

**ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОЙ
НЕОДНОРОДНОСТИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ**

Н. И. Украинаец, Н. А. Хижняк

Х а р ь к о в

Ранее [1, 2] проведены теоретические и экспериментальные исследования резонансного рассеяния электромагнитных волн на диэлектрической неоднородности сферической геометрии в прямо-

угольном волноводе. Зависимость величины коэффициентов отражения от частоты имеет резонансный характер. Показано, что наиболее узкий резонанс наблюдается в случае сферы, расположенной в центре волновода. Экспериментально исследовано расщепление резонанса, которое, как показывают расчеты, обусловлено влиянием стенок волновода на внутреннее поле в сфере. В настоящее время имеется полное теоретическое истолкование тонкой структуры резонансной кривой для этого случая.

Экспериментальное исследование рассеяния электромагнитных волн от диэлектрической неоднородности эллипсоидальной геометрии, проведенное при тех же условиях, что и для сферической неоднородности, показывает значительное расширение резонансной кривой и более сложную ее структуру [3]. Объяснение этому явлению можно искать в теории, однако теоретический анализ рассеяния волн на резонансных эллипсоидах еще не проведен. Чтобы выяснить физику самого явления, мы провели дополнительные экспериментальные исследования.

Исходные предпосылки основываются на следующих соображениях. В случае искусственных диэлектриков [4], образованных правильными решетками эллипсоидальных частиц, их дисперсия, анизотропия и прочие свойства могут быть обусловлены либо дисперсией (анизотропией) самих рассеивающих тел, либо дисперсией (анизотропией) пространственной решетки. В некотором смысле влияние рассеивающего тела может быть усилено или скомпенсировано геометрией пространственной решетки.

Действительно, при рассмотрении рассеяния волн на диэлектрическом теле в прямоугольном волноводе необходимо учитывать наличие стенок волновода, например, с помощью метода зеркальных изображений, что и приводит в конечном итоге к ситуации, имеющей место в искусственных диэлектриках. Рассеяние волн на одной неоднородности с учетом стенок в электродинамическом отношении эквивалентно рассеянию волн на решетке из этих неоднородностей в свободном пространстве. Можно поэтому ожидать, что анизотропию рассеяния и дисперсию резонансных свойств усиливают или ослабляют изменением положения сферы или эллипсоида в сечении волновода или же изменением геометрии самого рассеивающего тела.

Целью настоящей работы является систематическое экспериментальное исследование резонансного рассеяния волн на диэлектрическом эллипсоиде в прямоугольном волноводе в зависимости от его положения относительно стенок волновода и сравнение с аналогичным рассеянием на диэлектрической сфере в целях обнаружения усиления или ослабления дисперсионных свойств рассеяния в зависимости от положения тела и геометрии волновода.

Блок-схема измерений состояла из генератора сигналов, ферритового вентилля, измерительной линии, измерительной секции с исследуемой неоднородностью, согласованной нагрузки и индикатора. Измерительная секция представляет собой специально

сконструированное устройство с микрометрическими винтами для перемещения неоднородности в волноводе. Вся измерительная установка выполнена на волноводе сечением 10×23 мм. Эллипсоид вращения и сфера были изготовлены из одного и того же материала с $\epsilon = 151$, $\text{tg} \delta = 0,002$. Размеры эллипсоида: $2a = 10$ мм, $2b = 5$ мм, где a , b — большая и малая полуоси эллипсоида. Диаметр сферы равен меньшей оси эллипсоида вращения.

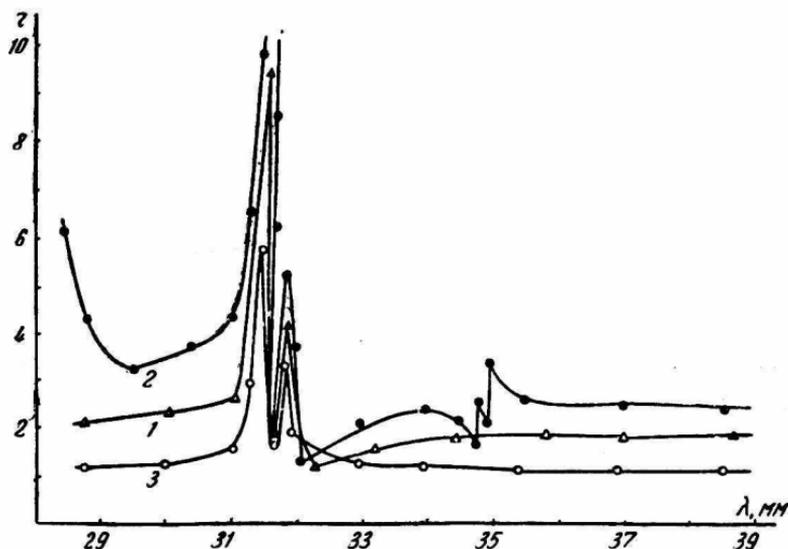


Рис. 1. Зависимость коэффициентов стоячих волн от длины рассеиваемой электромагнитной волны для диэлектрической сферы диаметром 5 мм:

1 — сфера в геометрическом центре поперечного сечения волновода; 2 — сфера посередине широкой стенки волновода; 3 — сфера посередине узкой стенки волновода.

Из рис. 1 видно, что для сферы, расположенной в геометрическом центре поперечного сечения волновода, резонанс очень узкий (кривая 1). Наблюдается лишь тонкое расщепление резонанса, обусловленное влиянием стенок волновода. При перемещении сферы к середине широкой стенки волновода полоса и коэффициенты стоячих волн (следовательно, и коэффициенты отражения) увеличиваются. Возникает также новый дополнительный резонанс электрического типа на длине волны $\lambda = 35$ мм (кривая 2). Но аналогичное расширение резонансной полосы наблюдается [3] и при вращении диэлектрического эллипсоида, расположенного в геометрическом центре поперечного сечения волновода, вокруг осей волновода. Следовательно, сфера, размещенная посередине широкой стенки волновода, ведет себя подобно эллипсоиду.

При перемещении сферы из геометрического центра поперечного сечения волновода к середине узкой стенки происходит лишь уменьшение коэффициентов стоячих волн с сохранением резонансов

на тех же частотах, что и для случая, когда сфера находится в геометрическом центре поперечного сечения волновода. Кривая 3 рис. 1 соответствует случаю, когда сфера находится посередине узкой стенки волновода. Таким образом, широкая стенка волновода усиливает отражение электромагнитной волны от диэлектрической сферы, а узкая — ослабляет.

Начальное положение диэлектрического эллипсоида вращения в волноводе характеризуется значениями: $x = 0$, $y = 0$. $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. Здесь x , y — координаты геометрического центра эллипсоида вращения, θ — угол между большой осью эллипсоида и продольной осью z волновода (θ , φ — эйлеровские углы прецессии и нутации соответственно). Начало системы координат совпадает с геометрическим центром поперечного сечения волновода. Основной резонанс для диэлектрического эллипсоида вращения с ориентацией в волноводе $x = 0$, $y = 0$, $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ проявляется на длине волны $\lambda_1 = 33,40$ мм. Кроме этого, в исследуемом диапазоне наблюдаются четко выраженные резонансы на длинах волн: $\lambda_2 = 30,90$ мм, $\gamma_3 = 35,30$ мм, $\gamma_4 = 37,90$ мм. Коэффициенты стоячих волн, измеренные по методике, применяемой для измерения больших КСВ составляли соответственно на этих длинах волн: $r_1 = 9,70$; $r_2 = 4,81$; $r_3 = 2,05$; $r_4 = 3,32$.

По мере приближения эллипсоида к широкой стенке волновода растут коэффициенты стоячих волн на всех частотах. Когда эллипсоид касается широкой стенки волновода, все резонансы увеличиваются по амплитуде и составляют соответственно $r'_1 = 10,80$; $r'_2 = 7,75$; $r'_3 = 3,13$; $r'_4 = 4,00$. Затем основной резонанс смещается с длины волны $\lambda_1 = 33,40$ мм на длину волны $\lambda'_1 = 33,80$ мм. Смещается также и резонанс с длины волны $\lambda_2 = 30,90$ мм на длину волны $\lambda'_2 = 31,38$ мм. Коэффициенты стоячих волн в резонансной области между этими длинами волн увеличиваются до уровня 4—5, тогда как для эллипсоида, расположенного в геометрическом центре поперечного сечения волновода, коэффициенты стоячих волн составляли лишь 2—2,5. Структура кривой в резонансной области между длинами волн $\gamma'_2 = 31,38$ мм и $\lambda'_1 = 33,80$ мм становится более сложной. Таким образом, широкая стенка волновода усиливает отражение и от диэлектрического эллипсоида, когда последний касается ее.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов стоячих волн от длины рассеиваемой электромагнитной волны для диэлектрического эллипсоида вращения с такой же начальной ориентацией, что и в предыдущем случае, но теперь эллипсоид перемещался по оси x , т. е. вдоль широкой стенки волновода. Здесь мы встречаемся с интересным случаем, когда эллипсоид касается узкой стенки волновода (кривая 2). При этом сужается резонансная полоса. Резонансы на длинах волн $\lambda_1 = 33,40$ мм и $\lambda_2 = 30,90$ мм (кривая 1) сдвигаются, и получается как бы расщепленный резонанс магнитного типа второго порядка, как и для диэлектри-

ческой сферы диаметром 5 мм, помещенной в геометрический центр поперечного сечения волновода. Все резонансы по мере приближения к узкой стенке уменьшаются по амплитуде. Эллипсоид ведет себя в этом случае как сфера. Объяснить это можно, опять-таки, пользуясь аналогией с искусственным диэлектриком.

Действительно, если рассмотреть диэлектрик, образованный сферой, расположенной на узкой стенке волновода, и ее отражениями в стенках, а также искусственный диэлектрик, образованный

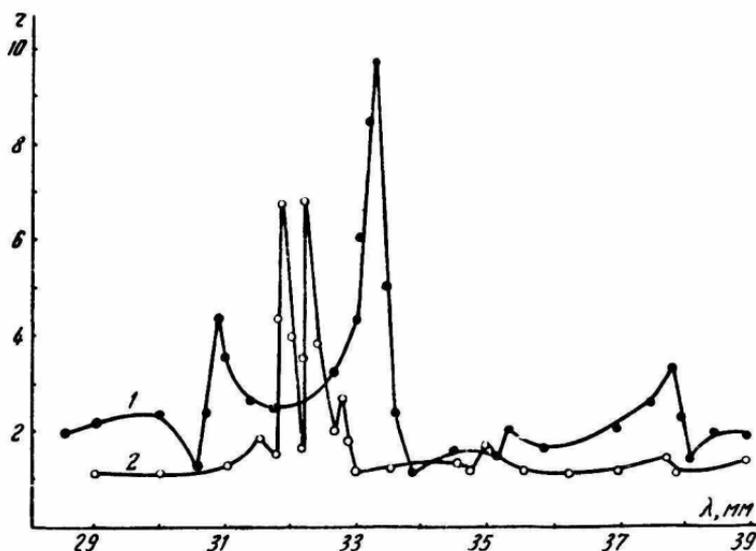


Рис. 2. Зависимость коэффициентов стоячих волн от длины рассеиваемой электромагнитной волны для диэлектрического эллипсоида вращения: положение эллипсоида:

$\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $y = 0$, $x = 0$ (кривая 1); $(x = 9 \text{ мм})$ (кривая 2).

эллипсоидом вращения с ориентацией как в нашем случае, то легко заметить, что пространственные решетки для них одинаковы. А так как сфера и эллипсоид находятся в минимуме электрического поля, то, очевидно, и следует ожидать проявления одинаковых свойств таких искусственных диэлектриков. Но поскольку сами рассеивающие тела отличаются геометрией, это проявляется в некотором небольшом смещении резонансных частот и возникновении малых дополнительных резонансных пиков в области основного резонанса. Для случаев, когда сфера и эллипсоид находятся на широкой стенке в пучности электрического поля, пространственные решетки таких искусственных диэлектриков совпадают, однако влияние геометрии самих рассеивающих тел проявляется в гораздо большей степени.

Рассмотрим случай, когда диэлектрический эллипсоид вращения ориентирован в волноводе так, что $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. При расположении эллипсоида с такой ориентацией в геометрическом центре

поперечного сечения волновода основной резонанс смещается с длины волны $\lambda_1 = 33,40$ мм на длину волны $\lambda_1'' = 32,20$ мм. Резонанс на длине волны $\lambda_4 = 37,90$ мм исчезает, а резонанс на длине волны $\lambda_2 = 30,90$ мм лишь уменьшается по амплитуде. Резонансная область между длинами волн $\gamma_2 = 30,90$ мм и $\lambda_1'' = 32,20$ мм (кривая 1, рис. 3) становится гораздо уже по сравнению с тем случаем, когда эллипсоид ориентирован так, что $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$.

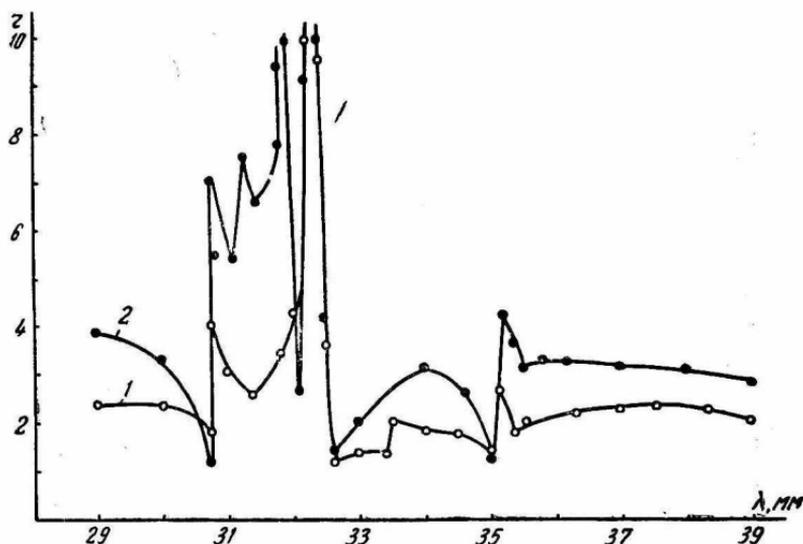


Рис. 3. Зависимость коэффициентов стоячих волн от длины рассеиваемой электромагнитной волны для диэлектрического эллипсоида вращения: положение эллипсоида: $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, $x = 0$, $y = 0$ (кривая 1); $y = 2,50$ мм (кривая 2).

При перемещении эллипсоида к широкой стенке волновода вдоль оси y опять-таки наблюдается увеличение коэффициентов стоячих волн. Характерным для этой позиции является расщепление основного резонанса, когда эллипсоид находится посередине широкой стенки волновода (кривая 2, рис. 3).

Перемещение эллипсоида вращения вдоль оси x характеризуется возникновением резонансов по мере приближения к узкой стенке волновода на длинах волн $\lambda = 33$ мм и $\lambda = 37,70$ мм. При этом, когда эллипсоид касается узкой стенки волновода, резонанс на длине волны $\lambda = 33$ мм становится расщепленным. Размещение эллипсоида на узкой стенке приводит к уменьшению коэффициентов стоячих волн. Амплитуда основного резонанса уменьшается до величины $r = 3,74$. Уменьшается по амплитуде и резонанс на длине волны $\gamma_2 = 30,90$ мм $r = 2,37$.

Было проведено исследование для случая, когда диэлектрический эллипсоид вращения накоротко замыкает волновод по

электрическому полю, т. е. ориентация эллипсоида в волноводе такова, что $y = 0$, $\Theta = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$. Перемещение эллипсоида в этом случае возможно лишь в направлении оси x . Для $x = 0$ характерно значительное увеличение КСВ по всему диапазону с рядом узких полос прозрачности. Коэффициенты стоячих волн в полосах прозрачности достигают величин порядка 1,10—1,20. Касание узкой стенки волновода с такой ориентацией приводит к уменьшению КСВ и выделению ряда резонансов.

Для изучения влияния геометрии волновода на дисперсионные свойства рассеяния электромагнитных волн рассеивающие тела (сфера, эллипсоид) помещались в волновод сечением $12,6 \times 28,5$ мм. В таблице приведены результаты измерений для диэлектрической сферы, расположенной в геометрическом центре поперечного сечения волноводов 10×23 мм и $12,6 \times 28,5$ мм. Следует заметить, что для одних и тех же частот КСВ или диэлектрической резонансной сферы, расположенной в волноводе 10×23 мм, всегда по величине больше, чем КСВ для аналогичного расположения сферы в волноводе $12,6 \times 28,5$ мм. Лишь в области резонанса такое утверждение может быть несправедливым, если резонанс расщеплен.

Из таблицы видно, что для сферы, расположенной в волноводе $12,6 \times 28,5$ мм, обе амплитуды расщепленного резонанса примерно одинаковы по величине. Для сферы же, расположенной в волноводе 10×23 мм, одна из амплитуд расщепленного резонанса превышает другую в три раза. Последняя оказывается меньшей по величине, чем соответствующая амплитуда расщепленного резонанса для сферы, расположенной в волноводе $12,6 \times 28,5$ мм. Кроме этого, резонансные длины волн для волновода 10×23 мм несколько смещены в сторону укорочения длины волны по сравнению с волноводом $12,6 \times 28,5$ мм.

Исследовалось также рассеяние электромагнитной волны на диэлектрической сфере, расположенной посередине широкой стенки волноводов 10×23 мм и $12,6 \times 28,5$ мм. Сравнение показывает, что для сферы, расположенной посередине волновода $12,6 \times 28,5$ мм, исчезают расщепления резонансов, которые имеют место для того же расположения сферы в волноводе 10×23 мм.

Аналогичные исследования проводились и для диэлектрического эллипсоида вращения. Так, для эллипсоида с ориентацией $\Theta = 0^\circ$,

Длина волн, мм	КСВ	
	волновод 10×23 мм	волновод $12,6 \times 28,5$ мм
29,00	1,95	1,60
30,00	2,20	1,70
31,00	2,50	1,85
31,50	5,80	2,75
31,55	12,00	3,00
31,60	6,00	3,40
31,65	4,05	6,50
31,75	1,80	1,75
31,85	4,00	3,10
31,95	2,75	6,75
32,00	1,50	2,60
32,25	1,10	1,25
32,50	1,25	1,03
33,00	1,45	1,25
35,00	1,75	1,40
37,00	1,75	1,35
39,00	1,75	1,35

$\varphi = 0^\circ$, расположенного в геометрическом центре поперечного сечения волноводов, основной резонанс для волновода $12,6 \times 28,5$ мм становится расщепленным. Коэффициенты стоячих волн по величине для диэлектрического эллипсоида вращения, расположенного в волноводе 10×23 мм, на одних и тех же длинах волн больше, чем для эллипсоида, расположенного в волноводе $12,6 \times 28,5$ мм. Размещение эллипсоида с ориентацией $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ в волноводе

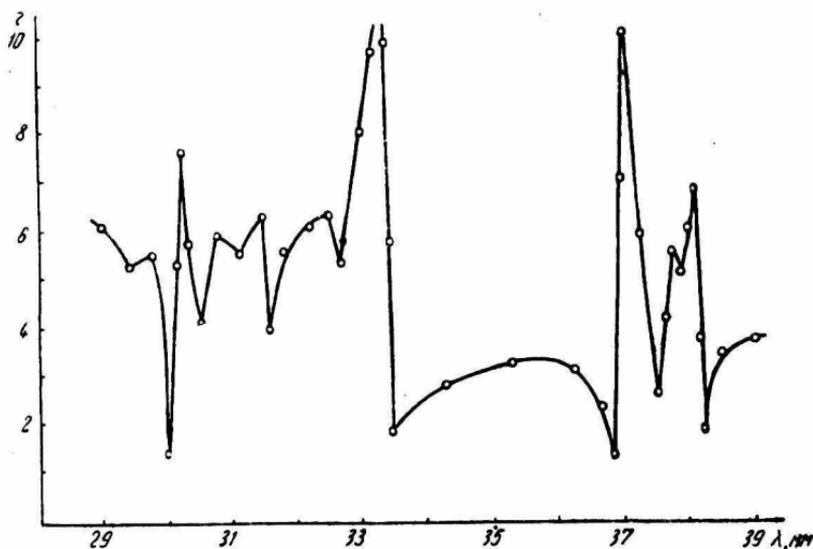


Рис. 4. Зависимость коэффициентов стоячих волн от длины рассеиваемой электромагнитной волны для диэлектрического эллипсоида вращения, расположенного в волноводе $12,6 \times 28,5$ мм; положение эллипсоида $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, $x = 0$, $y = 0$.

$12,6 \times 28,5$ мм приводит к изменению характера резонансной кривой по сравнению с аналогичным расположением эллипсоида в волноводе 10×23 мм (рис. 4).

Таким образом, изменение геометрии волновода также обуславливает изменение резонансных кривых, что проявляется в изменении амплитуд резонансов, некотором смещении резонансной области, в исчезновении или возникновении расщепления резонансов и даже в изменении характера резонансной кривой (например, случай, когда диэлектрический эллипсоид вращения ориентирован в волноводах так, что его большая ось совпадает с направлением электрического поля, т. е. $y = 0$, $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$).

Анализ погрешностей показывает, что среднеквадратичная ошибка измерений коэффициентов стоячих волн в области резонансов и больших КСВ составляет $\pm 4,5\%$, а в области небольших КСВ, вдали от резонансов, не превышает $\pm 1,5\%$.

ВЫВОДЫ

1. Анизотропию рассеяния и дисперсию коэффициента отражения в резонансной области можно усиливать или ослаблять изменением положения диэлектрической резонансной неоднородности в сечении волновода.

2. Максимальное отражение и расширение резонансной полосы наблюдается, когда рассеивающая диэлектрическая сфера находится на широкой стенке волновода, минимальное — при размещении рассеивающего тела на узкой стенке.

3. Размещение диэлектрической сферы на широкой стенке волновода приводит к расширению резонансной полосы так же, как и вращение эллипсоида, расположенного в геометрическом центре поперечного сечения волновода, вокруг осей волновода.

4. Изменение геометрии самого рассеивающего тела вызывает изменение резонансной полосы при размещении диэлектрической резонансной неоднородности в геометрическом центре поперечного сечения волновода.

5. Изменение геометрии волновода ведет к усилению или ослаблению дисперсионных свойств рассеяния электромагнитной волны на диэлектрической резонансной неоднородности и к изменению характера резонансной кривой.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Козарь, Н. А. Хижняк. УФЖ, 15, 5, 1970.
2. А. И. Козарь, Н. А. Хижняк. Сб. «Радиотехника», вып. 14. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.
3. М. І. Українець, М. А. Хижняк. «Вісник Харківського університету. Радіофізика і електроніка», вип. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1972.
4. Н. А. Хижняк. ЖТФ, 27, 1957.