



УДК 621.315

И. Б. Красный

Новосибирский государственный технический университет

## Технология формирования толстых медных слоев на высокотеплопроводящих керамических подложках

*Рассмотрены методы формирования медных слоев на керамике для схем силовой электроники. Проведено исследование основных параметров металлокерамических подложек, металлизированных по технологии прямого сращивания меди с керамикой. Выявлены особенности данной технологии металлизации на примере металлокерамических подложек зарубежного производства компании «СЕТЕС».*

### Силовые полупроводниковые устройства, высокотеплопроводящая керамика, соединение меди с керамикой

Основными методами повышения эффективности теплоотвода от радиоэлементов являются использование конструкционных материалов с максимальной теплопроводностью и повышение эффективности радиаторов за счет оптимизации их конструкции. Высокая потребность в недорогих силовых полупроводниковых устройствах (СПУ) высокой мощности и высокого качества в различных сферах жизни, таких как системы управления энергопотреблением, источники бесперебойного питания, импульсные источники питания, электротранспорт (поезда, электровозы, троллейбусы), системы автономного энергообеспечения (космические и авиационные системы), стимулирует поиск новых технологических решений в данной области.

В качестве проводников в высокомоощных СПУ часто используют особо чистые металлы с высокой теплопроводностью: медь, алюминий, серебро, золото, к тому же их проводимость достаточно высока, что приводит к минимальному выделению тепла на таком проводнике при прохождении через него тока.

Из диэлектрических материалов наиболее подходящими являются различные виды керамики на основе оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), нитрида алюминия (AlN), оксида бериллия (BeO), карбида кремния (SiC) и нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ). Ис-

пользование керамической подложки, например на основе оксида алюминия или нитрида алюминия, в качестве основы печатной платы вместо привычного стеклотекстолита позволяет с высокой надежностью изолировать токоведущие шины и при этом эффективно отводить тепло от активных радиоэлементов. К тому же за счет использования керамики значительно повышаются электрохимические характеристики готовой платы.

Самым эффективным сочетанием материалов «проводник–диэлектрик» с учетом параметров «цена–технологичность» для производства печатных плат высокомоощной электроники является металлизированная медью алюмонитридная керамика, а для менее мощных СПУ – алюмооксидная. На сегодняшний день платы из таких материалов широко используются многими производителями силовой электроники. Это позволяет им разрабатывать устройства, обладающие наивысшими характеристиками, что, несомненно, отражается на спросе и популярности выпускаемых изделий [1].

На данный момент в России есть предприятия, обладающие технологиями производства печатных плат для устройств средней мощности, но нет предприятий, которые бы серийно производили керамические платы, представляющие собой металлизированные медью керамические подложки для высоко- и сверхмоощной электро-

ники. Причиной этого является отсутствие технологии, позволяющей изготавливать платы из высокотеплопроводящих материалов с требуемыми характеристиками, которые бы могли конкурировать с зарубежными аналогами. В связи с этим отечественные производители силовых приборов в значительной мере зависят от импорта металлизированных медью керамических подложек, что также отражается и на стоимости готового устройства. Поэтому разработка и внедрение в серийное производство эффективной технологии металлизации медью керамических подложек является приоритетным и актуальным направлением в развитии отечественной силовой электроники.

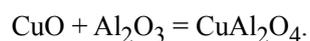
**Методы формирования толстых слоев меди на керамике.** Особенности, которые усложняют процесс получения топологических рисунков электрических схем на керамических подложках, заключаются в том, что слои меди для высокомоощных устройств должны быть толщиной от 300 мкм и более, медь при этом не должна терять своих электрических и теплопроводящих свойств. К тому же наличие любых промежуточных слоев между керамикой и медью приводит к появлению дополнительных тепловых сопротивлений, что ухудшает теплоотвод от транзисторов, снижает мощность и надежность СПУ. При такой большой толщине медного слоя разность в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) керамики и меди становится определяющим фактором, влияющим на прочность соединения. Снизить влияние этого фактора возможно за счет различных технологических решений, которые становятся самостоятельными технологиями.

Сейчас в мире существуют несколько основных методов формирования медных слоев на керамике:

- прямое медное соединение (Direct Bonded Copper – DBC);
- пайка активными металлами (Active Metal Braze – AMB);
- холодное газодинамическое напыление (ХГН);
- толсто пленочная технология;
- плазменное напыление и реактивное распыление;
- комбинированная технология металлизации (толсто пленочная + напыление) [2].

Наиболее перспективным методом металлизации для силовых гибридных интегральных схем (ГИС) является DBC-технология.

**Принцип технологии DBC** был разработан в Мюнхенском технологическом университете в 1981 г. [2]. В основе технологии DBC лежат термохимические процессы, суть которых заключается в образовании эвтектической связи между контактируемыми слоями меди и оксида алюминия. Создание эффективной эвтектической связи между этими материалами возможно через оксид меди (CuO), а точнее, через промежуточное соединение – алюмомедную шпинель (CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), которая образуется в процессе взаимодействия оксида меди (II) и оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [2]:



Слой оксида меди (II) на поверхности медной фольги формируется с помощью нагрева или химических реакций. Для того чтобы обеспечить однородность соединения, поверхность меди должна быть очищена от загрязнений путем травления в растворе азотной или серной кислоты, после чего промыта от остатков травления дистиллированной водой. Поверхность керамики перед соединением также необходимо очистить пескоструйной обработкой и обезжиривающим раствором. После чего необходимо максимально плотно (с давлением ~5...10 Н/см<sup>2</sup>) и однородно по всей площади прижать окисленную поверхность меди к керамической подложке и обеспечить условия для образования эвтектического сплава алюмомедной шпинели (выдержать в течение 10...30 мин при температуре 1065 °С), который при остывании формирует прочное соединение. Однако за счет рассогласования ТКЛР соединяемых материалов меди (16.8·10<sup>-7</sup> °С<sup>-1</sup>) и различных видов керамики (4.5·10<sup>-7</sup> °С<sup>-1</sup> – у алюмонитридной и 8.0·10<sup>-7</sup> °С<sup>-1</sup> – у алюмооксидной) при быстром остывании возможно отслоение медной фольги из-за влияния внутренних напряжений на еще не укрепленную связь. Поэтому после образования эвтектического расплава дальнейшее охлаждение должно проходить максимально плавно со скоростью не более 3...5 °С/мин до 300 °С [2], [3].

Во избежание сильного окисления медной фольги данный процесс проводится в инертной среде (азот, аргон) либо в вакууме.

В случае использования более теплопроводящей керамики – алюмонитридной (AlN – теплопроводность 180...240 Вт/(м·К)) на ее поверхности необходимо сформировать термическим или химическим путем тонкий слой (толщиной 1...2 мкм) оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и уже с этим

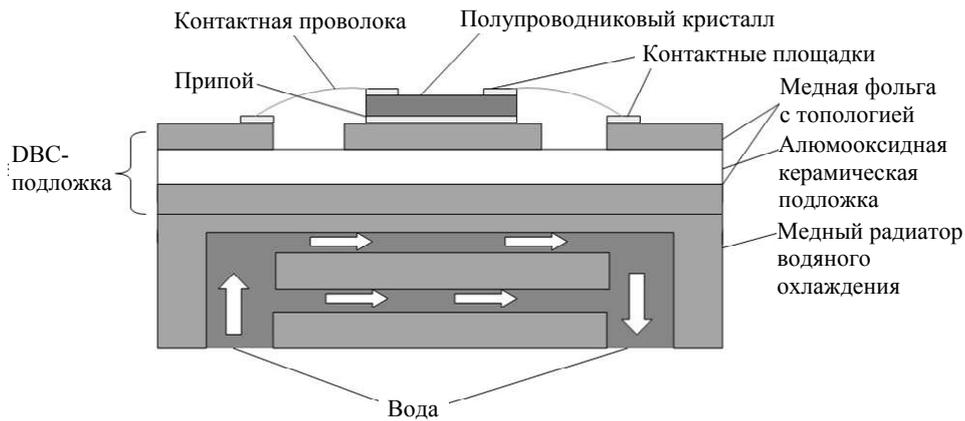


Рис. 1

слоем создавать эвтектический сплав с  $\text{CuO}$  [2]. При этом поверхность алюмонитридной подложки также должна быть предварительно очищена от загрязнений.

При такой технологии металлизация получается с высокой адгезией к керамике и высокой проводимостью, которая зависит от качества медной фольги. За счет этого данная технология является наиболее эффективной и наиболее популярной у производителей силовых полупроводниковых приборов. Металлизированные керамические подложки по такой технологии активно производятся за рубежом для нужд силовой электроники. На рис. 1 представлено применение DBC-подложки в СПУ.

Ведущими производителями в этой сфере производства являются «Ceramik Electronic», «Ferrotec Nord Corporation», «KYOCERA», «MARUWA», «CETC (China Electronics Technology Group Corporation)» и др. Российские производители на данный момент не могут предложить керамические подложки, металлизированные по технологии DBC, которые являются более привлекательными для производства СПУ за счет своей простоты и эффективности. Поэтому российские разработчики высокомоощных силовых полупроводниковых приборов, в основе которых приходится использовать платы на DBC-подложках, вынуждены использовать подложки зарубежного производства. Это делает отечественных производителей силовой электроники зависимыми от зарубежных предприятий, что, несомненно, влияет на стабильность поставок и отражается на стоимости уже готовых приборов. Исходя из вышеизложенного, становится понятным актуальность и востребованность в разработке отечественной DBC-технологии.

С целью организации отечественного импортозамещающего производства DBC-подложек на базе «НЭВЗ-Керамикс» (Новосибирск) были проведены исследования металлизированных по технологии DBC алюмооксидных ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) керамических подложек от компании «CETC» (Китай), которые являются наиболее популярными у российских производителей СПУ. При этом разработанная технология позволит производить конкурентоспособные платы для высокомоощных СПУ, что, в свою очередь, сделает производителей силовой электроники менее зависимыми от зарубежных поставок.

#### Исследования DBC-подложек от «CETC».

Исследуемые образцы DBC-подложек имели размер  $120 \times 120$  мм, толщину керамики 640 мкм, разброс по толщине в среднем составил  $\pm 17$  мкм (измерения проводились в 13 точках микрометром «Micron» с точностью измерения 5 мкм). Медная металлизация толщиной 300 мкм размером  $119 \times 119$  мм нанесена на подложку с двух сторон. При исследовании поверхности DBC-подложек было установлено, что металлизация на одной стороне подложки отличается по своей структуре от металлизации на другой стороне и значительно отличается от структуры медной фольги М06, изготовленной в соответствии с ГОСТ 859–2001 (ООО «Предприятие „Купромет-ОЦМ“», г. Киров).

После подтравливания азотной кислотой поверхностей металлизации на DBC-подложках можно было отчетливо разглядеть отдельные кристаллы меди, их форму и размеры (см. рис. 2).

Из рис. 2, а видно, что зерна меди имеют размеры порядка 1...2.5 мм и в среднем они в два раза крупнее зерен на рис. 2, б. Это отличие, возможно, обусловлено различными температурными профилями для каждой стороны в процессе

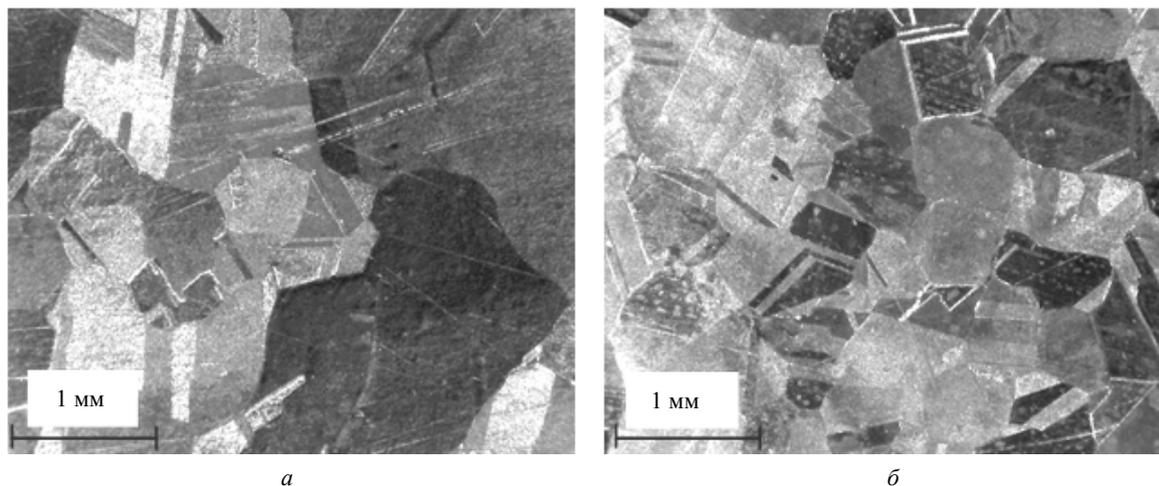


Рис. 2

металлизации, что и приводит к разному росту кристаллов. Различное поликристаллическое строение металлизации приводит к тому, что электрическое сопротивление на обеих сторонах тоже различно. Это подтверждается результатами измерения сопротивления металлизации, приведенными в табл. 1.

Адгезия является основным показателем качества соединения материалов [4]. Поэтому для определения прочности соединения в DBC-подложках были проведены измерения адгезии меди к керамике по ГОСТ 28830–90. В среднем адгезия на обеих сторонах составила порядка 54...55 Н/мм<sup>2</sup>. На рис. 3 представлено место отрыва меди от керамики

Таблица 1

Параметр	На стороне рис. 2, а	На стороне рис. 2, б	Медная фольга М0б толщиной 300 мкм	Теоретическое значение
Удельное сопротивление металлизации DBC-подложки (10 <sup>-6</sup> Ом · см)	1.95	2.12	1.84	1.72

Такая структура металлизации создает шероховатость на стороне, показанной на рис. 2, а, – класса 9а (шероховатость  $0.24 \pm 0.03$  мкм), в то время как на другой стороне (рис. 2, б) – класса 9б ( $0.21 \pm 0.02$  мкм) (измерения проводились щуповым профилометром TR220 с точностью  $\pm 0.01$  мкм по ГОСТ 2789–73 по 10 точкам). Шероховатость у керамики DBC-подложки была определена после травли медной металлизации азотной кислотой с последующей промывкой дистиллированной водой и в среднем с обеих сторон составила  $0.20 \pm 0.02$  мкм. Такое значение шероховатости указывает на то, что перед металлизацией керамическая подложка подвергалась шлифовке для увеличения площади соприкосновения с медью.

Из табл. 1 видно, что на стороне, показанной на рис. 2, а, сопротивление почти на 1 Ом ниже, чем на другой стороне (рис. 2, б). Такое различие в сопротивлении следует учитывать при разработке топологии схемы, так как это может привести к тому, что на проводнике, расположенном на стороне, показанной на рис. 2, б, будет выделяться мощность на 10 % больше, чем на таком же проводнике на стороне, показанной на рис. 2, а.

у DBC-подложки в результате измерения. Проведенный химический анализ этой области показал, что светлыми участками являются остатки меди (Cu), темными – оксидная керамика (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а между ними расположены области алюмомедной шпинели (CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) (переходной слой).

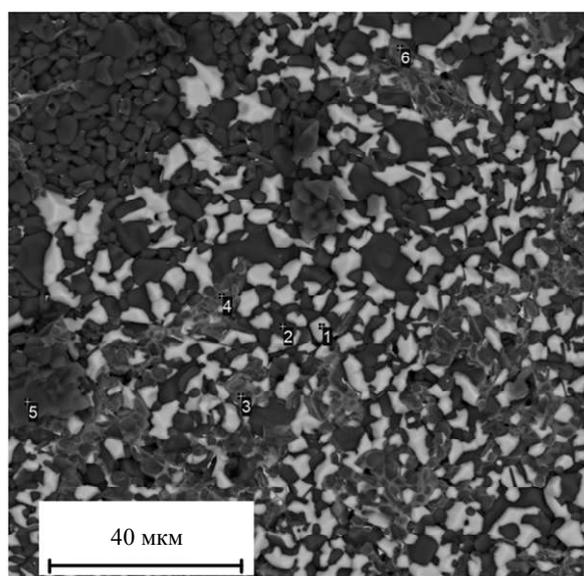


Рис. 3

Таблица 2

Параметр	Керамическая ДВС-подложка «СЕТС»	Подложка из керамики марки ВК96 «НЭВЗ-Керамикс»	Подложка из керамики марки ВК100 «НЭВЗ-Керамикс»	Методики и стандарты, по которым проводились измерения
Содержание основного вещества, %	98	96	99.7	Рентгенофлуоресцентный анализ ARL PerformX Sequential XRF
Прочность при статическом изгибе, МПа ( $\pm 1$ %)	193.9	206.2	313.8	ГОСТ 24409
Удельное объемное электрическое сопротивление при 25 °С, Ом·см ( $\pm 5$ %)	$40 \cdot 10^{14}$	$2.5 \cdot 10^{15}$	$2.5 \cdot 10^{14}$	Тераомметр Е6-3 ОСТ 11.027.006–83
ТКЛР в интервале температур 20...1000 °С, $\times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ( $\pm 5$ )	59...80	60...81	56...80	РД 11.027.022–77
Теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·°С) ( $\pm 5$ %)	21	24	29	Измеритель температуропроводности LFA 447 ГОСТ 24409
Напряжение пробоя, кВ	15	17	18	РАСЛ 25000.10167

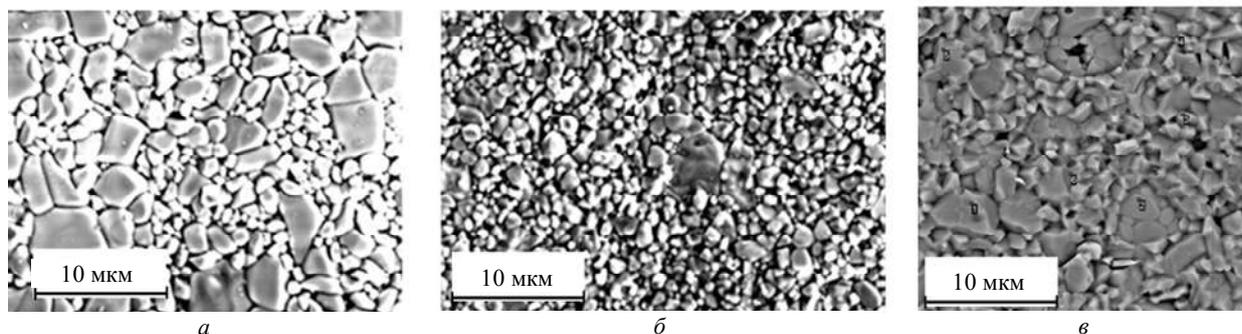


Рис. 4

Влияние различий структур металлизации двух сторон на значения адгезии из измеренных данных не наблюдается.

Для выявления качества оксидной керамики, используемой в ДВС-подложках производителем «СЕТС», были исследованы сами керамические подложки с предварительно сравненной медью в азотной кислоте. У ДВС-подложек «СЕТС» и подложек, изготовленных на «НЭВЗ-Керамикс», были измерены основные интересные разработчиков СПУ параметры, приведенные в табл. 2. На рис. 4 представлены сравнительные фотографии поверхностей керамик: *а* – ВК100 («НЭВЗ-Керамикс»); *б* – ВК96 («НЭВЗ-Керамикс»); *в* – ДВС («СЕТС»).

Керамика, используемая в ДВС-подложках «СЕТС», содержит 98 % основного вещества ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и по этому показателю находится в промежутке между керамикой ВК96 и ВК100. По многим параметрам ДВС-керамика очень близка к керамике марки ВК96, что указывает на нали-

чие возможности импортозамещения подложками этой марки керамики. Однако, как можно видеть из табл. 2, большинство характеристик керамических подложек из керамики марки ВК100 значительно превосходят характеристики ДВС-подложек и подложек из керамики ВК96, что говорит о приоритетности этой керамики при выборе керамического материала для производства ДВС-подложек для высокоомощных СПУ. На рис. 4 видно, что поверхностная структура у ДВС-керамики очень схожа со структурой керамики марки ВК96. Однако в керамике ВК96 зерна более округлые, а в ДВС продолговатые с острыми углами, что указывает на различные технологии изготовления порошка глинозема. Подложка из керамики марки ВК100 имеет более крупнокристаллическую структуру, в отличие от керамики ВК96, что связано с более высокотемпературным режимом спекания подложки из ВК100. Для выявления зависимости качества соединения меди с керамикой по технологии ДВС от структуры и химического состава

подложки будут проведены дополнительные исследования.

За счет высоких тепло- и электропроводящих свойств меди и отсутствия промежуточных адгезионных слоев металлизация по DBC-технологии намного превосходит по качеству металлизацию, изготовленную любым другим методом.

Керамика, используемая производителем «СЕТС» в DBC-подложках, по многим характеристикам уступает подложкам российского производ-

ства от «НЭВЗ-Керамикс», что указывает на приоритетность отечественного керамического материала для изготовления плат высокоомощных СПУ.

Выявленная в результате исследований неоднородность структуры медной металлизации DBC-подложек компании «СЕТС» является особенностью данного технологического процесса, что приводит к различным значениям сопротивления на противоположных сторонах подложки. Этот факт следует учитывать при разработке устройств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульц-Хардер Ю., Исламгазина Л., Валев С. Критерии выбора подложек для силовых модулей // Компоненты и технологии. 2004. № 3. С. 1–3.
2. Barlow F., Elshabini A. Ceramic Interconnect Technology Handbook. Boca Raton: CRC Press., 2007. 456 p.
3. Исламгазина Л. Силовые полупроводниковые приборы ЗАО «Протон-Импульс» // Компоненты и технологии. 2004. № 8. С. 2.

4. Шульц-Хардер Ю., Валев С. Медно-керамические подложки DBC: новые возможности, перспективы и проблемы создания нового поколения изделий силовой электроники // Компоненты и технологии. 2005. № 3. С. 1–2.

---

I. B. Krasniy  
*Novosibirsk state technical university*

### TECHNOLOGY OF FORMATION OF THICK COPPER LAYERS ON CERAMIC SUBSTRATES WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY

*Methods of formation of copper layers on ceramics for power electronics circuits are considered. Research of key parameters of the ceramic-metal substrates metallized on technology of direct bonding of copper with ceramics is carried out. Features of this metallization technology on the example of ceramic-metal substrates of foreign production from the «CETEC» company are revealed.*

**Power semiconductor devices, ceramic with high thermal conductivity, direct bonded copper**

---