в паяный шов, а также с целью улучшения растекания преформы по золотому покрытию (точки непропая могут быть причиной отсутствия

ООО «АК Микротех»

Комплексные решения в области микроэлектронного и микросборочного производства  
 Поставка, наладка и ремонт технологического оборудования  
 Отработка и постановка технологических процессов  
 Обеспечение материалами и комплектующими

WWW.AKMICROTECH.RU +7 (499) 398 0770 SALES@AKMICROTECH.RU

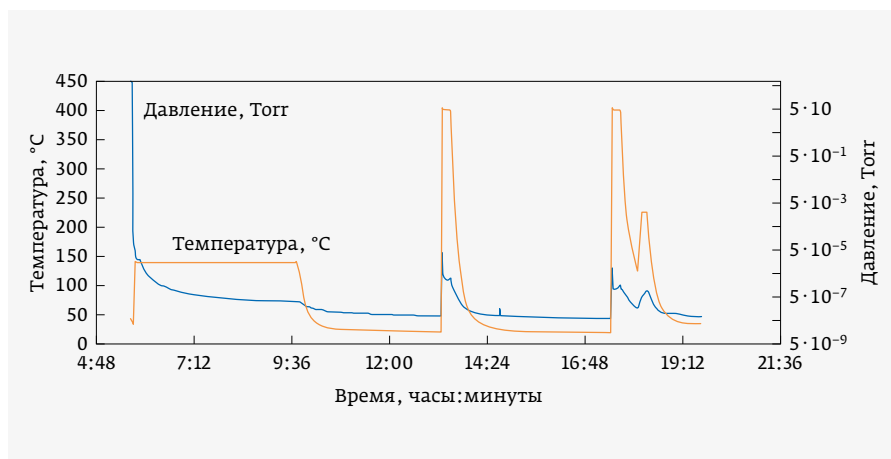


Рис. 8. Температурный профиль герметизации

герметичности готового изделия) разработана методика подготовки преформы перед присоединением ее к ободку основания корпуса, которая включает обработку в растворе соляной кислоты, отмывку в деионизованной воде, обезжиривание в трихлорэтилене и сушку в атмосфере азота. Крепление преформы проводилось контактной сваркой на универсальном комплексе УС.ИМ-227СК.

Для герметизации оснований корпусов в высоковакуумной печи герметизации модели 3150 SST International (рис. 6) разработана и изготовлена специальная графитовая оснастка (рис. 7).

На основании имеющейся информации о характеристиках припоя для герметизации, температуре активации геттера и требований к вакууму в подкорпусном объеме разработана программа и проведена герметизация микроболометров с одновременным проведением активации геттера при температуре 400 °С. Для более полного удаления защитных оксидов с поверхности геттера и адсорбции их в его объеме процесс активации проводился в две стадии по 12 мин. Факт активации геттера проверен по изменению уровня давления в рабочей камере печи: в момент активации защитная пленка испаряется с поверхности и частично попадает в рабочую камеру, повышая в ней давление.

Конструкция печи позволяет проводить отжиг германиевых окон с нанесенным геттером без теплового воздействия на основания корпусов.

На рис. 8 приведен температурный профиль герметизации.

После получения экспериментальных образцов корпусов микроболометров (рис. 9а), загерметизированных в вакууме по разработанной программе процесса, проведена оценка качества герметизации и получены следующие результаты:

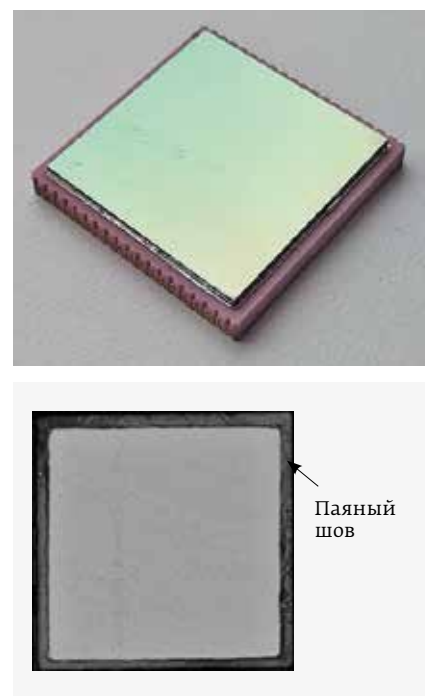


Рис. 9. Загерметизированный корпус микроболометра: а – вид на окно; б – результат ультразвукового контроля паяного шва «стекло – ободок основания корпуса»

- смещение окна относительно основания корпуса не более 50 мкм,
- паяный шов экспериментального образца однородный и не имеет пор, всплесков припоя, подтеков.

На рис. 9 изображены результаты контроля паяного шва «стекло – ободок основания корпуса» загерметизированного экспериментального образца корпуса микросборки микроболометра.

В ходе дальнейших работ по теме необходимо разработать и адаптировать аналитические методы для контроля качества после вакуумной герметизации и проверки надежности герметичного паяного соединения, которые чрезвычайно важны для общей оценки качества устройства, срока службы и производительности производственного процесса [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Скупов А.** Вакуумное корпусирование на уровне пластины – геттеры // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 5. С. 54–59.
2. **Тимошенков С. П., Бойко А. Н, Симонов Б. М.** Технологии вакуумной герметизации МЭМС // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 1. С. 11–23.
3. **Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А. Г.** Микроэлектромеханические системы. Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. 171 с.



# ЭЛЕКТРО

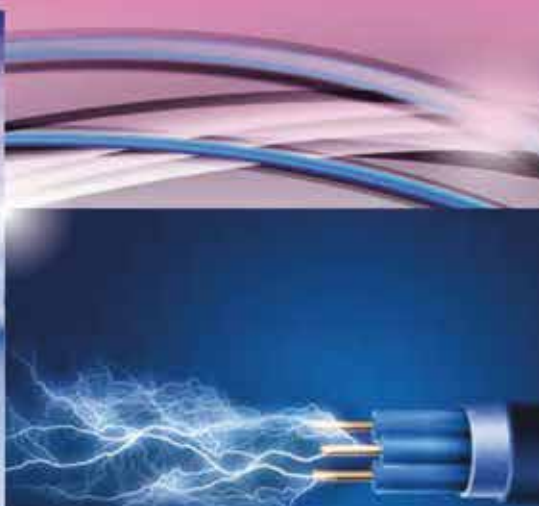
МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



31-я международная выставка  
«Электрооборудование. Светотехника.  
Автоматизация зданий и сооружений»

## 6–9 ИЮНЯ 2023

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР» • WWW.ELEKTRO-EXPO.RU



**ЭЛЕКТРО  
МАРКЕТ**  
ВАЖНЫЕ СВЯЗИ  
ДЛЯ ВАЖНЫХ ДЕЛ



**ЭЛЕКТРО  
ОБЩЕНИЕ**  
РАЗГОВОРЫ  
С ТОЛКОМ



**ЭЛЕКТРО  
НАВЫКИ**  
ПРОКАЧАЙ НАВЫКИ  
И КОМПЕТЕНЦИИ

Присоединяйтесь!  
Сканируйте QR-код и переходите на сайт выставки



12+

 **ЭКСПОЦЕНТР**

Реклама