

Новые композитные материалы для терморегуляции мощной электроники

А. Терешенок¹, С. Потапов²

УДК 621.3 | ВАК 05.27.06

Одним из важнейших факторов надежной работы мощных электронных приборов является обеспечение их хорошего охлаждения (плотности тепловых потоков в современных электронных устройствах связи и управления могут достигать несколько сотен ватт/см²). Для того чтобы решать подобные задачи, в сборочных конструкциях приборов нужно применять новые материалы и технологии. Такие традиционно используемые материалы, как металлы, керамики, синтетический алмаз, пиролитический графит, теплопроводящие пластики, часто не удовлетворяют комплексу выдвигаемых требований ввиду высокой плотности, низких удельных характеристик по теплопроводности, хрупкости, сложностей в обрабатываемости или монтаже, большой стоимости. Компромиссом могут стать композитные материалы, которые представляют собой объединение матричного металла и наполнителя, имеющих высокую теплопроводность. О таких материалах рассказывается в статье.

Композитные материалы, используемые для терморегуляции мощной электроники, проектируют так, чтобы они обладали следующими определяющими качествами: высокой удельной теплопроводностью, низким температурным коэффициентом расширения (ТКР), близким к ТКР сопрягаемых полупроводниковых материалов и керамик, приемлемой механической прочностью (табл. 1 [1]).

Наверное, наиболее широко распространенным композитным материалом, применяемым для этих целей, является AlSiC. Этот композит представляет собой высоконаполненный частицами карбида кремния алюминиевый сплав. Основными его преимуществами являются контролируемый коэффициент линейного расширения, теплопроводность на уровне чистых сплавов алюминия, а также низкая плотность. В настоящее время этот материал производится многими компаниями: Denka Company Limited, Ferrotec Corporation, Materion Corporation, Alvant Ltd, CPS Technologies Corp., DWA Aluminum Composites USA, Inc., Thermal Transfer Composites, LLC, MC-21, Inc., Sumitomo Electric U. S. A., Inc., Japan Fine Ceramics Co., Ltd. и др.

В России на данный момент крупносерийное производство изделий из материала AlSiC существует только на научно-производственном предприятии «Металл-Композит» (г. Ульяновск).

AlSiC используется для производства крышек для микропроцессоров и чипов, монтируемых по технологии flip-chip, радиаторов, теплораспределителей, корпусов

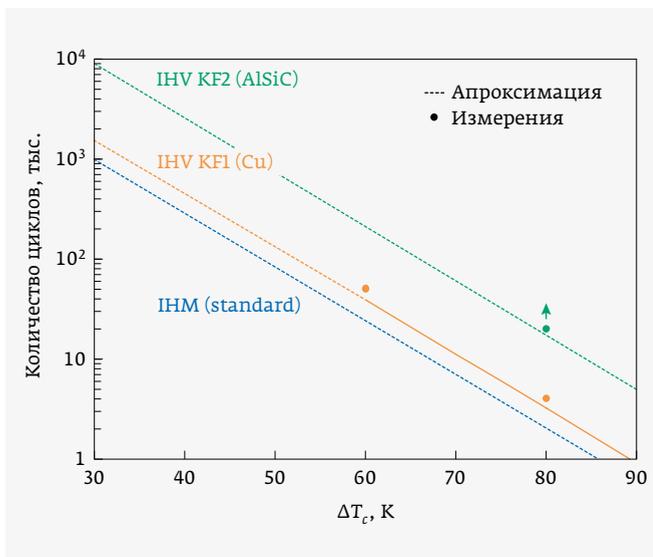


Рис. 1. Характеристика роста надежности (количество штатных циклов включения при заданном температурном перепаде на транзисторах ΔT_c) мощных IGBT-модулей с медным основанием (IHV KF1(Cu)) и с AlSiC-основанием (IHV KF2(AlSiC)). IHM (standard), IHV – платформы IGBT-модулей компании Infineon

¹ ООО «НПП «Металл-Композит», технический директор.

² ООО «НПП «Металл-Композит», главный конструктор

Таблица 1. Основные термомеханические свойства материалов, применяемых при сборке полупроводниковых электронных приборов

Материал	Плотность, г/см ³	ТКР (25–150 °С), ppm·K ⁻¹	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Прочность на изгиб, МПа	Модуль Юнга, ГПа
Si	2,3	4,2	151	-	112
GaAs	5,23	6,5	54	-	-
AlSiC (60 об. % SiC)	3,0	6,5–9	170–200	450	290
Ковар (Ni-Fe)	8,1	5,2	11–17	-	131
CuW (10–20% Cu)	15,7–17	6,5–8,3	180–200	1172	367
CuMo (15–20% Mo)	10	7–8	160–170	-	313
Cu	8,96	17,8	398	330	131
Al	2,7	23,6	238	137–200	68
SiC	3,2	2,7	200–270	450	415
AlN	3,3	4,5	170–200	300	310
Al ₂ O ₃	3,98	6,5	20–30	300	350
BeO	3,9	7,6	250	250	345

для СВЧ и оптоэлектронных приборов, подложек и оснований для IGBT-модулей и другой силовой электроники [2], структурных элементов оптических и навигационных приборов [3] и др.

Наиболее важный и массовый сектор применения AlSiC – основания и подложки для силовой электроники. В мировой практике материалы семейства AlSiC используются серийно в силовой электронике примерно с 2005 года. Так, практически все крупные компании, производящие IGBT-модули, такие как Infineon, Mitsubishi Electric и др., имеют в линейке продукции

модули с основанием из AlSiC (например серии IHM / IHV B-series (компания Infineon) и HVIGBT Module R-Series (компания Mitsubishi Electric)), которые ориентированы на сферы применения, где требуется обеспечение работоспособности на протяжении многих десятков тысяч циклов переключения. AlSiC применяют и отечественные компании, работающие в сфере силовой электроники. Например, в продуктовой линейке АО «Протон-Электротекс» есть модули для низкоиндуктивных систем на AlSiC-основании [4]. Для мощных IGBT-модулей (более 1200 В, 400 А) применение AlSiC-оснований приводит

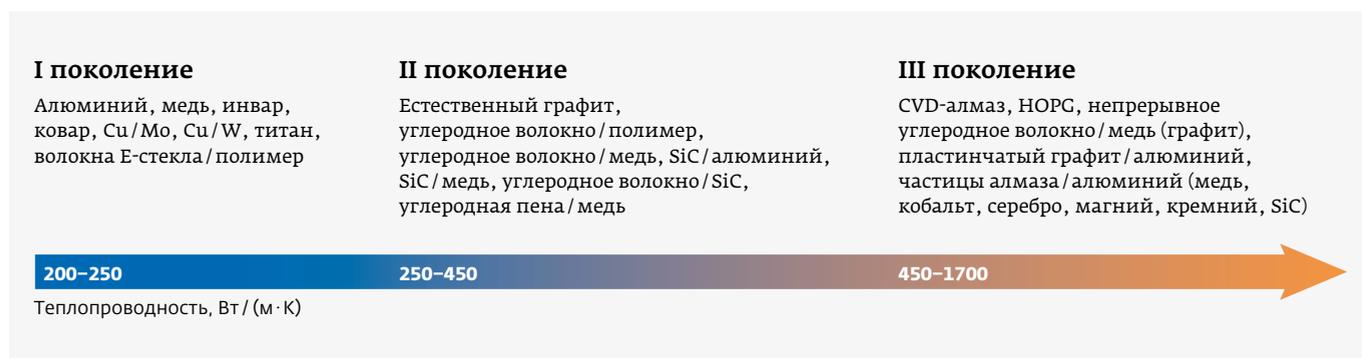


Рис. 2. Поколения материалов для теплоотвода

Таблица 2. Основные свойства композитных материалов AlSiC и AlGr производства НПП «Металл-Композит»

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	ТКР, ppm·K ⁻¹	Прочность при трехточечном изгибе, МПа	Плотность, г/см ³	Удельная электропроводность, мСм/м	Модуль упругости, ГПа
AlSiC	160–200	7–12	>400	2,95–3,0	4–7	>200
AlGr анизотропный				2,4	0,3–0,7	>73
x-y	>600		>60			
z	>30					
AlGr изотропный	>160	7–9	>100	2,3–2,6	0,5–1,5	>73

к многократному росту надежности при циклическом нагружении (рис. 1 [5]).

Немаловажным является снижение массогабаритных характеристик силовых электронных модулей и СВЧ-устройств при применении AlSiC-оснований и корпусов, поскольку плотность данного материала практически в три раза меньше по сравнению с медью.

По существующей классификации материалы AlSiC относятся ко второму поколению материалов для теплоотвода (рис. 2). В настоящее время стремительно развивается новое поколение материалов для терморегуляции, ключевым элементом которых являются материалы на основе высокотеплопроводных форм углерода – алмаза, графена, пирографита, термического пирографита. В отличие от AlSiC, алюминий-графитовые композитные материалы сегодня только начинают набирать популярность и кое-где уже внедряются в массовое производство [6–8].

В зависимости от свойств графитового наполнителя данные материалы могут обладать как изотропными, так и анизотропными свойствами теплопроводности и ТКР. Замечательной особенностью данного сорта материалов является практическое достижение очень высоких значений теплопроводности в выделенной плоскости, порядка 700–800 Вт/(м·К), что вполне сопоставимо с теплопроводностями таких, очень дорогих, материалов, как алмаз и термический пиролитический графит, и открывает перспективы их использования в схемах терморегуляции для очень высоконагруженных, мощных электронных и оптоэлектронных устройств. В качестве примера в табл. 2 приведены параметры композитных материалов AlSiC и AlGr, получаемых на научно-производственном предприятии «Металл-Композит». Большим преимуществом данных материалов является их относительно невысокая стоимость, возможность массового производства и хорошая механическая обрабатываемость.

Ниже приведено несколько иностранных компаний, разработавших и производящих металл-углеродные композитные материалы, а также некоторые основные характеристики этих материалов:

- Momentive Performance Materials Inc. (рис. 3): композит Graphmet 350 – алюминиевый сплав, наполненный графитом, теплопроводность 220–360 Вт/(м·К), температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) 6,0–8,5 ppm·K⁻¹, плотность 2,1 г/см³; композит TC1050 – сердцевина из слоя ориентированного пирографита, обкладки – алюминиевый или медный сплав, теплопроводность в плоскости подложки или поперек в зависимости от ориентации пирографита более 1000 Вт/(м·К); синтетический алмаз + алюминиевый или магниевый матричный сплав, теплопроводность до 650 Вт/(м·К), ТКЛР 7,5 ppm·K⁻¹, плотность 3,2 г/см³;

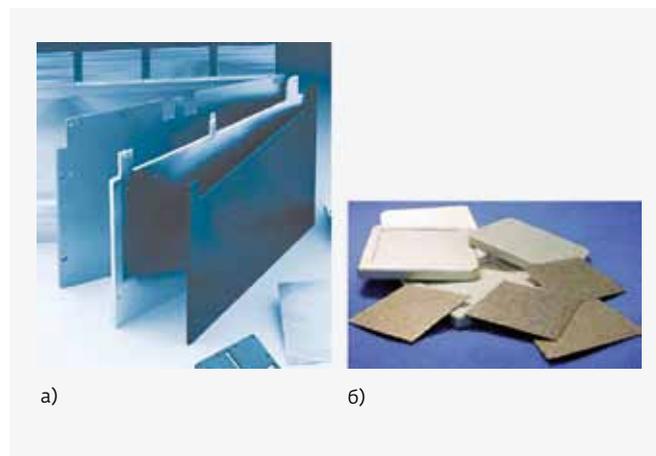


Рис. 3. Композиты TC1050 (а) и слои пирографита, инкапсулированные во flip-chip крышки для процессоров (б) производства компании Momentive Performance Materials Inc.

Таблица 3. Характеристики композитных материалов на основе алюминия и графита, алюминия и синтетического алмаза компании Metal Matrix Cast Composites LLC

Параметр	AlGr ^f	AlGr ^p	AlDi ^p
ТКР (20–30 °С), ppm · К ⁻¹	9,1	7,6	5,5
Теплопроводность, Вт/(м · К)	123 (x), 291 (y), 132 (z)	228 (x), 281 (y), 209 (z)	400
Плотность, г/см ³	2,53	2,1	3,26

Примечания:

1. Индексы f и p – указание (по первым буквам слов) формы наполнителя: fiber (волокно) и particles (частицы).
2. AlDi – алюминий-алмаз.

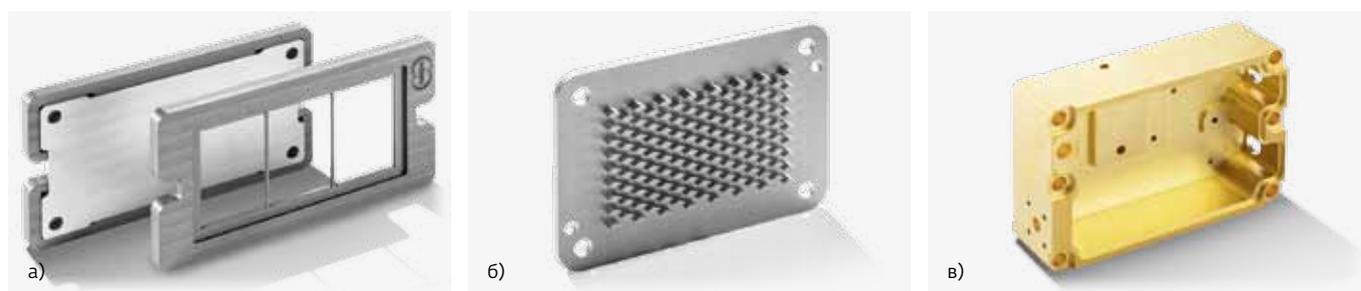


Рис. 4. Изделия Schunk Carbon Technology из AlGr: а – оснастка для пайки полупроводниковых кристаллов на основа; б – основание для силового электронного модуля; в – корпус для термостабилизированного лазерного диода

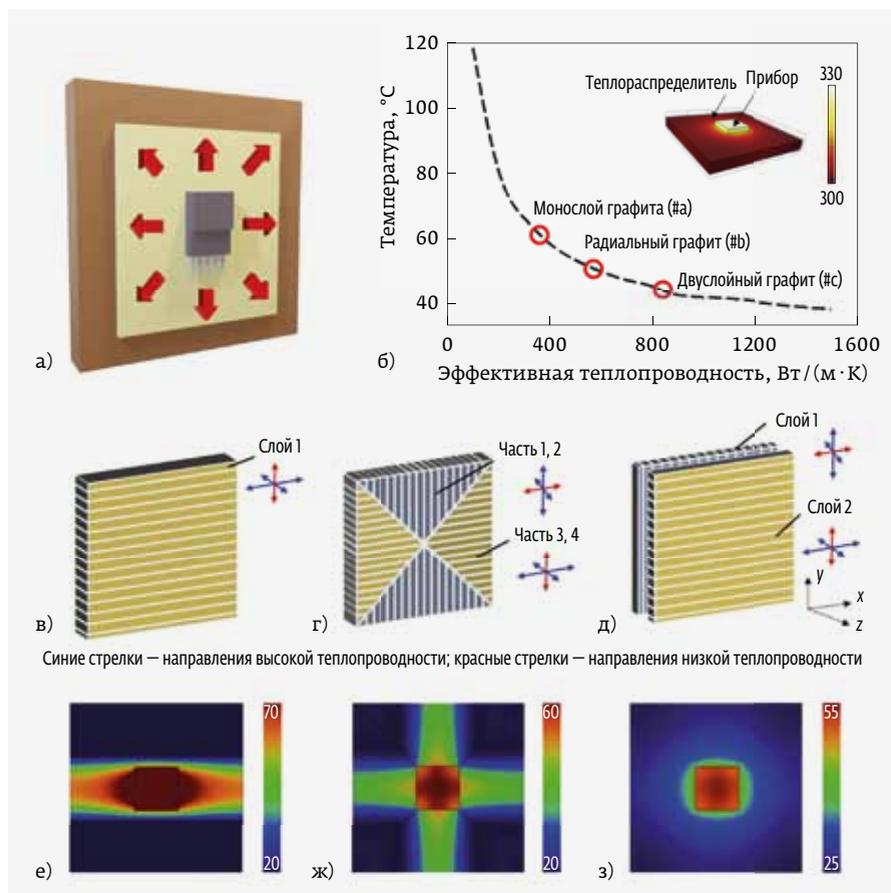


Рис. 5. Рассеяние тепла структурами из анизотропного кристаллического графита: а – схематическое изображение устройства теплораспределения от прибора; б – результаты FEM-моделирования температуры прибора при применении теплораспределителя с различным расположением слоев анизотропного кристаллического графита (случаи #а – #с); в–д – схемы относительного расположения слоев анизотропного кристаллического графита; е–з – соответствующие температурные профили

- Metal Matrix Cast Composites LLC (табл. 3): графитовое волокно, частицы графита и синтетического алмаза, пропитанные под давлением сплавами меди и алюминия;
- JW Composites LLC: медный сплав, наполненный графитовым волокном, контролируемый ТКЛР в диапазоне 2–10 ppm·K⁻¹, теплопроводность в плоскости 400 Вт/(м·K), поперек плоскости 200 Вт/(м·K); графитовая пена, пропитанная сплавами меди, ТКЛР 5,7–7,4 ppm·K⁻¹, теплопроводность изотропная 342 Вт/(м·K); синтетический алмаз + медный или серебряный матричный сплав, теплопроводность 600–800 Вт/(м·K), ТКЛР 5–8 ppm·K⁻¹;
- Schunk Carbon Technology (рис. 4): алюминий-графитовые композиты, ТКЛР 8–12 ppm·K⁻¹, теплопроводность 180–220 Вт/(м·K), плотность 2,2–2,3 г/см³.

В целом можно отметить, что благодаря применению высокотеплопроводных форм графита прогресс, достигнутый многими зарубежными компаниями в области высокотеплопроводных материалов, оказался столь значительным, что это повлекло за собой серьезную перестройку базовых подходов, используемых при расчете и проектировании систем охлаждения и электронных управляющих модулей.

Область применения алюминий-графитовых материалов также довольно обширна. AlGr-композиты применяются для изготовления технологической оснастки для сборки силовых электронных модулей, оснований для IGBT, корпусов для СВЧ- и лазерных диодов.

Анизотропия высокотеплопроводных материалов не является препятствием для их эффективного применения, напротив, в некоторых случаях данное качество оказывается преимуществом. Так, в работе [9] авторы на основе анизотропного высокотеплопроводного кристаллического графита с теплопроводностью в базальной плоскости 1500 Вт/(м·K) сконструировали двухслойную структуру с изотропной эффективной

теплопроводностью 900 Вт/(м·K) (рис. 5). В работе [10] приводится пример использования анизотропии теплопроводности для организации эффективного теплоотвода от такой, фактически двумерной, структуры, как лазерный диод с плотностью выделяемой мощности более 200 Вт/см².

Тенденции показывают, что сфера применения функциональных композитных материалов для теплоотвода ежегодно расширяется и объемы потребления растут. Так, по данным [11], объем производства материала AlSiC в мире будет показывать рост более 7% в год [11].

В компании «НПП «Металл-Композит» с момента ее основания в 2012 году осваиваются технологии производства различных композитных материалов для электроники. С 2016 года серийно производятся изделия из композитного материала AlSiC. За 2020–2022 годы проведены работы по модернизации и расширению производства для освоения крупноразмерных изделий. Текущие производственные мощности позволяют удовлетворить любой объем спроса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Occionero M. et al.** A new substrate for electronic packaging: aluminum-silicon carbide (AlSiC) composites. – Proceedings of the Forth Annual Portable by Design Conference, Electronics Design. March 24–27. PP. 398–403. www.alsic.com
2. **Cui Yana, Wang Lifeng, Ren Jianyue.** Multi-functional SiC/Al Composites for Aerospace Applications // Chinese Journal of Aeronautics. 2008. V. 21. PP. 578–584. https://www.proton-electrotex.com/files/project_5610/tmp_download_file/MIXM-HB17FA-1000N%20AlSiC_eng_v0.2.pdf
3. **Bin Xu et al.** Ultra-high-performance heat spreader based on a graphite architecture with three-dimensional thermal routing // Cell Reports Physical Science. 2021. V. 2. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100621>
4. **Mineraltech.** https://www.mineraltech.com/docs/default-source/refractories-documents/pyrogenics/pyroid/high-performance-pyrolytic-graphite-composite-heat-spreaders.pdf?sfvrsn=50359b20_2
5. **Infineon.** https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IAS_1998_Further_Improvements_Reliability-ED-v1.0-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40f05591303&da=t
6. **Schunk Group.** <https://www.schunk-group.com/mobility/en/products/power-electronics-sensors>
7. **Metal Matrix Composites.** <http://www.metalmatrixcomposites.com/>
8. **Momentive.** <https://www.momentive.com/docs/default-source/productdocuments/high-thermal-conductivity-graphite-and-composites/momentive-tc1050-heat-spreader449ff676e3142a6814f1e7cc0c17455.pdf>
9. **Verified Market Research.** <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/aluminum-silicon-carbide-alsic-market/>
10. **SMD.ru.** [www.SMD.ru](http://www.smd.ru)
11. **SMD.ru.** [www.SMD.ru](http://www.smd.ru)

ООО СМП ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru
 электронные компоненты для поверхностного монтажа
 НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК
 • катушки индуктивности на токи до 10 А
 • U FL разъемы и pigtail со SMA
 Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
 Тел.: (495) 158-7396, (495) 943-6244, (495) 943-6780

СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ЭКБ

Молекулярно-лучевая эпитаксия

| A3N | A3B5 | A2B6

Плазмохимическое травление и осаждение

| ICP-RIE | RIE | ICP-PECVD | PECVD

Физическое осаждение

| Магнетронное распыление
| Электронно-лучевое напыление

Быстрый термический отжиг и процессинг



ПРОИЗВОДСТВО И РЕИНЖИНИРИНГ КОМПЛЕКТУЮЩИХ И КЛЮЧЕВЫХ УЗЛОВ

| Молекулярные источники
| Вводы вращения
| Ростовые и линейные манипуляторы

в том числе для установок МЛЭ иностранного производства

