УДК 621.382.017.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И КАРБИДА КРЕМНИЯ

А.А. Золотарев, Ан.В. Редька

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Представлены результаты измерений теплового коэффициента линейного расширения (ТКЛР) корпусов, изготовленных из металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния, а также из псевдосплава МД-40. Измерения проводились при помощи dilatометра Linseis L75. Проведён анализ влияния температуры корпуса на изменение значения ТКЛР материала. Исследуемые корпуса применяются для монтажа мощных полевых транзисторов с барьером Шоттки, изготовленных из кристаллов GaN.

Ключевые слова: ТКЛР, GaN, металломатричный композит, AlSiC, полевой транзистор с барьером Шоттки, МД-40

Сведения об авторах: Золотарёв Алексей Алексеевич, аспирант, zolotarev_aa@pulsarnpp.ru; Редька Андрей Владимирович, начальник отдела

RESEARCH OF THE THERMAL COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION OF METAL-MATRIX COMPOSITE BASED ON ALUMINIUM AND SILICON CARBIDE

A.A. Zolotarev, An.V. Redka

S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

Abstract: The article presents the results of measurements of the thermal coefficient of linear expansion (CTE) of transistor cases made of a metal matrix composite based on aluminum and silicon carbide, as well as from a pseudo-alloy MD-40. Measurements were carried out using a dilatometer Linseis L75. The analysis of the effects of case temperature on the changes in the material's CTE values was performed. Cases under tests are used for installation of high-power field-effect transistors with Schottky barrier made of GaN crystals.

Keywords: CTE, GaN, metal matrix composite, AlSiC, field - effect transistor with Schottky barrier, Cu-Mo

Authors: Zolotarev Alexey Alekseevich, post-graduate student, zolotarev_aa@pulsarnpp.ru, Redka Andrey Vladimirovich, Head of department

Введение

В настоящее время одним из важнейших направлений развития СВЧ электроники является разработка СВЧ приборов на основе широкозонных полупроводников, среди которых наиболее перспективными являются нитрид-галлиевые транзисторы. Нитрид-галлиевые СВЧ НЕМТ обладают следующими преимуществами по сравнению с арсенид-галлиевыми СВЧ транзисторами: более высокой областью рабочих температур, более высокими рабочими напряжениями и напряжениями пробоя, высокой удельной плотностью мощности, повышенной радиационной стойкостью, лучшей линейностью, низкими фазовыми шумами и большей величиной тока насыщения [1]. СВЧ транзисторы на нитриде галлия могут работать при температуре рабочей области транзистора (до 300 °С) и позволяют поднять выходную мощность транзисторов на порядок [2]. Данные преимущества нитрид-галлиевых транзисторов позволяют создавать твердотельные СВЧ блоки и модули, предназначенные для разработки современных радиоэлектронных систем, в том числе активных антенных фазированных решёток (АФАР) [3].

Создание современных радиоэлектронных изделий связано с решением проблемы отвода тепла от активной области полупроводниковых приборов, электронных компонентов и узлов [4-6]. Постоянное повышение плотности размещения полупроводниковых приборов в изделиях

микроэлектроники приводит к увеличению тепловой мощности, что сказывается в конечном итоге на надёжности работы приборов.

При проектировании корпусов полупроводниковых приборов теплопроводность является не единственным решающим параметром при выборе теплоотводящего материала. В радиоэлектронной технике разработчики обращают внимание на термический коэффициент линейного расширения сопрягаемых материалов. Значение ТКЛР особенно важно учитывать при разработке и производстве полупроводниковых приборов, т. к. в этом случае необходимо добиться согласования коэффициентов линейного расширения между теплоотводящей подложкой и полупроводниковым кристаллом. Для сравнения, ТКЛР наиболее применяемых полупроводниковых материалов: кремний – 3,0; карбид кремния – 3,0; фосфид индия – 4,5; арсенид галлия – 5,9; нитрид галлия – 4,0.

В связи с этим разработчикам современных радиоэлектронных приборов необходимо принимать во внимание значения теплового коэффициента линейного расширения материалов, которые они используют в своих устройствах.

Одним из современных и перспективных материалов для использования в приборах микроэлектроники в качестве корпусов или подложек для кристаллов транзисторов, изготовленных из нитрида галлия, является металломатричный композит на основе алюминия и карбида кремния (AlSiC) [7]. Данный материал является

алюминиевым сплавом, армированным частицами карбида кремния при использовании технологии литья под давлением. Равномерное распределение частиц карбида кремния в сплаве алюминия (рис. 1),

эксплуатации во всех климатических зонах. Такие модули производят американские фирмы Ceramics Process Systems (CPS) и Thermal Transfer Composites (TTC) [9-10].

Рис. 1

Микроструктура металломатричного композита AlSiC

а также процентное соотношение частиц карбида кремния и алюминия позволяют контролировать значение ТКЛР в материале [8]. Металломатричный композит на основе алюминия и карбида кремния активно используется крупнейшими компаниями мира, занимающимися производством изделий электронной техники, такими как Infineon, Mitsubishi Electric, Hitachi, Semikron, Semelab и др. В силовой электронике в настоящее время подложки, изготовленные из металломатричного композита AlSiC, применяются в IGBT-модулях, работающих в жёстких условиях

Обладая уникальными свойствами, такими как высокая теплопроводность, малый удельный вес и низкий ТКЛР, металломатричный композит на основе алюминия и карбида кремния позволяет заменить им уже существующие материалы для корпусов и подложек полупроводниковых приборов (например, псевдосплав МД-40).

Результаты исследования

Для оценки возможности применения металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния в корпусах

полупроводниковых приборов была разработана математическая 3D-модель корпуса, представленная на рис. 2 [11]. Такие корпуса для мощных СВЧ внутрисогласо-

На основе математической модели были изготовлены два корпуса, один из которых выполнен из металломатричного композита с содержанием в алюминиевой мат-

Рис. 2

Внешний вид опытного корпуса

ванных транзисторов применяются в приёмопередающих модулях СВЧ диапазона, а также в различных усилителях мощности и других устройствах микроэлектроники.

рице частиц карбида кремния 65 % (рис. 3), а второй – из псевдосплава МД-40 (рис. 4), для дальнейшего сравнения этих материалов в части оценки ТКЛР.

Рис. 3

Опытный образец корпуса из металломатричного композита AlSiC

Рис. 4

Опытный образец корпуса из МД-40

Исследования ТКЛР опытных образцов корпусов полупроводниковых приборов, изготовленных из металломатричного композита AlSiC и псевдосплава МД-40, проводились на дилатометре Linseis L75 (рис. 5). Практически все дилатометры основаны на измерении малых и сверхма-

ния с запрограммированной циклическостью. На рис. 6 и 7 представлены графики изменения длины образца L в зависимости от изменения температуры.

Измерения ТКЛР двух опытных образцов корпусов, изготовленных из металломатричного композита и псевдосплава МД-40, про-

Рис. 5

Внешний вид дилатометра Linseis L75

лых смещений, вызванных изменением линейных размеров исследуемого образца относительно деталей прибора.

Дилатометры Linseis L75 предназначены для измерения расширения или сжатия твёрдых тел при изменении температуры, а также для определения ТКЛР. Принцип действия дилатометра Linseis L75 основан на измерении изменения длины образца во время изменения температуры посредством нагрева или охлажде-

вались в диапазоне температур от 50 до 150 °С. Исследования на дилатометре Linseis L75 значений теплового коэффициента линейного расширения двух корпусов проводились в следующих реперных точках измерения: 50, 75, 90, 100 и 150 °С.

Результаты измерений теплового коэффициента линейного расширения корпусов полупроводниковых приборов, изготовленных из металломатричного композита и псевдосплава МД-40, приведены в таблице.

Таблица

Результаты измерения ТКЛР корпусов, изготовленных из AlSiC и МД-40

Материал	ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$				
	50 °С	75 °С	90 °С	100 °С	150 °С
МД-40	9,37	9,51	9,5	9,5	9,51
AlSiC	7,07	7,23	7,32	7,4	7,78

Рис. 6

График изменения длины опытного образца корпуса, изготовленного из псевдосплава МД-40

Рис. 7

График изменения длины опытного образца корпуса, изготовленного из металломатричного композита

Максимальная производительность полупроводниковых приборов СВЧ диапазона, изготовленных из нитрида галлия, а также надёжность их работы и длительной эксплуатации обеспечиваются прежде всего подбором материалов с близким тепловым сопротивлением. Применяемые в микроэлектронике материалы, такие как арсенид галлия и нитрид галлия, обладают чрезвычайно низким значением теплового коэффициента линейного расширения. При разработке корпусов электронных приборов необходимо учитывать вероятность разрушения кристаллов полупроводников из-за многократного циклического расширения и сжатия в результате термических напряжений.

Выводы

Таким образом, полученные результаты измерения теплового коэффициента линейного расширения корпуса, изготовленного из металломатричного композита AlSiC, наглядно показывают его более низкие значения по сравнению со значениями ТКЛР корпуса, изготовленного из псевдосплава МД-40. Становится очевиден тот факт, что применение в конструкции корпусов полупроводниковых приборов металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния повысит их надёжность и время эксплуатации за счёт снижения тепловых напряжений между кристаллом и основанием корпуса или подложки.

Литература

1. Борисов, О.В. Широкополосный комплексированный усилитель мощности X-диапазона частот / О.В. Борисов, А.А. Глыбин, В.П. Еремин, Н.О. Коплевацкий, В.М. Миннебаев, А.В. Редька, А.В. Тихомиров, А.Н. Трушин, Е.А. Федоренко // *Наноиндустрия*. – 2017. – № S (74). – С. 409-413.
2. Васильев, А.Г. Твердотельный нитрид-галлиевый 500-ваттный импульсный усилитель мощности X-диапазона / А.Г. Васильев, А.А. Глыбин, К.А. Иванов, Ю.В. Колковский, К.С. Мещерякова, В.М. Миннебаев // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2011. – № 1 (226). – С. 83-88.
3. Борисов, О.В. Широкополосный 70-ваттный усилитель мощности X-диапазона / О.В. Борисов, А.М. Зубков, К.А. Иванов, В.М. Миннебаев, А.В. Редька // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2014. – № 2 (233). – С. 4-9.
4. Ланин, В.Л. Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов / В.Л. Ланин, Л.П. Ануфриев // *Силовая электроника*. – 2009. – № 2. – С. 94-99.
5. Аболдуев, И.М. Температурная зависимость параметров СВЧ мощных полевых транзисторов на основе нитрида галлия и алмаза / И.М. Аболдуев, Г.З. Гарбер, А.М. Зубков, К.А. Иванов, Ю.В. Колковский, В.Д. Красильников, В.М. Миннебаев // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2015. – № 1 (235). – С. 18-25.
6. Grishakov K.S., Elesin V.F., Kargin N.I., Ryzhuk R.V., Minnebaev S.V. Effect of diamond heat spreader on the characteristics of gallium nitride-based transistors // *Russian Microelectronics*. – 2016. – vol.45. – no. 1. – pp. 41-53.
7. Occhionero By, M.A. AlSiC baseplates for power IGBT modules: Design, Performance and Reliability. – 2003. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.487.8213>

8. Sevostyanov N.V., Nishchev K. N., Novopoltsev M.I. The Uniform Metallization of the AlSiC Metal Matrix Composite Material Surface // Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. – 2014. – no. 4. – pp.237-241.
9. Occhionero M.A., Adams R.W., Saums D. AlSiC for Optoelectronic Thermal Management and Packaging Designs // Ceramics Process Systems, chartley MA 02712-0338. – 200 l. – pp.1- 5. – URL: https://www.researchgate.net/publication/237689513_AlSiC_for_Optoelectronic_Thermal_Management_and_Packaging_Designs
10. Kablov, E.N. Enhancement of Power IGBT Module Reliability with the Use High-Aggregated MCM System Al-SiC // Aviation Materials and Technologies. – 2010. – URL: https://www.researchgate.net/publication/276044539_The_Uniform_Metallization_of_the_AlSiC_Metal_Matrix_Composite_Material_Surface
11. Золотарев, А.А. Анализ деформации корпуса из металломатричного композита AlSiC при саморазогреве мощного полевого транзистора с барьером Шоттки / А.А. Золотарев, К.А. Иванов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 2 (245). – С. 39-47.
1. Borisov O.V., Glybin A.A., Eremin V.P., Koplevatskiy N.O., Minnebaev V.M., Redka A.V., Tikhomirov A.V., Trushin A.N., Fedorenko E.A. X-band complex wideband power aplifier // Nanoindustriya [Nanoindustry]. – 2017. – no.S (74). – pp.409 – 413.
2. Vasilyev A.G., Glybin A.A., Ivanov K.A., Kolkovskiy Yu.V., Meshcheryakova K.S., Minnebaev V.M. 500-W X-band solid-state GaN pulsed power amplifier // Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. – 2011. –no.1 (226). – pp. 83 – 88.
3. Borisov O.V., Zubkov A.M., Ivanov K.A., Minnebaev V.M., Redka A.V. 70-W X-Band wide-band power amplifier // Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. – 2014. – no.2 (233). – pp. 4 – 9.
4. Lanin V.L., Anufriev L.P. IGBT die bonding // Si-lovaya Elektronika [Power Electronics]. – 2009. – no.2. – pp. 94 – 99.
5. Abolduev I.M., G. Z. Garber, A. M. Zubkov, K. A. Ivanov, Yu. V. Kolkovsky, V. D. Krasilnikov, V. M. Minnebaev. The microwave parameters temperature dependence of the GaN and diamond power FETs // Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. – 2015. – no.1 (235). – pp. 18 – 25.
6. Grishakov K.S., Elesin V.F., Kargin N.I., Ryzhuk R.V., Minnebaev S.V. Effect of diamond heat spreader on the characteristics of gallium nitride-based transistors // Russian Microelectronics. – 2016. – vol.45. – no 1. – pp. 41-53.
7. Occhionero M.A., Fennessy K.P., Adams R.W., Sundberg G.J. AlSiC baseplates for power IGBT modules: Design, Performance and Reliability. – 2003. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.487.8213>
8. Sevostyanov N.V., Nishchev K. N., Novopoltsev M.I. The Uniform Metallization of the AlSiC Metal Matrix Composite Material Surface // Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. – 2014. – no. 4. – pp. 237 - 241.
9. Occhionero M.A., Adams R.W., Saums D. AlSiC for optoelectronic thermal management and packaging designs // Ceramics Process Systems, chartley MA 02712-0338. – 200 l. – pp. 1 - 5. URL: https://www.researchgate.net/publication/237689513_AlSiC_for_Optoelectronic_Thermal_Management_and_Packaging_Designs

References

10. Kablov, E.N. Enhancement of Power IGBT Module Reliability with the Use High-Aggregated MCM System Al-SiC // Aviation Materials and Technologies. 2010. – URL: https://www.researchgate.net/publication/276044539_The_Uniformal_Metallization_of_the_AlSiC_Metal_Matrix_Composite_Material_Surface
11. Zolotarev A.A., Ivanov K.A. Analysis of Deformation of Metal-matrix Composite AlSiC Under Self-heating of Microwave Power FET with Schottky Barrier // Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikoviyе pribory [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices]. – 2017. – no.2 (245). – pp. 39 – 47