

# ОБЪЕМНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ – ОСНОВНЫЕ ТИПЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРОИЗВОДИТЕЛИ

## ЧАСТЬ 1

В.Геворкян, к.т.н.<sup>1</sup>, В.Кочемасов, к.т.н.<sup>2</sup>

УДК 621.389  
ВАК 05.27.00

Объемные диэлектрические резонаторы и резонансные звенья на их основе широко используются в СВЧ-устройствах. Разнообразные диэлектрические резонаторы различаются размерами, диапазонами рабочих частот, диэлектрической проницаемостью, добротностью и другими параметрами. Об основных типах объемных диэлектрических резонаторов, их характеристиках и производителях рассказывается в данной статье.

Объемные резонаторы (ОР) с применением диэлектрических включений или на основе диэлектрических материалов исторически именуют керамическими или диэлектрическими (последние могут быть образованы и монокристаллическими диэлектриками), часто в сочетании с уточняющими определениями.

Сегодня термин "керамические резонаторы" принято использовать для ОР на основе отрезков коаксиальных линий (коаксиальных резонаторов) с диэлектрическим заполнением. "Диэлектрическими резонаторами" (ДР) с 1960 года [1] называют объемные резонаторы из диэлектрических тел (первоначально – из монокристаллов рутила) без проводящего покрытия. Граничные условия на поверхностях ДР определяются явлением полного внутреннего отражения, поэтому такие резонаторы называют открытыми диэлектрическими.

ОР характеризуются набором параметров, таких как:

- резонансная частота собственных колебаний  $f_p$ , Гц;

- собственная (ненагруженная) добротность  $Q$ , определяемая тепловыми потерями в резонаторе;
- температурный коэффициент частоты (ТКЧ),  $1/^\circ\text{C}$  (показывает зависимость резонансной частоты от температуры).

Резонансные частоты ОР определяются их размерами, которые примерно кратны половине длины волны в диэлектрике (обратно пропорциональной корню квадратному из его относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$ ).

Собственная добротность ОР зависит от конструктивного решения.  $Q$  ДР достигает значений от примерно 25 000 на частотах порядка 1 ГГц до 5 000–8 000 в сантиметровом диапазоне длин волн. Это много выше, чем  $Q$  керамических резонаторов (на всех частотах диапазона применения не более ~1000), что определяется структурой электромагнитных полей в них.

Диэлектрические и керамические резонаторы характеризуются регулируемым спектром значений ТКЧ около нуля, что достигается применением принципа термокомпенсации температурных изменений линейных размеров ОР температурным изменением его относительной диэлектрической проницаемости (ТК  $\epsilon_r$ ).

Перейдем к анализу различных видов ОР и резонансных звеньев (РЗ) на их основе. Рассмотрим свойства

1 Профессор кафедры электрофизики информационных систем НИУ "МЭИ", gvm@emc.mpei.ac.ru.

2 Генеральный директор ООО "Радиокомп", vkochemasov@radiocomp.ru.



**Рис.1.** Типичный вид КРП на примере продукции компании MCV Microwave

ОР на примере выборочных (лучших) изделий разных компаний, а в заключительной части перечислим других производителей аналогичной элементной базы.

### КОНСТРУКЦИИ ОР И РЕЗОНАНСНЫХ ЗВЕНЬЕВ НА ИХ ОСНОВЕ

Можно выделить три основных вида объемных резонаторов:

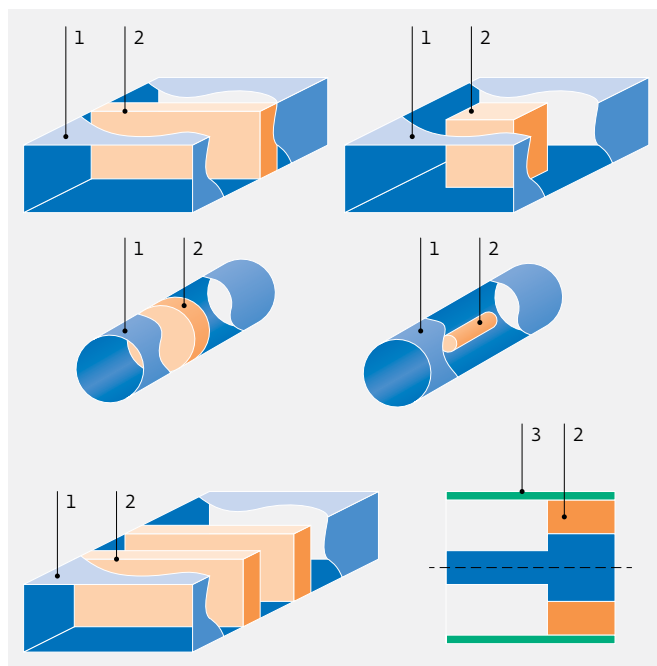
- коаксиальные резонаторы (КР), образованные короткозамкнутым на одном конце близким к четвертьволновому отрезком коаксиальной линии с диэлектрическим заполнением (рис.1) [2]. В зависимости от формы поперечного сечения оболочки, их в отечественной практике принято обозначать КРД (Д – диск при круглом сечении) или КРП (П – прямоугольное поперечное сечение) [3]. Такие КР образуют РЗ;
- открытые диэлектрические резонаторы, образованные диэлектрическими телами в виде дисков (рис.2) [2], называются ДРД. Реже (из-за близости высших видов колебаний) применяют ДР в форме цилиндров – ДРЦ. ДР из прямоугольных образцов сегодня практически не используются, поскольку уступают в технологичности и добротности;
- волноводно-диэлектрические резонаторы (ВДР) (рис.3) [4], образованные диэлектрическими включениями, как правило, прямоугольной формы в волноводных линиях передачи (полые волноводы прямоугольного сечения) или цилиндрическими диэлектрическими вставками в коаксиальные отрезки линий. Граничные условия на части поверхностей диэлектрического образца ВДР соответствуют металлическим стенкам (эти грани образца совмещены с плоскостью стенки волновода), а на других поверхностях



**Рис.2.** Типичный вид ДРД на примере продукции компании MCV Microwave

выполняются условия отражения от границ раздела диэлектрик/воздух.

В пределах каждого из указанных видов ОР можно выделить подвиды, которые различаются специфическими особенностями технических решений. Перейдем к анализу характеристик отмеченных видов устройств.



**Рис.3.** Возможные конструкции ВДР на волноводах с распространяющейся волной (1 – волновод; 2 – диэлектрический вкладыш; 3 – отрезок коаксиальной линии передачи)

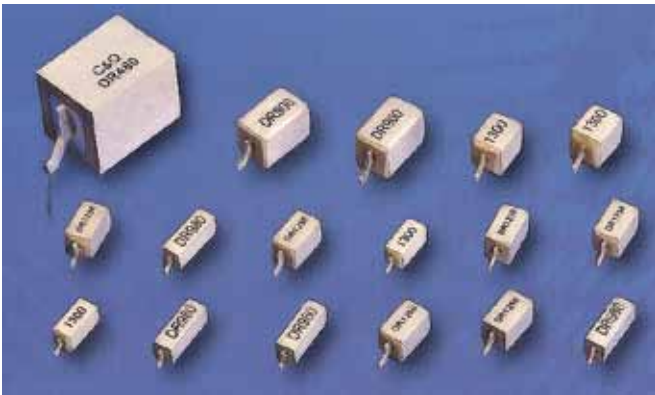


Рис.4. Варианты КРП с металлическим выводом центральной жилы компании C&Q

### КОАКСИАЛЬНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Обычно КР изготавливают на базе КРД или КРП в виде диэлектрических цилиндрических образцов, имеющих центральное отверстие с металлизированными поверхностями. В иностранной литературе эти ОР часто называют диэлектрическими резонаторами с ТЕМ (Transverse electric and magnetic mode – поперечная электромагнитная мода). При этом иностранные производители предлагают КРП как со встроенным металлическим выводом центральной жилы (рис.4) [5], так и без такового (см. рис.1).

КР образуют РЗ с относительной диэлектрической проницаемостью от 20 до 100 и возможными значениями температурных коэффициентов относительной диэлектрической проницаемости от  $-10^{-5}$  до  $10^{-5}$ /°С. Их эффективная собственная добротность не выше 1500. Типичные конструктивные соотношения параметров четвертьволновых КРП примерно одинаковы у изделий различных производителей. Проиллюстрируем на примере продукции компании MCV Microwave (рис.5, табл. 1). КР с такими параметрами позволяют формировать РЗ селективных устройств (с приемлемым для коммерческого применения уровнем вносимых потерь (единицы дБ) в полосе пропускания), предназначенных для использования в трактах со средней мощностью до ~5 Вт.

Фильтры на основе КР широко применяются в изделиях массового производства (например, в устройствах

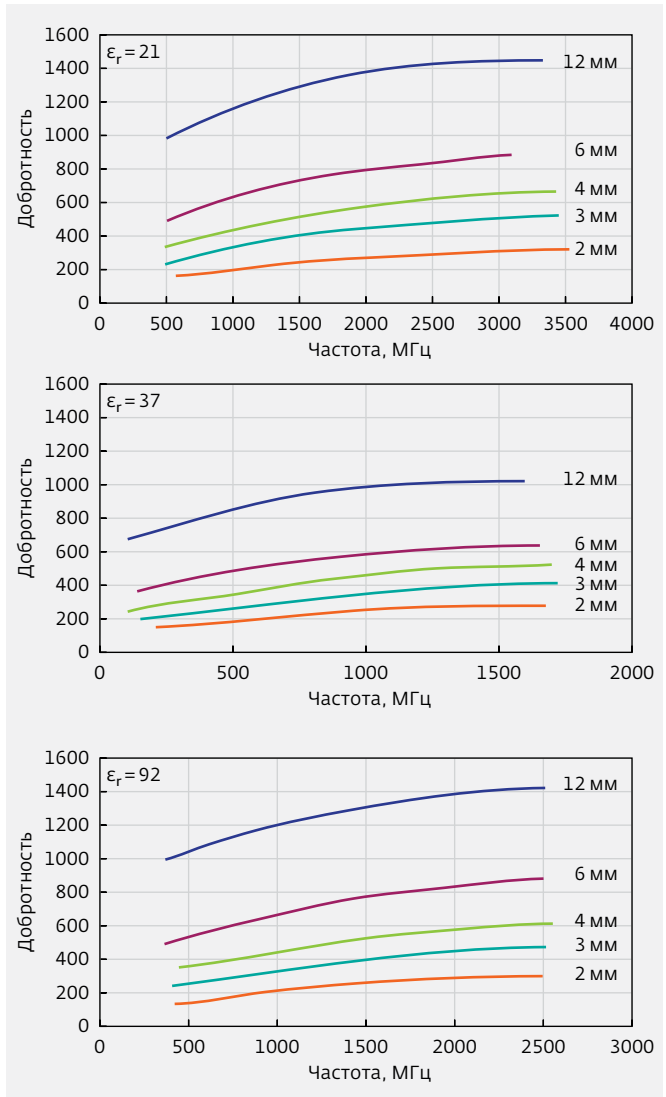


Рис.5. Частотные зависимости собственной добротности КР (см. табл.1) из керамики с относительной проницаемостью  $\epsilon_r$

мобильной связи). Традиционно фильтрам на КР соответствует диапазон частот от 300 МГц до 5 ГГц, однако принципиальных ограничений для их применения в более высокой области частот нет. Тем не менее, на более высоких частотах (при меньших геометрических

Таблица 1. Соотношения длин образцов (мм) и частот (МГц) КРП из диэлектриков с разными  $\epsilon_r$  производства компании MCV Microwave

Длина КРП	2	3	4	6	12
$\epsilon_r = 21$	2 000–4 000	1 500–4 000	1 000–4 000	600–2 500	600–1 250
$\epsilon_r = 37$	1 500–3 000	1 500–3 000	800–3 000	500–2 000	450–1 000
$\epsilon_r = 90$	900–2 000	650–2 000	450–2 000	450–1 000	300–650

размерах) предъявляются более жесткие требования к качеству обеспечения требуемой формы КР и технологии металлизации их поверхностей.

К конструктивным недостаткам фильтров на КР относится плохая повторяемость характеристик, что требует подстройки частот каждого экземпляра. Однако это относительно простой процесс, который доступен персоналу низкой квалификации и применяется большинством производителей крупных серий такой продукции, например, фирмой Murata [6]. Более существенным недостатком фильтров на КР считается сравнительно низкая температурная стабильность, соизмеримая с температурной нестабильностью относительной диэлектрической проницаемости материала. Однако эта проблема имеет решение, которое применяется на этапе проектирования фильтра и основано на эффекте взаимной температурной компенсации изменений линейных размеров диэлектрических образцов и их относительной диэлектрической проницаемости. Для этих целей ведущие производители керамических материалов предлагают широкий спектр возможных значений температурных коэффициентов относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  выпускаемой продукции.

Рыночно-ориентированное производство КРП обеспечивается на базе ограниченного количества фирм как в России, так и за рубежом, что связано с оптимизацией соотношения цена/качество, приемлемого на уровне массового (или как минимум крупносерийного) производства.

В завершение анализа свойств КР приведем типоразмеры устройств ряда фирм-производителей. Наиболее широкий спектр изделий керамики и КР зарубежного производства предлагает фирма MCV Microwave (табл.2). В модельном ряду компании Korea First Microwave также представлены КРП ряда типоразмеров и относительных диэлектрических проницаемостей (табл.3) [7]. Достаточно ограниченный спектр значений как по диапазону относительной диэлектрической проницаемости (не более 12), так и по частотному

Таблица 2. Типоразмеры (мм) моделей КР компании MCV Microwave

Модель	Внешний размер поперечного сечения	Внутренний диаметр	Длина
D150	1,50	0,62	11
D175	1,75	0,68	11
D200	2,00	0,83	10
D210	2,10	0,83	6.5
D230	2,30	0,83	8
D250	2,50	0,90	11
D260	2,60	0,83	10
D265	2,65	0,90	13
D280	2,80	0,89	11
D285	2,85	1,03	11
D291	2,91	0,89	13
D300	3,00	0,98	14
D305	3,05	0,78	14
D333	3,30	0,83	10
D340	3,40	1,16	15
D350	3,50	1,17	15
D400	4,0	1,20	20
D500	5,00	1,48	26
D600	6,00	2,22	33
D600	6,00	2,35	33
D670	6×7	2,35	33
D700	7,00	2,35	15
D800	8,00	2,59	40
D1000	10,00	2,85	45
D1200	12,00	3,50	45
D1700	18,00	5,25	45

Таблица 3. Типоразмеры моделей КРП компании Korea First Microwave

Размеры поперечного сечения, мм		Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_r$					
		89		38		21	
Внешние	Внутренний диаметр	Максимальная длина, мм	Минимальная частота, МГц	Максимальная длина, мм	Минимальная частота, МГц	Максимальная длина, мм	Минимальная частота, МГц
2×2	0,8	6,52	1 200	6,94	1 800	6,82	2 400
3×3	1,2	11,85	660	12,5	1 000	11,69	1 400
4×4	0,97	14,75	530	14,88	840	13,64	1 200
	1,5	11,85	660	12,5	1 000	11,69	1 400
6×6	2,0	13,03	600	13,02	960	12,59	1 300
	2,4	15,96	490	15,82	790	16,37	1 000
8×8	2,68	22,34	350	22,73	550	21,82	750

спектру, охватывающему в основном коммерческий диапазон сотовой связи, имеют КРП упоминавшейся фирмы C&Q [5].

Продукция отечественных производителей представлена изделиями компании "Керамика" (С.-Петербург) [3], специализирующейся на разработке и поставке различных видов керамических комплектующих мирового уровня.

Наряду с одиночными КР, разработчики фильтров на РЗ из КР успешно применяют сборки из нескольких резонаторов, объединенных в одном диэлектрическом блоке. Такие технические решения получили название "моноблоки" [5]. Взаимная связь между РЗ в моноблоках образуется полями внутри диэлектрической среды

моноблока и через элементы металлизации на торцевой поверхности КР. Поэтому такие моноблоки, по существу, образуют законченные фильтры (рис.6а) с определенными характеристиками (рис.6б), которые требуют минимальных доработок.

Моноблоки выпускают те же фирмы, что и КР. Однако фильтры на основе моноблоков производители керамики и моноблоков изготавливают редко. Это прерогатива фирм, использующих моноблоки КР для комплектации своей продукции.

Другая продукция тех же производителей керамики – открытые диэлектрические резонаторы, которые отличаются от коаксиальных односвязной структурой граничных условий.

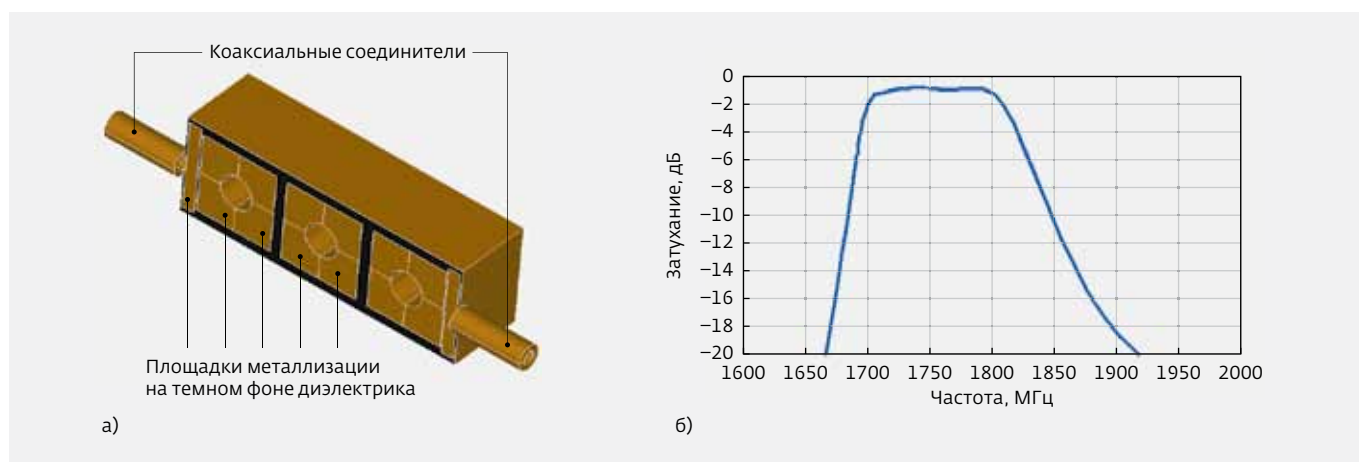


Рис.6. Трехзвенный монолитный диэлектрический блок, со сплошной металлизацией пяти граней и тремя сквозными металлизированными отверстиями (а) и экспериментальная характеристика трехзвенного полосно-пропускающего фильтра на его основе (б), НИУ "МЭИ", Москва, 2004 год.



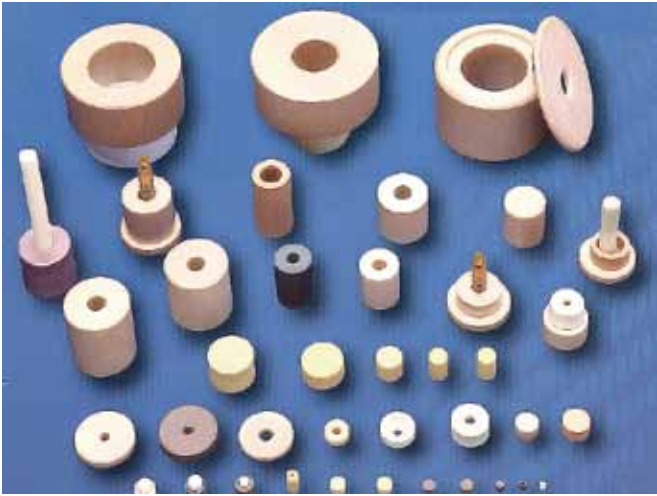


Рис.7. ДР разных типоразмеров из различной керамики фирмы C&Q

### ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

В настоящее время ДР выполняют из высокодобротных керамических материалов с относительной диэлектрической проницаемостью от 10 до 120 (рис.7) [5] в соответствии с некоторой сеткой типоразмеров, позволяющих перекрыть традиционный диапазон частот рационального применения таких резонансных звеньев: от примерно 1 до 40 ГГц. Заметим, что в отечественной практике указанная сетка [3] типоразмеров несколько отличается от зарубежной, но это не принципиально. Типоразмеры диэлектрических тел устанавливаются относительно диаметров дисков при фиксированных толщинах, что позволяет за счет уменьшения толщины диска перекрывать указанным типоразмером некоторый частотный поддиапазон. Приблизительно диаметр дисков  $D$  ДР связан с резонансной длиной волны  $\lambda_p$  равенством:  $D \approx \lambda_p / \sqrt{\epsilon_r}$ . Для сведения приведен пример номенклатуры керамических ДР компании MCV Microwave (рис.8).

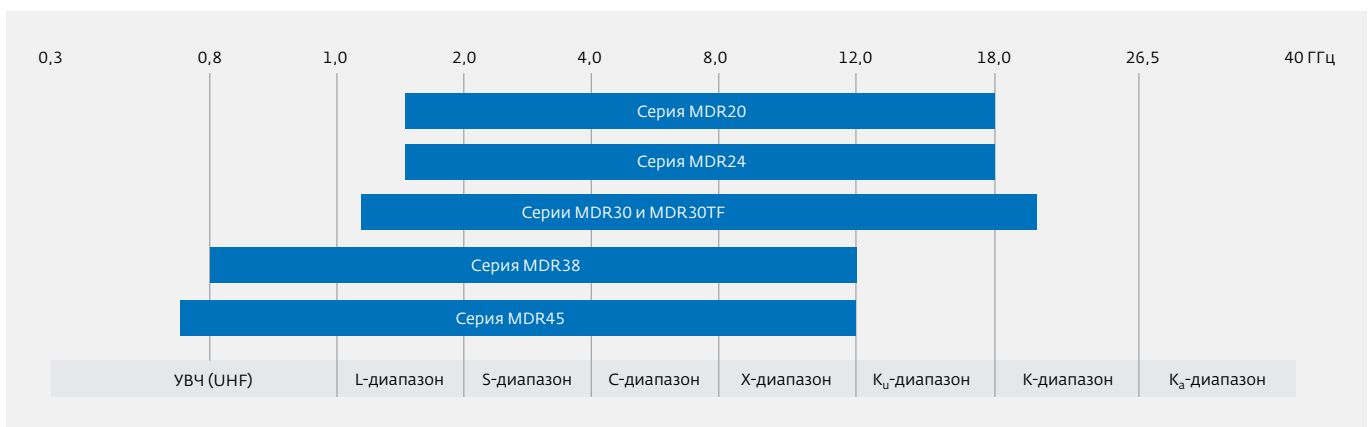


Рис.8. Марки ДР разных серий компании MCV Microwave и частотные диапазоны их применения

Рассмотрим особенности ДР и конструкции РЗ с их применением.

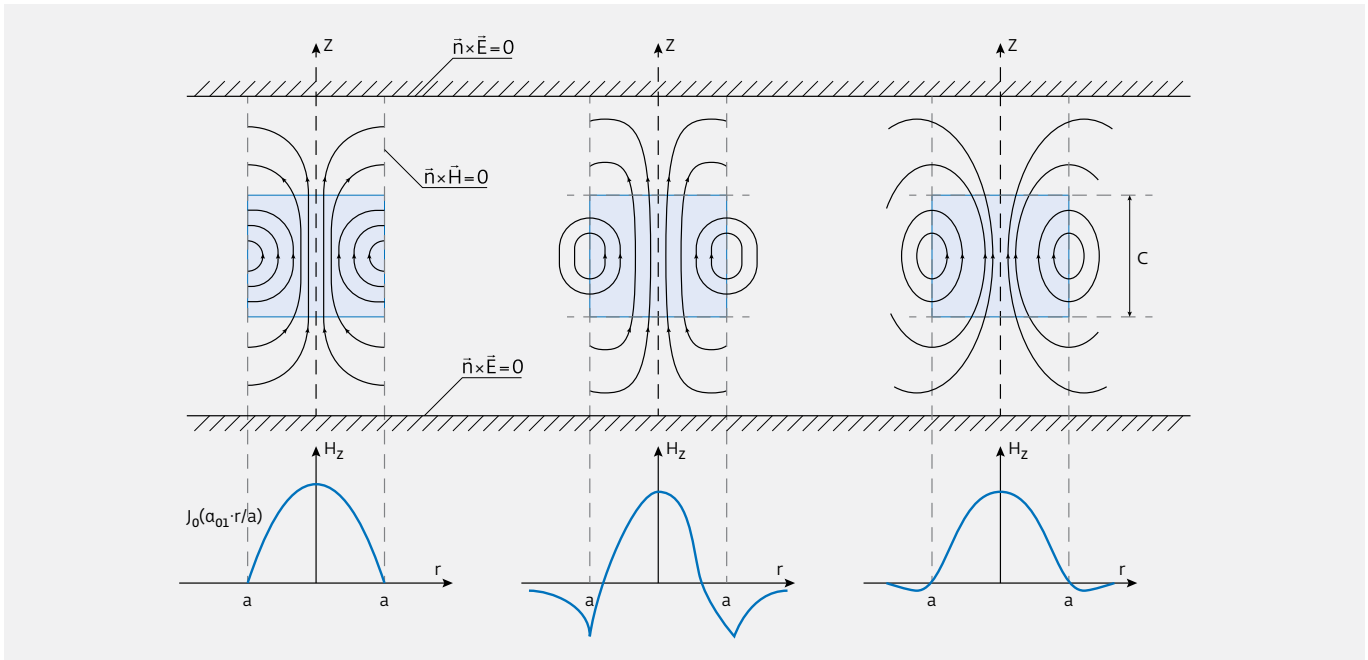
ДР представляют собой объемные тела, поддерживающие свободные электромагнитные колебания разных видов, удовлетворяющие граничным условиям границы раздела диэлектрик/воздух, то есть условиям полного внутреннего отражения (малые радиационные потери) при высоких значениях относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r \geq 10$ . ДР обладают малыми тепловыми потерями (малым тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta < 10^3$  или высокой собственной добротностью  $Q \approx 1/\text{tg } \delta$ ).

В отличие от ОР на основе металлических полостей в общем случае структура полей собственных колебаний ДР не может быть разделена на продольные колебания магнитного или электрического вида. Поэтому такие колебания называются гибридными, так как имеют продольные составляющие одновременно и магнитного, и электрического полей. Однако в ряде случаев удается ограничить анализ структур полей приближением продольных E- и H-колебаний. При этом наибольший практический интерес представляют низшие ( $TE_{016}$ ) колебания в дисковых ДР (рис.9) [8]. Зависимости резонансных длин волн первых TE-видов колебаний прямоугольных ДР от соотношения размеров ДР показывают (рис.10) [8], что наличие ближайших (высших) видов колебаний ДР, отстоящих от основного вида на 15–20%, принципиально и выбором геометрических соотношений тел не преодолимо. При этом условие лучшей отстройки частоты ближайшего вида колебаний от частоты низшего вида – соотношение  $c/g \leq 0,25$ . "Густота" частотного спектра – самый большой недостаток РЗ на ДР.

Вторым по значимости недостатком ДР можно считать температурную зависимость относительной диэлектрической проницаемости материала ( $TK\epsilon_r$ ), которая трансформируется в температурную зависимость



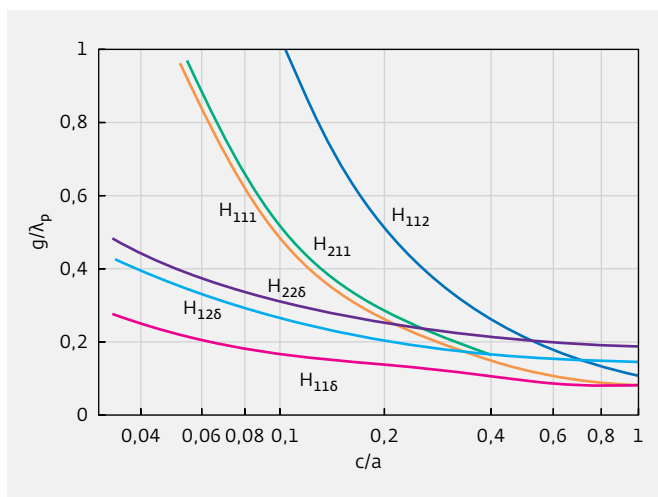




**Рис.9.** Структуры поля  $H_{01\delta}$ -вида колебаний для трех моделей описания: а – "второе" приближение; б – волноводная модель; в – реальное распределение поля в цилиндрическом диэлектрическом резонаторе.  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к торцевой поверхности цилиндрического образца ДР; ось  $z$  перпендикулярна торцевой поверхности ДР и совпадает по направлению с  $\vec{n}$ ;  $c$  – толщина ДР;  $r$  – радиальная координата;  $a$  – радиус ДР;  $J_0\left(\alpha_{01}\frac{r}{a}\right)$  – функция Бесселя нулевого порядка,  $\alpha_{01}$  – ее первый корень

резонансной частоты РЗ на ДР. Однако, в отличие от проблемы разрежения спектра собственных частот, стабилизировать резонансную частоту ДР (а, значит, и РЗ на ДР) удастся на основе взаимной компенсации

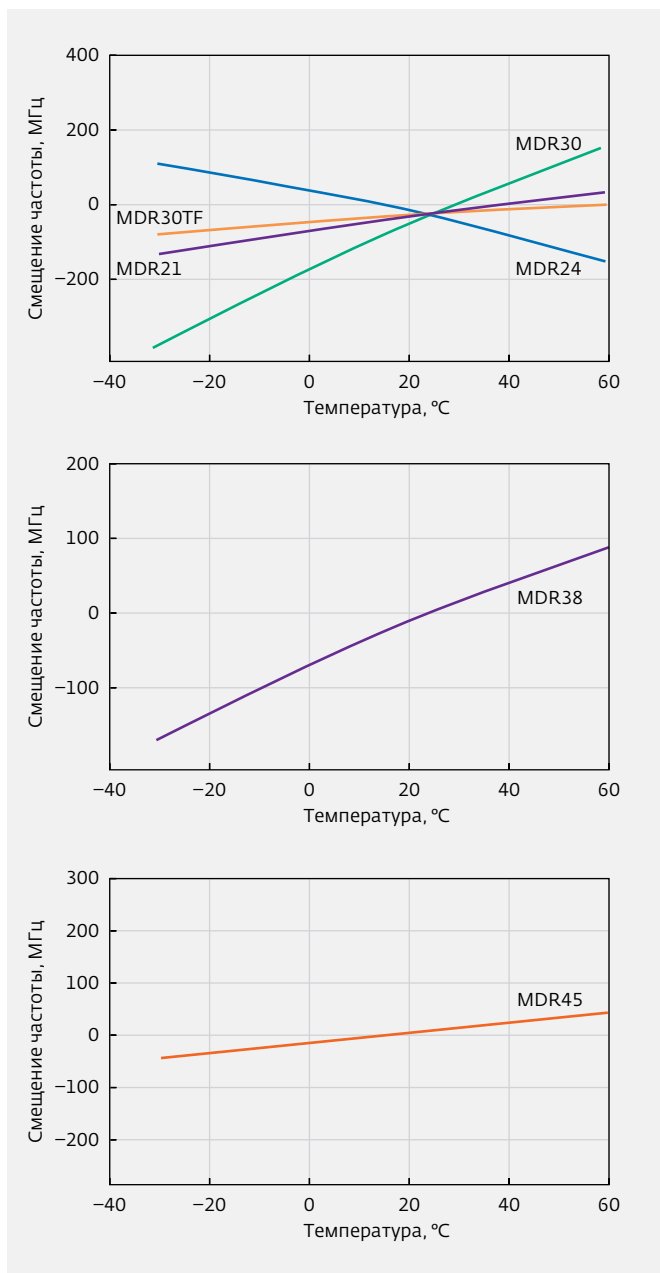
температурных уходов частоты за счет изменения диэлектрической проницаемости и геометрических размеров. Это обеспечивается наличием широкого диапазона значений ТК $\epsilon_r$  и, соответственно, температурных зависимостей резонансных частот керамических тел, предлагаемых производителями ДР (рис.11).



**Рис.10.** Примеры зависимостей резонансной длины волны  $\lambda_p$  от соотношения геометрических размеров резонатора  $c/a$  ( $c$  – толщина,  $a$  – поперечный размер) для ТЕ-видов колебаний при относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r=100$

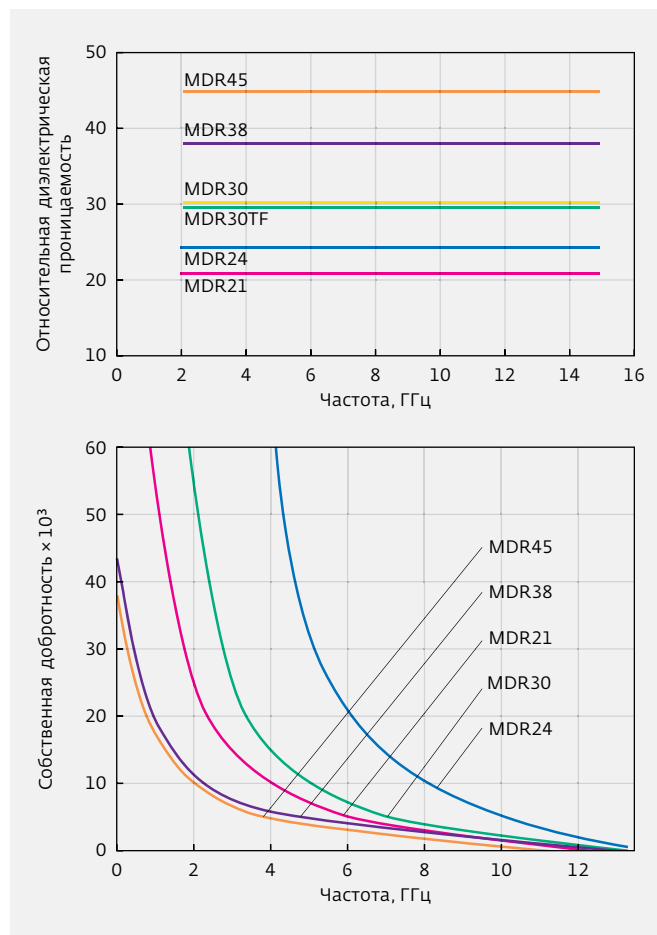
**Таблица 4.** Электрофизические характеристики ряда моделей ДР фирмы MCV Microwave

Тип	$\epsilon_r$	ТК $f_p$ , 1/°C	$Q \cdot f_p$
MDR-21	$21 \pm 1$	$5 \pm 5$	$> 60\,000$ (6,5 ГГц)
MDR-24	$24 \pm 1$	От 1 до $3 \pm 1$	$> 300\,000$ (10 ГГц)
MDR-30	$30 \pm 1$	$0 \pm 2$	$> 150\,000$ (10 ГГц)
MDR-34	$34 \pm 1$	От 2 до $3 \pm 1$	$> 150\,000$ (10 ГГц)
MDR-36	$36 \pm 2$	$0 \pm 5$	$> 30\,000$ (5 ГГц)
MDR-38	$38 \pm 1$	$0,7 \pm 0,5$	$> 47\,000$ (5,0 ГГц)
MDR-40	$40 \pm 1$	$3 \pm 5$	$> 70\,000$ (5,0 ГГц)
MDR-45	$46 \pm 1$	$-2 \dots \pm 6$	$> 43\,000$ (6,0 ГГц)
MDR-47	$47 \pm 1$	$0 \pm 10$	$> 46\,000$ (6,0 ГГц)



**Рис.11.** Температурные зависимости резонансных частот низших ТЕ-видов колебаний некоторых ДР из различных керамик фирмы MCV Microwave

Применительно к вопросу обеспечения температурной стабилизации резонансной частоты ДР необходимо заметить, что в реальных РЗ ДР помещают в экранирующие полости, уменьшающие радиационные потери, что повышает эффективную собственную добротность РЗ. Однако экран смещает резонансную частоту ДР (т.е. РЗ), но важнее то, что это изменяет температурный коэффициент резонансной частоты  $f_p$ . Поэтому выбор ТК $_{\epsilon}$  керамик для компенсации уходов частоты должен учитывать весь комплекс температурных влияний

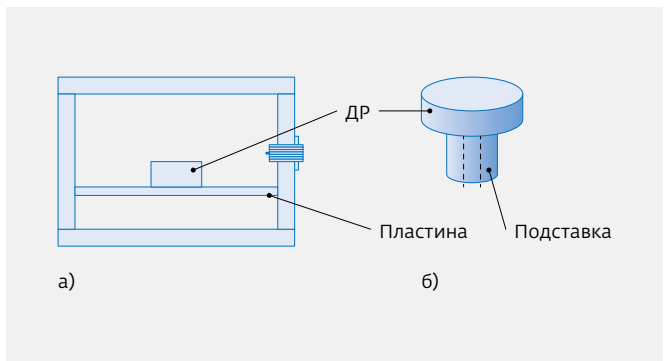
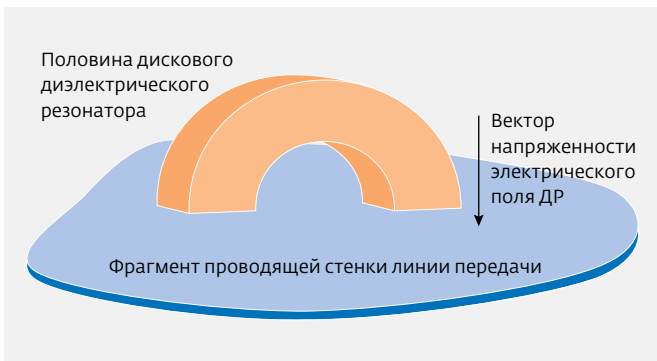


**Рис.12.** Частотные свойства электрофизических параметров керамик различных моделей ДР фирмы MCV Microwave (см. рис.8)

(диэлектрической проницаемости тела, его геометрических размеров и расстояний до экранирующих поверхностей).

Перейдем к оценкам добротности ДР и РЗ на их основе. Уровень достигнутых значений добротности у большинства передовых производителей этой продукции примерно одинаков. В качестве примера приведем электрофизические параметры изделий компанией MCV Microwave (рис.12, табл.4) [2]. Характеристика  $Q \cdot f_p$  (см. табл.4) – произведение собственной добротности ДР на его резонансную частоту – квазипостоянная величина, характеризующая ДР из конкретных керамик. Параметры ДР по существу единственного отечественного производителя – ООО "Керамика", специализирующего на крупносерийном (и даже оптовом) производстве аналогичной продукции, приведены в каталоге [3].

Остановимся на особенностях технических решений, применяемых для обеспечения разрежения (или сдвига в нужную сторону) спектра паразитных частот



**Рис.13.** РЗ на ДР с использованием зеркального эффекта

(подавления нежелательных высших видов колебаний) и для обеспечения теплоотвода от ДР. Последняя задача актуальна при создании селективных устройств на ДР в трактах высокого уровня мощности (от десятка ватт).

Как уже отмечалось, паразитные полосы пропускания, близкие к резонансной частоте ДР, являются серьезной проблемой ДР, РЗ на их основе, а значит и фильтров из таких РЗ вследствие густоты спектра собственных колебаний ДР. С момента начала внедрения ДР в устройства СВЧ (с конца 60-х годов прошлого

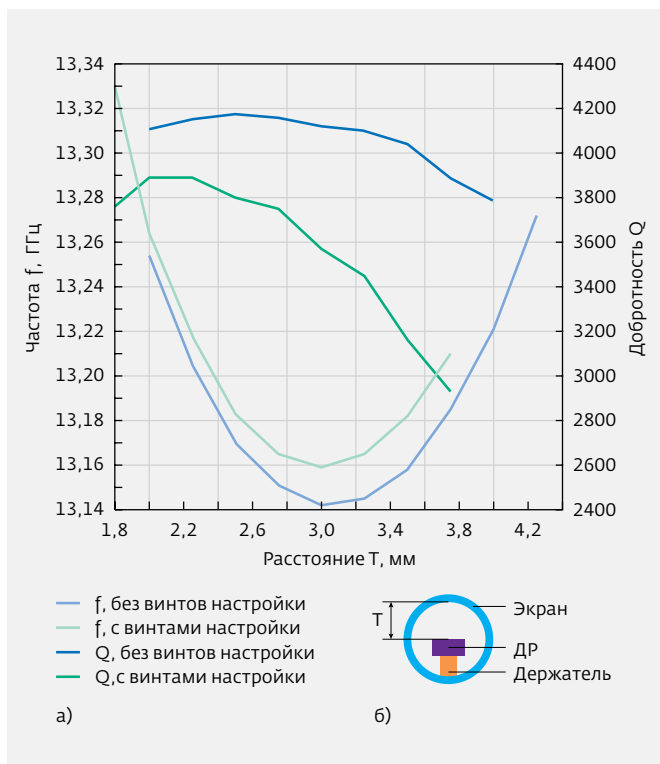
**Рис.15.** Резонансное звено с кварцевым держателем ДР: а) пластина; б) диэлектрическая (поликоровая) подставка-держатель

века) разрабатывались различные решения для борьбы с нежелательными видами колебаний, в частности, применение диафрагм, штырей и других дополнительных элементов, подавляющих или отстраивающих нежелательные виды колебаний. Наиболее эффективное – использование "зеркальных" (половина, четверть) резонаторов (рис.13) [9]. Общий недостаток резонансных звеньев с применением этих элементов подавления паразитных полос пропускания заключается в снижении собственной добротности РЗ в сравнении с собственной добротностью ДР. В случае применения "зеркально" сформированных ДР добротность падает до значений, характерных для КР, то есть до ~1000.

Поэтому чаще всего при создании РЗ предпочитают самый простой способ – соответствующий выбор соотношения размеров ДР и его положения в запердельной полости. В типичном варианте РЗ с применением низшего вида колебаний ДР устанавливается (фиксируется с помощью клея) на диэлектрической (кварцевой) подставке, которая закрепляется в стенке цилиндрического корпуса (рис.14) [10]. Особенность

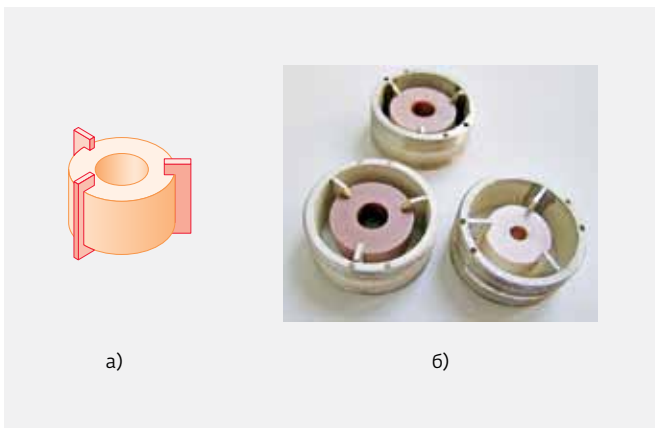
**Таблица 5.** Сравнительные параметры подставок-держателей, применяемых фирмой MCV Microwave

Параметр	Стандартный поликор	MCV поликор
$\epsilon_r$	9,8	9,8
$tg\delta$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,75	3,90
Частота, для которой представлены параметры, ГГц	10	10



**Рис.14.** Зависимости (а) резонансной частоты f ДР и его эффективной добротности Q от положения резонатора в экране (б)





**Рис.16.** Резонатор, закрепленный в трех П-образных пластинах (а), и конструктивное выполнение резонансного звена (б)

конструкции – применение резьбовой металлической втулки, на которой установлен держатель ДР и которая вворачивается в соответствующее резьбовое отверстие в стенке корпуса. Такая конструкция обеспечивает простоту монтажа, подстройки резонансной частоты и при необходимости замены резонаторов в фильтре.

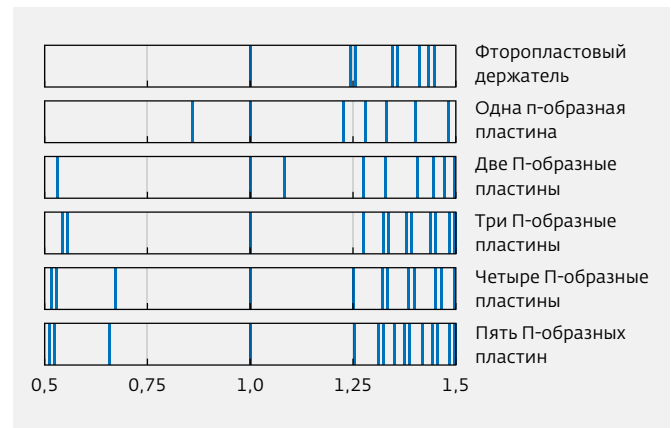
Отметим типичные для большинства производителей РЗ на ДР характеристики элементов крепления диэлектрических тел в линиях передачи и их влияние на добротность РЗ на примере изделий фирмы MCV Microwave (рис.15, табл.5).

Следует пояснить, что качество диэлектриков подставок-держателей практически не сказывается на добротностях РЗ с ДР, так как основные вносимые потери определяют проводящие элементы конструкции РЗ. Это иллюстрируют зависимости, приведенные на рис.14, где в качестве держателей ДР (с собственной добротностью около 5000) применен материал кварц с собственной добротностью около 10000. Из рисунка видно, что добротность РЗ в основном зависит от положения металлических винтов настройки. Причем к числу проводящих элементов конструкции РЗ следует отнести клеи, применяемые для фиксации тел ДР к подставкам-держателям и непосредственно соприкасающиеся

**Таблица 6.** Результаты расчета спектра собственных частот

	Частота спектральных составляющих, ГГц							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ДР без держателя				12,360*	14,435	14,707	15,519	16,120
Металлический держатель	4,631	4,622	7,805	12,630*	13,896	13,900	17,173	17,176
Кварцевый держатель				12,482*	14,215	14,516	15,052	16,103

\* Обозначены частоты низшего ТЕ-вида колебаний РЗ с ДР.



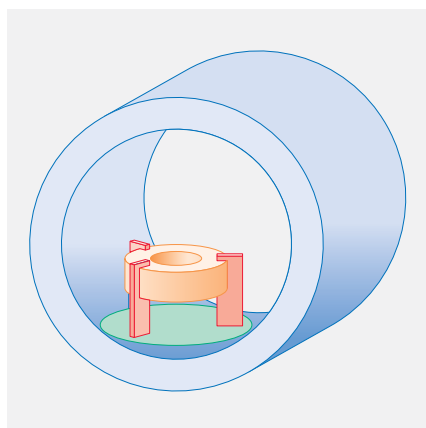
**Рис.17.** Иллюстрация эффекта разрежения спектра паразитных частот РЗ на ДР

с поверхностью ДР. Влияние клея на вносимые в РЗ потери определяет его  $tg \delta$  и напряженность поля в области склеиваемых поверхностей.

Тем не менее, опыт применения современных клеев как отечественного, так и иностранного производства указывает на незначительное (в сравнении с остальными факторами) влияние клеев на эффективные (с учетом вносимых потерь) собственные добротности РЗ.

Кроме величины  $tg \delta$  клеев, применяемых для фиксации ДР, важные характеристики клеящих материалов – их механические параметры, к которым относятся способность удержания (в условиях механических воздействий) фиксируемых тел определенной массы и температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР), а также теплопроводность, определяющую способность передачи тепловой энергии от ДР через объем клея к теплоприемникам (корпусу устройства, окружающему пространству и др.).

К примеру, компания Trans-Tech Ceramics and Advanced Materials [11] для крепления ДР диаметром до 10 мм в диапазоне частот 5 ГГц рекомендует применять клей Loctite 499 с использованием одной части Cyano-Acrylic (CA), а в условиях расширенного диапазона температур или ДР большой массы – клей Loctite 4212.



**Рис.18.** Резонансное звено с металлическим держателем ДР при ортогональном размещении



**Рис.19.** Цилиндрические ДР ТМ-видов фирмы MCV Microwave

Кроме того, ТКЛР клея должен соответствовать ТКЛР основания крепления ДР в РЗ, что исключит неприемлемую деформацию конструкции РЗ в диапазоне изменения температуры окружающей среды. Согласно данным компании Trans-Tech типичные ТКЛР ДР составляют  $(8-10) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ , а поликорových подложек – от  $6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  до  $24 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ . При этом важный критерий выбора клея – обеспечение теплоотвода от ДР через слой клея или исключение создания промежуточного слоя клея между поверхностями тела ДР и подставок-держателей.

Что касается проблемы теплоотвода от ДР в РЗ, то наиболее актуален этот вопрос при создании фильтров в трактах среднего и высокого уровней мощности (ВУМ). Решение задачи создания селективных устройств на базе ДР в трактах ВУМ состоит в применении теплоотводящих элементов крепления, например из теплопроводных диэлектриков (на основе нитрида бора и др.), или специальных приемов, среди которых упомянутое использование "зеркальных" (половина,

четверть) резонаторов [9], сопровождаемое снижением эффективной добротности (ростом вносимых потерь). У каждого из названных вариантов теплоотвода есть общий недостаток – проблема обеспечения крепления ДР к теплоотводу. С учетом сказанного, лучший прием обеспечения теплоотвода от ДР – применение специфических элементов крепления диэлектрических тел [12] (рис.16). Держатель образует пластины, которые размещены радиально и крепятся на внутренней поверхности цилиндрического экрана. Такая конструкция обеспечивает разрежение спектра паразитных частот (рис.17) в сочетании с хорошим отводом тепла от ДР и прочностью фиксации диэлектрического тела в РЗ.

Следует заметить, что оптимальным вариантом крепления диска ДР оказывается применение трех П-образных скоб, но только при его соосном размещении в цилиндрическом экране. При ортогональном варианте крепления (рис.18) аналогичного эффекта – разрежения спектра – не наблюдается (показано на примере ДР  $K_u$ -диапазона в табл.6) [13].

Завершая анализ параметров ДР, нельзя не сказать о свойствах этих резонаторов на других видах колебаний. В практике построения фильтров высшие виды колебаний применяют крайне редко ввиду близости соседних частот. Тем не менее следует отметить

**Таблица 7.** Типоразмеры ДР ТМ-видов фирмы MCV Microwave

Модель	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Максимальная длина, мм
D560C	5,6	1,47	20,0
D620C	6,2	2,48	20,0
D1360C	13,6	4,04	30,0
D1600C	16	5,25	55,0
D1700C	17	4,62	55,0
D2450C	24,5	8,56	55,0
D3000C	30	8,84	55,0
D4500C	45	12,80	55,0

**Таблица 8.** Параметры ДР ТМ-видов фирмы MCV Microwave

$\epsilon_r$	$TК\epsilon_r, \text{ppm}/^\circ\text{C}$	$\Delta TК\epsilon_r, \text{ppm}/^\circ\text{C}$	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Максимальная длина, мм
20	*	$\pm 0,5$	10,8	4	5
24	6	$\pm 1,0$	*	*	*
30	3	$\pm 2,0$	*	*	*
38	-3	-	*	*	*
45	-6	-	*	*	*

\* По требованию заказчика.

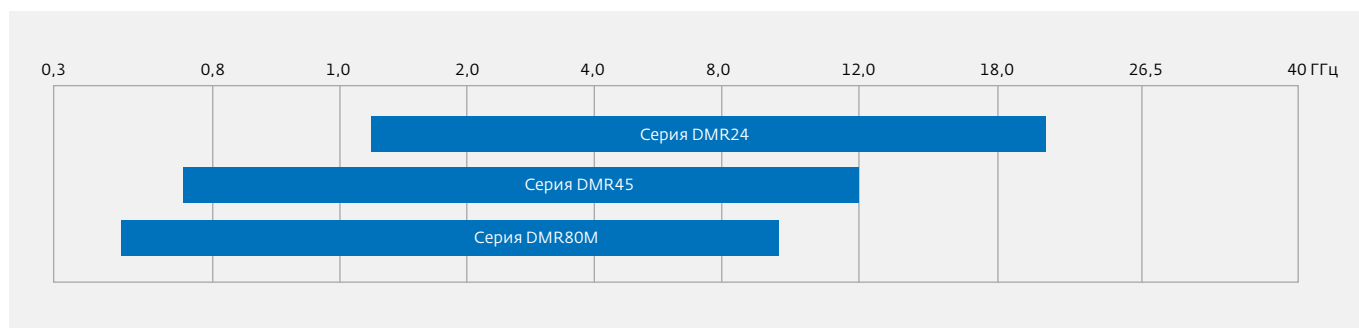


Рис.20. Частотные диапазоны ДР ТМ-видов фирмы MCV Microwave

некоторый положительный эффект, наблюдаемый в колебаниях высших видов, связанный с уменьшением радиационных потерь (большой локализацией поля внутри диэлектрического тела).

В варианте очень высоких видов колебаний, которые называют "шепчущей галереей", свойства ДР характеризуются чрезвычайно высокой собственной добротностью. Например, для тел из сапфира при комнатной температуре она достигает значений порядка  $10^5$ . К сожалению, практическое применение таких ОР в устройствах селекции сигналов чрезвычайно затруднительно и потому не реализуется. Некоторый интерес к подобным резонаторам проявляют создатели колебательных систем активных устройств ввиду достаточно простой реализации электромагнитной связи полей таких колебаний с полупроводниковыми генераторными структурами.

С учетом сказанного понятно, почему широко не рекламируются ДР с высшими видами колебаний. Обратим внимание на ДР, представленные фирмой MCV Microwave, с высшим (вероятно первым E) видом колебаний, названным ими ДР ТМ-вида. Заметим, что в отечественной практике такой термин не применяется.

Производитель предлагает эти изделия в виде цилиндрических тел различных размеров (рис.19, табл.7) в частотном диапазоне от 0,3 до 20 ГГц (рис.20, табл.8).

На этом завершим обзор характеристик ДР и перейдем к краткой оценке свойств ВДР.

*Окончание следует.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Окава А.** The rutile microwave resonator. Proc. IRE (correspondece), 1960. Vol. 48, № 11, p. 1921.
2. Проспект Material Driven Solutions for RF Microwave Applications компании MCV Microwave: [www.mcv-microwave.com](http://www.mcv-microwave.com)
3. ВЧ и СВЧ керамические материалы и микроволновые элементы. Каталог продукции ООО "Керамика". – СПб, 2004. 35 с.
4. **Капилевич Б.Ю., Трубехин Е.Р.** Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
5. Сайт компании C&Q – Caiqin technology (Hong Kong Caiqin Electronics Elements). – [www.hkcanandq.com](http://www.hkcanandq.com)
6. Сайт компании Murata: [www.murata.com](http://www.murata.com)
7. Сайт компании Korea First Microwave: [korfirstco.en.ec21.com](http://korfirstco.en.ec21.com)
8. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть I: Параметры миниатюрных диэлектрических резонаторов на СВЧ и методы их расчета / Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Парышкуро Л.А. // Обзоры по электронной технике. 1981. Вып. 13 (832), 97 с. (Серия 1: Электроника СВЧ).
9. **Nishikawa T., Wakino K., Tsanoda K., Ishikawa Y.,** Dielectric high-power band-pass filter using quarter-out TE<sub>016</sub> image resonator for cellular base stations. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., D-2, 1987, pp. 133–136.
10. **Бунин А.В., Вишняков С.В., Геворкян В.М., Михалин С.Н.** Полосно-пропускающие фильтры Ки-диапазона на диэлектрических резонаторах. Базовая модель. // Электронная техника. 2011. вып.2 (509), С.4–12. (Серия 1. СВЧ техника).
11. Adhesives for Dielectric Resonator Assemblies. Application Note: [www.trans-techinc.com](http://www.trans-techinc.com)
12. **Бунин А.В., Вишняков С.В., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Михалин С.Н., Полукаров В.И.** Высокодобротная резонансная секция с разреженным спектром. 17-я Международная Крымская конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, Крым, Украина. 10–14 сентября 2007, Материалы конференции, Т. 2, С. 486–487.
13. **Бунин А.В., Вишняков С.В., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Михалин С.Н., Полукаров В.И.** Фильтры Ки-диапазона на диэлектрических резонаторах: Сборник докладов НТК "Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем". – Омск, 2008. С. 26–31.