

Паршин В.В.¹, Серов Е.А.¹, Ершова П.В.²

¹Институт прикладной физики РАН

²ОАО «Завод Магнетон»

Исследование диэлектрических свойств современных керамических материалов в миллиметровом диапазоне

Представлены результаты исследования диэлектрических свойств керамических материалов марок МСТ-7.3, МСТ-10, ТК-20, ТК-40, ЛК-2.5, ЛК-3, СТ-3, СТ-4, СТ-10, ВК-100М в диапазоне частот от 50 ГГц до 200 ГГц, а также на частотах 6 и 9.4 ГГц. Исследования в ММ диапазоне выполнены с помощью резонаторного спектрометра на базе высокочастотного (добротность $\sim 10^6$) резонатора Фабри-Перо. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что ряд материалов, с малым поглощением, пригодны для использования в ММ и, частично, в СубММ диапазонах для различных конструкций, взаимодействующих с электромагнитной волной.

Ключевые слова: миллиметровые волны, керамические материалы, диэлектрические потери, резонатор Фабри-Перо, прецизионные измерения.

Введение

Развитие технологий производства материалов с заданными характеристиками тесно сопряжено с исследованиями их фундаментальных характеристик и свойств. В связи с этим, для расширения круга известных свойств, выпускаемых ОАО «Завод Магнетон» материалов и определения новых перспективных применений проведена работа по исследованию диэлектрических свойств керамических материалов марок МСТ-7.3, МСТ-10, ТК-20, ТК-40, ЛК-2.5, ЛК-3, СТ-3, СТ-4, СТ-10, ВК-100М в диапазоне частот от 50 ГГц до 200 ГГц, а также на частотах 6 и 9.4 ГГц. Основная цель работы – определение потенциально пригодных материалов для использования в ММ и (возможно) СубММ диапазонах длин волн.

Все вышеуказанные марки материалов освоены в серийном производстве и широко применяются для решения различных конструкторских задач в области СВЧ-техники. Особая актуальность работы вызвана применением ряда материалов в рамках программы по импортозамещению.

Керамические материалы марок МСТ-7,3 и МСТ-10 традиционно используются в качестве согласующей среды и конструктивных элементов СВЧ-техники. Материалы могут быть изготовлены в виде различных форм, в том числе и сложнопрофильных.

Термостабильная микроволновая керамика ряда ТК широко применяется для создания согласующих и конструкционных элементов, подложек интегральных схем, фильтров, диэлектрических резонаторов при повышенных требованиях к термостабильности диэлектрических характеристик.

СВЧ-керамика с супермалым значением диэлектрической проницаемости (от 1.5 до 3) обладает мелкоячеистой структурой, и характеризуются сочетанием малой плотности и закрытой пористости. Радиопрозрачность этих материалов обуславливается малыми значениями тангенса угла диэлектрических потерь, низким уровнем отражения радиоволн СВЧ-диапазона и близостью значений диэлектрической проницаемости материала к ϵ воздуха.

Материалы ряда СТ представляют собой СВЧ-диэлектрики на основе полимеров, наполненных двуокисью титана. В крупносерийном производстве материалы этого ряда являются основой для изготовления деталей сложной формы с высокой точностью методами литья под давлением.

Корундовая керамика ряда ВК представляет собой материал на основе оксида алюминия с различными модифицирующими добавками, традиционно применяющийся для изготовления подложек интегральных СВЧ схем, подложек высоковольтных стабилизаторов напряжения, подложек микрополосковых приборов, а также высоковольтных изоляторов и окон вывода энергии генераторов средней мощности.

Ниже приведены характеристики материалов, образцы которых являются объектами исследования в данной работе.

Таблица 1. Характеристики исследуемых СВЧ материалов

Марка	$\epsilon' \pm 5\%$	$\text{tg}\delta \times 10^4$	W, %	ρ , г/см ³
МСТ-7.3	7,3	≤ 3	$\leq 0,05$	3,18
МСТ-10	10	≤ 2	$\leq 0,05$	3,37
ВК-100М	9,9	$\leq 0,5$	$\leq 0,00$	3,98
ТК-20	20	≤ 4	$\leq 0,05$	3,78
ЛК-2.5	2,5	≤ 12	—	1,2
ЛК-3	3	≤ 15	—	1,5
СТ-3	3,0	≤ 9	$\leq 0,1$	1,15
СТ-4	4,0	≤ 9	$\leq 0,1$	1,35
СТ-10	10,0	≤ 20	$\leq 0,1$	2,00
ТК-40	40*	$\leq 4^*$	$\leq 0,05$	4,78

Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta$ — 9,4 ГГц; *Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta$ — 6,0 ГГц. W – влагосодержание.

Методика измерений

Измерения на низких частотах проведены с помощью объёмных резонаторов в ОАО «Завод Магнетон» [1].

Исследования диэлектрических свойств керамик в ММ диапазоне проведены с помощью резонаторного спектрометра на базе открытого высокодобротного резонатора Фабри-Перо (с добротностью $\sim 10^6$). В резонаторе, образованном двумя сферическими зеркалами, располагается измеряемый диэлектрик. Резонатор возбуждается генератором соответствующего диапазона – лампой обратной волны (ЛОВ). Частота ЛОВ стабилизируется и управляется системой фазовой автоподстройки.

Плоскопараллельный образец располагается вблизи центра резонатора перпендикулярно его оси. Для исключения из расчёта дифракционных потерь минимальный поперечный размер (диаметр) образца д.б. \sim в 2.4 раза большим, чем диаметр пучка в резонаторе в месте установки образца.

Перестраивая частоту генератора и изменяя длину резонатора, находится резонансная частота образца, т.е. условие при котором оптическая толщина образца кратна целому числу полуволн: $t \cdot n = m \cdot \lambda / 2$ или $t \cdot n = m \cdot c / 2f$,

где t – толщина диэлектрика, m – количество полуволн в диэлектрике, $n = \sqrt{\epsilon'}$ – показатель преломления (при $\mu=1$), c – скорость света в вакууме, f – частота возбуждающего резонатор генератора. На резонансной частоте отсутствуют отражения от поверхностей образца.

Единственными измеряемыми величинами для определения показателя преломления и тангенса угла диэлектрических потерь образца являются частоты и ширины резонансов резонатора Фабри-Перо. Эти величины могут быть определены с очень высокой точностью (характерная статистическая погрешность составляет ~ 20 Гц для резонансной кривой шириной ~ 200 кГц). Благодаря этому показатель преломления n для однородных плоскопараллельных образцов определяется с погрешностью не хуже 10^{-3} , а $\text{tg}\delta$ – с погрешностью не хуже 10%. Более подробное описание методики измерений представлено в работах [2-4], экспериментальная установка и её технические характеристики представлены в работах [5-6].

Результаты исследований

Ниже приведены полученные в эксперименте зависимости $\text{tg}\delta$ от частоты различных образцов керамики. Для большинства образцов (кроме пенокерамик ЛК-2.5 и ЛК-3, для которых резкая зависимость потерь от частоты вызвана рассеянием) эта зависимость близка к линейной. Показатель преломления большинства образцов не зависит от частоты в исследуемом диапазоне, либо имеет слабую линейную зависимость.

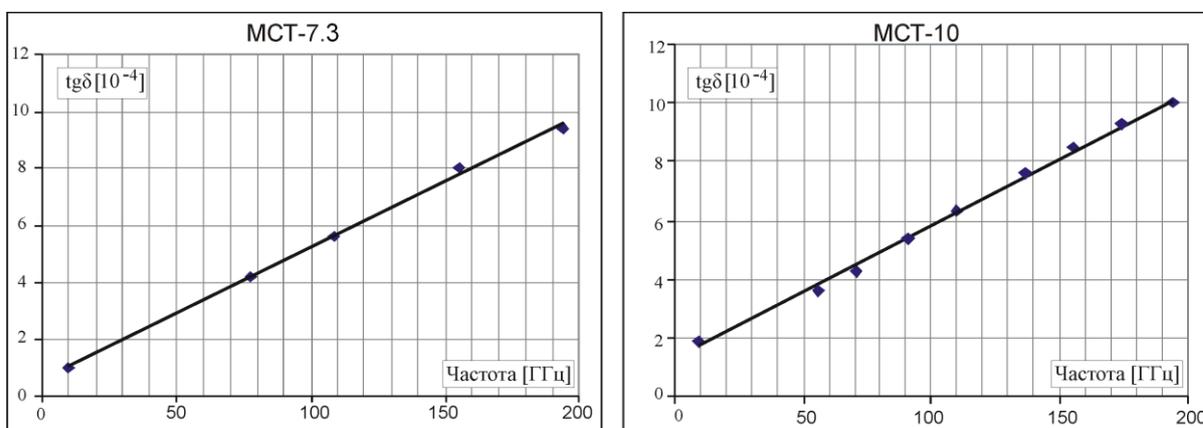


Рис. 1. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты керамических материалов МСТ-7.3 и МСТ-10. Зависимость близка к линейной, включая результаты измерений на СВЧ. В пределах ошибки измерения не выявлена анизотропия показателя преломления. Для МСТ-7.25: $n(80-200 \text{ ГГц}) = 2.658 \pm 0.001$, $n(9.4 \text{ ГГц}) = 2.72$. Для МСТ-10: $n(55-200 \text{ ГГц}) = 3.1855 \pm 0.001$, $n(9.4 \text{ ГГц}) = 3.225$.

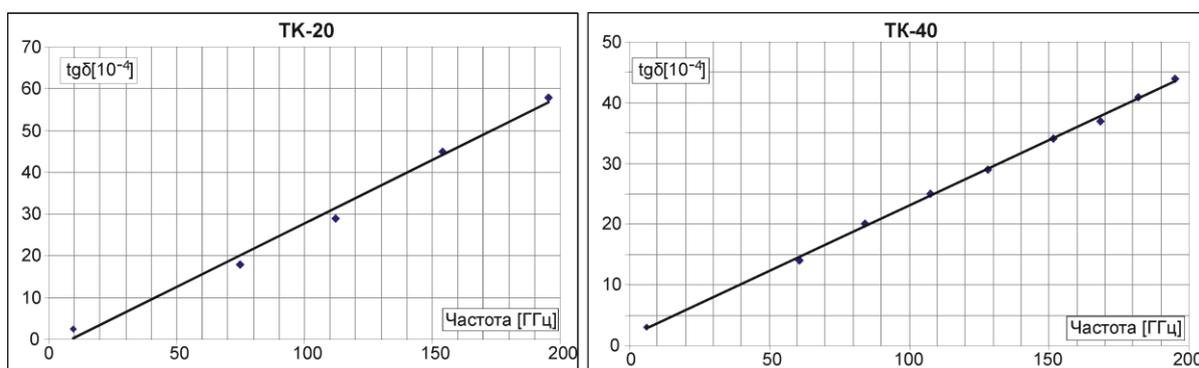


Рис. 2. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты керамических материалов ТК-20 и ТК-40. Зависимость близка к линейной, включая результаты измерений на СВЧ. В пределах ошибки измерения не выявлена анизотропия показателя преломления. Для ТК-20: показатель преломления возрастает практически линейно от $n(9.4 \text{ ГГц}) = 4.404$ до $n(200 \text{ ГГц}) = 4.416$. Для ТК-40: $n(60-200 \text{ ГГц}) = 6.255 \pm 0.001$, $n(6 \text{ ГГц}) = 6.316$.

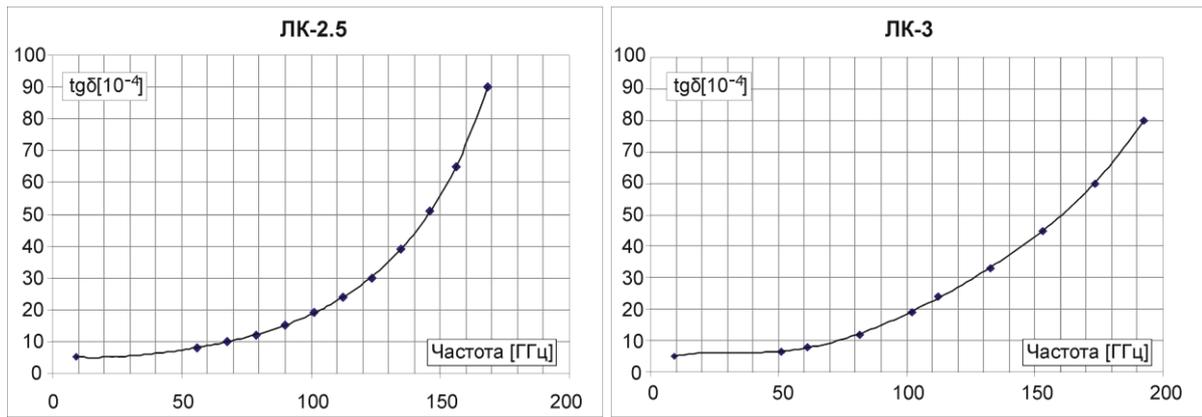


Рис. 3. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты пенно-керамик ЛК-2.5 и ЛК-3. Аппроксимация – полиномы 6-й степени. В пределах ошибки измерения не выявлена анизотропия показателя преломления. Для ЛК-2.5: показатель преломления возрастает практически линейно от n (9.4 ГГц) = 1.58 до n (170 ГГц) = 1.61. Для ЛК-3: величина показателя преломления меняется практически линейно от n (9.4 ГГц) = 1.73 до n (192 ГГц) = 1.77.

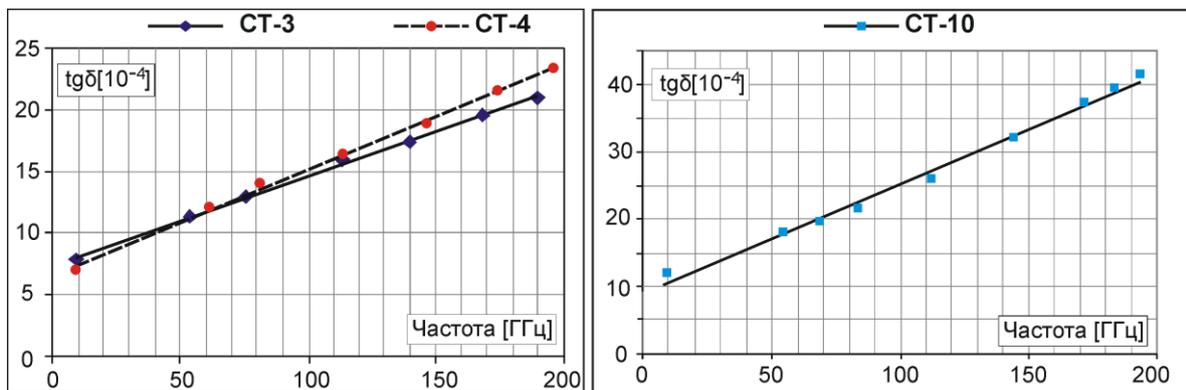


Рис. 4. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты керамических материалов СТ-3, СТ-4 и СТ-10.

Зависимости близки к линейным, включая результаты измерений на СВЧ.

СТ-3: выявлена анизотропия показателя преломления, во всём ММ диапазоне $n = 1.707 \pm 0.001$ и $n = 1.705 \pm 0.001$ для двух взаимно перпендикулярных поляризаций. $n(9.4 \text{ ГГц}) = 1.70 \pm 0.04$.

СТ-4: в пределах погрешности измерений не выявлено анизотропии показателя преломления, во всём ММ диапазоне $n = 1.995 \pm 0.001$, $n(9.4 \text{ ГГц}) = 2.00 \pm 0.05$.

СТ-10: выявлена заметная анизотропия в величине показателя преломления, во всём ММ диапазоне: $n = 3.194 \pm 0.001$ и $n = 3.184 \pm 0.001$ для двух взаимно перпендикулярных поляризаций, $n(9.4 \text{ ГГц}) = 3.162 \pm 0.08$.

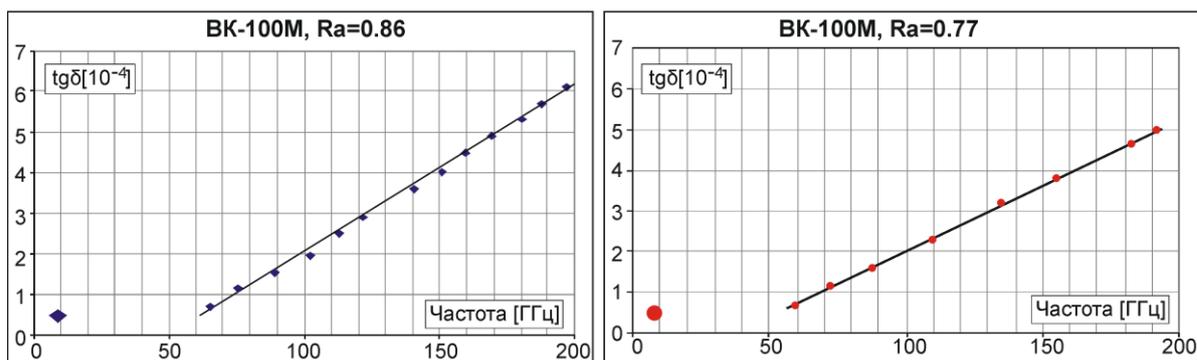


Рис. 5. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты двух образцов керамики BK-100M с разной шероховатостью Ra (мкм). Зависимость близка к линейной в ММ диапазоне, но не совпадает с измерениями на СВЧ. Несовпадения указывает, что на низких частотах другой механизм поглощения. Это подтверждается различием в величине показателя преломления. На 9.4 ГГц $n = 3.194$, в ММ диапазоне, в пределах ошибки измерений, $n=3.165$. Для обоих образцов выявлена небольшая анизотропия показателя преломления: отличие двух взаимно перпендикулярных поляризаций в пределах 0.001.

Заключение

В настоящее время ОАО "Завод Магнетон" (<http://www.magneton.ru>) освоил в серийном производстве 35 марок диэлектрических материалов, непрерывно перекрывающих диапазон значений ϵ от 1,5 до 120. Продолжаются работы по расширению этого ряда до значений $\epsilon \approx 140$, а также по повышению теплостойкости диэлектрических материалов на основе полимеров до температур 120-250 °С.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что ряд материалов с малым поглощением вполне пригоден для использования в ММ и частично в СубММ диапазонах для различных конструкций, взаимодействующих с электромагнитной волной.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-52-53140.

Библиографический список

1. Фирсенков А.И., Канивец А.Ю., Касаткина Т.С., Ершова О.М., Иванова Л.П., Ершова П.В. Микроволновые диэлектрические материалы производства ОАО «Завод Магнетон», Электроника и микроэлектроника СВЧ. Всероссийская конференция. Сборник статей IV Всероссийской конференции. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2015. – Т. 2. – С. 55-59.
2. Дрягин Ю.А., Паршин В.В. "Способ определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь". Авторское свидетельство N 1539681. Бюл. N 40 Гос. Ком. по делам изобр. и открытий. 30.01.1990.
3. Dryagin Yu.A., Parshin V.V. A method to measure dielectric parameters in 5±0,5 mm wavelength band, International Journal of Infrared and Millimeter Waves. V. 13, No.7 (1992), pp.1023-1032.
4. Власов С.Н., Копосова Е.В., Мазур А.Б., Паршин В.В. Об измерении диэлектрической проницаемости резонансным методом, Известия Вузов. Радиофизика, т. 39, № 5 (1996), с. 615-623.
5. Паршин В.В., Третьяков М.Ю., Кошелев М.А., Серов Е.А., Аппаратурный комплекс и результаты прецизионных исследований распространения ММ и СубММ волн в конденсированных средах и атмосфере, Известия ВУЗов. Радиофизика. Т. 52, № 8 (2009), с. 583-594.
6. Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Serov E.A., Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths. IEEE Sensors Journal, V. 13, No 1 (2013), p. 18-23.