УДК 621.3.085.6

DOI: 10.36845/2073-8250-2019-255-4-55-64

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КОРПУСОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА ALSIC

А.А. Золотарев, Л.В. Чумакова

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

В статье представлены результаты разработки технологии металлизации корпуса полупроводникового прибора, изготовленного из металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния, при помощи химического и гальванического осаждения никеля. Проведены исследования качества полученного покрытия при помощи электронной микроскопии, предложена технология нанесения покрытия с применением промежуточного вжигания между химическим и гальваническим осаждением никеля.

Ключевые слова: GaN – нитрид галлия, металломатричный композит, AlSiC, HEMT, высокотемпературные корпуса для микроэлектроники

Сведения об авторах: Золотарев Алексей Алексеевич, аспирант, zolotarev_aa@pulsarnpp.ru; Чумакова Лариса Владимировна

FEATURES OF METALLIZATION OF SEMICONDUCTOR DEVICE PACKAGES MADE OF ALSIC METAL-MATRIX COMPOSITE

A.A. Zolotarev, L.V. Chumakova

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

This paper presents the results of the development of metallization technology assisted with chemical and galvanic deposition of nickel for semiconductor device packages, which are made of metal-matrix composite based on aluminum and silicon carbide. Obtained coating was analysed by the means of electron microscopy, and the technology of applying the coating using an intermediate burn-in process between the chemical and galvanic deposition of nickel is proposed.

Keywords: GaN – gallium nitride, metal-matrix composite, AlSiC, HEMT, high-temperature electronic packaging

Authors: Zolotarev Alexey Alekseevich, post-graduate student, zolotarev_aa@pulsarnpp.ru; Chumakova Larisa Vladimirovna

Одними из самых востребованных изделий микроэлектронной промышленности являются полупроводниковые приборы, изготовленные на широкозонных материалах, таких как карбид кремния, арсенид галлия, нитрид галлия и т. д. Интерес к широкозонным полупроводниковым материалам со стороны разработчиков микроэлектроники вызван возможностью снижения потерь и увеличения рабочей частоты устройств на их основе, их высокими значениями напряжения пробоя и рабочей температуры, а также надёжностью и радиационной стойкостью. Среди полупроводниковых приборов на широкозонных материалах отдельно стоит выделить устройства на основе нитрида галлия. Нитрид галлия обладает широкой запрещённой зоной, высоким напряжением пробоя, высокой плотностью мощности и высоким коэффициентом усиления в СВЧ диапазоне. Эти свойства совместно с превосходной теплопроводностью делают устройства на основе GaN пригодными для мощных приборов, работающих на высокой частоте и в широком диапазоне рабочих температур [1].

Применение широкозонных материалов в конструкции современных приборов приводит к повышению удельной и суммарной выделяемой тепловой мощности, что в сочетании с постоянным уменьшением геометрических размеров полупроводниковых приборов ставит перед разработчиками микроэлектронных устройств следующие задачи:

- отвод избыточного тепла от малой площади, вырабатываемого в процессе эксплуатации приборов;

- согласование КТР материалов полупроводниковых приборов;

- применение полупроводниковых приборов в широком диапазоне рабочих температур.

Традиционно применяемые материалы в микроэлектронике, такие как сплавы на основе меди и алюминия, уже не могут обеспечивать решение вышеуказанных задач, что заставляет разработчиков искать новые материалы для использования в конструкции современных полупроводниковых приборов. К таким материалам можно отнести металломатричные композиты (ММК). В ММК матрицей могут служить такие материалы, как алюминий, магний, титан, никель и их сплавы. Армирующими наполнителями в ММК могут служить различные типы керамики. Выбор материала матрицы и наполнителя зависит от тех свойств, которые необходимо получить для решения конкретной задачи.

Композиты системы AlSiC (алюминий – карбид кремния) выделяются среди различных сочетаний материалов матрицы и наполнителя во всём диапазоне металломатричных композитов прежде всего физическими свойствами и широким распространением алюминия и сплавов на его основе [2-3]. Металломатричные композиты на основе алюминиевой матрицы и армирующих частиц карбида кремния являются одним из самых современных материалов в области терморегулирования. Применение армирующих частиц карбида кремния позволяет повысить согласованность материалов корпуса и кристалла полупроводникового прибора и увеличить количество отводимого тепла.

На рис. 1 представлено изображение частиц карбида кремния, полученное с помощью электронного микроскопа.

Рис. 1

Изображение частиц SiC , полученное с помощью электронного микроскопа [4]

Применение в микроэлектронике корпусов и подложек, изготовленных из металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния, тесно связано с необходимостью качественной металлизации поверхности для улучшения паяемости приборов. Качество пайки элементов полупроводникового прибора напрямую влияет на надёжность. Поверхность металломатричного композита $AlSiC$ состоит из комбинированных поверхностей алюминия и карбида кремния. При нанесении металлических покрытий на комбинированные поверхности возникают трудности, связанные с различными способами подготовки поверхности разных материалов перед химической металлизацией. В связи с этим было необходимо проанализировать существующие способы металлизации композиционных материалов и отработать технологию нанесения металлического покрытия на металломатричный композит.

Опытный образец для проведения исследования был получен методом инфильтрации под давлением. Общая схема метода представлена на рис. 2.

Рис. 2

Общая схема получения металломатричного композита методом инфильтрации под давлением

Использование этого метода получения металломатричного композита позволяет получить более высокую объёмную долю частиц карбида кремния в металлической матрице, так как расплавленный металл под давлением заполняет пустоты между армирующими частицами.

Для проведения исследования качества нанесения металлизации на поверхность металломатричного композита был изготовлен опытный образец прямоугольной формы, который представлен на рис. 3.

Рис. 3

Опытный образец, изготовленный из металломатричного композита $AlSiC$, без металлизации

Поверхность композита AlSiC представляет собой комбинацию чередующихся поверхностей алюминия и карбида кремния. При нанесении металлических покрытий на комбинированные поверхности возникают трудности, связанные с различными способами подготовки поверхности разных материалов перед химической металлизацией.

Известен способ химической металлизации алюминия, в котором с целью увеличения адгезии никелевого покрытия проводят двойную цинкатную обработку [5]. Однако при использовании данной обработки невозможно получить никелевое покрытие на участках карбида кремния AlSiC, т. к. она не приводит к активации его поверхности. Также известен способ подготовки поверхности деталей из керамики под нанесение металлических покрытий, который включает следующие стадии предварительной обработки поверхности: обезжиривание, промывку, химическое травление, промывку, сенсibilизацию, промывку, активирование в растворе, содержащем PdCl_2 и HCl , сушку и нанесение металлического покрытия [6]. Данные способы имеют ряд недостатков – прежде всего это большое количество технологических операций для подготовки поверхности, а также использование раствора для сенсibilизации на основе солей олова, которые отличаются высокой нестабильностью.

Описанные технологические схемы невозможно использовать для активирования комбинированной поверхности композита AlSiC и осаждения на неё покрытия, так как в результате контактного выделения олова и палладия на поверхности алюминия резко снижается сцепление осаждённого никелевого покрытия с подложкой. Кроме того, обработкой карбида кремния

раствором соли благородного металла (палладия или золота) затруднительно произвести активацию поверхности вследствие её высокой химической инертности. В связи с этим исследовался технологический процесс химической металлизации металломатричных композиционных материалов, описанный в патенте [7], согласно которому можно получить сплошное и равномерное никелевое покрытие без осуществления стадий сенсibilизации и активации обрабатываемой поверхности.

В патенте [7] описан способ химического никелирования металломатричных композитов. Он включает в себя обезжиривание, первую промывку, травление, вторую промывку, химическое осаждение никеля, третью промывку и сушку, при этом травление проводят в водном растворе, содержащем 20-35 мас.% фтористоводородной кислоты и 10-35 г/л аммония фтористого, в течение 15-30 с при температуре раствора от 10 до 40 °С. Химическое осаждение никеля проводилось при температуре от 55 до 70 °С. Для оценки вышеуказанной технологии металлизации был покрыт один опытный образец AlSiC. Образец, покрытый в соответствии с технологией, указанной в [7], представлен на рис. 4.

Рис. 4

Опытный образец, изготовленный из металломатричного композита AlSiC, с металлизацией по способу [7]

По внешнему виду образца можно определить наличие непокрытых участков и общую неоднородность никелевого покрытия. Для определения сплошности покрытия опытный образец анализировали с использованием электронной микроскопии. Результат анализа поверхности опытного образца с использованием электронной микроскопии представлен на рис. 5.

На микроскопическом изображении поверхности, металлизированной химическим никелированием по технологии [7], видны непокрытые участки с частицами карбида кремния, а также неоднородные участки металлизации. На непокрытых участках адгезия химически осаждённых слоёв никеля к частицам карбида кремния отсутствует. В местах выхода частиц

Рис. 5

Изображение поверхности опытного образца, покрытого по способу [7], полученное с помощью электронного микроскопа

карбида кремния на поверхность композита могут появляться непокрытые никелем пятна и точки, а также после нагрева вздутия химически осаждённого покрытия, что может привести к локальным перегревам, например, транзисторных структур, смонтированных на теплоотводе из металломатричного композита. Особенно отчетливо эти дефекты поверхности проявляются после нанесения слоя золота на никелированную поверхность.

Результат нанесения покрытия методом химического никелирования на опытный образец по технологии [7] был получен на оборудовании АО «НПП «Пульсар». Поверхность опытного образца перед нанесением покрытия механически не обрабатывалась, в отличие от технологии нанесения покрытия по патенту [7].

Для улучшения адгезии и сплошности покрытия поверхности металломатричного композита была предложена техно-

логическая схема, включающая следующие стадии: обезжиривание; травление; химическое осаждение никеля (толщиной около 1 мкм); сушку; вжигание; активацию; гальваническое осаждение никеля.

Процесс обезжиривания проводился в хлорированных углеводородах (трихлорэтилен и четырёххлористый углерод), так как щелочные обезжиривающие растворы сильно растравливают поверхность, содержащую алюминий. В качестве травителя был использован состав, предложенный в патенте [7]: плавиковая кислота 20-35 % (по массе); фтористый аммоний 10-35 г/л. Время травления 15-30 секунд при температуре 10-40 °С.

На рис. 6 представлены два образца, справа – образец с металлизацией, полученный по способу [7]; слева – образец с металлизацией, полученный по вышеуказанной технологии.

Рис. 6

Опытные образцы, изготовленные из металломатричного композита $AlSiC$, с металлизацией:
а) по разработанной технологии; б) по технологии патента [7]

Внешний вид поверхности опытного образца, полученного по разработанной технологии, заметно отличается от образца с металлизацией, полученной по технологии [7]. На поверхности нет видимых дефектов покрытия, поверхность однородная. Исследование результатов нанесения металлизации на поверхность металломатричного композита проводилось с применением электронной микроскопии. На рис. 7 представлен снимок участка поверхности с металлизацией по разработанной технологии.

Локальный участок поверхности на рис. 7 имеет более сплошной вид по сравнению с предыдущим образцом. На поверхности отсутствуют непокрытые участки карбида кремния, максимальная глубина шероховатости покрытия составила не более 5 мкм.

Вжигание слоя химического никеля проводилось в вакууме при температуре 400 °С в течение 10 минут из соображений максимальной прочности сцепления с подложкой, в состав которой входит алюминий [8].

Рис. 7

Микроскопическое изображение поверхности опытного образца, покрытого по разработанной технологии

Перед нанесением гальванического никеля поверхность активировали в холодной соляной кислоте (18 %, 10-15 с), а никелирование проводилось с начальным толчком тока в 1,5-2 раза выше расчётного в течение 10-15 секунд [9].

Для проведения исследования структуры слоёв металлизации, нанесённой по разработанной технологии, был сделан срез на поверхности опытного образца и получено изображение слоёв при помощи электронного микроскопа. Результат исследования структуры среза металлизации представлен на рис. 8.

На рисунке 8 видно, что металлизация опытного образца состоит из трёх слоёв. Два нижних слоя по 0,3 мкм – это слой химической металлизации. Слоистость промежуточного слоя химической металлизации объясняется изменением концентрации фосфора в толщине слоя осадка, связанного со сложным механизмом осаждения химического никеля на алюминий, а также последующей термообработкой (вжиганием) покрытия. Этим же объясняется и малая толщина промежуточного слоя химического никеля из-за диффузии никеля в композит и возможного образования

Рис. 8

Изображение среза поверхности опытного образца, покрытого по разработанной технологии, с размерами

сложных соединений (темный слой химического никеля на рис. 8). Верхний светлый слой на рис. 8 с толщиной 6,5 мкм относится к гальваническому никелю.

Никелирование металломатричного композита AlSiC из различных растворов химического никелирования показало, что можно применять как кислые, так и щелочные растворы, известные из литературных источников. Во всех случаях вначале идёт бурная реакция, связанная с присутствием алюминия в металломатричном композите, что вызывает пористость никелевого покрытия.

Малая толщина первого слоя никеля (менее 1 мкм) выбрана с учётом пористости материала подложки (металломатричного композита), так как в процессе подготовительных операций (обезжиривания, травления, промывок) в порах материала могут оставаться следы этих растворов, которые при последующем нагреве будут газить и вызывать вздутия и отслаивание покрытия. Пористость самого никеля при такой толщине позволит этим парам выйти из-под слоя при термообработке.

Опытные образцы металломатричного композита с металлизацией поверхности, нанесённой по разработанной технологии, проверили на качество сцепления в соответствии с ГОСТ 9.302-88 методом нагрева и методом нанесения сетки царапин на поверхность. В результате визуального контроля дефектов поверхности вздутий, отслаиваний и растрескиваний обнаружено не было. Также были проведены испытания качества адгезии методом проверки прочности паяного соединения. С этой целью к поверхности с нанесённым покрытием припаивались металлические

стержни диаметром 1 мм, к которым затем прикладывалось растягивающее усилие, при этом исследуемый образец был неподвижно закреплён. В результате проведения измерений на опытном образце произошёл отрыв металлических стержней вместе с покрытием – голый отрыв. Величина прикладываемого усилия при отрыве составила от 34,3 до 46 Н/мм². Данные значения усилия на отрыв нанесённого никелевого покрытия позволяют использовать металломатричный композит для изготовления подложек с последующим монтажом на него кристаллов на основе широкозонных материалов.

Применение разработанной технологии нанесения металлизации на металломатричный композит AlSiC позволило получить сплошную однородную поверхность на металломатричном композите без видимых дефектов и непокрытых локальных участков с частицами карбида кремния для дальнейшего создания корпусов и элементов герметичных корпусов полупроводниковых приборов.

Литература

1. Герасимов, А.О. Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN транзисторах: опыт изготовления / А.О. Герасимов, В.М. Миннебаев, В.Ф. Синкевич, Ал.В. Редька // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 1 (228). – С. 30-37.
2. Occhionero M., Adams R.W. Alluminium Silicon Carbide (AlSiC) for advanced microelectronic packages. Proceedings of 1994 International Symposium on Microelectronics, IMAPS May 1998 Boston Meeting, pp. 590-595.
3. Золотарев, А.А. Применение металломатричного композита на основе алюминия и карбида кремния для создания корпусов СВЧ GaN транзисторов / А.А. Золотарев // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 2 (249). – С. 48-52.

4. Molina J.M., Narciso, J., Weber, L., Mortensen, A. Thermal conductivity of aluminium matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles. *Scripta Materialia*, vol.58, (October 2007), pp. 393-396.
5. Никандрова, Л.И. Химические способы получения металлических покрытий. – Л.: Машиностроение, 1971. – 104 стр.
6. **Патент RU 2219284C1 Российская Федерация, МПК C23C 18/31 (2006.01), H05K 3/18 (2006.01).** Способ подготовки поверхности деталей из ферритов, керамики и ферритокерамики под нанесение металлических покрытий : № 200211350/02 : опубл. 20.12.2003 / Симунова С.С., Лапенкова Н.И.
7. **Патент RU 2544319 C1 Российская Федерация, МПК C23C 18/18 (2006.01), C23C 18/36 (2006.01), C23F 1/14 (2006.01).** Способ химического никелирования и раствор для его осуществления : № 2013155748/02 : заявл. 17.12.2013 : опубл. 20.03. 2015 / Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ефимочкин И.Ю., Севастьянов Н.В., Мурашов В.В., Вдовин С.М., Нищев К.Н.
8. Вансовская, К.М. Металлические покрытия, нанесённые химическим способом / К.М. Вансовская – Л.: Машиностроение, 1989. – 103 с.
9. Гальванотехника: Справочник / А.А. Гинберг, А.Ф. Иванов, Л.А. Кравченко – М.: Металлургия, 1987. – 735 с.
- on Microelectronics, IMAPS May 1998 Boston Meeting, pp. 590-595.
3. Zolotarev A.A., Primeneniye metallomatrixnogo kompozita na osnove alyuminiya i karbida kremniya dlya sozdaniya korpusov SVCH GaN tranzistorov [Application of AlSiC metal-matrix composite to produce GaN microwave transistor cases]. *Semiconductor engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 2018, iss. 2 (249), pp. 48-52.
4. Molina J.M., Narciso, J., Weber, L., Mortensen, A. Thermal conductivity of aluminium matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles. *Scripta Materialia*, 2007, vol. 58, pp. 393-396.
5. Nikandrova L.I. Khimicheskiye sposoby polucheniya metallicheskih pokrytiy [Chemical methods for producing metal coatings], Saint-Petersburg, Mashinostroyeniye, 1971, 104 p.
6. Simunova S.S., Lapenkova N.I., Sposob podgotovki poverkhnosti detaley iz ferritov, keramiki i ferritokeramiki pod naneseniye metallicheskih pokrytiy [The method of preparing the surface of parts made of ferrites, ceramics and ferrite ceramics for applying metal coatings]. Russian Federation patent, 2003, no. 2219284C1
7. Kablov Ye.N., Shchetanov B.V., Efimochkin I.YU., Sevast'yanov N.V., Murashov V.V., Vdovin S.M., Nishchev K.N. Sposob khimicheskogo nikelirovaniya i rastvor dlya yego osushchestvleniya [Chemical nickel plating method and solution for its implementation]. Russian Federation patent, 2015, no. RU 2544319 C1.
8. Vansovskaya K.M. Metallicheskiye pokrytiya, nanesonnyye khimicheskim sposobom [Metal coatings applied by chemical method]. Saint-Petersburg, 1989, 103 p.
9. Ginberg A.A., Ivanov A.F., Kravchenko L.A. Gal'vanotekhnika: Spravochnik [Electroplating: Handbook]. Moscow, Metallurgiya, 1987, 735 p.

Reference

1. Gerasimov A.O., Minnebaev V.M., Sinkevich V.F., Redka Al.V. Impul'snyy usilitel' moshchnosti X-diapazona na GaN tranzistorakh: opyt izgotovleniya [X-band pulsed power amplifier based on GaN transistors: manufacturing practice]. *Semiconductor engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 2012, iss. 1 (228), pp. 30-37.
2. Occhionero M., Adams R.W. Alluminium Silicon Carbide (AlSiC) for advanced microelectronic packages. Proceedings of 1994 International Symposium