

УДК 621.315.59

PACS: 85.60.-q

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-522-529

EDN: EZDQMP



Исследование профиля краевой металлизации оптически прозрачных окон, формируемого методом магнетронного напыления

А. В. Трухачев, К. О. Болтарь, Н. Г. Мансветов, М. В. Седнев, Н. С. Трухачева, Е. Н. Зубкова, Н. В. Прахов

Исследуется процесс формирования краевой металлизации на входных окнах (германиевых, кремниевых и других дисках), используемых для ввода принимаемого светового потока фотоприемником, находящимся в защитном герметичном корпусе. В работе представлены результаты экспериментального исследования зависимости профиля краевой металлизации Ge дисков, формируемого магнетронным напылением, от конструктивных параметров загрузочного устройства. Представлены варианты конструкций загрузочных устройств. Экспериментально показано влияние толщины на профили краевой металлизации элементов конструкции загрузочного устройства, маскирующих диски при напылении.

Ключевые слова: Ge диски (входные окна) – оптически прозрачный элемент, конструкция фотоприемника, магнетронное напыление, Au, Ni, Mo, устройство для формирования краевой металлизации.

Введение

В конструкции корпуса фотоприемника функционально необходимо входное окно [1–3], которое изготавливают из оптически прозрачных [4], в том числе в ИК-диапазоне, материалов: германий, кремний, сапфир и др. Для уменьшения потерь на отражение принимаемого светового потока формируют напылением антиотражающее покрытие (АОП) с

двух сторон входного окна в центральной области, размер которой определен оптической схемой использования фотоприемника, рис. 1.

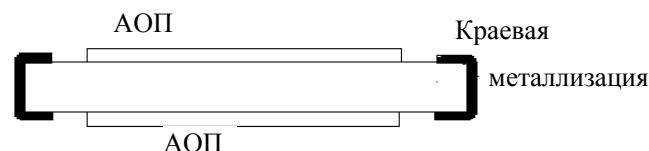


Рис. 1. Оптически прозрачный элемент с АОП и краевой металлизацией в разрезе

Герметичное соединение металлического корпуса и входного окна, как правило, (смотри таблицу 1) выполняют пайкой. Для выполнения этой операции необходимо наличие краевой металлизации на поверхности входного окна (оптически прозрачного элемента), предназначенной для формирования пайкой герметичного шва между металлическим корпусом и краевой металлизацией оптически-прозрачного элемента. Как видно из рисунка 1 краевая металлизация образует связную область по периметру входного окна и формируется на трех поверхностях оптически-прозрачного элемента: нижней, верхней и боковой.

Трухачев Антон Владимирович, инженер-технолог 1 кат.
E-mail: orionmoscow@mail.ru

Болтарь Константин Олегович, нач. НТК, д.ф.-м.н.

Мансветов Николай Георгиевич, гл. специалист.

Седнев Михаил Васильевич, нач. участка, к.т.н.

Трухачева Наталия Сергеевна, инженер-технолог 2 кат.

Зубкова Елена Николаевна, инженер-технолог 1 кат.

Прахов Никита Викторович, инженер 1 кат.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 16.11.2023

После доработки 28.11.2023

Принята к публикации 7.12.2023

© Трухачев А. В., Болтарь К. О., Мансветов Н. Г.,
Седнев М. В., Трухачева Н. С., Зубкова Е. Н.,
Прахов Н. В., 2023

Таблица 1

Способы герметизации входных окон фотоприемников

Способ соединения	Недостатки	Следствие
Клеевое соединение	Газовыделение	Не обеспечивает работоспособность при длительном хранении и повышенной температуре
Холодная сварка	1. Необходимость применения высоких давлений. 2. Необходимость формирования краевой металлизации	1. Германиевые диски не выдерживают - разрушаются. 2. Разработка оснастки для создания краевой металлизации
Пайка	Необходимость формирования краевой металлизации	Разработка оснастки для создания краевой металлизации

Герметичность соединения краевой металлизации и оптически прозрачного элемента обеспечивается технологией обработки поверхности последнего и способом формирования металлических слоев на нем. Технология обработки верхней и нижней поверхностей определена требованиями к оптическим элементам конструкции фотоприемника, поэтому шероховатость этих поверхностей не превышает $R_z = 0,05$ мкм, тогда как шероховатость боковой поверхности не влияет на оптические характеристики входного окна и может значительно превышать значения $R_z = 1,0$ мкм, что существенно упрощает технологию обработки боковой поверхности, но накладывает требование на толщину краевой металлизации, которая должна быть больше величины шероховатости боковой поверхности.

Существуют различные способы формирования краевой металлизации [5–7], включающие вакуумное напыление металлического покрытия, в том числе в сочетании с жидкостным гальваническим осаждением толстого слоя, пригодного для пайки, металла на поверхность напыленного металлического покрытия. Метод магнетронного распыления является предпочтительным для формирования металлизации геометрически сложных поверхностей. Высокая энергия осаждаемых атомов при распылении мишени по сравнению с термическим испарением навески способствует увеличению адгезии и позволяет получить покрытие с более высокой плотностью и однородностью.

Необходимость защиты поверхности антиотражающего покрытия в процессе напыления краевой металлизации вынуждает исполь-

зовать в конструкции загрузочного устройства маскирующий элемент, касающийся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП. Высота этого элемента может существенно влиять на толщину краевой металлизации.

Оборудование, техника выполнения

Процесс формирования краевой металлизации осуществляли на установке магнетронного распыления, укомплектованной тремя магнетронами с распыляемыми мишенями диаметром 76 мм и станцией высокочастотного катодного распыления, предназначенной для очистки ионами аргона пластин, закрепленных в загрузочном устройстве. Последовательное напыление металлических слоев обеспечено возможностью перемещения магнетронов относительно станции очистки, но без вращения последней относительно магнетронов. В исследовании использовали один из возможных вариантов металлизации из молибдена, никеля и золота (Mo/Ni/Au). Эта комбинация материалов обеспечивает высокую адгезию с поверхностью диска, достаточную толщину и пассивацию никеля слоем золота на время межоперационного хранения перед пайкой. Распределение толщины слоя металла напыленного на пластину диаметром 76 мм имеет осевую симметрию. Толщина слоя уменьшается на 25–30 % от значения в центре.

Измерения профилей поверхности дисков до и после напыления выполняли контактным профилометром [8] с погрешностью не более 10 нм.

Для выявления зависимости профиля краевой металлизации Ge дисков от геометрии загрузочного устройства при проведении работ было использовано два вида загрузочных устройств. Их фотографии представлены в таблице 2. Конструкции устройств похожи, но имеют значительные различия: на правом фото представлено загрузочное устройство с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 1 мм и сплошным сепаратором, а на левом – касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 100 мкм, и игольчатым сепаратором. Игольчатый и сплошной сепараторы обеспечивают фиксированное положение дисков в загрузочном устройстве. Игольчатый сепаратор касается вертикальных поверхностей дисков в трех точках, что позволяет исключить маскирование части боковой поверхности дисков при напылении со сплошным сепаратором. Суммарная высота маскирующих элементов,

определяющая расстояние между загружаемыми Ge дисками и удерживающими нитями, обеспечивается соединением лазерной сваркой дисков с убывающим размером диаметра. Самая нижняя пластина маскирующего элемента выполняется из нержавеющей стали толщиной 0,1–0,2 мм в форме кольца, наружный диаметр которого определяет положение края металлизации, а внутренний границу касания маскирующим элементом поверхности загружаемых Ge дисков.

Для выравнивания толщины слоев на дисках процесс формирования краевой металлизации осуществлялся последовательно в два этапа: 1 этап – напыление трехслойного покрытия в исходной позиции, разгерметизация камеры, освобождение дисков удалением маскирующего элемента конструкции загрузочного устройства, поворот дисков на 180° вокруг своей оси, закрепление дисков маскирующим элементом; 2 этап – повторение процесса напыления.

Таблица 2

Варианты загрузочных устройств

	
<p>Загрузочное устройство с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 100 мкм и игольчатым сепаратором.</p>	<p>Загрузочное устройство с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 1 мм и сплошным сепаратором.</p>

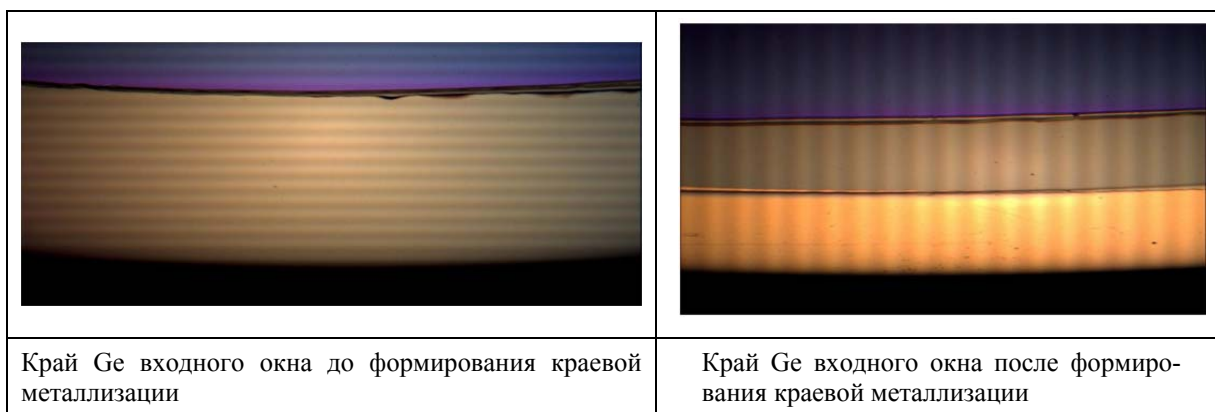
Экспериментальные результаты и обсуждение

Фотографии краевой металлизации Ge дисков до и после напыления представлены в таблице 3. На изображении до формирования металлизации наблюдается две области: первая – край Ge диска с исходной поверхностью,

вторая – с нанесённым антиотражающим покрытием. На изображении после формирования краевой металлизации наблюдается три области. Первая – край Ge диска с трёхслойной металлизацией, состоящей из молибдена, никеля, золота. Вторая – с исходной поверхностью германия, третья – с нанесённым антиотражающим покрытием.

Таблица 3

Край Ge диска до и после формирования краевой металлизации



Профилограммы поверхностей края Ge дисков до и после формирования напылением краевой металлизации с разными загрузочными устройствами представлены на рис. 2 и 3, где обозначен исходный профиль, а сплошной линией с точками – профиль после сформированной напылением металлизации. Рисунок 2 демонстрирует профиль, формируемый при использовании загрузочного устройства с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 1 мм и сплошным сепаратором, а рис. 3 – профиль, получаемый при примене-

нии загрузочного устройства с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 100 мкм и игольчатым сепаратором. Профили измерены на поверхностях дисков с известной кривизной поверхности. На этих же рисунках жирными линиями изображены распределения толщин сформированных металлических покрытий, полученных сложением профилограмм: исходной и после напыления поверхности дисков, учитывая отклонение от плоскостности исходной поверхности.

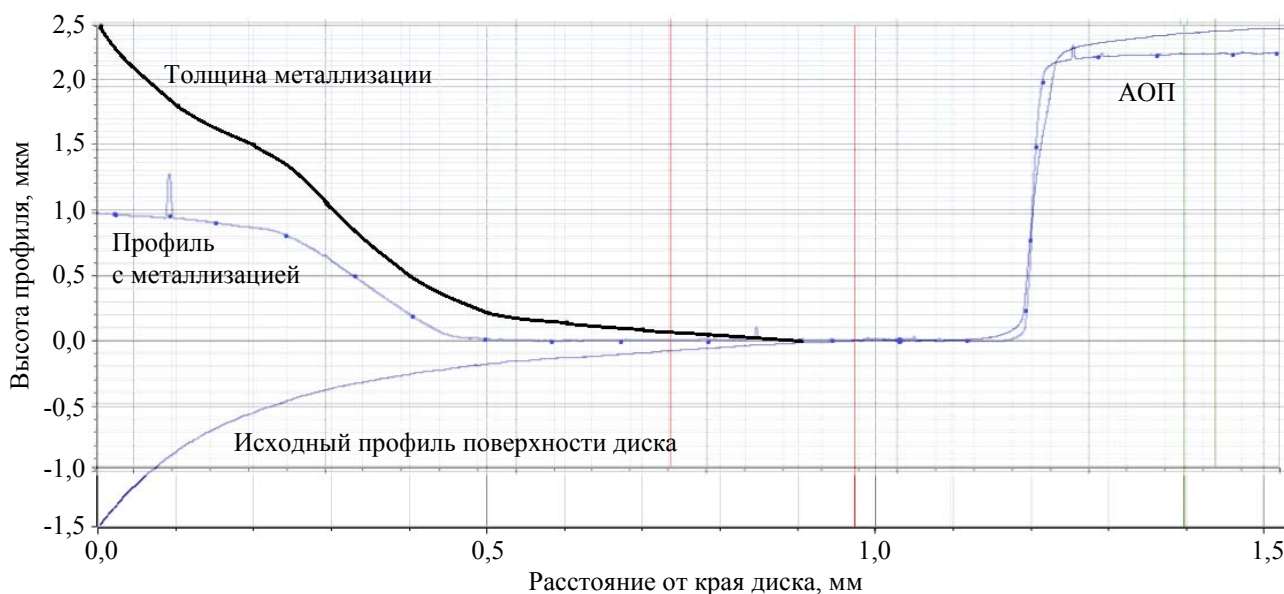


Рис. 2. Профили на поверхности края Ge диска до и после напыления в загрузочном устройстве с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 1 мм и сплошным сепаратором



Рис. 3. Профили на поверхности края Ge диска до и после напыления в загрузочном устройстве с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 100 мкм и игольчатым сепаратором

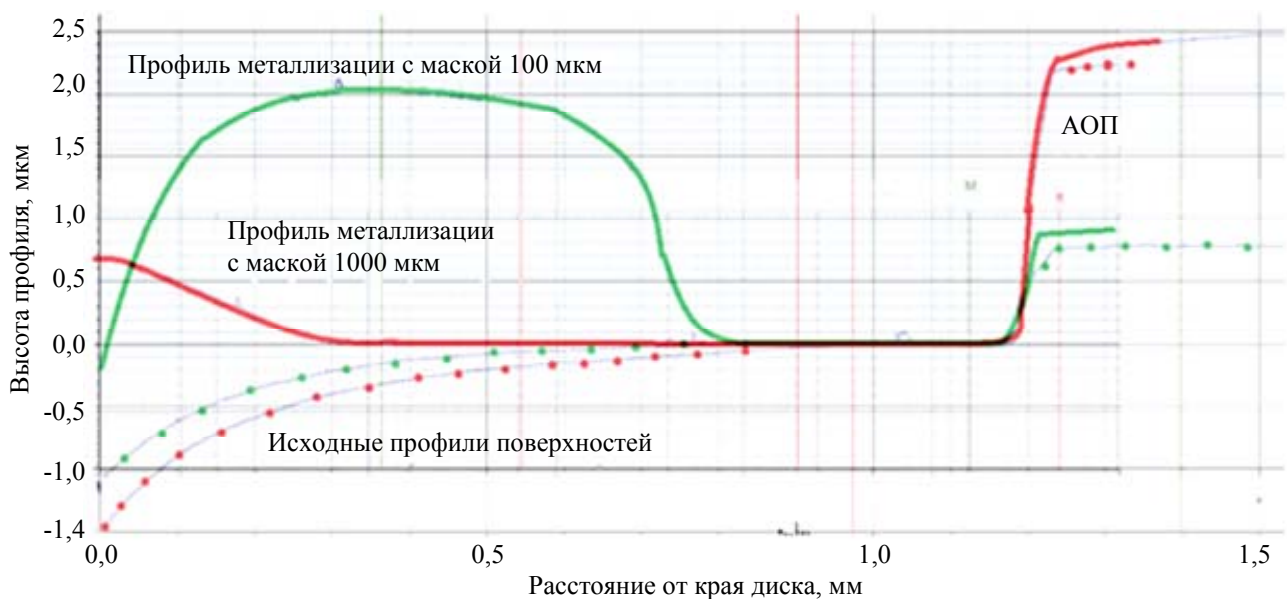


Рис. 4. Совмещённые профили на поверхности края Ge диска до и после напыления в разных загрузочных устройствах

Как видно из представленных результатов измерений, профилограммы краевой металлизации, сформированные с использованием отличающихся конструктивными элементами загрузочных устройств, имеют особенности. С одной стороны, наибольшие значения толщины металлизации до 2,5 мкм достигаются на краях дисков. Однако габаритами элементов конструкций, в том числе высотой маскирующего элемента, можно управлять распределением толщины напыляемого слоя на краю

пластин. Использование загрузочного устройства с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 100 мкм и игольчатым сепаратором позволяет сместить профиль краевой металлизации на 0,5 мм в направлении АОП (см. рис. 2–4). Такое поведение профилей металлизации можно объяснить, изучая схему (рис. 5) процесса магнетронного распыления мишени на плоскую пластину через маски различной высоты.

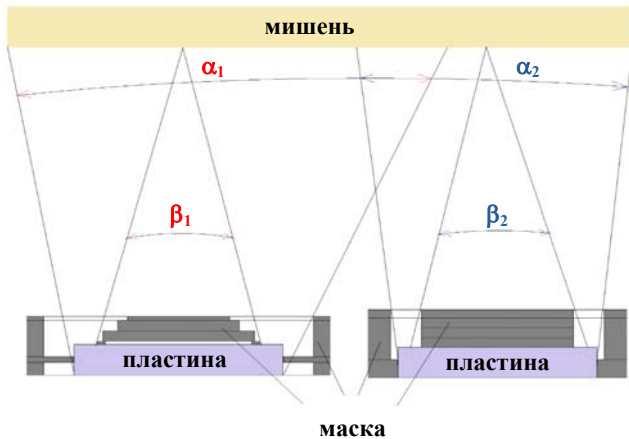


Рис. 5. Схема процесса магнетронного распыления мишени на плоскую пластину через маски различной высоты

При магнетронном распылении круглой мишени участвует вся поверхность, но вследствие взаимодействия скрещенных электрического и магнитного полей на мишени образуется кольцеобразная зона с максимальной скоростью распыления и толщина слоя на пластине, напыленного без маски, на краю меньше, чем в центре на 25÷30 %. Расстояние между вершинами углов β_1 и β_2 соответствует диаметру этой зоны (см. рис. 5). В то же время, распределение толщины напыленного слоя можно рассматривать как совокупность действия точечных источников разной интенсивности, распределенных по поверхности мишени. Поэтому при формировании пленочных покрытий напылением в непосредственной близости от маскирующей пластину элементов на поверхности образуется область полутени, в которой толщина слоя стремится к нулю. При этом протяженность этой зоны пропорциональна высоте маскирующего элемента. Тем не менее, как видно из рис. 5, изменяя геометрическую форму маскирующего элемента, можно добиться оптимального результата, сохраняя суммарную высоту маскирующего элемента, обеспечивающую необходимое расстояние между пластиной и удерживающими маскирующий элемент нитями.

Важным в процессе формирования краевой металлизации дисков является эффективность напыления покрытия на боковые вертикальные поверхности. На рис. 5 показаны углы α_1 и α_2 , в пределах которых атомы распыляемой мишени достигают поверхностей, в том числе вертикальных, пластин, закреплен-

ных в устройствах загрузки со сплошным (α_2) и игольчатым (α_1) сепараторами. Конечно, скорость роста металлизации на вертикальных поверхностях ниже в отсутствие возможности планетарного вращения загрузочного устройства относительно распыляемой мишени. Но даже при вращении пластины в загрузочном устройстве со сплошным сепаратором, нижняя ее часть закрыта от напыления. В устройстве с игольчатым сепаратором эта проблема решена, так как фиксирование пластин в горизонтальной плоскости осуществляется тремя точечными выступами.

Проведенные исследования использованы при разработке технологии впаивания входных окон из оптически прозрачных материалов, таких как кремний, германий, сапфир, и внедрены в производство различных фотоприемников с герметичной конструкцией. На рис. 6 представлен фрагмент металлического корпуса фотоприемника с входным окном из германия, впаянным оловянно-свинцовым припоем. Смачивание припоем германиевого окна происходит однородно по всей металлизированной поверхности.



Рис. 6. Фрагмент металлического корпуса фотоприемника с впаянным входным окном

Заключение

Формирование краевой металлизации на германиевых дисках (входных окнах) играет важную роль в различных областях, связанных с электроникой и фотоникой.

Результаты работы показывают возможности вакуумных методов формирования профиля краевой металлизации без применения жидкостных методов электрохимического осаждения на оптически прозрачных входных окнах, используемых в конструкциях фотоприемников. Профиль толщины металлизации зависит от выбора напыляемых металлов, метода напыления металлизации и геометрии элементов загрузочного устройства.

Применение загрузочного устройства с игольчатым сепаратором и минимальной высотой маскирующего элемента позволяет получить более однородную толщину краевой металлизации входного окна, пригодную для герметизации пайкой корпуса фотоприемника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Diamond Materials GmbH, Freiburg, Germany www.diamond-materials.com
2. Damerow C., Erley W. / Journal of Vacuum Science & Technology A. 1987. Vol. 5. P. 2974. doi: 10.1116/1.574236
3. Zilic K., Aboobaker A., Aubin F. et al. Rev. Sci. Instrum. 2017. Vol. 88. P. 045112. <https://doi.org/10.1063/1.4981814>.
4. Stenchly Vanessa, Lofink Fabian, Reinert Wolfgang. AR-concepts for hermetic wafer level packaging of

uncooled FIR bolometer arrays Fraunhofer Institute for Silicon Technology Fraunhoferstr. 1, 25524 Itzehoe, Germany.

5. Болтарь К. О., Седнев М. В., Коротаев Е. Д. Способ герметизации вакуумных металлических конструкций с оптически-прозрачными элементами. Заявка № 2022133766 от 20.12.2022, решение о выдаче патента № 2022133766/05(073519) от 14.09.2023.

6. Болтарь К. О., Седнев М. В., Трухачев А. В. Способ формирования краевой металлизации оптически-прозрачных элементов для герметизации пайкой вакуумных металлических конструкций. Заявка № 2022133838 от 12.12.2022, решение о выдаче патента № 2022133838/05(073519) от 02.10.2023.

7. Седнев М. В., Трухачев А. В., Атрашков А. С. Способ изготовления матричного фотоприемника. Патент № RU 2749957 С2. 2021.

8. Трухачев А. В., Трухачева Н. С., Седнев М. В., Алиев П. М. / Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 364–369.

PACS: 85.60.-q

Edge metallization profile on optically transparent windows formed by RF magnetron deposition

A. V. Trukhachev, K. O. Boltar, N. G. Mansvetov, M. V. Sednev, N. S. Trukhacheva, E. N. Zubkova and N. V. Prakhov

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orionmoscow@mail.ru

Received 16.11.2023; revised 28.11.2023; accepted 7.12.2023

The paper examines the process of formation of edge metallization on input windows (germanium, silicon and other disks) used to input the received light flux by a photodetector located in a protective sealed housing. The article presents the results of an experimental study of the dependence of the edge metallization profile of Ge disks formed by magnetron sputtering on the design parameters of the loading device. Design options for loading devices are presented. The influence of thickness on the profiles of edge metallization of structural elements of the loading device, masking the disks during deposition, has been experimentally shown.

Keywords: Ge disks (entrance windows) – optically transparent element, photodetector design, magnetron sputtering, Au, Ni, Mo, device for forming edge metallization.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-522-529

REFERENCES

1. Diamond Materials GmbH, Freiburg, Germany www.diamond-materials.com
2. Damerow C. and Erley W., *Journal of Vacuum Science & Technology A* **5**, 2974 (1987). doi: 10.1116/1.574236
3. Zilic K., Aboobaker A., Aubin F. et al., *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 045112 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4981814>
4. Stenchly Vanessa, Lofink Fabian and Reinert Wolfgang, AR-concepts for hermetic wafer level packaging of uncooled FIR bolometer arrays Fraunhofer Institute for Silicon Technology Fraunhoferstr 1, 25524 Itzehoe, Germany.
5. Boltar K. O., Sednev M. V., Korotaev E. D., A method for sealing vacuum metal structures with optically transparent elements, Application № 2022133766 dated 12/20/2022, decision to issue a patent № 2022133766/05 (073519) dated 09/14/2023.
6. Boltar K. O., Sednev M. V. and Trukhachev A. V., Method for forming edge metallization of optically transparent elements for sealing vacuum metal structures by soldering. Application № 2022133838 dated 12/12/2022, decision to issue patent № 2022133838/05(073519) dated 10/02/2023.
7. Sednev M. V., Trukhachev A. V. and Atrashkov A. S. Method of manufacturing a matrix photodetector. Patent № RU 2749957 C2. 2021.
8. Trukhachev A. V., Trukhacheva N. S., Sednev M. V. and Aliev R. M., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **8** (5), 364–369 (2020) [in Russian].