

# Перспективные технологии для сборки силовых модулей и приборов

А. Хохлун<sup>1</sup>, С. Чигиринский, к. ф. - м. н.<sup>2</sup>, Р. Шайдуллин<sup>3</sup>

УДК 621.314:621.3.049.776:666.651 | ВАК 05.27.06

Рост мирового потребления электроэнергии влечет за собой увеличение потребности в устройствах силовой электроники для удовлетворения требований по всей цепочке поставок электроэнергии от производителя до конечного потребителя. В то же время рынок стремится к повышению эффективности ее преобразования и использования. Отрасль силовой электроники демонстрирует устойчивый рост, по крайней мере, в течение последних 15 лет. В данной статье приведены некоторые перспективные материалы и технологии сборки силовых модулей для получения изделий с повышенной надежностью, высокими электрическими и эксплуатационными характеристиками.

**В** данной статье под силовым полупроводниковым модулем (СПМ) понимается полупроводниковый прибор для преобразования электроэнергии и управления мощными электрическими нагрузками. Наиболее распространенным сегодня вариантом конструктивного исполнения СПМ является IGBT-модуль.

Обычный IGBT-модуль (Insulated-Gate Bipolar Transistor, по-русски БТИЗ – биполярный транзистор с изолированным затвором, рис. 1) состоит из полупроводниковых кристаллов, пассивных компонентов и межсоединений, под которыми в данном случае подразумеваются как проводочные соединения, так и области контакта кристалла, проводящих и диэлектрических элементов подложки. Из всех этих элементов именно межсоединения внутри модуля являются источником механических отказов из-за разницы коэффициента теплового линейного расширения (КТЛР) между материалами и компонентами в сборке. Типичными отказами являются отрыв проводника или потеря качества паяного соединения, трещины в припое, проводниках и изоляторе подложки.

Не менее важным источником отказов силовых модулей является комплекс причин, вызванных превышением допустимого терморесурса прибора. Возрастающие требования к удельной мощности СПМ на единицу объема / массы приводят к множеству проблем для разработчиков, поскольку силовая электроника требует пространства для ее размещения, генерирует тепло, которое надо отводить. Для силовой электроники, в частности, ориентированной на рынок электротранспорта с его высокими требованиями к удельной мощности и надежности, решающее значение имеет управление терморесурсом

прибора, а именно повышение допустимой рабочей температуры (где это возможно), снижение теплового сопротивления, обеспечение эффективного теплоотвода (где это необходимо).

Повысить энергоэффективность позволяет использование чипов на основе SiC и GaN, отличающихся низкими потерями электроэнергии в самом кристалле, что приводит к уменьшению отводимого теплового потока и, соответственно, габаритов интегрированных систем охлаждения. Данные материалы, несмотря на их более высокую стоимость, получили признание экспертного сообщества и применяются рядом производителей; однако наиболее полно решить задачу повышения рабочих температур и уменьшения тепловыделения полупроводниковых кристаллов можно лишь путем повышения эффективности всех конструктивных элементов силового модуля.

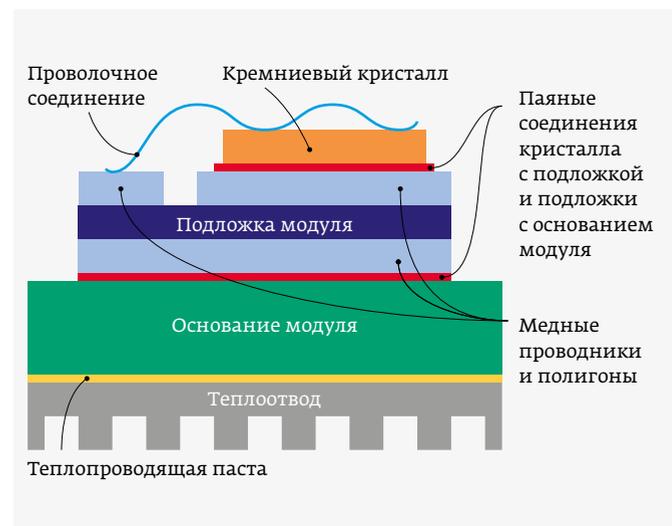


Рис. 1. Типовая конструкция силового модуля [1]

<sup>1</sup> ООО «АКМ», генеральный директор, ark@akmicrotech.ru.

<sup>2</sup> ООО «АКМ», технический директор, sch@akmicrotech.ru.

<sup>3</sup> ООО «АКМ», руководитель направления, raf@akmicrotech.ru.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СБОРКИ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ

Плотность теплового потока силового полупроводникового чипа превышает плотность теплового потока обычной кухонной плиты более чем на порядок и превосходит тепловой поток от микропроцессора [2]. Поэтому конструкция и технология сборки силового модуля должны обеспечивать высокую теплопроводность. Кроме того, корпуса силовых устройств должны отвечать ряду требований, а именно:

- высокая надежность, которая в данном случае определяется в первую очередь стойкостью к термоциклированию;
- высокая электропроводность токоведущих элементов для повышения полезной мощности и снижения электрических потерь (паразитного электрического сопротивления, емкости и индуктивности);
- повышенная электрическая прочность изоляции между элементами модуля.

Решение этих проблем нетривиально, и сегодня это одна из самых востребованных и интересных задач для инженеров. Типовой процесс сборки (корпусирования) силового модуля приведен на рис. 2.

Как отмечалось выше, одной из основных задач, стоящих перед разработчиками СПМ, является максимально эффективный отвод тепла от полупроводниковых кристаллов и элементов конструкции, таких как проволочные выводы и силовые электроды. Нагрев данных элементов является первостепенным фактором, сдерживающим минимизацию размеров устройства. Одним из направлений решения данного вопроса является улучшение характеристик полупроводников, другим – уменьшение теплового сопротивления кристалл-теплоотвод. Для уменьшения теплового сопротивления выбирают материалы с наибольшей теплопроводностью.

Другой важнейшей задачей является максимальное увеличение ресурса готового изделия, особенно при свойствах современной технике импульсных режимах. Основной проблемой здесь является согласование КТЛР используемых материалов. В настоящее время всё большее количество серий СПМ различных производителей

переводится на AMB-подложки (Active Metal Brazing – пайка активными металлами) на основе нитрида алюминия (AlN), напаянные на AlSiC-основания. В качестве диэлектрического материала подложки используется AlN, а для двусторонней металлизации – медь. Уровень стойкости AlN AMB к термоциклированию в несколько раз превышает этот показатель у конструкции из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DBC-подложки (Direct Bonded Copper – прямое присоединение меди), напаянной на медное основание, в которой в качестве диэлектрического материала используется оксид алюминия, а для металлизации – также медь. Модули этого типа, представляющие собой предыдущее поколение СПМ, также предлагаются на рынке и, имея более низкую стоимость, продолжают активно применяться.

Относительно упомянутых выше модулей на новых для силовой электроники типах широкозонных полупроводников SiC и GaN надо отметить, что для максимального раскрытия их характеристик безальтернативно использование подложек на основе AlN и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

## НЕКОТОРЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СБОРКИ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ

В производстве IGBT-модулей используются металлизированные керамические подложки, изготовленные из различных материалов и по различным технологиям. В табл. 1 приведены основные технические параметры таких подложек.

В настоящее время основная масса СПМ делается с применением DBC-подложек на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Несомненными плюсами данного типа подложек являются:

- отработанная технология;
- наличие нескольких производителей;
- массовость продукта;
- низкая цена.

При этом DBC-подложки имеют существенные недостатки, главными из которых являются их низкая теплопроводность и хрупкость эвтектического соединения между керамикой и медью. Технический прорыв по этим параметрам позволяет совершить использование металло-керамических подложек, изготовленных по технологии AMB.



Рис. 2. Типовой процесс сборки относительно сложного СПМ [3]

**Таблица 1.** Основные параметры металлизированных керамических подложек для корпусов силовых модулей

Характеристика	AlN (нитрид алюминия)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (нитрид кремния) <sup>1</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (оксид алюминия) <sup>2</sup>
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,3	3,22	3,72
Теплопроводность, Вт/м·К	>170	90	25
КТЛР, (20~300 °С), ×10 <sup>-6</sup> , К <sup>-1</sup>	4,7	2,7	7,2
Предел прочности при изгибе, МПа	>350	>700	>450
Модуль упругости, ГПа	320	300	340
Тангенс угла диэлектрических потерь (f=1 МГц)	0,0005	0,0003	0,0003
Относительная диэлектрическая проницаемость (f=1 МГц)	9,0	8,0	9,7
Напряжение пробоя, кВ/мм	>15	>15	>25
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	>10 <sup>14</sup>	>10 <sup>14</sup>	>10 <sup>14</sup>
Термоциклирование (от -55 до 155 °С), количество циклов <sup>3</sup>	DBC: 40 AMB: 100-120	AMB: 1000	DBC: 40

<sup>1</sup> По данным ООО «АКМ» (для AlN и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>).

<sup>2</sup> По данным компании Kyocera (Япония) (для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

<sup>3</sup> Значения характеристики «Термоциклирование» нужно понимать как количество циклов до появления отказа при ускоренном испытании. При снижении граничных температур количество термоциклов у приведенных материалов будет увеличиваться пропорционально.

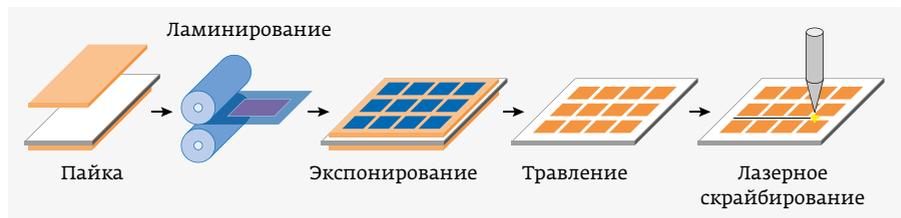
По сравнению с традиционной подложкой DBC, подложка AMB имеет более высокую теплопроводность и прочность соединения со слоем меди, позволяет уменьшить размеры изделия при тех же характеристиках; очень важно также то, что ее коэффициент теплового расширения наиболее близок к КТЛР кремния.

Толщина присоединенной меди по этой технологии (рис. 3) может составлять от 0,3 до 0,8 мм и даже более, что обеспечивает, помимо очень высокой плотности проводимого тока, еще и великолепное рассеивание и отвод тепла. Припой с активным металлом обеспечивает гораздо более высокую адгезию меди к керамике, до 15 Н/мм, а также хорошие демпфирующие свойства. Фото шлифов паяного соединения меди с керамикой AMB-подложек производства ООО «АКМ» приведены на рис. 4.

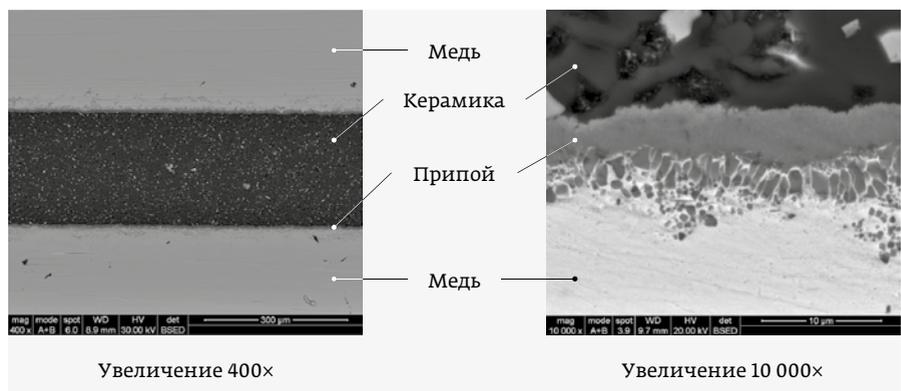
Изготовление AMB-подложек освоено в России, что сокращает сроки поставки продукции потребителям и снимает зависимость от всякого рода санкций.

Дальнейшим направлением развития технологии производства металл-керамических подложек для силовых

модулей будет использование в качестве изоляционного материала нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [4]. Керамика, выполненная на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, сочетает отличную теплопроводность



**Рис. 3.** Схема технологического маршрута производства AMB-подложек



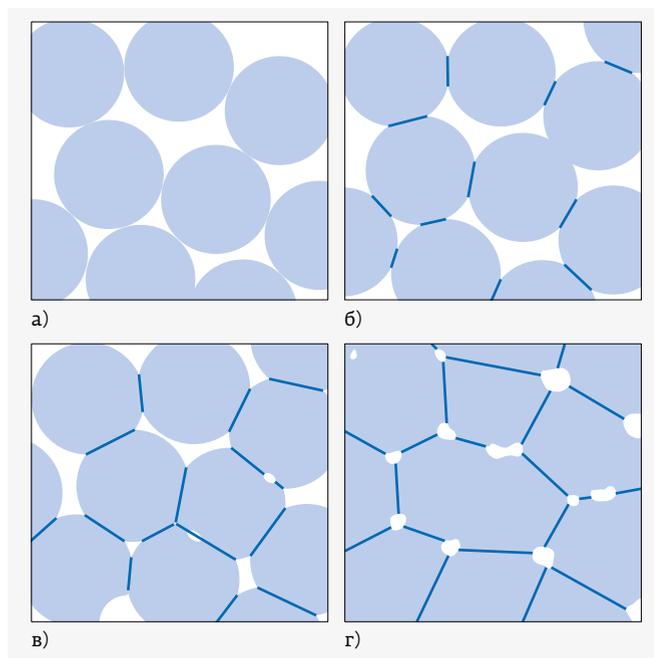
**Рис. 4.** Фотографии шлифов паяного соединения меди с керамикой AMB-подложек производства ООО «АКМ» при различном увеличении

с высокими механическими характеристиками: типовая теплопроводность данного материала находится на уровне 90 Вт/м·К, а предел прочности при изгибе составляет более 700 МПа, так что эта керамика имеет самую высокую из всех имеющихся на рынке устойчивость к развитию трещин. Приведенные параметры позволяют сделать вывод, что керамика на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с металлизацией, выполненной по технологии АМВ, будет иметь высокую надежность при использовании в качестве подложек СПМ. Опытные образцы таких металлокерамических подложек также уже изготавливаются в ООО «АКМ» (то есть в России).

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СПЕКАНИЯ ПРИПОЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (SINTERING)

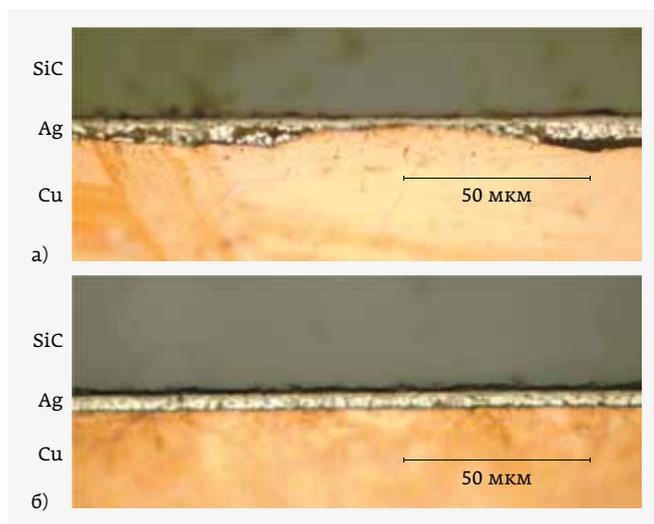
Всё большее распространение в технологии сборки СПМ получают новые технологические процессы, например спекание припоя на основе серебра при повышенной температуре под давлением – синтеринг (англ. – sintering). Давний партнер ООО «АКМ» – компания BESI (Австрия), которая производит автоматические установки посадки кристаллов – имеет много наработок по данной технологии; ниже представлены данные этой компании в части особенностей процесса спекания припоя:

- по сравнению с пайкой спекание не требует фазового перехода, то есть отсутствует необходимость достигать точки плавления материала. Как следствие, спекание может происходить при небольшой температуре;
- действие диффузионных механизмов, создающих связи между частицами, приводит сначала к образованию пористого материала, а затем к уменьшению его пористости (рис. 5);
- в то время как эвтектический припой может работать только ниже температуры его плавления, спеченный материал может работать как ниже, так и выше температуры спекания;
- поскольку во время процесса спекания серебро остается в твердом состоянии, нет никакого смачивающего или капиллярного эффекта, который можно наблюдать при плавлении припоя;
- процесс спекания серебра чувствителен к качеству поверхностей соединяемых элементов;
- спекание под давлением позволяет достичь более качественного соединения, избежать пустот и трещин;
- для процессов без давления спекание ограничено только частицами с субмикронным размером. Таким образом, требуется жесткий контроль за размером частиц;
- для достижения высокой плотности соединения в процессе без давления помогает увеличение времени нагрева, повышение температуры спекания и использование меньшего размера частиц.



**Рис. 5.** Присоединение кристалла посредством спекания под давлением: а – свободные частицы; б – начало процесса; в – промежуточная стадия; г – окончание процесса [5]

Особую важность при использовании технологии синтеринга имеет качество подготовки поверхности металлокерамической подложки и обратной стороны кристалла [5]. На рис. 6 приведены типичные для спекания с использованием серебряного припоя границы раздела «кристалл – припой – металл подложки». Образцы,



**Рис. 6.** Увеличенные изображения границы раздела «кристалл – припой – металл подложки»: а – необработанная DBC-подложка; б – полированная DBC-подложка

показанные на рис. 6а и 6б, различаются только шероховатостью поверхности подложки. В обоих случаях слой серебра очень тонкий – около 10 мкм при начальной толщине нанесения сырой пасты 50 мкм. Поскольку шероховатость поверхности необработанной DBC-подложки имеет тот же порядок, слой серебра недостаточен, чтобы заполнить пустоты. Для полированной подложки шероховатость поверхности намного ниже (несколько десятков нанометров). Соединительный слой имеет гораздо более однородную толщину, что позволяет получить высокую прочность и теплопроводность соединения.

Важно отметить, что такие результаты получены при монтаже прямо на медь (без какой-либо защиты поверхности от окисления, такой как покрытие Ni/Au), и процесс происходил в атмосфере воздуха (то есть в присутствии кислорода).

На текущий момент в промышленности при монтаже кристаллов на подложку СПМ используются четыре метода посадки на спекаемый припой; они схематически показаны на рис. 7.

После монтажа кристалла следует этап выдержки соединения в специальном прессе под давлением (усилие 3–5 кН) при повышенной температуре (100–200 °С) в течение 1–2 ч для спекания припоя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без использования электронных преобразователей электроэнергии сегодня невозможно представить себе такие области, как электросварка, электрохимия, электрометаллургия, станкостроение, автомобильная электроника и, конечно, военная техника. Важный эффект, который достигается с применением преобразователей электроэнергии, основывается на том, что с увеличением рабочей частоты снижаются вес и габариты электрических машин: при переходе с частоты 50 на 400 Гц масса машин уменьшается примерно в два раза. Современные электронные преобразователи позволяют довести рабочую частоту электрических машин, причем большой мощности, до 20 кГц и более. Легкие и мощные электрические машины позволяют, в частности, заменить в авиационной

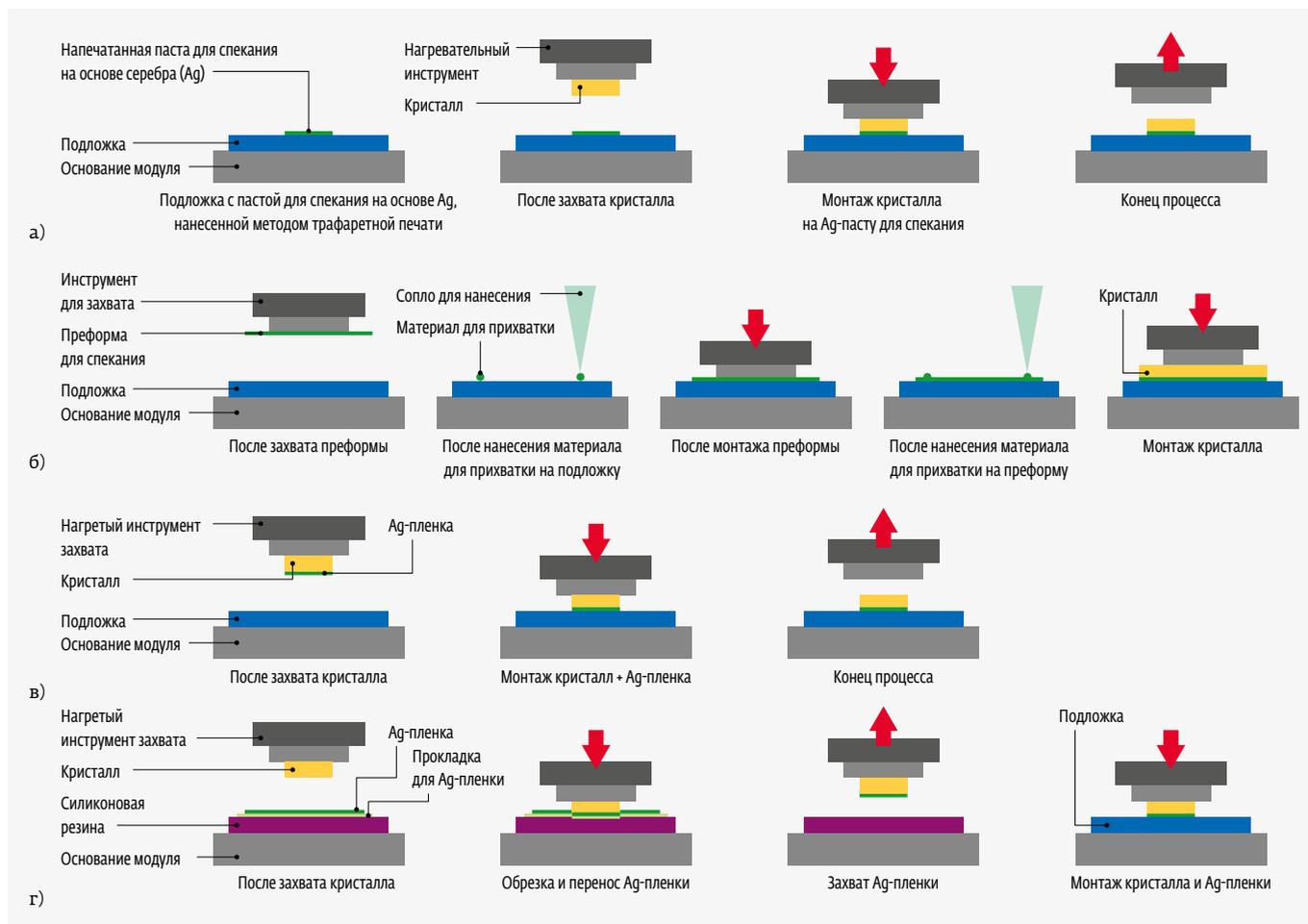
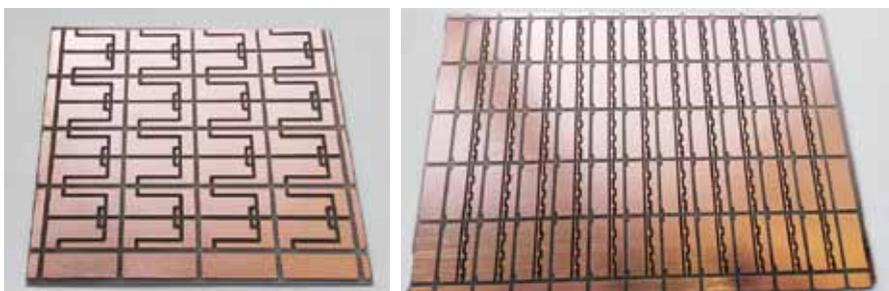


Рис. 7. Основные методы монтажа кристаллов на спекаемый припой: а – предварительное нанесение пасты; б – использованием преформы; в – с переносом материала; г – с ламинированием

ряд гидравлических приводов на более надежные электрические.

Отечественным производителям СПМ для создания устройств современного технического уровня предстоит решить ряд технологических задач, направленных на повышение энергоэффективности и снижение стоимости своих изделий. Наиболее перспективными, на наш взгляд, представляются шаги по внедрению АМВ-подложек из AlN и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, методов вакуумной пайки и современных технологий синтеринга. Отметим, что подложки АМВ производятся всего несколькими заводами за рубежом, поэтому их проблематично купить (тем более внедрить в продукт специального назначения из-за санкционных ограничений). В таких условиях особенно важен тот факт, что ряд перспективных материалов, и в первую очередь АМВ, производится в России (в ООО «АКМ») и уже апробирован отечественными потребителями (рис. 8). Типовые толщины нитрида алюминия и меди для АМВ производства ООО «АКМ» приведены в табл. 2.



**Рис. 8.** Пример подложек АМВ с толщиной керамики AlN 0,38 мм и толщиной меди с двух сторон по 0,3 мм, с вытравленным рисунком по чертежам заказчиков, перед упаковкой: а – подложка размерами 130×140 мм; б – подложка размерами 140×190 мм

**Таблица 2.** Типовые толщины AlN и меди для АМВ производства ООО «АКМ»

Толщина керамики	Толщина меди			
	0,20 мм	0,30 мм	0,50 мм	0,80 мм
0,25 мм	+	+	-	-
0,38 мм	+	+	-	-
0,50 мм	+	+	+	-
0,63 мм	+	+	+	-
1,00 мм	+	+	+	+

Текущее потребление российского рынка покрывается имеющимися производственными мощностями, но в случае увеличения спроса компания «АКМ» готова расширять производство. Результаты апробации будут представлены на нашем ближайшем семинаре, который состоится 19 мая в Москве.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. **Gutierrez E., Lin K., McCluskey P., DeVoto D.** Thermal assessment and in-situ monitoring of insulated gate bipolar transistors in power electronic modules. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/73583.pdf>
2. **Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R.** Semiconductor Power Devices, Physics, Characteristics, Reliability; ISBN 978-3-642-11124-2, Springer 2011.
3. **Гец М.** Подложки из нитрида кремния // Силовая электроника. 2018. № 3. С. 16–18.
4. **Horowitz K., Remo T., Reese S.** A Manufacturing Cost and Supply Chain Analysis of SiC Power Electronics Applicable to Medium-Voltage Motor Drives. National Renewable Energy Technical Report, NREL/TP-6A20-67694, March 2017.
5. **Masson A., Sabbah W., Riva R., Buttay C., Azzopardi S., et al.** Die attach using silver sintering. Practical implementation and analysis // European Journal of Electrical Engineering. 2013. No. 16 (3–4). PP. 293–305.

ООО «АК Микротех»

Комплексные решения в области микроэлектронного и микросборочного производства  
 Поставка, наладка и ремонт технологического оборудования  
 Отработка и постановка технологических процессов  
 Обеспечение материалами и комплектующими

WWW.AKMICROTECH.RU +7 (499) 398 0770 SALES@AKMICROTECH.RU