Технологии изготовления плат для высокомощных силовых полупроводниковых устройств Часть 2

Иван Красный, Юрий Непочатов, Александр Беркин, Светлана Кумачёва, Юлия Швецова (Новосибирск)

Одним из методов эффективного отвода тепла от активных элементов силовых полупроводниковых устройств (СПУ) высокой мощности является использование материалов с высокой теплопроводностью. Как было показано в первой части статьи [1], перспективной технологией, направленной на решение проблемы отвода тепла, является технология DBC (Direct Bonded Copper), которая заключается в создании надёжного соединения меди с высокотеплопроводящей керамикой и использовании такой металлокерамической структуры в качестве платы для СПУ. Во второй части статьи представлены результаты измерения основных параметров DBC-подложек зарубежного производства и исследована возможность применения в таких структурах отечественных материалов.

Технология DBC

Существует несколько способов создания керамических подложек с двухсторонней толстой медной металлизацией. На сегодняшний день наиболее экономичным решением является технология DBC (Direct Bonded Copper – прямое медное соединение), которая была разработана в Мюнхенском Технологическом Университете в 1981 году [2]. Структура силового элемента управления на основе DBCподложки показана на рисунке 1.

Керамические подложки, металлизированные по технологии DBC, широко применяются за рубежом в изделиях силовой электроники. Ведущими производителями в этой сфере являются Curamik Electronic, Ferrotec Nord Corporation, KYOCERA, MARUWA, CETC (China Electronics Technology Group Corporation) и другие. В настоящее время российские производители в качестве аналога могут предложить только керамические подложки с молибденовой / вольфрамовой / медной металлизацией, изготовленной по толстоплёночной технологии или по технологии АМВ, которые имеют свои ограничения [1, 3]. Однако ни один отечественный производитель не может предложить керамические подложки, металлизированные по технологии DBC, которые лучше подходят для производства СПУ. Поэтому российским разработчикам высокомощных силовых полупроводниковых приборов приходится использовать медно-керамические подложки зарубежного производства, что влияет на стабильность поставок конечного продукта и отражается на стоимости готовых приборов.

С целью определения реальных характеристик керамических DBCподложек и выявления возможности использования в таких структурах отечественных материалов в научно-техническом отделе предприятия HЭB3-КЕРАМИКС были исследованы металлизированные по технологии DBC алюмооксидные (Al₂O₃) керамические подложки от компании СЕТС, которые являются наиболее популярными среди производителей СПУ (см. рис. 2).

Характеристики металлизации DBC-подложек

Исследуемые образцы DBC-подложек от компании СЕТС имели размеры керамики 120×120 мм, толщина в среднем 640 ± 17 мкм (измерения проводились в 13 точках микрометром Micron с точностью измерения 5 мкм). Двусторонняя медная металлизация была толщиной 300 мкм и размером $119 \times$ 119 мм. При исследовании поверхности DBC-подложек было установлено, что структура металлизации сторон подложки различна (см. рис. 3а и 3б) и существенно отличается от структуры медной фольги M06, изготовленной по ГОСТ 859-2001 (см. рис. 3в).

После подтравливания поверхностей DBC-подложки азотной кислотой, на них можно было отчётливо раз-





Рис. 2. Алюмооксидные DBC-подложки производства компании CETC



Рис. 3. Фотоизображения поверхности DBC-подложки (×150): а – сторона а; 6 – сторона б; в – поверхность медной фольги марки МОб



Рис. 4. Фотоизображения поверхности DBC-подложки после травления в азотной кислоте (×150): а – сторона *a*; б – сторона *b*; в – поверхность медной фольги марки M06



Рис. 5. Изображения поверхностной структуры: а – керамическая подложка марки ВК100; б – керамическая подложка марки ВК96; в – DBC-подложка

личить отдельные кристаллы меди, их форму и размеры (см. рис. 4а и 4б). На этих фотографиях видно, что на стороне а зёрна меди имеют размеры порядка 1-2,5 мм, что в среднем в два раза крупнее зёрен на стороне б. Это отличие, возможно, обусловлено различными температурными режимам процесса металлизации для каждой из сторон. Такая структура металлизации создаёт шероховатость класса 9в с Ra = $0,24 \pm 0,03$ мкм на стороне *a* и Ra = 0,21 ± 0,02 мкм на стороне б. Измерения проводились щуповым профилометром TR220 (точность ±0,01 мкм) по ГОСТ 2789-73. Шероховатость у керамики DBC-подложек была определена после стравливания медной металлизации азотной кислотой с последующей промывкой дистиллированной водой и с обеих сторон составила, в среднем, $Ra = 0,20 \pm 0,02$ мкм (класс 9в)(см. рис. 5). Такое значение шероховатости указывает на то, что перед металлизацией, для увеличения прочности сцепления с медью, керамические подложки подвергались механической обработке.

Различное поликристаллическое строение металлизации приводит к разнице электрического сопротивления сторон *а* и *б*, поскольку межкристаллическое сопротивление вносит большой вклад в общее сопротив-

ление. На стороне б поликристаллов больше, чем на стороне а и, соответственно, граней, которые создают дополнительное сопротивление. Для подтверждения этого вывода на обсих сторонах DBC-подложки было измерено удельное сопротивление металлизации. Измерения проводились цифровым прецизионным мультиметром Tektronix DMM4040 (точность 1×10^{-7} Oм). Результаты этих измерений представлены в таблице 1.

Из данных, приведённых в таблице 1, видно, что на стороне *а* сопротивление почти на 10% ниже, чем на стороне *б*. Такое различие в сопротивлении следует учитывать при разработке топо-



Рис. 6. Принцип измерения адгезии медного покрытия к DBC-подложке

логии схемы, так как это может привести к тому, что на проводнике, расположенном на стороне *б*, будет выделяться больше мощности, чем на проводнике тех же размеров на стороне *а*.

Адгезия является основным показателем качества соединения материалов. Для определения прочности соединения в DBC-подложках были проведены измерения адгезии меди к керамике до и после воздействия термоударов.

Измерения адгезии DBC-подложек проводились на образцах размером 30 × 30 мм, которые подвергались воздействию различного числа термоударов по ГОСТ 20.57.406-81 (метод «двух камер» 205-1, перепад температуры –60...150°С, выдержка 1 час). После этого измерялась адгезия на сторонах *а* и *б* с использованием разрывной машины Instron 3366L4610 с точностью измерения 1%. Принцип измерения показан на рисунке 6.

Подготовка к измерению адгезии производилась следующим образом. Измеряемая DBC-подложка и разрывной столбик с площадью основания 0,5 см², изготовленный из латуни марки ЛС-59-1, облуживались паяльной пастой на основе порошков оло-



Рис. 7. Место отрыва меди от керамики на DBC-подложке

ва и свинца с добавкой вазелина и канифоли, располагались на электроплите и разогревались до температуры 270°С. Залуженный разрывной столбик закреплялся на залуженной поверхности измеряемой DBC-подложки строго перпендикулярно. В таком положении детали припаивались друг к другу.

Для обеспечения равномерной нагрузки на измеряемую подложку использовался металлический диск с отверстием 0,6 мм, на который создавался упор (с помощью специальной оснастки – тисков) в тот момент, когда к разрывному столбику прикладывалось усилие в вертикальном направлении. Обработка измеренных данных проводилась по ГОСТ 28830-90. В таблице 2 представлены результаты измерений адгезии на стороне а и стороне б. На рисунке 7 показано место отрыва на DBC-подложке меди от керамики. Проведённый химический анализ этой области показал, что светлыми участками являются остатки меди (Си), темными алюмооксидная керамика (Al₂O₃), а полупрозрачные области – это алюмомедная шпинель (CuAl₂O₄) (переходный слой).

Из данных, приведённых в таблице 2, видно, что прочность соединения

Таблица 1. Сравнение сопротивления медного покрытия на DBC-подложках

Параметр	Сопротивление медного покрытия на DBC-подложках		Сопротивление медной фольги МОб	Теоретическое сопротивление	
	на стороне <i>а</i>	на стороне б	толщиной зоо мкм		
Удельное сопротивление, 10 ⁻⁶ Ом см	1,95	2,12	1,84	1,72	

Таблица 2. Результаты измерения адгезии медного покрытия к керамике у DBC-подложек

Параметр	Значение				
Количество термоударов	0	5	10	15	20
Адгезия к стороне <i>a</i> (с крупными поликристаллами), Н/мм ²	55,6	53,7	51,2	48,6	47,1
Адгезия к стороне <i>б</i> (с мелкими поликристаллами), Н/мм ²	54,5	51,0	48,3	46,8	46,0

алюмооксидной керамики с медью по технологии DBC имеет высокие значения. Однако из результатов измерений также видно, что после 20 термоударов адгезия ухудшается почти на 16%, что может оказаться серьёзной проблемой при проектировании на таких подложках высокомощных устройств. Подобное ухудшение адгезии происходит из-за механических напряжений, которые возникают в соединении между медью и керамикой при температурных перепадах в результате разности температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) меди и керамики. Более тщательные исследования зависимости адгезии от перепадов температуры требуют проведения исследований на большем количестве образцов.

Характеристики керамики в DBC-подложках от производителя CETC

Для определения качества керамики, используемой компанией СЕТС, были исследованы подложки с медью, которая предварительно была стравлена азотной кислотой (см. рис. 5в). Для сравнения характеристик этих подложек с отечественными образцами, на предприятии НЭВЗ-КЕРАМИКС были изготовлены алюмооксидные подложки размером 120 × 120 мм из керамики марок ВК-96 и ВК-100 толщиной 640 мкм. Подложки изготавливались на оборудовании KEKO EQUIPMENT по технологии литья на движущуюся основу, которая включает в себя следующие основные операции:

- приготовление шликера;
- литьё сырой керамической плёнки;
- изготовление заготовок подложек из сырой керамической плёнки;
- спекание заготовок керамических подложек;
- механическая обработка поверхности (шлифовка, полировка, торцовка краёв и др.).

Особенностью этой технологии является то, что у спечённых подложек торцы обрезаются методом лазерного скрайбирования на лазерной установке МЛ1-1, после чего отламываются специальным приспособлением. Керамические DBC-подложки производства компании СЕТС также имеют на торцах характерные следы от воздействия лазерного луча (см. рис. 8). Это указывает на то, что данные керамические подложки изготавливались по технологии литья на движущуюся основу с последующим лазерным скрайбированием торцов.

У DBC-подложек производства СЕТС и отечественных подложек были измерены основные физические и механические параметры, которые очень важны для разработчиков электронных устройств. Средние значения измеренных параметров приведены в таблице 3.

По результатам проведённого анализа был сделан вывод о том, что керамика, используемая в DBC-подложках компанией СЕТС, содержит 98% основного вещества (Al₂O₃), и по этому показателю занимает промежуточное положение между керамикой ВК96 и керамикой ВК100. По многим параметрам DBC-керамика схожа с керамикой марки ВК96. Однако, как можно видеть из таблицы 3, большинство характеристик подложек из керамики марки ВК100 значительно превосходят характеристики DBC-подложек и подложек из керамики ВК96. Это может стать определяющим фактором при выборе керамического материала для производства DBC-подложек для высокомощных СПУ.

Для сравнения поверхностных структур керамики DBC-подложек от СЕТС и отечественных подложек на электронном микроскопе MIRA3 были сделаны фотографии поверхностей этих подложек (см. рис. 5а, 56 и 5в).

На фотографиях видно, что поверхностная структура у DBC-керамики очень схожа со структурой керамики марки ВК96. Однако в керамике ВК96 зёрна более округлые, а в DBCкерамике – продолговатые и с острыми углами, что указывает на различные технологии изготовления порошка глинозёма. По сравнению с керамикой марки ВК96, подложка из керамики марки ВК100 имеет более крупнокристаллическую структуру, что связано с более высокотемпературным режимом её спекания. Для выявления зависимости качества соединения меди с керамикой по технологии DBC от характера поверхностной структуры керамической подложки и её химического состава планируется провести дополнительные исследования.

Одним из определяющих параметров выбора материала для изготовления надёжных высокомощных полупровод-



Рис. 8. Торец DBC-подложки (×100)

никовых устройств является высокая теплопроводность, которая для металлокерамических подложек рассчитывается по формуле эквивалентной теплопроводности (КЕ) из работы «Ceramic Interconnect Technology Handbook» [2]:

$$K_E = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \times t_i}{\sum_{i=1}^n t_i},$$

где K_E – эквивалентная теплопроводность, K_i – теплопроводность каждого материала [1], t_i – толщина каждого материала (медь – 300 мкм; керамика 640 мкм), n – количество слоёв материала (медь – керамика – медь, n = 3).

Таблица 3. Результаты измерений характеристик керамических алюмооксидных (Al ₂ O ₃) DBC-подложек компании CETC и отечественных г	подложек
---	----------

Параметры	Керамическая DBC-подложка (CETC)	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	Рентген флуоресцентный анализ ARL PerformX Segential XRF	
Шероховатость поверхности по Ra, мкм, (±0,01 мкм)	96 (0,20)	9б (0,22)	9в (0,18)	FOCT 2789-73	
Прочность при статическом изгибе, МПа, (±1%)	193,9	206	313,8	FOCT 24409	
Удельное объёмное электрическое сопротивление при 25°С, Ом-см, (±5%)	$40 imes 10^{14}$	$2,5 imes 10^{15}$	$25 imes 10^{14}$	Тераомметр Еб-3, ОСТ 11 027.006-83	
Тангенс угла диэлектрических потерь, tgδ, в диапазоне частот 8–10 ГГц	1,5×10 ⁻⁴	1,2×10 ⁻⁴	1,0×10 ⁻⁴	ГОСТ Р 8.623 544-86	
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon,$ в диапазоне частот 8–10 ГГц, (±0,2)	7,3	8,1	9,6	FOCT 22372-83	
ТКЛР (10 ⁻⁷ 1/°С) в интервале температур, °С, (±5)					
20 – 200	59	60	56		
20 – 500	70	72	67	РД 11 027.022-77	
20 – 900	77	79	75		
20 – 1000	80	80	80		
Кажущаяся плотность, рк , г/см ³ , (±0,01)	3,74	3,79	3,96	FOCT 24409	
Пористость, %, (0,01%)	0,07	0,04	0,02	FOCT 24409	
Теплопроводность при 20°С, Вт/м-град, (±5%)	21	24	29	Измеритель температуропроводности LFA 447, ГОСТ 24409	
Напряжение пробоя, кВ	15	17	18	РАСЛ 25000.10167	

Таблица 4. Результаты расчёта эквивалентной теплопроводности

Керамические подложки	DBC	BK96	BK100
Эквивалентная теплопроводность К _е , Вт/м·К	209,5	211,7	213,7

В таблице 4 представлены результаты расчета эквивалентной теплопроводности DBC-подложек на керамике различных типов.

При расчёте эквивалентной теплопроводности были использованы данные из таблицы 3. Как видно из расчётов, эквивалентная теплопроводность у DBC-подложек из керамики марок BK96 и BK100 почти на 2% выше, чем у DBC-керамики (CETC), что даёт небольшое преимущество для отечественной керамики при выборе керамических подложек для их металлизации толстыми слоями меди.

Выводы

Керамические подложки, содержащие $98\% \, Al_2O_3$, металлизированные по технологии DBC от компании СЕТС, имеют показатели адгезии, которые удовлетворяют требованиям большинства российских производителей СПУ.

Выявленная в результате исследований неоднородность структуры медной металлизации DBC-подложек от компании СЕТС является особенностью данного технологического процесса, что приводит к различным значениям сопротивления на противоположных сторонах подложки. Этот факт следует учитывать при разработке устройств. Однако за счёт высоких теплопроводящих и электропроводящих свойств меди и отсутствия промежуточных адгезионных слоёв, металлизация по DBC-технологии по качеству намного превосходит металлизацию, изготовленную любым другим методом.

Керамические подложки, используемые компанией СЕТС в DBC-подложках, по многим характеристикам уступают подложкам производства НЭВЗ-КЕРАМИКС, что указывает на конкурентоспособность отечественного керамического материала для изготовления плат высокомощных СПУ.

Литература

- Красный И.Б., Непочатов Ю.К., Кумачёва С.А., Швецова Ю.И. Технологии изготовления плат для высокомощных силовых полупроводниковых устройств. Часть 1. Современная электроника. 2014. №9.
- 2. *Barlow F., Elshabini A*. Ceramic Interconnect Technology Handbook. CRC. 2007.
- Батыгин В.Н., Метёлкин И.И., Решетников А.М. Вакуумно-плотная керамика и её спан с металлами. Москва. Энергия. 1973. Э