

Выбор диэлектрических материалов для применения в выводах энергии мощных ЭВП СВЧ

Представлен анализ интегральных характеристик диэлектрических материалов, применяемых в выводах энергии ЭВП СВЧ, и даны рекомендации по использованию этих материалов в зависимости от передаваемого уровня мощности СВЧ и рабочего диапазона частот.

Ключевые слова: окна вывода энергии, диэлектрические материалы, мощные электровакуумные приборы СВЧ.

Для вывода СВЧ энергии из электровакуумных приборов используют волноводные и коаксиальные окна, основным элементом которых является вакуумноплотная диэлектрическая перегородка, способная пропускать электромагнитные волны. В качестве материалов перегородки чаще всего используют оксиды алюминия или бериллия, нитрид алюминия, пиролитический нитрид бора, поликристаллический алмаз. Обилие параметров, характеризующих каждый материал (см. таблицу 1), приводит к тому, что разработчики мощных и сверхмощных приборов СВЧ, как правило, отдают предпочтение тому или иному материалу, руководствуясь его ценой, доступностью, а также какими-либо отдельными свойствами, которые им кажутся наиболее важными. В качестве таких свойств, определяющих выбор материала, обычно оказываются теплопроводность диэлектрика и тангенс угла потерь. Однако относительная роль тех или иных характеристик материала может быть выяснена только при учете реальных угроз надежности окна и всей совокупности параметров диэлектрика, определяющих конкретный вид разрушения.

Разрушение современных диэлектрических материалов, применяемых в устройствах вывода энергии мощных и сверхмощных приборов СВЧ, происходит, главным образом, по одной из следующих причин:

- термомеханическое разрушение (ТМР) вследствие неравномерного нагрева вакуумноплотной перегородки из-за диэлектрических потерь;
- вторично-электронный СВЧ разряд (ВЭР) на обращенной в вакуум поверхности перегородки;
- СВЧ пробой и вызванный им дуговой разряд в невакуумной части окна вывода энергии.

Реже встречаются разрушения, обусловленные отчасти связанными между собой СВЧ разрядом в порах керамики и т.н. «проколами» диэлектрика в выводах энергии сверхмощных приборов импульсного режима. Эти проблемы могут быть решены применением технологии горячего изостатического прессования керамики [1]. В России подобная керамика пока не производится, но во многих случаях ее можно заменить другими беспористыми материалами, например, лейкосапфиром или пиролитическим нитридом бора.

В выводах энергии мощных и сверхмощных приборов СВЧ почти всегда применяются окна с жидкостным охлаждением краев диэлектрической перегородки. Для такого охлаждения формулы, которые описывают предельную пропускную способность плоско-

Таблица 1

Свойства диэлектриков, применяемых в выводах энергии

Материал	ВК94-1 (22ХС)	ВК98-1 (сапфирит)	ВК99-1 (поликор)	Лейко- сапфир	Нитрид алюминия	ВБ100 (оксид бериллия)	CVD нитрид бора	CVD. алмаз
Содержание основного компонента	94,2% Al ₂ O ₃	98% Al ₂ O ₃	99,8 % Al ₂ O ₃	100% Al ₂ O ₃	96,5% AlN	99,5% BeO	100% BN	100 % C
Σ _р , кгс/см ²	1800	2650	2500	4000	-	1000	540	2500
Σ _{сж} , кгс/см ²	11000	30000	-	20000	21500	13350	⊥2400	-
E _у × 10 ⁻⁶ , кгс/см ²	3,1	3,8	3,8	3÷4	3,2	3,1	0,15 ⊥0,11	10
Λ, Вт/м×°К (20°С)	14	25	29,3	34,2	170	210	55 ⊥1,5	700÷ 1900
α × 10 ⁷ , 1/°С	68	70	70	77 ⊥66	36	72	26 ⊥223	23
ε (20°С)	9,4	9,7	9,9	11,6 ⊥9,4	8,35	6,7	4,65 ⊥3,8	5,7
tgδ × 10 ⁴ (20°С)	8	1	0,5	1,3 ⊥3,3	25÷50	5	0,5÷3	0,1÷0,5
U _{пр} , кВ/мм	30÷45	32-47	-	-	20÷25	-	⊥60	-
КВЭЭ σ _{макс}	5,8	8,05	-	-	1,9	4,55	2,5	2,8
V _{икр} , В	50	40	-	-	90	70	⊥ 90	-
Токсичность	-	-	-	-	-	+	-	-
Завис. свойств от температуры	сильная	сильная	сильная	сильная	очень силь- ная	очень силь- ная	слабая	сильная
Стоимость	умеренная	умеренная	умеренная	высокая	умеренная	умеренная	высокая	очень высокая

поперечных диэлектрических перегородок, связанную с неравномерным нагревом из-за диэлектрических потерь, в общем случае имеют следующий вид [2]:

$$P_{\text{прТМР}} = A_1 \times \frac{K}{f}, \quad (1)$$

где A_1 – постоянный (с точностью до дисперсионного множителя) коэффициент, определяемый конструкцией и размерами окна, f – частота; $K = \Sigma_p \Lambda / (\alpha E_y \varepsilon \cdot \text{tg} \delta)$ [Вт/м] – коэффициент качества диэлектрика, в котором Σ_p – прочность материала на растяжение, Λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент линейного расширения, E_y – модуль упругости, ε – диэлектрическая проницаемость, δ – угол потерь.

Таблица 2

Значения коэффициента качества диэлектриков

Материал	22ХС	Сапфи- рит	Поликор	Лейкосап- фир	BeO	AlN	CVD BN	CVD- алмаз
K · 10⁻⁵ Вт/м	1÷2	15÷25	30÷40	50÷70	30÷40	5÷15	500÷700*	≈10000

*Величина коэффициента качества нитрида бора ограничена его максимальной рабочей температурой, принятой равной температуре окисления на воздухе (около 1100 °С).

Значения коэффициента качества приведены в таблице 2, из которой следует, что наименьшим коэффициентом качества обладает керамика 22ХС, а наибольшим – пироли- тический нитрид бора («борнит») и поликристаллический алмаз.

Пороговая мощность вторично-электронного СВЧ-разряда для плоскопоперечной ди- электрической перегородки в общем случае определяется формулами вида [3]:

$$P_{\text{прВЭР}} = A_2 C^2 f^2 S, \quad (2)$$

где A_2 – постоянный (с точностью до дисперсионного множителя) коэффициент, опреде- ляемый конструкцией окна; S – площадь поперечного сечения волновода; C – постоянная, определяемая формой кривой коэффициента вторичной электронной эмиссии диэлектрика (см. таблицу 3).

Таблица 3

Рассчитанные значения коэффициента C для некоторых диэлектриков [3]

Материал	22ХС	Сапфи- рит	Поли- кор	Лейко- сапфир	BeO	AlN	CVD BN	CVD- алмаз
$C \cdot 10^7$, В·с/м	230	190	--	–	260	–	350	–

Среди рассмотренных в таблице материалов наибольшей устойчивостью к вторично- электронному разряду характеризуется пироли- тический нитрид бора, хотя, судя по вели- чине коэффициента вторичной эмиссии, не менее привлекательно может выглядеть нитрид алюминия. Относительно низкий коэффициент вторичной эмиссии имеет также и CVD-ал- маз.

При нормальных условиях пороговая мощность СВЧ-пробоя в воздухе до частот, меньших $f \approx 30$ ГГц, когда можно пренебречь частотой столкновений электронов с молеку- лами газа по сравнению с рабочей частотой f , пропорциональна сечению S волновода:

$$P_{\text{прПВ}} = A_3 S, \quad (3)$$

где, как и раньше, A_3 – постоянный, с точностью до дисперсионного множителя, коэффи- циент, определяемый конструкцией окна. При этом устойчивость материалов к кратковре- менному локальному поверхностному нагреву, вызванному пробоем и образованием дуги, определяется температурами, приведенными в таблице 4.

Таблица 4

Устойчивость диэлектриков к внезапному локальному нагреву

Материал	22ХС	Сапфи- рит	Лейкосап- фир	BeO	AlN	CVD BN	CVD- алмаз
$\Sigma_{\text{сж}} / \alpha E_y, ^\circ\text{C}$	520	1100	≈ 850	1800	600	≈ 6200	$\approx 1700^*$

*Ввиду отсутствия для CVD-алмаза данных по пределу разрушения при сжатии величина $\Sigma_{\text{сж}}$ была при- нята на порядок большей порога прочности на растяжение Σ_p - соотношение, которое приблизительно вы- полняется для различных материалов.

Как следует из таблицы, пиронитрид бора, расчетная температура разрушения кото- рого превышает его температуру плавления, не должен поддаваться растрескиванию, что подтверждается и опытом работы с этим материалом. Ввиду своей слоистой структуры и крайне малой теплопроводности в направлении, перпендикулярном слоям, перегородка из нитрида бора относительно медленно прогорает под действием электрической дуги (рис. 1). Остальные материалы, включая CVD-алмаз, уязвимы в отношении локальных термоуда- ров, трескаются при пробоях по поверхности вакуумноплотной перегородки. Это уникаль- ное свойство пиронитрида бора объясняется не столько малой величиной его коэффициента

линейного расширения, сколько крайне малым значением модуля упругости – как выяснилось, чрезвычайно важной характеристикой материалов, используемых в окнах мощных СВЧ приборов.

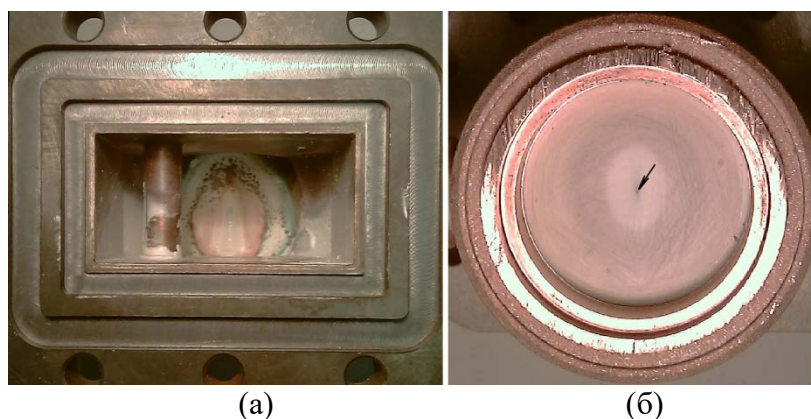


Рис. 1. Диск из борнитита, разрушенный дуговым разрядом с внешней стороны (а). (б) – вид диска со стороны прибора. Стрелка указывает на микроотверстие, образовавшееся в центре диска и приведшее к натеканию прибора. С внутренней стороны на поверхность диска напылилась медь. Трещин в диске нет.

При моделировании конструкций окон таким образом, чтобы все их внутренние размеры изменялись обратно пропорционально частоте:

$$S \cdot f^2 = \text{const} , \quad (4)$$

электродинамические характеристики практически не изменяются, а зависимость порога рассмотренных разрушающих явлений от частоты принимает вид:

$$P_{\text{пр}} f^n = \text{const}_n , \quad (5)$$

где $n=0$ для вторично-электронного разряда, $n=1$ для ТМР из-за диэлектрических потерь и $n=2$ для пробоя в невакуумной части вывода энергии, const_n – постоянная величина для выбранных конструкции волноводного окна и материала диэлектрической перегородки. На рис. 2 представлены зависимости пороговых мощностей разрушающих явлений в т.н. «двойном» окне вывода энергии при изменении размеров с частотой в соответствии с формулой (4).

На основании представленных зависимостей и приведенных выше данных можно прийти к следующим выводам:

- в приборах с высокой средней или непрерывной мощностью термомеханическое разрушение наиболее вероятно для материалов с низкими значениями коэффициента качества (керамика 22ХС) и практически невозможно для пиронитрида бора (условная граница ТМР для борнитрита на графике соответствует порогу начала каления и окисления материала, наблюдаемого в сверхмощных МЦР-приборах миллиметрового диапазона). Однако керамика 22ХС может с успехом применяться для передачи высоких уровней мощности в метровом и дециметровом диапазонах длин волн;

- в приборах импульсного режима с высокой средней мощностью в метровом и дециметровом диапазонах длин волн основную опасность для плоских окон вывода энергии на основе оксидов алюминия и бериллия представляет вторично-электронный СВЧ-разряд. Для предотвращения ВЭР используют антидинаatronные покрытия. Следует также обратить внимание на нитрид алюминия, имеющий самый низкий коэффициент вторичной эмиссии. В этих диапазонах он может с успехом заменить керамику 22ХС, выгодно отличаясь от нее и более высоким коэффициентом качества;

- в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн основной причиной разрушения высококачественных диэлектрических материалов является пробой вдоль поверхности перегородки, причем CVD-алмаз не имеет в этом отношении каких-либо преимуществ по сравнению с другими материалами. Отсюда следует, что использование CVD-алмаза в одномодовых, а также в баночных окнах мощных ЭВП не имеет смысла. Благодаря крайне низкому значению модуля упругости наибольшей устойчивостью к СВЧ пробоям обладает пиронитрид бора, который не трескается и может быть разрушен только вследствие расплавления при пробоях с внешней (невакуумной) стороны диэлектрической перегородки

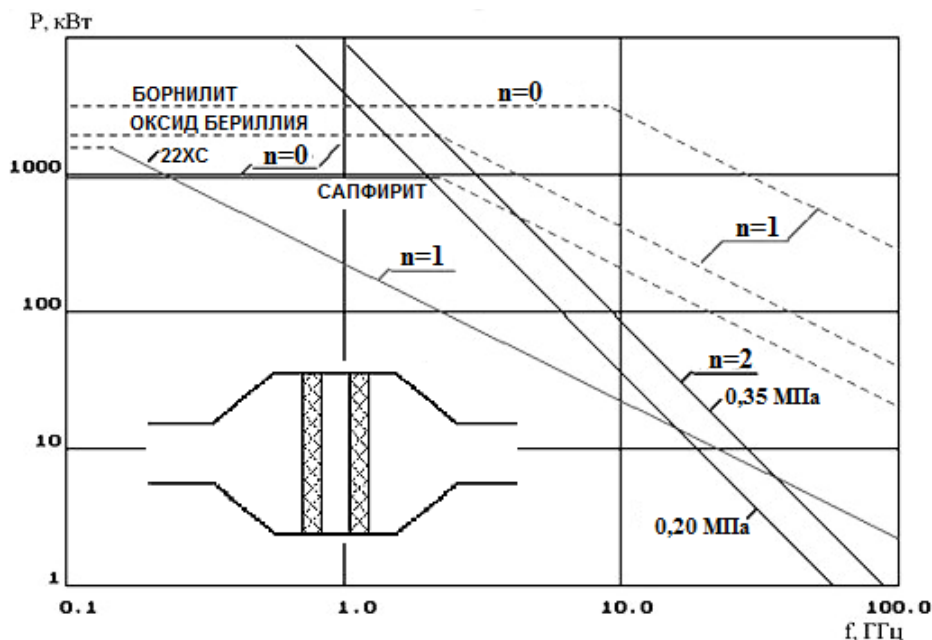


Рис. 2. Зависимости пороговых уровней мощности разрушающих явлений от частоты для самосогласованного («двойного») окна. Границы пробоя, а также граница ТМР (для керамики 22ХС) проведены на основании экспериментальных данных, полученных в работе [4].

и/или образовании СВЧ-дуги;

- как следует из сравнения формул (1), (2), (3), увеличение площади S диэлектрической перегородки в сверхразмерных окнах сверхмощных МЦР-приборов миллиметрового диапазона для волн, способно предотвратить саму возможность появления пробоев и вторично-электронного разряда. В этих обстоятельствах рекордная величина коэффициента

качества этого материала, обусловленная исключительно высокой теплопроводностью и низким тангенсом угла потерь, играет решающую роль в повышении пропускной способности, связанной с термомеханическим разрушением, и позволяет считать CVD-алмаз оптимальным для применения именно в таких приборах;

- по сочетанию свойств лучшим материалом для применения в одномодовых и баночных выводах энергии мощных ЭВП СВЧ коротковолновой части дециметрового, а также сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн является пиролитический нитрид бора – материал, наиболее устойчивый ко всем основным видам разрушений, с которыми приходится сталкиваться в процессе разработки волноводных окон.

Библиографический список

1. Matsumoto H. Development of a High-Power RF-Window in S-Band/ H Matsumoto// International Accelerator School in Japan. – 1996. P. 1-22.
2. Prokofiev V.V. Pillbox-Type Windows Transmitting Power in the TM_{01} -Mode of the Circular Waveguide / V.V. Prokofiev // Third Int. Vacuum Electronics Conf. IVEC2002. Monterey, CA, USA. – April 23-25, 2002. – P. 224,225.
3. Прокофьев Б.В. Численное моделирование тангенциального вторично-электронного СВЧ разряда / Б.В. Прокофьев // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып.11(323). – С. 29-34.
4. Приезжев Г.М. Испытания выводов энергии самосогласованного типа в кольцевом резонаторе с бегущей волной/ Г.М. Приезжев, В.П. Сазонов//Электронная техника. Сер.1. Электроника. – Вып. 12. – 1967. – С. 43-52.