

Разработка технологии изготовления металлизированных подложек для изделий силовой электроники

Юрий Непочатов, Гуго Дейс, Александр Богаев (Новосибирск), Александр Каширин, Александр Шкодкин (Калужская обл.)

В статье даётся описание существующих методов металлизации подложек для силовой электроники, альтернативой которым может быть метод холодного газодинамического напыления. Приведены результаты разработки технологии металлизации керамических подложек этим методом на оборудовании ДИМЕТ. Полученные данные параметров адгезии и проводимости позволяют сделать выводы о перспективности этого метода металлизации.

Растущий спрос на надёжные силовые полупроводниковые модули высокой мощности и приемлемой стоимости обусловлен непрерывно развивающимся рынком силовых преобразовательных устройств: приводов, систем управления энергопотреблением, источников бесперебойного питания, импульсных источников питания и электрических транспортных средств. Основные требования, предъявляемые к законченному силовому модулю, – минимальные габариты и низкая стоимость материалов и процесса производства в сочетании с высокими техническими характеристиками, устойчивостью к воздействиям окружающей среды и практически абсолютной безотказностью. Конструкция современного модуля должна обеспечивать минимальные значения переходных тепловых сопротивлений и распределённых индуктивностей силовых шин в сочетании с высоким напряжением изоляции. Основным элементом конструкции силового модуля является металлизированная керамическая подложка, на которой расположены силовые полупроводниковые кристаллы. Керамическая подложка выполняет две основные функции:

- осуществляет электрическую изоляцию токоведущих шин топологического рисунка, расположенных на одной стороне, друг от друга, а также от токоведущих шин на другой стороне;
- передаёт тепло, выделяемое активными силовыми полупроводниковыми кристаллами (диодами, транзисторами, тиристорами), на теплоотводы и радиаторы.

По типу конструкции силовые модули можно условно разбить на два типа: паяные с изолированным основанием и модули прижимной конструкции. В обоих случаях чипы (IGBT, FRD и т.д.) припаиваются на керамическую подложку, играющую роль электроизолирующего и теплопроводящего слоя между полупроводниковыми кристаллами и основанием-теплоотводом. Используемая для подложек керамика негигроскопична, термостойка, является изоляционным материалом с высокими механическими и электрическими свойствами, отличается сравнительной простотой технологии изготовления и невысокой стоимостью. Механическая прочность на сжатие, растяжение, изгиб достаточна для практического использования. При изготовлении силовых модулей для обеспечения безотказности и высоко-го напряжения изоляции, а также минимальных значений переходных тепловых сопротивлений используются керамические подложки на основе оксида алюминия Al_2O_3 и нитрида алюминия AlN с медным слоем с обеих сторон керамической пластины. По способу получения толстого медного слоя на керамических пластинах, пригодного для эффективной работы с токами свыше 50 А и напряжениями 1...4 кВ, наибольшее распространение получили технологии AMB (Active Metal Braze) и DBC (Direct Bonded Copper). AMB является комбинированной технологией, в которой необходимый толстый слой проводника достигается гальванической металлизацией предварительно полученных тонкоплёночных проводников. Такая технология

позволяет достичь превосходной адгезии и электрических свойств конечной подложки. Однако она имеет ограниченное применение, прежде всего в силу сложности и дороговизны технологического процесса. Оптимальным сочетанием технических и коммерческих преимуществ для производства силовых модулей обладают подложки, изготовленные по технологии DBC. Такая подложка представляет собой пластину из керамики Al_2O_3 или AlN, покрытую с двух сторон фольгой из бескислородной меди. Соединение достигается за счёт эвтектической связи, образующейся при высокотемпературной обработке в туннельной печи между молекулами оксида меди и оксида алюминия (в случае керамики из нитрида алюминия его поверхность предварительно окисляется). Как правило, нижний слой (сплошной или сетчатый) служит для соединения подложки с теплоотводом, верхний образует необходимую топологию электрической схемы модуля и обеспечивает электрическое соединение силовых ключей, силовых и управляющих выводов. Соединение силовых (эмиттеры IGBT и катоды FRD) и управляющих выводов полупроводниковых кристаллов с контактными площадками подложки осуществляется при помощи алюминиевой проволоки ультразвуковой сваркой. Толщина керамической основы подложки может быть различной, зависит от предъявляемых к изделию требований и варьируется от 0,25 до 1 мм. В зависимости от назначения, медный слой может иметь толщину от 0,127 до 0,5 мм. Помимо чистой меди, подложки могут иметь один из трёх вариантов финишного покрытия: никель (толщиной 2...10 мкм), золото (толщиной 0,01...0,15 мкм) или комбинация никель-золото. Для получения финишного покрытия используется метод химического осаждения. На отечественном рынке материал, обладающий вышеперечисленными характеристиками, представляет фирма curamik® electronics (Германия), разра-

ботчик и крупнейший изготовитель DBC-подложек в мире. Характеристики и способы получения фирмой Samsung медного слоя на керамических пластинах на основе оксида алюминия и нитрида алюминия приведены в [1]. Для получения металлизации по технологии DBC на обе стороны керамической подложки осаждают толстые (до 300 мкм) проводящие слои, из которых формируют многослойную металлизационную систему. В процессе осаждения проводящих слоёв, при монтаже навесных элементов на подложку, а также при последующей эксплуатации силовых модулей в условиях циклически изменяющихся температур многослойные металлизационные структуры подвергаются воздействию термических и механических напряжений. Важными проблемами при этом являются обеспечение высокой адгезии к подложке плёночных покрытий и их пригодность к различным видам пайки и сварки. В результате многочисленных термоциклов различия КТР меди и подложки из алюмооксидной или алюмонитридной керамики приводят к образова-

нию в керамике так называемых «конкоидальных» трещин, параллельных поверхности подложки [2, 3]. При этом происходит отслоение медного слоя от керамики, нарушается теплопередача, что в конечном итоге приводит к отказу модуля. Подложки на основе AlN имеют теплопроводность и КТР ближе к кремниевым кристаллам, чем подложки на основе Al_2O_3 , что обуславливает большую стойкость первых к термоциклированию и их применение в модулях большей электрической мощности, предназначенных для железнодорожной техники и других устройств, испытывающих сильные термические нагрузки.

Альтернативным решением для обеспечения устойчивости к термоциклированию является, по мнению авторов, способ холодного газодинамического напыления (ХГН) [4]. Впервые явление холодного газодинамического напыления было зафиксировано в начале 1980-х годов в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск) в процессе экспериментального изучения обтекания затупленных

тел сверхзвуковым потоком газа, содержащим частицы алюминия, с температурой торможения около 0...20°C. Согласно распространённой тогда точке зрения, устойчивые покрытия образуются при напылении расплавленных или близких к этому частиц. Однако, не смотря на ошибочность такого утверждения, отмеченный эффект дал толчок быстрому развитию нового способа получения покрытий, названного холодным газодинамическим напылением, созданию новых технологий и техники. Суть ХГН – «не расплавляем, а ускоряем». Дальнейшие исследования, проведённые по схеме «разгоняемая в сопле сверхзвуковая гетерогенная струя – преграда для напыления», показали определяющую роль скорости частиц. Для металлических частиц с размером менее 50 мкм существуют критические скорости (500...600 м/с) их взаимодействия с подложкой. При скорости частиц меньше критической наблюдается процесс эрозии. Если скорость частиц превышает критическое значение, происходит процесс напыления. Важно, что свойства получающихся покрытий (адгезия, пористость,

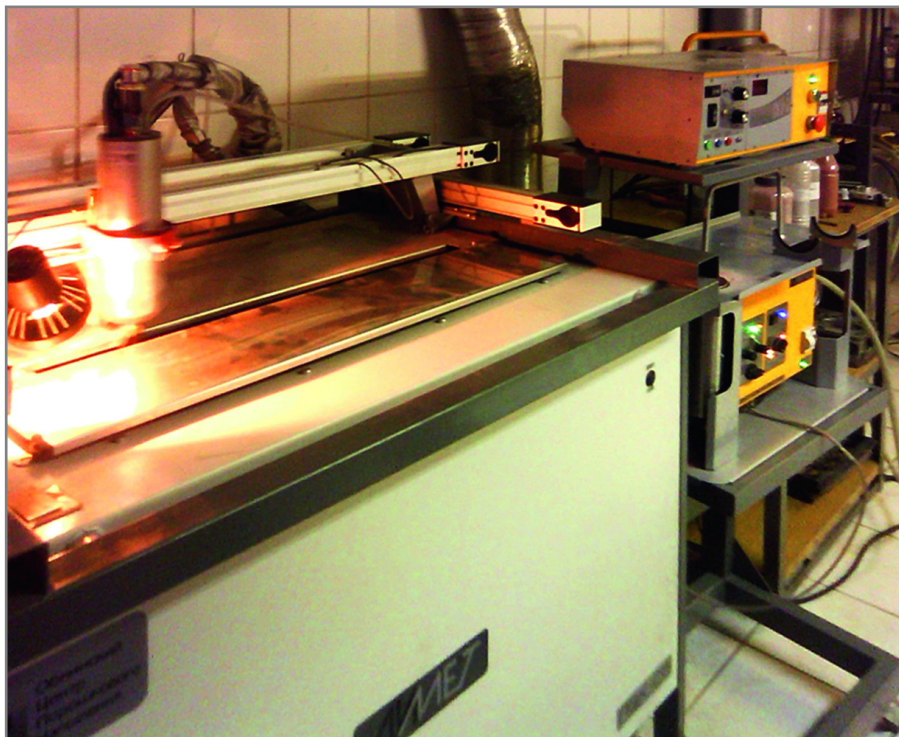


Рис. 1. Автоматизированный комплекс ДИМЕТ SKU-5 для напыления толстых слоёв Al и Cu

микротвёрдость и т.д.) зависят от скорости напыляемых частиц. Поскольку при ХГН отсутствует сильное термическое воздействие на частицы, нет и связанных с ним нежелательных побочных эффектов (к примеру, таких как окисление или фазовые переходы) и жёстких ограничений на размер частиц. С учётом того, что размеры сопла пропорциональны размеру частиц, а диаметр сопла может быть уменьшен до 1 мм и менее, здесь просматривается прямой путь к нанотехнологиям. Способ холодного газодинамического напыления позволяет использовать для получения покрытий не только однокомпонентные порошки, но и их смеси. Новым перспективным направлением в развитии ХГН можно считать получение металлокерамических покрытий различного функционального назначения (износостойких, эрозиянностойких, фрикционных и др.).

Разновидностью ХГН является технология динамической металлизации

(ДИМЕТ) [5–8], которая отличается от метода ХГН тем, что по технологии ХГН напыление осуществляется под высоким давлением (свыше 1 МПа), а по технологии ДИМЕТ – под низким давлением (до 1 МПа). При этом в качестве напыляемых материалов используются смеси металлических и керамических частиц. Добавление керамических частиц в металлический порошок позволяет наносить смешанные металлокерамические покрытия, в которых металлический компонент играет роль матрицы, удерживающей эти частицы. Экспериментально показано, что процесс формирования подобных покрытий имеет ряд особенностей, обусловленных взаимным влиянием керамических и металлических частиц на процесс напыления. В частности, повышается адгезия, прочность покрытия, его износостойкость и т.п. При напылении покрытий напыляемый материал инжектируется в закритическую зону сверхзвукового

сопла, что позволяет избежать эрозии стенок сопла в критическом сечении.

Для исследования характеристик покрытия по технологии ДИМЕТ были выполнены работы по напылению слоя толстой меди с подслоем алюминия на алюмооксидные подложки групповым методом с использованием многоместной оснастки для крепления подложек. Работы проводились на автоматизированном комплексе ДИМЕТ SKU-5 (рис. 1). Многоместная оснастка с закреплёнными керамическими подложками показана на рис. 2.

Процесс напыления проводился на автоматизированном комплексе ДИМЕТ SKU-5 (рис. 1 и 3), в состав которого входит аппарат типа ДИМЕТ-405, пылезащитная камера ПЗК-С5, на которую установлен двухкоординатный привод SKU-5, управляемый шаговыми двигателями по заданной программе от блока контроля и управления, вентиляционное устройство, компрессор. Напылительный блок крепится на двухкоординатном приводе в вертикальном положении. Режим работы был подобран путем изменения скорости и шага перемещения привода с напылителем, количества подаваемого порошка, скорости вылета частиц порошка из сопла (пять режимов за счёт нагрева газовой струи), количества проходов.

Порошки для нанесения покрытий представляли собой смесь двух порошков. Один из них – это керамический порошок оксида алюминия (корунд), который сам, ввиду своей высокой твёрдости и жаростойкости, практически не взаимодействует с обрабатываемой поверхностью, но выполняет операцию её подготовки (очистки), а в процессе нанесения покрытия выполняет роль молотка для наклёпа основного, мягкого материала покрытия. Для нанесения на подложки адгезионного подслоя из алюминия использовали смесь типа А-10-04 с соотношением корунда и алюминия соответ-



Рис. 2. Конструкция многоместной оснастки для напыления



Рис. 3. Иллюстрация процесса нанесения меди на алюминиевый подслей с помощью оборудования ДИМЕТ

Параметры подложек по технологиям ДИМЕТ, DBC и пластины из меди

Номер образца	Толщина слоя алюминия, мкм	Толщина слоя меди, мкм	Удельное сопротивление, 10 ⁻⁶ Ом·см	Адгезия, кгс/мм ²	Характер отрыва
1	50	200	2,98	1,92	Отрыв меди от алюминия
2	75	275	3,07	1,66	Отрыв меди от алюминия
3*	50	200	3,37	1,44	Отрыв по меди
4	50	275	3,18	2,31	Отрыв меди от алюминия
5	50	200	3,05	2,09	Отрыв меди от алюминия
6*	25	170	3,77	2,94	Отрыв по меди
7	50...75	450	2,91	>3,25	Отрыв по слою припоя
8	50...75	450	2,81	>3,25	Отрыв по слою припоя
9*	10...25	450	4,37	2,13	Отрыв по меди
DBC-покрытие	-	300	2,90	>4,20	Расслоение по керамике
Медная пластина	-	300	2,05	-	-

* Образцы без отжига

ственно 85 : 15. Для нанесения меди использовалась смесь типа С-01-00 с соотношением корунда и меди соответственно 45 : 55. Дисперсность порошков находилась в пределах 25...100 мкм. В качестве медной составляющей смеси использовался порошок ПМС-1 или ПМС-М4, изготовленный электролитическим методом. Порошковая медь относительно чистая, производится по ТУ 1793-094-00194429-2002.

Номинальная величина давления в аппарате 5 атм. При повышении давления увеличивается производительность и коэффициент напыления. Максимальное давление не более 7 атм, оно ограничено условием подачи материала в сопло, при превышении которого подача становится невозможной из-за отсутствия требуемого перепада давления. Существует зависимость величины адгезии от режима нагрева. Чем меньше нагрев, тем лучше адгезия, но при этом ниже коэффициент напыления. И чем выше нагрев, тем хуже адгезия, но при этом выше коэффициент напыления. Максимальный нагрев на пятом режиме. Коэффициент напыления при номинальном давлении (5 атм) в зависимости от режима нагрева находится в диапазоне 10...35%. То есть на втором режиме – 10...15%, на третьем режиме – 15...20%.

Напыление партии подложек проводилось на 15-местном приспособлении (рис. 2). Пробное напыление проводилось на одной подложке. Нанесение двух слоёв (адгезионный алюминиевый и проводящий медный) с одной стороны производили в одном цикле за счёт того, что аппарат оснащён двумя питателями для различных порошков. Сначала наносили подслой алюминия толщиной 30...40 мкм, затем толстый слой меди толщиной 250...300 мкм путём переключения с

одного питателя на другой. Время, необходимое для нанесения покрытия одной стороны подложки, составило 1,5 мин. В процессе работ было изготовлено три партии подложек с покрытиями, нанесёнными в различных режимах. Первая партия на втором режиме подогрева с порошком меди ПМС-1, вторая партия на втором режиме подогрева с порошком меди ПМС-М4, третья партия на третьем режиме подогрева с порошком меди ПМС-М4. После напыления образцы подложек с нанесёнными слоями алюминия и меди для повышения адгезии и уплотнения структуры термически обрабатывались, после чего измерялись удельное сопротивление и адгезия спечённой металлизационной структуры из толстых слоёв Al и Cu.

В таблице показаны результаты измерений образцов подложек с напылёнными слоями алюминия и толстой меди по технологии ДИМЕТ в сравнении с образцами пластины из меди и подложки с нанесённой толстой медью по технологии DBC. Как видно из таблицы, наилучшие результаты имеют образцы № 7 и № 8, у которых величины удельного сопротивления и адгезии близки к значениям этих параметров у образца с толстой медью по технологии DBC. Измерение адгезии проводилось по методу нормального отрыва стальных пластин по ГОСТ 28089-89, 28574-90, 27325-87 на разрывной машине Р5. Измерение удельного сопротивления выполнялось с использованием моста постоянного тока МО-62.

Выводы

- Технология динамической металлизации (ДИМЕТ) позволяет получать подложки с толстой медью с характеристиками металлизационных сло-

ёв не хуже, чем у подложек с толстой медью по технологии DBC.

- Для использования подложек с толстой медью в изделиях силовой электроники необходимо проверить их способность к ультразвуковой сварке, к пайке мягкими припоями и провести испытания образцов на устойчивость к воздействию термоциклов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исламгазина Л., Шульц-Хардер Ю., Валев С. Критерии выбора подложек для силовых модулей. Компоненты и Технологии. 2004. № 3.
2. Катаков А. О термоциклах и термоциклировании. Силовая электроника. 2006. № 2.
3. Гонтер М., Риттнер М., Ньюхтер В., Вольтер К-Ю. Поведение керамических DBC-субстратов при повреждении: иллюстрация дефектов, характеристики и факторы влияния. Технологии в электронной промышленности. 2008. № 7.
4. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Фомин В.М., Клишков С.В. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. Физико-математическая литература, 2010.
5. Каширин А.И., Клюев О.Ф., Буздыгар Т.В., Шкодкин А.В. Способ получения покрытий. Патент РФ № 2109842. 1997. Опубл. 27.04.98. Бюлл. № 12.
6. Клюев О.Ф., Каширин А.И., Шкодкин А.В. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 1. Процесс формирования покрытий. Сварщик. 2003. № 4 (32). С. 25–27.
7. Клюев О.Ф., Каширин А.И., Шкодкин А.В., Буздыгар Т.В. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 2. Применение покрытий. Сварщик. 2003. № 5 (33). С. 24–27.
8. Клюев О.Ф., Каширин А.И., Шкодкин А.В., Буздыгар Т.В. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 3. Оборудование «ДИМЕТ». Сварщик. 2003. № 6 (34). С. 25–27.

