

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РЕЗОНАНСНОЕ КОЛЬЦО В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Введение

Открытие резонансных эффектов в диэлектрических неоднородностях малых размеров (в сравнении с длиной электромагнитной волны), изготовленных из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ и малыми потерями, привело не только к значительному росту научных публикаций теоретического и экспериментального характера, но и к созданию различных уникальных малогабаритных радиоэлектронных устройств. Эти устройства синтезируются на основе диэлектрических резонансных рассеивателей (ДРР) [1-4]. Основной характерной особенностью ДРР, размещенных в волноводных линиях передачи СВЧ диапазона, является возникновение парных резонансов – отражения и прохождения.

Актуальность исследования резонансного рассеяния электромагнитных волн на диэлектрических включениях малых размеров не потеряла своего значения, поскольку остаются открытыми и требуют дальнейших систематических исследований и объяснений ряд особенностей, которые имеют место при взаимодействии волны с такими включениями. Так, например, в работе [5] было отмечено, что резонансы в диэлектрических неоднородностях представляют собой объемные эффекты. А это означает, что в возникновении резонансов существенную роль играют не только электродинамические параметры ($\epsilon, \text{tg } \delta$), геометрические размеры и форма рассеивателя, но также и его масса. Это нашло подтверждение при исследовании рассеяния волн на диэлектрическом цилиндре и тонкостенной трубке одинаковых геометрических размеров (длина, внешний диаметр), эквивалентных объемов, с одинаковым соотношением осей, изготовленных из одного и того же диэлектрика с большим ϵ и малым $\text{tg } \delta$ [6]. Было установлено, что резонансные картины для этих двух тел существенно различаются.

Из приведенных в работе [6] результатов следует, что масса тела играет существенную роль в формировании резонансной картины. К тому же из сопоставления экспериментальных результатов для этих тел возникает необходимость дальнейшего систематического экспериментального исследования резонансного рассеяния электромагнитных волн на диэлектрических кольцеобразных включениях малых размеров в линиях передачи, что важно для практических целей, поскольку кольцеобразные ДРР используются при решении проблемы миниатюризации радиоэлектронных устройств и их электромагнитной совместимости.

Цель работы – экспериментальное исследование резонансного рассеяния электромагнитных волн на диэлектрических кольцах, расположенных в прямоугольном волноводе. Кольца были изготовлены из диэлектрика с $\epsilon = 88, \text{tg } \delta = 0,001$. Разность между внешним и внутренним диаметрами кольца составляла $\gamma = 0,8$ мм. Толщина самих колец l изменялась последовательным шлифованием через 0,2 - 0,3 мм от 6 до 1 мм. Внешние диаметры использовавшихся в эксперименте колец, были следующими: $D = 5,76; 6,1; 6,45; 6,6; 7,2$ и $7,4$ мм.

Основная часть

Исследования проводились на волне H_{10} с помощью панорамных автоматических измерителей коэффициентов стоячих волн ($K_{CT}U$). Кольца размещали на подложке из пенопласта в геометрическом центре поперечного сечения стандартных волноводов $12,6 \times 28,5$ мм² и 15×35 мм², что обеспечивало диапазон исследований длин волн от 2,4 до 5,38 см. Были изучены зависимости $K_{CT}U$ от длины электромагнитной волны для трех наиболее характерных позиций кольца в геометрическом центре поперечного сечения волновода:

- плоскости кольца параллельны плоскости поперечного сечения волновода ($\theta = 0, \varphi = 0$);

- плоскости кольца параллельны H – плоскости волновода ($\varphi = 90^0$);
- плоскости кольца параллельны E – плоскости волновода ($\theta = 90^0$).

Здесь θ – угол между продольной осью волновода и осью, проходящей перпендикулярно плоскости кольца через его центр, при вращении ДРР вокруг оси, перпендикулярной широким стенкам волновода. Угол φ – это угол между той же осью кольца и продольной осью волновода, но при вращении ДРР вокруг оси перпендикулярной узким стенкам волновода.

Ниже приведены результаты исследований для этих трех ориентаций колец в волноводе.

Ориентация колец в плоскости поперечного сечения волновода ($\theta = 0, \varphi = 0$)

Такая ориентация колец в геометрическом центре поперечного сечения волновода характеризуется тем, что в рассматриваемом диапазоне длин волн для колец диаметром 5,76 мм при изменении их толщины l от 1 до 2,5 мм наблюдается формирование резонанса отражения магнитного типа первого порядка в области длины волны 2,42 см. Величина $K_{CT}U$ при резонансе не превышает 1,7...2,1. Однако уже при $l > 2,5$ мм резонансные значения $K_{CT}U$ значительно возрастают, а сами резонансы по мере увеличения толщины колец смещаются в длинноволновую область. В табл. 1 приведены измеренные значения резонансных длин волн резонансов отражения и $K_{CT}U$ на этих длинах волн для колец диаметрами 5,76 и 6,45 мм в зависимости от толщины колец. Как следует из экспериментальных исследований, рядом с резонансом отражения со стороны длинных волн находится резонанс прохождения, характеризующийся тем, что значения $K_{CT}U$ при нем составляют приблизительно 1,05. В соответствии с классификацией, принятой в [3,4], данные резонансы отражения являются резонансами магнитного типа первого порядка.

Таблица 1

$D, мм$	$l, мм$	2,5	2,7	3	3,2	3,5	3,7	4	4,31	4,51	4,6
5,76	$\lambda, см$	-	2,42	2,53	2,6	2,76	2,87	3	3,08	3,18	3,2
	$K_{CT}U$	-	4,5	10	50	14	20	25	25	28	30
6,45	$\lambda, см$	2,48	2,58	2,77	2,88	3,02	3,13	3,28	3,42	3,5	3,52
	$K_{CT}U$	50	16	25	25	30	31	50	40	29	30
	K_{CM}	-	1,07	1,09	1,11	1,09	1,09	1,09	1,11	1,10	1,10

Как следует из табл. 1, увеличение диаметров колец при одних и тех же величинах γ, l приводит к смещению резонансов в длинноволновую область и, как следствие этого, более раннему появлению резонанса в начале исследуемого диапазона. Например, для кольца с диаметром 6,45 мм резонанс отражения магнитного типа первого порядка имеет место уже при толщине $l = 2,5$ мм ($\lambda = 2,48$ см), в то время как для кольца с диаметром 5,76 мм при тех же самых параметрах γ, l резонанса нет.

Введем коэффициент смещения резонанса как $K_{CM} = \lambda_2 / \lambda_1$, где λ_2, λ_1 соответственно резонансные значения длин волн колец с D_2, D_1 для одинаковых их толщин. Значения этих коэффициентов для данных колец приведены в табл. 1. Среднее значение коэффициента смещения составляет $\langle K_{CM} \rangle = 1,09 \pm 0,02$. Из этого следует, что зависимости резонансных длин волн от толщины колец для обоих ДРР практически пропорциональны друг другу в пределах погрешности среднего значения коэффициента смещения.

Данная ориентация колец в волноводе характеризуется еще и тем, что, начиная с толщины $l = 4,8$ мм, в исследуемом диапазоне длин волн для колец с внешним диаметром $D = 5,76$ мм появляются резонансы отражения электрического типа первого порядка. Возле этих резонансов со стороны коротковолнового участка диапазона находятся резонансы прохождения.

В табл. 2 приведены резонансные длины волн и $K_{CT}U$ при резонансах отражения электрического типа в зависимости от толщины колец. Отметим, что для колец диаметром 6,45 мм резонансы электрического типа первого порядка появляются при более тонких кольцах, начиная с толщины 4,31 мм ($\lambda = 2,46$ см, $K_{CT}U = 16$) и при увеличении толщины, как в случае кольца диаметром 5,76 мм, смещаются в длинноволновую область.

Таблица 2

$l, \text{мм}$	4,83	5,12	5,4	5,72	6,06
$\lambda \text{ см}$	2,41	2,43	2,55	2,6	2,69
$K_{CT}U$	35	50	18	20	12

Таким образом, увеличение геометрических размеров колец, а следовательно, и массы, взаимодействующей с электромагнитной волной, приводит к возрастанию резонансной длины волны и появлению резонансов электрического типа первого порядка.

Ориентация колец в H -плоскости волновода ($\varphi = 90^0$)

При данном расположении колец в геометрическом центре поперечного сечения волновода наблюдаются незначительные смещения резонансов магнитного типа первого порядка, не превышающие 0,8 % по сравнению с ориентацией $\theta = 0, \varphi = 0$, рассмотренной выше. Резонансы электрического типа первого порядка в исследуемом диапазоне отсутствуют.

Такое поведение резонансов можно объяснить особенностями волны H_{10} , на которой проводилось данное исследование. Действительно, волна H_{10} имеет в волноводе компоненты E_y, H_x, H_z . Компонента E_y имеет максимальное значение в центре поперечного сечения волновода и уменьшается по синусоидальному закону к его узким стенкам. Линии электрического поля направлены к широким стенкам. Компонента H_x изменяется также по синусоидальному закону и следует за изменением электрического поля. Компонента H_z равна нулю в центральной части широкой стенки волновода и увеличивается по мере приближения к его узким стенкам. Когда кольцо с данной ориентацией находится в геометрическом центре поперечного сечения волновода, то области кольца, взаимодействующие с компонентой H_x , практически совпадают с областями взаимодействия кольца с ориентацией $\theta = 0, \varphi = 0$. Кроме того, совпадают для этих обеих ориентаций области взаимодействия с компонентой магнитного поля H_z . Поэтому при возбуждении резонансов магнитного типа масса областей кольца, взаимодействующих с этими составляющими магнитного поля, остается практически неизменной. В результате и резонансные длины волн резонансов магнитного типа для обеих ориентаций кольца в волноводе ($\theta = 0, \varphi = 0$ и $\varphi = 90^0$) остаются практически неизменными (табл. 3).

В табл. 3 приведены результаты измерений для колец с внешним диаметром $D = 5,76$ мм, внутренним диаметром $d = 4,12$ мм и толщиной стенки $\gamma = 0,8$ мм для трех рассматриваемых ориентаций. Здесь: l – толщина кольца, $\lambda_{\parallel}, \lambda_H, \lambda_E$ – резонансные длины волн для колец, ориентированных в плоскости поперечного сечения волновода, H -плоскости и E -плоскости соответственно; $K_{CT}U_{\parallel}, K_{CT}U_H, K_{CT}U_E$ – коэффициенты стоячих волн при резонансах для

этих же ориентаций колец в волноводе соответственно; k_H и k_E – коэффициенты смещения резонансов, определяемые как $k_H = \frac{\lambda_H}{\lambda_{\parallel}}$ и $k_E = \frac{\lambda_E}{\lambda_{\parallel}}$.

Таблица 3

Ориентация колец в волноводе	$l, \text{мм}$	2,7	3	3,2	3,5	3,7	4	4,31	4,51	4,6	4,83
$\theta = 0, \varphi = 0$	$\lambda_{\parallel}, \text{см}$	2,42	2,53	2,6	2,76	2,87	3	3,08	3,18	3,2	3,28
	$K_{CT} U_{\parallel}$	4,5	10	50	14	20	25	25	28	30	35
$\varphi = 90^0$	$\lambda_H, \text{см}$	2,42	2,58	2,64	2,77	2,9	3	3,14	3,20	3,24	3,28
	$K_{CT} U_H$	20	25	18	30	30	40	50	50	50	50
	k_H	1	1,02	1,01	1,004	1,01	1	1,02	1,01	1,01	1
$\theta = 90^0$	$\lambda_E, \text{см}$	3,59	3,71	3,80	-	-	-	-	-	-	-
		3,68*	3,78*	3,83*	3,90*	3,99*	4,02*	4,08*	4,15*	4,16*	4,20*
$\theta = 90^0$	$K_{CT} U_E$	40	50	50	-	-	-	-	-	-	-
		25*	25*	28*	20*	30*	25*	28*	25*	25*	25*
$\theta = 90^0$	k_E	1,48	1,47	1,46	-	-	-	-	-	-	-
		1,52*	1,49*	1,47*	1,41*	1,39*	1,34*	1,32*	1,31*	1,30*	1,28*

Как следует из таблицы, в случае ориентации колец в H -плоскости, коэффициенты смещения резонансов магнитного типа первого порядка находятся в пределах 1...1,02. Среднее значение коэффициента смещения составляет $\langle k_H \rangle = 1,01$.

Для резонансов электрического типа при ориентации $\varphi = 90^0$ значительная часть линий электрического поля E_y приходится на внутреннюю область кольца, т.е. на «пустоту», а обод кольца взаимодействует с гораздо меньшим по величине суммарным полем E_y , поскольку находится на расстоянии внутреннего радиуса кольца от его центра, в котором составляющие E_y имеют максимальное значение. Поэтому интенсивности напряженности поля E_y в зонах взаимодействия этой компоненты с кольцом, очевидно, недостаточно, чтобы возбудить резонансы электрического типа, которые имеют место при ориентации колец в поперечном сечении волновода ($\theta = 0, \varphi = 0$). Заметим, что при ориентации ($\theta = 0, \varphi = 0$) все кольцо находится в зоне максимума поля E_y , и те компоненты, которые приходились на «пустоту» кольца при ориентации $\varphi = 0$, взаимодействуют полностью с кольцом. Таким образом, в случае ориентации ($\theta = 0, \varphi = 0$) интенсивности электрического поля E_y достаточно, чтобы возбудить резонансы электрического типа, поскольку в данном случае волна взаимодействует со всей массой кольца.

Ориентация колец в E -плоскости волновода ($\theta = 90$)

При такой ориентации колец в волноводе наблюдаются значительные смещения резонансов магнитного типа в длинноволновую область по сравнению с ориентациями ($\theta = 0, \varphi = 0$) и $\varphi = 90^0$ (табл. 3). Поскольку, начиная с толщины кольца $l = 3,5$ мм, резонансы смещаются за пределы диапазона длин волн, обеспечиваемого линией передачи на базе стандартного волновода $12,6 \times 28,5 \text{ мм}^2$, то дальнейшие исследования проводились в волно-

водном тракте сечением $15 \times 35 \text{ мм}^2$. Результаты измерений, полученные в этом диапазоне длин волн (3,62...5,38 см) в табл. 3 отмечены звездочкой (*).

Так как частотные диапазоны панорамных измерителей на базе стандартных волноводов $12,6 \times 28,5 \text{ мм}^2$ и $10 \times 15 \text{ мм}^2$ имеют перекрытие, то это дало возможность сопоставить результаты измерений, полученные для ряда колец, расположенных в этих волноводах. Из этих результатов следует, что для колец толщиной от 2,7 до 3,2 мм, расположенных в волноводе $10 \times 15 \text{ мм}^2$, резонансная длина волны увеличивается на 0,8...2,5%, а резонансные значения K_{CTU} уменьшаются в 1,5...2 раза по сравнению с расположением ДРР в волноводе $12,6 \times 28,5 \text{ мм}^2$. Очевидно, что такие изменения резонансных характеристик связаны с влиянием стенок волновода на эти характеристики. Но проведенные исследования показали, что для обоих этих случаев расположения колец в волноводах изменение ориентации колец с $(\theta = 0, \varphi = 0)$ на $\theta = 90^\circ$ приводит к значительным смещениям резонансов магнитного типа в длинноволновую область.

Увеличение длины волны для колец, ориентированных в E -плоскости волновода, связано с тем, что при таком расположении кольцо полностью находится в максимуме поля H_x , в то время как при $\theta = 0, \varphi = 0$ большая часть плоскости кольца, кроме его диаметра, параллельно узким стенкам волновода, размещена в зоне, где компонента H_x , изменяясь по синусоидальному закону, имеет значения поля меньшие, чем посередине широкой стенки волновода.

Из табл. 3 также следует, что коэффициенты смещения при ориентации колец в E -плоскости по мере увеличения толщины кольца от 2,7 до 4,83 мм монотонно уменьшаются от значений 1,48-1,52 до 1,28 соответственно. Таким образом, из поведения коэффициента смещения можно сделать вывод, что по мере приближения толщины кольца к такой, которая характерна уже для трубчатых цилиндров ($l > D$), зависимости резонансной длины волны магнитного резонанса первого порядка все более приближаются к аналогичной зависимости для трубчатых цилиндров [6].

Для резонансов электрического типа первого порядка резонансные длины волн, характерные для ориентации кольца в плоскости поперечного сечения волновода ($\theta = 0, \varphi = 0$) табл. 2, практически не изменяются, однако резонансные значения K_{CTU} уменьшаются в 2-10 раз. Очевидно, что такое поведение резонансов электрического типа связано с тем, что компонента E_y электрического поля волны H_{10} параллельна плоскости поперечного сечения волновода. А в случае ориентации кольца в E -плоскости ($\theta = 90^\circ$) в возбуждении резонанса участвуют все значения компоненты $E_{y \max}$ с максимальной амплитудой, приходящиеся на середину широкой стенки волновода, в то время как при ориентации $\theta = 0, \varphi = 0$ в возбуждении резонанса совместно с $E_{y \max}$ принимают участие все значения компоненты E_y , которые приходятся на зону, занимаемую кольцом с такой ориентацией.

Сопоставление характеристик рассеяния волн на кольце и диске одинаковых размеров

Для сопоставления характеристик рассеяния волн кольцо и диск последовательно размещали в геометрическом центре поперечного сечения волновода, сечение которого $12,6 \times 28,5 \text{ мм}^2$. Плоскости исследуемых ДРР совпадали с плоскостью поперечного сечения волновода ($\theta = 0, \varphi = 0$). Кольцо и диск были изготовлены из материала с $\epsilon = 88$ и $\text{tg } \delta = 0,001$. Толщина колец и дисков составляла 2,7 мм, диаметр диска совпадал по величине с внешним диаметром кольца и был равен 5,76 мм.

Как показали исследования, резонансные картины этих ДРР существенно различаются. Так, в исследуемом диапазоне в случае кольца существует лишь резонанс отражения маг-

нитного типа первого порядка ($\lambda = 2,42$ см) с сопутствующим ему резонансом прохождения со стороны длинных волн ($\lambda = 2,52$ см).

В случае диска в этом же диапазоне длин волн наблюдаются резонансы первого порядка магнитного типа ($\lambda = 3,95$ см) и электрического ($\lambda = 3,7$ см) с сопутствующими резонансами прохождения.

Из сопоставления характеристик рассеяния следует вывод, что в случае диска компоненты магнитного поля H_x, H_z и электрического E_y взаимодействуют с большей массой, чем у кольца, находящегося в таких же условиях, как и диск. Поэтому возбуждение резонансов магнитного и электрического типа первого порядка происходит раньше, чем у кольца.

Выводы

1. Рассеяние электромагнитных волн на диэлектрических кольцах малых размеров по сравнению с длиной волны, изготовленных из материалов с высокими значениями ϵ и малыми $tg\delta$ и расположенных в волноводах, носит резонансный характер.

2. Возникающие резонансы – парные: рядом с резонансом отражения всегда находится резонанс прохождения.

3. Изменение геометрических размеров кольца приводит к изменению резонансной длины волны.

4. В диапазоне длин волн 2,4–3,5 см при изменении толщины колец от 1 до 4,8 мм и диаметре 5,76 мм существует лишь резонанс магнитного типа первого порядка. При более толстых кольцах появляются резонансы электрического типа первого порядка.

5. Изменение ориентации кольца в волноводе по-разному влияет на положение магнитного резонанса первого порядка. Ориентация колец в H -плоскости волновода может незначительно изменить резонансную длину волны по сравнению с ориентацией кольца в плоскости поперечного сечения волновода. Среднее значение коэффициента смещения резонанса составляет 1,01. Ориентация колец в E -плоскости волновода приводит к значительным изменениям положения резонанса магнитного типа. Для рассматриваемых толщин коэффициент смещения монотонно уменьшается от 1,5 до 1,28.

6. Размещение кольца в волноводе сечением 15×35 мм² приводит к увеличению резонансной длины волны на 0,8–2,5 % по сравнению с аналогичным расположением в волноводе сечением $12,6 \times 28,5$ мм² и уменьшению резонансных значений K_{CTU} в 1,5–2 раза.

7. Из сопоставления резонансных характеристик рассеяния волн на диэлектрических кольцах и дисках одинаковой толщины и равных диаметрах (по внешнему диаметру кольца) установлено, что эти характеристики значительно отличаются друг от друга.

8. Сравнение характеристик рассеяния волн на диэлектрических кольцах и дисках, на сплошном и трубчатом цилиндрах [6] и телах с эквивалентными объемами и равным соотношением осей [5] показало, что в возникновении резонансов, кроме электродинамических характеристик, геометрических размеров и формы тел, существенную роль играет также масса тела.

Список литературы: 1. Okaja A., Barash L.J. The dielectric resonator // PIPE. 1962. V.50, №10. P.2115-2126. 2. Диэлектрические резонаторы / Под ред. М.Е. Ильченко. М.: Радио и связь, 1989. 328 с. 3. Козарь А.И., Хижняк Н.А. Отражение электромагнитных волн от резонансной диэлектрической сферы в волноводе // Укр.физ. журн. 1970. Т.15, №5. С. 847-849. 4. Хижняк Н.А. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. Киев: Наук. думка, 1986. 280 с. 5. Украинец Н.И., Хижняк Н.А. К вопросу о рассеянии электромагнитных волн на малых диэлектрических телах с эквивалентными объемами и равным соотношением осей в прямоугольном волноводе // Вестн. Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника. 1986. № 285. С.47-49. 6. Козарь А.И., Украинец Н.И. Резонансное рассеяние электромагнитных волн на эквивалентных трубчатом и сплошном диэлектрических цилиндрах в волноводе // Радиотехника: Всеукр. науч.-техн.сб. 1997. Вып. 101. С.145-148.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 31.07.2009