

Монтаж кристаллов по технологии синтеринга для производства элементов и модулей силовой электроники

В. Иванов¹, Ф. Уголини²

УДК 621.3 | ВАК 05.27.06

Спекание (синтеринг, от англ. sintering) серебра (Ag) – перспективный метод для создания бессвинцового соединения, обеспечивающего более высокие рабочую температуру, теплопроводность и электропроводность, чем у припойных паст и других материалов из бессвинцовых сплавов. В полупроводниковых силовых модулях материал для монтажа кристаллов на диэлектрическую подложку играет существенную роль. В статье мы обсудим современные материалы, применяемые в производстве силовых элементов. Рассмотрим пример спекания частиц Ag при низком давлении на медной (Cu) подложке, на кристалле карбида кремния (SiC) и между ними. Опишем процесс монтажа кристаллов с помощью синтеринга для серийного производства силовых модулей и дадим оценку его качества. Также мы представим оборудование, необходимое для синтеринга и оценки качества процесса. Спекание способно успешно заменить пайку во многих практических применениях, обеспечивая при этом гораздо более высокую и долговременную стабильность рабочих характеристик.

Буквально за последнее десятилетие появилось несколько технологий монтажа кристаллов для сборки надежных высокотемпературных силовых модулей (температура р-п-перехода свыше 175 °С). Некоторые из них основываются на применении дорогостоящих золотых припоев, таких как золото-германий (AuGe) и хорошо известный золото-олово (AuSn), другие используют силы Ван-дер-Ваальса, третьи делают ставку на сплавы и припои олово-сурьма (SnSb) с повышенным содержанием Sb. В целом выбор пал на проверенные и надежные материалы, это вызвано тем, что внедрение и коммерциализация любой новой технологии является сложным процессом и надежнее стартовать с готовыми наработками.

Ag используется для монтажа полупроводниковых кристаллов с 90-х годов прошлого века, а высокая надежность Ag-соединений и их хорошие электрохимические свойства были известны еще раньше. Однако широкому применению препятствовала необходимость использования специального оборудования и низкая пригодность для массового производства по причине высокой температуры плавления Ag. Поэтому технология

синтеринга не одно десятилетие исследовалась и обсуждалась на международных конференциях задолго до внедрения в производство.

Увеличение энергоэффективности требует повышения скоростей преобразования электроэнергии при хорошей устойчивости к высокому напряжению и применения материалов с высокой коммутационной способностью. Силовые элементы на основе материалов с широкой запрещенной зоной (WBG – Wide Band Gap), таких как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC), были исследованы на предмет уменьшения размеров и повышения эффективности преобразования энергии [1]. В первую очередь это вызвано тем, что материалы с WBG обладают высокой электроизоляцией и отлично подходят для повышения эффективности силовых модулей (рис. 1). WBG обеспечивает работу силовых модулей при температурах свыше 250 °С [2], но возникают проблемы в соединении между кристаллом и подложкой, необходимо обеспечить прочность, высокую электро- и теплопроводность.

Обязательно следует подчеркнуть, что переход на SiC позволяет снизить массу и габариты силовых модулей почти в два раза (рис. 2).

Также важное преимущество SiC перед Si – высокая теплопроводность, существенным критерием является коэффициент теплового расширения (КТР). Некоторые значения КТР для материалов, применяемых в силовых

¹ ООО «Остек-ЭК», ведущий специалист, Ivanov.v@ostec-group.ru.

² AMX Automatrix srl., инженер отдела продаж, francesco.ugolini@amx-automatrix.it.



Рис. 1. Переход к сборке силовых модулей высокой мощности

модулях, представлены в табл. 1. КТР напрямую влияет на теплоотвод и на прочность соединения, поскольку при нагреве могут возникать повреждения и пустоты, особенно в слоях материалов между кристаллом и подложкой, поэтому кристаллы для синтеринга должны иметь металлизацию на поверхности соединения с подложкой. Это, как правило, три слоя – слой титана (Ti), слой никеля (Ni) и слой Ag (крайне редко Au), но может быть и два – Ti и Ag.

После монтажа осуществляется сварка кристалла и выводов подложки проволокой, которая тоже играет свою роль и в отводе тепла.



Рис. 2. Выигрыш в массогабаритных показателях, достигнутый за три года за счет внедрения полупроводниковых элементов на базе SiC, на примере инвертора. Источник: ROHM Semiconductor

Таблица 1. КТР различных материалов

Материал	Si ₃ N ₄	Si	SiC/GaN	Ti	Ni	Спеченное Ag	Cu
КТР, 10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹	3,3	2,8	4,2	8,9	13,0	19,5	16,9

Для силовых модулей на базе Si-кристаллов применяют толстую алюминиевую (Al) проволоку или ленту, теплопроводность Al составляет около 2 Вт/см²·°C. Для силовых модулей на базе SiC-кристаллов используется либо чистая, либо покрытая Al толстая Cu-проволока, ее теплопроводность составляет около 4 Вт/см²·°C и при этом ее электропроводность тоже лучше. Учитывая, что самые ходовые в производстве силовых модулей это Cu-подложки, очевидно, что применение Cu-проволоки дает целый ряд преимуществ.

При высокой рабочей температуре припои из бессвинцовых сплавов ненадежны [3], поэтому и возникла острая потребность в синтеринге Ag как альтернативном методе монтажа кристаллов [4, 5]. Есть три варианта монтажа кристаллов при помощи синтеринга Ag: на пасту, прямой с напылением Ag на контактных поверхностях и на фольгу (преформу). Фольга или напыленное Ag на поверхностях при спекании образуют интерметаллические соединения, но для обеспечения качества требуется высокое давление порядка 20 МПа и более, что может привести к повреждению кристалла или деформации подложки. Паста для синтеринга представляет собой смесь монометаллических частиц Ag размером менее 1 мкм с полимером и в данной работе мы рассмотрим применение пасты, в том числе в виде пленки, и ее спекание при высоком давлении, а также вариант при низком давлении 0,4 МПа [6].

ПРОЦЕСС МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕРИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ Ag-ПАСТЫ В ВИДЕ ПЛЕНКИ

Различные материалы для монтажа кристаллов на пленочном носителе в наше время широко используются при производстве ответственных изделий, поскольку они обеспечивают равномерность нанесения материала на контактную поверхность кристалла. Скорость процесса монтажа с применением Ag-пасты для спекания на пленке составляет около 2 мин при давлении от 5 до 10 МПа. Данный метод подходит для широкого спектра изделий, включая сборку силовых модулей, силовых дискретных устройств, тиристоров, мощных светодиодов и силовых СВЧ-устройств [7].

Схема монтажа кристалла по технологии синтеринга с применением пасты в виде пленки представлена на рис. 3. Спекание кристалла и пасты с пленки (часто данный метод называют переносом или ламинированием) удобно проводить на установке монтажа кристаллов

с нагреваемым инструментом и столиком, способным осуществить захват пленки. А вот монтаж кристалла на подложку представляет собой единый принцип, но может осуществляться разными способами. Первый – спекание в специальном прессе для синтеринга при высоком давлении с нагревом пресс-формы и столика. Второй – спекание на установке монтажа кристаллов с нагреваемым инструментом и столиком.

Учитывая скорости процесса, применение установки монтажа кристаллов подходит для исследований, разработок (R&D) и мелкосерийного производства, также



Рис. 3. Принципиальная схема процесса монтажа кристалла с применением Ag-пасты в виде пленки по технологии синтеринга на установке монтажа кристаллов

АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ ПРИГЛАШАЕТ

ОНЛАЙН-СЕМИНАРЫ

30 сентября
11:00

**ЦИФРОВОЕ СБОРОЧНО-МОНТАЖНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО РЭА**
Демонстрация работы элементов решения



06 октября
11:00

**3D-ПЕЧАТЬ И КОМПЬЮТЕРНАЯ
ТОМОГРАФИЯ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**
Демонстрация напечатанных изделий



07 октября
10:00

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД
К КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА СБОРКИ**
Прямое включение из демозала Viscom, Германия



14 октября
10:00

**СКЛАД 4.0: КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ
ДЛЯ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**
Прямое включение из демозала Essegi, Италия



21 октября
10:00

**МОДУЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА FUJI AIMEX
ДЛЯ УСТАНОВКИ КОМПОНЕНТОВ**
Демонстрация работы модульной платформы AIMEX III



28 октября
10:00

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
СБОРОЧНЫЕ ЦЕНТРЫ**
Прямое включение из демозала Essemtec, Швейцария



Онлайн-формат встреч – это удобно и информативно!
Будем рады видеть вас на наших мероприятиях!

в производстве потребуется в зоне монтажа создавать инертную атмосферу с подачей азота (N_2) и возникают некоторые ограничения, связанные с обеспечением доступа для инструмента с кристаллом. В случае с прессом можно спекать групповые заготовки и есть конструкционные исполнения, когда сама пресс-форма и подложка с кристаллами располагаются в герметичной камере с напуском N_2 .

ПРОЦЕСС МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕРИНГА ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Синтеринг при низком давлении интересен для монтажа крупных кристаллов с большой площадью контакта. Подготовка к данному процессу имеет свою специфику и далее мы приведем конкретный пример и представим его результаты.

При подготовке пасты использовались два типа частиц Ag, их изображение, полученное с помощью

сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), продемонстрировано на рис. 4а, б. Один тип представляет собой частицы в форме хлопьев, которые имеют среднюю толщину 260 нм и средний диаметр 2,6 мкм, их распределение по объему показано на рис. 4в. Другой тип частиц Ag имеет сферическую форму со средним диаметром 300 нм и распределением по объему, как показано на графике (рис. 4г).

Частицы были равномерно перемешаны с массовым соотношением 1:1 в спиртовом растворе в ультразвуковой (УЗ) ванне в течение 30 мин. Затем частицы были смешаны в миксере с этиленгликолем с соотношением Ag к этиленгликолю 10:1.

Схема процесса монтажа кристалла с использованием смешанных частиц Ag показана на рис. 5. Во-первых, были подготовлены SiC-кристаллы размерами $3 \times 3 \times 0,5$ мм; $6 \times 6 \times 0,5$ мм; $10 \times 10 \times 0,5$ мм и $15 \times 15 \times 0,5$ мм. Также были подготовлены Si-подложки размером $20 \times 20 \times 1,5$ мм. Далее поверхности кристаллов и подложек были покрыты

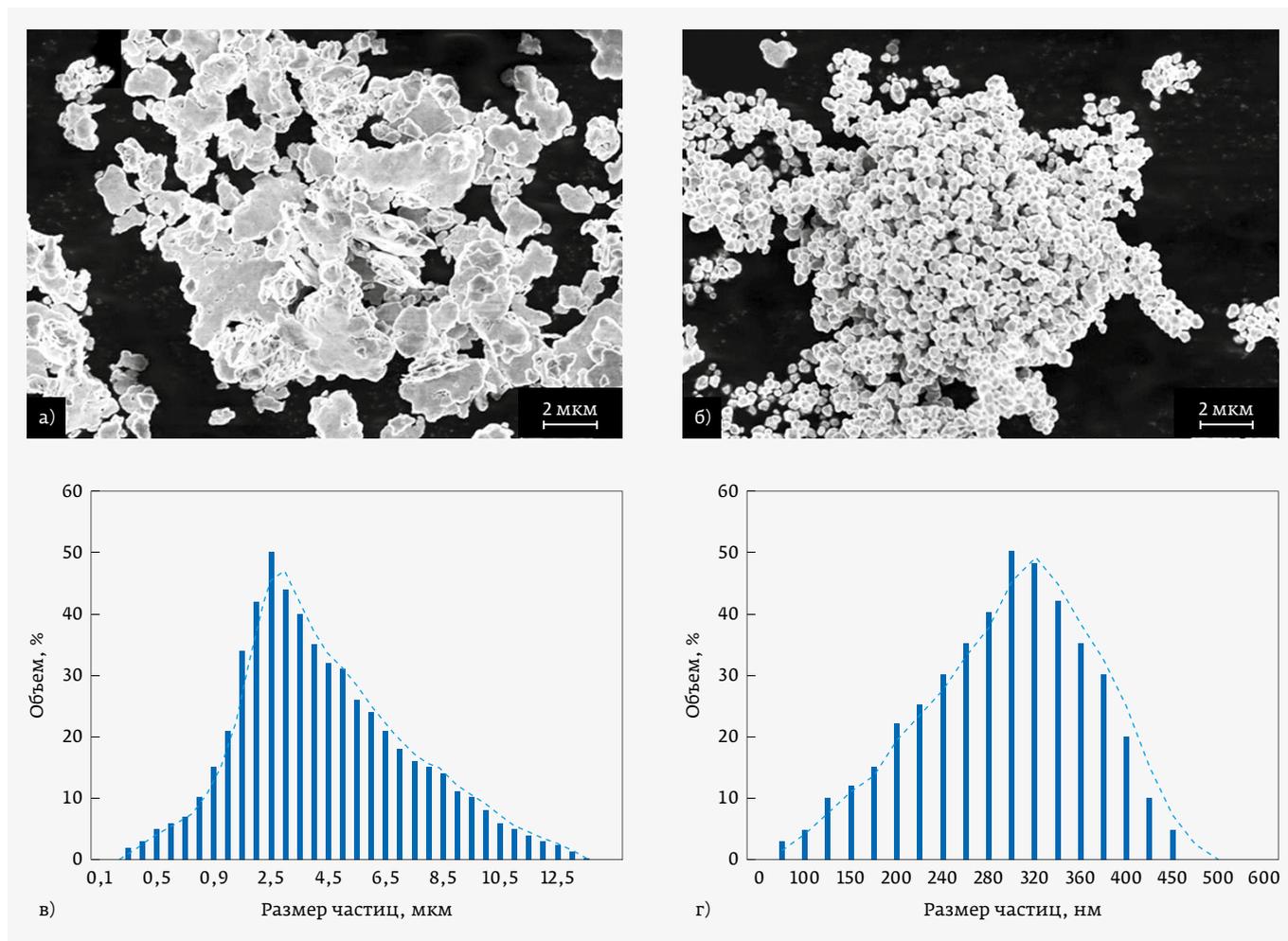


Рис. 4. СЭМ-изображение частиц Ag в форме хлопьев (а) и их распределение по объему (в), сферические частицы (б) и их распределение по объему (г)

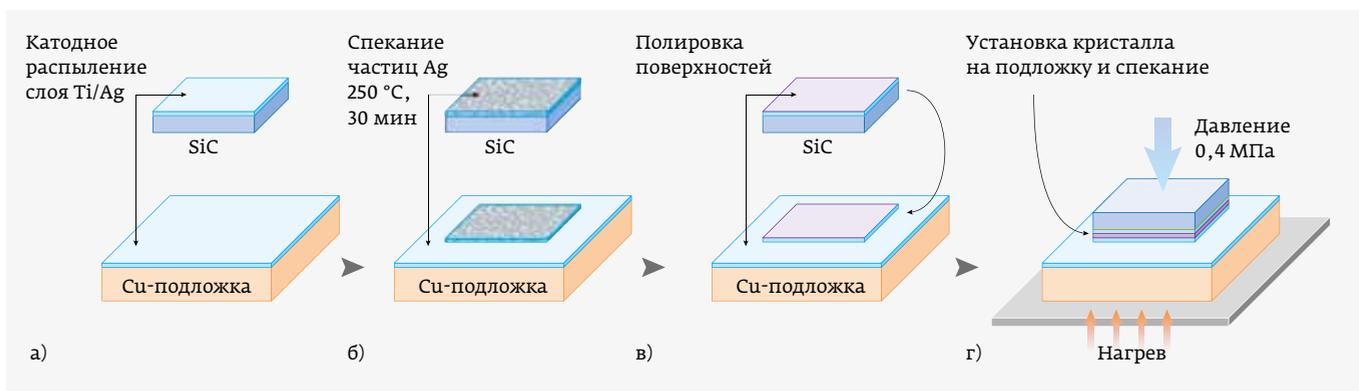


Рис. 5. Схема процесса монтажа кристалла: а – Cu-подложка и SiC-кристалл покрыты слоем Ti/Ag; б – частицы Ag были напечатаны и спекались при 250 °C в течение 30 мин; в – механическая полировка поверхности спеченных частиц Ag; г – SiC-кристалл размещен на Cu-подложке с последующим спеканием под давлением 0,4 МПа

слоем титана Ti (100 нм) и Ag (1 мкм) с помощью катодного распыления, как показано на рис. 5а. Распыленный слой Ag улучшит прочность связи на границах раздела между Cu-подложкой, SiC-кристаллом и спеченными частицами Ag. Затем частицы Ag были нанесены методом трафаретной печати на подложки и кристаллы, затем они спекались с подложками и кристаллами при 250 °C в течение 30 мин при стандартных атмосферных условиях (рис. 5б). При спекании частицы Ag превращаются в твердотельную пористую структуру. После выполнения механической полировки поверхности абразивом (#4000) (рис. 5в) на твердотельной пористой структуре появился плотный поверхностный слой Ag толщиной около 2 мкм. После полировки SiC-кристаллы были установлены на Cu-подложках, как показано на рис. 5г.

На следующем этапе сборка загрузалась в пресс для синтеринга и спекалась под давлением 0,4 МПа при температуре 250 °C и 300 °C в течение 1 ч. На рис. 6а, б показана исходная поверхность и поперечное сечение спеченных частиц Ag. Поверхность выглядит как неровная пористая структура. Рис. 6в, г иллюстрируют полированную поверхность спеченных частиц Ag и ее поперечное сечение.

Полированная поверхность превратилась в сплошную объемную структуру Ag с мелким размером зерна около 100 нм, как показано на рис. 6в. Полированная поверхность имеет среднюю шероховатость 15,3 нм, толщина составляет около

2 мкм рис. 6г. На рис. 7 показаны поперечные сечения границ раздела между SiC-кристаллом, Cu-подложкой и спеченными частицами Ag, полученные на СЭМ. Спеченные частицы Ag с пористой структурой имеют хорошую адгезию с SiC-кристаллом и Cu-подложкой.

МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ СИНТЕРИНГА ДЛЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ

Для силовой электроники на сегодняшний день самым перспективным материалом считается SiC, его уже повсеместно используют в серийном производстве силовых

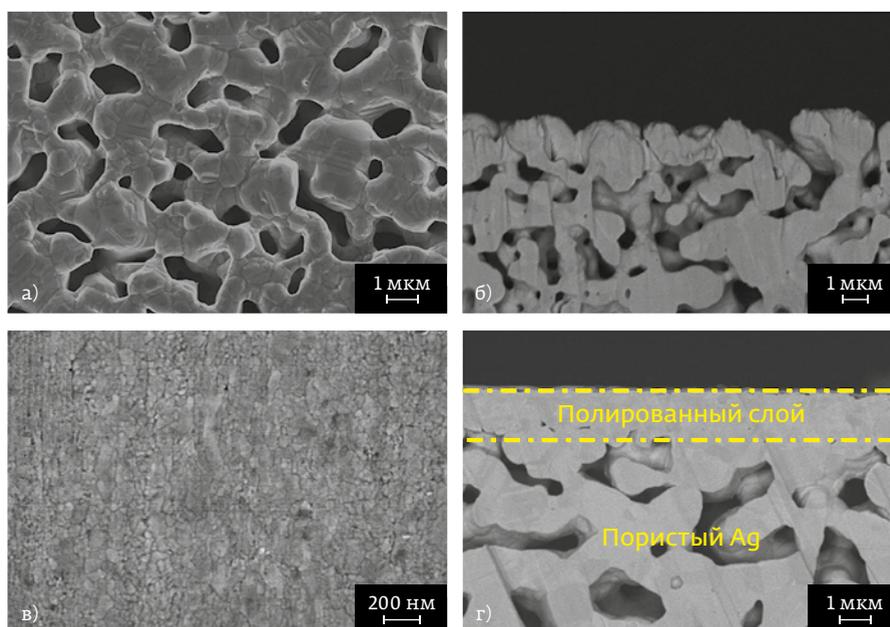


Рис. 6. Изображение поверхности спеченных частиц Ag (а) и их поперечное сечение (б), изображение после полировки поверхности (в) и поперечное сечение после полировки поверхности (г)

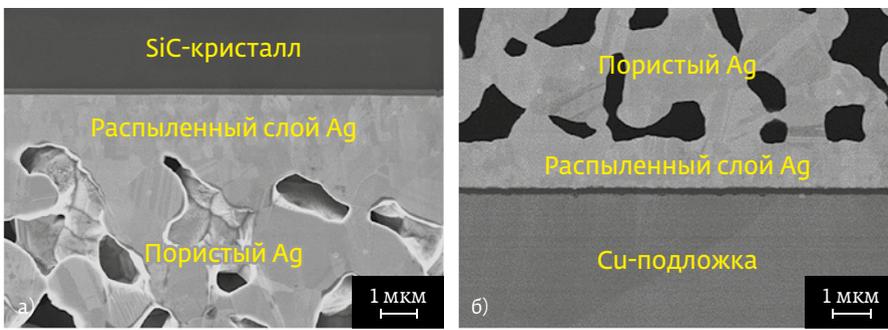


Рис. 7. Поперечные сечения границ раздела между SiC-чипом и спеченными частицами Ag (а), Si-подложкой и спеченными частицами Ag (б)

модулей на базе нескольких полевых МОП-транзисторов (MOSFET) или биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) [8]. Например, компания Tesla, признанный передовой производитель электромобилей, одна из первых начала применять такие решения, а их последняя модель оснащена силовым инвертором, который включает 24 силовых модуля производства STMicroelectronics (Швейцария) на основе SiC.

При серийном производстве в соответствии с формой и местоположением кристаллов применяют стандартные варианты нанесения Ag-пасты на подложку через шаблон или металлическую маску методом трафаретной печати. Потом подложки нагревают, чтобы испарить полимер, входящий в состав, и разместить кристаллы по местам монтажа. В серийном производстве процесс синтеринга проводят в инертной атмосфере для предотвращения окисления металлических поверхностей, само спекание проходит под действием температуры и давления на кристалл.

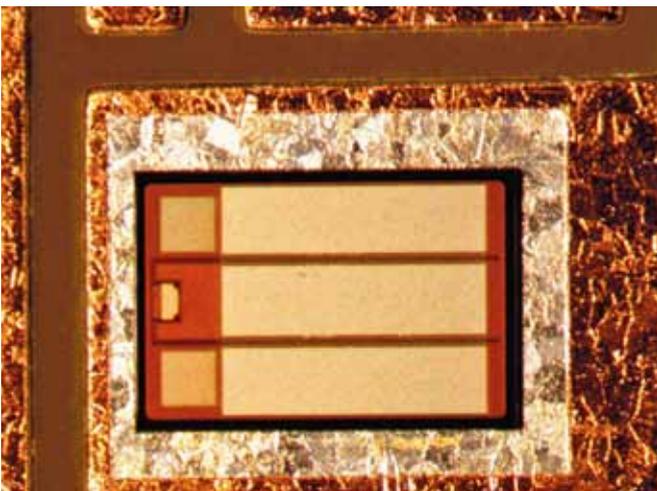


Рис. 8. SiC-кристалл IGBT-модуля, смонтированный по технологии синтеринга.

Источник: AMX Automatrix srl.

Давление в процессе может достигать нескольких десятков МПа и преследует две цели. Во-первых, потребуется более низкая температура для соединения материалов, но при этом после спекания они смогут эксплуатироваться и при более высоких температурах. Во-вторых, снижается образование пустот, которые со временем вызывают расслоение и растрескивание связующего слоя между кристаллом и подложкой, что в свою очередь приводит к возникновению высо-

ких токов и выходу модуля из строя. На рис. 8 представлен SiC-кристалл IGBT-модуля, смонтированный по технологии синтеринга.

Большинство стандартных пресс-форм для синтеринга представляет собой единую конструкцию, однако толщина кристаллов будет варьироваться от партии к партии и менее тонкие кристаллы в итоге не будут качественно смонтированы. Даже использование многопоршневой пресс-формы, в которой реализована возможность оказывать давление на группы кристаллов на одной подложке, не решает проблему варьирования толщины кристаллов, поскольку контактная поверхность штампов всегда плоской формы. Уникальная конструкция пресс-формы для решения данной проблемы разработана и запатентована итальянской компанией AMX Automatrix srl. (далее AMX) [9], в ней для каждого кристалла предусмотрен свой штамп (рис. 9).

Самыми распространенными подложками для синтеринга являются DBC (Direct Bonded Cooper), когда Si-фольга и керамическая подложка Al₂O₃ или AlN (с одной или двух сторон) непосредственно соединяются при высокой температуре. На одиннадцатой Международной конференции по силовой электронике [10] рассматривали применение альтернативных видов, таких как изолированные металлические подложки (IMS – Insulated Metal Substrate), медные выводные рамки и высокотемпературные печатные платы. Независимо от применяемых подложек при спекании связующий слой между кристаллами и подложкой должен быть практически без пустот. Для проверки пустот требуется сканирующая акустическая микроскопия (SAM – Scanning Acoustic Microscopy), поскольку рентгеновские методы не всегда работают из-за необходимой высокой мощности излучения для проникновения через металлические слои подложки и кристалла. На рис. 10 представлены результаты анализа качества монтажа кристаллов SiC с применением пресс-формы и пресс-формы с микроштампами.



ПАТРОНАЖ ТПИ РФ

21-24

СЕНТЯБРЯ 2021

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Radel

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА РАДИОЭЛЕКТРОНИКА & ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ
- ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ДРУГИЕ НОСИТЕЛИ СХЕМ
- СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ
- РОБОТОТЕХНИКА
- КОНСТРУКТИВЫ
- МАТЕРИАЛЫ
- ТЕХНОЛОГИИ
- ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТЫ
- КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ



radelexpo.ru (812) 718-35-37

ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ:



FarEXPO | **FE**[®]

Международная выставка в сфере радиоэлектроники

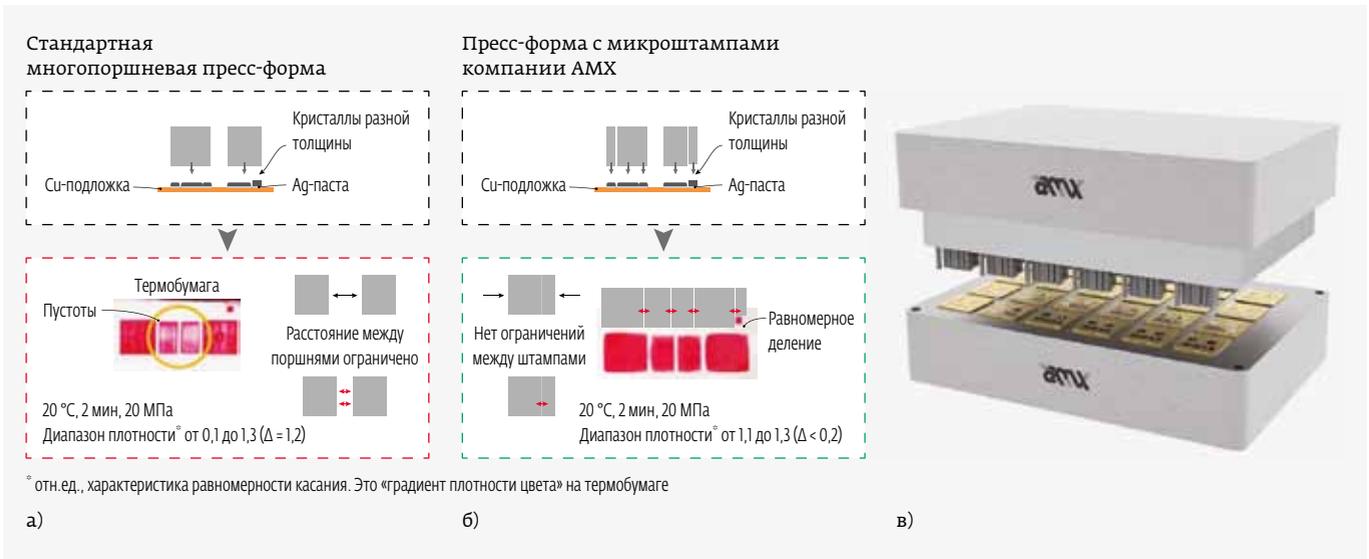


Рис. 9. Оценка качества давления на кристаллы разной толщины на одной подложке многопоршневой пресс-формы (а); пресс-формы с микроштампами компании АМХ (б); 3D-модель пресс-формы с микроштампами на 24 DVC-подложки (в)

ОБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ Ag-Ag ПРИ СПЕКАНИИ

Для стандартных условий синтеринга соединение Ag-Ag образуется при высокой температуре и большом давлении в рамках механизма диффузии, который уже описан в нашей статье о технологии микросварки [11]. То есть базовые

физические принципы образования интерметаллических соединений при спекании аналогичны термокомпрессии. Но образование соединения Ag-Ag при низком давлении 0,4 МПа нельзя отнести к механизму диффузии. На рис. 10а показана поверхность полированного слоя Ag после спекания при 300 °С в течение 1 ч. На поверхности появилось

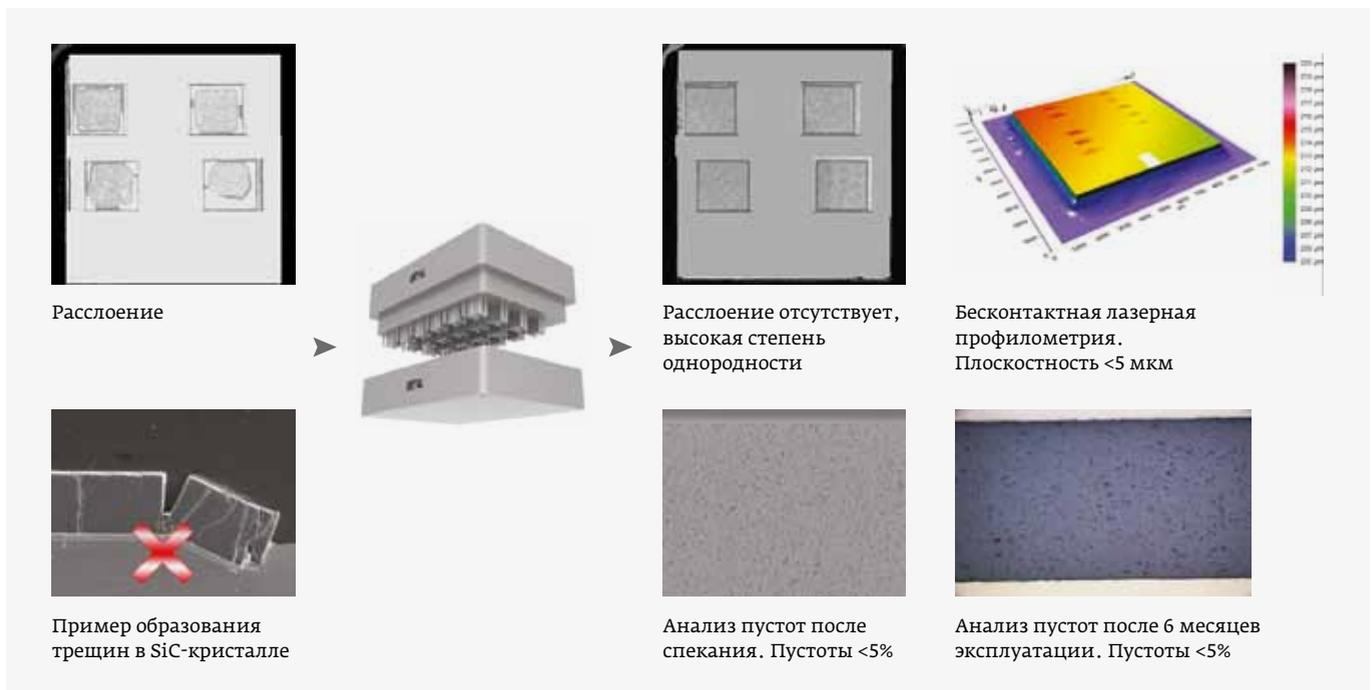


Рис. 10. Качество монтажа SiC-кристаллов по технологии синтеринга на оборудовании компании АМХ с помощью пресс-формы с микроштампами

В рамках
Российской
промышленной
недели

SEMIEXPO RUSSIA

**МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ТЕХНОЛОГИИ | МАТЕРИАЛЫ | ОБОРУДОВАНИЕ
В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

19 – 20 октября 2021
ЦВК «Экспоцентр», Москва



ОТРАСЛЕВЫЕ ОБЗОРЫ

Конкурентный анализ рынка
и стандарты, маркетинговые
исследовательские программы



ИННОВАЦИИ

Новые разработки, международные
проекты и локальные компетенции



СОТРУДНИЧЕСТВО

Стратегические инициативы,
международные институты развития
и ведущие мировые ассоциации



БИЗНЕС

Локальные партнеры, новые
заказчики и поставщики,
старт-апы и консорциумы



Организатор:
Business Media Russia

bmr

+7 495 649 69 11

Подробная информация
и бесплатный билет

www.semiexpo.ru



@semiexporussia

большее количество бугорков с высокой плотностью, их диаметр различен: от десятка до ста нанометров, как показано на рис. 11б. Образование соединения Ag-Ag между этими бугорками и SiC-кристаллами, заранее покрытыми распыленным слоем Ag, возникает как раз за счет роста бугорков. Это явление может играть ключевую роль в прочности соединений Ag-Ag, полученных спеканием при низком давлении.

Получается, что атомы диффундируют из областей с более высоким напряжением сжатия в области с более низким напряжением. Для полированной структуры спекенного слоя Ag сжимающее напряжение вызвано различными свойствами пористого слоя и его полированной поверхности. Напряжение сжатия для роста бугорков в горизонтальном направлении по осям x и y можно рассчитать по следующей формуле [12]:

$$\sigma_x = \sigma_y \approx \frac{E_{Ag} \Delta T (a_1 - a_2)}{(1 - \mu_{Ag})}, \quad (1)$$

где $E_{Ag} = 76$ ГПа – модуль Юнга для Ag, ΔT (°C) – разница между температурами нагрева и комнатной, $\mu_{Ag} = 0,37$ – коэффициент Пуассона для Ag, $\alpha_1 = 18,9$ мкм/(м·°C) и $\alpha_2 = 17,5$ мкм/(м·°C) – КТР пористого и полированного слоев Ag, соответственно.

$$\sigma_z \approx 0, \quad (2)$$

$$\sigma_{Ag} \approx \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}. \quad (3)$$

В вертикальном направлении (по оси Z) напряжение равно нулю. Гидростатическое напряжение с направлением сжатия в этом случае рассчитывается при различных температурах процесса. Напряжения сжатия составляют $-25,33$ и $-30,96$ МПа при температурах нагрева 250 и 300 °C. Таким образом, напряжение увеличивается с повышением температуры процесса и рост бугорков можно контролировать, регулируя температуру.

На рис. 12 показано поперечное сечение границы раздела Ag-Ag при 300 °C, площадь контакта составляет более 90% и пустоты практически отсутствуют, это вызвано высокой плотностью роста бугорков, как показано на рис. 11а.

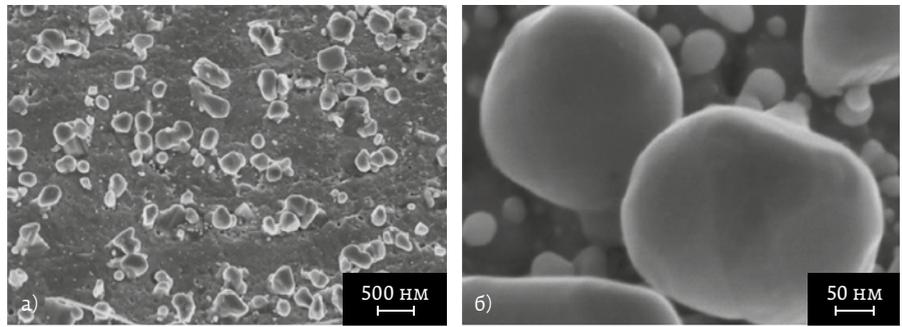


Рис. 11. СЭМ-изображение полированного слоя Ag после спекания (а); увеличенное изображение бугорков (б)

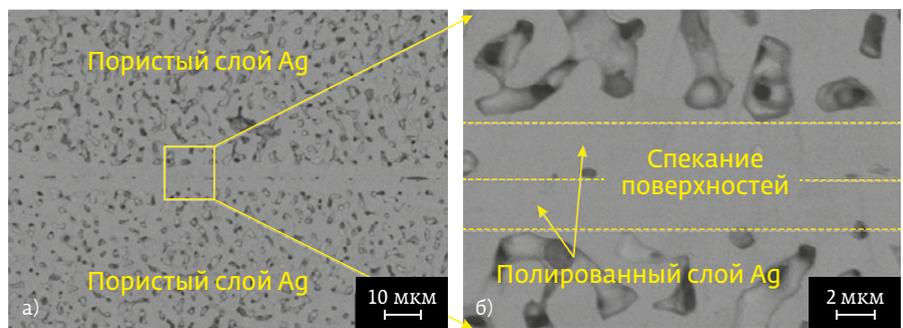


Рис. 12. Изображение поперечного сечения границы раздела Ag-Ag (а); увеличенное изображение границы раздела (б)

ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ КРИСТАЛЛ-ПОДЛОЖКА НА СДВИГ И УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО СЛОЯ Ag

Чтобы исследовать влияние толщины связующего слоя на прочность соединения на сдвиг, частицы Ag перед синтерингом были нанесены слоями различной толщины: 50, 75, 100, 150 и 250 мкм. Прочность на сдвиг измерялась на оборудовании Nordson Dage [13] при скорости сдвига 50 мкм/с. Наконечник инструмента был установлен параллельно границе соединения.

Nordson Dage является партнером «Остек-ЭК», это подразделение компании Nordson Electronics Solutions, которое производит оборудование под различные задачи в области исследований и производственного контроля материалов. Системы Nordson Dage (рис. 13) обладают гибкостью за счет применения различной оснастки и уникальных быстросменных картриджей с нагрузками на сдвиг до 200 кг, при нажиме до 50 кг и на отрыв до 50 кг, что позволяет экономить время и проводить комбинированные испытания сложных сборок.

На рис. 14а показана прочность на сдвиг при различных размерах кристалла (погрешность рассчитана для стандартного отклонения). Средняя прочность на сдвиг составила около 25 МПа и превышала 30 МПа для кристаллов, спекенных при температуре 300 °C. Полученные



Рис. 13. Варианты конструкций систем Dage: а – полуавтоматическая; б – автоматическая; в – автоматическая в корпусе с дверцами, включая блок фильтров и ионизаторы для работы в чистых помещениях

результаты превышают прочность на сдвиг традиционных припоев SnPb, которая составляет около 19–24 МПа [14]. Что наиболее важно, прочность не изменилась с увеличением размера кристалла (около 30 МПа даже для кристаллов размером 15 × 15 мм). Кроме того, прочность на сдвиг практически не изменилась с увеличением толщины связующего слоя, как показано на рис. 14б. Это указывает на то, что термомеханическое напряжение можно уменьшить за счет увеличения толщины твердого пористого слоя Ag.

Электрические характеристики связующего слоя кристалл-подложка имеют решающее значение для работы электронного устройства, поскольку они влияют на эффективность электронного тракта. Поэтому удельное электрическое сопротивление твердой пористой структуры Ag измеряли с использованием четырехзондового метода с помощью измерителя удельного поверхностного сопротивления Loresta GP T610 (Mitsubishi, Япония). Удельное электрическое сопротивление спеченного пористого Ag с различной толщиной показано на рис. 14в. Удельное сопротивление составляет $6,97 \pm 0,58$; $7,25 \pm 0,76$ и $7,38 \pm 0,36$ мкОм · см при толщине 200, 400 и 600 мкм соответственно. Удельное сопротивление существенно не меняется при изменении толщины слоя и это значит, что даже для кристаллов большего размера удельное электрическое сопротивление связывающего слоя фактически поддерживает постоянное значение.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕРИНГА

Технологическим партнером «Остек-ЭК» при решении любых задач, связанных с синтерингом, является компания AMX, которая предлагает широкий выбор моделей прессов для спекания (рис. 15) для различных применений: R&D и создание прототипов, массовое производство с возможностью встраивания в конвейерную линию

с высокой производительностью. Преимущества оборудования AMX:

- высокая точность даже у младших моделей;
- рабочая зона от 75 × 75 мм до 300 × 300 мм;
- максимальное усилие до 980 кН;
- максимальная температура 350 °С;
- единая система контроля давления, температуры и качества с функцией мониторинга процесса спекания в реальном времени;
- контролируемая атмосфера (N₂ или другой инертный газ);
- зона предварительного нагрева и последующего охлаждения;
- запатентованная конструкция пресс-формы с микроштампами (Micro-punch) позволяет оказывать равное давление на кристаллы разной толщины.

В заключение отметим, что технология синтеринга с применением Ag имеет множество преимуществ перед другими методами обработки материалов в процессе монтажа кристаллов при сборке силовых модулей:

- высокая электро- и теплопроводность;
- высокая температура плавления >900 °С;

ООО "Руднев-Шляев"

Разработка и производство:

- платы сбора данных
- измерительные приборы
- виброакустические системы
- инструментальные решения задач заказчика

Москва (495) 787-63-67
(495) 787-63-68

www.rudshel.ru
adc@rudshel.ru

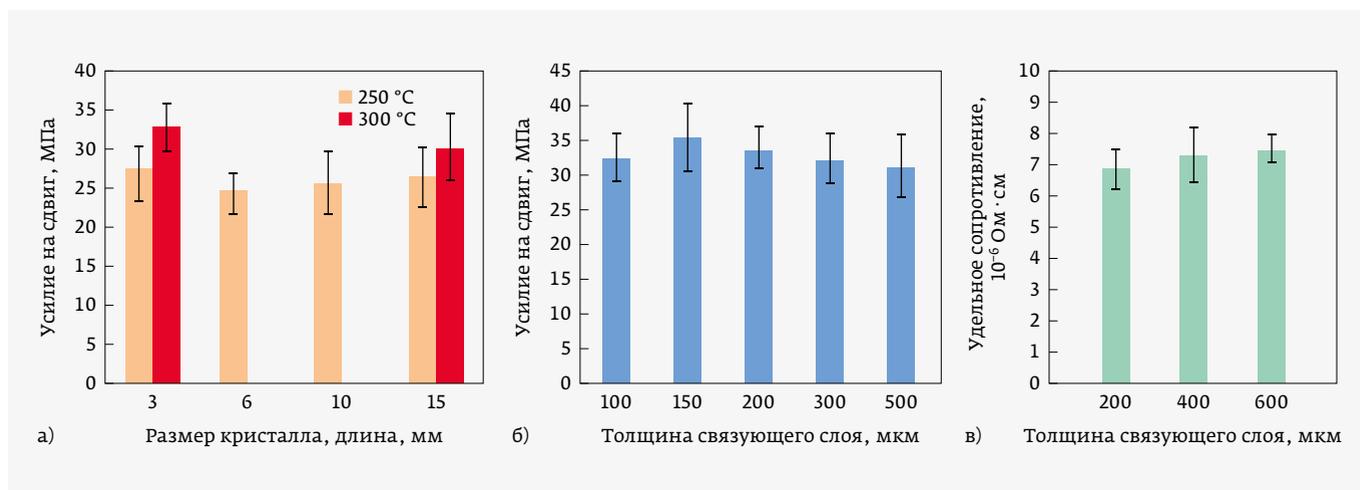


Рис. 14. Прочность на сдвиг кристаллов с различной площадью соединения (а); прочность на сдвиг кристаллов с разной толщиной связующего слоя (б); удельное электрическое сопротивление при разной толщине связующего слоя Ag (в)

- повышение срока службы изделий до 100 раз в сравнении с пайкой;
- при переходе на сборки с элементами на базе SiC-кристаллов снижает потери мощности на 75% (при температуре кристалла 150 °C).

Перспективные направления для синтеринга:

- 3D-сборка за счет применения Micro-punch;
- монтаж чувствительных элементов;
- исследование взаимодействия различных материалов и поверхностей в процессе спекания.

При синтеринге следует обратить внимание на ряд факторов:

- для более качественных соединений требуется двух- или даже трехслойная металлизация контактной поверхности кристалла;
- для обеспечения качества процесса требуется инертная атмосфера;
- требуется точный контроль давления и температуры.

На сегодняшний день передовые производители силовых элементов и модулей перешли на новые

полупроводниковые материалы и синтеринг является самым подходящим решением для монтажа кристаллов. Спекание обеспечивает высокое качество соединения кристалл-подложка практически без пустот. При использовании Ag повышается производительность и надежность готовых изделий за счет количественных преимуществ по электро- и теплопроводности. В серийном производстве модулей на базе нескольких кристаллов минимизация рисков образования пустот под ними при групповом монтаже за один цикл играет важную роль и для этого разработаны уникальные инструменты, такие как многопоршневые пресс-формы и пресс-формы с микроштампами.

На сайте ООО «Остек-ЭК» представлены подробные материалы о системах монтажа кристаллов. По всем вопросам, связанным с синтерингом и другими технологиями, оборудованием, оснасткой и инструментами для производства микроэлектроники, обращайтесь по телефону: +7 495 877-44-70 или по e-mail: micro@ostec-group.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kaminski N., Hilt O.** SiC and GaN devices – competition or coexistence? – 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS). 2012. PP. 1–11.
2. **Chalker P. R.** Wide bandgap semiconductor materials for high temperature electronics // Thin Solid Films. 1999. V. 343–344. PP. 616–622.
3. **Chin H. S., Cheong K. Y., Ismail A. B.** A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices // Metallurgical and Materials Transactions B. 2010. V. 41. PP. 824–832.
4. **Siow K. S.** Mechanical properties of nano-silver joints as die attach materials // Journal of Alloys and Compounds. 2012. V. 514. PP. 6–19.

ООО СМП
 ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
 www.SMD.ru
 электронные компоненты для поверхностного монтажа
 НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК
 • Керамические конденсаторы до 100 мкф
 • Синфазные дроссели на ток 10 А
 Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32, e-mail: sale@smd.ru
 Тел.: (499) 158-7356, (495) 948-6244, (499) 943-8780



Рис. 15. Модельный ряд оборудования для синтеринга компании AMX

5. Wang T., Chen X., Lu G.-Q., Lei G.-Y. Low-temperature sintering with nano-silver paste in die-attached interconnection // Journal of Electronic Materials. 2007. V. 36. PP. 1333–1340
6. Chen C., Sugauma K. Solid porous Ag-Ag interface bonding and its application in the die-attached modules // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2018. V. 29. PP. 13418–13428.
7. Yan H., Liang P., Mei Y., Feng Z. Brief review of silver sinter-bonding processing for packaging high-temperature power devices, Chinese Journal of Electrical Engineering. 2020. V. 6. PP. 25–34.
8. Rhodes J., Govier J. Joining Forces: Sintered Die Attach // e-mobility technology international. 2021. V. 9. PP. 96–97.
9. <https://www.amx-automatrix.it/>
10. <https://www.cips.eu/en/2020>
11. Иванов В. И. Специфика технологии термовзвучковой сварки медной проволокой выводов микросхем, компонентов и силовых элементов // Вектор высоких технологий. 2021. № 1 (51). С. 26–34.
12. Lu Y., Li Y., Saka M. Growth of Ag micro/nanoparticles using stress migration from multilayered metallic structure // Applied Surface Science. 2015. V. 351. PP. 1011–1015.
13. <https://www.nordson.com/en/divisions/dage/bondtesting-systems>
14. Maruyama M., Matsubayashi R., Iwakuro H., Isoda S., Komatsu T. Silver nanosintering: a lead-free alternative to soldering // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2008. V. 93. PP. 467–470.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 2600 руб.
за два тома

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ. СПРАВОЧНИК В 2-Х КНИГАХ Под ред. К. Кумбза

В издании рассматриваются все процессы создания и применения печатных плат: проектирование и выбор базовых материалов, изготовление, обеспечение качества и оценки надежности печатных плат и печатных узлов, монтаж плат, включая особенности бессвинцовых технологий пайки, а также методы и средства испытаний применительно к специальным требованиям. Шестое издание дополнено информацией по ценообразованию, количественной оценке технологичности плат, управлению производством и решению экологических проблем.

Все изменения в технологии изготовления печатных плат нашли свое отражение в этой книге, что привело к тому, что более 75% ее глав были либо исправлены, либо являются новыми, свидетельствуя, что шестое издание содержит самую последнюю информацию.

Цель книги состоит в том, чтобы предоставить нужную информацию насколько возможно в более конкретном и подробном виде, используя промышленные стандарты там, где они существуют, и передовой опыт, имеющий технологическое обоснование и продемонстрировавший свою работоспособность там, где соответствующих стандартов нет.

Справочник рассчитан на широкий круг специалистов-технологов, конструкторов, схемотехников и специалистов по надежности.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2018. – 2032 с.,
ISBN 978-5-94836-258-8
Т. 1. – 1016 с. Т. 2. – 1016 с

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru