

Технология синтеринга в силовой и импульсной электронике на основе карбида кремния

А. Афанасьев, к. т. н.¹, О. Бохов, к. т. н.²,
В. Ильин, к. ф.-м. н.³, В. Лучинин, д. т. н.⁴

УДК 621.37 | ВАК 05.27.01

В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» функционирует Инжиниринговый центр микротехнологии и диагностики, ориентированный на использование в отечественной практике различных вариантов современной технологии синтеринга серебра при создании карбидокремниевой электроники для экстремальных условий эксплуатации и формировании систем коммутации на гибких носителях.

В условиях известных зарубежных ограничений поставок в Россию критически важных материалов и технологий для производства сложных систем на кристалле с высокими топологическими нормами альтернативным подходом для достижения требуемых функциональных характеристик электронной аппаратуры, безусловно, является технология гетерогенной интеграции, ключевым элементом которой наряду с архитектурными решениями является процесс сборки.

Данный процесс при динамичном развитии материаловедческой базы широкозонных полупроводниковых материалов (замещение кремниевой ЭКБ в ряде областей применения) в рамках силовой, высокочастотной, импульсной электроники становится доминирующей технологией при создании функционально-сложных изделий с экстремальными режимами и условиями эксплуатации. Особое внимание требуют процессы сборки при переходе на гибкую конформную электронику на тонких органических субстратах, что ограничивает температурные и механические технологические воздействия на собираемые объекты, в том числе по причине гетерогенной интеграции с использованием утоненных кристаллов чипов. Базовыми областями применения таких изделий являются носимые портативные системы, ориентированные на интернет-технологии с доминированием экономического фактора конкурентоспособности на рынке массовой продукции.

Вышеуказанное обстоятельство, а также требования «экологизации» технологии с переходом в процессах сборки к бессвинцовым технологиям определили динамику

замещения классической технологии пайки, в том числе и не использующей свинцовые припои, на процесс, который получил название «синтеринг» (от англ. sintering – спекание).

Несмотря на значительное количество в отечественной литературе публикаций, основанных на зарубежных источниках об эффективности синтеринга как современной технологии сборки [1], реальные экспериментальные результаты применения этой технологии в российской практике электронного приборостроения весьма скромны.

Целью настоящей работы является представление практического опыта СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по целенаправленному использованию различных вариантов технологии синтеринга серебра при создании приборов на карбиде кремния (импульсных пиконаносекундных высоковольтных модулей и силовых сильноточных инверторов) для экстремальных условий эксплуатации [2]. Уделено внимание также вопросам применения каплеструйной печати в технологии синтеринга при создании систем коммутации и сборке модулей электроники на гибких носителях.

СИНТЕРИНГ КАК БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ

Синтеринг обеспечивает твердофазное соединение поверхностей материала за счет диффузионного механизма без фазового перехода и образования эвтектики. Активация процесса диффузионного спекания стимулируется факторами температуры и давления, при этом процесс является достаточно низкотемпературным. Материал при спекании остается в твердом состоянии, отсутствуют типичные для пайки процессы растекания и капиллярные эффекты. Спекание наряду с факторами температуры и давления зависит от размера спекаемых частиц (интенсивность процесса возрастает при уменьшении размеров наноагломератов), состояния поверхности в зоне спекания (наличие оксидных слоев, пустот и микронеоднородностей

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ), зам. директора ИЦ ЦМИД.

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ», заведующий лабораторией.

³ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ведущий научный сотрудник.

⁴ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», директор ИЦ ЦМИД, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники, профессор, cmid_let@mail.ru.

поверхности отрицательно влияют на протекание процесса в отношении достижения требуемых механических, электрических и теплофизических характеристик соединения) и атмосферы, в которой происходит спекание (воздушная среда не столь критична).

Важнейшей функционально-конструктивной особенностью данного процесса является образование твердого диффузионно спеченного материала с высокой рабочей температурой, близкой к точке плавления данного чистого вещества, что коренным образом отличает процесс синтеринга, как современного базиса сборочных операций, от пайки, основанной на формировании расплава с низкотемпературной эвтектической точкой.

Считается, что технология спекания на основе серебра впервые была использована компанией Siemens в конце 80-х годов прошлого века при сборке силовых тиристоров для обеспечения контактов кремниевого кристалла с молибденовыми дисками. В настоящее время технология синтеринга, как процесс низкотемпературного спекания агломератов серебряных наночастиц, инициированный заменой содержащих свинец материалов из экологических соображений (требования RoHS Европейского совета), получила развитие благодаря системным исследованиям фирм Boschman Technology и Semikron в области силовой электроники. В данных разработках приоритет отдается функциональной эффективности и надежности конечного продукта по отношению к издержкам на его разработку. Это в первую очередь связано с тем, что твердофазно спеченные соединения серебра наряду с высокими параметрами теплопроводности и электропроводности, определяющими снижение теплового сопротивления и увеличение допустимой плотности тока при уменьшении потерь, обеспечивают также повышение допустимой рабочей температуры и термомеханической стойкости конструкции в условиях циклических импульсных нагрузок. Точка плавления спеченной серебряной нанокомпозиции превышает 900 °С, а эластичность гораздо выше, чем у композиций традиционного припоя и, как следствие, повышается надежность и расширяется диапазон рабочих температур.

Для достижения экстремальных параметров по удельной мощности, устойчивости к деградации, минимизации массогабаритных показателей и интеллектуализации гибридных систем предложен ряд современных технологий твердофазной сборки.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОФАЗНОЙ СБОРКИ Skin-технология

Верхний уровень токоразводки, реализуемый алюминиевыми проводниками или медными, покрытыми алюминием, которые обеспечивают соединение с токоведущими шинами, имеет ряд ограничений по допустимой плотности

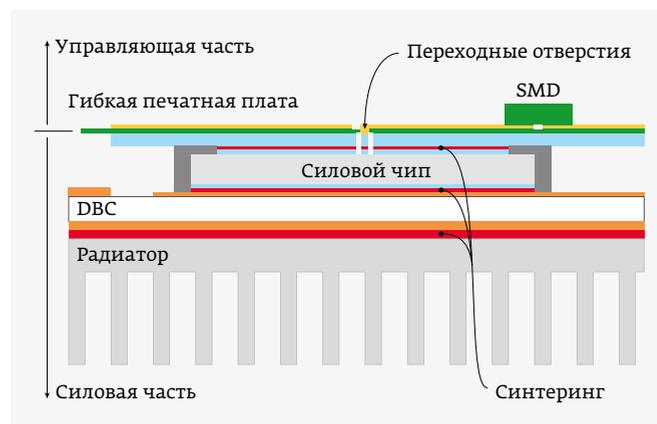


Рис. 1. Конструкторское решение технологии Skin [3]

тока (электропроводность алюминия меньше, чем у меди и серебра) и отводу тепла, исходя из использования тонких проводников определенной геометрии. Кроме того, более низкая эластичность алюминия (меньше, чем у серебра) и процессы расслоения при термоциклировании определили необходимость конструктивно-технологических изменений в контактных системах верхнего уровня.

Следует также отметить, что в условиях интеллектуализации функциональных модулей в системах в корпусе прогрессивной доминантой является процесс «этажирования» в виде стековой сборки или применения интерпозеров. Современным вариантом гибкого интерпозера, размещаемого на верхней стороне модуля в виде печатной платы со специальной двухсторонней медной токоразводкой, является так называемая Skin-технология [3] (рис. 1), коммерциализированная фирмой Semikron.

Фактически вместо соединительных алюминиевых проводников межсоединения реализуются коммутационными полями на нижней и верхней сторонах платы, причем более тонкий слой медной токоразводки на поверхности гибкой платы выполняет функцию интерпозера для размещения компонентов, несущих на себе функцию управления, то есть интеллектуализации модуля. При этом все межсоединения реализуются при спекании серебра, включая посадку кристаллов и соединение верхней токоразводки с силовыми клеммами. Таким образом, технология Skin наряду с верхней системой коммутации гибкой полиимидной печатной платой полностью реализует межсоединения в рамках процесса синтеринга, включая соединение базовой платы (DBC) с несущим основанием (в некоторых конструкциях выполняющего роль радиатора / теплоотвода).

Технология NANOWiring

В основе данной технологии лежит процесс твердофазного соединения упорядоченных нановискерных композиций меди (высота 25 мкм и диаметр – единицы

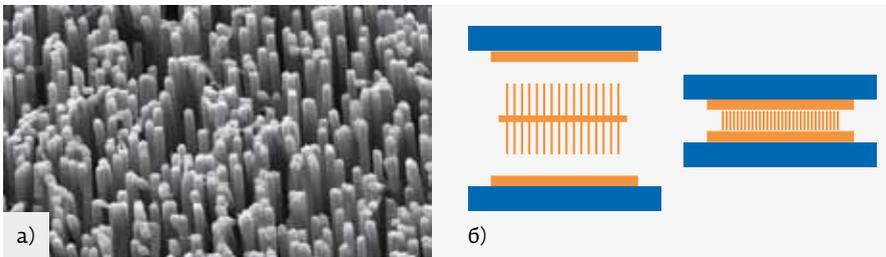


Рис. 2. Твердофазное соединение массивов [4]. Технология межсоединений NanoWiring (а), массив медных нанопроводников (б)

нанометров), которые формируются на поверхности электрохимическим методом по заданной топологии. Базовым вариантом данной технологии, разрабатываемой стартапом NANOWired, инициированного техническим университетом Durmshtat, является соединение поверхностей медными наноконструкциями под давлением 15–20 МПа при комнатной температуре (рис. 2) [4]. Такой медный 3D-наносэндвич обеспечивает стабильность межсоединений, высокую тепло- и электропроводность.

Далее представлены современные отечественные (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ОАО «ЦТМ») подходы, основанные на технологии синтеринга при создании устройств силовой, импульсной и гибкой электроники.

3D-стековая сборка импульсных карбидокремниевых модулей

Одним из примеров эффективного применения синтеринга вместо соединений пайкой является его использование в технологии высоковольтных диодных сборок, в частности – последовательных сборок дрейфовых диодов с режимом восстановления (ДДРВ). Этот класс полупроводниковых размыкающих ключей, работа которых основана на эффекте сверхбыстрого восстановления напряжения при переключении высоковольтных р⁺-р-n-n⁺-переходов. В работах [5, 6] было экспериментально установлено, что карбидокремниевые 4H-SiC ДДРВ обеспечивают более высокие (в 2–4 раза) по сравнению

с кремниевыми скорости переключения и коммутацию токов с плотностью свыше $5 \cdot 10^3$ А/см², а в работах [7, 8] была показана возможность создания высоковольтных наносекундных ключей (10 кВ и 30 кВ) размыкающего типа на основе 4H-SiC с использованием принципа последовательной коммутации одиночных р⁺-р-n⁺-структур ДДРВ. На основе высоковольтных 4H-SiC ДДРВ возможна реализация генераторов сверхкоротких импульсов напряжения и электромагнитных импульсов с высокими частотами повторения и импульсной мощностью [9].

Процесс изготовления высоковольтных диодных сборок с использованием технологии синтеринга был организован в несколько этапов. Основное внимание уделялось созданию низкоомных и механически прочных соединений между металлизацией 4H-SiC ДДРВ-чипа, серебряного или медного спейсера, обеспечивающего необходимый зазор между чипами. Для решения этой задачи наиболее подходящими материалами являлись композиции, содержащие инкапсулированные наночастицы серебра, которые в условиях приложения давления и температуры обеспечивают надежное низкоомное соединение. В работе были использованы продукты компании Alpha – пасты и лавсановые пленки с нанесенным слоем материала Argomax толщиной 80 мкм. На первом этапе создавалась базовая структура, состоящая из одиночного 4H-SiC ДДРВ-чипа и серебряного спейсера (рис. 3).

Дальнейшие операции по последовательной коммутации базовых элементов осуществлялись с использованием пасты Argomax, которая с помощью шприцевого дозатора наносится на спейсер и на внешние обкладки сборки из трех базовых кристаллов элементов (рис. 4). Далее при температуре 200 °С, давлении 5 МПа в течение 3 мин проводился синтеринг, после чего полученная диодная сборка герметизировалась.

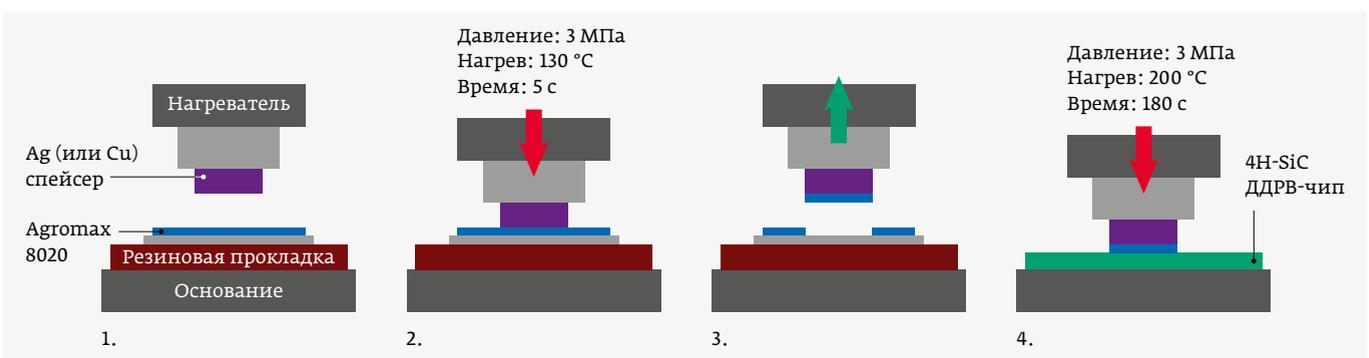


Рис. 3. Последовательность операций по созданию базового элемента высоковольтной сборки методом синтеринга

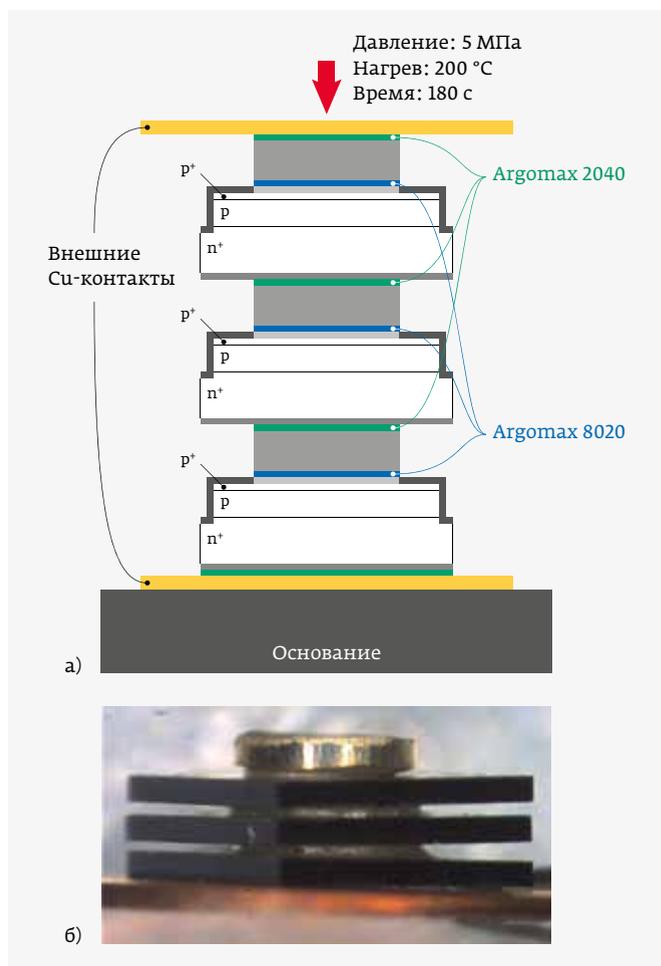


Рис. 4. Структура 3-элементной 4H-SiC ДДРВ диодной сборки (а) и фотография сборки кристаллов технологией синтеринга (б)

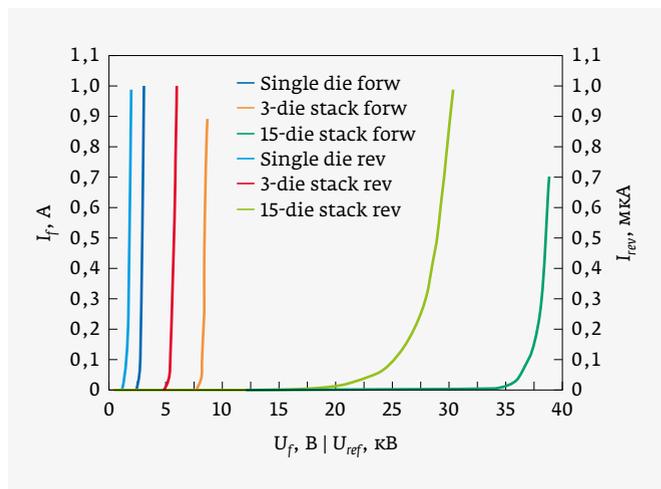


Рис. 5. Прямые и обратные ветви ВАХ для одиночного 4H-SiC p⁺-p-n⁺-перехода и последовательных сборок из 3-х и 15-ти переходов [8]

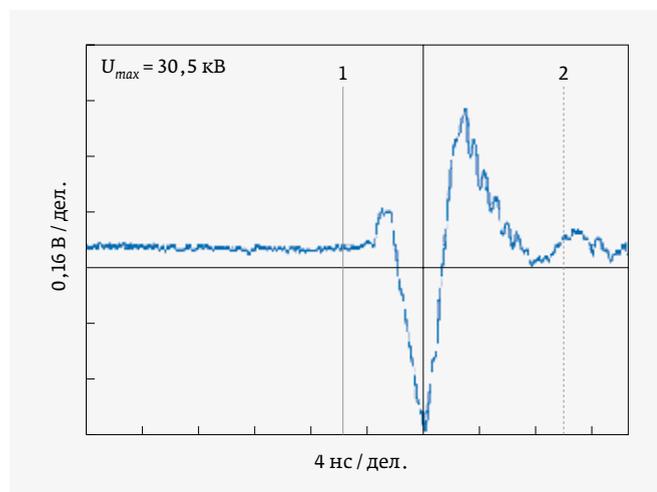


Рис. 6. Осциллограмма импульса напряжения, формируемого в генераторе на нагрузке 50 Ом 15-элементной 4H-SiC диодной сборкой [8]

2D-сборка сильноточных карбидокремниевых инверторов

Объектом разработки с использованием технологии синтеринга являлся силовой модуль – полумост на основе карбида кремния с рабочим напряжением 1200 В при использовании в качестве элементной базы бескорпусных кристаллов-чипов карбидокремниевых транзисторов и диодов, на токи до 120 А (рис. 7). Структура силового модуля, состоящая из совокупности базовых элементов, представлена на рис. 8.

В рамках поставленной задачи, после проведения процесса конструирования изделия, был определен список основных межсоединений, которые могут быть

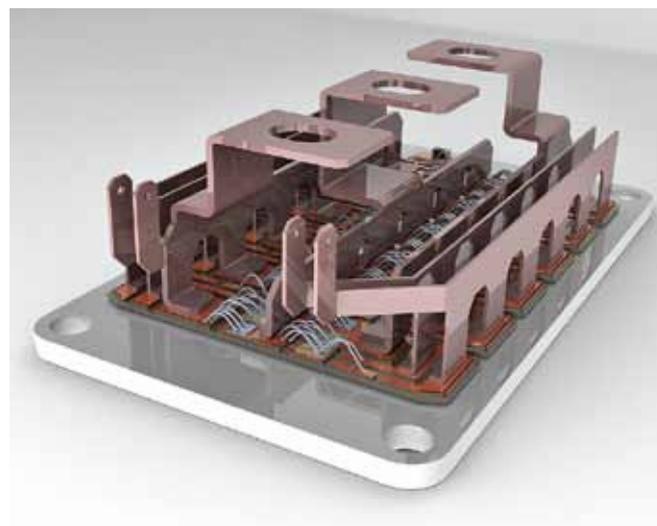


Рис. 7. Конструкция силового модуля на основе карбида кремния

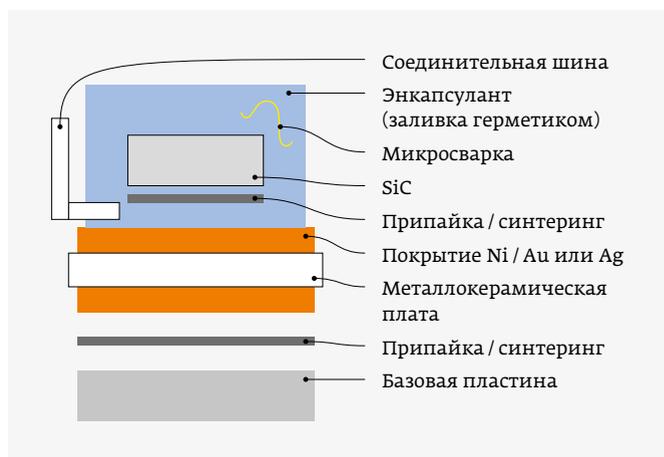


Рис. 8. Основные элементы конструкции силового модуля

причинами возможного отказа силового электронного блока с экстремальными режимами эксплуатации:

- соединение нижнего контакта кристалла-чипа с металлокерамической платой;
- соединение металлокерамической платы и базовой пластины;
- соединение токовыводящих проводников.

Одним из подходов для снижения вероятности отказов межсоединений была определена технология синтеринга. Исследование и оптимизация параметров процесса синтеринга для всех значимых соединений в разрабатываемом силовом блоке позволили разработать технологический маршрут изготовления силовых модулей, наиболее значимые операции которого в рамках технологий сборки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Базовые операции сборки силовых модулей

Этапы маршрута	Технологическая операция сборки	Реализованная технология
1	Соединение кристаллов с металлокерамической платой или основанием	Синтеринг
2	Соединение металлокерамических плат между собой	Синтеринг
3	Соединение металлокерамических плат и основания	Синтеринг
4	Соединение верхних контактов транзистора	Разварка медной проволокой, покрытой алюминием
5	Соединение токоподводящих шин и металлокерамической платы / печатной платы	Ультразвуковая сварка



Рис. 9. Тестирование компонентов в составе пилотной платы на механический сдвиг

В качестве базового процесса по первым трем технологическим операциям сборки использовался процесс синтеринга, основанный на относительно высокотемпературном (240 °С) при давлении до 40 МПа спекании серебряной пасты Argomax. Интервал оптимизации технологических параметров крайне «узок». Фактически в рамках проводимых исследований осуществлялся поиск баланса между надежностью соединений и минимизацией внутренних напряжений (рис. 9), возникающих в процессе монтажа кристаллов транзисторов и диодов. Созданные тестовые структуры приведены на рис. 10.

Важнейшим элементом технологического маршрута, представленного в таблице, является процесс формирования токоразводки к базовым областям транзисторных и диодных структур. Данный процесс был реализован с использованием медной проволоки диаметром 300 мкм, покрытой алюминием, что иллюстрирует рис. 11.

Один из вариантов реализованного карбидокремниевое силового модуля, базирующегося на полумостовой электрической схеме, собранной на основе технологии синтеринга, представлен на рис. 12.

По результатам электрического тестирования были достигнуты следующие базовые параметры: рабочее напряжение до 1200 В, постоянный ток до 1000 А, сопротивление менее 2,7 мОм, индуктивность менее 3 нГн.

Рис. 10. Карбидокремниевые транзисторы и диоды на пилотной плате, смонтированные по технологии синтеринга



2,5D-сборка и коммутация капле струйной печатью на гибких платах

Динамично развивающаяся аддитивная 2D печатная технология наряду с формированием коммутационных полей на органических гибких субстратах с использованием технологии спекания наносеребряных композиций, открывает в рамках применения бесшаблонных капле струйных технологий [10] новые возможности в отношении процессов микросборки, в том числе с достижением гетерогенной интеграции с применением бескорпусных и утоненных электронных компонентных баз. В данной области в качестве примера объектов выполненной разработки можно назвать разработанную технологию капле струйной печати серебряными металлическими и органическими диэлектрическими композициями для формирования многоуровневой токоразводки, то есть фактически гибкой печатной платы, а также монтаж бескорпусных компонентов на данную гибкую плату в рамках унификации технологии с использованием метода капле струйной печати.

Обобщая исследования по формированию многослойных печатных плат капле струйной печатью, отметим, что базовой проводящей композицией являлись наночастицы серебра диаметром 50–120 нм

Рис. 11. Фотография токоразводки микропроводом Cu(Al) к базовым областям карбидокремниевых транзисторных структур

в растворителе – монометиловом эфире. Термическая обработка, направленная на процесс спекания наноагломерации после ее локального топологического упорядочения на субстрате, осуществлялась при температурах не более 150 °С в течение нескольких десятков минут. Толщина слоев определялась числом проходов капле струйной печатью, что обеспечивало при 6-уровневой композиции толщину 2,5 мкм и удельное сопротивление не более 40 МОм / квадрат. Срез образца после меднения серебряного слоя иллюстрирует рис. 13.

Для формирования межслойной изоляции использовалась печатная технология фотоотверждаемого полимера на основе акрилов. Внешний вид фрагмента четырехслойной печатной композиции, полученный по технологии капле струйной печати, иллюстрирует рис. 14. Важно, что в основу реализуемого процесса положена низкотемпературная технология с использованием наноструктурированного серебра, позволяющая без шаблонов



Рис. 12. Внешний вид изготовленного модуля

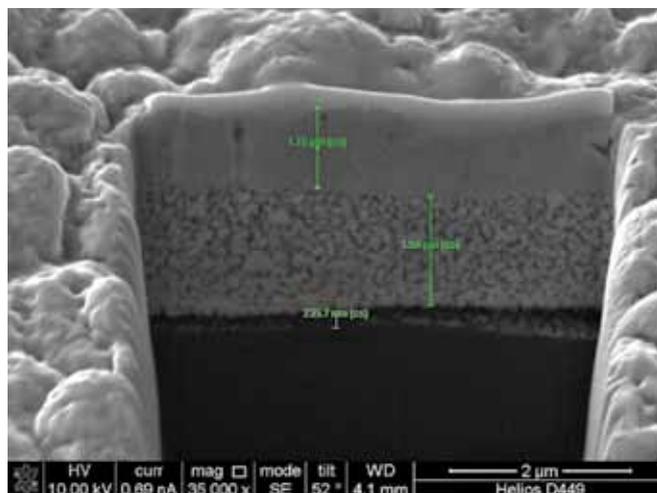


Рис. 13. Сечение коммутационной шины на основе технологии синтеринга серебра и химического меднения

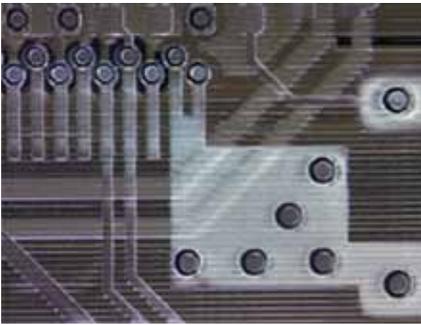


Рис. 14. Фрагмент многоуровневой системы коммутаций на основе технологии капле струйной печати и синтеринга серебра

капле струйным методом реализовать произвольное коммутационное поле.

Установка и коммутация чипа осуществлялась без процессов пайки в рамках использования унифицированной технологии капле струйного нанесения серебра на локально планаризованную диэлектриком (формируется также капле струйной технологией) поверхность с обеспечением токоразводки (рис. 15а). Фотография, отображающая результаты монтажа кристалла памяти методом капле струйной печати с использованием технологии синтеринга, представлена на рис. 15б.

Таким образом, капле струйная печать в сочетании с низкотемпературным синтерингом обеспечивает в рамках унифицированной технологии формирование локальных областей для посадки кристаллов чипов на плату и их последующую токоразводку коммутационными шинами (с исключением классического монтажа алюминиевой или золотой проволокой), формируемыми локальной капле струйной технологией. На разработанный способ монтажа с использованием капле струйной технологии и процессы синтеринга получен патент РФ [11], а основные результаты исследований более подробно отражены в публикации [12].

* * *

В таких направлениях, как электродвижение, аккумуляция энергии, генерация мощного электромагнитного излучения, стоимость интегрируемых кристаллов чипов не является доминирующим фактором, определяющим рыночную стоимость изделия для которого доминантами являются функциональная эффективность, надежность, энергетический и временной ресурсы.

Процессы низкотемпературной твердофазной диффузии и срачивания могут рассматриваться как альтернативные технологии прецизионной сборки для приборов с экстремальным импульсным и циклическим энерговыделением для достижения функциональной эффективности при повышении деградационной устойчивости с обеспечением надежности и временного ресурса.

Развитие современных технологий в отношении возможности получения материалов в наноструктурированном виде и реализация процессов высокоточной

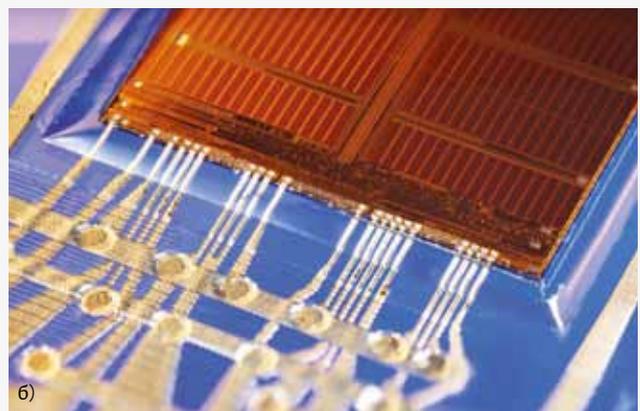
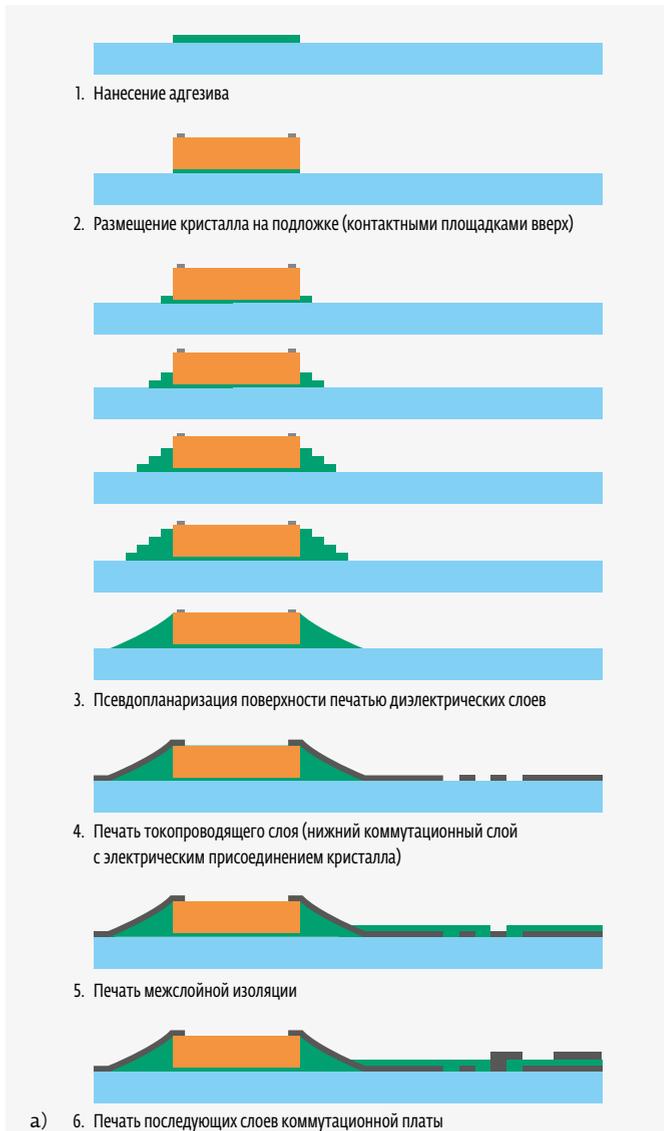


Рис. 15. Последовательность этапов монтажа капле струйной печатью утоненного кристалла на гибкую плату (а) и фото смонтированного утоненного кристалла памяти (б)

бесшаблонной их локализации обеспечивают на примере наносеребряных композиций реализацию сборки и коммутации в условиях низкого уровня термического воздействия на гетерогенные функциональные системы.

Конструктивно-технологическое решение с использованием твердофазной сборки с верхней интерпозерной токоразводкой ориентировано на интеллектуальные силовые модули с повышенной устойчивостью к циклическому переключению мощности.

Современная концепция синтеринга серебра может реализоваться в рамках процесса капле струйной печати на гибких тонких органических носителях для формирования систем коммутации и сборки кристаллов чипов при создании изделий с ярко выраженной гетерогенной интеграцией.

Процессы низкотемпературного срачивания, исключая образование паяных и сварных соединений, в условиях развития управляемого структуро- и формообразования наноконпозиций определяют современную динамику 3D «этажерочной» сборки при гетерогенной интеграции, в том числе в объектах с экстремальными режимами и условиями эксплуатации, а также функциональных модулей на гибких органических субстратах.

ЛИТЕРАТУРА

- Хохлун А., Чигиринский С., Шайдуллин Р.** Перспективы технологии для сборки силовых модулей и приборов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 3 (00204). С. 156–161.
- Лучинин В. В.** Отечественная экстремальная ЭКБ: карбидокремниевая индустрия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» // НАНОИНДУСТРИЯ. 2016. № 4 (66). С. 40–50.
- Guth K., Siepe D., Görlich J., Torwesten H., Roth R., Hille F., Umbach F.** New Assembly and Interconnects Beyond Sintering Methods // PCIM Europe 2010. Nuremberg. Germany. PP. 219–224.
- Schmidt R., König C., Prenosil P.** Novel wire bond material for advanced power module packages // Microelectronics Reliability. 2012. V. 52. Is. 9–10. PP. 2283–2288.
- Grekhov I. V., Ivanov P. A., Konstantinov A. O., Samsonova T. P.** On the Possibility of Creating a Superfast-Recovery Silicon Carbide Diode // Technical Physics Letters. 2002. 28. PP. 544–546.
- Afanasyev A. V., Ivanov B. V., Ilyin V. A., Kardo-Sysoev A. F., Kuznetsova M. A., Luchinin V. V.** Superfast Drift Step Recovery Diodes (DSRDs) and Vacuum Field Emission Diodes Based on 4H-SiC // Materials Science Forum. 2013. V. 740–742. PP. 1010–1013.
- Ilyin V. A., Afanasyev A. V., Ivanov B. V., Kardo-Sysoev A. F., Luchinin V. V., Reshanov S. A., Schöner A., Sergushichev K. A., Smirnov A. A.** High-Voltage Ultra-Fast Pulse Diode Stack Based on 4H-SiC // Materials Science Forum. 2016. V. 858. PP. 786–789.
- Ilyin V. A., Afanasyev A. V., Demin Y. S., Ivanov B. V., Kardo-Sysoev A. F., Luchinin V. V., Reshanov S. A., Schöner A., Sergushichev K. A., Smirnov A. A.** // 30 kV Pulse Diode Stack Based on 4H-SiC // Materials Science Forum. 2018. V. 924. PP. 841–844.
- Афанасьев А. В., Демин Ю. А., Иванов Б. В., Ильин В. А., Лучинин В. В., Сергушичев К. А., Смирнов А. А., Кардо-Сысоев А. Ф.** Мегаваттный генератор наносекундных импульсов на основе карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. № 3. С. 21–24.
- Лучинин В. В., Бохов О. С., Старцев В. А., Мандрик И. В., Аньчков М. Г.** Капле струйная печать – новый метод прецизионной микросборки гибридно-интегрированных систем // Радиоэлектронная отрасль: Проблемы и их решения, 2021. № 3. С. 27–32.
- Лучинин В. В., Бохов О. С., Старцев В. А., Мандрик И. В.** Патент РФ: № 2 752 013 от 21.07.2021. Способ изготовления микросборки бескорпусных электронных компонентов на гибких органических подложках.
- Лучинин В. В., Бохов О. С., Мандрик И. В., Старцев В. А., Смирнов А. В., Афанасьев П. В., Аньчков М. Г., Пудова А. В., Никонова В. В., Шевченко С. Ю.** Конформно интегрируемая электронная компонентная база гибкой печатной электроники для Интернета людей // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 5 (00196). С. 1–7.

ООО «Руднев-Шиляев»

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35
 www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru
 тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368