

КЕРАМИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ТЕХНИКИ

Акимов А.И.

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси,
220072, Минск, ул. П. Бровки, 17; e-mail: akimov@ifftp.bas-net.by

Интенсивное развитие в последнее время телекоммуникационной техники, радиолокационных систем с фазированными антенными и малогабаритных спутниковых навигационных систем вызвало интенсивное развитие исследований по получению новых диэлектрических материалов. В настоящем докладе анализируется состояние дел в исследовании и разработке новых керамических материалов для СВЧ-техники. Уникальные свойства миниатюрных диэлектрических резонаторов (ДР) (малые габариты и масса, высокая добротность, устойчивость к различным дестабилизирующим воздействиям, надежность и долговечность) вызывают большой интерес разработчиков радиоэлектронной аппаратуры и изделий электронной техники к применению их в пассивных и активных высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) - устройствах различного назначения. ДР все шире начинают применяться для построения полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров, фильтров разделения частотных каналов (мультиплексеров), линий задержки, концентраторов поля, антенных элементов, активных фильтров, высокостабильных полупроводниковых СВЧ-генераторов как с механической, так и электрической перестройкой частоты. Применение диэлектрических резонаторов в таких устройствах обеспечивает существенное снижение габаритов и массы, стоимости, повышение надежности и стабильности и, самое главное, расширение возможностей комплексной миниатюризации и функциональной нагрузки ВЧ и СВЧ-аппаратуры. ВЧ и СВЧ-фильтры на ДР имеют полосу пропускания (или заграждения) менее 15%, что определяется достаточно высокой добротностью ДР и сложностью получения больших (более 50) коэффициентов связи резонаторов с линиями передачи. В большинстве конструкций фильтров используются ДР цилиндрической или прямоугольной формы, возбужденные на низшем Н-типе колебаний, для которых связь с различными типами линий передачи ВЧ и СВЧ осуществляется простыми способами. Для металлизации ДР и создания конденсаторов связи, как правило используется серебро, которое наносится вжиганием при высокой температуре.

СВЧ-область электромагнитного спектра занимает интервал от 300 МГц до 30 ГГц. “Длинноволновые” военные радары работают в районе 450 МГц, интервал 470-870 МГц занимают УНФ телевизионные каналы, в районе 900 МГц работают сотовые мобильные телефоны, район выше 1 ГГц используется спутниковыми навигационными системами (GPS, ГЛОНАС), область в районе 2 ГГц предназначена для космических телеметрических систем, а свыше 2 ГГц для тропосферной связи, радары используемые для управления движением самолетов работают в области выше 3 ГГц, различные релейные системы работают в области около 4 ГГц, коммуникационные спутниковые системы занимают область 4-7 ГГц, контроль за воздушным пространством осуществляется в интервале частот около 10 ГГц, полицейские радары работают на частотах 24 ГГц и 10,25 ГГц, область в интервале 20-30 ГГц предназначена для будущих спутниковых коммуникационных систем, область 30-300 ГГц характеризуется повышенным поглощением атмосферой.

Основными параметрами, определяющими свойства керамических материалов для диэлектрических резонаторов являются: относительная диэлектрическая проницаемость ϵ , тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ (добротность $Q=1/\text{tg}\delta$), температурные коэффициенты диэлектрической проницаемости $\text{ТК}\epsilon$, тангенса угла потерь $\text{ТК}\text{tg}\delta$ и

линейного расширения ТКЛР. Так как диэлектрические резонаторы предназначены для практического применения в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн, то для построения ДР используются керамические материалы с диэлектрической проницаемостью от нескольких единиц до нескольких сотен. Выбор материала с тем или иным значением ϵ зависит от диапазона рабочих частот и вида ДР. Частотозадающий размер ДР пропорционален $(1/\epsilon)^{1/2}$ и тем самым использование материала с более высоким значением ϵ приводит к уменьшению размеров и массы устройств. Параметр $\text{tg}\delta$ (у современных материалов лежит в интервале $(10^{-3} \dots 10^{-8})$) в основном определяет добротность собственных и вынужденных колебаний в ДР и тем самым избирательность резонансных систем, чем выше добротность ДР, тем лучше избирательная способность фильтрующих систем, что приводит к увеличению числа рабочих каналов без расширения используемого интервала электромагнитного спектра. Значение коэффициента температурной стабильности резонансной частоты ДР должно быть вблизи нуля $(\text{TK}_f=0 \pm 4)^{-6}$ град $^{-1}$. Как известно в соответствии с формулой Клаузиуса-Масотти:

$$\epsilon = 3V_m + 8\pi A / V_m - 4\pi A; \text{ где } A - \text{ молярная поляризуемость, } V_m - \text{ молярный объем}$$

Таким образом, материал с более высоким значением ϵ должен иметь большее значение молярной поляризуемости при меньшем молярном объеме. Температурный коэффициент $\text{TK}_f = -\text{TK}_\epsilon / 2 - \alpha$; где $-\text{TK}_\epsilon$ - температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости; α - температурный коэффициент линейного термического расширения (КЛТР). То есть материал с нулевым значением TK_f должен иметь отрицательное значение TK_ϵ и по модулю в два раза большее, чем значение α . Механизм частотной зависимости $\text{tg}\delta$ керамических материалов пока не до конца понятен. Как правило малые значения $\text{tg}\delta$ в широком диапазоне температур и частот обеспечивается минимальным количеством дефектов структуры керамического диэлектрика.

Требования к керамическим материалам, используемым для создания малогабаритных керамических антенн имеют свои особенности. Наряду с требованием миниатюризации необходимо обеспечить требуемую эффективность антенны, которая является уменьшающейся функцией относительной диэлектрической проницаемости. Это вызвано пропорциональным значению относительной диэлектрической проницаемости ростом мощности отраженной электромагнитной волны от границы поверхности керамической антенны с воздухом. Показывается, что приемлемое значение эффективности антенны ($\eta > 0,7$) может быть получено только для керамических материалов с $\epsilon < 30$. Для широкой гаммы антенных устройств оптимальным является керамический материал со значением $18 < \epsilon < 24$ и $\text{tg}\delta < 2 \cdot 10^{-4}$. Сильное влияние на эффективность керамических антенн оказывает качество электродов. Снижение проводимости электрода на один порядок приводит к уменьшению эффективности η на 0,2. В качестве основы керамических материалов для диэлектрических резонаторов широко используются сложные оксидные материалы, как с выраженной поляризацией ионного смещения, так и с преобладающей электронной поляризацией и с сильным внутрикристаллическим полем, которые отличаются высокой диэлектрической проницаемостью и ее отрицательным температурным коэффициентом. Такие материалы представляют собой собственные сегнетоэлектрики с точкой Кюри при очень низких температурах либо параэлектрики. Физическая природа поляризации параэлектриков приводит к тому, что направления поиска веществ с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости, обладающих линейной поляризацией, и сегнетоэлектриков кислородно-октаэдрического типа совпадают. Материалам с преимущественно ионно-деформационной поляризацией свойственны более низкие значения ϵ и положительный по знаку TK_ϵ . В таблице приведены примеры, используемых в СВЧ-диапазоне в настоящее время керамических диэлектриков.

Вид керамического материала	ϵ	$Q \times f$ (f в ГГц)	TK_f ($10^{-6}/^{\circ}C$)	Назначение материала
MgTiO₃ композиты	20	36000	± 10	антенны
Ba₂Ti₉O₂₀ и модификации	38	27000 45000	+10...-2	Фильтры на ДР, стабилизаторы частоты, подложки
Ba₂Ti₉O₂₀/ BaTi₄O₉ композиты	38	50000	+5...-5	Фильтры на ДР, стабилизаторы частоты, подложки
Ba₂Ti₉O₂₀/ BaTi₄O₉ композиты с соединениями Zn и Ta, Nb	34 - 37	50000	+4...-4	Фильтры на ДР
(Zr,Sn)(Ti,Sn)O₄	36 - 38	45000	+5...-5	Фильтры на ДР, стабилизаторы частоты, подложки
(La,Ca)(Mg,Ti)O₃	50	40000	+10...-9	Фильтры на ДР, радары с фазированными антенными решетками
Ba, Ln – титанаты и композиты Ln=Sm Ln=Nd	80 90	12500 7000	+10...-9	Фильтры на ДР, подложки
Ba₃Ta₂MeO₉ Me=Zn Me=Mg	30 20	100000 150000÷ 200000	+4...-4	стабилизаторы частоты
Ba(Sn,Mg,Ta)O₃	25	200000	+2...-2	стабилизаторы частоты
AgNb_{1-x}Ta_xO₃ (0.46<x<0,54)	360...410	2000	+15...-15	Фильтры на ДР для интервала (300...1000)МГц

Актуальными направлениями для дальнейших исследований керамических материалов для СВЧ-техники могут являться: установление связи между химическим составом, кристаллической структурой, микроструктурой, дефектностью кристаллической решетки, свойствами межзеренных границ и диэлектрическими свойствами (ϵ , TK_f и Q); построение фазовых диаграм перспективных керамических систем; разработка керамик с $\epsilon > 150$; $TK_f \approx 0$ и $Q > 4000$; выяснение природы роста $tg\delta$ с увеличением частоты разработка методик измерения диэлектрических свойств в широком интервале частот и температур.

1. Б.А.Ротенберг и др., Электронная техника сер. Радиодетали и радиокомпоненты, вып.2(67), 1987, с.3-9.
2. Б.М. Тареев, Физика диэлектрических материалов, М. Энергоиздат, 1991
3. S. Jerry Fiedziuszko et all, IEEE TRANSACTIONS on microwave theory and techniques, vol.50, №3, 2002, s.706-720
4. A.J. Moulson and J.M. Herbert, Electroceramics – Materials, Properties, Applications, Chapman and Hall, London, 1990.
5. D.Kaifez and P.Guillon, Dielectric Resonators, Artech House, Norwood. MA., USA (1986).
6. Mattjaz Volant and Danilo Suvorov, J.Am.Ceram.Soc., 82(1), s. 81-87 (1999).