

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА КРЕМНИЕВЫХ КРИСТАЛЛОВ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ПОЗОЛОЧЕННЫЕ И НИКЕЛИРОВАННЫЕ КОРПУСА С ПОМОЩЬЮ СПЛАВА ПСР-2,5

© В. С. Аносов, Д. В. Гомзиков, М. В. Пашков, Л. А. Сейдман,  
Р. И. Тычкин, В. М. Фомин

АО «Государственный завод «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Целью данной работы является улучшение качества пайки припоем ПСр-2,5, в частности, снижение теплового сопротивления между кремниевым кристаллом и корпусом транзистора. Для повышения качества пайки применена предварительная металлизация обратной стороны кремниевой пластины покрытием Ti-Ni, что значительно облегчило процесс пайки, исключив образование пустот между кристаллом и корпусом прибора.

Проведена экспериментальная оценка влияния материалов внешних слоёв покрытия корпуса прибора и металлизации обратной стороны кристалла. При пайке кремниевых кристаллов свинцово-серебряным припоем в корпуса транзисторов преимущество имеют корпуса с никелевым, а не золотым покрытием, поскольку либо полученное тепловое сопротивление ниже, либо отсутствие золота удешевляет технологию. Получена величина теплового сопротивления 0,48 °C/Вт при площади кристалла 42 мм<sup>2</sup> и 0,55 °C/Вт при площади кристалла 40 мм<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** кремниевые приборы, монтаж кристаллов кремниевых приборов, пайка сплавом, металлизация кремния, корпуса приборов, тепловое сопротивление

**Сведения об авторах:** Аносов Василий Сергеевич, [vanosov@yandex.ru](mailto:vanosov@yandex.ru); Гомзиков Денис Васильевич, [d.pulsar@mail.ru](mailto:d.pulsar@mail.ru); Пашков Михаил Викторович, [michaelpashkov@yandex.ru](mailto:michaelpashkov@yandex.ru); Сейдман Лев Александрович, к.т.н., [seid1@yandex.ru](mailto:seid1@yandex.ru); Тычкин Роман Игоревич, [kb-it@mail.ru](mailto:kb-it@mail.ru); Фомин Владимир Михайлович

**Благодарность:** Авторы выражают благодарность начальнику отдела АО «НПП «Пульсар» Ежову В. С. за помощь в представленной работе.

---

## RESEARCH OF THE INSTALLATION OF THE POWER TRANSISTORS SILICON CHIPS IN GOLD-PLATED AND NICKEL-PLATED HOUSINGS WITH A ПСР 2.5 ALLOY

V. S. Anosov, D. V. Gomzиков, M. V. Pashkov, L. A. Seidman, R. I. Tychkin, V. M. Fomin

JSC «State Plant «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

The purpose of this research is to improve the quality of soldering by ПСр-2.5 alloy, in particular, reducing the thermal resistance between the silicon chip and the transistor housing. To improve the quality authors used the preliminary metallization of the back side of the silicon wafer – Ti-Ni coating, which greatly facilitated the soldering process, eliminating the voids between the die and the device housing.

Experimental evaluation of the influence of the materials of the external layers of device housings and the back side metallization was performed. During silicon die's soldering with lead-silver in the transistor's housings, cases with a nickel coating has an advantage over cases with golden coating, as either resulting thermal resistance is lower or the absence of gold makes technology cheaper. Obtained values of thermal resistance were 0.48 °C/W at die area of 42 mm<sup>2</sup> and 0.55 °C/W at die area 40 mm<sup>2</sup>.

**Keywords:** silicon devices, silicon device's die installation, soldering, silicon metallization, device housing, thermal resistance

**Data of authors:** Anosov Vasilii Sergeevich, [vanosov@yandex.ru](mailto:vanosov@yandex.ru); Gomzikov Denis Vasilevich, [d.pulsar@mail.ru](mailto:d.pulsar@mail.ru); Pashkov Mikhail Viktorovich, [michaelpashkov@yandex.ru](mailto:michaelpashkov@yandex.ru); Seidman Lev Aleksandrovich, Ph.D., [seid1@yandex.ru](mailto:seid1@yandex.ru); Tychkin Roman Igorevich, [kb-it@mail.ru](mailto:kb-it@mail.ru); Fomin Vladimir Mikhailovich

**Acknowledgements:** Authors show their gratitude to V.S. Ezhov, head of Department of «PULSAR» S&PE» JSC, for his assistance in the research.

## **Введение**

В настоящее время монтаж кристаллов мощных кремниевых транзисторов в корпуса приборов осуществляется пайкой с образованием жидкой металлической фазы между кристаллом и корпусом, которая при остывании затвердевает и скрепляет их друг с другом. Главными требованиями к процессу пайки являются достижение низкого теплового сопротивления и обеспечение повышенной надёжности паяного соединения во время эксплуатации полупроводникового прибора.

Качество пайки определяет тепловое сопротивление паяного соединения, низкая величина которого особенно важна для мощных транзисторов. В большой мере эта величина зависит от смачиваемости исходных поверхностей образовавшейся жидкой фазой: чем лучше смачиваемость, тем меньше площадь, где отсутствует непосредственный контакт припоя и паяемой детали и ниже тепловое сопротивление паяного соединения. Дело в том, что при хорошем смачивании происходит взаимная диффузия атомов из припоя и паяемой детали. В результате они сближаются на столь малые расстояния, что между ними возникают связи, облегчающие передачу тепловой энергии.

Среди различных способов пайки широко распространён традиционный способ пайки с помощью свинцово-серебряного припоя ПСр-2,5, состав которого кроме свинца содержит 2,5 % серебра и 5,5 % олова [1]. Температура начала плавления припоя ПСр-2,5 составляет 295-300 °С, поэтому пайку им осуществляют при температуре кристалла около 320 °С. Преимущества припоя ПСр-2,5 заключаются в дешевизне припоя (из-за отсутствия золота) и высокой производительности процесса пайки, обеспечиваемой групповой обра-

боткой одновременно большого количества приборов. В то же время такие припои на основе свинца, обычно применяемые для монтажа кристаллов, имеют недостаток [2, 3]: интенсивное растворение золота (покрытия корпуса) как в жидкой фазе при пайке, так и в его твердой фазе во время эксплуатации при повышенных температурах. Этот недостаток должен проявиться при сравнении результатов пайки кристаллов кремния в корпусах с разным покрытием: золотым и никелевым.

Для улучшения смачиваемости обратной стороны кремниевого кристалла расплавленным припоем в данной работе применили металлизацию обратной стороны, как это делалось в работах [3-5]. Однако в данной работе использовали другие два вида металлизации Ti-Ni-Au Ti-Ni, соответствующие двум видам корпусов, сравниваемых в данной работе.

Целью данной работы является улучшение качества пайки припоем ПСр-2,5, в частности, снижение теплового сопротивления между кристаллом и корпусом прибора и экспериментальная оценка влияния материалов внешних слоёв покрытия корпуса прибора и металлизации обратной стороны кристалла.

## **Использованное оборудование**

Нанесение металлизации на обратную сторону кремниевых пластин проводили в установке Kurt J. Lesker PVD 250. Испарение металлов вели электронным лучом: титана и никеля из вольфрамового тигля, а золота из графитового тигля. Расстояние от испарителя до подложек было 515 мм. Подложки во время нанесения были нагреты до 300 °С.

Разделение кремниевой пластины на кристаллы осуществляли методом сквозной дисковой резки на установке proVectus ADT (Advanced dicing technologies) 7100.

Пайку кристаллов в корпусе вели в программируемой печи SST-5100. Эта вакуумная печь обеспечивает откачку, нагнетание, продувку и вытяжку рабочих газов в широком диапазоне давлений. Используемые инертные среды – азот и формиргаз (95 % азота и 5 % водорода).

Для микросварки выводов использовали установку Orthodyne 3600 фирмы Orthodyne Electronics с одиночной головкой, предназначенную для клиновой ультразвуковой микросварки проволочных алюминиевых выводов.

Для контроля качества пайки использовали рентгеновскую установку абсорбционной спектроскопии высокого разрешения типа Micromelx DXR 180\*В фирмы General Electric, на которой получали рентгенограммы изготовленных образцов. Применимость этого метода проверили в работе [6] на примере корпусов транзисторов КТ-57 с впаянными в них кристаллами транзисторов 2Т-862 и 2П-762.

Прямые измерения теплового сопротивления паяного соединения проводили на установке БКВП.411189044, разработанной в АО «НПП «Пульсар».

### *Процедура экспериментов*

Для экспериментов были выбраны пластины кремния двух видов, содержащие как биполярные, так и МОП-транзисторы, кристаллы которых имеют относительно крупные размеры. Пластины кремния диаметром 100 мм и толщиной 320 мкм содержали кристаллы мощных МОП-транзисторов с размерами  $6,4 \cdot 6,55 = 42 \text{ мм}^2$ . Кроме того, были использованы пластины кремния диаметром 76 мм и толщиной 220 мкм, содержащие кристаллы мощных биполярных транзисторов КТ-862 примерно той же площади  $7,7 \cdot 5,2 = 40 \text{ мм}^2$ . Обратная сторона всех пластин была полированной.

После стандартной отмывки на обратную сторону пластин в одном процессе наносили металлизацию в двух вариантах: в первом – плёнку титана толщиной 0,1 мкм, плёнку никеля толщиной 0,1 мкм и плёнку золота толщиной 0,1 мкм, или во втором – плёнку титана толщиной 0,1 мкм и плёнку никеля

толщиной 0,1 мкм. Плёнка титана – это адгезионный подслои, а плёнка никеля здесь играет роль барьера при взаимодействии кремния с припоем во время пайки. Плёнка золота в одном из вариантов металлизации добавлена для защиты нижележащих слоёв от окисления. Два таких варианта металлизации были выбраны, чтобы они соответствовали двум вариантам корпусов транзисторов: позолоченных и никелированных. Эти два варианта металлизации сравнивали в одинаковых условиях с целью определить у кого лучше смачиваемость припоем и ниже тепловое сопротивление паяного соединения между кристаллом и корпусом.

В работе исследовали посадку кристаллов в стандартные корпуса с различным типом металлизации: никелированные корпуса КТ-97 и КТ-57 и позолоченные корпуса КТ-94 и КТ-57. Это делалось для выявления особенностей процесса пайки в зависимости от вида металлизации корпуса, также как от вида металлизации обратной стороны кристалла (трёхслойная Ti-Ni-Au или двухслойная Ti-Ni).

Посадка кристаллов в корпуса проводилась через преформу, то есть через прокладку свинцово-серебряного припоя ПСр-2,5, толщиной 100 мкм. Данная толщина преформы была выбрана с целью получения минимальных механических напряжений в паяном соединении [3]. Подготовленное к пайке изделие помещали в камеру вакуумной печи, и после закрытия крышки камеры начинался полностью автоматический, заранее запрограммированный процесс.

### *Посадка кристаллов в различные корпуса*

По описанной выше технологии проводили посадку кристаллов в корпуса различного типа. На рис. 1 (а) приведена типичная рентгенограмма с результатами пайки припоем ПСр-2,5 в никелированном корпусе КТ-97. На рентгенограмме видно, что пустот нет и тепловой контакт обеспечен по всей площади кристалла. Диапазон разброса теплового сопротивления  $R_t$  по образцам составил  $0,446\text{--}0,508 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  при среднем значении  $0,48 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . На рис. 1 (б) приведены резуль

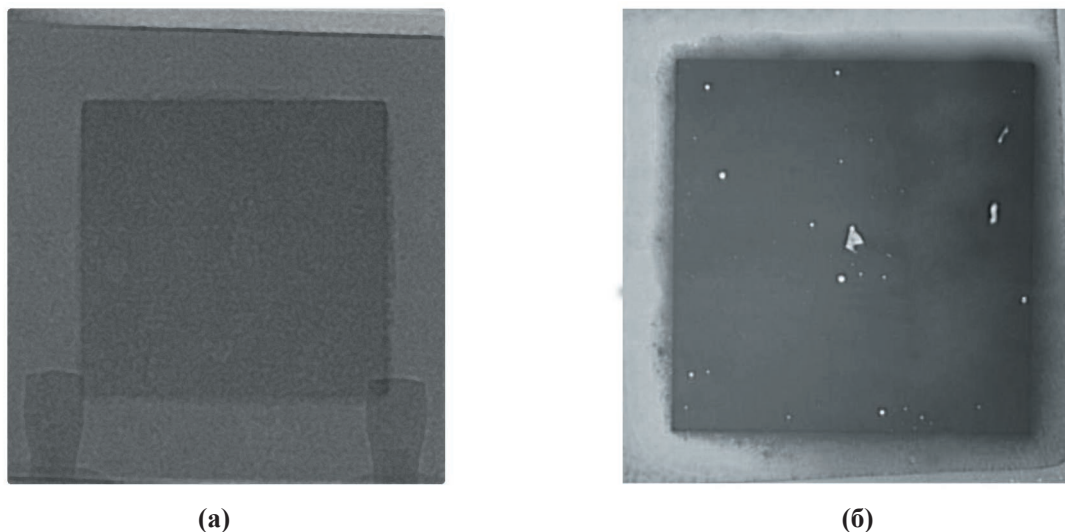


Рис. 1

Типичная рентгенограмма образцов кристаллов после пайки их в никелированном корпусе КТ-97 (а) и позолоченном корпусе КТ-94 (б)

таты пайки припоем ПСр-2,5 в позолоченном корпусе КТ-94. Из рентгенограммы видно, что площадь пустот пренебрежимо мала, и тепловой контакт обеспечен практически по всей площади кристалла. Диапазон разброса  $R_t$  по этим образцам составил 0,581-0,722 °С/Вт при среднем значении 0,66 °С/Вт.

Аналогичным образом оценили результаты пайки кристаллов биполярного транзистора КТ-862 при посадке их в корпуса КТ-57. Были использованы два вида корпусов КТ-57: корпуса только с никелевым покрытием толщиной 3 мкм и с дополнительным золотым покрытием толщиной 5 мкм. На обратную сторону кристаллов была нанесена двухслойная металлизация Ti-Ni. Из их рентгенограмм после пайки было видно, что и здесь тепловой контакт обеспечен практически по всей площади кристалла. После монтажа кристаллов, разварки выводов и измерения теплового сопротивления были получены средние его значения 0,57 °С/Вт с разбросом  $\pm 0,02$  °С/Вт.

### Обсуждение результатов

Известно, что тепловое сопротивление собранного транзистора состоит как из теплового сопротивления его корпуса и самого полупроводникового кристалла, так и из теплового сопротивления паяного соеди-

нения, которое, как показал опыт сборки транзисторов, вносит существенный вклад в общее тепловое сопротивление [7]. Тепловое сопротивление соединения, в свою очередь, состоит из последовательно соединённых тепловых сопротивлений застывшего припоя и двух переходов между ним и паяемыми деталями [7, 8]. На основании этих представлений проанализируем полученные экспериментально данные по тепловому сопротивлению собранных приборов.

Результаты пайки кристаллов биполярного транзистора КТ-862 при посадке их в корпуса КТ-57 с различными покрытиями показали, что тепловое сопротивление было практически одинаковым в позолоченных и никелированных корпусах и равно  $0,57 \pm 0,02$  °С/Вт. В тех же условиях традиционная пайка эвтектическим сплавом золото-кремний кристаллов биполярного транзистора КТ-862 в позолоченном корпусе КТ-57 показала, что среднее значение величины теплового сопротивления было 0,52 °С/Вт, что на 10 % ниже, чем при пайке припоем ПСр-2,5.

Полученные результаты полезно сравнить также с результатами предыдущей работы при пайке кристаллов мощных МОП-транзисторов эвтектическим сплавом золото-кремний [6]. Они оказались лучше при пайке эвтектическим сплавом:  $R_t$  равно 0,48 °С/Вт вместо 0,66 °С/Вт при пайке

свинцово-серебряным припоем. Увеличение теплового сопротивления по сравнению с эвтектическим сплавом можно объяснить тем, что затвердевший припой ПСр-2,5 имеет большую толщину (100 мкм вместо 20 мкм) и большее удельное тепловое сопротивление 43,6 Вт/м·К [9] по сравнению с эвтектическим сплавом 190 Вт/м·К [10].

Тепловое сопротивление паяного свинцово-серебряным припоем соединения кристалла в никелированном корпусе КТ-97 оказалось равно 0,48 °С/Вт, что лучше чем при пайке в позолоченном корпусе КТ-94 – 0,66 °С/Вт. Повышенное на 0,18 °С/Вт тепловое сопротивление, по-видимому, связано с растворением золотого покрытия корпуса прибора толщиной 7 мкм в расплаве свинцово-серебряного припоя во время процесса пайки. Действительно, температура пайки 320 °С, а температура образования эвтектики золото-свинец всего 212,5 °С при концентрации золота 15,2 ат. % (примерно 15 масс. %), поэтому концентрация золота в расплаве может превысить концентрацию исходных примесей припоя (серебра и олова), то есть его оптимальный состав существенно нарушается. Из-за этого при кристаллизации припоя в нём образуются дополнительные интерметаллические соединения [2, 3, 11], что уменьшает удельную теплопроводность припоя до 11,5 Вт/м·К [2], а теплопроводность слоя припоя до 0,21 °С/Вт, то есть эта разность близка к разности, полученной экспериментально.

Таким образом можно сделать вывод, что при пайке свинцово-серебряным припоем кремниевых кристаллов в корпуса преимущество имеют корпуса с никелевым, а не золотым покрытием, поскольку либо полученное тепловое сопротивление ниже, либо отсутствие золота удешевляет технологию. В случае пайки в корпуса КТ-57 растворение золотого покрытия в припое не сказалось на величине теплового сопротивления, по-видимому, из-за меньшей его толщины: 3-5 мкм вместо 7 мкм у корпуса КТ-94. В этом случае состав свинцово-серебряного припоя меньше изменяется во время пайки и остаётся оптимальным с точки зрения теплопроводности.

Оценочный расчёт для кристаллов площадью 40-42 мм<sup>2</sup> показывает, что тепловое сопротивление кремниевого кристалла толщиной 300 мкм равно 0,076 °С/Вт. Аналогичным образом тепловое сопротивление корпуса (пластины из псевдосплава молибдена с медью толщиной 1-1,3 мм и теплопроводностью около 200 Вт/м·°С) оценим как 0,13-0,17 °С/Вт. Их сумма вместе с сопротивлением слоя припоя, казалось бы должна составлять тепловое сопротивление идеально собранного прибора – 0,27-0,31 °С/Вт. Однако, в данной работе экспериментально получено тепловое сопротивление 0,48 °С/Вт для корпусов позолоченного КТ-94 и никелированного КТ-97. Разность между величинами идеального и полученного экспериментально теплового сопротивления, достигающая 0,17-0,3 °С/Вт, что представляет собой тепловое сопротивление двух переходов от слоя припоя к паяным деталям, редко учитывается технологами. Теоретические аспекты теплового барьера, возникающего на границе раздела двух тел, рассмотрены в работе [12]. Причём установлено, что основной вклад вносит сопротивление перехода кристалл-припой, где тепловая энергия передаётся от фононов в кремнии электронам в металле [12, 13]. Второй переход металл-металл создаёт менее значимое тепловое сопротивление, ввиду одинаковости механизмов переноса тепла у обоих металлов.

Описанные выше эксперименты были осуществлены сначала при использовании трёхслойной металлизации Ti-Ni-Au. Затем они были повторены с двухслойной металлизацией Ti-Ni. Оба варианта металлизации обратной стороны кристалла (трёхслойная Ti-Ni-Au или двухслойная Ti-Ni) показали одинаковые результаты пайки. То есть наличие плёнки золота не дало каких-либо преимуществ. Это был ожидаемый результат, поскольку плёнка золота при пайке растворяется в расплаве свинцово-серебряного припоя. Поэтому целесообразно использовать менее дорогую двухслойную металлизацию Ti-Ni.

## **Выводы**

1. Показано, что предварительная металлизация Ti-Ni-Au или Ti-Ni полированной обратной стороны кремниевой пластины, содержащей кристаллы транзисторов, значительно облегчает процесс их пайки припоем ПСр-2,5 в корпуса как позолоченные, так и никелированные, и практически исключает образование пустот между кристаллом и корпусом прибора и снижает тепловое сопротивление между ними.

2. Оба варианта металлизации обратной стороны кристалла (трёхслойная Ti-Ni-Au или двухслойная Ti-Ni) показали одинаковые результаты пайки. Поэтому целесообразно использовать менее дорогую двухслойную металлизацию Ti-Ni без плёнки золота.

3. При пайке кремниевых кристаллов припоем ПСр-2,5 в корпуса транзисторов преимущество имеют корпуса с никелевым, а не золотым покрытием, поскольку либо полученное тепловое сопротивление ниже, либо отсутствие золота удешевляет технологию.

4. После пайки припоем ПСр-2,5 получены низкие средние величины теплового сопротивления. Для кристаллов МОП-транзисторов размером  $6,4 \cdot 6,55 = 42 \text{ мм}^2$  в корпусах КТ-97 –  $0,48 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ , и в корпусах КТ-94 –  $0,66 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ . И для кристаллов биполярных транзисторов размером  $7,7 \cdot 5,2 = 40 \text{ мм}^2$  в корпусах КТ-57 как с золотым, так и с никелевым покрытием получено тепловое сопротивление  $0,57 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ .

## **Литература**

1. ГОСТ 19738-74. Припой серебряные. Марки.
2. Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Конструктивно-технологические особенности MOSFET-транзисторов // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 100-104.
3. Ланин В. Л., Ануфриев Л. П. Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов // Силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 94-99.
4. Ланин В. Л., Керенцев А. Ф. Сборка и монтаж мощных транзисторов в корпусе SMD-2 // Силовая электроника. – 2010. – № 1. – С. 76-79.
5. Ланин В. Л., Керенцев А. Ф. Дефекты паяных соединений при монтаже внешних выводов транзисторов в силовых модулях // Технология электронной промышленности. – 2010. – № 3. – С. 58-63.

6. Аносов В. С., Гомзиков Д. В., Пашков М. В., Сейдман Л. А., Тычкин Р. И., Фомин В. М. Исследование технологии монтажа кремниевых кристаллов пайкой эвтектическим сплавом золото-кремний // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2016. – № 3 (242). – С. 4-12.
7. Нисс В. С. и др. Исследование структуры теплового сопротивления ДМОП-транзисторов неразрушающим методом ТРДС. – 2014. – С. 73. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/107868/1/p.73-75.pdf> (дата обращения: 17.06.16).
8. Романова М. П. Сборка и монтаж интегральных микросхем: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 95 с.
9. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. изд. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
10. Daniel D. Evans, Jr. and Zeger Bok. AuSi and AuSn Eutectic Die Attach Case Studies from Small (12 mil) to Large (453 mil) Die // The 43 rd International Symposium on Microelectronics (IMAPS 2010) Proceedings, October 31-November 4, 2010, Raleigh, North Carolina.
11. Диаграммы состояния двойных металлических систем: в 3 т. Т. 1. / Под общей ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
12. Меснянкин С. Ю., Викулов А. Г., Викулов Д. Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твёрдых тел // УФН. – 2009. – Т. 179, № 9. – С. 945-970.
13. Васьков О. В., Кононенко В. К., Нисс В. С., Турцевич А. С., Рубцевич И. И., Соловьев Я. А., Керенцев А. Ф. Тепловые параметры, структура и дефектность посадки мощных полевых транзисторов // 5-ая Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники», г. Минск, 10-11 октября 2012, с. 27-30.

## **References**

1. GOST 19738-74. Silver Alloys. Brands.
2. Kerentsev A. F., Lanin V. L. MOSFET design features. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2007, № 4, pp. 100-104.
3. Lanin V. L., Anufriev L. P. IGBT die mounting. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2009, № 2, pp. 94-99.
4. Lanin V. L., Kerentsev A. F. Power transistor fabrication and packaging in SMD-2 cases. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2010, № 1, pp. 76-79.
5. Lanin V. L., Kerentsev A. F. Defects of solder bonding of transistors external outputs in power modules.

- Tekhnologiya elektronnoy promyshlennosti* [Electronic Industry Technology], 2010, № 3, pp. 58-63.
6. Anosov V. S., Gomzikov D. V., Pashkov M. V., Seidman L. A., Tychkin R. I., Fomin V. M. Investigation of silicon die braze bonding method using Au-Si eutectic alloy. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2016, № 3 (242), pp. 4-12.
  7. URL: <http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/107868/1/p.73-75.pdf> (accessed 17 June 2016).
  8. Romanova M. P. *Sborka i montazh integralnykh mikroskhem* [Integrated circuit fabrication and mounting]. Ulyanovsk, UIGTU [USTU] Publ., 2008, 95 p.
  9. Zinovyev V. E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermo-physical properties of metals under high temperatures]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989, 384 p.
  10. Daniel D. Evans, Jr. and Zeger Bok. AuSi and AuSn Eutectic Die Attach Case Studies from Small (12 mil) to Large (453 mil) Die // The 43 rd International Symposium on Microelectronics (IMAPS 2010) Proceedings, October 31-November 4, 2010, Raleigh, North Carolina.
  11. *Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskih sistem* [Binary diagrams of metallic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, vol. 1, 992 p.
  12. Mesnyankin S. Yu., Vikulov A. G., Vikulov D. G. Modern approach to thermal contacting of solid-states. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics Uspekhi*, 2009, vol. 179, № 9, pp. 945-970.
  13. Vaskov O. V., Kononenko V. K., Niss V. S., Turtsevich A. S., Rubtsevich I. I., Solovyev Ya. A., Kerentsev A. F. *5 Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Materialy i struktury sovremennoy elektroniki»* [5th International scientific conference «Materials and structures of modern electronics»]. Minsk, 10-11 October 2012, pp. 27-30.