

УДК 621.372.8

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ШАР В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ВОЛНОВОДНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Н. И. Украинец, Т. К. Мокан

Приведены результаты экспериментального исследования электрического поля вблизи диэлектрического резонансного шара, расположенного в открытом конце прямоугольного волновода или в ближней зоне. Изучено распределение полей на резонансных частотах отражения и прохождения и вдали от резонансов. Проведено сопоставление полученных результатов со случаем ненагруженного волноводного излучателя.

Диэлектрические резонаторы (ДР) находят широкое применение в различных устройствах СВЧ диапазона благодаря их уникальным техническим характеристикам. Использование на практике ДР становится более эффективным, если известно распределение электромагнитного поля в окрестности ДР. Особенно важно знать распределение поля при решении проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, когда отсутствие информации об особенностях распределения поля вблизи ДР может отрицательно сказаться на работоспособности устройства вследствие возможных искажений поля при работе на резонансных частотах, что и может привести к возникновению нежелательных помех. Актуальность проблемы весьма существенно возрастает в случае расположения ДР непосредственно в раскрыве излучателя либо в его ближней зоне.

Целью данной работы является экспериментальное исследование распределения поля в окрестности диэлектрического резонатора в форме шара, расположенного в открытом конце прямоугольного волновода и его ближней зоне. Для изучения поля вблизи ДР использовался метод непосредственного измерения поля с помощью пассивного рассеивающего зонда, модулирующего электромагнитное поле [1]. Хотя данный метод был разработан для измерения распределения электрического поля в волноводно-щелевых излучателях, однако в работе [2] показана возможность эффективного использования этого метода для измерения

распределения электрического поля в окрестности диэлектрического резонатора.

В настоящей работе приведены результаты систематического экспериментального исследования распределения электрического поля вблизи сферического диэлектрического резонатора для двух случаев расположения шара: 1) шар в геометрическом центре поперечного сечения открытого конца прямоугольного волновода; 2) шар в свободном пространстве на расстоянии, не превышающем половину длины волны от волноводного излучателя. В первом случае поле измерялось в свободном пространстве перед шаром, а во втором - вблизи шара со стороны волноводного излучателя.

При измерении распределения полей следует учитывать также следующие обстоятельства. Как известно, рассеяние электромагнитных волн на малых неоднородностях, изготовленных из высокопроницаемых диэлектриков с низкими потерями, характеризуется возникновением парных резонансов отражения и прохождения. При этом резонансы отражения подразделяются на резонансы электрического или магнитного типа [3]. В связи с этим представляет интерес исследовать поле на частотах, соответствующих резонансам отражения электрического и магнитного типов, а также на частотах их сателлитов, т. е. резонансов прохождения.

Для решения этой задачи были использованы два шара, изготовленные из диэлектрика с $\epsilon = 151$, $\text{tg}\delta = 0,002$ и диаметрами 5,2 и 6,3 мм. Рассеиватели были установлены на подложке из пенопласта в геометрическом центре поперечного сечения полубесконечного волновода с поперечными размерами 10×23 мм². Для шара диаметром 5,2 мм характерен резонанс отражения магнитного типа второго порядка на частоте 9515 МГц и сопутствующий ему резонанс прохождения на частоте 9330 МГц. В случае шара диаметром 6,3 мм характерными являются резонанс отражения электрического типа второго порядка на частоте 9532 МГц и сопутствующий ему резонанс прохождения на частоте 9770 МГц.

При измерениях необходимо также учитывать, что размещение ДР в открытом конце волновода приводит к незначительному (не более 0,9%) смещению резонансных частот, а при расположении ДР в ближней зоне волноводного излучателя резонансные эффекты исчезают, когда ДР расположен на расстояниях, превышающих половину длины волны от плоскости открытого конца волновода [4]. Поэтому во втором случае исследуемые шары размещались на специальном держателе из пенопласта на расстоянии менее $\lambda/4$, где λ - длина волны в свободном

пространстве. Распределения электрических полей снимались вдоль оси x , направленной вдоль широкой стенки волновода.

Рассмотрим полученные результаты измерений.

Шар в открытом конце прямоугольного волновода. При данном расположении шара на частотах резонансов отражения обоих типов в характере распределения электрического поля вдоль широкой стенки волновода принципиальных отличий не наблюдается. На резонансных частотах отражения внешнее поле значительно уменьшается (более чем в 3, 5 раза) по сравнению с ненагруженным открытым концом волновода.

В случае открытого конца волновода, как показали исследования, распределение электрического поля является синусоидальным. Отметим также, что для электрического типа колебаний эффект подавления поля более значительный и внешнее поле в центре кривой практически не отличается от точек вдали от центра и является по существу постоянным.

Таким образом, полученные результаты в случае резонансов отражения подтверждают правильность предположений об отсутствии поля вне диэлектрического резонатора, принятых в работе [5] при теоретическом анализе свойств ДР.

Однако в точках резонансов прохождения ($f = 9333$ МГц и 9770 МГц) такое предположение является уже неверным. Как следует из результатов измерения, наличие диэлектрического шара при резонансе прохождения приводит к увеличению амплитуды поля по сравнению с открытым концом волновода более чем в 2,4 раза. Следовательно, при резонансе прохождения вне диэлектрического резонатора существует весьма значительное внешнее поле.

Исследования показали также, что вдали от резонансных частот распределение поля при наличии рассеивателя практически совпадает с распределением поля вблизи открытого конца волновода без рассеивателя.

Шар в ближней зоне волноводного излучателя. Изучим теперь распределение поля в области между открытым концом прямоугольного волновода и шаром, удаленным от волновода на расстояние, равное $\lambda/4$. Шар в данной точке пространства был укреплен в специальном кронштейне из пенопласта на уровне геометрического центра поперечного сечения волновода. Зонд располагался между открытым концом волновода и шаром на расстоянии менее $\lambda/30$ от поверхности шара.

Из полученных экспериментальных данных следует, что на

резонансных частотах запирания для колебаний обоих типов происходит уменьшение амплитуды поля по сравнению с ненагруженным волноводом. Однако в зависимости от типа колебаний влияние диэлектрического резонатора на поле проявляется по-разному. Для колебаний электрического типа величина поля на резонансной частоте уменьшается почти в 5 раз, а для магнитного - лишь на 15%.

Таким образом, и при расположении диэлектрического шара в свободном пространстве в ближней зоне волноводного излучателя на резонансных частотах запирания поле вне ДР также уменьшается.

Рассмотрим результаты исследований распределения полей в областях резонансов прохождения. На рис. 1 представлены графики распределения полей вблизи шара диаметром 6,3 мм в области резонанса прохождения, сопутствующего резонансу отражения электрического типа. Здесь $A = n/n_0$, n - показания индикатора прибора при размещении зонда в рассматриваемой точке x вдоль широкой стенки волновода, n_0 - максимальное показание прибора для ненагруженного открытого конца волновода, a - размер широкой стенки волновода. На этом рисунке кривая 1 соответствует резонансной частоте прохождения 9580 МГц. Как следует из этого графика, на резонансной частоте происходит концентрация поля вдоль оси, соединяющей центр шара и

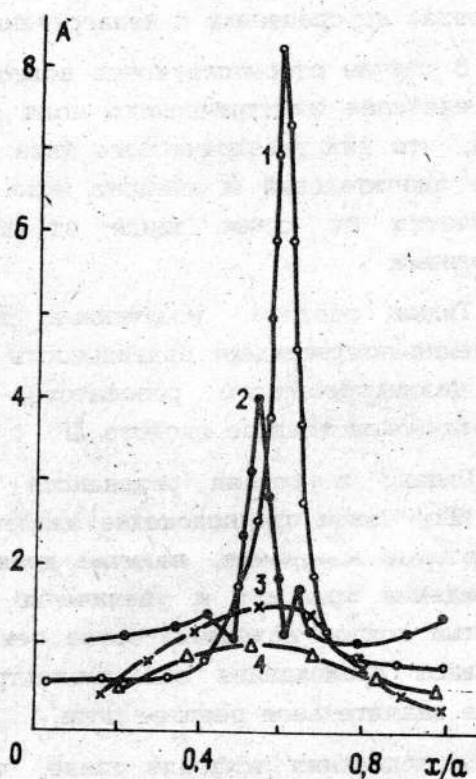


Рис. 1.

центр поперечного сечения волновода. Наблюдается также значительное увеличение амплитуды поля. Диэлектрический резонансный шар на резонансной частоте способствует вытягиванию поля из всей остальной области пространства и фокусировке поля в узкий луч. Незначительное изменение частоты приводит к изменению характеристики электрического поля. Так, для частоты 9650 МГц (кривая 2), кроме уменьшения амплитуды поля, наблюдаются два дополнительных максимума при $x/a = 0,41$ и $0,63$ и два минимума при $x/a = 0,47$ и $0,61$. Сдвиг частоты в нерезонансную область вызывает дальнейшее уменьшение амплитуды поля вблизи рассматриваемой оси и постепенное приближение характеристики

распределения поля к синусоидальному закону. Кривая 3 отображает распределение электрического поля на частоте 9305 МГц, а кривая 4 - аналогичное распределение в той же точке пространства при отсутствии шара и держателя из пенопласта.

Из сопоставления распределения полей на резонансной частоте с

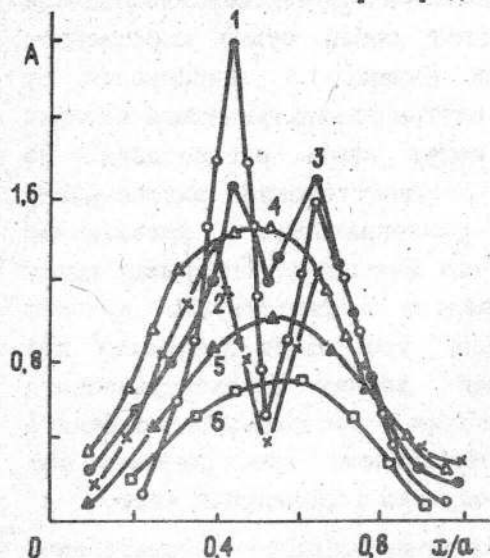


Рис. 2.

шаром (кривая 1) и без шара (кривая 4) следует, что в результате настройки частоты падающего поля на частоту резонанса прохождения происходит также сужение полосы на уровне $0,7A$ более чем в 16 раз. Подобные явления происходят и на частотах резонансов прохождения, сопутствующих резонансу отражения магнитного типа. Характерные зависимости амплитуд рассеянного поля в области резонанса прохождения при резонансе отражения магнитного типа для шара диаметром 5,2 мм представлены на рис. 2 кривыми 1 - 4. Так, для

частоты 9370 МГц, близкой к резонансной, поле имеет два резких максимума при $x/a = 0,44$ и $0,64$ и один минимум поля вблизи оси, соединяющей центр шара и геометрический центр поперечного сечения прямоугольного волновода. Такое же поведение поля характерно и для других частот, близких к резонансной. Кривая 2 соответствует частоте 9360 МГц, а кривая 3 - 9320 МГц. Однако в результате дальнейшего ухода частоты от резонансной происходит выравнивание амплитуд, соответствующих максимумам поля, и наблюдается подъем провала в центральной области кривой, характеризующей распределение поля вдоль оси x . Так, если для частот 9360 и 9370 МГц наблюдается асимметрия амплитуд максимумов, то для частоты 9320 МГц максимумы поля становятся почти равными, а амплитуда в провале кривой увеличивается. Дальнейший уход частоты приводит к тому, что поле становится почти синусоидальным (кривая 4, $f = 9210$ МГц), хотя по амплитуде и превышает значения, соответствующие распределению поля вблизи открытого конца прямоугольного волновода при отсутствии ДР, а кривая 6 - аналогичное распределение поля при наличии держателя из пенопласта без диэлектрического резонансного шара.

Такое поведение рассеянных полей в областях резонансов прохождения можно объяснить, используя результаты численного анализа, выполненного для диэлектрической вставки в прямоугольном волноводе [6]. При падении волны на диэлектрическую вставку в ней возбуждаются колебания как электрического, так и магнитного типов. Численный анализ внутренних полей диэлектрического параллелепипеда [6] показал, что эти поля представляют собой сумму собственных колебаний разных типов с различными фазами. В зависимости от соотношения фаз этих парциальных волн внутри диэлектрической вставки наступают резонансы поля, которые могут иметь расщепления. Но поскольку рассеянные поля обусловлены соответствующими внутренними, связь с которыми описывается интегральными уравнениями макроскопической электродинамики [3], то фазовые соотношения между внутренними парциальными волнами производят соответствующее влияние и на отраженное (или прошедшее) поле, что мы и наблюдаем при экспериментальном исследовании полей вблизи диэлектрического резонансного шара. По-видимому и асимметрия в распределении внешнего поля в окрестности шара (рис. 2) обусловлена несовпадением фаз внутренних мод колебаний в области вырождения резонансных частот.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1) На резонансных частотах запирания для колебаний обоих видов внешнее поле вблизи диэлектрического резонатора, расположенного как в открытом конце волновода, так и в его ближней зоне, незначительно, что подтверждает правильность принятых в работе [5] предположений при теоретическом анализе полей и собственных частот диэлектрических резонаторов.

2) На резонансных частотах прохождения и в областях, близких к ним, внешнее поле значительно превышает поле невозмущенного волноводного излучателя, оно может быть сфокусировано либо в узкий луч вдоль оси, соединяющей геометрические центры поперечного сечения волновода и шара, либо иметь расщепления, а характеристики поля существенно отличаются от синусоидального закона.

3) С помощью диэлектрических резонансных рассеивателей можно управлять характеристиками полей волноводных излучателей.

4) На частотах, далеких от резонансной, поле вблизи диэлектрического рассеивателя практически совпадает с полем ненагруженного волноводного излучателя и имеет синусоидальный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горобец Н. Н., Лященко В. А., Сиротников А. И. // В сб.: Антенно-фидерные и измерительные устройства сверхвысоких частот. - Харьков: Гос. ун-т, 1971. С. 14.
2. Горобец Н. Н., Мокан Т. К., Украинец Н. И. // Тезисы докл. областной школы-семинара. - Куйбышев, 1987. С. 60.
3. Хижняк Н. А. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. - Киев: Наукова думка, 1986. - 280 с.
4. Горобец Н. Н., Хижняк Н. А., Украинец Н. И. Статья депонирована в ВИНТИ, рег. № 1822-79. Деп. от 21 мая 1979 г.
5. Окава А., Varash L.F. // Proc. JRE. 1962. V. 50. N 10. P. 2081.
6. Гал Л. К., Украинец Н. И., Хижняк Н. А. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 8. С. 1585.

Харьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
31 августа 1990 г.

THE DIELECTRIC RESONANCE BALL IN THE NEAR-FIELD OF THE WAVEGUIDE RADIATOR

N.I. Ukrainets, T.K. Mokan

The results of the experimental investigation of the electric field near a little dielectric ball disposed at the open end of the rectangular waveguide and its near-field are represented. The field distributions at the resonance frequencies of the reflection and the passage and far from the resonances have been studied. A comparison of the results received with the case of an unloaded waveguide radiator has been made.