

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК¹, д. т. н. И. П. ФЕСЕНКО²

Украина, г. Киев, ¹НИИ «Орион»; ²ИСМ НАНУ

E-mail: ndiorion@tsua.net

ПОГЛОТИТЕЛИ СВЧ-ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ AlN И SiC С ДОБАВКАМИ МОЛИБДЕНА

Представлены результаты экспериментальных исследований теплопроводности и поглощения в композитах из нитрида алюминия с разным содержанием карбида кремния и молибдена. Показано, что наилучшим из рассмотренных материалов является композит, содержащий 46% карбида кремния и 4% молибдена. В этом случае одновременно обеспечивается высокий уровень поглощения СВЧ-энергии (42 дБ/см в диапазоне частот 9,5–10,5 ГГц) и высокая теплопроводность (65 Вт/(м·К)).

Ключевые слова: объемный поглотитель, коэффициент поглощения электромагнитной энергии, композит, нитрид алюминия, карбид кремния, молибден.

Самыми важными характеристиками объемных поглотителей СВЧ-энергии, применяемых в вакуумных приборах СВЧ (клизотронах и лампах бегущей волны), являются их способность к поглощению значительных уровней СВЧ-энергии и высокая теплопроводность при том условии, что материал поглотителя является диэлектриком. В [1–3] сообщалось, что такие композиты с керамической матрицей, состоящие из высокотеплопроводной керамики из нитрида алюминия (AlN) и проводящей (поглощающей) фазы из двух тугоплавких веществ — карбида хрома (Cr₃C₂) и молибдена (Mo) [1–2] или карбида кремния (SiC) и молибдена [3] — имеют высокие значения теплопроводности 60–80 и 54–65 Вт/(м·К) соответственно. Привлекательной особенностью этих композитов является повышенная термостабильность, обусловленная противоположными температурными коэффициентами электросопротивления полупроводников (Cr₃C₂, SiC) и металла. Вместе с тем, в [4] показано, что для материалов объемных поглотителей СВЧ-энергии между их теплопроводностью и уровнем поглощения существует обратная зависимость. В связи с этим представляет определенный интерес выяснить комплексное влияние проводящей фазы, состоящей из двух компонентов, на уровень поглощения СВЧ-энергии и на теплопроводность композита.

Целью данной работы является экспериментальное определение уровня поглощения и теплопроводности в керамическом материале с матрицей из нитрида алюминия и поглощающей фазы из карбида кремния и молибдена.

Экспериментальная часть

В настоящее время не существует теории и формул, позволяющих определить уровень поглощения СВЧ-энергии в непроводящих (по по-

стоянному току) композитах, состоящих из двух фаз — собственно диэлектрической, служащей матрицей и составляющей основу композита, и проводящей, состоящей из мелких частиц металла, не говоря уже о композитах, проводящая фаза которых состоит из нескольких компонентов, например из частиц металла и полупроводника, из металлоида и полупроводника. Поэтому единственным способом определения поглощения СВЧ-энергии в композитах является экспериментальное исследование конкретных образцов.

Измерение затухания СВЧ-энергии в кольцах поглотителя, размещенного в резонаторе замедляющей системы макета СВЧ-прибора, проводили на панорамном измерителе КСВН и ослабления Р2-61 в диапазоне частот 9,5–10,5 ГГц по методике, описанной в [5]. Кольца имеют размеры Ø16×Ø6×2,7 мм и выполнены из композита AlN—SiC—Mo.

Точность измерения затухания на панорамном измерителе Р2-61 составляет 0,1 дБ, что соответствует точности в определении коэффициента поглощения СВЧ-энергии 0,37 дБ/см с учетом толщины кольца поглотителя 2,7 мм.

Теплопроводность композита измеряли с помощью прибора ИТЗ-МХТИ (г. Новомосковск, Россия) на образцах размером 15×15×1,2 мм, ошибка измерения составляла 5% [6].

Для создания керамической матричной фазы композита использовали порошок нитрида алюминия (Донецкий завод химреактивов, Украина) с удельной поверхностью 2 м²/г. В качестве активизирующей добавки для спекания порошка нитрида алюминия применяли оксид иттрия Y₂O₃ марки ИТО-И (Киргизский горно-обогатительный комбинат) с размером частиц 0,5–1,0 мкм. Исходный порошок карбида кремния (производ-

Характеристики образцов полученных композитов

Состав образца, % по массе	Коэффициент по- глощения СВЧ- энергии, дБ/см	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Пористость, %
46%AlN — 4%Y ₂ O ₃ — 50%SiC	39±3	37±2	8
46%AlN — 4%Y ₂ O ₃ — 48%SiC — 2%Mo	37±3	54±2,5	6
46%AlN — 4%Y ₂ O ₃ — 46%SiC — 4%Mo	42±3	65±3	3
46%AlN — 4%Y ₂ O ₃ — 42%SiC — 8%Mo	45±3	49±2	2

ства ОАО «Запорожский абразивный комбинат», Украина) имел средний размер частиц 3,2 мкм. Для получения композитов порошок AlN (46% по массе) смешивали с порошком Y₂O₃ (4% по массе) сухим способом в планетарной мельнице. Затем в эту смесь добавляли порошки SiC (42—48%) и Mo (8—2%) со средним размером частиц 2,2 мкм. Полученные порошковые компакты спекали в среде азота при нормальном атмосферном давлении и температуре 1900°C.

Экспериментально измеренные уровни поглощения СВЧ-энергии в кольцах поглотителя из композитов с разным содержанием карбида кремния и молибдена приведены в **таблице**. Там же указаны значения пористости и коэффициентов теплопроводности этих композитов.

Анализ этих данных показывает, что введение в состав композита AlN—SiC частиц Mo вместо карбида кремния приводит к значительному увеличению теплопроводности и уменьшению пористости. В исследуемых композитах между теплопроводностью и уровнем поглощения прослеживается обратная зависимость. Так, например, при добавлении 2% молибдена коэффициент поглощения снижается с 39 до 37 дБ/см, но при этом теплопроводность возрастает в 1,46 раза, с 37 до 54 Вт/(м·К). И наоборот, когда теплопроводность уменьшается с 65 до 49 Вт/(м·К), поглощение увеличивается с 42 до 45 дБ/см. Композит, содержащий 46% SiC и 4% Mo, по комплексу своих параметров выгодно отличается от остальных рассмотренных тем, что имеет наибольшую теплопроводность 65 Вт/(м·К) и довольно высокий уровень поглощения СВЧ-энергии 42 дБ/см при пористости 3%.

Указанный в таблице разброс значений коэффициента поглощения СВЧ-энергии (±3 дБ/см) соответствует измеренным значениям в одной партии колец объемного поглотителя. Этот разброс вполне приемлем для композитов сложного состава. Диэлектрическая матричная фаза спеченного композита состоит из нитрида алюминия и алюмоиттриевого граната (Y₃Al₅O₁₂), образующегося из оксида иттрия, примесного кислорода нитрида алюминия и алюминия матричной фазы при спекании. Проводящая фаза спеченного композита состоит из частиц полупроводника карби-

да кремния, частиц молибдена и некоторого количества твердых растворов карбида кремния в нитриде алюминия на границах частиц молибдена и карбида кремния.

Обсуждение экспериментальных результатов

Рассмотрим влияние концентрации и размера частиц проводящей фазы на теплопроводность и поглощение СВЧ-энергии в двухфазных композитах вида AlN—Mo, AlN—SiC. Относительно поглощения можно считать установленной следующую закономерность: при условии, что композит является непроводящим на постоянном токе, уровень поглощения СВЧ-энергии в двухфазных композитах всегда увеличивается с ростом концентрации частиц проводящей фазы. Это правило соблюдается при любых размерах частиц и неоднократно подтверждено экспериментально [7]. При постоянном составе поглощающих частиц, их концентрации, размеров или спектра их размеров уровень поглощения СВЧ-энергии тем выше, чем больше примесей находятся в исходных материалах проводящих частиц или в материале диэлектрической матрицы. Дополнительные примеси могут добавляться при размоле и спекании композитов. И хотя доля этих примесей в составе материала редко превышает 1—2% и обычно составляет доли процента, их влияние на поглощение иногда оказывается существенным. По общему утверждению Каламе и Абе [8], карбид кремния должен быть «грязным», т. е. содержание примесей в добавках карбида кремния должно быть высоким для получения композитов на основе оксида бериллия (BeO—SiC) с высокой поглощающей способностью к СВЧ-излучению.

По отношению к теплопроводности достоверно установлено, что для композитов типа AlN—SiC при фиксированных значениях концентрации проводящих частиц SiC и пористости теплопроводность композита тем больше, чем крупнее частицы карбида кремния [4, 9]. Основной вклад в теплопроводность двухфазных композитов вносит теплопроводность матричной, диэлектрической фазы — чем она выше, тем выше и теплопроводность всего композита. При фиксированных размерах частиц проводящей фазы высокая теплопроводность, присущая макрообъемам металлов и веществ, из которых состоят проводящие частицы, очень слабо влияет на теплопроводность композита.

та в целом. Обычно теплопроводность двухфазных композитов ($\text{AlN}-\text{Mo}$, $\text{AlN}-\text{W}$, $\text{AlN}-\text{SiC}$) составляет 60–80 Вт/(м·К), и только в композите на основе оксида бериллия 60% $\text{BeO}-40\%$ SiC теплопроводность равна 160 Вт/(м·К), но и в этом случае такое ее значение обусловлено высокой теплопроводностью оксида бериллия (250 Вт/(м·К)) [8]. С ростом концентрации проводящих частиц и приближении ее к пределу, за которым наступает проводимость по постоянно-му току всего композита (порог перколяции), поглощение СВЧ-энергии максимально, а уровень теплопроводности минимален.

На основании вышеизложенного можно заключить, что основным фактором, определяющим теплопроводность в двухфазных композитах, является их объемная структурная иерархия, определяющая протяженность всех граничных поверхностей частиц и таким образом влияющая на процессы теплопереноса и теплообмена, происходящие на границах зерен матричной фазы и проводящих (и иных) частиц.

Если говорить о поглощении и теплопроводности как о процессах, происходящих на атомарном уровне, то можно сказать — чем больше протяженность несогласованных поверхностей кристаллических решеток соседних зерен и частиц, тем более затруднен поток фононов между ними, а это означает уменьшение теплопроводности. В то же время, чем больше суммарная поверхность всех граничащих друг с другом кристаллических решеток атомов веществ, входящих в состав композита, тем больше содержится в этих поверхностных слоях электронов проводимости, следовательно, с большим количеством электронов взаимодействует электромагнитное поле СВЧ-излучения. Это означает больший уровень поглощения СВЧ-энергии материалом композита.

Заключение

Применение порошка молибдена дисперсностью частиц 2,2 мкм в качестве добавки (4–8% по массе) в композитах на основе нитрида алюминия (46%) и карбида кремния (42–48%) позволило при высоком уровне поглощения СВЧ-энергии (42 дБ/см) увеличить теплопроводность композита $\text{AlN}-\text{SiC}-\text{Mo}$ в 1,8 раза. Использование исследованных композитов, имеющих высокий уровень поглощения и теплопроводности, в качестве материала для объемных поглотителей СВЧ-энергии в лампах бегущей волны с замед-

ляющей системой на связанных резонаторах приведет к снижению тепловых нагрузок в резонаторах выходных секций высокочастотного блока прибора, в которых размещаются объемные поглотители. Это обстоятельство является особенно важным для ламп бегущей волны средней и большой выходной СВЧ-мощности, работающих в непрерывном режиме. Повышение надежности по тепловому режиму вследствие уменьшения тепловых нагрузок в высокочастотном блоке прибора будет способствовать увеличению срока службы ЛБВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Куликов В.И., Мушкаренко Ю.Н., Пархоменко С.И., Прохоров Л.Н. Новый класс керамических материалов на основе теплопроводного нитрида алюминия // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. — 1993. — Вып. 2 (456). — С. 45–47.
2. Павлова М.А., Рыбкин В.Н., Немогай И.К. Поглотители СВЧ-энергии и их соединения с металлами // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. — 2009. — Вып. 4 (503). — С. 42–47.
3. Новиков Н.В., Фесенко И.П., Осипов А.С. и др. Особенности структуры и влияние ее на теплопроводность композиционных материалов на основе алмаза, с BN, WC, MgB_2 , B_4C , AlN // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. научн. Тр. — Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, серия Материаловедение. — 2011. — С. 148–153.
4. Часнык В.И., Фесенко И.П. Теплопроводность внутривакуумных объемных поглотителей СВЧ-энергии // Техника и приборы СВЧ. — 2011. — №2. — С. 47–51.
5. Часнык В.И., Фесенко И.П. Объемный поглотитель СВЧ-энергии на основе нитрида алюминия и карбида кремния // Техника и приборы СВЧ. — 2008. — №2. — С. 45–47.
6. Азима Ю.И., Беляев Ю.И., Кулаков М.В. Устройство для измерения коэффициента теплопроводности высокотеплопроводных материалов // Приборы и техника эксперимента. — 1985. — № 4. — С. 248–249.
7. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. — Москва: Наука. 1982. — 163 с.
8. Calame J. P., Abe D. K. Applications of Advanced Materials Technologies to Vacuum Electronic Devices // Proc. IEEE. — 1999. — 87, N 5. — P. 840–864.
9. Сербенюк Т. Б., Александрова Л. И., Заїка М. І. та ін. Структура, механічні, тепло- та діелектричні властивості керамічного матеріалу нітрид алюмінію — карбід кремнію // Сверхтвердые материалы. — 2008. — №6. — С. 29–39.

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.11 2013 г.

В. І. ЧАСНИК, І. П. ФЕСЕНКО
Україна, м. Київ, НДІ «Оріон»; ІНМ НАНУ
E-mail: ndiorion@tsua.net

ПОГЛИНАЧІ СВЧ-ЕНЕРГІЇ З ВИСОКОЮ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ НА ОСНОВІ AlN ТА SiC З ДОБАВКАМИ МОЛІБДЕНУ

Представлено результати експериментальних досліджень теплопровідності та поглинання у композитах з нітриду алюмінію з різним вмістом карбіду кремнію та молибдену. Показано, що найкращим з

розглянутих матеріалів є композит, що містить 46% карбиду кремнію та 4% молибдену. У цьому випадку одночасно забезпечується високий рівень поглинання НВЧ-енергії (42 дБ/см у діапазоні частот 9,5–10,5 ГГц) та висока теплопровідність (65 Вт/(м·К)).

Ключові слова: об'ємний поглинач, коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії, композит, нітрид алюмінію, карбід кремнію, молибден.

DOI: 10.15222/TKEA2014.1.11

УДК 621.315:615.5

V. I. CHASNYK¹, I. P. FESENKO²

Ukraine, Kiev, ¹RSI "Orion"; ²ISM of NASU

E-mail: ndiorion@tsua.net

MICROWAVE ENERGY ATTENUATORS OF HIGH THERMAL CONDUCTIVITY BASED ON AlN AND SiC WITH ADDITION OF MOLYBDENUM

The paper presents the results of experimental studies of thermal conductivity and microwave absorption in aluminum nitride based composites with different percentages of silicon carbide and molybdenum. It is shown that the optimal composition of the studied materials is the composite with 46% of silicon carbide and 4% of molybdenum. This composition reveals high UHF-energy absorption level of 42 dB/cm in the frequency range of 9.5–10.5 GHz and high thermal conductivity of 65 W/(m·K).

Keywords: volume attenuators, absorption factor of electromagnetic energy, composite, aluminum nitride, silicon carbide, molybdenum.

REFERENCES

1. Kulikov V.I., Mushkarenko Yu.N., Parkhomenko S.I., Prokhorov L.N. *Elektronnaya tekhnika. Ser. SVCh-tehnika*, 1993, iss. 2 (456), pp. 45-47 (in Russian)
2. Pavlova M.A., Rybkin V.N., Nemogai I.K. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tehnika*, 2009, iss. 4 (503), pp. 42-47 (in Russian)
3. Novikov N.V., Fesenko I.P., Osipov A.S. et al. *Sintez, spekanie i svoystva sverkhтвердых материалов: Sb. nauchn. Tr., V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, seriya Materialovedenie*, 2011, pp. 148-153 (in Russian)
4. Chasnyk V.I., Fesenko I.P. *Tekhnika i pribory SVCh*, 2011, no 2, pp. 47-51 (in Russian)
5. Chasnyk V.I., Fesenko I.P. *Tekhnika i pribory SVCh*, 2008, no 2, pp. 45-47 (in Russian)
6. Azima Yu.I., Belyaev Yu.I., Kulakov M.V. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1985, no 4, pp. 248-249 (in Russian)
7. Kovneristy Yu.K., Lazareva I.Yu., Ravaev A.A. *Materialy, pogloshchayushchie SVCh-izlucheniya* [Materials that absorb the microwave radiation] Moscow, Nauka, 1982, 163 p. (in Russian)
8. Calame J. P., Abe D. K. *Proc. IEEE*, 1999, 87, no 5, pp. 840-864.
9. Serbenyuk T. B., Aleksandrova L. I., Zayika M. I. et al. *Sverkhтвердые материалы*, 2008, no 6, pp. 29-39 (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Вонг Б.П., Миттал А., Цао Ю., Старр Г. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне.— Москва: Техносфера, 2014.

Книга содержит весьма актуальные сведения по особенностям современных технологий СБИС уровня 130–90 нм, которые необходимо знать и учитывать при проектировании. Здесь также описаны соответствующие приемы проектирования на физическом уровне для схем смешанного сигнала и аналоговых компонентов, схем памяти, методов снижения потребляемой мощности, схем ввода/вывода и защиты от электростатического разряда, целостности сигнала с учетом длинных межсоединений. В книге также рассмотрены приемы проектирования, обеспечивающие повышение выхода годных и учет вариаций технологического процесса.

Книга может быть весьма полезна не только конструкторам, но и инженерам-технологам, осуществляющим разработку новых технологий и соответствующих правил проектирования.

