

УДК 621.372.826

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ЩЕЛЬЮ В СТЕНКЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

© 2024 г. Л. В. Алексейчик^{1,*}, А. А. Курушин¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», Москва, Россия

* E-mail: Alexeychiklv@mpei.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Проведено моделирование задачи возбуждения полуцилиндрического диэлектрического резонатора электромагнитным полем щели, выполненной в широкой стенке прямоугольного металлического волновода U -диапазона длин волн. Диэлектрический резонатор изготовлен из высокопроницаемого диэлектрика с малыми потерями. В результате численного моделирования получены основные технические параметры антенны на диэлектрическом резонаторе, а также картины распределения векторов результирующего электромагнитного поля и частотные характеристики. По кривым АЧХ и временным данным скорости затухания процесса возбуждения диэлектрического резонатора получены значения нагруженной добротности, собственной добротности и добротности связи диэлектрического резонатора со свободным пространством. Приведена диаграмма направленности диэлектрического резонатора, демонстрирующая свойства диэлектрического резонатора как антенных элементов СВЧ диапазона.

DOI: 10.31857/S0367676524110031, EDN: FMNUOQ

ВВЕДЕНИЕ

Возможности применения диэлектрических резонаторов (ДР) в качестве антенных элементов рассматривались еще в первых работах по исследованию собственных типов колебаний диэлектрических тел с высокой диэлектрической проницаемостью, обладающих внутренними и внешними электромагнитными полями, энергия которых способна излучаться в окружающее свободное пространство, в частности при исследовании спектров колебаний диэлектрического шара [1, 2].

Однако в конструкциях частотно избирательных СВЧ устройств на ДР требовались меры по устранению излучения с помощью экранов, которыми могли служить металлические стенки линий передачи или специальные экранирующие устройства, что позволило реализовать новое поколение функциональных устройств СВЧ различного назначения, имеющих малые веса и габариты по сравнению с известными традиционными волноводными конструкциями [3, 4].

В первой публикации по реализации микроволновой антенны на ДР [5] был проведен аналитический расчет ее параметров и диаграммы направленности для открытой конструкции микрополосковой линии при возбуждении ДР полосковым

проводником линии. Позже в работе [6] были получены рекомендации по выбору диэлектрических материалов для оптимизации эффективности излучения антенн на ДР. Затем проявился все более возрастающий интерес к разработкам антенн и антенных решеток на ДР [7–9]. В настоящее время продолжают интенсивные исследования антенн на ДР (в англоязычной терминологии как DRA) в широкой области частот СВЧ диапазона, вплоть до оптического диапазона [10, 11]. С развитием мобильной и космической связи антенны на ДР получили распространение в средствах связи СВЧ, включая миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны волн.

Для изучения процессов излучения ДР в работе [12] было проведено моделирование задачи возбуждения цилиндрического ДР, установленного в отверстии металлической стенки, полем падающей плоской электромагнитной волны. В результате численного моделирования с помощью программы CST Microwave Studio [13] впервые были получены картины распределения векторов результирующего поля при дифракции плоской электромагнитной волны на цилиндрическом ДР, установленном в отверстии металлической стенки, причем падающая плоская волна линейно поляризована относительно плоскости, параллельной торцам

цилиндрического (или дискового) ДР. При этом обнаружено преобразование низшего магнитного типа колебания ДР, размещенного в отверстии диафрагмы, в гибридный квази- $\text{EH}_{11\delta}$ -тип колебания с поправкой на структуру электромагнитного поля, обусловленной влиянием отверстия связи. По АЧХ ДР и временным данным скорости затухания процесса возбуждения ДР были получены значения его резонансной частоты и нагруженной добротности, в том числе при изменении величины диэлектрической проницаемости материала ДР. Приведены диаграммы направленности в виде эффективных площадей рассеяния (RCS), демонстрирующие характеристики ДР как возможных антенных элементов СВЧ-диапазона, подходящих для реализации простых конструкций антенных решеток, как показано на рис. 1. При этом остается важным исследование физических процессов дифракции ДР при возбуждении их различными сторонними

пространство. Электромагнитное поле щели возбуждают резонансные колебания ДР на типе колебаний, близким по структуре поля к низшему типу колебания целого дискового ДР $H_{01\delta}$, однако преобразующиеся в гибридный квази- $\text{EH}_{11\delta}$ -тип колебаний из-за влияния щели и металлической поверхности волновода, как дополнительных неоднородностей, аналогично случаю размещения целого дискового ДР в отверстии металлической стенки, рассмотренного ранее в [12]. ДР изготовлен из высокопроницаемого диэлектрического материала с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 44$ и тангенсом угла потерь $\text{tg } \delta = 10^{-4}$. Геометрические размеры ДР: диаметр 5 мм, толщина 2.5 мм. Собственная резонансная частота ДР находится в окрестности 15 ГГц и уточняется при моделировании. Численное моделирование проведено с помощью программы CST Microwave Studio [13].

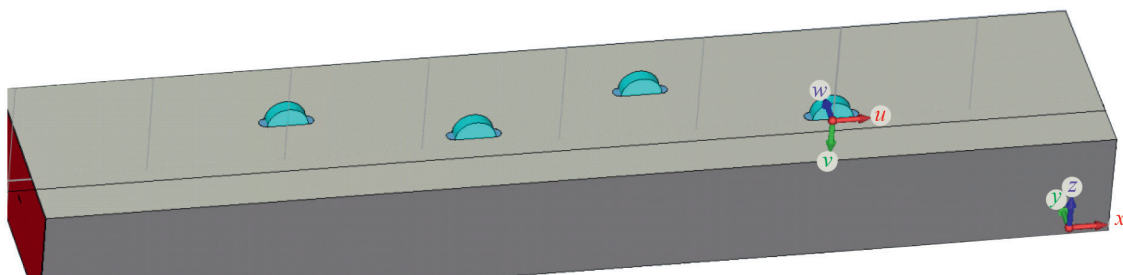


Рис. 1. Волноводная конструкция антенной решетки с цилиндрическими ДР.

источниками, что открывает новые возможности для совершенствования антенных СВЧ элементов и решеток на основе ДР.

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ

В данной работе предложена волноводная конструкция антенного элемента на ДР. Верхняя стенка прямоугольного волновода выполнена квадратной формы для обеспечения симметрии экранирующей поверхности для ДР. Полуцилиндрический ДР установлен перпендикулярно и симметрично относительно щели, выполненной в широкой стенке прямоугольного металлического волновода, как показано на рис. 2. Дополнительным достоинством такой конструкции является возможность надежного крепления полуцилиндрического ДР к стенке волновода и меньший расход диэлектрического материала при реализации антенных решеток с большим числом ДР. В волноводе обеспечивается распространение рабочего H_{10} типа волны. В результате возбуждения ДР часть энергии его электромагнитного поля эффективно излучается в свободное

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ полученных дифракционных картин электромагнитного поля рассеяния ДР позволил выявить характерные особенности, которые необходимо учитывать при разработке современных

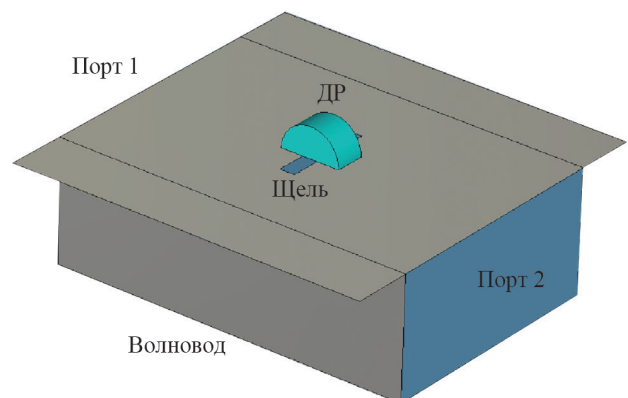


Рис. 2. Вид волноводной конструкции антенны с полуцилиндрическим ДР.

антенн. На рис. 3 приведена картина распределения векторов электрического поля в области ДР и волновода, подтверждающие тип волны волновода и тип колебаний ДР, как указывалось ранее. При этом, судя по картине электрического поля, в ДР преобладает азимутальная составляющая векторов электрического поля, что подтверждает возбуждение типа колебаний ДР, близкого к гибричному квази- EH_{118} -типу колебаний, где наблюдается минимум магнитного поля вблизи щели. При этом Е-составляющая поля имеет выраженный минимум внутри полуцилиндрического ДР в области, близкой к 0.4–0.5 его радиуса, в то время как Н-составляющая, напротив, имеет внутри этой области максимум. Учет этой особенности позволил уточнить рабочий тип колебаний как гибридный квази- EH_{118} с дополнительной вариацией электрического поля по радиусу полуцилиндра. При малых перемещениях ДР вдоль щели (или при регулировке размеров щели) достигается настройка антенны на оптимальные импедансные характеристики. При размещении ДР в волноводной конструкции линейной антенной решетки (рис. 1) следует учитывать взаимные связи между ДР по распространяющейся волне для достижения требуемых фазовых соотношений между элементами решетки [14]. При численном моделировании значение резонансной частоты ДР определялось из графика АЧХ, полученного при введении пробника магнитного поля, установленного в центре полуцилиндрического ДР и ориентированного по направлению силовых линий магнитного поля, и ее величина составила 15.477 ГГц. При обработке данных АЧХ уточнялись значения резонансной частоты, полосы пропускания и вносимого ослабления. Полоса частот

пропускания составила 360.0 МГц, нагруженная добротность ДР $Q_n = 15.477/360 = 43.0$. Добротность связи Q_c ДР со свободным пространством находится из соотношения

$$1/Q_n = 1/Q_o + 1/Q_c,$$

где Q_o – собственная добротность ДР, обратно пропорциональная $\tan \delta$ материала диэлектрика ДР. Для высокодобротных диэлектриков современных керамик тангенс угла потерь $\tan \delta$ составляет не более 10^{-4} , при этом добротность связи на излучение практически равна нагруженной добротности ДР. Для снижения уровня добротности связи на излучение целесообразно использование диэлектрических материалов для изготовления ДР с более низкими значениями относительной диэлектрической проницаемости, однако обеспечивающих требуемое значение рабочей резонансной частоты на заданном типе колебаний ДР. Дополнительные возможности для эффективного излучения ДР связаны с вариацией формы ДР и включением различных неоднородностей, например в виде воздушных зазоров [5, 15–17].

Характеристика способности ДР на излучение приведена на рис. 4, на котором представлена 3D-диаграмма направленности излучения антенны и ее сечение в плоскости полярного угла. Согласно рис. 4, диаграмма направленности ДР подобна диаграмме дальнего поля магнитного диполя, но имеет преимущество по коэффициенту усиления, максимальное значение которого составляет примерно 5.6 дБ и по ширине диаграммы (по уровню – 3 дБ от максимального), составляющей примерно 3 радиана.

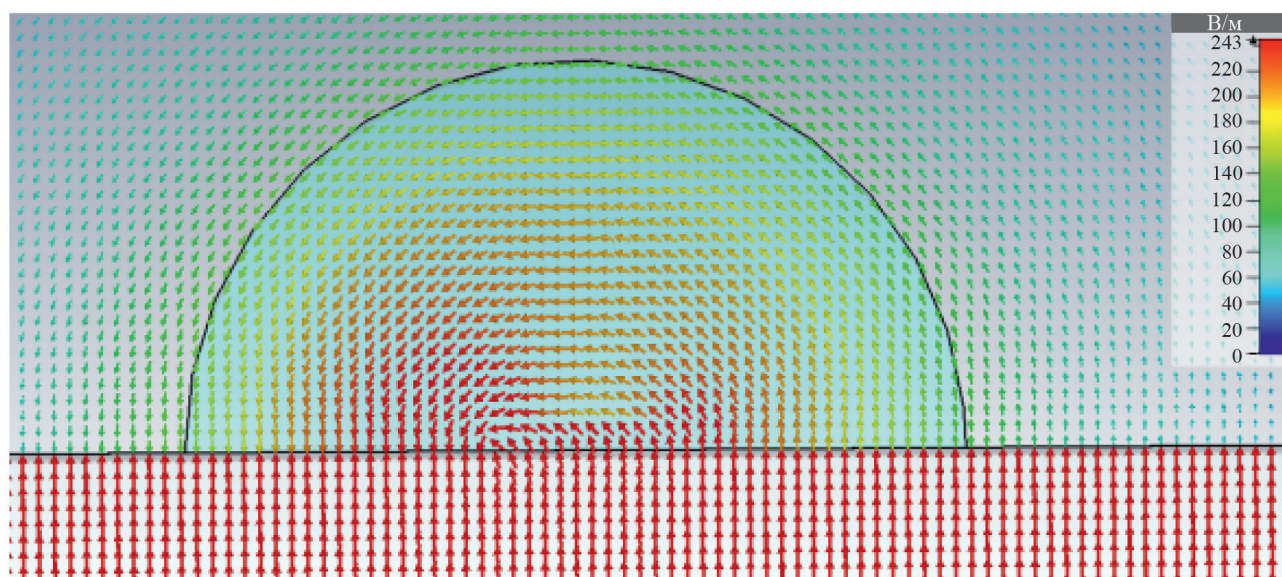


Рис. 3. Распределение векторов электрического поля ДР, щели и волновода в плоскости YOZ.

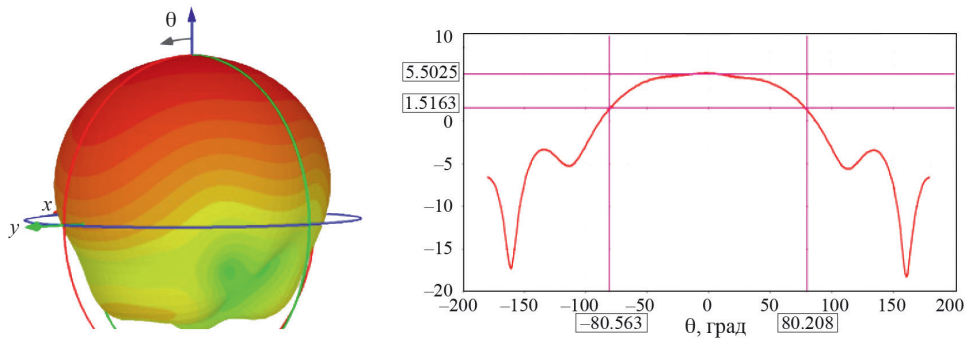


Рис. 4. 3D диаграмма направленности антенны и ее сечение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численного моделирования задачи возбуждения вынужденных колебаний ДР под действием электромагнитного поля щели в широкой стенке прямоугольного металлического волновода выявлены физические особенности явления дифракции и излучения ДР, получены картины распределения результирующего электрического поля ДР в ближней зоне и диаграмма направленности в дальней зоне. Установлен низший тип колебаний как гибридный— EH_{118} -тип колебания. Впервые получены частотные характеристики амплитуд вынужденных колебаний квази— EH_{118} -типа колебания полуцилиндрического ДР. Определены картины распределения векторов электрического и магнитного полей данного типа колебаний, возбужденных под действием гармонического во времени электромагнитного поля падающей плоской электромагнитной волны. Выявлены особенности распределения электромагнитного поля ДР такие как эффекты «втягивания» пучности электрического поля падающей плоской волны в область объема ДР и соответствующее «втягивания» узла магнитного поля падающей плоской волны в окрестности ДР, связанных с наложением собственного поля ДР с полем стоячей волны в освещенном полупространстве от металлической стенки.

Рассчитаны рабочие параметры антенны на ДР, включая АЧХ, значения резонансной частоты и добротности связи ДР со свободным пространством, а также 3D-диаграммы направленности, согласующиеся с известными данными. Приведены рекомендации по повышению эффективности излучения представленной конструкции микроволновой антенны на полуцилиндрическом ДР. Полученные в работе результаты представляют интерес при разработке антенн и антенных решеток на основе диэлектрических резонаторов, получивших широкое распространение в средствах космической и мобильной связи 5G-поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Richtmyer R.D. // J. Appl. Phys. 1939. V. 10. P. 391.
2. Загер О., Тиси Ф. // ТИИЭР. 1968. Т. 66. № 9. С. 203.
3. Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Гаврилюк Н.Г. и др. Параметры и методы расчета диэлектрических резонаторов и генераторов и фильтров на их основе. М.: Центр. иссл. ин-тут «Электроника», 1990. 64 с.
4. Алексейчик Л.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1012; Alexeychik L.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 8. P. 913.
5. Алексейчик Л.В., Геворкян В.М., Калугин Е.И. // В кн.: Исследование диэлектрических СВЧ резонаторов в качестве антенных СВЧ элементов: сб. науч. тр. М.: МЭИ, 1981. С. 31.
6. Long S.A., McAllister M.W., Shen L.C. // IEEE Trans. Antennas Propag. 1983. V. 31. No. 3. P. 406.
7. Leung K.W. // State Key Laboratory of Millimeter Waves & Department of Electronic Engineering. City University of Hong Kong, 2012.
8. Soren D., Ghatak R., Mishra R.K. et al. // Progr. Electromagn. Res. B. 2004. V. 60. P. 195.
9. Maity S., Gupta B. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2014. V. 62. No. 12. P. 6524.
10. Malheiros-Silveira G.N., Hernandez-Figueroa H.E. // IEEE Photon. J. 2015. V. 7. No. 1. P. 1.
11. Keyrouz L., Caratelli D. // Int. J. Antennas Propag. 2016. V. 2016 No. 1. Art. No. ID6075680.
12. Алексейчик Л.В., Курушин А.А. // Журн. радиоэлектрон. 2020. № 11. С. 1.
13. Алексейчик Л.В., Курушин А.А. Комплексное моделирование в программе CST SUITE. М.: СОЛОН Пресс, 2022. 276 с.
14. Алексейчик Л.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 9. С. 1283; Alexeychik L.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 9. P. 1062.

15. Лу Г., Захаров П.Н., Королев А.Ф. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 1. С. 50; *Lu G., Zacharov P.N., Korolev A.F.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 1. P. 40.
16. Геворкян В.М., Вишняков С.В., Казанцев Ю.А., Шутов А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 9. С. 1278; *Gevorkyan V.M., Vishnyakov S.V., Kazantsev Yu.A., Shutov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 9. P. 1058.
17. Алексейчик Л.В., Жохова М.П., Любимова Г.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 154; *Alexeychik L.V., Zhokhova M.P., Lubimova G.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 115.

Simulation of excitation of a microwave dielectric resonator by a slot in the wall rectangular waveguide

L. V. Alekseychik^{1,*}, A. A. Kurushin¹

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, 111250, Russia

* e-mail: Alexeychiklv@mpei.ru

The problem of excitation of a semicylindrical dielectric resonator (DR) by the electromagnetic field of a slot made in the wide wall of a rectangular metal waveguide of the U -wavelength range has been simulated. The DR is made of a high-permeability dielectric with low losses. As a result of numerical modeling, the main technical parameters of the dielectric resonator antenna were obtained.