

УДК 621.382

СИЛОВОЙ МОДУЛЬ С ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ АЛМАЗНЫМИ ТЕПЛООТВОДАМИ

Бакмаев С.М.-К., Емец В.М., Тингаев Н.В., Цепилов Г.В.

ЗАО «Межрегиональное производственное объединение технического комплектования «Технокомплект» (ЗАО «МПОТК «Технокомплект»), (141981, Московская обл. г. Дубна, ул. Школьная д. 10-а), e-mail: nio@techo-com.ru.

Ввиду возрастающих требований в плане надежности к изделиям силовой электроники, предложена конструкция силового модуля с поликристаллическими алмазными теплоотводами. Разработана и изготовлена прижимная конструкция силового трехфазного модуля с алмазными теплоотводами. Конструкция также позволяет использовать алмазные теплоотводы, на которых расположены силовые транзисторы, присоединенные методом низкотемпературного спекания нанопорошков серебра. Преимуществом соединения методом спекания является малое значение температурного сопротивления системы полупроводниковый кристалл – теплоотвод. Кроме того, на каждую алмазную пластину, методом термического осаждения нанесен терморезистор, служащий тепловым датчиком силового транзистора. Для управления транзисторами на силовом модуле смонтирован трехфазный драйвер с встроенной системой защиты. Ввиду высокой теплопроводности алмазной пластины и близкого расположения терморезистора к полупроводниковому кристаллу, система защиты силового модуля, в случае достижения температуры полупроводникового кристалла критического значения, оперативно отключает весь силовой модуль. Контактные площадки истока и затвора на полупроводниковом кристалле присоединены к выводам силового модуля при помощи ультразвуковой разварки.с трехфазным драйвером включающей систему защиты по температуре.

Ключевые слова: силовой модуль, MOSFET транзистор, теплопроводность, поликристаллические алмазные пластины.

POWER MODULE AT DIAMOND POLYCRYSTALLINE HEAT SINK

Bakmaev S.M.-K., Emets V.M., Tingaev N.V., Tsepilov G.V.

"Technocomplekt" JSC, (Shkolnaya str., 10-a, Dubna, Moscow region, Russia, 141981), e-mail: nio@techo-com.ru

Due to increasing requirements in terms of reliability for power electronics products, our proposed a power module construction with polycrystalline diamond heat sinks. Designed and manufactured by the pressing construction of the three-phase power module with diamond heat sinks. The construction also allows the use of diamond heat sinks, which are located on the power transistors, connected by low-temperature sintering of silver nano-powders. The advantage of bonding by sintering a low value of thermal resistance between the semiconductor chip - heat sink. Also, each diamond plate caused by thermal deposition thermistor serving as a heat sensor for each power transistor. To control the transistors in the power module mounted three-phase driver with built-in protection system. Due to the high thermal conductivity of the diamond plate and thermistor proximity to the semiconductor chip, the protection system of the power module, in the event if the temperature of the semiconductor chip reaches a critical value, operatively turns off the entire power module. The contact areas of the source and gate of the semiconductor chip are connected to the outputs of the power module using an ultrasonic bonding.

Keywords: power module, MOSFET transistor, thermal conductivity, polycrystalline diamond plate.

Компоненты силовой электроники выделяют большое количество тепла, следовательно, для обеспечения надежного функционирования изделий необходимо быстро отводить тепло от полупроводникового кристалла. Среди теплопроводящих материалов поликристаллический CVD-алмаз является наиболее перспективным материалом, поскольку его теплопроводность значительно выше теплопроводности иных используемых на сегодня материалов (табл. 1).

Таблица 1

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
CVD-алмаз	1000–1400	1,0
BeO-керамика	190–215	7,6
AlN-керамика	140–200	6
Медь	389	16,5
Сапфир	40	8,2

Сочетание высокой теплопроводности с большим пробивным напряжением нелегированного поликристаллического алмаза (более 10^6 В/см) позволяет увеличить эффективность отвода тепла и значительно повысить надежность и мощность силового модуля, а также снизить массогабаритные характеристики модуля.

Была разработана конструкция силового модуля с поликристаллическими алмазными теплоотводами (рис. 1). Основополагающим элементом силового модуля являются изолирующие теплоотводящие пластины из поликристаллического алмаза.

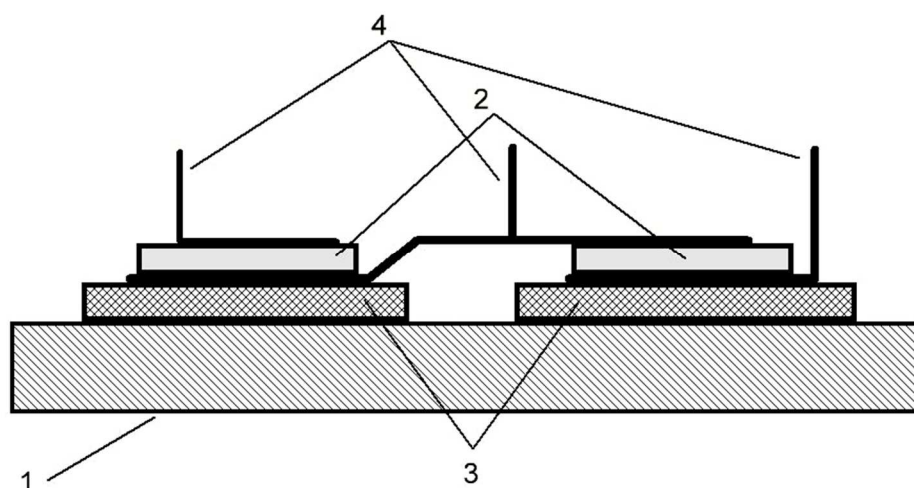


Рис.1. Функциональная схема силового модуля: 1 – основание, 2 – кристалл транзистора, 3 – поликристаллический алмазный теплоотвод, 4 – выводы транзистора

Силовые полупроводниковые приборы с силовой шиной (сток) присоединены к алмазному теплоотводу методом низкотемпературного спекания металлических нанопорошков. Поликристаллические алмазные пластины выполняют роль электроизолирующего теплоотвода между силовыми полупроводниковыми приборами и основанием силового модуля.

Изготовление теплоотвода из поликристаллического алмаза, включает в себя: подготовку кремниевой подложки, выращивание на ней алмазной пластины из смеси метана и водорода CVD методом и отделение ее от подложки в виде алмазного диска. Подготовка подложки осуществляют прорезанием на ней канавок с образованием площадки, соответствующей конфигурации готового изделия, при этом канавки выполняют шириной,

составляющей удвоенную толщину пленки готового изделия, и глубиной, превышающей ширину по технологии описанной в [1].

Снятые с подложки алмазные пластины подвергаются термохимической полировке и многослойной металлизации последовательными слоями никеля, титана, серебра по технологии [2]. При этом сторона алмазной пластины, обращенная к полупроводниковому прибору, металлизируется в пределах размера проекции полупроводникового прибора на пластину. Затем элементы модуля: металлизированные алмазные пластины, силовые шины и силовые полупроводниковые приборы необходимо соединить.

Наиболее часто используемым способом соединений полупроводниковых компонентов является пайка различными легкоплавкими припоями на основе сплавов: олова, свинца, меди, серебра, золота, кремния.

Существенным недостатком паяных соединений на основе оловянно-серебряных, оловянно-медных припоев является то, что у них температура плавления сравнима с рабочей температурой карбид-кремниевых транзисторов, при этом припой обладает невысоким коэффициентом теплопроводности, наличием ограничения по числу термоциклирования из-за значительного различия коэффициентов теплового расширения по сравнению с полупроводниковыми кристаллами. Недостатком припоев на основе эвтектического сплава золото-кремний является более высокая стоимость по сравнению с оловянно-серебряными припоями, высокая хрупкость спаев и необходимость термокомпенсирующих вкладок из медь-молибденового сплава между полупроводниковым кристаллом и токоведущей шиной.

Интерес к соединениям на основе микро- и нанопорошков, связан с тем, что они позволяют получить материалы с новыми свойствами, которые практически недостижимы при использовании крупнодисперсных материалов [3]. Основная причина этого явления - существенное различие соотношений между площадью поверхности и объемом частиц [4, 5]. Наночастицы металлов имеют низкую когезионную энергию и высокую поверхностную энергию [6]. Это свойство приводит к сильной агрегации зерен.

Другим важным свойством наночастиц металлов является зависимость точки плавления от геометрических размеров самих наночастиц [7]. Высокая поверхностная энергия по отношению к объему зерен наночастиц приводит к тому, что температура спекания частиц между собой существенно ниже температуры плавления материала. Этот эффект наблюдается в системах находящихся в защитной среде, когда наночастицы при нагреве непосредственно взаимодействуют между собой, образуя агломераты [8, 9]. Температура спекания нанопорошков в значительной степени зависит от двух факторов: размеров фракции зерен и величины внешнего давления, оказываемого на спекаемые зерна.

Спекаемые структуры на основе нанопорошков являются перспективными материалами для создания проводящих соединений в области силовой электроники и могут служить альтернативой паяным соединениям на основе легкоплавких сплавов.

В нашем случае для спекания элементов модуля используется нанопорошок серебра со средней величиной фракции 20 нм. Для низкотемпературного спекания нанопорошковое серебро используется в виде суспензии, которая получается в виде гомогенной смеси нанопорошка серебра в толуоле. Весовое содержание серебра в суспензии 56%. Оптимальная толщина спекаемого слоя нанопорошка серебра 20 – 40 мкм.

Устройство, осуществляющее непосредственно прижим и соединение спеканием, силовой шины с транзистором и алмазной пластины, расположено внутри кварцевого цилиндрического кожуха. Схема этой конструкции изображена на рисунке 2.

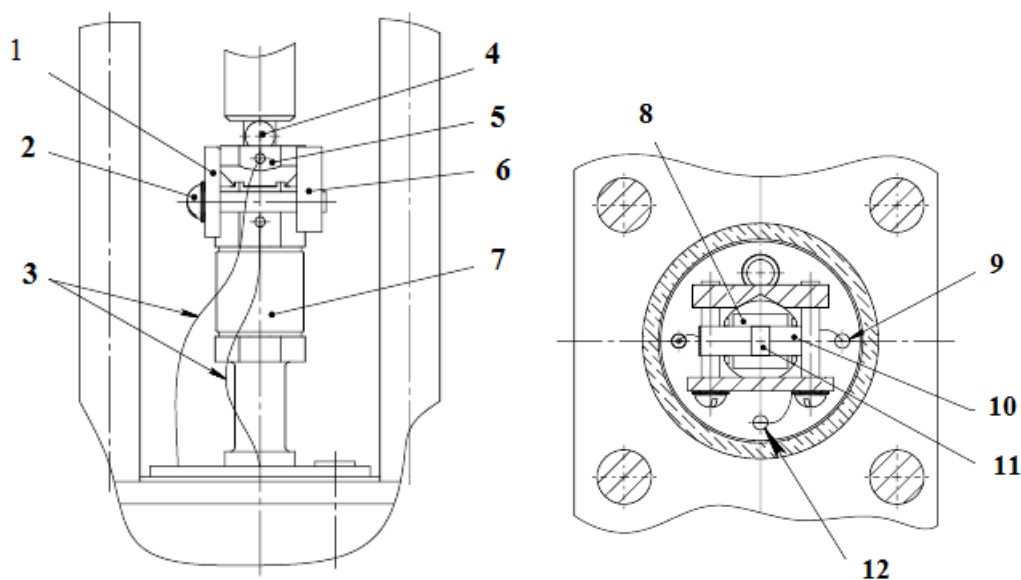


Рис.2. Конструкция устройства для низкотемпературного спекания силовой шины с транзистором и алмазным теплоотводом: 1 – направляющее кольцо; 2 – соединительный болт; 3 – термопара; 4 – прижимной шарик. 5 – верхний конусный прижим; 6 – основание прижима; 7 – нихромовый нагреватель; 8 – алмазная пластина; 9 – токовводы для нихромового нагревателя; 10 – наплавляемая силовая шина; 11 – кристалл силового транзистора; 12 – токоввод для термопары

Поскольку серебро при нагреве на воздухе поверхностно окисляется, то для реализации процессов спекания обеспечивается плавный нагрев всех соединяемых деталей в инертной среде. Кроме того, при спекании все элементы прижаты друг к другу с заданным усилием.

На рисунке 3 изображена схема алмазного теплоотвода с присоединенным кристаллом и выводами.

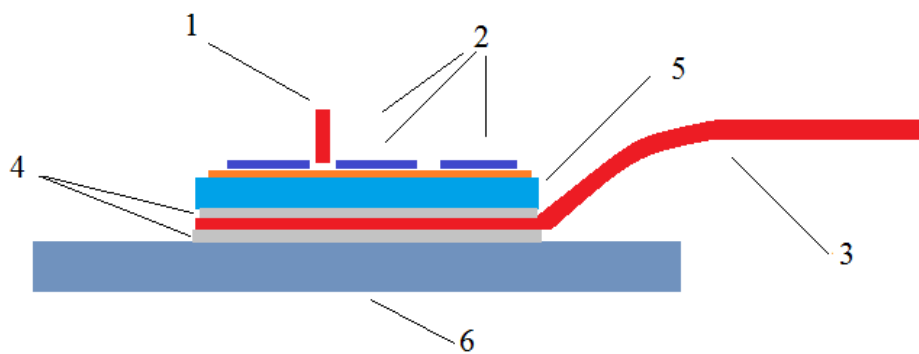


Рис.3. Алмазный тепловод с транзистором и электрическими выводами: 1 – затвор; 2 – исток; 3 – сток; 4 – соединительные слои спеченного нанопорошка серебра; 5 – силовой транзистор; 6 – теплоотводящая алмазная пластина

Алмазная пластина с карбид-кремниевым транзистором и силовой шиной показана на рисунке 4.

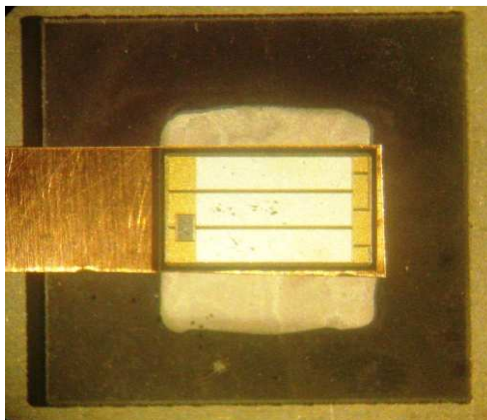


Рис.4. Алмазная теплоотводящая пластина с присоединенным транзистором и силовой шиной

Далее производится поэтапный процесс сборки силового модуля, показанный на рисунке 5.

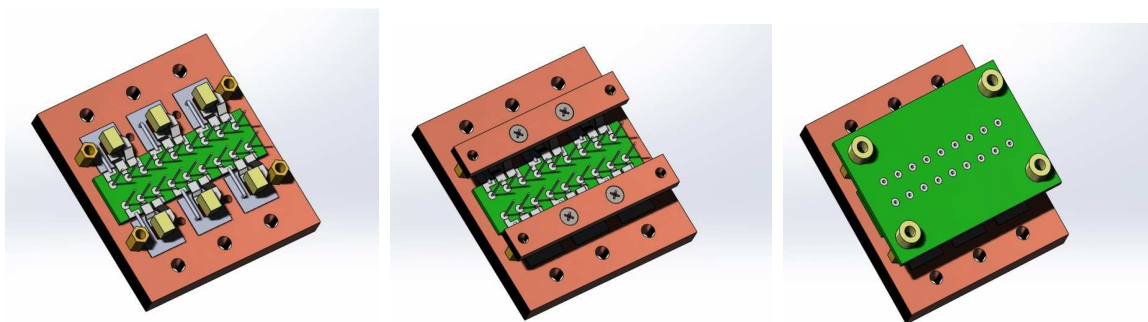


Рис.5. Последовательность этапов сборки силового модуля

На сборку кристаллов транзисторов, сверху крепится плата с разводкой силовых и управляющих проводников. Над платой силовой разводки расположена печатная плата драйвера. Схема драйвера силового модуля обеспечивает безопасное чередование управляющих сигналов подаваемых на затворы транзисторов и обеспечивает защитные

функции транзисторов во избежание превышения их предельно допустимой температуры и протекающего через них максимального тока.

Собранный образец силового модуля с поликристаллическими алмазными теплоотводами, представлен на рисунке 6.

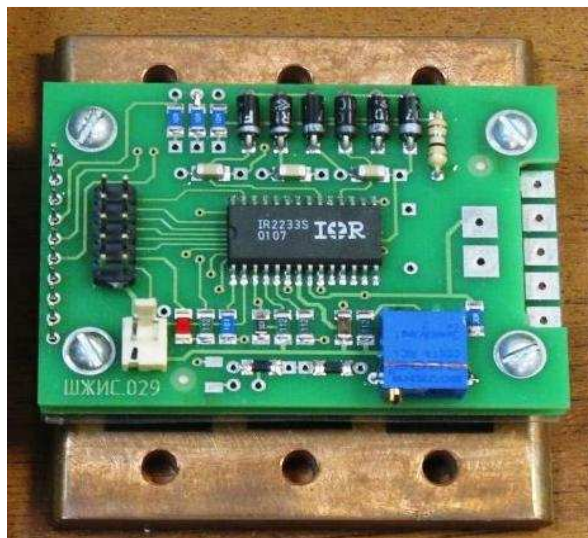


Рис.6. Силовой модуль с платой драйвера

Заключение

Разработана новая конструкция силового модуля с поликристаллическим алмазным теплоотводом, которая позволяет повысить надежность и мощность силового модуля за счет повышения эффективности отвода тепла от силовых элементов, а также снизить массогабаритные характеристики модуля.

Разработка конструкции силового модуля проводится в рамках работы по разработке перспективных технологий и конструкций изделий интеллектуальной силовой электроники для применения в аппаратуре промышленного назначения и в специальных системах (силовой модуль с поликристаллическим алмазным теплоотводом) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 14.429.12.0001 от 05 марта 2014 г.

Список литературы

1. Патент №2357001 РФ. Способ получения изделий из поликристаллического пластин алмаза. М.П. Духновский, О.Ю. Кудряшов, И.А. Леонтьев, А.К. Ратникова, Ю.Ю. Федоров, приоритет от 25.08.2007.
2. Патент № 2285977 РФ. Металлизированная пластина алмаза и способ её изготовления. Духновский М.П., Крысов Г.А., Ратникова А.К.; приоритет от 21.03.2005.
3. Гегузин Я. Е. Физика спекания, 2-е изд., М. Наука 1984.
4. Ивенсон И.В. Феноменология спекания, М. Metallургия 1985.
5. Хермель В., Б Кийбак, В Шатт и др. Процессы массопереноса при спекании, Наукова думка, 1987.

6. W. H. Qi, M.P. Wang, *Journal of Materials Science Letters*, 21 (2002) 1743.
7. S.L. Lai, J.Y. Guo, V. Petrova, et al., *Physical Review Letters*, 77/1 (1996) 99.
8. B. Zheng, I. Yamashita, M. Uenuma, et al., *Nanotechnology*, 21/4 (2010) 045305.
9. N.A. Luechinger, E.K. Athanassiou, W.J. Stark, *Nanotechnology*, 19/44 (2008) 445201.

Рецензенты:

Иванов В.В., д.ф-м.н., старший научный сотрудник (доцент), главный научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна;

Крянев А.В., д.ф-м.н., профессор НИЯУ МИФИ, г. Москва.