

# Сборка и монтаж

## мощных транзисторов в корпусе SMD-2

**Исследованы способы сборки и монтажа мощных транзисторов в корпусах типа SMD, предназначенных для электронных модулей силовой электроники.**

**Владимир Ланин**

vlanin@bsuir.by

**Анатолий Керенцев**

akerentsev@transistor.com.by

### Конструктивно-технологические характеристики корпусов SMD

Поверхностный монтаж электронных компонентов перспективен для сборки блоков РЭА, к которым предъявляются требования миниатюрности и невосприимчивости к низкочастотной вибрации [1]. Монтаж силовых транзисторов в герметичных металлокерамических корпусах SMD-1 и SMD-2 позволяет достичь миниатюризации, снизить вес при высокой рассеиваемой мощности и сохранить герметичность после термоциклических нагрузок [2].

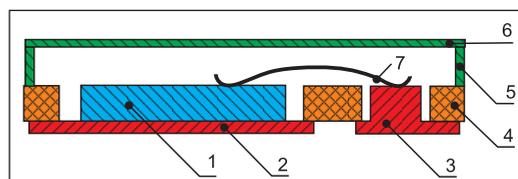
Герметичный металлокерамический корпус состоит из контактных площадок и кристаллодержателя, присоединенных к керамической плате, являющейся основанием корпуса, металлического ободка и крышки (рис. 1).

Внешний вид корпусов типа SMD International Rectifier представлен на рис. 2.

Основные свойства элементов металлокерамических корпусов SMD-2 и пластмассового корпуса SMD-220 представлены в таблице 1. Как следует из приведенных данных, максимальное отклонение коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) элементов корпуса SMD-2 относительно кристалла составляет  $2,2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , в то же время для SMD-220 это отклонение примерно на порядок выше и составляет  $21,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Корпуса SMD относятся к XIV группе, к которой, согласно ГОСТ 20.39.405-84, предъявляются жесткие требования по технологическим и эксплуатационным воздействиям:

1. Конструкция изделий должна обеспечивать применение групповых методов пайки: оплавление припойной пасты в режиме: нагрев до температуры  $190 \text{ } ^\circ\text{C}$  не более 30 с; последующий нагрев до температуры не выше  $230 \text{ } ^\circ\text{C}$  не более 15 с; нагрев групповым паяльником при температуре пайки не выше  $265 \text{ } ^\circ\text{C}$  не более 4 с.
2. Изделия должны выдерживать трехкратный нагрев по режиму: температура не выше  $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ , длительность однократного воздействия не более 10 мин.



**Рис. 1.** Металлокерамический корпус SMD-2: 1 — кристалл, 2 — кристаллодержатель, 3 — внешний вывод, 4 — керамическая плата, 5 — ободок, 6 — крышка, 7 — проволочная перемычка

Максимально допустимая температура  $p$ - $n$ -перехода (кристалла)  $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Тепловое сопротивление переход-корпус  $4\text{--}5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , переход-среда  $80\text{--}85 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

3. Изделия должны быть устойчивы к воздействию одиночных импульсов напряжения, возникающих при воздействии электромагнитных излучений. Показатель импульсной электрической прочности — не более 1000 В.
4. Стойкость к воздействию статического электричества по V степени жесткости ОСТ 11 073.062. Допустимое значение статического потенциала 500–1000 В.
5. Показатель герметичности транзисторов — не более  $5 \times 10^{-2}$  Па.

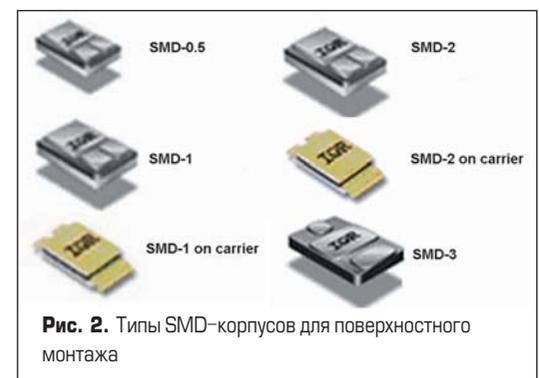
В экстремальных условиях эксплуатации при термоциклическом воздействии из-за различия КТЛР элементов корпуса и кристалла в активной структуре прибора могут возникать значительные внутренние напряжения. Величину остаточных термомеханических напряжений примерно можно оценить по формуле [3]:

$$\sigma = -E_1(\alpha_1 - \alpha_2)(T_1 - T_2) \times F(E_1, E_2, h_{кр}/h_{кд}), \quad (1)$$

где  $\sigma$  — напряжение сжатия на границе кристалл-кристаллодержатель;  $E_1, E_2$  — модуль упругости кристаллодержателя и кристалла соответственно;  $\alpha_1, \alpha_2$  — КТЛР кристаллодержателя и кристалла соответственно;  $F(E_1, E_2, h_{кр}/h_{кд})$  — функция, зависящая от соотношения толщины кристалла и кристаллодержателя и их модулей упругости.

Поэтому для снижения внутренних напряжений, обусловленных несовместимостью по КТЛР, монтаж кристаллов в корпус SMD-220 необходимо осуществлять на легкоплавкий припой, а для SMD-2 допускается выполнять монтаж методом эвтектической пайки Au-Si. Необходимо отметить, что эвтектическая пайка кристаллов на Au-Si или Au-Si-Ge является основным способом достижения энергоцикlostойкости не менее 10000 циклов.

Сборка кристаллов размером  $4,3 \times 4,7 \text{ мм}^2$ ,  $4,7 \times 5,6 \text{ мм}^2$  и  $4,4 \times 7,5 \text{ мм}^2$  и с системой металлиза-



**Рис. 2.** Типы SMD-корпусов для поверхностного монтажа

Таблица 1. Материалы элементов корпуса

Изготовитель корпуса	Элемент корпуса	Материал	КТЛР, × 10 <sup>-6</sup> °С <sup>-1</sup>
SMD-2 (А) (США)	к/держатель и выводы	Сплав WCu	6,0
	Основание	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,4
	Ободок	Ковар	5,1
	Крышка	Ковар	5,1
SMD-1 (Б) (Россия)	к/держатель	Сплав W-Cu	6,0
	Основание	ВК94	6,1
	выводы (2 детали)	Сплав WCu+	6,0
	Ободок	Cu	5,5
	Крышка	42H	5,5
SMD-220	к/держатель и выводы	CuSn <sub>0,15</sub>	18,0
	пластмасса	MG-40F	23,0

Примечание: КТЛР кремниевого кристалла 4,2×10<sup>-6</sup> °С<sup>-1</sup>

ции на непланарной поверхности Ti-VNi-Ag включает:

- монтаж кристаллов касетной технологией пайки на припойную прокладку в конвейерной водородной печи ЖК4007А, а также эвтектической пайкой через золотую прокладку толщиной 16 мкм на автомате ЭМ-4085 (в этом случае металлизация на обратной стороне отсутствует);
- проволочный микромонтаж УЗ-сваркой алюминиевой проволокой типа АОЦПоМ-250 мкм, и при этом соединение «исток–внешний вывод» выполняется двумя перемычками (для снижения сопротивления R<sub>си</sub> и обеспечения требуемого предельного выходного тока).

После сборки транзисторов проводят измерение их электрических и тепловых параметров (таблица 2).

Как следует из таблицы 2, электрическое сопротивление R<sub>си отк</sub> (сопротивление сток–исток в открытом состоянии) приборов в корпусах SMD-2 и SMD-220 практически одинаково, а тепловые сопротивления отличаются значительно. Причиной повышенного уровня теплового сопротивления кристалл–корпус R<sub>thjc</sub> могут быть как дефекты сборки, так и недостаточная теплопроводность элементов корпуса.

Тепловую модель мощного транзистора с напаянным на держатель кристаллом можно представить в виде трех многослойных параллелепипедов, которые имитируют кристалл с плоским источником тепла на его поверхности, слой припоя заданной толщины и участок кристаллодержателя, ограниченно-го размерами паяного соединения. Тепловое сопротивление напаянного кристалла можно определить из выражения [4]:

$$R_{thjc} = \sum_{i=1}^3 R_{si} = \frac{1}{\lambda_{Si}} \int_0^{L_{Si}} \left( \frac{dL}{b + LtgB} - \frac{dL}{a + LtgB} \right) + \frac{L_{np}}{\lambda_{np} \times S_{np}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \ln \frac{b+2L}{a+2L} \times \frac{a}{b}, \quad (2)$$

где λ<sub>Si</sub>, λ<sub>np</sub>, λ<sub>Cu</sub> — теплопроводности кристалла, припоя, кристаллодержателя; L<sub>Si</sub>, L<sub>np</sub>, L<sub>Cu</sub> — толщина кристалла, припоя, кристаллодержателя; a и b — размеры источника тепла; tgB — тангенс угла растекания теплового потока.

Из выражения (2) видно, что величина теплового сопротивления R<sub>thjc</sub> в значительной степени зависит от толщины паяного соединения. При толщине паяного соединения, равной 50 мкм, расчетное значение R<sub>thjc</sub> составляет 0,545 °С/Вт.

### Выбор технологии сборки кристаллов

Для сборки MOSFET-транзисторов типа IRF540 в корпусе SMD-2 и пластмассовом корпусе SMD-220 использованы кристаллы размером 4,7×5,6 мм<sup>2</sup> с системой металлизации ТTi-VNi-Ag на непланарной стороне. Монтаж кристаллов на припой PbInAg выполнялся в конвейерной водородной печи типа ЖК4007А при T = 400<sub>-20</sub> °С. Качество присоединения кристаллов оценивалось методами оптического контроля, неразрушающей рентгенотелевизионной диагностики и лазерной микроинтерферометрии. Дополнительно качество паяного соединения оценивалось путем снятия кристалла с кристаллодержателя горячим методом и химическим травлением.

Установлено, что дефекты паяного соединения под кристаллом в виде пустот и непропаев составляют 9–10% площади кристалла для SMD-2 и 12–18% для SMD-220, что обусловлено пассивным процессом монтажа в печи, при котором на кристалл действуют только силы поверхностного натяжения расплава припоя и статическая нагрузка [5]. Для определения устойчивости к термоциклическим нагрузкам были проведены испытания на воздействие термоударов при T = -196...+200 °С, до и после испытаний проконтролированы герметичность и тепловое сопротивление. Динамика отказов по данным критериям приведена на рис. 3.

Приборы варианта А выдержали испытания на воздействие термоударов без отказов, для варианта Б зафиксировано 10% отказов, в то же время для SMD-220 их доля составила 50%. Причинами отказов явились: для SMD-2 (вариант Б) — нарушение сплошности паяного соединения по границе ободок–керамика; для SMD-220 — растрескивание кристаллов и образование микротрещин на границе пластмасса–кристаллодержатель.

Распределение теплового сопротивления кристалл–корпус в зависимости от вида монтажа и типа корпуса приведено на рис. 4. Анализ гистограмм теплового сопротивления в корпусах SMD-2 и SMD-220 показывает, что монтаж



Рис. 3. Динамика отказов после испытаний на термоудары: 1 — SMD-2 (вариант А); 2 — SMD-2 (вариант Б); 3 — SMD-220

кристаллов на припой в корпусе SMD—220 позволяет снизить среднее значение теплового сопротивления практически в 2 раза.

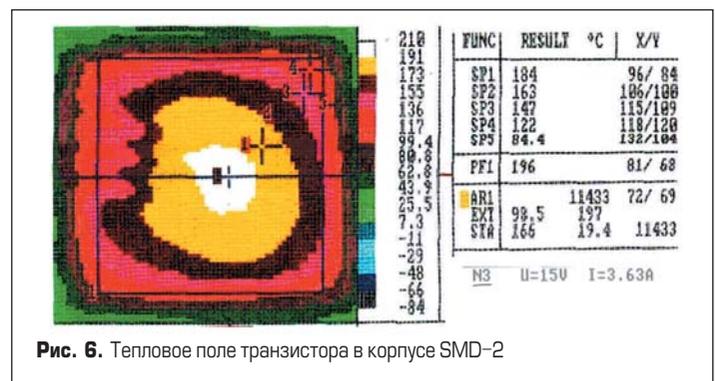
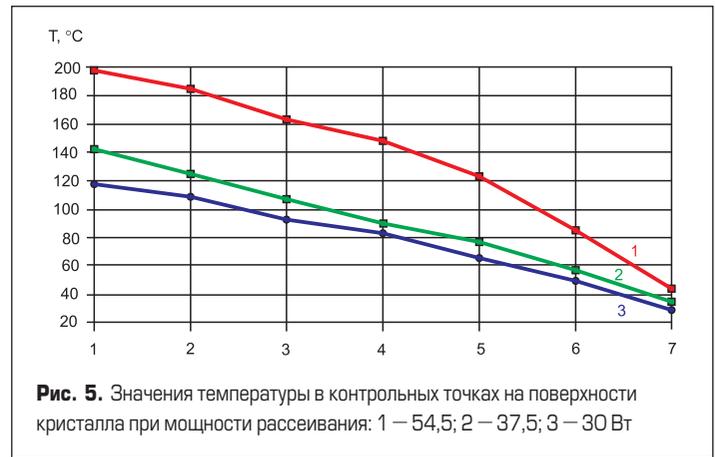
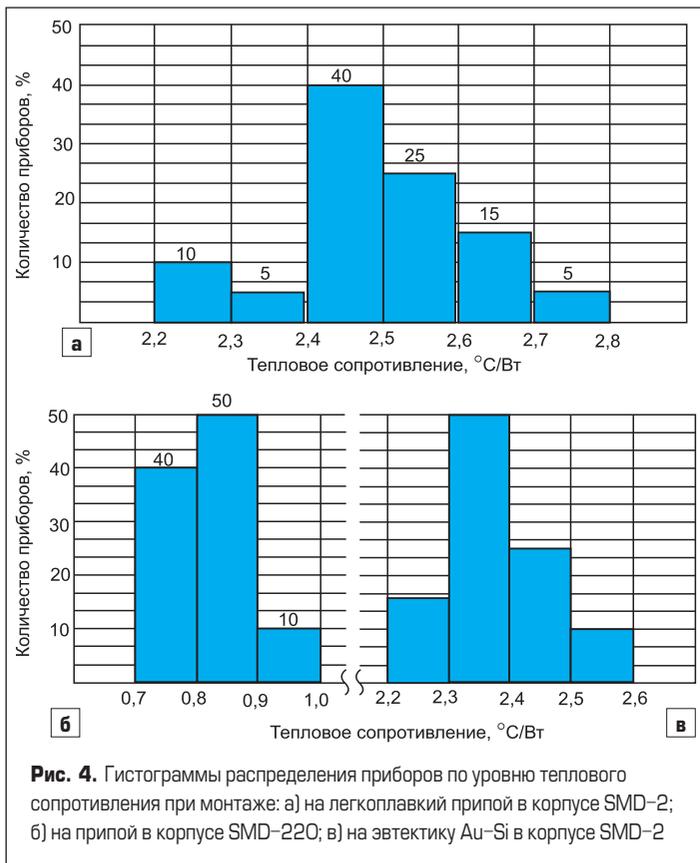
Анализ тепловых полей на тепловизоре не выявил локальных перегревов, способных привести к росту R<sub>thjc</sub>. Рис. 5 и 6 иллюстрируют равномерное, без локальных перегревов распределение теплового поля на поверхности кристалла, что указывает на удовлетворительное качество сборки приборов.

Дополнительное применение активного монтажа кристаллов методом эвтектической пайки через золотую прокладку позволило примерно на 1% уменьшить дефектность паяного соединения под кристаллом (при толщине соединения в пределах 5 мкм), но привело к снижению теплового сопротивления в корпусе в SMD-2 всего лишь на 8%. Основной причиной повышенного уровня теплового сопротивления транзистора является низкая теплопроводность кристаллодержателя из сплава WCu-15, которая составляет 200 Вт/мК, тогда как в корпусе SMD-220 медный кристаллодержатель имеет теплопроводность не ниже 390 Вт/мК. При этом увеличение площади кристалла при сборке в данных корпусах приводит к разным значениям относительного изменения теплового сопротивления ΔR<sub>thjc</sub>/R<sub>thjc исх</sub>.

Так, для корпуса SMD-2 относительное изменение теплового сопротивления на 10–15% меньше, чем в корпусе SMD-220, что, видимо, обусловлено анизотропией теплопроводности в поперечном и продольном направлениях. Для подтверждения этого предположения на пайку кристалла осуществляли через промежуточный слой псевдосплава МД-40, имеющего примерно одинаковую теплопроводность с кристаллодержателем, в результате чего тепловое сопротивление уменьшилось на 29%.

Таблица 2. Электрические и тепловые параметры транзисторов

Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	R <sub>си отк</sub> Ом		R <sub>thjc</sub> °С/Вт	
	SMD-2	SMD-220	SMD-2	SMD-220
20,2	0,026	0,019	2,5	0,90
26,3	0,150	0,139	2,4	0,80
33,0	0,170	0,162	1,5	0,45



Выявленная анизотропия теплопроводности порошкового материала WCu-15 приводит к меньшей эффективной площади кристалла, чем при использовании меди. Поэтому для увеличения эффективной площади кристалла в корпусе SMD-2 было опробовано применение дополнительных теплорастекателей в виде прокладки из меди различной толщины и плакированного материала медь-ковар. Условное изображение монтажа кристалла в корпус SMD-2 через промежуточную прокладку теплорастекателя показано на рис. 7. Применение дополнительного теплорастекателя в корпусе SMD-2 за счет увеличения эффективной площади кристалла и более равномерного распределения тепла позволяет снизить тепловое

сопротивление на 100% [6]. Рассеиваемая мощность  $P_{сmax}$  в корпусе SMD-2 возросла с 30 до 190 Вт (таблица 3).

Для повышения эксплуатационной надежности и формирования согласованного паяного соединения требуется вводить дополнительный согласующий по КТЛР слой, например ковар [7]. Для опробования использовался теплорастекатель из медной ленты, плакированной слоем ковара толщиной 90 мкм. Установлено, что низкая теплопроводность плакированного ковара ухудшает теплопередачу от кристалла к теплоотводу и приводит к уменьшению мощности рассеивания  $P_{сmax}$ .

Таким образом, при производстве мощных MOSFET-транзисторов в стандартном металлокерамическом корпусе SMD-2 с использованием кристаллов площадью не более 30 мм<sup>2</sup> целесообразно в конструкцию приборов вводить дополнительный слой теплорастекателя из меди или биметалла медь-ковар.

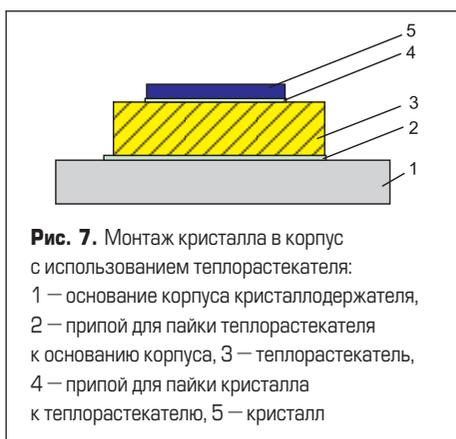
нов мониторов аналитических приборов — рентгенотелевизионного микроскопа МТР-7, лазерного фотоакустического микроскопа ФМ-3М, лазерного микроинтерферометра.

Качество монтажа кристаллов проверялось методом оптического контроля внешнего вида транзистора с использованием микроскопов типа МБС-10 при увеличении 16–32 и ММУ-3 при увеличении 50–100.

С помощью оптического контроля, неразрушающей рентгенотелевизионной диагностики, фотоакустического контроля и лазерной микроинтерферометрии установлено, что дефекты паяного соединения под кристаллом в виде пустот и непропаев составляют всего лишь 9–10% площади кристалла (рис. 8–11).

**Таблица 3.** Тепловые характеристики приборов

Вариант конструкции прибора	$R_{thicr}$ , °C/Вт	$P_{сmax}$ , Вт
Без теплорастекателя	2,5	60
Теплорастекатель из биметалла ковар-медь	1,3	115
Теплорастекатель из меди	0,8	190

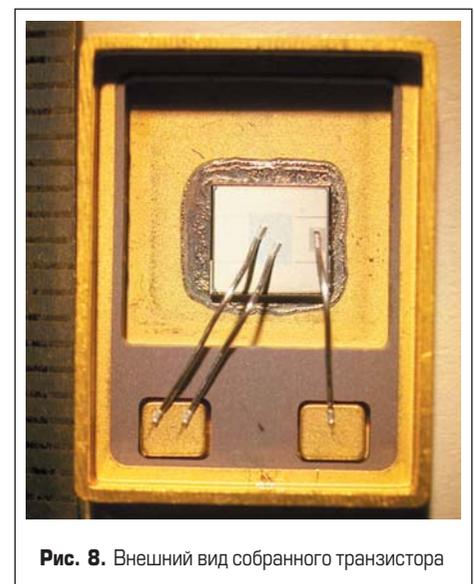


### Исследование качества монтажа кристаллов

Для исследования качества соединений использованы следующие диагностические методы анализа:

- рентгенотелевизионное диагностирование внутренних микродефектов (неплотностей, пористости, неоднородностей, инородных включений и т. д.) в паяном соединении;
- лазерная микроинтерферометрия и фотоакустическая диагностика качества монтажа и оценки напряженно-деформированного состояния кристаллов.

Результаты анализа регистрировались при помощи цифровой фотокамеры HP912 с экра-



Анализ рентгенограмм качества монтажа кристаллов (рис. 10) показал увеличение количества и размеров точечных дефектов в паяном соединении при монтаже на эвтектику Au-Si.

Как видно из лазерных интерферограмм, для варианта пайки кристаллов в конвейерной печи имеет место наличие локальных



Рис. 9. Рентгенограммы качества монтажа кристаллов в конвейерной печи ЖК-4007AA

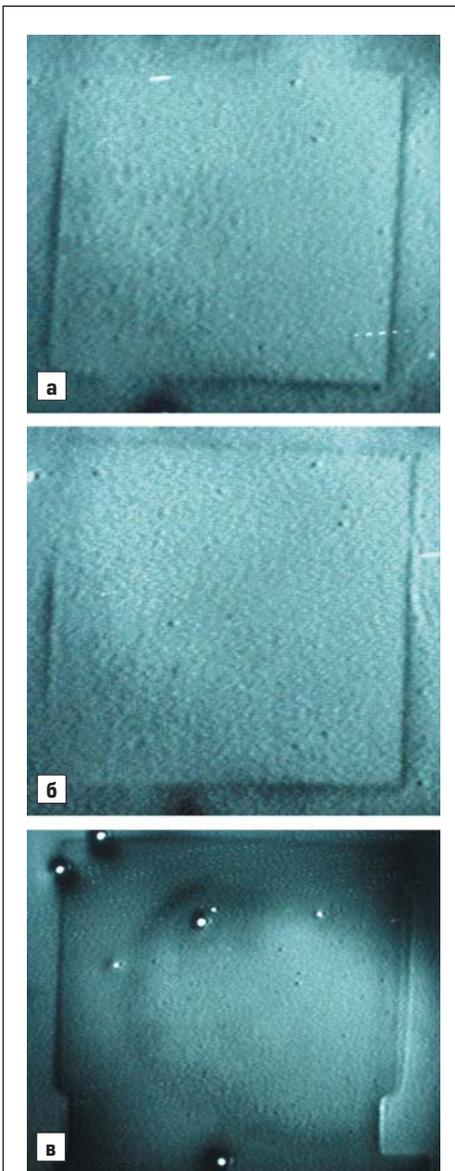


Рис. 10. Рентгенограммы качества монтажа кристаллов на автомате ЭМ-4085: а) на припой ПСр-2,5; б) на Pb-In5-Ag2,5; в) на эвтектику Au-Si

критических растягивающих напряжений на границах пор. Методом лазерной интерферометрии определен уровень напряженно-деформированного состояния напаянных кристаллов, который составил 28–32 МПа для SMD-2 и 30–48 МПа для SMD-220.

Напряженно-деформированное состояние напаянных кристаллов может приводить к изменению электрических параметров, потенциальному трещинообразованию в структуре кристалла и, в конечном итоге, к возможному функциональному отказу транзистора.

Оптимизация процесса монтажа кристаллов позволяет получить надежный технологический процесс с высокой управляемостью, стабильностью и воспроизводимостью тепловых параметров транзисторов. Посадка кристалла на эвтектические сплавы, помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие), имеет и другие недостатки. Ввиду малой пластичности эвтектики Au-Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и рамки в напаянном кристалле возникают значительные механические напряжения.

Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой [8] обеспечивает гомогенизацию паяного соединения, исключает образование дефектов в виде пустот и непропаев, в результате чего снижается уровень термомеханических напряжений активной структуры и переходное тепловое сопротивление кристалл-корпус. При амплитуде

колебаний кристалла 250–500 мкм по криволинейной замкнутой траектории происходит наиболее эффективное удаление оксидных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину припоя в соединении и выход годных по электрическим параметрам изделий до 98%.

## Выводы

Установлено, что монтаж кристаллов на эвтектику Au-Si в металлокерамическом корпусе SMD-2 обеспечивает устойчивость мощных транзисторов к циклическому воздействию температур с перепадом 396 °С. Для получения качественного присоединения монтаж кристаллов необходимо выполнять на оборудовании, обеспечивающем вибрационную пайку с двухкоординатным перемещением кристалла.

При изготовлении мощных MOSFET-транзисторов в стандартном металлокерамическом корпусе SMD-2 с площадью кристаллов до 30 мм<sup>2</sup> достигается мощность рассеивания на уровне 50–60 Вт. Для получения мощности 115–120 Вт необходимо в конструкцию прибора вводить дополнительный слой теплоотрастекателя из биметалла медь-ковар. Использование медного теплоотрастекателя повышает мощность до 190–200 Вт, но в этом случае монтаж кристаллов необходимо выполнять на припой.

## Литература

1. Кундас С. П., Достанко А. П., Ануфриев Л. П. и др. Технология поверхностного монтажа. Минск: Армита-Маркетинг, Менеджмент. 2000.
2. Whitaker G. C. Microelectronics. Second ed. N.Y., CRC, 2006.
3. Omi S., Fujita K. Causes of cracks in SMD and type specific remedies // IEEE Trans.Comp. Hybrid, Manufacture Technology. 1991. №14.
4. Синкевич В. Ф. Физические основы диагностирования предельных состояний и обеспечения надежности мощных транзисторов // Электронная промышленность. 1990. Вып. 6.
5. Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Сборка силовых транзисторов в корпусе SMD-2 для поверхностного монтажа // Современные средства связи. Труды XV Междунар. НТК. Минск. 2009.
6. Рубцевич И. И., Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф. Исследование MOSFET-транзисторов в различных герметичных корпусах для поверхностного монтажа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 5.
7. Рубцевич И. И., Ануфриев Л. П., Ланин В. Л., Керенцев А. Ф. Повышение мощности рассеивания MOSFET-транзисторов в корпусе SMD-2 // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники. Труды X Междунар. НТК. Таганрог. 2004. Ч. 1.
8. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.

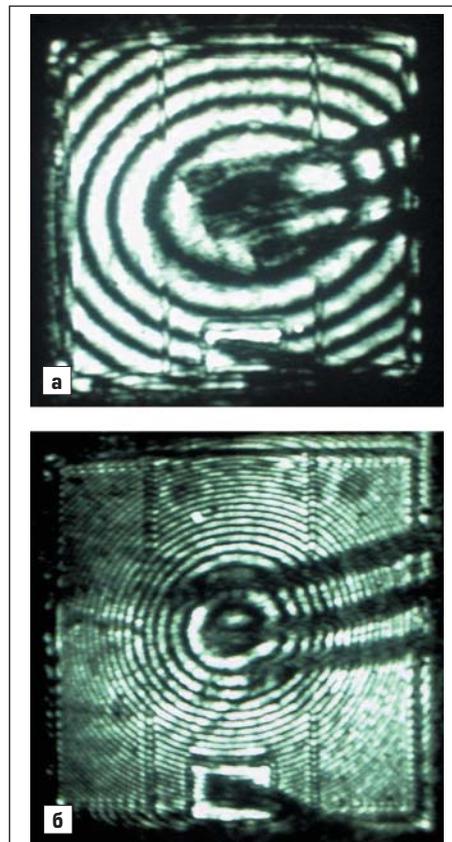


Рис. 11. Лазерные интерферограммы напряженно-деформированного состояния кристаллов: а) монтаж кристаллов в конвейерной печи; б) монтаж кристаллов на автомате ЭМ-4085