ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОРПУСОВ СВЧ GaN ТРАНЗИСТОРОВ

А.А. Золотарев

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

Рассмотрена возможность применения металломатричного композита на основе порошка алюминия и карбида кремния для создания корпусов СВЧ GaN транзисторов. Одной из основных задач является снижение веса и уменьшение различий в КТР между материалом корпуса и карбидом кремния, на основе которого создаются кристаллы GaN СВЧ транзисторов. Приводятся результаты исследования новых корпусов с применением разнообразных методик контроля. Проведены расчёты деформации поверхности корпусов при разных тепловых нагрузках.

Ключевые слова: Корпуса GaN СВЧ транзисторов, металломатричный композит AlSiC, расчёты деформации корпусов при тепловых нагрузках

Сведения об авторах: Золотарев Алексей Алексеевич, аспирант, zolotarev_aa@pulsarnpp.ru

APPLICATION OF ALSIC METAL-MATRIX COMPOSITE TO PRODUCE GaN MICROWAVE TRANSISTOR CASES

A.A. Zolotarev

«S&PE «Pulsar» JSC, 105187, Moscow, Okružhnoy pr., 27

An option of using metal-matrix composite based on aluminum and silicon carbide for the creation of cases for GaN microwave transistors is considered in this paper. One of the main goals is to lower the weight and the difference in thermal expansion coefficient between the case material and silicon carbide, based on which the dies of GaN microwave transistors are produced. The results of the study of new cases involving various inspection techniques are given. Simulation of case surface deformation at various thermal stresses was performed.

Keywords: GaN microwave transistor cases, AlSiC metal-matrix composite, simulation of case deformation under thermal stress

Authors: Aleksey Alekseevich Zolotarev, post-graduate, zolotarev_aa@pulsarnpp.ru

Введение

В современных высокочастотных приёмопередающих радиолокационных блоках широко используются GaN СВЧ транзисторы [1, 2]. Они позволяют создавать приёмопередающие модули с рекордными значениями удельной мощности, КПД, обладающие повышенной стойкостью к воздействию специальных факторов [3]. Однако с повышением значения выходной мощности приёмопередающих модулей необходимо повысить надёжность GaN СВЧ приборов и защитить их от перегрева и деформации

корпуса, на котором монтируются кристаллы СВЧ транзисторов.

Для защиты от перегрева активных элементов и деформации корпусов при повышенных температурах разработчики современных мощных полупроводниковых приборов обычно применяют материалы на основе меди и её сплавов. Но в последнее время появились новые металломатричные композитные материалы на основе алюминия и карбида кремния (AlSiC) [4, 6]. Они обладают меньшей плотностью, чем плотность сплава на основе меди и молибдена (МД-40), в несколько раз (плотность AlSiC составля-

ет $2,97 \text{ г/см}^3$, плотность МД-40 – 8 г/см^3), стабильными размерными характеристиками (коэффициент термического расширения (КТР) $\text{AlSiC} = 7\text{-}8,5 \times 10^{-6}/\text{K}$, у МД40 – $12\text{-}17 \times 10^{-6}/\text{K}$). Для того чтобы выяснить возможность применения металломатричного композита, необходимо провести ряд дополнительных исследований, чему и посвящена настоящая работа.

Исследования состава корпуса на основе металломатричного композита

Исследования проводились для корпуса, в котором содержание частиц карбида кремния составляло приблизительно 60 %). Фотография корпуса представлена на рис. 1.

Рис. 1

Внешний вид созданного корпуса

Корпус исследовали при помощи энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием электронного микроскопа JEOL JCM-6000 с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром. Перед измерениями было проведено химическое травление образца. Информация, полученная в ходе анализа, собрана с небольшой глубины образца (порядка 1 микрометра). РЭМ-изображение поверхности приведено на рис. 2.

Рис. 2

РЭМ-изображение поверхности корпуса

На рис. 3 приведены результаты рентгеновской спектроскопии.

Рис. 3

Спектрограмма, показывающая содержание элементов в образце

При анализе спектрограммы возникает следующий вопрос: почему пики кремния и углерода значительно меньше, чем пик алюминия? Объяснение следующее: в процессе изготовления корпуса каждая крупинка карбида кремния обволакивается слоем алюминия, и пики кремния, которые по величине примерно должны соответствовать пикам алюминия, поглощаются в слое алюминия, покрывающего крупинки карбида кремния.

Спектрограмма показывает также и наличие других элементов кроме алюминия и карбида кремния.

Одной из важнейших характеристик гальванических покрытий является прочность их сцепления с материалом основы. В большинстве работ по получению плёнок изучаются не только их структура, фазовый состав, механические характеристики и т.д., но и адгезионные свойства.

Применяемые в промышленности методы контроля прочности сцепления основаны на таких методиках, как изгиб, растяжение, нанесение сетки царапин и т.д. Для количе-

ственного определения прочности сцепления используют метод прямого отрыва плёнки от подложки.

Гальванические покрытия опытного образца корпуса осуществлялись в два этапа. На первом этапе исследуемые образцы покрывались медью и никелем с толщиной слоёв 3-3,5 мкм, далее образцы подвергались термообработке при температуре 300-350 °С в вакууме с выдержкой 30-40 мин. На втором этапе образцы дополнительно покрывались никелем толщиной в 1 мкм. На рис. 4 изображён корпус опытного образца с гальваническим покрытием.

Рис. 4

Фотография корпуса опытного образца с гальваническим покрытием

При исследовании адгезии использовались динамометр ДПУ-0.01-2 (ГОСТ 13837-79) и червячная передача с электроприводом.

Для количественного определения прочности сцепления нанесённого покрытия с материалом образца использовался метод проверки прочности паяного соединения. С этой целью к поверхности с нанесённым покрытием припаиваются металлические стержни Ø 1 мм (рис. 5), к которым затем прикладывается растягивающее усилие, при этом исследуемый образец неподвижно закреплён.

Рис. 5

Корпус с металлическими стержнями

В результате проведения измерений происходит отрыв металлических стержней вместе с покрытием (рис. 6).

Рис. 6

Корпус после проведения исследования

Измерения показали, что значение величины адгезии металлического покрытия к корпусу опытного образца составило 5,2 кг/мм², а аналогичное значение к пластине, изготовленной из МД-40, составило 6,9 кг/мм². Полученные данные показывают, что предлагаемый корпус можно использовать для монтажа на него кристалла GaN СВЧ транзистора.

Исследование влияния металломатричного композита на сверхвысокочастотные характеристики электронных приборов проводилось на векторном анализаторе спектра Agilent E5071C. Во время исследования проводились измерения коэффициента усиления, коэффициента стоячей волны по входу и выходу. Из полученных данных выяснилось, что характеристики СВЧ транзисторов в корпусе из AlSiC и МД-40 существенно не отличаются друг от друга. Показатели КСВ по входу и выходу у обоих приборов составляют < 1,5. Это означает, что материал корпуса из AlSiC не оказывает влияния на сверхвысокочастотные характеристики полупроводниковых приборов.

Для определения деформации корпуса опытного образца и сравнения с деформацией корпусов из МД-40 было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS Mechanical [5]. Транзистор, по условию задачи, работает в непрерывном режиме с мощностью тепловыделения $P_{diss} = 133$ Вт. Тепловая мощность вычислялась по следующей формуле:

$$P_{diss} = P_{in} - P_{out} + P_{dc} = \frac{P_{out}}{gain} - P_{out} + \frac{P_{out} - \frac{P_{out}}{gain}}{PAE}.$$

В данной формуле P_{in} – входная СВЧ мощность, P_{out} – выходная СВЧ мощность, $gain = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ – коэффициент усиления по мощности, $P_{dc} = I_{стока} * U_{стока}$ – мощность питания, $PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{dc}}$ – коэффициент полезного действия. Результаты моделирования при

разном значении выделяющейся тепловой мощности представлены на рис. 7 и в таблице.

Рис. 7

Расчёт деформации поверхности корпуса: а) – с «грубым» шагом, б) – с «тонким» шагом

Таблица

Максимальная величина смещения на поверхности (анализ рисунка 7а)

Материал корпуса	Деформация (мкм)		
	при выделяющейся мощности P_{diss}		
	$P_{diss} = 56 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 79.3 \text{ Вт}$	$P_{diss} = 133 \text{ Вт}$
AlSiC	4.4 мкм	4.43 мкм	4.53 мкм
МД-40	5.48 мкм	5.52 мкм	5.6 мкм

В соответствии с указанными показателями корпус на основе металломатричного композита меньше подвержен деформации, чем корпус на основе справа МД40.

Выводы

В результате проведенных исследований был выявлен структурный состав композитного материала и обнаружено равномерное распределение частиц карбида кремния в алюминиевой матрице. Исследования на прочность адгезии показали возможность применения композита AlSiC для создания корпусов GaN СВЧ транзисторов. Меньшая плотность и согласованность КТР основания корпуса с КТР карбида кремния делают металломатричный композит AlSiC более перспективным по сравнению со сплавами на основе меди.

Литература

1. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев. СВЧ электроника на нитриде галлия – основное направление создания радиоэлектронных систем // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – Вып. 2 (231). – С. 88-101.
2. А.О. Герасимов, В.М. Миннебаев, В.Ф. Синкевич, Ал.В. Редька. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN транзисторах: опыт изготовления // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1 (228). – С. 30-37.
3. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, В.М. Миннебаев. Электронные блоки на основе AlGaIn/GaN/SiC СВЧ гетеротранзисторов для космических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: ТулГУ. – 2016. – Вып. 12. – Ч. 2. – С. 201-207.
4. Gilleo K., Ph.D. MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials, and Processes – McGraw-Hill // Nanoscience and Technology Series. 2005. 239 p.
5. А.А. Золотарев, К.А. Иванов. Анализ деформации корпуса из металломатричного композита AlSiC при саморазогреве мощного полевого

транзистора с барьером Шоттки // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 2 (245). – С. 39-47.

6. Occhionero M.A., Adams R.W., Saums D. AlSiC for Optoelectronic /Thermal Management and Packaging Designs. 2001. 5 p.

References

1. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Gallium nitride microwave electronics – main direction of radio-electronic systems' development. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 2 (231), pp. 88-101.
2. Gerasimov A. O., Minnebaev V. M., Sinkevich V. F., Redka Al. V. X-band pulsed power amplifier based on GaN transistors: manufacturing practice. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2012, № 1 (228), pp. 30-37.
3. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Electronic modules based on microwave AlGaIn/GaN/ SiC heterotransistors for space applications. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], Issue 12, pt .2. Tula, TulGU Publ., 2016, pp. 201-207.
4. Gilleo K., Ph.D. MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials, and Processes - McGraw-Hill //Nanoscience and Technology Series. 2005. 239 p.
5. Zolotarev A. A., Ivanov K. A. Analysis of AlSiC metal-matrix composite case deformation under the self-heating of microwave power Schottky barrier FET. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2017, № 2 (245), pp. 39-47.
6. Occhionero M.A., Adams R.W., Saums D. AlSiC for Optoelectronic / Thermal Management and Packaging Designs. 2001. 5 p.