

УДК 621.382.2

**РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ  
КРИСТАЛЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ  
ПУСТОТ В ОБЛАСТИ ПАЙКИ**

**Н.А. Павлюк-Мороз**

*АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр., 27*

*Представлены результаты тепловых расчётов полупроводниковых кристаллов на металлической подложке. Проведено сравнение расчётов и результатов компьютерного моделирования. Осуществлён анализ влияния наличия и расположения пустот в слое припоя на температуру кристалла.*

**Ключевые слова:** *тепловой расчёт, пайка, монтаж кристаллов*

**Сведения об авторах:** *Никита Александрович Павлюк-Мороз, nmoroz@pulsarnpp.ru*

**SEMICONDUCTOR DIE THERMAL FIELD  
CALCULATION WITH DIFFERENT VOID  
CONFIGURATIONS IN THE SOLDERING AREA**

**N.A. Pavlyuk-Moroz**

*S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27*

*The results of thermal design of semiconductor dies on a metal substrate are presented. Comparison of computer simulation results has been conducted. Analysis of the effect of the presence and location of voids in the solder layer on the crystal temperature is performed.*

**Keywords:** *thermal calculation, soldering, die bonding*

**Authors:** *Nikita Aleksandrovich Pavlyuk-Moroz, nmoroz@pulsarnpp.ru*

## Введение

В процессе сборки полупроводниковых приборов одним из наиболее важных факторов, влияющих на надёжность, является качество монтажа кристалла на основание корпуса и отсутствие пустот в области между кристаллом и корпусом [1].

Существуют три основные причины образования пустот в паяном соединении:

1. Плохое смачивание припоем соединяемых поверхностей [2].
2. Газовые пустоты, образующиеся в объёме припоя из-за избыточной толщины припоя или недостаточного усилия прижима кристалла.
3. Газовые пустоты, образующиеся в объёме припоя при улетучивании растворителей, входящих в состав флюсов [3, 4].

В статье рассматривается влияние размера и расположения таких пустот на температуру кристалла при работе прибора. Результаты трёхмерного моделирования получены с помощью математического моделирования в программном комплексе «SolidWorks».

## Расчёт теплового сопротивления

Тепловое сопротивление, термическое сопротивление – способность тела препятствовать распространению тепла. Термическое сопротивление – величина, обратная коэффициенту теплопередачи.

$$R_t = \frac{T_2 - T_1}{P}, \quad (1)$$

где  $R_t$  – тепловое сопротивление на участке тепловой цепи, К/Вт;  $T_2$  – температура начала участка, К;  $T_1$  – температура конца

участка, К;  $P$  – тепловой поток, протекающий через участок цепи, Вт.

В нашем случае тепловое сопротивление будет иметь несколько составляющих, а именно: тепловое сопротивление кристалла, тепловое сопротивление припоя под кристаллом и тепловое сопротивление основания корпуса. Для каждой составляющей тепловое сопротивление можно рассчитать по формуле

$$R_t = \frac{h}{\lambda S}, \quad (2),$$

где  $h$  – толщина элемента, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);  $S$  – площадь поперечного сечения участка, м<sup>2</sup>.

Из формулы (2) видно, что тепловое сопротивление обратно пропорционально площади поперечного сечения участка. Следовательно, тепловое сопротивление слоя припоя прямо пропорционально количеству пустот в нём.

## Предмет исследований

Приведённые ниже расчёты описывают теплопередачу от кристалла к подложке механизмом теплопроводности. Рассмотрена стационарная теплопроводность.

Расчётная модель состоит из 3 элементов:

1. Кристалл Si размером 1.4x0.7x0.2 мм.
2. Припой ПСр-2.5 размером 1.4x0.7x0.05 мм.
3. Основание корпуса из псевдосплава МД-40 размером 2.4x0.7x0.2 мм.

Припой ПСр-2.5 имеет состав: 2,5% Ag + 92,5% Pb + 5% Sn [5]. Данный состав имеет температуру плавления 295-300°C и широко применяется при монтаже кристаллов методом вакуумной пайки благодаря своему хорошему растеканию [6]. Его теплопроводность равна 35 Вт/М · К.

Материал основания корпуса, МД-40 (медно-молибденовый псевдосплав с составом меди и молибдена 40% и 60% соответственно), также часто применяется в изготовлении полупроводниковых приборов. Его основными преимуществами являются относительно низкий коэффициент теплового расширения ( $12 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ), благодаря чему в сборке достигаются низкие значения механических напряжений, а также высокая теплопроводность (210 Вт/М · К) и низкое удельное сопротивление (0,03 мкОм · см). Стоит также отметить, что характеристики псевдосплава могут меняться в зависимости от технологии его изготовления, в данной статье взяты усреднённые параметры.

Теплопроводность кремния во всех расчётах принимаем равной 149 Вт/М · К.

На припое, находящемся на основании корпуса, расположен кристалл. Схематичное изображение исследуемой структуры показано на рис. 1.

### Теоретический одномерный расчёт

Для данной конструкции проведём расчёт теплового сопротивления  $R_t$  между верхней плоскостью кристалла и нижней плоскостью основания корпуса по формуле (2). При этом расчёт будем проводить как для случая пайки без дефектов, так и для пайки с полостями различной площади в слое припоя. Во всех случаях  $R_t$  будет иметь три составляющие:  $R_{t1}$  – тепловое сопротивление кристалла,  $R_{t2}$  – тепловое сопротивление припоя и  $R_{t3}$  – тепловое сопротивление основания корпуса.

Проведём расчёт для пайки с различным размером полостей в слое припоя, а именно: для полостей шириной от 50 до 450 мкм с шагом 50 мкм.  $R_{t1}$  и  $R_{t3}$  при этом будут оставаться неизменными, а  $R_{t2}$  будет зависеть от площади полости

$$R_{t2} = \frac{h}{\lambda(S-a \cdot l)}, \quad (3)$$

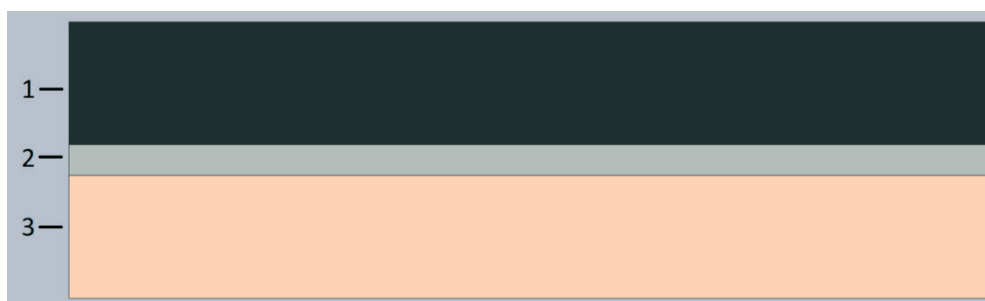


Рис. 1

Внешний вид исследуемой модели: 1 – кристалл Si, 2 – припой ПСр-2.5; 3 – основание корпуса МД-40

где  $S_1$  – площадь полости;  $a$  – ширина кристалла (0,7мм);  $l$  – ширина полости.

Результаты расчётов приведены в табл. 1.

### Тепловые расчёты трёхмерных моделей

Приведённый выше одномерный расчёт удобен своей простотой, но имеет один серьёзный недостаток, а именно он не учитывает неравномерность распределения тепла в области дефекта пайки. Чтобы оценить влияние этой неравномерности, проведём трёхмерное компьютерное модели-

рование для удобства анализа результатов.

В первом случае было проведено моделирование для структуры с идеальным слоем припоя, то есть без каких-либо пустот. Мощность 1 Вт распределена равномерно по всей площади кристалла. Прирост температуры на кристалле при этом составил 3,55К, то есть тепловое сопротивление  $R_t=3,55\text{K/Вт}$ , что соответствует результатам расчёта по формуле (2). Результаты моделирования показаны на рис. 2.

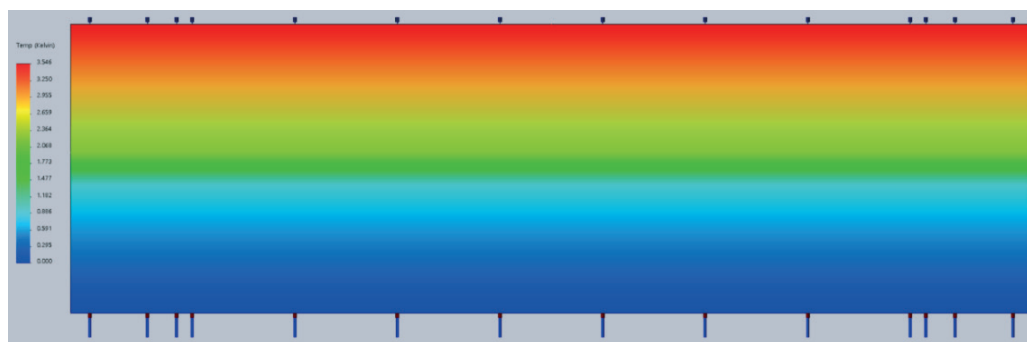


Рис. 2

Моделирование структуры с припоем без дефектов и равномерным распределением мощности по всей площади кристалла

рование.

К верхней плоскости кристалла прикладывается тепловая мощность 1Вт. К нижней стороне основания корпуса по всей его площади, применен теплоотвод с температурой 0К (то есть температура всей нижней плоскости основания равна 0К). Таким образом, полученная температура кристалла будет показывать прирост температуры, вызванный приложением мощности 1 Вт. Такие значения выбраны для

Для дальнейшего моделирования в центре слоя припоя расположим полость, размер которой, как и при расчёте, будем менять от 50 мкм до 450 мкм с шагом 50 мкм (рис. 3).

Как и в предыдущем расчёте, мощность 1 Вт распределена равномерно по всей площади кристалла. На рис. 4 видна неравномерность распределения температуры в данной модели.

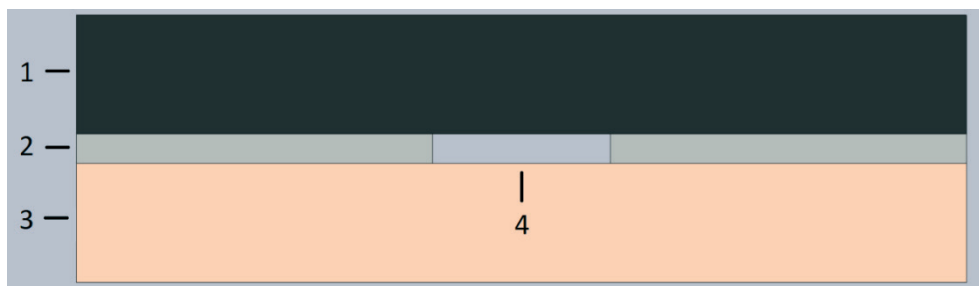


Рис. 3

Модель с полостью в припое шириной 300 мкм: 1 – кристалл Si; 2 – припой ПСр -2,5; 3 – основание корпуса МД-40; 4 – полость в припое

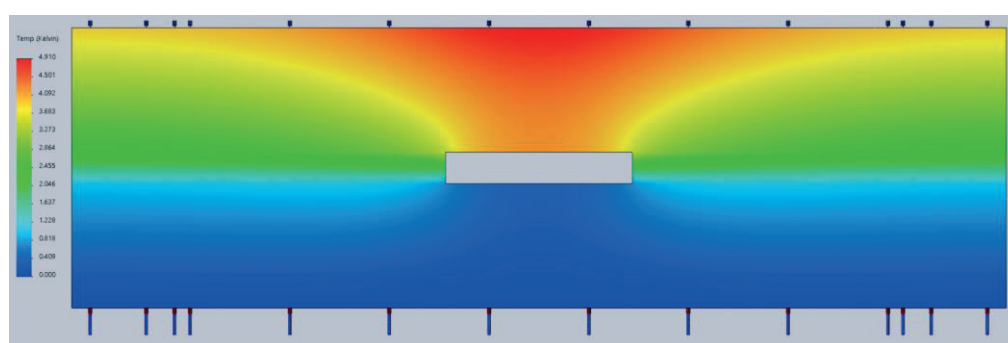


Рис. 4

Распределение тепла при наличии дефекта шириной 300 мкм

Далее смоделируем случаи, когда полость в припое разделена на небольшие части размером 50 мкм, (количество частей от 1 до 9) и они равномерно распределены по площади (рис. 5).

Как и в предыдущем случае, мощность 1Вт равномерно рассеяна по всей площади кристалла. Результаты данного моделирования приведены в табл. 1.

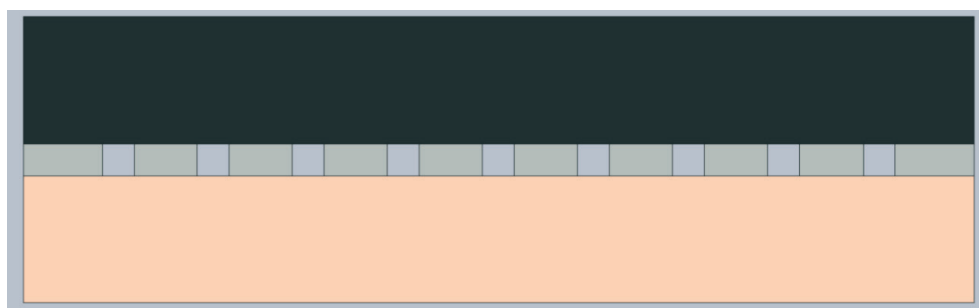


Рис. 5

Модель с полостями шириной 50 мкм в припое

**Анализ полученных результатов**

одну таблицу и на основании этих данных

Сведём все полученные результаты в построим график (рис. 6).

Таблица 1

**Зависимость  $R_t$  от размера и количества полостей согласно одномерному расчёту и трёхмерному компьютерному моделированию**

Общий размер полостей, мкм	$R_t$ согласно одномерному расчёту, К/Вт	$R_t$ трёхмерной модели с одной полостью, К/Вт	$R_t$ трёхмерной модели с несколькими малыми полостями, К/Вт
0	3,55	3,55	3,55
50	3,59	3,68	3,67
100	3,64	3,85	3,71
150	3,7	4,06	3,78
200	3,75	4,31	3,84
250	3,82	4,6	3,92
300	3,89	4,91	4
350	3,96	5,25	4,08
400	4,04	5,63	4,17
450	4,13	6,03	4,27

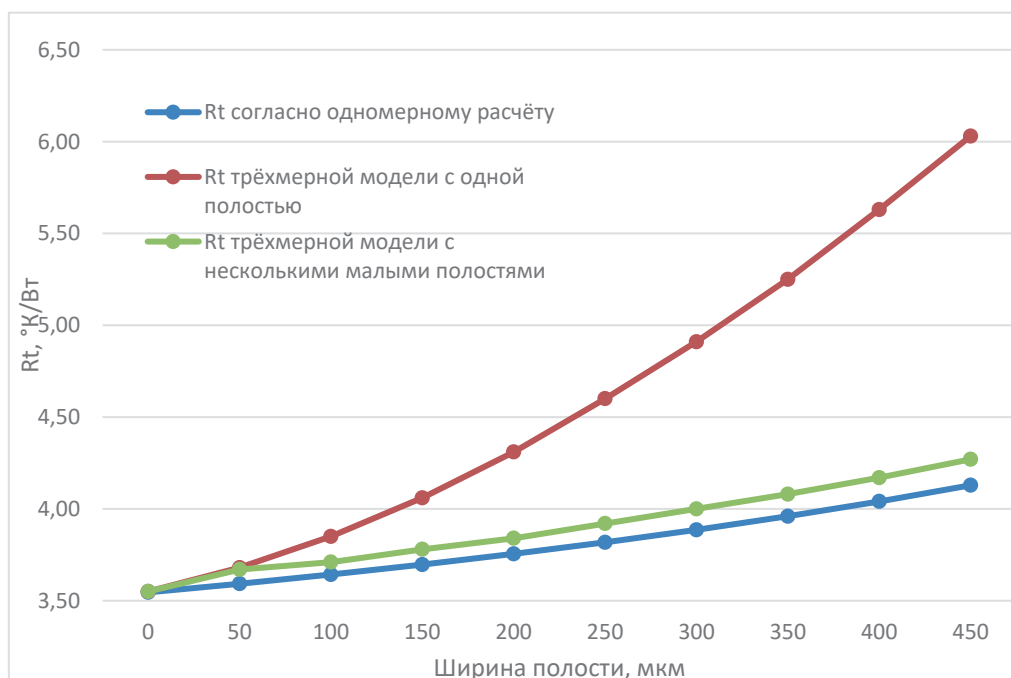


Рис. 6

Сравнение одномерных расчётов и результатов трёхмерного моделирования

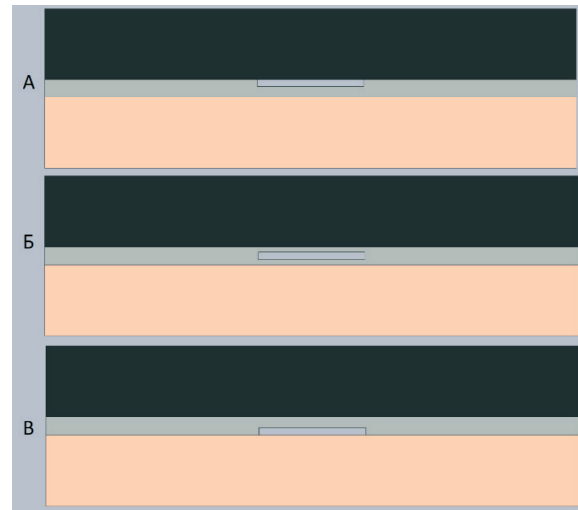
Из табл. 1 и рис. 6 видно, что уже при ширине полости 100 мкм (что составляет менее 7% от общей ширины кристалла) наблюдается значительное расхождение результатов расчёта и результатов моделирования, однако при наличии малых полостей, распределённых по площади, результаты расчёта и моделирования близки во всём исследуемом диапазоне, причём в последнем случае  $R_t$  заметно ниже, чем в случае с одной большой полостью. Отсюда можно сделать вывод, что при пайке следует в первую очередь избегать единичных полостей большого объёма. Также стоит отметить, что в некоторых случаях суммарная площадь полостей может достигать 30% от площади кристалла [1].

#### **Исследование влияния полостей в зависимости от их расположения**

В реальной жизни случай, когда не облуживается и подложка и кристалл, встречается довольно редко. Поэтому далее рассмотрим влияние расположения полости по высоте, то есть случаи, когда не облуживается только кристалл либо не облуживается только подложка. Также рассмотрим случай, когда и кристалл

и основание корпуса облужены, но внутри припоя присутствует пузырёк воздуха.

Для наглядности возьмём ширину полости 300 мкм. Её толщина при этом составляет 20 мкм (рис. 7).



**Рис. 7**

*Варианты расположения полости по вертикали: А – полость сверху, имитирует необлуженный кристалл; Б – полость по центру, имитирует пузырёк внутри припоя; В – полость снизу, имитирует необлуженное основание корпуса*

Результаты моделирования показаны в табл. 2.

**Таблица 2**

#### **Значение $R_t$ в зависимости от расположения полости по вертикали**

Расположение полости	$R_t$ , К/Вт
Сверху (вариант А)	4,82
По центру (вариант Б)	4,83
Снизу (вариант В)	4,77

Как видно из данных результатов, расположение полости по вертикальной оси слабо влияет на значение  $R_t$ . Таким образом, показано, что кроме качественной подготовки паяемых поверхностей с целью их хорошей смачиваемости припоем также важно обеспечение отсутствия пустот внутри припоя, что достигается правильным подбором толщины слоя припоя, а также обеспечением прижима при пайке на столе либо правильным подбором алгоритма работы в целом и параметров вакуума в частности при работе в вакуумной печи.

#### Исследование влияния особенностей кристалла на значение $R_t$

Стоит отметить, что расчёты с равномерным распределением мощности по поверхности кристалла справедливы только для транзисторов и диодов. Для микросхем же, как правило, характерен нагрев какой-то её части. Поэтому, для дальнейших исследований разобьём кристалл на равные части шириной 0,5 мм. Мощность 1 Вт будем прикладывать крайней части.

Проведём трёхмерное моделирование для такой конфигурации с припоем без полостей, а также для двух вариантов припоя с полостью шириной 50 мкм: в первом случае полость будет находиться по центру,

а во втором случае под областью, в которой выделяется мощность (рис. 8).

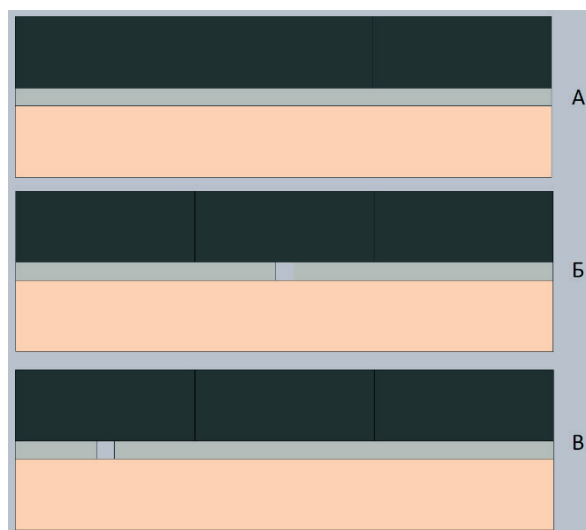


Рис. 8

Нагрета крайняя часть кристалла шириной 0,5 мм: А – припой не имеет полостей; Б – полость шириной 50 мкм находится под серединой кристалла; В – полость шириной 50 мкм находится под нагреваемой областью

Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Как видно из данных результатов, взаимное расположение нагреваемой области и полости в припое имеет достаточно весомое значение даже при размере полости 50 мкм.

Таблица 3

Зависимость  $R_t$  от расположения полости в припое

Расположение полости	$R_t$ , К/Вт
Полость отсутствует	8,85
Полость в удалении от нагреваемой области	8,87
Полость под нагреваемой областью	9,17



### Выводы

Установлено, что на отвод тепла от кристалла значительное влияние оказывает не только общее количество пустот под ним, но и их расположение в горизонтальной плоскости. Показано, что одномерный подход к расчёту  $R_t$  применим только в случае наличия пустот малого размера, распределённых по площади равномерно. Проведено моделирование, показывающее, что помимо качественной подготовки паяемых поверхностей с целью их хорошей смачиваемости припоем также важно обеспечение отсутствия пустот внутри припоя.

### Литература

1. Бенуни, И.С. Особенности монтажа GaN кристаллов СВЧ усилителей мощности / И. С. Бенуни, О. Ю. Дьяконица, А. О. Климов, Н. А. Павлюк-Мороз, Ал. В. Редька // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – №3 (246) – С. 44-51.
2. Сумм, Б. Д. Гистерезис смачивания / Б.Д. Сумм // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – №7 – С. 98-102.
3. Патент РФ 2636034. Способ пайки кристаллов дискретных полупроводниковых приборов к корпусу / А.Х. Давыдов, А.О. Климов, Г.Д. Кравчук, Н.А. Павлюк-Мороз
4. Суитман, К. Контроль над механизмами образования пустот при пайке оплавлением / К. Суитман, Т. Нишимура, К. Сугимото, А. Кита // Технологии в электронной промышленности. – 2016. – № 6(90) – С. 44-51.
5. Егоров, Г. Образование пустот в паяных соединениях / Г. Егоров // Технологии в электронной промышленности. – 2010. – №7. – С. 22-23.
6. ГОСТ 19738-2015 Припой серебряные. Марки : национальный стандарт : издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 03 июля 2016 г.

№ 517-ст.: дата введения 2017-01-01 / разработан Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 304 благородные металлы, сплавы и промышленные изделия из них. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.

7. Аносов, В. С. Исследование процессов пайки кремниевых кристаллов мощных транзисторов в их корпуса / В.С. Аносов, Д.В. Гомзииков, М.И. Ичетовкин, Л.А. Сейдман, Р.И. Тычкин // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2017. – №1 – С. 51-59.

### References

1. Benuni I.S., Dyakonitsa O.Yu., Klimov A.O., Pavlyuk-Moroz N.A., Redka Al.V. Features of Microwave GaN Power Amplifier Dies Solder Bonding. – Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. 2017. – No.3 (246). – pp. 44-51.
2. Summ B.D. Wetting Hysteresis. Soros Education Journal. – 1999. – No.7 – pp. 98-102.
3. Davydov A.Kh., Klimov A.O., Kravchuk G.D., Pavlyuk-Moroz N.A. Sposob paiki kristallov diskretnykh poluprovodnikovykh priborov k korpusu [The Way to Solder Dies of Discrete Semiconductor Devices to The Case]. Patent RF, No. 2636034.
4. Sweatman K., Nishimura T., Sugimoto K., Kita A. Control Over the Mechanisms of Void Formation During Soldering. Tekhnologii v Elektronnoy Promyshlennosti [Technologies in the Electronic Industry]. – 2016. – No.6 (90). – pp. 44-51.
5. Egorov G. Void Formation in Solder Bonds. Tekhnologii v Elektronnoy Promyshlennosti [Technologies in the Electronic Industry]. – 2010. – No.7. – pp. 22-23.
6. State Standard 19738-2015 Silver Solders. Brands. National Standard. Official Publication. – Moscow. Standartinform Publ. 2016. – 11 p. (In Russian)
7. Anosov V.S., Gomzikov D.V., Ichetovkin M.I., Seydman L.A., Tychkin R.I. Study of Solder Bonding of Power Transistor Silicon Dies to the Cases. – Materialy Elektronnoy Tekhniki [Electronic Engineering Materials]. – 2017. – No.1. – pp. 51-59.