

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9>**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКИ ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ
ПРИ СБОРКЕ РАДИОФОТОННЫХ МОДУЛЕЙ**

Научная статья

Иваничко С.П.¹, Жидик Ю.^{2,*}, Майкова А.В.³, Кузьмин А.С.⁴¹ ORCID : 0009-0000-9818-9646;² ORCID : 0000-0001-7803-2086;³ ORCID : 0009-0008-7074-4175;^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (zhidikyur[at]mail.ru)

Аннотация

В статье приведены результаты отработки технологического режима термозвуковой микросварки, обеспечивающего надёжные электрические соединения разнородных элементов фотонных интегральных схем при их корпусировании в виде радиопотонных модулей. Экспериментально определено, что наиболее оптимальным режимом микросварки золотым шариком к металлизированной контактной площадке и клиновидным соединением является режим со следующими параметрами: мощность ультразвукового воздействия равна 0,375 Вт, сила прижима инструмента равна 350 мН, длительность процесса сварки составляет 200 мс, длина проволоки, из которой формируется шарик, равна диаметру капилляра. При использовании данного режима микросварки проволочных соединений размеры пятна контакта составляют в среднем 60 мкм и не превышают геометрические размеры контактных площадок интегральных микросхем. Электрические соединения, выполненные в данном технологическом режиме, успешно прошли испытания тестирования на воздействие изменения температуры окружающей среды и на отрыв. Показано, что для более надёжного закрепления на контактной площадке клиновидного соединения можно использовать дополнительное шариковое соединение. Электрические соединения, выполненные в данном технологическом режиме, успешно прошли тестирования на воздействие циклического изменения температуры окружающей среды (изменении внешней температуры плюс 100 °С - минус 60 °С в течении 5 циклов с выдержками при каждом крайнем значении температуры в течение 30 минут) и испытания на отрыв динамометром с силой отрыва 2 г.

Ключевые слова: термозвуковая микросварка, монолитные интегральные схемы, фотонные интегральные схемы, корпусирование интегральных схем.

**SPECIFICS OF USING THERMOSONIC MICROWELDING OF WIRE LEADS DURING ASSEMBLY OF
RADIOPHOTONIC MODULES**

Research article

Ivanichko S.P.¹, Zhidik Y.^{2,*}, Maikova A.V.³, Kuzmin A.S.⁴¹ ORCID : 0009-0000-9818-9646;² ORCID : 0000-0001-7803-2086;³ ORCID : 0009-0008-7074-4175;^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (zhidikyur[at]mail.ru)

Abstract

The article presents the results of development of the technological mode of thermosonic microwelding, which provides reliable electrical connections of heterogeneous elements of photonic integrated circuits during their casing in the form of radiophotonic modules. It has been experimentally determined that the most optimal mode of microwelding with a gold ball to a metallized contact pad and a wedge-shaped joint is the mode with the following parameters: ultrasonic power is equal to 0.375 W, tool clamping force is equal to 350 mN, welding process duration is 200 ms, the length of the wire from which the ball is formed is equal to the capillary diameter. When using this mode of micro-welding of wire joints, the size of the contact spot is on average 60 μm and does not exceed the geometric dimensions of the contact areas of integrated circuits. The electrical connections made in this technological mode have successfully passed the tests of testing for the impact of changes in ambient temperature and tear-off. It is demonstrated that an additional ball joint can be used for a more reliable fixation on the contact pad of the wedge-shaped connection. The electrical joints made in this technological mode have successfully passed the tests on the effect of cyclic change of ambient temperature (change of ambient temperature plus 100 °C - minus 60 °C during 5 cycles with dwell time at each extreme temperature value for 30 minutes) and the tear-off test with a dynamometer with a tear-off force of 2 g.

Keywords: thermosonic microwelding, monolithic integrated circuits, photonic integrated circuits, integrated circuit casing.

Введение

Одной из важных операций при установке кристалла полупроводниковой интегральной микросхемы в корпус является электрическое соединение его контактных площадок с выводами корпуса [1]. Наиболее часто используемым на производстве видом электрического соединения контактных площадок кристалла и выводов корпуса является микросварка выводов проволокой, а в некоторых случаях – лентой [1], [2], [3]. Данный метод позволяет в полной мере воспользоваться автоматизацией, кроме того он обладает универсальностью по отношению к разным технологическим вариантам изготовления монолитной интегральной схемы и геометрическим параметрам корпусов [4].

Существует несколько видов микросварки контактных площадок интегральных схем и проволочных выводов: термозвуковая микросварка, термокомпрессионная и контактная [5], [6], [7]. Основными преимуществами термозвуковой микросварки перед другими видами является то, что при этом процессе не происходит плавление металла, температура нагрева кристалла значительно ниже, на контактные площадки микросхемы не подается высокий ток, что особенно важно для высокочувствительных микросхем, а также обеспечивается высокая адгезия свариваемых поверхностей [8].

Несмотря на хорошую изученность метода термозвуковой микросварки, при корпусировании коллективом авторов фотонных интегральных схем электрооптических модуляторов и кристаллов полупроводниковых лазерных диодов возникла необходимость в отработке технологии формирования электрических соединений разнородных элементов (полупроводниковый кристалл, керамическая переходная плата, корпус изделия) методом термозвуковой микросварки с имеющимися особенностями для данных компонентов.

Целью данной работы является отработка технологии термозвуковой микросварки, которая обеспечит получение надёжных электрических соединений разнородных элементов фотонных интегральных схем при их корпусировании в виде радиофотонных модулей.

Методы и принципы исследования

Отработка технологии термозвуковой микросварки разнородных элементов фотонных интегральных схем осуществлялась на установке НВ16 (ТРТ, Германия). Данная установка представлена на рисунке 1 и представляет собой полуавтоматическую установку, которая предназначена для выполнения клиновой термозвуковой сварки и термозвуковой сварки шариком. Для сварки установка позволяет использовать проволоку диаметром от 17 до 75 мкм.



Рисунок 1 - Внешний вид установки ТРТ НВ16

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.1>

Экспериментальными образцами в данной работе являлись проволочные соединения типов «шарик-клин» и «клин-клин» (рисунок 2), выполненные на текстолитовой плате фирмы Roger's с медным металлизированным слоем покрытым иммерсионным золотом. Геометрические размеры контактных площадок составляли 50 x 50 мкм. Все сварные соединения выполнялись проволокой толщиной 17,5 мкм.



Рисунок 2 - Виды сварки: а) шариком, б) клином [3]
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.2>

Сам «шарик» (рисунок 2 а) формируется путем оплавления проволоки плазменным разрядом и застыванием материала на контактной площадке [4], [6], а само соединение получается с помощью ультразвукового воздействия. Преимущество сварки шариком заключается в том, что приварку сварной проволоки можно проводить в любом направлении без поворота образца или дополнительных манипуляций, в отличие от клиновой сварки (рисунок 2 б), требующей предварительную ориентацию направления проволочного вывода [10].

При сварке соединением типа «клин» две металлические поверхности соединяются между собой методом диффузии. Проволока приваривается к контактной площадке кристалла или металлическому корпусу в результате ультразвукового трения между собой нагретых свариваемых поверхностей [2], [7], [9].

Тестирование сформированных проволочных соединений на отрыв осуществлялось с использованием динамометра HOLEX 478900 50CN (Hoffmann GmbH Quality Tools, Германия).

Термоциклические испытания сварных соединений на экспериментальных образцах производились с использованием электрошкафа тепла СНОЛ-3,5.3.5.3,5/3,5-И5М (ТерМИКС НПФ, Россия) и термокамеры ТК 005-70-80 (Россия).

Основные результаты и обсуждение

На первом этапе отработки технологии термозвуковой микросварки разнородных элементов фотонных интегральных схем производилась оценка диапазонов варьирования технологических параметров термозвуковой микросварки.

Для этого, была проведена оценка размера сварного соединения типа «шарик-клин». Данный этап необходим, чтобы электрическое соединение не превышало геометрических размеров контактной площадки. Отношение диаметра капилляра ($D_{\text{мин}}$) к длине ее вылета из наконечника капилляра ($L_{\text{пров}}$) возможно брать любое, однако значения отношений более единицы, для данных критических размеров нецелесообразны, так как размер сварного соединения будет превышать размер контактной площадки (рисунок 3). В данной работе использовались два соотношения длины вылета проволоки и диаметра капилляра: $L_{\text{пров}} = 0,5 \cdot D_{\text{мин}}$ и $L_{\text{пров}} = D_{\text{мин}}$. Учитывая возможность заклинивания сформированного плазмой шарика в инструменте, в работе используется случай, при котором длина проволоки $L_{\text{пров}}$, из которой формируется шарик, равен диаметру капилляра $D_{\text{мин}}$.

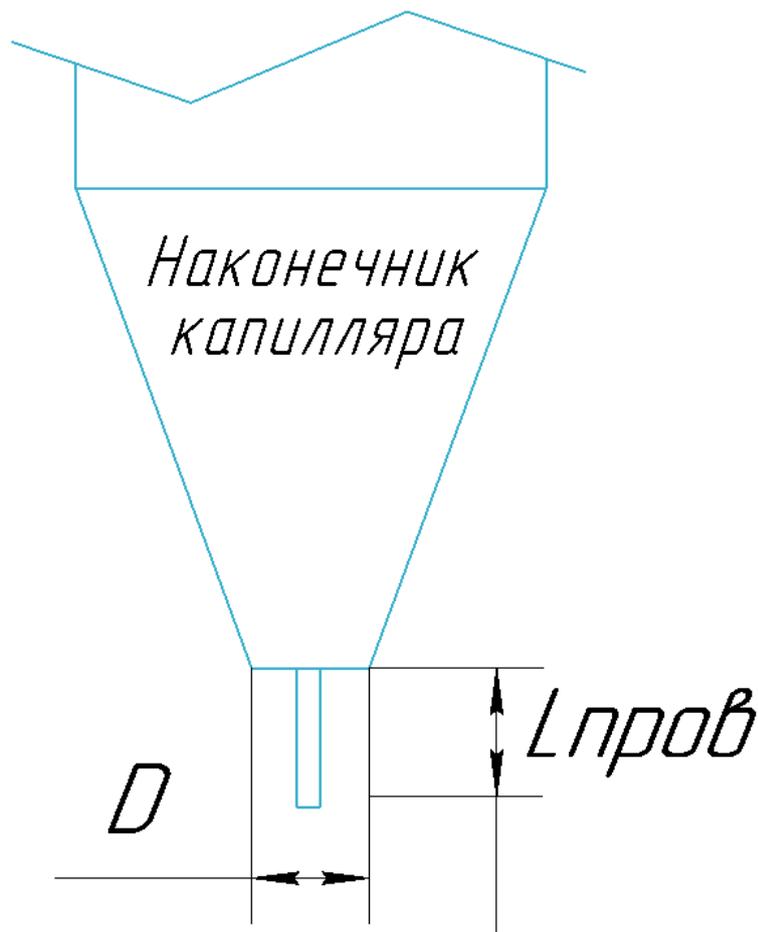


Рисунок 3 - Графическая схема определения длины проволоки
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.3>

Выбор силы прижима инструмента и мощности ультразвукового воздействия производился из диапазонов, рекомендованных производителем установки [3]. Время сварки проволочных выводов во всех исследуемых режимах составлял 200 мс.

Рекомендованный производителем установки диапазон силы прижима инструмента ($F_{инст}$) составляет от 100 мН до 500 мН. При значении силы прижима капилляра менее 150 мН, подавляющим параметром, который образует соединение, является мощность ультразвукового воздействия. При этом чаще всего в последующем наблюдается отрыв соединения от контактной площадки. Таким образом, в данных исследований диапазон значений для силы прижима капилляра изменялся от 150 до 500 мН.

При формировании второго соединения «клин» с помощью подреза проволоки капилляром, важными параметрами являются форма и размер клинового следа, а также мощность ультразвукового воздействия. Для того чтобы второе соединение, как и шарик, размещались на поверхности контактной площадки и не превышали критические размеры, необходимо чтобы клиновой след был или немного меньше, или соразмерен шарик. При таком виде соединения основным параметром, определяющим качество микросварки, является мощность УЗ воздействия.

Частота излучения в используемой установке составляет 63,3 кГц. При значении мощности УЗ воздействия 0,75 Вт для маленьких размеров проволоки и соединений из тонкой проволоки наблюдается чрезмерная деформация контактной площадки и ее оплавление, а также, что немаловажно, деформация и частичное оплавление капилляра. Исходя из вышесказанного, значение мощности ультразвукового воздействия выше 0,625 Вт нецелесообразно использовать для используемой на установке пары капилляр – проволока. На рисунке 4 представлена микрофотография прожога контактной площадки при мощности ультразвукового воздействия 0,75 Вт, длины проволоки равной диаметру капилляра, и при значениях $F_{инст} = 150$ мН, время сварки 200 мс.

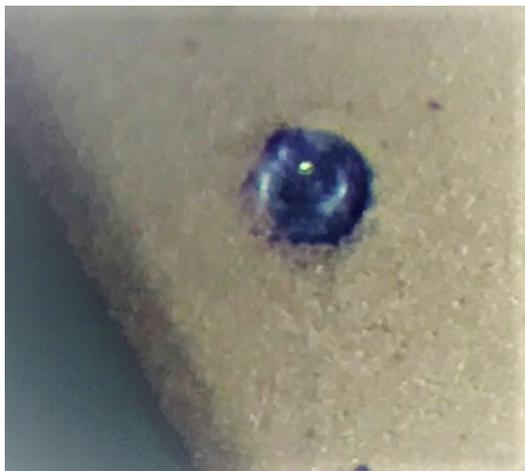


Рисунок 4 - Микрофотография прожога $P_{уз} = 0,75$ Вт
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.4>

Таким образом, значения мощности ультразвукового воздействия и силы прижима инструмента в данных исследованиях варьируются в диапазонах от 0,25 до 0,625 Вт и от 150 до 500 мН соответственно при неизменном времени сварки.

Для выбора оптимального режима микросварки проволочных выводов на тестовые платы приваривались проволочные соединения при шаговых изменениях мощности ультразвукового воздействия и силы прижима инструмента (рисунок 5).

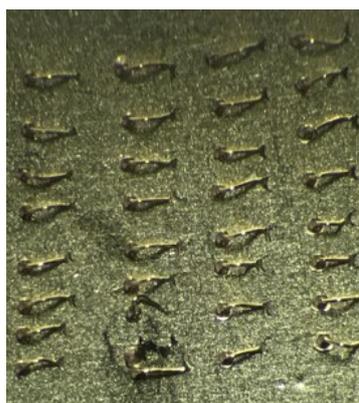


Рисунок 5 - Визуализация эксперимента по отбраковке неподходящих режимов термозвуковой микросварки, вид сверху
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.5>

Результаты эксперимента приведены в таблице 1. В данной таблице, если ширина клиновидного следа меньше или примерно равна диаметру шарика и при формировании шарика не происходит деформация контактной площадки, то результат микросварки считается положительным, иначе результат микросварки считается отрицательным.

Таблица 1 - Результаты тестовых исследований режимов микросварки

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.6>

Сила прижима инструмента, $F_{инст}$, мН	Мощность ультразвукового воздействия, $P_{уз}$, Вт			
	0,25	0,375	0,5	0,625
150	-	-	-	-
200	-	-	-	-
250	-	+	+	+
300	-	+	+	+
350	-	+	+	+
400	-	+	+	+
450	-	+	+	+

500	–	+	+	+
-----	---	---	---	---

Анализ полученных результатов показывает, что среди опробованных 32 режимов микросварки проволоочных выводов пригодными для создания соединений оказались лишь 18 режимов.

Для дальнейшей отбраковки отобранных режимов экспериментальные образцы подвергались тестированию на воздействие изменения температуры окружающей среды (термоциклирование). Данный метод испытаний необходим, чтобы выявить скрытые дефекты соединения.

Используемые параметры процесса термоциклирования следующие:

- 1) температура в камере тепла: + 100 °С;
- 2) температура в камере холода: – 60 °С;
- 3) время выдержки в камере тепла: 30 минут;
- 4) время выдержки в камере холода: 30 минут;
- 5) время переноса из камеры в камеру: не более 2 минут;
- 6) количество циклов: 5.

Тестирование прочности соединения на отрыв было проведено с использованием динамометра HOLEX для двух подготовленных партий подготовленных экспериментальных образцов: подвергавшихся (плата 1) и не подвергавшихся (плата 2) процессу термоциклирования. Осмотр по результатам тестирования на воздействия изменения температуры окружающей среды проводился на оптическом микроскопе Альтами СМ0745-Т (Альтами, Россия). Результат проведения тестирования прочности соединения на отрыв приведен в таблице 2. Прочерками в таблице отмечены испытываемые образцы, не прошедшие испытания на отрыв (отрыв которых наступил при силе отрыва менее 1 г).

Таблица 2 - Анализ результатов тестирования образцов на отрыв

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.7>

Параметры микросварки		Плата 1	Плата 2
$F_{инст}$, мН	$P_{уз}$, Вт	$F_{отрыва}$, Г	$F_{отрыва}$, г
250	0,375	–	1
	0,5	–	1
	0,625	–	–
300	0,375	–	2,5
	0,5	–	–
	250	–	1
350	0,375	3,5	4
	0,5	2	1
	0,625	–	–

Пригодным режимом по результатам тестирования проволоочных соединений на отрыв считаются образцы, сила отрыва которых на всех платах больше 2 г.

Таким образом, с учетом прошедшего тестирования на отрыв и на воздействие изменения температуры окружающей среды было определено, что предъявляемым требованиям соответствуют образцы, полученные при силе прижима инструмента 350 мН и мощности ультразвукового воздействия 0,375 Вт.

Тестирование на отрыв соединений типа шарик – клин показало, что при механическом воздействии от тестовой платы прежде всего отходит соединение типа клин. Для более надежного закрепления было решено использовать на контактной площадке клиновидного соединения дополнительное шариковое соединение. Данное соединение применяется в случаях, когда необходимо получить повышенную прочность электрического соединения к контактной площадке. Важно отметить, что второе шариковое соединение после обрезки соединительной проволоки не должно иметь остаточный проволоочный выступ. В высокочастотных устройствах данный дефект может привести к искажению частотных характеристик. Наиболее простым способом устранения образуемой «антенны» является ее прижим к сформированному соединению с помощью специальной насадки на рабочую часть установки.

При использовании дополнительного шарикового соединения необходимо удостовериться и наглядно показать, что определённый в ходе работы режим укладывается в геометрические размеры контактной площадки. На рисунке 6 представлена микрофотография разваренного в отработанном технологическом режиме соединения на контактной площадке кристалла интегральной GaAs схемы питания и согласования для СВЧ фотодиода.



Рисунок 6 - Микрофотография разваренного соединения типа «шарик - клин» с дополнительным шариковым соединением на контактной площадке кристалла
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.8>

Как видно из рисунка 6, соединение типа «шарик – клин» с дополнительным шариковым соединением, сформированные в выбранном технологическом режиме, действительно размещаются на контактной площадке кристалла.

С использованием отработанного технологического режима термовзвучковой микросварки были изготовлены экспериментальные микросборки сверхширокополосного оптического модулятора с интегрированным источником излучения (рисунок 7).

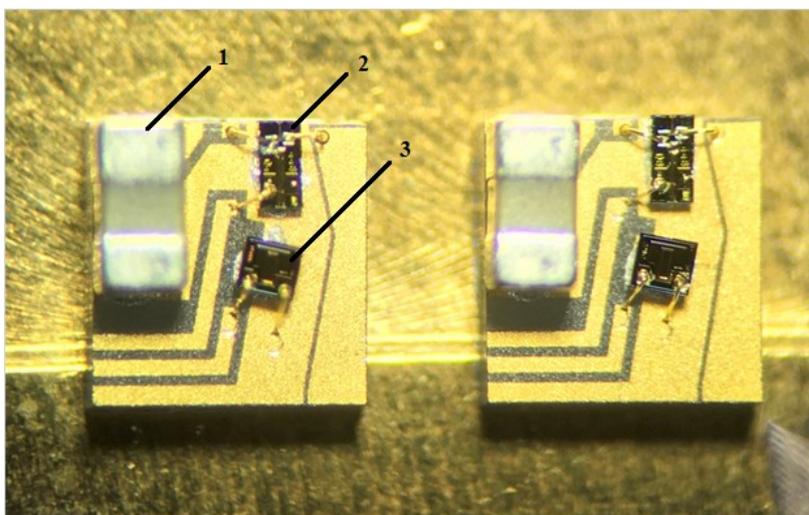


Рисунок 7 - Фотография экспериментальных микросборок сверхширокополосного оптического модулятора с интегрированным источником излучения
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.9.9>

Примечание: 1 – конденсатор, 2 – фотонная интегральная микросхема модулятора с интегрированным лазером, 3 – мониторинг фотодиод

Изготовленные микросборки состояли из расположенных на микрополосковой керамической переходной плате фотонной интегральной микросхемы модулятора с интегрированным лазером, мониторингового фотодиода и конденсатора.

Таким образом, результаты работы показали, что отработанный технологический режим термозвуковой микросварки соответствует требованиям для электрических соединений разнородных элементов фотонных интегральных схем при их корпусировании в виде радиофотонных модулей.

Заключение

В ходе данной работы изготовлены экспериментальные образцы. Проанализировано влияние технологических параметров термозвуковой микросварки на параметры получаемых соединений. Также выполнено тестирование на контроль качества сварного соединения на отрыв и проведено испытание на воздействие изменения температуры окружающей среды.

Экспериментально определено, что наиболее оптимальным режимом микросварки золотым шариком к металлизированной контактной площадке является режим со следующими параметрами: мощность ультразвукового воздействия равна 0,375 Вт, сила прижима инструмента равна 350 мН, длительность процесса сварки составляет 200 мс, длина проволоки, из которой формируется шарик, равна диаметру капилляра. При использовании данного режима микросварки проволочных соединений размеры пятна контакта составляют в среднем 60 мкм и не превышают геометрические размеры контактных площадок интегральных микросхем. Для более надежного закрепления было решено использовать на контактной площадке клиновидного соединения дополнительное шариковое соединение. Данное соединение применяется в случаях, когда необходимо получить повышенную прочность электрического соединения к контактной площадке. Важно отметить, что второе шариковое соединение после обрезки соединительной проволоки не должно иметь остаточный проволочный выступ. В высокочастотных устройствах данный дефект может привести к искажению частотных характеристик.

Финансирование

Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004, а также в рамках программы «Приоритет 2030».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out by the staff of the Scientific laboratory of Integrated Optics and Radiophotonics with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project number FEWM 2024-0004, as well as under the program "Priority 2030".

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Шмаков М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем / М. Шмаков // Технологии в электронной промышленности. — 2006. — № 5. — С. 60–65.
2. Ланин В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников / В. Ланин, И. Петухов, В. Шевцов // Компоненты и технологии. — 2009. — № 8. — С. 124–130.
3. Кудряшов И. Технология микросварки проволочных выводов / И. Кудряшов // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. — 2007. — № 5. — С. 1–6.
4. Ramsey T. High-Frequency Enhancement for Ambient Temperature Ball Bonding / T. Ramsey, C. Alfaro // Semiconductor International. — 1997. — № 8.
5. Пат. 1446784 Российская Федерация, МПК422232427 МПК. Устройство образования шарика при микросварке / Головин В. М.; заявитель и патентообладатель Головин В. М.. — № 422232427; заявл. 1987-04-16; опубл. 2023-10-26. — 5 с.
6. Charles H. K. The Wirebonded Interconnect: A Mainstay for Electronics / H. K. Charles // Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures, Springer. — 2007. — № 2. — P. 71–120.
7. Паршин В. Технология термозвуковой микросварки методом «шарик – клин – шарик» и контроль микросварных соединений / В. Паршин, М. Шмаков, Е. Теплякова // Технологии в электронной промышленности. — 2007. — № 7.
8. Сидоров В. Многокристальная сборка мощных СВЧ-транзисторов / В. Сидоров, С. Минаев // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2008. — № 3.
9. Свиридов Е. Разварка золотым шариком и клиновья ультразвуковая микросварка: сравнение / Е. Свиридов // Технологии в электронной промышленности. — 2016. — № 6.
10. Prasad S. K. Advanced Wirebond Interconnection Technology / S. K. Prasad // Kluwer Academic Publishers. — 2004. — P. 107–109.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Shmakov M. Mikrosvarka pri proizvodstve mikrosborok i gibridnyh integral'nyh mikroshem [Micro-welding in the Production of Micro-assemblies and Hybrid Integrated Circuits] / M. Shmakov // Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti [Technologies in the Electronic Industry]. — 2006. — № 5. — P. 60–65. [in Russian]

2. Lanin V. Ul'trazvukovoe oborudovanie dlja svarki mikroprovodnikov [Ultrasonic Equipment for Welding of Microconductors] / V. Lanin, I. Petuhov, V. Shevtsov // Komponenty i tehnologii [Components and Technologies]. — 2009. — № 8. — P. 124–130. [in Russian]
3. Kudrjashov I. Tehnologija mikrosvarki provolochnyh vyvodov [Micro-welding Technology of Wire Leads] / I. Kudrjashov // Proizvodstvo jelektroniki: tehnologii, oborudovanie, materialy [Electronics Manufacturing: Technologies, Equipment, Materials]. — 2007. — № 5. — P. 1–6. [in Russian]
4. Ramsey T. High-Frequency Enhancement for Ambient Temperature Ball Bonding / T. Ramsey, C. Alfaro // Semiconductor International. — 1997. — № 8.
5. Pat. 1446784 Russian Federation, МПК422232427 МПК. Ustrojstvo obrazovaniya sharika pri mikrosvarke [The Device for the Formation of a Ball during Micro-welding] / Golovin V. M.; the applicant and the patentee Golovin V. M.. — № 422232427; appl. 1987-04-16; publ. 2023-10-26. — 5 p. [in Russian]
6. Charles H. K. The Wirebonded Interconnect: A Mainstay for Electronics / H. K. Charles // Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures, Springer. — 2007. — № 2. — P. 71–120.
7. Parshin V. Tehnologija termozvukovoj mikrosvarki metodom «sharik – klin – sharik» i kontrol' mikrosvarnyh soedinenij [The Technology of Thermosonic Micro-welding by the "Ball – Wedge – Ball" Method and Control of Micro-welded Joints] / V. Parshin, M. Shmakov, E. Tepljakova // Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti [Technologies in the Electronic Industry]. — 2007. — № 7. [in Russian]
8. Sidorov V. Mnogokristal'naja sborka moschnyh SVCh-tranzistorov [Multi-chip Assembly of High-power Microwave Transistors] / V. Sidorov, S. Minaev // Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes [Electronics: Science, Technology, Business]. — 2008. — № 3. [in Russian]
9. Sviridov E. Razvarka zolotym sharikom i klinovaja ul'trazvukovaja mikrosvarka: sravnenie [Welding with a Golden Ball and Wedge Ultrasonic Micro-welding: comparison] / E. Sviridov // Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti [Technologies in the Electronic Industry]. — 2016. — № 6. [in Russian]
10. Prasad S. K. Advanced Wirebond Interconnection Technology / S. K. Prasad // Kluwer Academic Publishers. — 2004. — P. 107–109.