

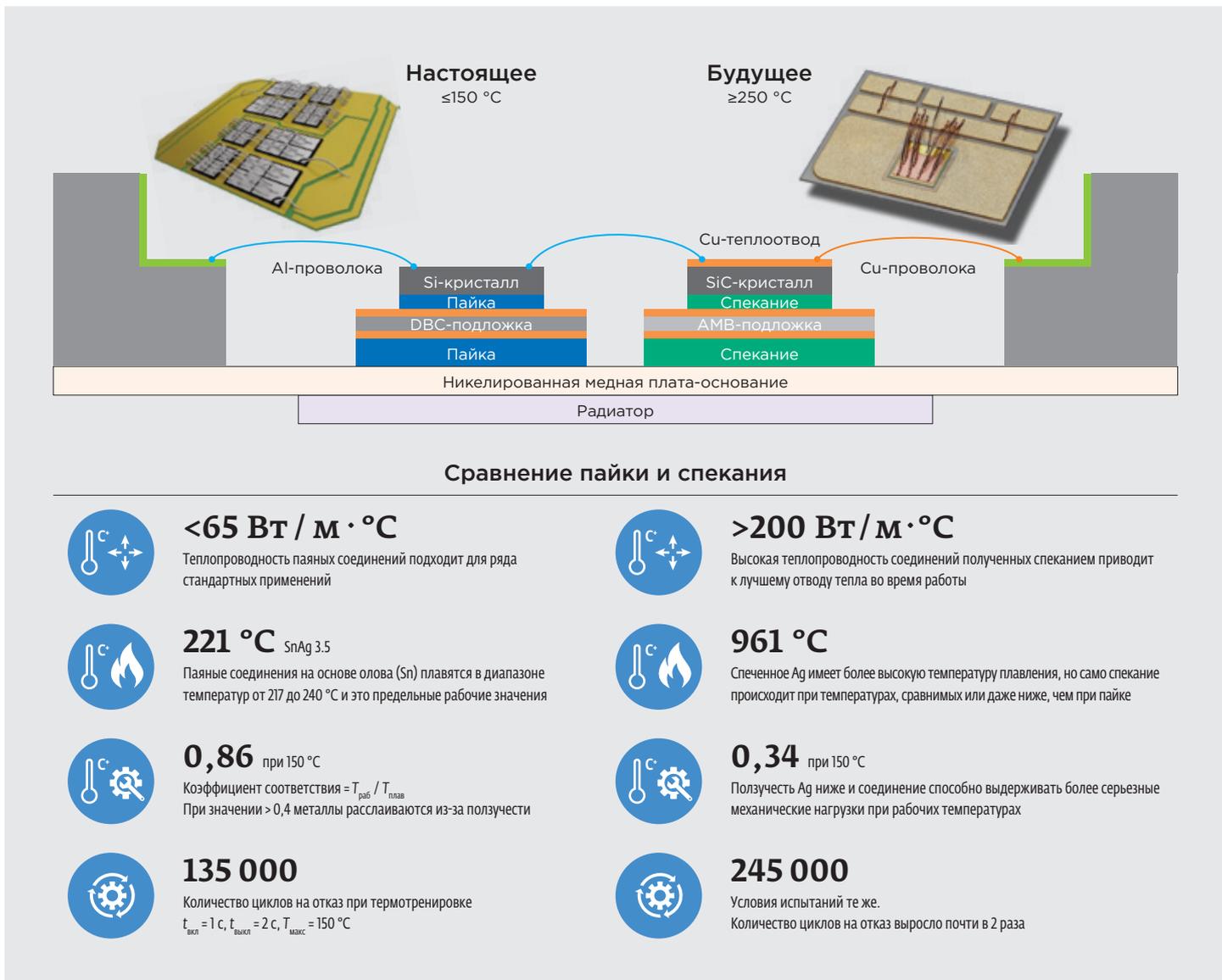
# Монтаж кристаллов по технологии синтеринга для производства элементов и модулей силовой электроники

Текст: Владимир Иванов  
Франческо Уголини



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.



1

Переход к сборке силовых модулей высокой мощности

Буквально за последнее десятилетие появилось несколько технологий монтажа кристаллов для сборки надежных высокотемпературных силовых модулей (температура р-п-перехода свыше 175 °C). 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 припой 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 электромеханические свойства были известны еще раньше. Однако широкому применению препятствовала необходимость использо-

вания 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.

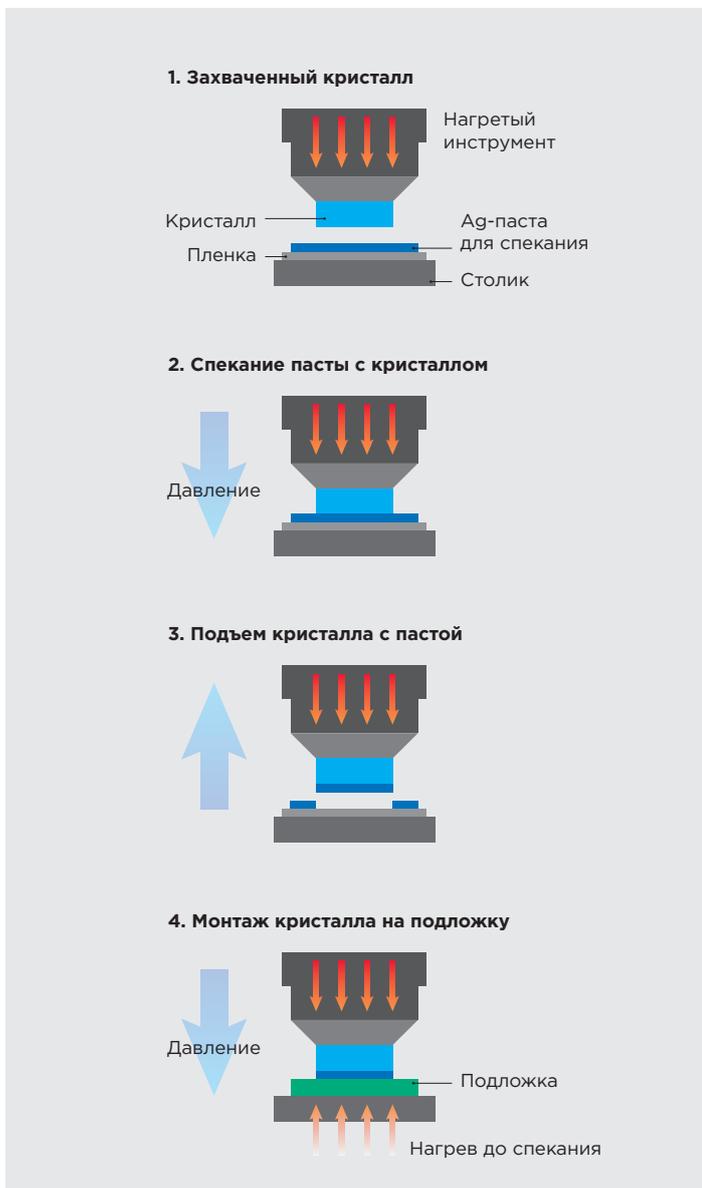
Увеличение энергоэффективности требует повышения скоростей преобразования электроэнергии при хорошей устойчивости к высокому напряжению и применения материалов с высокой коммутационной способностью. Силовые элементы на основе материалов с широкой запрещенной зоной (WBG – Wide Band Gap), таких как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC), были исследованы на предмет уменьшения размеров и повышения эффективности преобразования энергии<sup>1</sup>. В первую очередь это

<sup>1</sup> N. Kaminski, SiC and GaN devices-competition or coexistence, IEEE Cips. 393. 2012. Стр. 1-11



2

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



3

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

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, 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 модулях, представлены в табл. 1. КТР напрямую влияет на теплоотвод и 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. Для силовых модулей на базе Si-кристаллов применяют толстую алюминиевую (Al) проволоку или ленту, теплопроводность Al составляет около 2 Вт / см<sup>2</sup> · °С. Для силовых модулей на базе SiC-кристаллов используется либо чистая, либо покрытая Al толстая Cu-проволока, ее теплопроводность составляет около 4 Вт / см<sup>2</sup> · °С 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.

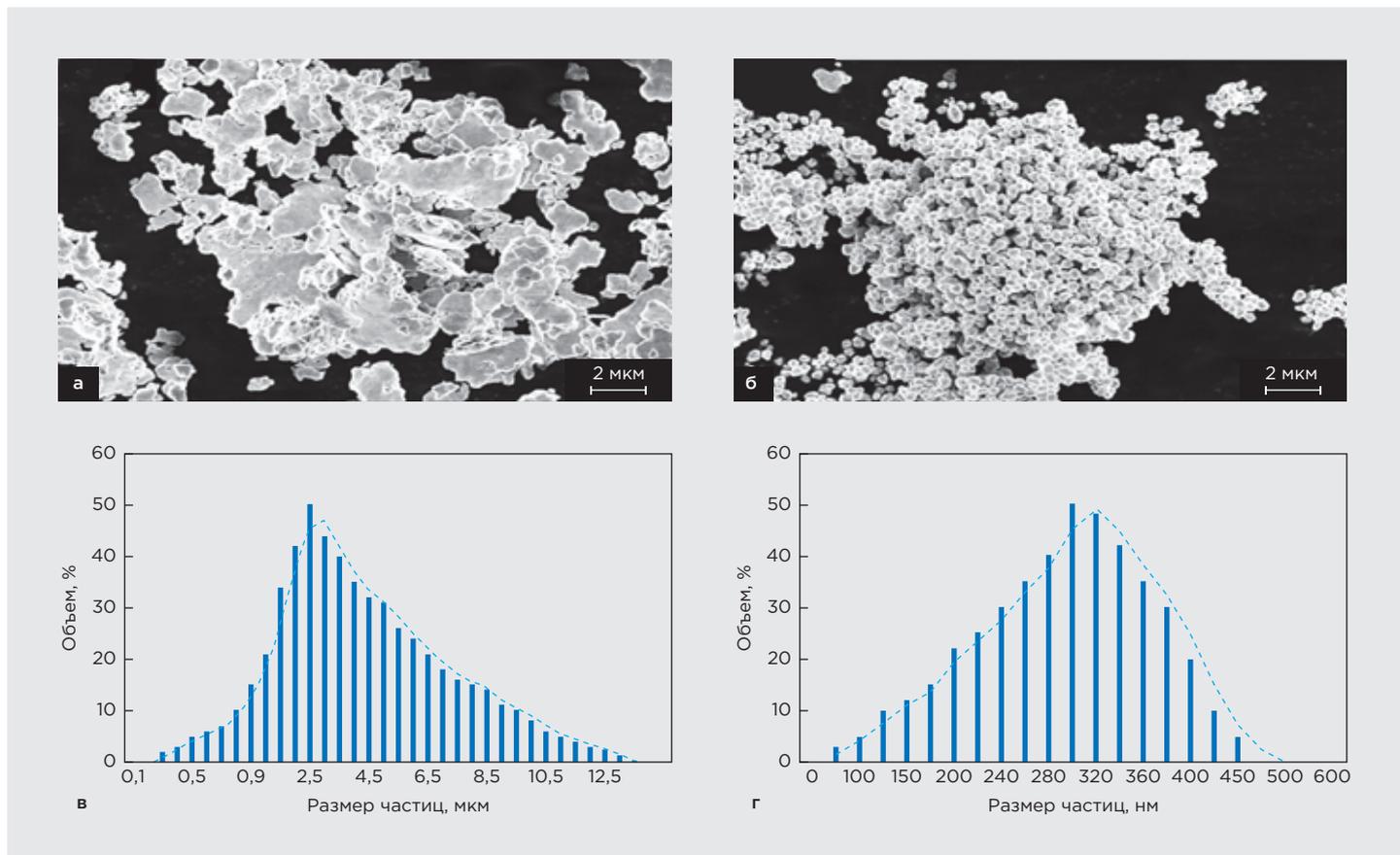
При высокой рабочей температуре припои из бессвинцовых сплавов ненадежны<sup>3</sup>, поэтому и возникла острая потребность в синтеринге Ag как альтернативном методе монтажа кристаллов<sup>4,5</sup>. Есть три варианта монтажа кристаллов при помощи синтеринга Ag: на пасту, прямой с напылением Ag на контактных 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

<sup>2</sup> P.R. Chalker, Wide bandgap semiconductor materials for high temperature electronics, Thin Solid Films. 343. 1999. Стр. 616-622

<sup>3</sup> H.S. Chin, K.Y. Cheong, A.B. Ismail, A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices, Metal. Mater. Trans. B. 41. 2010. Стр. 824-832

<sup>4</sup> K.S. Siow, Mechanical properties of nano-silver joints as die attach materials, J. Alloy. Compd. 514. 2012. Стр. 6-19

<sup>5</sup> T. Wang, X. Chen, G.-Q. Lu, G.-Y. Lei, Low-temperature sintering with nano-silver paste in die-attached interconnection, J. Electron. Mater. 36. 2007. Стр. 1333-1340



4

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

Т 1

КТР различных материалов

МАТЕРИАЛ	Si3N4	Si	SiC/GaN	Ti	Ni	СПЕЧЕННОЕ Ag	Cu
КТР, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	3,3	2,8	4,2	8,9	13,0	19,5	16,9

статье 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<sup>6</sup>.

### Процесс монтажа кристаллов по технологии синтеринга с применением Ag-пасты в виде пленки

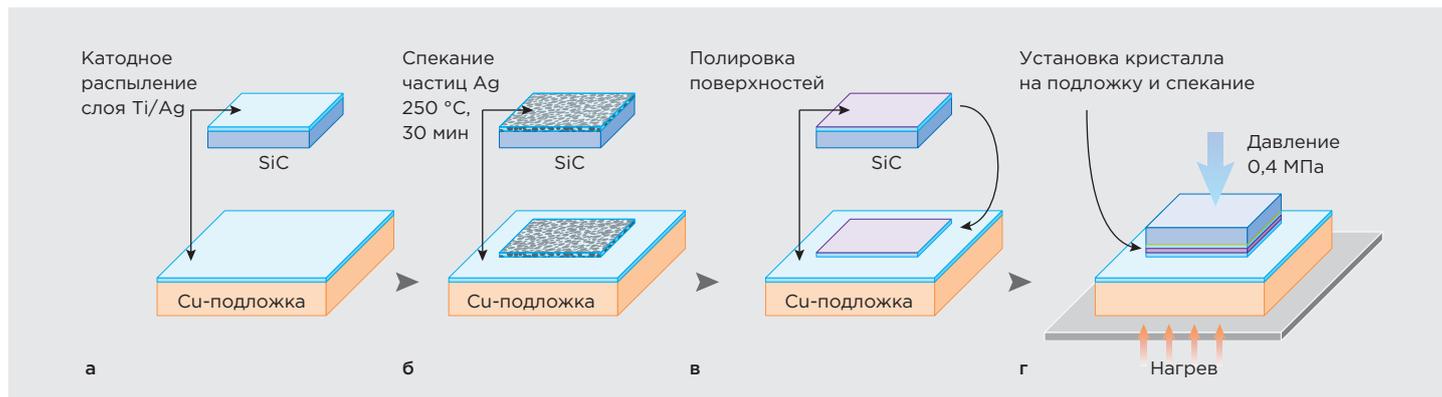
Различные материалы для монтажа кристаллов на пленочном носителе в наше время широко используются при производстве ответственных изделий, поскольку они обеспечивают равномерность нанесения материала на контактную поверхность кристалла. Скорость процесса монтажа с применением Ag-пасты для спекания на плен-

ке 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<sup>7</sup>.

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

<sup>6</sup> C. Chen, K. Suganuma, Solid porous Ag-Ag interface bonding and its application in the die-attached modules, J. Mater. Sci.-Mater. 29. 2018. Стр. 13418-13428

<sup>7</sup> H. Yan, P. Liang, Y. Mei, H. Feng, Brief review of silver sinter-bonding processing for packaging high-temperature power devices, Chinese Journal of Electrical Engineering. 6. 2020. Стр. 25-34



5

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

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 в производстве потребуется в зоне монтажа создавать инертную атмосферу с подачей азота (N<sub>2</sub>), 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<sub>2</sub>.

### 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 будет приведен конкретный пример и представлены его результаты.

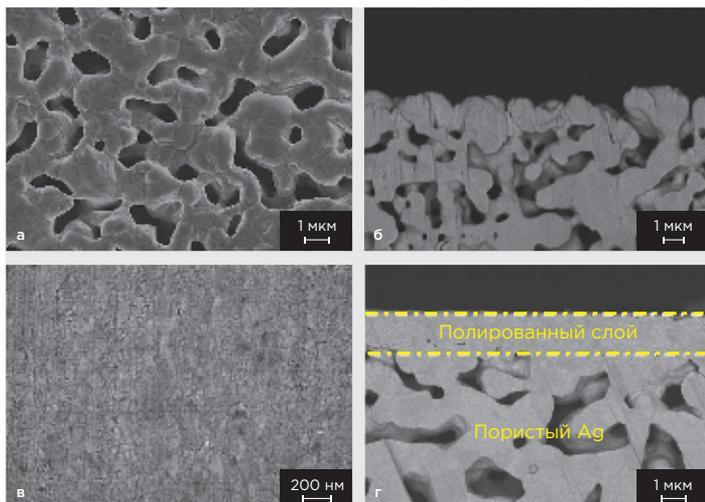
При подготовке пасты использовались два типа частиц Ag, их изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), продемонстрировано на рис 4 а, б. Один тип представляет собой частицы в форме хлопьев, которые имеют среднюю толщину 260 нм и средний диаметр 2,6 мкм, их распределение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

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 × 3 × 0,5 мм; 6 × 6 × 0,5 мм; 10 × 10 × 0,5 мм и 15 × 15 × 0,5 мм. Также были подготовлены Cu-подложки размером 20 × 20 × 1,5 мм. Далее поверхности кристаллов и подложек были покрыты слоем титана Ti (100 нм) и Ag (1 мкм) с помощью катодного распыления, как показано на рис 5 а. Распыленный слой Ag улучшит прочность связи на границах раздела между Cu-подложкой, SiC-кристаллом и спекленными частицами Ag. Затем частицы Ag были нанесены методом трафаретной печати на подложки и кристаллы, затем они спеклись с подложками и кристаллами при 250 °C в течение 30 мин при стандартных атмосферных условиях (рис 5 б). При спекании частицы Ag превращаются в твердотельную пористую структуру. После выполнения механической полировки поверхности абразивом (#4000) (рис 5 в) 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 5 г.

На следующем этапе сборка загружалась в пресс для синтеринга и спекалась под давлением 0,4 Мпа при температуре 250 и 300 °C в течение 1 ч. На рис 6 а, б показана исходная поверхность и поперечное сечение спекленных частиц Ag. Поверхность выглядит как неровная пористая структура. А рис 6 в, г иллюстрируют полированную поверхность спекленных 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 6 в. Полированная поверхность имеет среднюю шероховатость 15,3 нм, толщина составляет около 2 мкм (рис 6 г). На рис 7 показаны поперечные сечения границ раздела между SiC-кристаллом, Cu-подложкой и спекленными частицами Ag, полученные на СЭМ. Спекленные частицы Ag с пористой структурой имеют хорошую адгезию с SiC-кристаллом и Cu-подложкой.



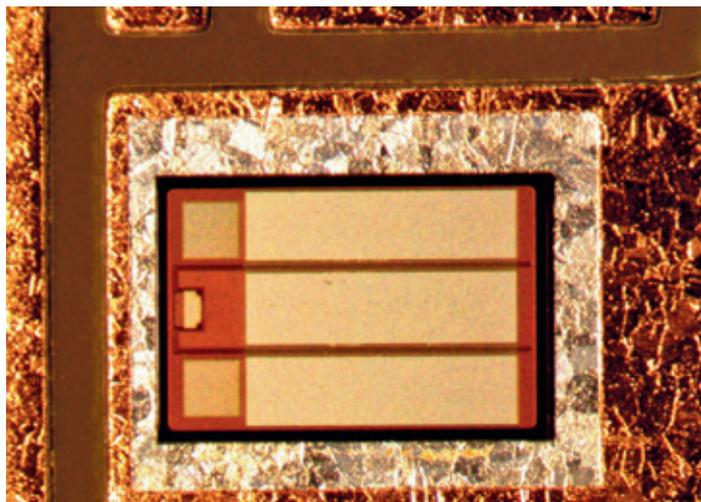
6 Изображение поверхности спеченных частиц Ag (а) и их поперечное сечение (б), изображение после полировки поверхности (в) и поперечное сечение после полировки поверхности (г)

### 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 модулей на базе нескольких полевых МОП-транзисторов (MOSFET) или биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT)<sup>8</sup>. Например, компания Tesla, признанный передовой производитель электромобилей, одна из первых начала применять такие решения, а их последняя модель оснащена силовым инвертером, 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

<sup>8</sup> J. Rhodes, J. Govier, Joining Forces: Sintered Die Attach, e-mobility technology international, Vol. 9. Summer 2021. Стр. 96-97

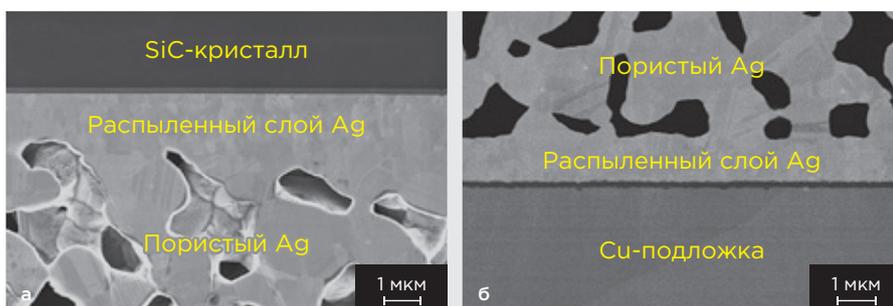


8 SiC-кристалл IGBT-модуля, смонтированный по технологии синтеринга. Источник: AMX Automatrix srl.

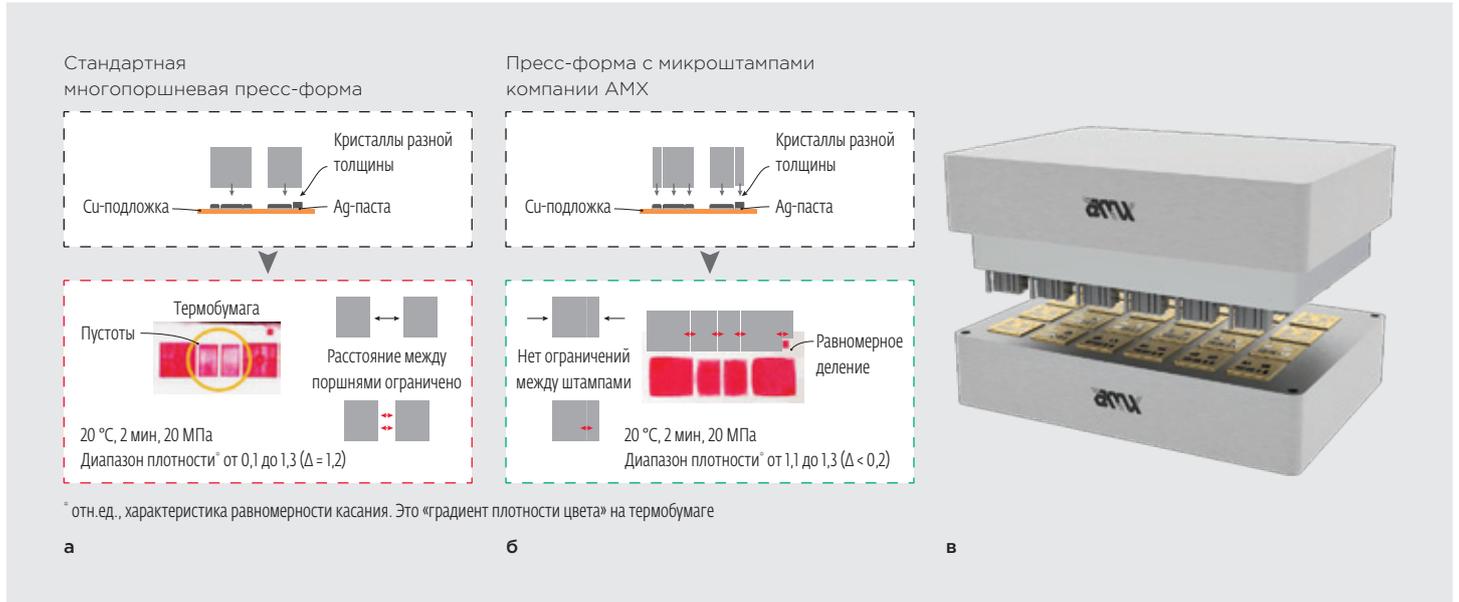
металлических поверхностей, само спекание проходит под действием температуры и давления на кристалл.

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 высоких 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.



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



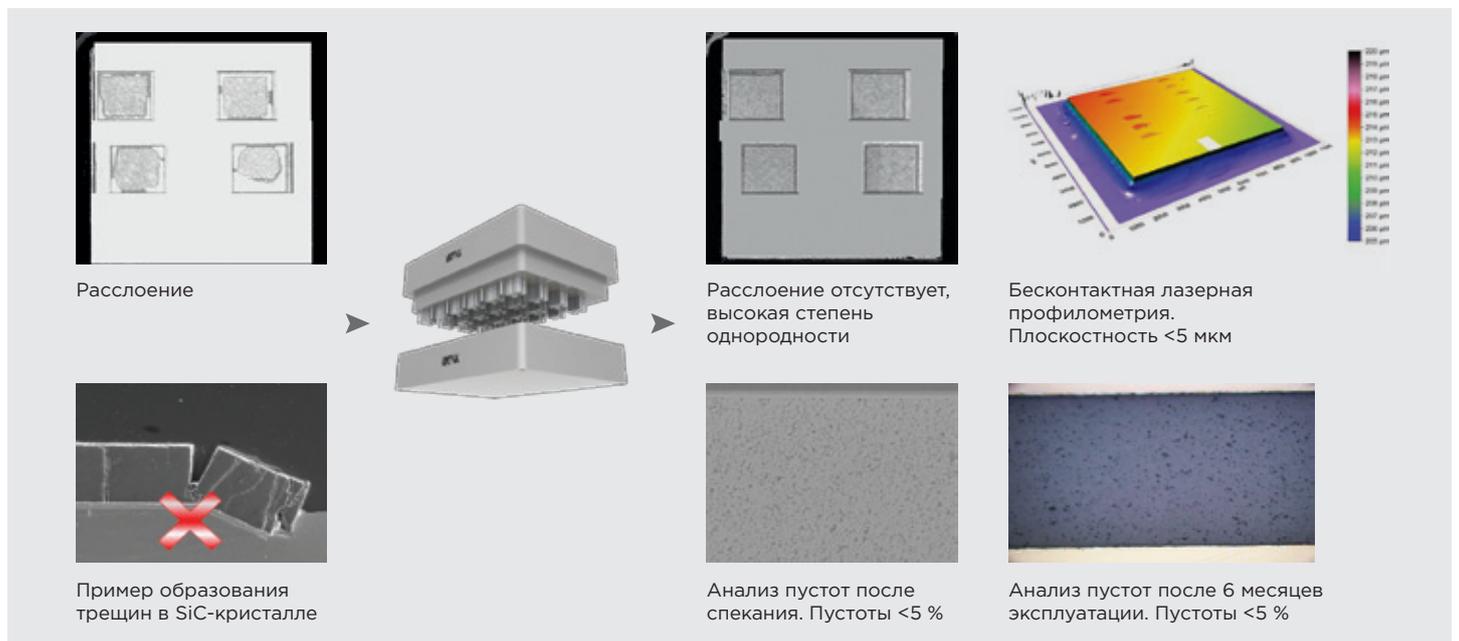
9 Оценка качества давления на кристаллы разной толщины на одной подложке многопоршневой прессформы (а); пресс-формы с микроштампами компании AMX (б); 3D-модель пресс-формы с микроштампами на 24 DBC-подложки (в)

(далее AMX)<sup>9</sup>, в ней для каждого кристалла предусмотрен свой штамп (рис 9).

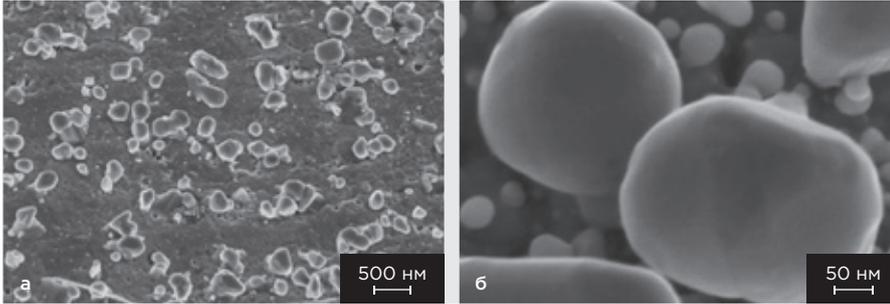
Самыми распространенными подложками для синтеринга являются DBC (Direct Bonded Cooper), когда Cu-фольга и керамическая подложка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или AlN (с одной или двух сторон) непосредственно соединяются при высокой температуре. На одиннадцатой Международной конференции по силовой электронике<sup>10</sup> 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

<sup>9</sup> <https://www.amx-automatrix.it/>  
<sup>10</sup> <https://www.cips.eu/en/2020>



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



1 1

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

с применением пресс-формы и пресс-формы с микроштампами.

### 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<sup>11</sup>. 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 1 1 а показана поверхность полированного слоя Ag после спекания при 300 °С в течение 1 ч. На поверхности появилось большее количество бугорков с высокой плотностью, их диаметр различен: от десятка до ста нанометров, как показано на рис 1 1 б. 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 спеченного слоя Ag сжимающее напряжение вызвано различными свойствами пористого слоя и его полированной поверхности. Напряжение сжатия для роста бугорков в горизонтальном направ-

лении по осям x и y можно рассчитать по следующей формуле<sup>12</sup>:

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

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

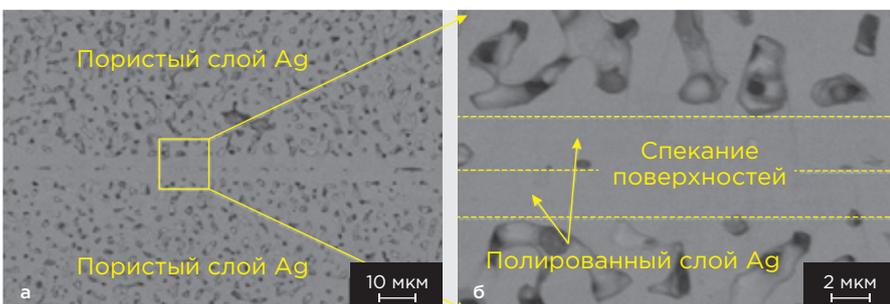
$$\sigma_z \approx 0 \quad (2)$$

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

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 °С. Таким образом, напряжение увеличивается с повышением температуры процесса и рост бугорков можно контролировать, регулируя температуру. На рис 1 2 показано поперечное сечение границы раздела соединения Ag-Ag при 300 °С, площадь контакта составляет более 90 % и пустоты практически отсутствуют, это вызвано высокой плотностью роста бугорков, как показано на рис 1 1 а.

<sup>11</sup> В.И. Иванов, «Специфика технологии термовзвучковой сварки медной проволокой выводов микросхем, компонентов и силовых элементов», «Вектор высоких технологий» № 1 (51) март 2021. Стр. 26-36

<sup>12</sup> Y. Lu, Y. Li, M. Saka, Growth of Ag micro/nanoparticles using stress migration from multilayered metallic structure, Appl. Surf. Sci. 351. 2015. Стр. 1011-1015



1 2

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



1 3

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

### Прочность соединений кристалл-подложка на сдвиг и удельное сопротивление связующего слоя Ag

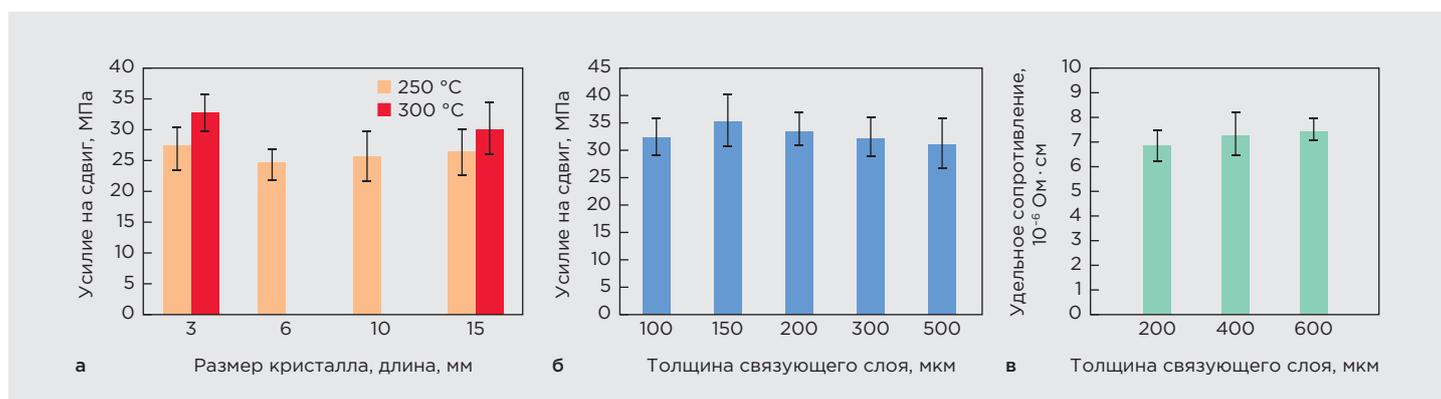
Чтобы исследовать влияние толщины связующего слоя на прочность соединения на сдвиг, частицы Ag перед синтезом были нанесены слоями различной толщины: 50, 75, 100, 150 и 250 мкм. Прочность на сдвиг измерялась на оборудовании Nordson Dage<sup>13</sup> при скорости сдвига 50 мкм/с. Наконечник инструмента 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 1 3) 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 1 4 а 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, спеченных при температуре 300 °С. Полученные результаты превышают прочность на сдвиг традиционных припоев SnPb, которая составляет около 19–24 МПа<sup>14</sup>. 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 1 4 б. 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

<sup>13</sup> <https://www.nordson.com/en/divisions/dage/bondtesting-systems>

<sup>14</sup> M. Maruyama, R. Matsubayashi, H. Iwakuro, S. Isoda, T. Komatsu, Silver nanosintering: a lead-free alternative to soldering, Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. 93 .2008. Стр. 467–470



1 4

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)



1 5

Модельный ряд оборудования для синтеринга компании AMX

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 T 610 (Mitsubishi, Япония). Удельное электрическое сопротивление спеченного пористого Ag с различной толщиной показано на рис 1 4 в. 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 1 5) 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 (N<sub>2</sub> 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.

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;
- 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 °С).

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.**