

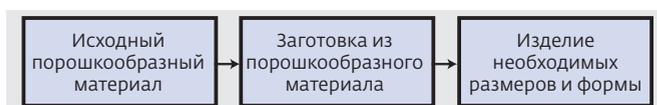
# АЛМАЗ-КАРБИДНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ "СКЕЛЕТОН" ДЛЯ ТЕПЛОТВОДОВ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

С. Катаев, В. Сидоров, к.т.н., С. Гордеев, д.т.н.  
zyies@mail.ru

Разработчики радиоэлектронных изделий повышенной мощности уделяют особое внимание отводу тепла. Отвод тепла от изделий происходит в результате теплопроводности, теплового излучения и конвекции. В реальных условиях эти три принципиально различных способа передачи тепла связаны между собой и проявляются одновременно. Однако основную роль в процессе теплоотвода играет теплопроводность. Поэтому один из путей эффективного отвода тепла в изделиях мощной электроники – применение теплоотводов из материалов с высокой теплопроводностью. В радиоэлектронике широко применяется керамика из оксида бериллия, отличающаяся высокой теплопроводностью и высокими диэлектрическими свойствами. Начинают использовать алюмонитридную керамику и поликристаллический алмаз, которые сегодня могут рассматриваться как наиболее перспективные материалы для создания теплоотводов полупроводниковых приборов. Наряду с ними заслуживает внимания и экологически чистый высокотеплопроводный алмаз-карбидный композиционный материал "Скелетон".

**К**омпозит алмаз-карбид кремния – новый тип композиционного материала (КМ) с уникальными свойствами, полученный путем химических реакций. В зависимости от концентрации алмаза и карбида кремния значения модуля упругости находятся в диапазоне 550–700 ГПа при плотности 3,1–3,3 г/см<sup>3</sup>. Твердость материала по Кнуппу составляет 50–55 ГПа. Теплопроводность достигает 600 Вт/м·К, т.е. выше теплопроводности меди. Такое сочетание свойств объясняется микроструктурой материала, формируемой жесткой карбидокремниевой матрицей, армированной алмазными частицами. Материал получают по "безусадочной" технологии, которая позволяет производить изделия не только сложных форм, но и больших габаритов.

Один из альтернативных методов получения изделий требуемого размера и форм – проведение химических реакций в объеме заготовки (рис.1) [1]. Суть метода в том, что уже на стадии изготовления заготовки из исходных веществ (как правило, порошков) формуется деталь требуемой формы и затем с помощью химических реакций изменяется состав и структура исходной заготовки. Правильный выбор химической реакции позволяет сохранить форму и размеры заготовки и получить конечное изделие требуемого состава и структуры. Этим методом получают сверхтвердый материал с высокой износостойкостью, что крайне затрудняет механическую обработку конечных изделий. Поэтому придание формы изделию на ранних стадиях технологического процесса и последующее преоб-



**Рис.1.** Получение изделий необходимых форм и размеров с помощью химических реакций в объеме заготовки

разование состава и структуры материала внутри заготовки весьма перспективно.

Рассмотрим результаты экспериментальной работы по получению КМ алмаз-карбид кремния-кремний посредством химической реакции между кремнием и углеродом непосредственно в объеме заготовки [2]. Процесс проводился при давлении не выше атмосферного. В качестве исходных материалов использовали промышленные марки порошков алмазов с размерами частиц соответственно 3-5, 5-7, 10-14, 20-28 и 28-40 мкм. Содержание примесей в кремнии не превышало 0,08 мас.%.

Для получения алмазных КМ (рис.2) первоначально формовались заготовки из алмазных порошков – "в сухую" или с добавлением временного связующего, затем проводилась термообработка заготовок и пропитка их жидким кремнием в вакуумной печи. Формование помимо получения требуемых размеров и формы конечного материала позволяет повысить в нем объемное содержание алмазных частиц.



**Рис.2.** Последовательность операций получения композиционного материала алмаз-карбид кремния-кремний

При использовании алмаза в качестве исходного вещества следует учитывать его относительно низкую термическую устойчивость. При температуре выше 1200°C происходит частичная графитизация алмаза, т.е. его превращение в более термодинамически стабильную графитоподобную структуру [3]. Этот процесс начинается с поверхности отдельных зерен и постепенно распространяется вглубь зерна. С увеличением температуры процесс графитизации алмаза становится более интенсивным. Поскольку пропитка образцов кремнием осуществлялась при температуре выше 1420°C, то при их нагреве и изотермической выдержке значительная часть структуры алмазного порошка претерпела переход в графитоподобную структуру. После-

дующая пропитка заготовок кремнием приводила к преобразованию образовавшегося графитоподобного углерода в карбид кремния. Исследования графитоподобного углерода показали отсутствие в нем других фаз. Было также установлено, что с увеличением размера алмазных частиц плотность получаемых материалов уменьшается (табл.1).

Фазовый состав алмазных КМ, полученных пропиткой кремнием, можно рассчитать следующим образом. Если предположить, что в ходе процесса часть алмаза претерпевала превращение в графитоподобный углерод, а затем в карбид кремния, то объемное содержание алмаза в конечном материале  $\varphi_a$  равно:

$$\varphi_a = (1 - \varepsilon_0)(1 - \alpha), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – пористость сформованной заготовки из алмазного порошка.

Объемное содержание карбида кремния  $\varphi_k$  будет определяться количеством углерода, вступившего в реакцию с кремнием

**Таблица 1.** Характеристики композиционных материалов, полученных из порошков синтетических алмазов различной дисперсности

Марка исходного алмаза	Размер частиц, мкм	Содержание алмаза в заготовке, об. %	$\rho_{км}$ , г/см <sup>3</sup>	Состав, об. %			$\alpha^*$
				алмаз	SiC	Si	
АСМ 5/3	3–5	51	3,36	32,6	67,0	0,4	0,36
АСМ 10/7	7–10	54	3,26	39,4	53,2	7,4	0,27
АСМ 14/10	10–14	54	3,22	41,6	45,3	13,2	0,23
АСМ 28/20	20–28	55	3,18	45,0	36,3	18,7	0,18
АСМ 40/28	28–40	54	3,13	46,0	29,0	25,0	0,15
АС6 63/50	50–63	58	3,10	53,8	15,4	30,8	0,07

\*  $\alpha$  – степень превращения алмаза в SiC.

$$\varphi_k = (1 - \varepsilon_0) \alpha M_k \rho_a / M_c \rho_k, \quad (2)$$

где  $M_k$  и  $M_c$  – соответственно молекулярные массы карбида кремния и углерода,  $\rho_a$  и  $\rho_k$  – плотности алмаза и карбида кремния, соответственно.

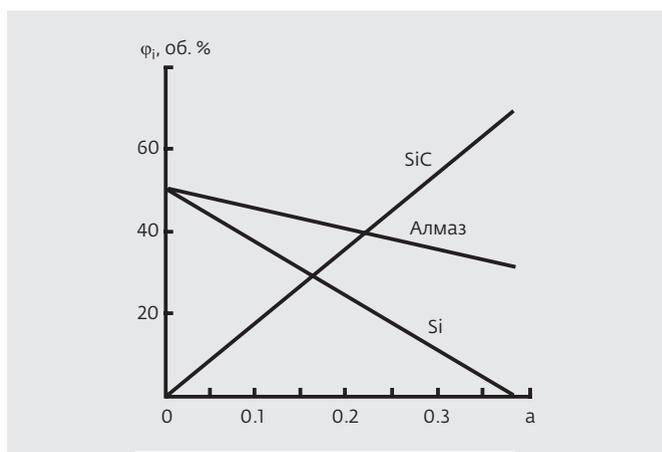
Содержание кремния  $\varphi_{Si}$  в беспористом материале будет равно:

$$\begin{aligned} \varphi_{Si} - 1 - (\varphi_k + \varphi_a) = \\ = 1 - (1 - \varepsilon_0) \left[ \frac{M_k \rho_a}{M_c \rho_k} \alpha - \alpha + 1 \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Плотность получаемого материала может быть рассчитана по формуле:

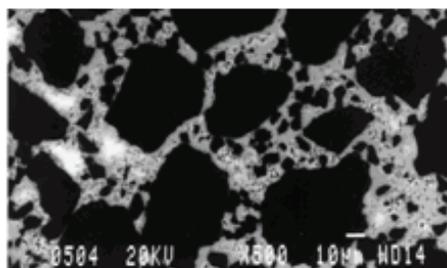
$$\rho = \rho_a \varphi_a + \rho_k \varphi_k + \rho_{Si} \varphi_{Si}. \quad (4)$$

Приведенные соотношения позволяют проследить за изменением состава композиционного мате-



**Рис. 3.** Зависимость состава материала (объемные доли алмаза, карбида кремния и кремния) от доли алмаза, претерпевшего превращение в графитоподобный углерод, а затем в карбид кремния, при пористости заготовки 50 об. %

риала в зависимости от параметра  $\alpha$ . Из зависимости состава материала от доли алмаза, претерпевшего превращение в графитоподобный углерод, а затем в карбид кремния (рис.3), следует, что существуют предельные значения степени превращения алмаза, накладывающие ограничения на условия проведения процесса получения композиционного материала. Эти предельные значения, соответствующие  $\varphi_{Si} = 0$  (очевидно, для проведения химической реакции карбидообразования во всем объеме и получения беспористых материалов, не содержащих графитоподобный углерод, необходимо обеспечить избыток кремния в нем, т.е.  $\varphi_{Si} > 0$ ), зависят от пористости заготовки алмаза. Так, при пористости 50% теоретически допустимо участие в процессе образования карбида кремния 38% алмаза, тогда как при пористости 30% возможно преобразование только 16% алмаза (см. табл.1). В материалах, полученных из порошков алмаза с размерами частиц 3–10 мкм, основной фазой является карбид кремния. В этом случае малый размер частиц алмаза приводит к интенсивному протеканию процессов графитизации и последующему формированию карбида кремния. Степень превращения алмаза в карбид кремния в ходе эксперимента достигает 27–36%. При размере частиц порошка алмаза 10–40 мкм содержание карбида кремния в полученном материале ниже, чем в



**Рис.4.** Микроструктура КМ алмаз-карбид кремния-кремний

**Таблица 2.** Модуль упругости и удельная жесткость различных материалов

Материал	E, ГПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$E/(\rho g) \cdot 10^6$ , м
Алмаз-карбид кремния-кремний 10–14 мкм*	580	3,22	18
20–28 мкм*	570	3,18	18
Бериллий	300	1,85	16
Самосвязанный карбид кремния	400	3,10	13
Алмаз	1000	3,51	29

\* Размер частиц алмаза, из которых получен композиционный материал.

предыдущей группе, а содержание кремния больше. Более низкая, по сравнению с карбидом кремния, плотность кремния является причиной уменьшения плотности материалов с увеличением размеров исходных частиц алмаза. Наибольшее содержание кремния наблюдается в образцах композитов, изготовленных из крупных зерен (50–63 мкм). Степень превращения алмаза в карбид в этом случае наименьшая – только 7%.

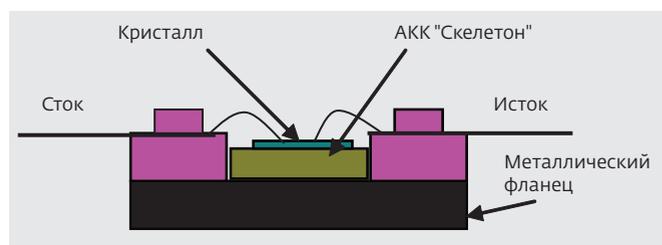
Полученная фотография микроструктуры поверхности композиционного материала, содержащего алмазные частицы размером 10–14 и 50–53 мкм, подтверждает отмеченные особенности (рис.4). В структуре материалов отчетливо видны три фазы: алмаз (черный цвет), карбид кремния (серый) и кремний (белый). Никаких следов графитоподобного углерода или других фаз не обнаружено. Кроме того, в образцах отсутствуют поры, что позволяет использовать для расчета состава материалов приведенные уравнения.

По уровню удельной жесткости, т.е. модуля упругости, отнесенного к плотности, полученные композиционные материалы алмаз-карбид кремния-кремний достигают рекордных результатов. По этой характеристике они уступают лишь монокристаллам алмаза (табл.2).

Благодаря процессу химического преобразования алмаза в объеме получаемого изделия можно изготавливать изделия заданной формы из композиционного алмазосодержащего материала "Скелетон" с уникальными свойствами (модулем упру-

гости, удельной жесткостью и теплопроводностью). Очень важна возможность изготовления деталей больших габаритов и разнообразных форм, что сегодня нельзя достичь другими методами получения подобных материалов.

В материале "Скелетон" реализуется фоновый механизм теплопроводности, определяемый частотой колебаний кристаллической решетки (фононов) фаз, входящих в его структуру. Получение материала с частичным химическим преобразованием поверхности алмазных зерен в карбидокремниевую матрицу, обуславливает



**Рис.5.** Структура LDMOS-транзистора

**Таблица 3.** Сравнительная теплопроводность материала "Скелетон" различного состава и меди

Образцы	Объемное содержание, об.%			λ, Вт/м·К
	Алмаз	Карбид кремния	Кремний	
«Скелетон» №1	55	36	9	330
«Скелетон» №2	66	25	10	470
«Скелетон» №3	75	15	10	650
Медь	–			390

**Таблица 4.** Тепловой коэффициент линейного расширения АКК "Скелетон" в зависимости от его состава (10<sup>-6</sup>/К)

Температурный интервал, °С	ТКЛР, 10 <sup>-6</sup> /К		
	Размер алмазных частиц, мкм		
	14/10	28/20	63/50–14/10
330–100	2,3	2,2	2,0
30–40	3,1	3,2	2,8
30–60	3,3	3,5	3,2

**Таблица 5.** Удельное сопротивление различных материалов, используемых в теплоотводах

Материал	Удельное сопротивление, Ом · см
Медь	1,63 · 10 <sup>-6</sup>
Композиционный материал	~10 <sup>-2</sup>
Оксид алюминия	10 <sup>12</sup> –10 <sup>13</sup>

эпитаксиальное сочетание кристаллических решеток алмаза и карбидокремниевой матрицы и, как следствие, очень слабое рассеяние фононов на границе их раздела. За счет этого обеспечивается высокая теплопроводность материала в целом (табл.3).

Учитывая технологические особенности получения композиционного материала алмаз-карбид кремния-кремний и его свойства (табл.4 и 5), можно определить возможность использования его в электронных приборах. АКК «Скелетон» не является диэлектриком, но благодаря высокой



**Рис.6.** Металлизированные теплоотводы из АКК "Скелетон"

теплопроводности и хорошему согласованию по коэффициенту теплового расширения с кремнием он перспективен для применения в LDMOS-транзисторах (рис.5) и радиоэлектронной аппаратуре, где необходим эффективный отвод тепла.

При использовании в мощных LDMOS-транзисторах теплоотводов из АКК "Скелетон" для монтажа кристалла и монтажа на фланец для снижения электрического сопротивления между истоком полупроводникового кристалла и металлическим фланцем необходимо металлизировать не только поверхности, предназначенные для монтажа кристалла и теплоотвода на фланец, но и боковые поверхности теплоотвода (рис.6).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Gordeev S.K.** Advanced Composite Materials on the Diamond Base. – Diamond Based Composites. Dordrecht: Kluwer, 1997, p.1.
2. **Гордеев С.К., Жуков С.Г., Данчукова Л.В., Экстрем Т.С.** Особенности получения композиционных материалов на основе алмаза, карбида кремния и кремния при низких давлениях. – Неорганические материалы, 2001, т.37, №6, с.691–696.
3. **Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В.** Алмазы и сверхтвердые материалы. – М., 1990.