

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ЭЛЛИпсоИД В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Диэлектрические резонансные рассеиватели (ДРР) находят широкое применение в различных областях техники СВЧ [1]. В связи с этим комплексное изучение физики явлений в устройствах с ДРР является актуальным и в настоящее время. Это объясняется тем, что такие рассеиватели имеют малые размеры по сравнению с длиной электромагнитной волны и обладают уникальными характеристиками, что позволяет создавать высокоэффективные миниатюрные СВЧ системы различного назначения.

Так, совмещение ДРР с рупорными и волноводными излучателями позволяет реализовывать полосовые и режекторные антенны-фильтры, что способствует также решению проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных систем (РЭС). Характеристики таких РЭС существенно зависят от электродинамических и геометрических параметров, формы, ориентации и местоположения ДРР в рассматриваемом устройстве. Поэтому необходимость всестороннего изучения особенностей рассеяния электромагнитных волн на ДРР, совмещенных с конкретными устройствами СВЧ, в том числе и расположенных в ближней зоне излучателей, бесспорна.

Особый смысл приобретают исследования резонансных характеристик рассеяния волн на малых диэлектрических телах в ближней зоне волноводных излучателей в связи с обнаружением на резонансных частотах пропускания существенного изменения структуры поля между излучателем и резонансным шаром, характеризующегося значительным ростом амплитуды и фокусировкой луча вдоль оси, соединяющей геометрические центры поперечного сечения волновода и шара [2]. Обнаруженные явления открывают новые возможности применения малогабаритных устройств микроволнового диапазона на базе диэлектрических резонансных рассеивателей, поскольку с их помощью можно управлять характеристиками полей излучателей.

Целью данной работы является экспериментальное исследование резонансного рассеяния электромагнитных волн на малом диэлектрическом эллипсоиде вращения, расположенном в ближней зоне прямоугольного волноводного излучателя трехсантиметрового диапазона длин волн.

Параметры эллипсоида следующие: $\epsilon = 151$, $\operatorname{tg} \delta = 0,002$, $2a = 10$ мм, $2b = 5$ мм, где ϵ – диэлектрическая проницаемость материала, из которого изготовлен эллипсоид; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; $2a$ и $2b$ – соответственно большая и малая оси эллипсоида.

Эллипсоид размещали в ячейках пенопластовой подложки, находящихся на определенных расстояниях одна от другой. Подложка укреплялась в свободном пространстве так, что геометрические центры эллипсоида вращения и поперечного сечения волновода совпадали. Коэффициенты стоячих волн для такой подложки, совмещенной с излучателем, в исследуемом диапазоне не превышали 1,8.

Исследования проводились для трех характерных ориентаций эллипсоида: 1) большая ось эллипсоида совпадает с продольной осью z волновода ($\Theta = 0$, где Θ – угол между осями); 2) большая ось эллипсоида перпендикулярна узким стенкам волновода ($\Theta = 90^\circ$) и направлена вдоль оси x ; 3) большая ось эллипсоида перпендикулярна широким стенкам волновода ($\varphi = 90^\circ$, где φ – угол между большой осью эллипсоида и продольной осью волновода) и совпадает с осью y .

Начало декартовой системы координат находится в геометрическом центре поперечного сечения открытого конца волновода.

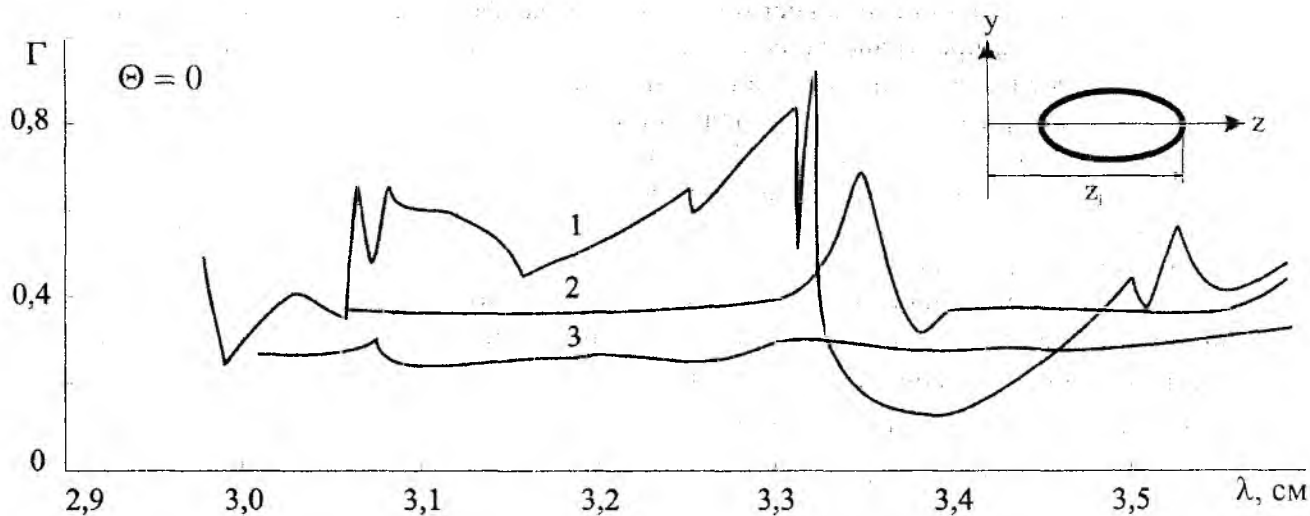


Рис. 1

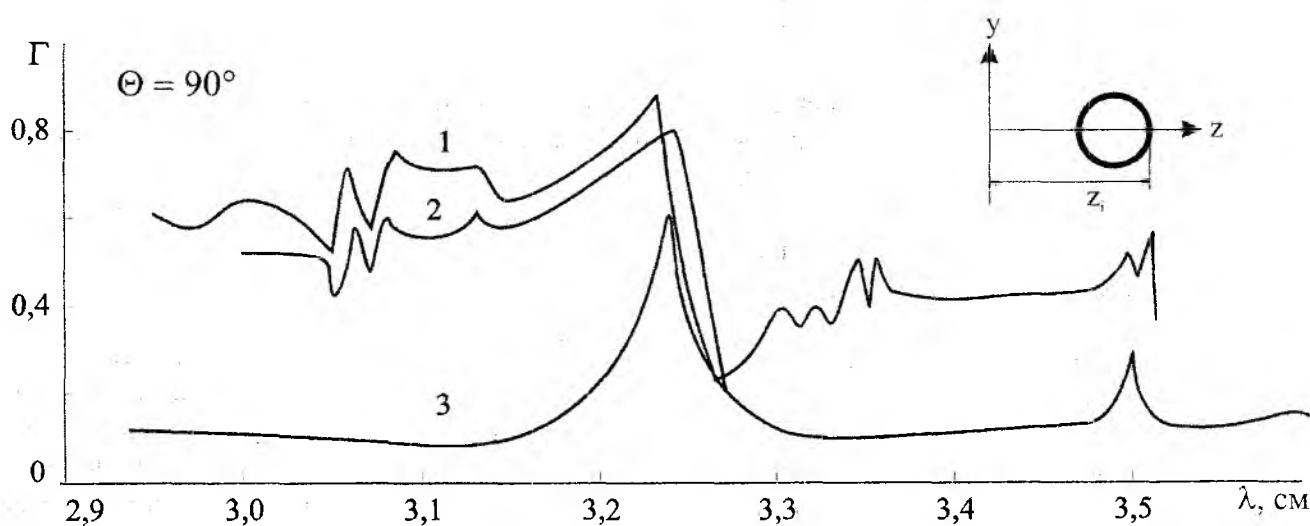


Рис. 2

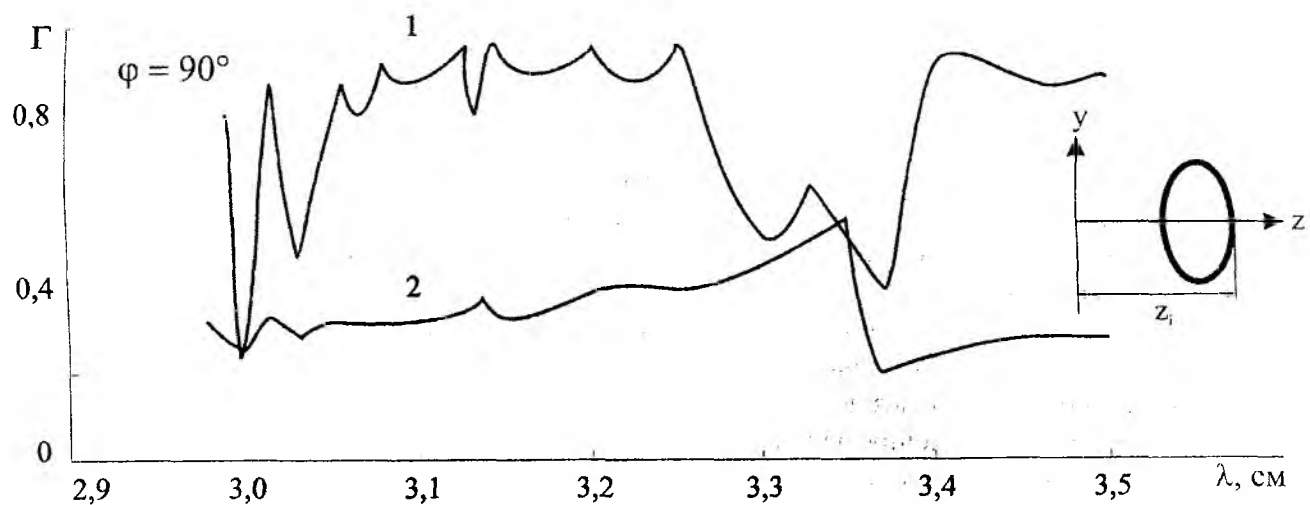


Рис. 3

Полученные дисперсионные зависимости модуля коэффициента отражения волн от эллипсоида в свободном пространстве сопоставлялись с аналогичными характеристиками при расположении рассеивателя в полубесконечном волноводе.

Результаты экспериментальных исследований для эллипсоида в ближней зоне прямоугольного волновода приведены на рис. 1–6, а в случае расположения рассеивателя в геометрическом центре поперечного сечения полубесконечного волновода, изученного ранее [3], показаны на рис. 7 – 9. Исследования проводились с помощью автоматического измерителя коэффициентов стоячих волн.

Проанализируем полученные результаты. На рис. 1 представлены зависимости модуля коэффициента отражения Γ от длины волны λ для ориентации эллипсоида $\Theta = 0$ при следующих положениях рассеивателя: 1) $z_i = 0$ мм (кривая 1) – эллипсоид полностью находится внутри излучателя; 2) $z_i = 10$ мм (кривая 2) – эллипсоид находится в свободном пространстве, непосредственно примыкая к плоскости излучателя; 3) $z_i = 30$ мм (кривая 3).

Сравнение кривой 1 с графиком зависимости модуля коэффициента отражения от длины волны для эллипсоида с такой же ориентацией, расположенного в геометрическом центре поперечного сечения полубесконечного волновода (рис. 7), показывает, что эти характеристики незначительно отличаются одна от другой. Наблюдаемые смещения резонансных длин волн незначительны и не превышают 0,6 % для магнитных типов резонансов и 0,3% – для электрических.

Модули коэффициентов отражения на резонансных длинах волн отличаются также незначительно при соответствующих расположениях эллипсоида в открытом конце волновода излучателя и полубесконечном волноводе такого же поперечного сечения. Удаление эллипсоида от плоскости излучателя приводит к уменьшению резонансных значений модулей коэффициентов отражений резонансов обоих типов: и электрического, и магнитного. Наблюдается уменьшение модулей коэффициентов отражений и для нерезонансных областей (кривые 2 и 3).

На рис. 4 приведены зависимости резонансных значений модулей коэффициентов отражения от расстояния z_i эллипсоида от открытого конца волновода для резонансов магнитного (кривая 1) и электрического (кривая 2) типов. Резонансы отражения магнитного типа возникают в области длины волны 3,32 см, а электрического – 3,07 см (кривая 1, рис. 1). Особенностью этих резонансов является их расщепление. Как показывают исследования, тонкая структура электрических резонансов сохраняется практически до расстояний $z_i \approx \lambda/4$, а сами резонансы этого типа исчезают на расстояниях $z_i \approx \lambda/2$, хотя их «резонансный след» наблюдается ещё при $z_i \approx 1,5\lambda$.

В случае магнитных резонансов тонкая структура наблюдается практически до расстояний $z_i \approx \lambda$, а сами резонансы сохраняют «резонансный след», как и в случае электрических резонансов, при $z_i > 1,5\lambda$.

Отметим, что магнитный резонанс при удалении эллипсоида от плоскости открытого конца волновода смещается в длинноволновую область, однако наблюдаемые смещения по частоте небольшие и не превышали 1% по сравнению с расположением эллипсоида в открытом конце волновода.

Рассмотрим ориентацию эллипсоида $\Theta = 90^\circ$ (рис. 2). Отметим, что при повороте эллипсоида на 90° в случае его расположения в полубесконечном волноводе (рис. 8) расщепления резонансов обоих типов исчезли, положение резонанса электрического типа осталось неизменным, а резонанс отражения магнитного типа сместился на длину волны 3,24 см и сопутствующий ему сателлит-резонанс прохождения соответственно переместился на длину волны 3,28 см.

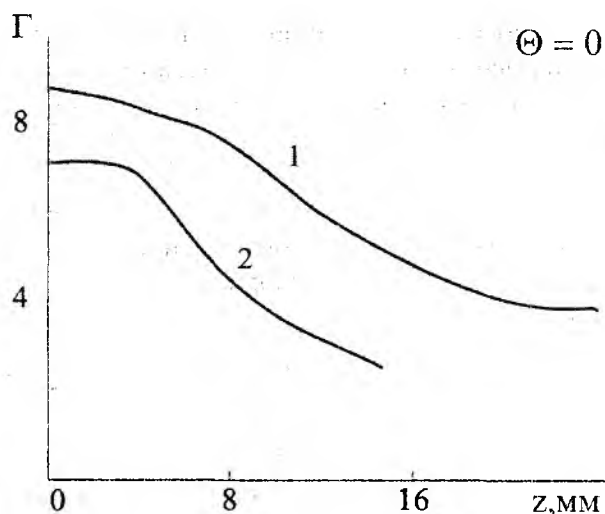


Рис. 4

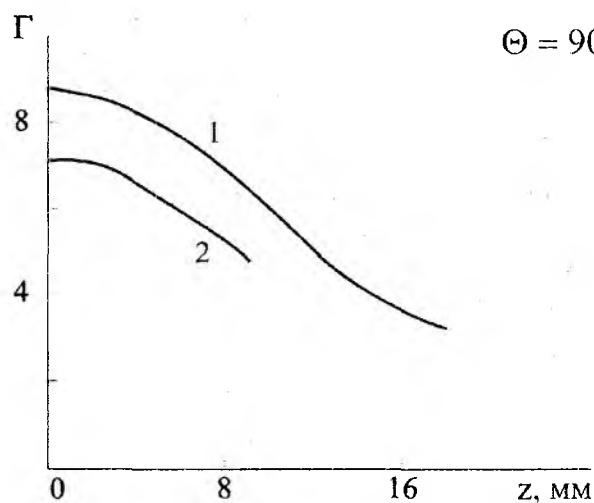


Рис. 5

В случае расположения эллипсоида с такой ориентацией в открытом конце волновода (кривая 1, $z_i = 0$ мм) и при его последующем размещении в ближней зоне излучателя (кривая 2, $z_i = 2,5$ мм) и (кривая 3, $z_i = 10$ мм) резонанс магнитного типа остается нерасщепленным, а в случае электрических резонансов тонкая структура сохраняется до расстояний $z_i \sim 0,08\lambda$. Таким образом, тонкая структура имеет место, когда рассеиватель находится в непосредственной близости от излучателя.

Исследования показали, что электрические резонансы практически исчезают при $z_i \approx \lambda/4$; а магнитные – при $z \sim \lambda/2$, хотя их «резонансный след» наблюдается ещё при $z_i \approx \lambda$.

Отметим, что по мере удаления эллипсоида от излучателя резонансные значения модулей коэффициентов отражения уменьшаются, о чем свидетельствуют графики, приведенные на рис. 5 (кривая 1 – $\lambda_m = 3,24$ см, кривая 2 – $\lambda_g = 3,07$ см).

Результаты исследования рассеяния электромагнитных волн на эллипсоиде с ориентацией $\varphi = 90^\circ$ в ближней зоне приведены на рис. 3. При размещении в открытом конце волновода ($z_i = 0$, кривая 1) эллипсоид, ориентированный таким образом, закорачивает волновод по электрическому полю волны H_{10} и касается обеих широких стенок волновода. На рис. 9 показана зависимость модуля коэффициента отражения от длины волны в случае расположения эллипсоида в полубесконечном волноводе. Как следует из графиков на рис. 9 и рис. 3 (кривая 1), такое расположение эллипсоида приводит к значительному изменению структуры резонансной кривой по сравнению с рассмотренными выше случаями. При этом модуль коэффициента отражения увеличивается до значений порядка 0,9 – 0,97 во всем диапазоне длин волн между резонансами прохождения на длинах волн 3 и 3,36 см и наблюдаются его осцилляции.

При удалении эллипсоида от излучателя тонкая структура, характерная для размещения рассеивателя в открытом конце волновода, снимается и становятся четко выраженными резонансы отражения (кривая 2, $z_i = 10$ мм) с их спутниками-резонансами прохождения.

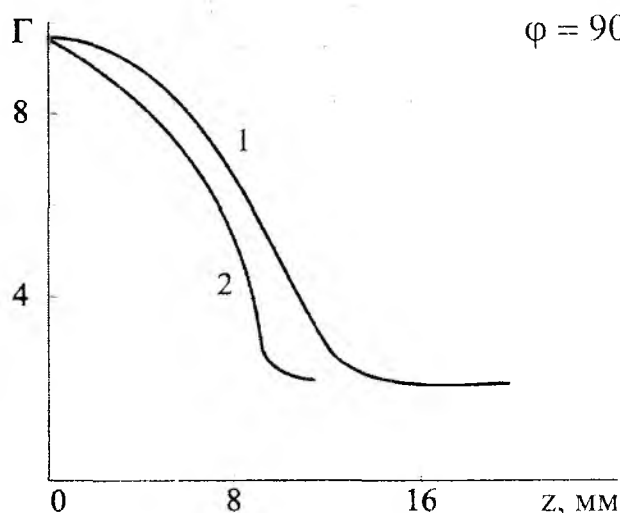


Рис. 6

Отметим, что резонансы обоих типов четко проявляются при такой ориентации эллипсоида в полубесконечном волноводе, если нет закорачивания его по электрическому полю, о чем свидетельствуют результаты исследований, приведенные в работе [3], в которой использовался волновод сечением $12,6 \times 28,5 \text{ мм}^2$, в то время как в данной работе в качестве излучателя применяется стандартный волновод сечением $10 \times 23 \text{ мм}^2$. Таким образом, одной из причин возникновения тонкой структуры резонансов является, по-видимому, влияние стенок волноводных излучателей. При удалении эллипсоида от излучателя «резонансный след», как установлено, сохраняется практически до расстояний $z_i \sim \lambda$.

Зависимости резонансных значений Γ от расстояния для магнитных и электрических резонансов показаны на рис. 6 (кривая 1 – $\lambda_m = 3,34 \text{ см}$; кривая 2 – $\lambda_g = 3,01 \text{ см}$).

Таким образом, анализ экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

- Рассеяние электромагнитных волн на малом диэлектрическом эллипсоиде с высоким значением ϵ и малым $\text{tg} \delta$ в ближней зоне волноводного излучателя носит резонансный характер.
- Резонансы отражения электрического типа исчезают при размещении эллипсоида на расстояниях $z_i \approx \lambda/2$ от излучателя, а магнитного – при $z_i \approx \lambda$.
- «Резонансный след» сохраняется почти до расстояния $z_i \approx 1,5\lambda$.

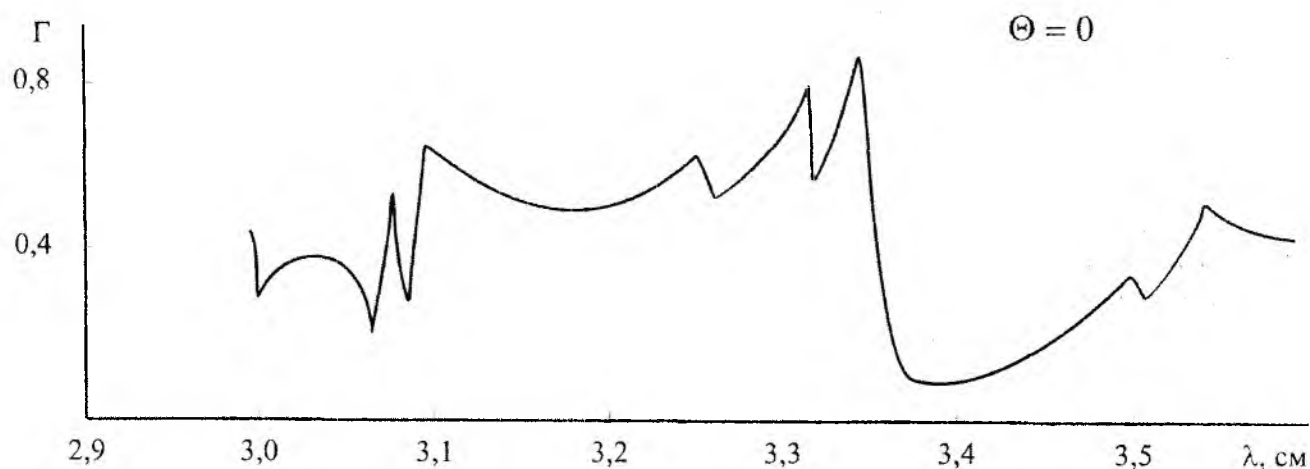


Рис. 7

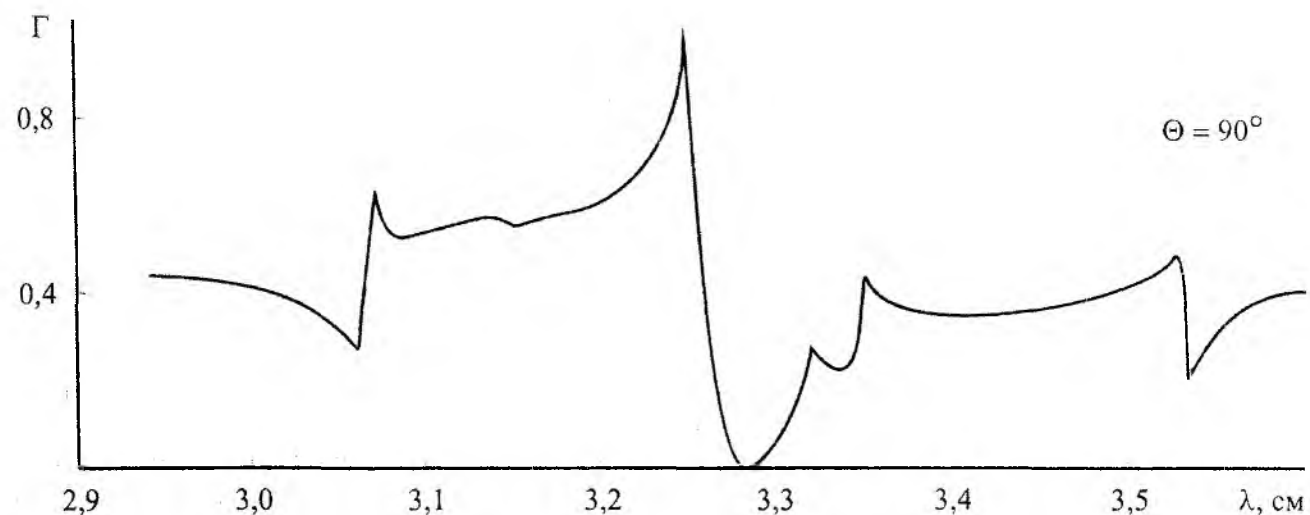


Рис. 8

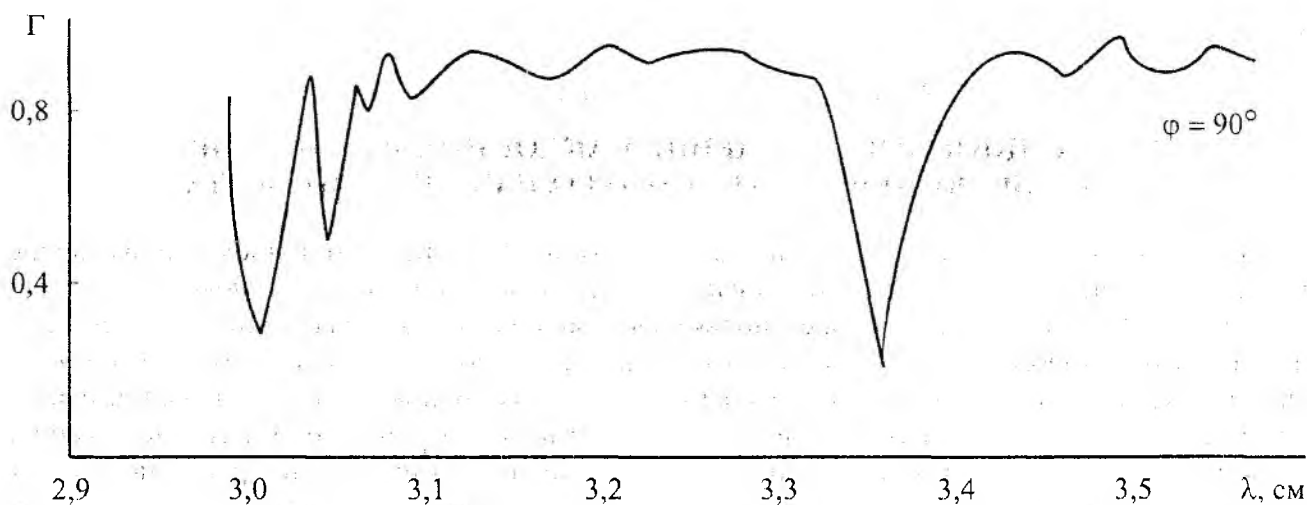


Рис. 9

Список литературы: 1. Диэлектрические резонаторы / М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхев, Л.Г. Гасанов и др. / Под ред. М.Е. Ильченко. М.: Радио и связь, 1989. 328 с. 2. Українець Н.І., Мокан Т.К. Диэлектрический резонансный шар в ближней зоне волноводного излучателя // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 5. С. 451–457. 3. Українець М.І., Хижняк М.А. Дослідження резонансного розсіяння електромагнітних хвиль на діелектричному еліпсоїді в прямокутному хвилеводі // Вісн. Харк. ун-ту. 1972. № 80. Радиофізика і електрон. С. 34–39.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 29.04.2004