

**А.И. Фирсенков, А.Ю. Канивец, Т.С. Касаткина, О.М. Ершова,
Л.П. Иванова, П.В. Ершова**
ОАО «Завод Магнетон»

Микроволновые диэлектрические материалы производства ОАО «Завод Магнетон»

За последние 10 лет в ОАО «Завод Магнетон» освоено в серийном производстве пять типов диэлектрических материалов для СВЧ техники. Эти материалы представлены 35-ю марками, непрерывно перекрывающими диапазон значений ϵ от 1,5 до 80, и характеризуются малыми диэлектрическими потерями на СВЧ.

Ключевые слова: микроволновые диэлектрические материалы, СВЧ керамика, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери

Создание новых материалов всегда являлась ключевой задачей для достижения научно-технического прогресса и предопределяла возможности развития отраслей, связанных со средствами связи и телекоммуникациями, навигацией и радиолокационными системами, микроэлектроникой, радиоэлектроникой и вычислительной техникой. Материалы, удовлетворяющие требуемым конструктивным параметрам – первый шаг в совершенствовании конструкторских и инженерных решений для создания приборов и элементов современной техники.

Именно поэтому изготовление материалов с заданными характеристиками, а также развитие технологий, способствующих их производству, занимают важнейшую позицию в политике развития предприятия ОАО «Завод Магнетон», ориентированного на отрасль производства СВЧ техники.

История предприятия всегда была тесно связана с производством материалов, отвечающих нуждам своего времени. В 1901 г. было образовано товарищество «Электрическая Энергия», занимающееся выпуском гальванических элементов до 40-х гг. XX века. В 50-х гг. завод начал изготавливать сердечники из карбонильного железа, малогабаритные электролитические конденсаторы типа ЭМ, резисторы, а также танталовые электролитические конденсаторы типа ЭТО, а с начала 60-х годов первым в стране перешел на производство ферритов и изделий на их основе. С середины 70-х "Завод Магнетон" вошел в состав головного в стране НПО "Феррит" и стал базовым предприятием, на котором осваивалось производство практически всех марок ферритов, включая такие уникальные, как монокристаллические ферриты-гранаты, монокристаллические марганец-цинковые ферриты, поликристаллические феррогранаты с суперузкой линией ферромагнитного резонанса. В настоящее время ОАО "Завод "Магнетон" является основным серийным производителем ферритовых материалов для СВЧ техники в России.

В 2004 г. руководством предприятия было принято решение о начале серийного выпуска микроволновых диэлектрических материалов в связи с разработкой фазовращателя для фазированной антенной решетки восьмимиллиметрового диапазона РЛС ЗРПК «Панцирь С1» с целью изготовления высококачественных излучателей с заранее заданными параметрами в сочетании с применяемыми ферритами. В дальнейшем изделия из

микроволновой керамики стали широко применяться и в других выпускаемых СВЧ устройствах, а также для изготовления элементов и узлов электронной техники.

К настоящему времени на предприятии освоено серийное производство пяти групп диэлектрических микроволновых материалов [1]:

- 1 группа – СВЧ керамика с широким диапазоном значений диэлектрической проницаемости (ряд МСТ-МТС);
- 2 группа – термостабильная микроволновая керамика (ряд ТК);
- 3 группа – «легкая» керамика с супермалой ϵ (ряд ЛК);
- 4 группа – СВЧ диэлектрики на основе полимеров (ряд СТ);
- 5 группа – корундовая керамика (ряд ВК).

1. Группа СВЧ керамики ряда МСТ-МТС представлена 14 марками материалов с ϵ от 7,3 до 80. Изделия из этих материалов используются в качестве согласующей среды и конструктивных элементов для различных устройств СВЧ техники. Изготавливаются в виде различных форм (стержни, пластины, трубки) в широком диапазоне размеров.

Материалы созданы на основе систем силиката магния, титанатов кальция и магния. Характеризуются малыми потерями в СВЧ диапазоне. Обладают высокой механической прочностью, химической и термической стойкостью. Для механической обработки используют алмазный инструмент и ультразвук. Характеристики материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1 Характеристики материалов ряда МСТ-МТС

Марка	$\epsilon' \pm 5\%$	$\text{tg}\delta_\epsilon \times 10^4$	W, %	ρ , г/см ³ номинал
МСТ-7,3	7,3	≤ 3	$\leq 0,05$	3,18
МСТ-8	8	≤ 3	$\leq 0,05$	3,26
МСТ-10	10	≤ 2	$\leq 0,05$	3,37
МСТ-12	12	≤ 2	$\leq 0,05$	3,51
МСТ-15	15	≤ 2	$\leq 0,05$	3,68
МСТ-16	16	≤ 2	$\leq 0,05$	3,73
МТС-18	18	≤ 3	$\leq 0,05$	3,71
МТС-20	20	≤ 4	$\leq 0,05$	3,78
МТС-25	25	≤ 5	$\leq 0,05$	3,82
МТС-30	30	≤ 5	$\leq 0,05$	3,87
МТС-35	35*	$\leq 6^*$	$\leq 0,05$	3,94
МТС-40	40*	$\leq 6^*$	$\leq 0,05$	3,98
МТС-60	60*	$\leq 6^*$	$\leq 0,05$	4,22
МТС-80	80*	$\leq 6^*$	$\leq 0,05$	4,28

Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_\epsilon$ — 9,4 ГГц; *Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_\epsilon$ — 6,0 ГГц;

В дополнение к марке МСТ-7,3 разработана марка МСТ-7,25 с более узким интервалом значений диэлектрической проницаемости ϵ и меньшим водопоглощением в качестве возможной замены ситалла марки СТ-38-1. Характеристики марки МСТ-7,25 приведены в таблице 2.

Таблица 2 Сравнительные характеристики керамики МСТ-7,25 и ситалла СТ-38-1

Материал	ϵ'	$\text{tg}\delta_{\epsilon} \times 10^4$	W, %	ρ , г/см ³
Керамика марки МСТ-7,25	7,15-7,40	≤ 3	$\leq 0,02$	3,18
Ситалл марки СТ-38-1	7,15-7,40	≤ 3	—	2,9

Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ — 9,4 ГГц;

Основной кристаллической фазой керамики марок МСТ-7,25 и МСТ-7,3 является форстерит. Форстеритовая керамика обладает малыми диэлектрическими потерями, высоким значением удельного объемного сопротивления и хорошей механической прочностью, характеризуется повышенным коэффициентом линейного расширения, благодаря чему используется в электровакуумной технике как изолятор для согласованного спая с металлами. Материал также предназначен для использования в качестве элемента согласования СВЧ устройств, подложек микросхем СВЧ, электрических линий задержки, объемных резонаторов, конденсаторов.

На предприятии разработана технология горячего литья под давлением для изготовления из керамики марок МСТ-7,25 и МСТ-7,3 малогабаритных сложнопрофильных изделий без дополнительной механической обработки, а также изделий с внутренними отверстиями малых размеров ($d \approx 1$ мм) и жесткими допусками ($\pm 0,02$ мм).

2. Термостабильная микроволновая керамика ряда ТК – представляет собой комбинацию фаз с взаимокompенсирующим значением ТК ϵ в структуре керамического материала.

Применяется в технике СВЧ для создания согласующих и конструктивных элементов, подложек ГИС, фильтров, диэлектрических резонаторов при повышенных требованиях к термостабильности диэлектрических характеристик. Характеризуется высокой механической прочностью, химической и термической стойкостью.

Таблица 3 Характеристики термостабильных материалов ряда ТК

Марка	$\epsilon' \pm 5\%$	$\text{tg}\delta_{\epsilon} \times 10^4$	$\alpha_{\epsilon'} \times 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	W, %	ρ , г/см ³
ТК-20	20	≤ 6	0 \pm 20	$\leq 0,05$	3,78
ТК-40	40*	$\leq 6^*$	0 \pm 20	$\leq 0,05$	4,78

Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ — 9,4 ГГц

*Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ — 6,0 ГГц;

3. Легкая керамика ряда ЛК - СВЧ керамические материалы с супермалой (от 1,5 до 3) диэлектрической проницаемостью. Имеют мелкоячеистую структуру. 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.

Существенным преимуществом керамики ЛК, по сравнению с диэлектриками с малой ϵ на основе полимеров, является высокая теплостойкость: материал может выдерживать температуры до 500 °С.

Таблица 4 Характеристики материалов ряда ЛК

Марка	$\epsilon' \pm 8\%$	$\text{tg}\delta_{\epsilon} \times 10^4$	ρ , г/см ³ , номинал
ЛК-1,5	1,5	≤ 5	0,48
ЛК-2	2	≤ 8	0,8
ЛК-2,5	2,5	≤ 12	1,2
ЛК-3	3	≤ 15	1,5

Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ — 9,4 ГГц;

4. Материалы ряда СТ представляют собой СВЧ диэлектрики на основе полимеров, наполненных двуокисью титана. Применяются в интервале температур от -60°С до +90°С, допускают механическую обработку на металлообрабатывающем оборудовании, выдерживают воздействие кислот, щелочей, обладают высокой адгезией к металлам. Материалы этого ряда являются основой для изготовления деталей сложной формы с высокой точностью в крупносерийном производстве методами литья под давлением.

Таблица 5 Характеристики диэлектрических материалов группы СТ

Марка	$\epsilon' \pm 5\%$	$\text{tg}\delta_{\epsilon} \times 10^4$	W, %	ρ , г/см ³
СТ-3	3	≤ 9	$\leq 0,1$	1,15
СТ-4	4	≤ 9	$\leq 0,1$	1,35
СТ-5	5	≤ 12	$\leq 0,1$	1,51
СТ-7	7	≤ 15	$\leq 0,1$	1,76
СТ-8	8	≤ 17	$\leq 0,1$	1,86
СТ-10	10	≤ 20	$\leq 0,1$	2,00
СТ-11	11	≤ 20	$\leq 0,1$	2,15
СТ-12	12	≤ 20	$\leq 0,1$	2,21
СТ-14	14	≤ 25	$\leq 0,1$	2,36
СТ-16	16	≤ 30	$\leq 0,1$	2,48

Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ — 9,4 ГГц;

Недостатком материалов группы СТ является невысокая теплостойкость (порядка

90-100 °С). В связи этим на предприятии проводятся поисковые работы, направленные на улучшение этого параметра: разработана технология и изготовлены опытные образцы материала ФТ-5 – термостойкого диэлектрика с параметрами: $\epsilon = 5$, $\text{tg}\delta_{\epsilon}=5 \times 10^{-4}$, $T_{\text{раб}} = 250$ °С. Кроме того, на основе этого материала синтезированы образцы с непрерывным градиентом ϵ по объему материала, что представляет особый интерес при использовании изделий из таких материалов в качестве согласующей среды.

5. Корундовая керамика ряда ВК представляет собой материал на основе оксида алюминия с различными присадками, который применяется для изготовления подложек интегральных СВЧ схем, подложек высоковольтных стабилизаторов напряжения, подложек микрополосковых приборов. Характеристики материалов ряда ВК приведены в таблице 6.

Таблица 6 Характеристики корундовой керамики ряда ВК

Марка	ρ , г/см ³	W, %	ϵ'	$\text{tg}\delta_{\epsilon} \times 10^4$	Примечания
ВК-85	3,76	0,00	9,1	12-14	Аналог материала фирмы MURATA (Япония)
ВК-95	3,87	0,01	9,5	1,6-2,5	Аналог материала фирмы АТС (США)
ВК-96 М	3,76	0,00	9,2	1,9-4,0	
ВК-100 М	3,99	0,00	10,0	$\leq 0,5$	$U_{\text{пр}} \geq 50$ кВ (при постоянном токе)

Частота измерения ϵ' и $\text{tg}\delta_{\epsilon}$ — 9,4 ГГц;

В рамках программы по импортозамещению изделий американских и японских производителей (фирмы АТС и MURATA) разработаны составы и технология изготовления малогабаритных сложнопрофильных изделий методом горячего литья под низким давлением (2 атм). По этой технологии из керамики марок ВК-85 и ВК-95 изготовлены и поставлены заказчику керамические каркасы для микроиндуктивностей в чип-исполнении размерами 1,9×1,45×1,3 мм (марка ВК-95) и 3,2×1,6×1,7 мм (марка ВК-85). Изготовленные на базе указанных каркасов микроиндуктивности сохраняют заданные электромагнитные характеристики в диапазоне частот от 1 МГц до 1,5 ГГц и 2,0 ГГц соответственно.

Таким образом, на предприятии освоено в серийном производстве 35 марок диэлектрических материалов, непрерывно перекрывающих диапазон значений ϵ от 1,5 до 80. Продолжаются работы по расширению этого ряда до значений $\epsilon=100-140$, а также по повышению термостойкости диэлектрических материалов на основе полимеров до температур 120-250 °С.

Библиографический список

1. Сверхвысокочастотные магнитные и диэлектрические материалы [Электронный ресурс]: СВЧ ферриты и диэлектрики Режим доступа: www.magneton.ru