

УДК 621.315.61

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОЙ КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ СВЧ

Проведен анализ свойств и характеристик керамических материалов, применяемых в электронных приборах СВЧ: корундовых керамик, керамики из оксида бериллия и керамики из нитрида алюминия. Показано, что по комплексу параметров, включающих конструкционные и функциональные характеристики, высокотеплопроводная керамика из нитрида алюминия превосходит все типы корундовой керамики и не уступает керамике из оксида бериллия, особенно при температурах выше 450°C. Приведены примеры преимущественного использования керамики из нитрида алюминия в вакуумных электронных приборах СВЧ-диапазона: ЛБВ и клистронах.

Ключевые слова: керамика, нитрид алюминия, диэлектрические опоры, спираль, ЛБВ, окно вывода энергии, изолятор, коллектор.

Для всесторонней и объективной оценки разных керамических материалов, применяемых в электронной технике и в вакуумных приборах СВЧ-диапазона волн, необходима комплексная оценка их конструкционных и функциональных характеристик. Часто в работах, где анализируются разные керамические материалы, их физико-механические свойства приводятся не в интервале температур от 0 до 600°C, а при комнатной температуре, и не в диапазоне частот, в котором работают СВЧ-приборы (клистроны, ЛБВ, магнетроны), а только на нескольких частотах, которые могут и не совпадать с рабочим диапазоном приборов. Тем более ценны работы, в которых функциональные характеристики керамических материалов приводятся в широком интервале температур и СВЧ-диапазоне частот [1–3].

Нередко данные для керамического материала, полученные разными экспериментальными методами, отличаются между собой на 20–30%, а иногда и больше. Это может быть вполне приемлемым для обсуждения свойств материала в теоретическом плане, однако для применения материала в конкретном приборе или аппаратуре необходимы достоверные сведения в широком интервале температур (0–600°C) и в диапазоне частот от 3 до 40 ГГц. Обычно интервал температур окружающей среды для приборов СВЧ задается техническим заданием и составляет от –60 до +85°C. Кроме того, при работе СВЧ-приборов, а особенно приборов с большой выходной мощностью (сотни ватт и киловатты), температура внутри прибора и особенно на конечном участке замедляющей системы в выходной секции лампы бегущей волны (ЛБВ), а также на внутренних поверхностях токоприемников

в коллекторе ЛБВ может достигать 450–600°C, а иногда и выше. Именно поэтому сравнение конструкционных и функциональных характеристик разных керамических материалов в интервале температур от 0 до 450–600°C позволяет разработчикам электронной аппаратуры и приборов СВЧ объективно оценить преимущества или недостатки керамического материала и использовать этот материал в конструкции прибора с учетом всех его особенностей.

Целью данной статьи является сопоставление свойств и характеристик керамических материалов, применяемых в приборах СВЧ.

Сравнение характеристик керамических материалов

По данным [1–4] были построены приведенные на **рис. 1, 2** температурные зависимости коэффициента теплопроводности, тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости в интервале температур от 0 до 600°C для трех основных типов керамических материалов, применяемых в приборах и устройствах электронной техники: керамики на основе оксида бериллия (ВБ-100-1), корундовой керамики (основа — оксид алюминия (22ХС, сапфирит, поликор)) и керамики на основе нитрида алюминия (НИТАЛ-17, ЭЛАНТИНИТ и др.). Физические и механические параметры этих материалов приведены в **таблице**.

Как следует из **рис. 1**, коэффициент теплопроводности керамики из AlN повышенной чистоты в интервале температур от 0 до 350°C всего на 12% меньше коэффициента теплопроводности бериллиевой керамики ВБ-100-1, а в интервале 400–500°C они практически одинаковы. При

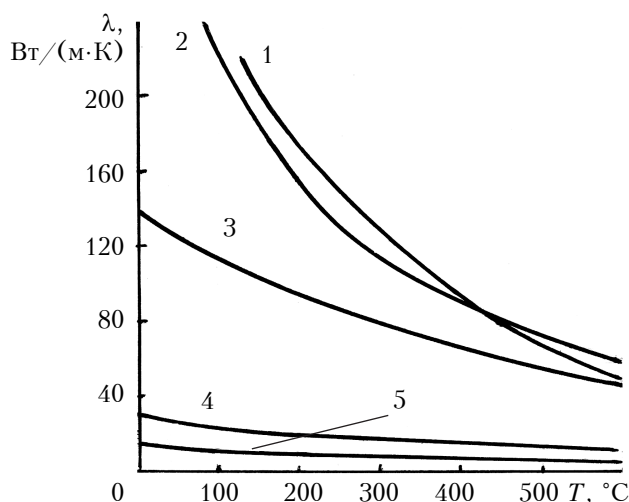


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности для различных материалов: 1 — оксид бериллия (ВБ-100-1); 2 — нитрид алюминия повышенной чистоты; 3 — нитрид алюминия НИТАЛ-17; 4, 5 — корундовая керамика (4 — поликор (ВК-100); 5 — 22ХС(ВК-94-1))

температуре выше 500°C теплопроводность керамики из AlN превосходит теплопроводность бериллиевой керамики. Однако такое высокое значение теплопроводности керамики из нитрида алюминия имеют лишь образцы небольшого размера и содержащие незначительное количество примеси кислорода — 0,1% по массе [2]. Теплопроводность современных керамических материалов, разработанных на основе нитрида алюминия (НИТАЛ-17, ЭЛАНТИНИТ) с содержанием кислорода 0,6–0,7% по массе (кривая 3 на рис. 1), составляет $\lambda=140-74$ Вт/(м·К) в интервале температур от 0 до 350°C . Это в 1,35–2 раза ниже теплопроводности керамики из AlN повышенной чистоты, но почти в 5 раз выше теплопроводности лучших видов корундовой керамики — поликора и сапфира. Вместе с этим следует отметить, что коэффициент теплопроводности в разработанных керамических материалах (типа НИТАЛ-17) в интервале температур 0–200, 200–400 и 400– 600°C уменьшается всего в 1,45 раза, а в керамике из AlN повышенной чистоты, соответственно, в 2,56, 1,73 и в 1,5 раза. Таким образом, наличие большого количества примеси кислорода играет положительную стабилизирующую роль в отношении деградации теплопроводности материала из AlN при изменении температуры. Кроме того, при этом возрастает также прочность материала из AlN . Известно, что периоды кристаллической решетки AlN зависят от концентрации примесей [3]. Тетраэдрический ковалентный радиус кислорода, который замещает азот, меньше, чем у азота. Одна молекула $\text{Al}_{0,67}\text{O}$ замещает одну молекулу AlN . При этом образуются металлические вакансии, что приводит к уменьшению параметров решетки AlN при увеличении содержания кислорода. Это уменьшение размера кристаллической

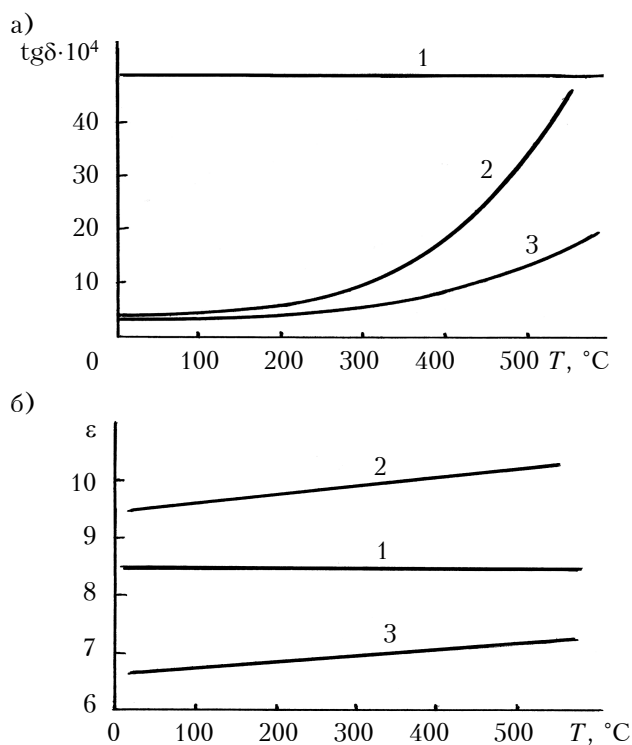


Рис. 2. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь (а) и диэлектрической проницаемости (б) на частоте 5,5 ГГц для различных материалов:

1 — керамика НИТАЛ-17; 2 — ВК 94-1; 3 — оксид бериллия ВБ-100-1

решетки AlN не только приводит к упрочнению материала, но и тесно связано с уникальным качеством керамики из нитрида алюминия — высокой термостойкостью и низким коэффициентом термического линейного расширения в интервале температур от 0 до 600°C .

Керамика из AlN , получаемая свободным спеканием (НИТАЛ-17, ЭЛАНТИНИТ и др.) с использованием активирующих добавок Y_2O_3 и CaCO_3 (от 2 до 5%), имеет не только высокую теплопроводность при удельном весе 3,20–3,26 г/см³, но и большое электросопротивление. В [6] отмечается, что в области примесной проводимости большее сопротивление обеспечивают именно добавки оксида иттрия и оксида кальция, причем наличие 2–3% по массе оксида иттрия стабилизирует электросопротивление на высоком уровне независимо от вида используемого при спекании порошка AlN . Переход от примесной проводимости к собственной наблюдается при $800-900^{\circ}\text{C}$.

Диэлектрическая проницаемость ϵ при наличии добавок увеличивается благодаря образованию плотных кристаллических фаз с повышенной ϵ , например за счет образующегося при спекании алюмоиттриевого граната $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{13}$ с $\epsilon=11,7$ [6, 7]. Вместе с тем, их наличие стабилизирует диэлектрические характеристики

Физико-механические свойства керамических материалов [1–4]

Параметр	Керамика из AlN НИТАЛ-17	Корундовая керамика			Керамика из оксида бериллия
		ВК 94-1 (22ХС)	ВК 98-1 (сапфи- рит)	ВК-100 (поликор)	ВБ-100-1
Удельный вес, г/см ³	3,20–3,26	3,65–3,85	3,88–3,94	3,96–3,99	2,84–2,95
Предел прочности при ста- тическом изгибе, МПа, при: 20°C 400°C	160–290 —	320–400 90–100	300–400 230	280–350 240	200 230
Термический коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁷ °C ⁻¹ , в диапазоне: 20–200°C 20–400°C 20–600°C 20–900°C	28–38 38–48 40–50 48–55	55–65 60–68 65–72 79–84	58–67 — 70–75 77–86	57 — — 75–85	53 60 65 78–86
Электрическая прочность, кВ/мм	30–45	30–45	32–47	50	—
Удельное объемное элек- трическое сопротивление, Ом·см, при 100°C 500°C	10 ¹³ 10 ⁸ –10 ⁹ (400°C)	10 ¹⁴ 5·10 ⁷	10 ¹⁴ 5·10 ⁷ –10 ⁸	10 ¹⁵ —	1,1·10 ¹⁵ 4,3·10 ¹⁴ (300°C)
Коэффициент вторичной электронной эмиссии	1,9–2,5	5,8	6,5	—	4,5
Разрушающий перепад тем- ператур при охлаждении в воде, °C	500–600	180–230	180–210	—	165

при изменении температуры. Так, при частотах выше 3 ГГц диэлектрические характеристики у керамики из AlN остаются неизменными в интервале температур от 0 до 500°C: $\epsilon=8-8,5$, $\text{tg}\delta=(40-50)\cdot 10^{-4}$, в то время как у алюмооксидной керамики ВК 94-1 ϵ увеличивается в 1,2 раза, а $\text{tg}\delta$ — в 6,5–7 раз (см. рис. 2 и 3). Важным преимуществом керамики из AlN по сравнению с плотной алюмооксидной и оксидно-бериллиевой керамикой является ее высокое сопротивление термоудару. Разрушающий перепад температур при охлаждении в воде составляет от 300–400 [2] до 500–600°C [5], что в 2–3 раза выше, чем у вышеуказанных типов оксидной керамики. Характерной особенностью керамики из AlN является также менее резкое изменение прочности с повышением температуры, чем у оксидной керамики. Так, предел прочности AlN при сжатии уменьшается с 120 кН/см² при 20°C до 29 кН/см² при 1100°C и до 20 кН/см² при 1600°C, тогда как у алюмооксидной керамики в том же интервале температур прочность уменьшается более чем в 50 раз [5, 8].

Все перечисленные свойства и преимущества керамики из AlN, полученной свободным спеканием с использованием активирующих спекание

добавок Y₂O₃ или CaCO₃, и являются основой для ее широкого применения в приборах СВЧ и электронной техники.

Применение керамики из AlN в СВЧ-приборах

Из всех существующих в настоящее время усилителей СВЧ-сигнала в диапазоне частот от единиц до десятков ГГц наиболее широкополосным прибором, с полосой усиливаемых частот от десятков процентов до двух-трех октав, является лампа бегущей волны с замедляющей системой на спирали. В разных конструкциях ЛБВ неизменным является наличие трех или четырех диэлектрических опор (обычно это стержни разного профиля), которые служат как для закрепления спирали, так и для отвода тепла от нее. Чем выше выходная мощность электронного потока, рассеиваемая на последних витках спирали в выходной секции ЛБВ, тем большее количество тепла необходимо отвести от спирали из внутривакуумной части прибора наружу. Если при этом не обеспечить хороший теплоотвод, то возможно не только выгорание последних витков спирали, но и расплавление в этом месте диэлектрических опор, что приводит к вы-

ходу из строя всего прибора. Поэтому для материала опор самым важным параметром является высокая теплопроводность.

В мощных спиральных ЛБВ для увеличения теплоотвода от последних витков спирали в выходной секции между основными диэлектрическими опорами располагают дополнительно три-четыре стержня с высокой теплопроводностью длиной около 10–15 мм. Материалом для них служат как разнообразная вакуумплотная керамика, так и искусственный алмаз, несмотря на его высокую стоимость. В таком случае, однако, из-за увеличения количества диэлектрика на выходном участке спирали возрастают высокочастотные потери и, как следствие, выходная мощность уменьшается на 5–10% в зависимости от ϵ и $\text{tg}\delta$ материала дополнительных опор. Для того чтобы потери выходной мощности были минимальными, материал диэлектрических опор, как основных, так и дополнительных, должен иметь небольшие значения ϵ и $\text{tg}\delta$. В ЛБВ средней и большой мощности наиболее подходящими материалами, удовлетворяющим этим требованиям, являются материалы на основе оксида бериллия, такие как керамика ВБ-100-1. Она применяется уже достаточно долго, и это несмотря на ее меньшую, чем у корундовых керамик, прочность и чрезвычайно высокую токсичность — при работе с деталями из керамики ВБ-100-1 необходимо соблюдать те же меры предосторожности, что и при работе с радиоактивными материалами.

Проведенный выше анализ керамических материалов позволяет сделать вывод, что керамика из AlN не уступает традиционной для СВЧ-приборов корундовой керамике из оксида алюминия (22ХС, сапфиру и поликору), особенно в области температур выше 450°C. При этих температурах диэлектрические потери ($\epsilon \times \text{tg}\delta$) в ней такие же, как у керамики 22ХС, а теплопроводность — как у бериллиевой керамики ВБ-100-1 и в четыре-пять раз выше, чем у корундовых керамик. Поэтому уже сейчас, с достигнутыми на настоящее время диэлектрическими и конструктивными характеристиками, применение керамики из нитрида алюминия в СВЧ-приборах в качестве диэлектрических опор для спирали более предпочтительно, чем использование корундовых керамик.

В настоящее время фирмы передовых стран мира, разрабатывающие приборы и устройства электронной и СВЧ-техники, проводят комплекс мероприятий и работ по замене токсичных материалов из оксида бериллия на экологически чистые и нейтральные для окружающей среды. Так, например, фирмы Sienna Technologies, Inc. и L-3 Communication Electron Devices провели совместную работу по замене алюмооксидной и бериллиевой керамики в сверхмощных приборах (20–100 МВт) на керамику из нитрида алюминия. Фирма L-3 Communication Electron

Devices провела испытания окон вывода энергии из керамики AlN на своих мощных клистронах. Полученные результаты подтвердили, что керамику AlN можно использовать в качестве материала окон выводов энергии в мощных и сверхмощных приборах СВЧ [9].

В НИИ «Орион» и ИСМ НАНУ (г. Киев) были проведены совместные работы по замене изоляторов из алюмооксидной керамики 22ХС на керамику из нитрида алюминия в коллекторном узле широкополосной ЛБВ (УВ-009) с выходной непрерывной мощностью до 30 Вт в полосе частот 8–18 ГГц. Замена изолятора из керамики 22ХС на керамику из AlN (при тех же ее размерах) позволила уменьшить перепад температуры на 40°C в первой ступени коллектора и на 18°C во второй. Мощность электронного потока, рассеиваемая в первой ступени коллектора, составляла 160 Вт, во второй — 80 Вт. Снижение перепада температур в первой и второй ступенях коллектора привело к облегчению теплового режима всей ЛБВ, охлаждаемой потоком воздуха с температурой +85°C, и, как следствие, к повышению надежности и долговечности работы ЛБВ. В ИСМ НАНУ на изоляторы из керамики AlN, применяемые в ЛБВ (УВ-009), были составлены технические условия — ТУ 88 УССР 90.1256-91 «Изоляторы из материала ЭЛАНТИНИТ», в соответствии с которыми коэффициент теплопроводности материала изоляторов должен быть не менее 120 Вт/(м·К), плотность материала 3,26 г/см³, значения коэффициента термического расширения (2,8; 4,5; 4,9; 4,6)·10⁻⁶ К⁻¹ при температуре 293, 673, 1073, 1273 К соответственно.

В [2] сообщается, что существует технология нанесения на детали из керамики AlN покрытий на основе нитрида бора. При этом устраняется опасность увеличения коэффициента вторичной электронной эмиссии из-за возможного образования оксидной пленки на их поверхности. Применение в ЛБВ деталей из керамики AlN приведет к повышению надежности и долговечности работы всего прибора.

Выводы

По комплексу параметров, включающих конструкционные и функциональные характеристики в СВЧ-диапазоне (3–40 ГГц) в интервале температур 450–600°C, керамика из нитрида алюминия превосходит все типы корундовой керамики и не уступает керамике из оксида бериллия (ВБ-100-1), не говоря уже о токсичности последней. Керамика из AlN может применяться для внутривакуумных деталей приборов СВЧ: изоляторов токоприемников в коллекторных узлах приборов, диэлектрических опор, поддерживающих спиральные замедляющие системы, и для деталей вакуумплотных узлов — окон ввода и вывода СВЧ-энергии, а также для изоляторов электронной пушки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Аветиков В. Г., Бершадская М. Д., Неделько Э. Е. и др. Нитрид алюминия — новый высокотеплопроводный диэлектрик // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1984. — Вып. 6. — С. 54 — 57. [Avetikov V. G., Bershadskaya M. D., Nedel'ko E. E. i dr. // Elektronnaya tehnika. Ser. Materialy. 1984. Iss. 6. P. 54]
2. Бершадская М. Д., Ерошев В. К., Кузнецова И. Г., Неделько Э. Е. Преимущества нитридных диэлектриков при производстве ИЭТ // Электронная промышленность. — 1984. — Вып. 5. — С. 72 — 78. [Bershadskaya M. D., Eroshev V. K., Kuznetsova I. G., Nedel'ko E. E. // Elektronnaya promyshlennost'. 1984. Iss. 5. P. 72]
3. Косолапова Т. Я., Андреева Т. В., Бартницкая Т. С. и др. Неметаллические тугоплавкие соединения. — Москва: Металлургия, 1985. [Kosolapova T. Ya., Andreeva T. V., Bartnitskaya T. S. i dr. Nemetallicheskie tugoplavkie soedineniya. Moscow: Metallurgiya, 1985]
4. Голант М. Б., Маклаков А. А., Шур М. Б. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. — Москва: Советское радио, 1969. [Golant M. B., Maklakov A. A., Shur M. B. Izgotovlenie rezonatorov i zamedlyayushchikh sistem elektronnyh priborov. Moscow: Sovetskoe radio, 1969]
5. Полубояринов Д. Н., Гордова М. Р., Кузнецова И. Г. и др. Основные свойства высокоплотной керамики из AlN // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. — 1979. — Т. 15, № 11. — С. 2055—2060. [Poluboyarinov D. N., Gordova M. R., Kuznetsova I. G. i dr. // Izv. AN SSSR. Ser. Neorganicheskie materialy. 1979. Vol. 15, N 11. P. 2055]
6. Кабышев А. В., Лопатин В. В. Влияние активирующих добавок на диэлектрические свойства алюмонитридной керамики // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. — 1990. — Т. 26, № 2. — С. 418—422. [Kabyshev A. V., Lopatin V. V. // Izv. AN SSSR. Ser. Neorganicheskie materialy. 1990. Vol. 26, N 2. P. 418]
7. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. — Москва: Наука, 1975. [Kaminskiy A. A. Lazernye kristally. Moscow: Nauka, 1975]
8. Павлушкин Н. М. Спеченный корунд. — Москва: Госстройиздат, 1961. [Pavlushkin N. M. Spechennyi korund. Moscow: Gosstroyizdat, 1961]
9. Информационный сборник «Новости СВЧ-техники». — Московская обл., г. Фрязино: ФГУП «НПП Исток», 2004, № 12. [Informacionnyi sbornik «Novosti SVCh-tehniki». Moskoov reg., Fryazino: FGUP «NPP Istok», 2004, N 12]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 08.11 2012 г.*

Chasnyk V. I. Use of high-thermal conductive aluminum nitride based ceramics in vacuum UHF electronic devices.

Keywords: ceramics, aluminum nitride, dielectric support, helix, TWT, output window, isolator, collector.

Analysis of properties and characteristics of the alumina, beryllium oxide and aluminum nitride based ceramic materials used in UHF electronic devices has been made. It was shown that the complex of parameters including structural and functional characteristics of the high-thermal conductive aluminum nitride ceramics prevail over all types of alumina ceramics and is not lower than the same characteristics of the beryllium oxide ceramics especially at the temperatures higher than 450 °C. The examples of the prevailing use of the aluminum nitride ceramics inside vacuum UHF-region devices: TWT's and klystrons.

Ukraine, Kiev, RSI «Orion».

Часник В. І. Застосування високотеплопровідної кераміки з нітриду алюмінію у вакуумних електронних приладах НВЧ.

Ключові слова: кераміка, нітрид алюмінію, діелектричні опори, спіраль, ЛБХ, вікно виводу енергії, ізолятор, колектор.

Проведено аналіз властивостей та характеристик керамічних матеріалів, які застосовуються в електронних приладах НВЧ: корундових керамік, кераміки з оксиду берилія та кераміки з нітриду алюмінію. Показано, що за комплексом параметрів, які складаються з конструкційних та функціональних характеристик, високотеплопровідна кераміка з нітриду алюмінію має вищі якості, ніж усі типи корундової кераміки, і не поступається кераміці з оксиду берилія, особливо при температурах вище 450°C. Наведено приклади переважного застосування кераміки з нітриду алюмінію в електронних приладах НВЧ-діапазону: ЛБХ та клістронах.

Україна, м. Київ, НДІ «Оріон».