

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.1>
УДК 621.372.826

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ПОЛЕМ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Л. В. Алексейчик, А. А. Курушин

**Национальный исследовательский университет МЭИ,
111250, г Москва, Красноказарменная, 14**

Статья поступила в редакцию 27 мая 2020 г., после доработки – 26 октября 2020 г.

Аннотация. Проведено моделирование цилиндрического (дискового) диэлектрического резонатора (ДР), возбуждаемого электромагнитным полем падающей плоской волны в свободном пространстве. ДР изготовлен из высокопроницаемого диэлектрика с малыми потерями. Целью работы явилось получение характеристик процесса дифракции плоской электромагнитной волны при возбуждении вынужденных колебаний ДР на низшем магнитном типе колебания, а также уточнение структуры электромагнитного поля внутри и в окрестности ДР и его характеристик как излучающего антенного элемента для использования полученных данных при проектировании антенной решетки. Задача исследования характеристик ДР решается для использования полученных данных при проектировании антенной решетки, в которой ДР используются как излучающий элемент. В результате численного моделирования данной задачи с помощью программы CST Microwave Studio впервые получены картины распределения векторов результирующего поля при дифракции плоской электромагнитной волны на цилиндрическом ДР и его частотные характеристики в L-диапазоне длин волн. Выявлены особенности электрической и магнитной составляющих поля внутри и в окрестности образца ДР. По кривой АЧХ ДР и временным данным скорости затухания процесса возбуждения ДР получены значения его эффективной (нагруженной) добротности, собственной добротности и добротности связи ДР со свободным пространством. Приведены диаграммы направленности в виде эффективных

площадей рассеяния (RCS), демонстрирующие свойства ДР как антенных элементов СВЧ диапазона.

Ключевые слова: Диэлектрические резонаторы, моделирование процесса дифракции, плоская электромагнитная волна, CST MWS.

Abstract. The simulation of the problem of excitation of cylindrical (disk) dielectric resonator (DR) by the electromagnetic field of an incident plane wave in free space is carried out. DR is made from highly permeable dielectric with low losses. The aim of the work was to obtain the characteristics of the diffraction process of a plane electromagnetic wave upon excitation of forced oscillations of the DR on the lowest magnetic type of oscillation, as well as to clarify the structure of the electromagnetic field inside and in the vicinity of the DR and its characteristics as a radiating antenna element for using the obtained data when designing an antenna array. The studying the DR characteristics is solved in order to use in the design of the antenna array, in which the DR is used as a radiating element. As a result of numerical modeling of the task using the CST Microwave Studio, we obtained patterns of the distribution of the vectors of the resulting field upon diffraction of a plane electromagnetic wave by cylindrical DR and its frequency characteristics (AFC) in the L-range. Peculiarities of the electric and magnetic components of the field inside and in the vicinity of the DR sample were revealed. Using the AFC curve of the DR and the temporal data of the attenuation rate of the DR excitation process, the values of its effective (loaded) Q factor, intrinsic Q factor, and Q factor of coupling the DR with free space were obtained. The radiation patterns in the form of radar cross section (RCS) are presented, which demonstrate the properties of DR as antenna elements in the microwave range.

Key Words: dielectric resonators; simulation of the diffraction; plane electromagnetic wave; CST Microwave Studio.

Возможности применения диэлектрических резонаторов в качестве антенных элементов рассматривались ещё в первых работах по исследованию собственных типов электромагнитных колебаний диэлектрических объектов 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 [1-4]. Поэтому в конструкциях СВЧ устройств на ДР требовались меры по устранению излучения с помощью экранов, которыми могли служить металлические стенки линий передачи или специальные экранирующие устройства [5]. Одни из первых реализаций волноводных и полосковых конструкций антенн на ДР приведены в работах [6-10]. Начиная с 80-тых годов 19 века, начались и продолжились по настоящее время интенсивные исследования антенн на ДР, обладающих достоинствами по малым размерам и высокой эффективности применения [9-12]. С развитием мобильной и космической связи антенны и антенные решетки на ДР заняли одно из ведущих положений на рынке микроволновых антенн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн [11-13] и в создании излучающих объемных интегральных структур (ОИС) на диэлектрических резонаторах с внедренными активными элементами, что становится важным шагом при освоении диапазонов 5G-6G. Современные САПР позволяют моделировать и оптимизировать структуры таких ОИС. При этом остается важным исследование физических процессов дифракции высокочастотных ДР при возбуждении их сторонними источниками, что открывает новые возможности для совершенствования антенных СВЧ элементов на основе ДР.

В работе проведено численное моделирование электромагнитного поля цилиндрического (дискового) ДР, возбужденного на низшем магнитном типе колебаний, подобному известному идеализированному типу $H_{01\delta}$ [2], под действием плоской электромагнитной волны, и установленного в свободном пространстве. Анализ полученных дифракционных картин электромагнитного поля рассеяния ДР позволил выявить характерные особенности, которые необходимо учитывать при разработке современных антенн на ДР (DRA). Используемый ДР изготовлен из высокопроницаемого диэлектрического материала с относительной диэлектрической проницаемостью, равной $\epsilon = 44$ и

тангенсом угла потерь $\operatorname{tg}\delta = 10^{-4}$. Геометрические размеры ДР: диаметр 30 мм, высота 15 мм. Собственная резонансная частота ДР низшего типа колебаний находится в окрестности 1500 МГц и уточняется при моделировании. Численное моделирование данной задачи проведено с помощью программы CST Microwave Studio [17].

1. Моделирование падения плоской волны на диэлектрический резонатор

На рис. 1. показана система из плоскости падающей волны и ДР, установленного в боксе свободного пространства, плоская падающая волна поляризована в плоскости торцов дискового ДР и нормирована на 1 В/м, направление распространения волны справа - налево (противоположно орту x). Мониторы ЭМ поля фиксируют ЭМ поле частотой 1.5 ГГц.

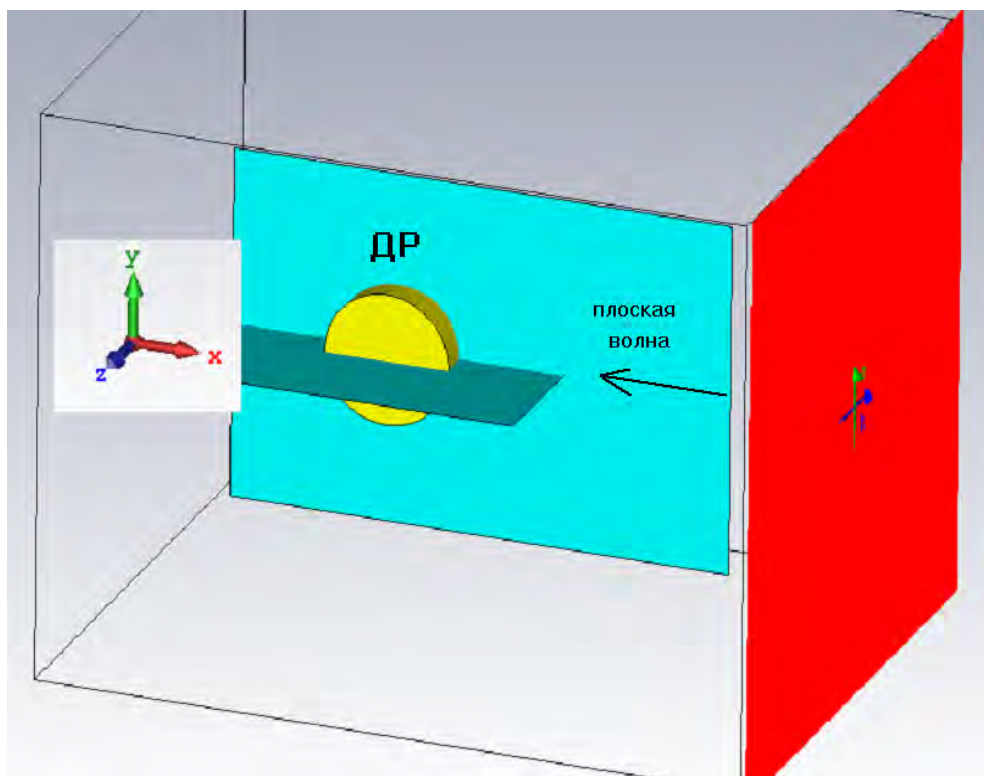


Рис. 1. Ориентация падающей плоской волны относительно ДР.

Так как плоская волна имеет линейную поляризацию электромагнитного поля, параллельную плоскости торцов ДР, обеспечивается максимальная связь ДР на низшем магнитном типе колебаний с плоской волной за счет

параллельности векторов магнитных полей ДР и плоской волны в области образца ДР. При этом, судя по картине результирующего магнитного поля ДР и плоской волны (рис.2), энергия электромагнитного поля преимущественно накапливается в диэлектрическом образце ДР и частично отражается в противоположном направлении к падающей плоской волне. Это обусловлено тем, что наводимые сторонним полем плоской волны токи поляризации ДР возбуждают вторичное поле рассеяния в противофазе с полем плоской волны в направлении ее распространения. Аналогичный эффект имеет место при размещении ДР в полости прямоугольного металлического волновода [2,5].

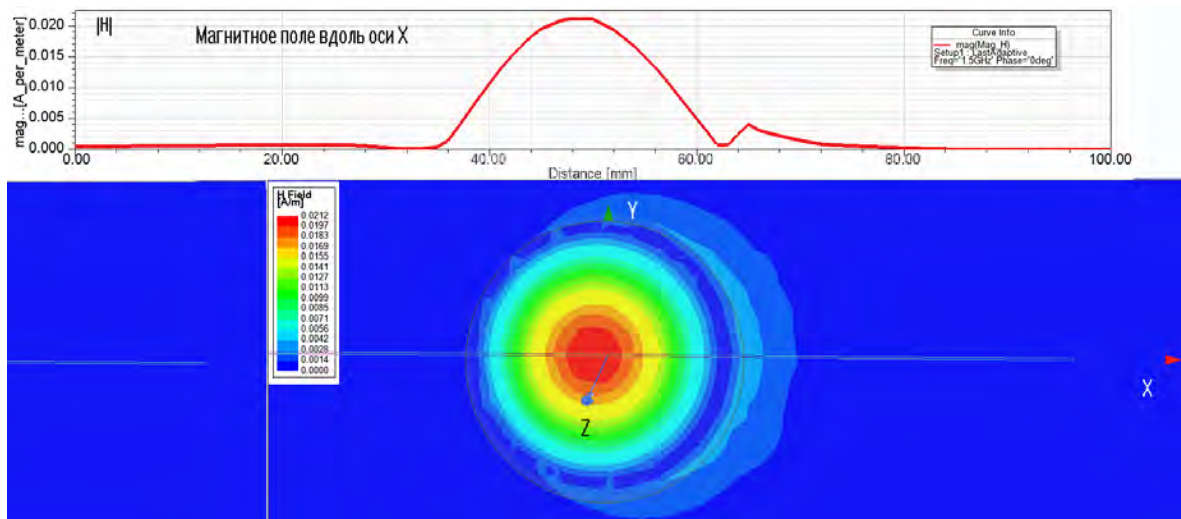


Рис. 2. Результирующее магнитное поле ДР и плоской волны.

Картини распределения векторов электрического и магнитного полей в окрестности ДР приведены на рис. 3. Из рис. 3а видно, что электрическое поле внутри ДР имеет единственную азимутальную компоненту E_ϕ с осевой симметрией. Магнитное поле на рис. 3б по структуре подобно полю магнитного диполя, которое в сферической системе координат имеет две компоненты H_θ и H_r , имеющие также осевую симметрию (не зависят от угла ϕ). Поле низшего магнитного типа колебания ДР, представленное на рис. 3а, б, подобно полю магнитного диполя.

Из данных рис.3.б. следует, что силовые линии магнитного поля, близкие к периферии цилиндрической поверхности ДР, имеют частично противоположное направление относительно направления векторов внутри

образца ДР, что приводит к ослаблению внутреннего магнитного поля, не соответствующего идеальному $H_{01\delta}$ типу колебания ДР, при котором магнитное поле однонаправленно и ограничено идеальными "магнитными стенками" по цилиндрической поверхности ДР.

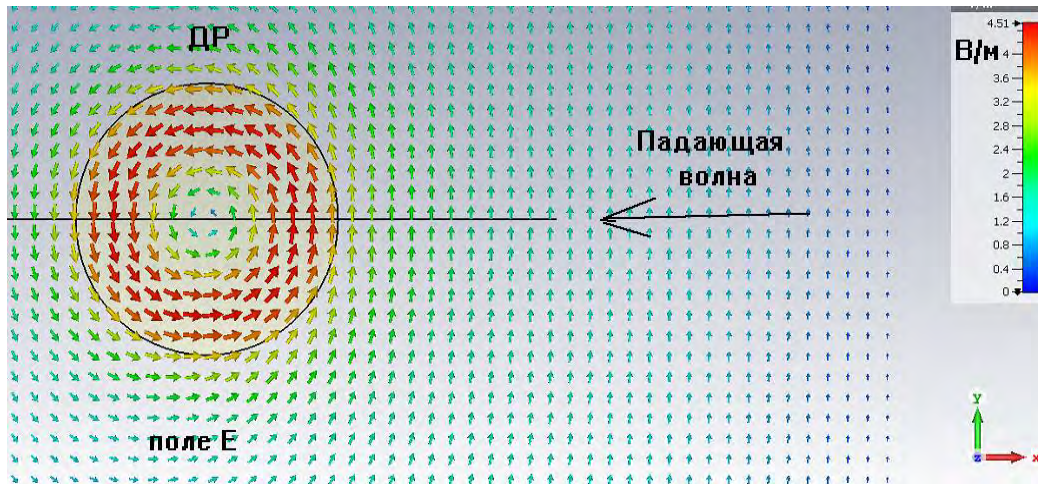


Рис. 3 а. E -составляющая электромагнитного поля в плоскости XOY (направление падающей волны противоположно стрелке x).

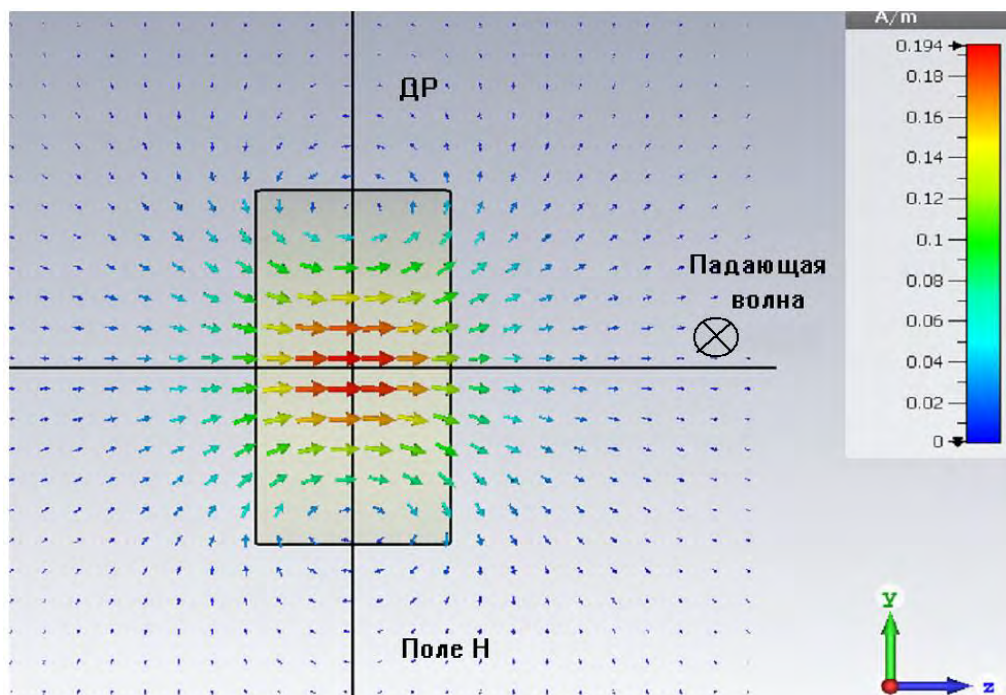


Рис.3 б. H -составляющая электромагнитного поля в плоскости YOZ

На рис.4.а и рис. 4.б показаны картины модулей E - и H - составляющих поля, соответственно. Из представленных картин следует, что E -составляющая поля простирается снаружи образца ДР относительно боковой цилиндрической

поверхности ДР, в то время как H -составляющая, напротив, имеет внутри этой поверхности минимум, который выделен в виде окружности минимума H -составляющей (синяя линия) внутри ДР вблизи окружности границы раздела диэлектрик-воздух. Учет этой особенности позволяет ввести понятие «эффективного диаметра» дискового ДР, соответствующего повышению резонансной частоты ДР относительно случая идеализированного $H_{01\delta}$ -типа колебания. Для данного случая использования ДР (диаметр 30 мм) отношение «эффективного диаметра» к реальному диаметру составило значение 0,92, т.е. ошибка в расчете диаметра ДР по известной резонансной частоте идеализированного $H_{01\delta}$ -типа колебания ДР в свободном пространстве составит порядка 8%. Для других форм и размеров ДР потребуется уточнение данной погрешности. Применение "эффективного диаметра" позволит повысить точность определения резонансной частоты ДР на низшем магнитном $H_{01\delta}$ -типе колебаний ДР в свободном пространстве до 1-2%.

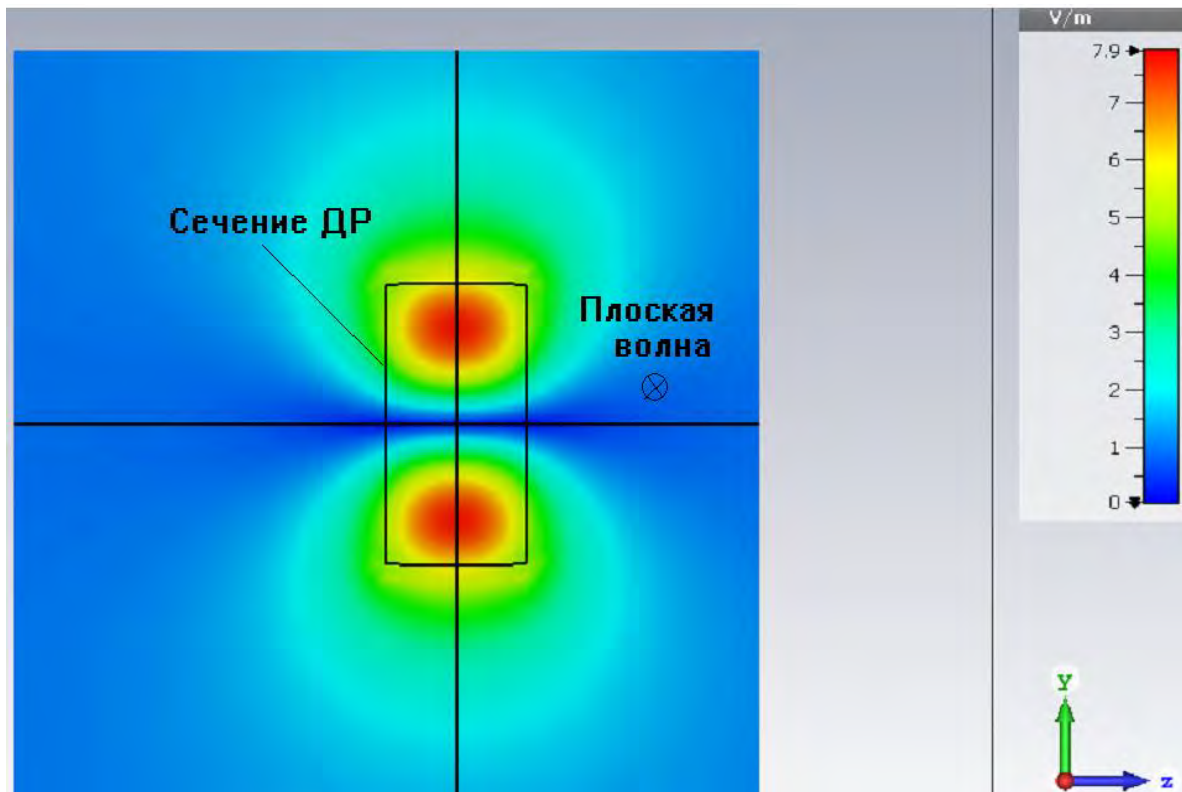


Рис.4.а. Модуль E -составляющей электромагнитного поля в плоскости YOZ.

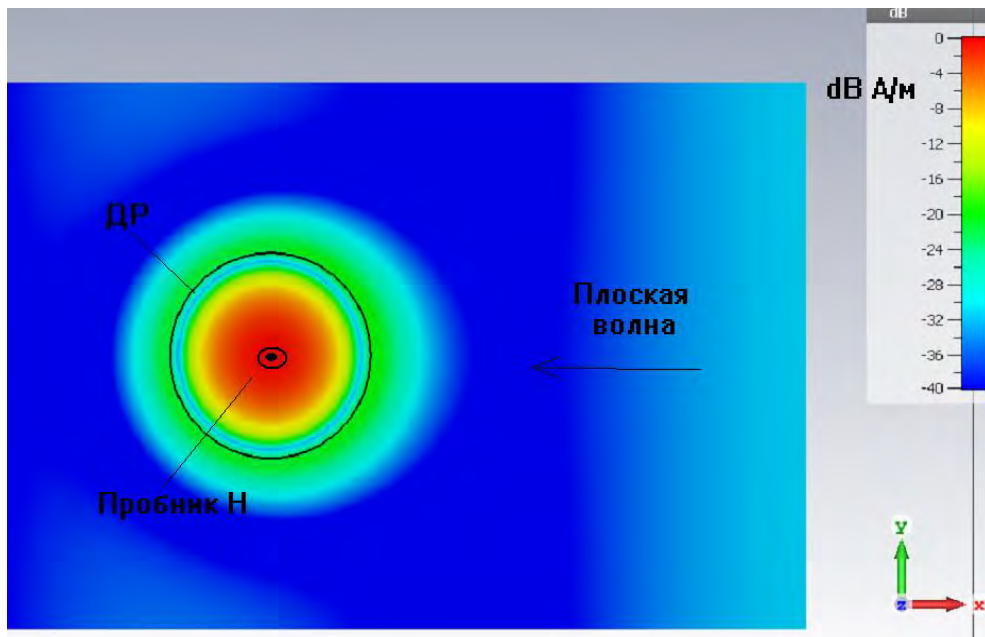


Рис. 4.6. Модуль H -составляющей электромагнитного поля в плоскости YOX , в дБ.

Приведенные картины распределения абсолютных значений составляющих электромагнитного поля (с учетом указанных замечаний) подтверждает возбуждение ДР на низшем магнитном типе колебания, близким к идеализируемому $H_{01\delta}$ -типу колебания ДР, магнитная составляющая поля которого концентрируется в области цилиндрического образца ДР.

2. Численный расчет резонансной частоты ДР

При численном моделировании точное значение резонансной частоты ДР определялось из графика АЧХ (рис. 5), полученного при введении пробника магнитного поля, установленного в центре ДР (рис. 4.6) и ориентированного по направлению силовых линий магнитного поля. Пробник магнитного поля выполнен в виде кругового витка, размеры которого достаточно малы в сравнении с размерами ДР.

При обработке данных АЧХ (рис. 5) с увеличением масштаба рисунка уточнялись значения резонансной частоты, полосы пропускания и вносимого ослабления от максимума АЧХ по уровню -3 дБ. При этом резонансная частота составила 1599 МГц, а полоса частот пропускания 37,17 МГц. Нагруженная добротность ДР составила значение $Q_n = f_0/\Delta f = 61$. 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 $\operatorname{tg}\delta$ материала диэлектрика ДР. Для высокодобротных диэлектриков современных керамик тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ составляет не более 10^{-4} , при этом добротность связи практически равна нагруженной добротности ДР.

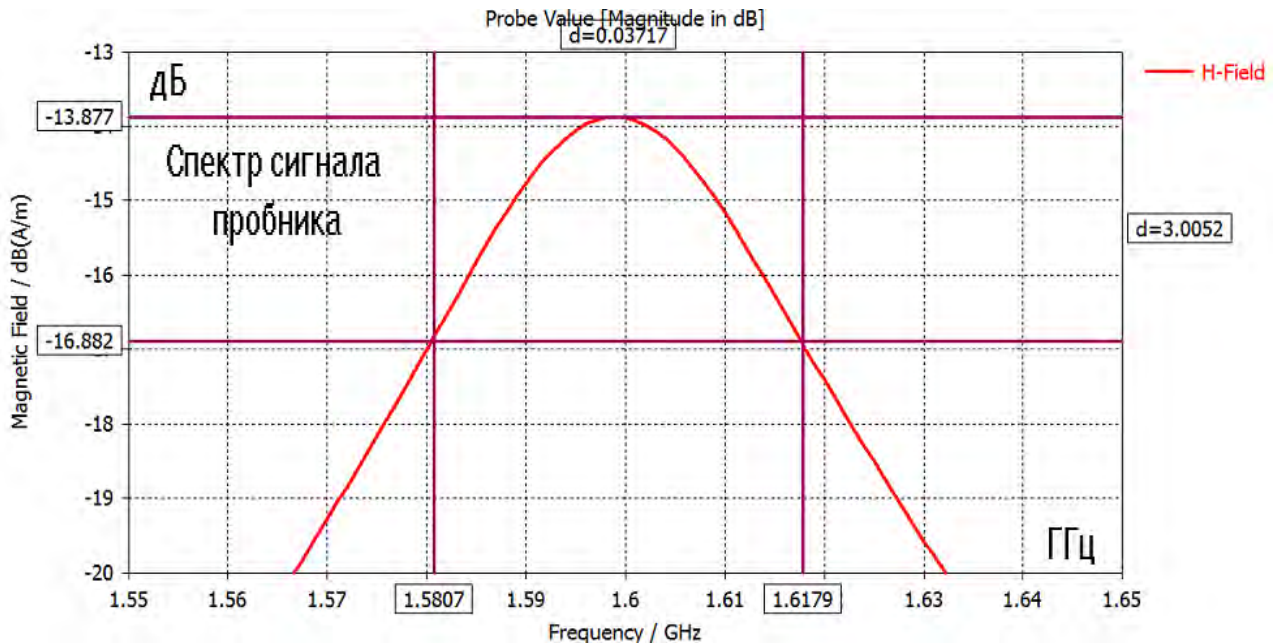


Рис. 5. АЧХ пробника H - составляющей поля в диапазоне частот, в дБ

Другой способ определения искомых параметров нагруженной добротности Q_n , дискового ДР следует из временной зависимости сигналов возбуждения (рис. 6) и релаксации энергии электромагнитной энергии поля W с течением времени после воздействия возбуждения ДР.

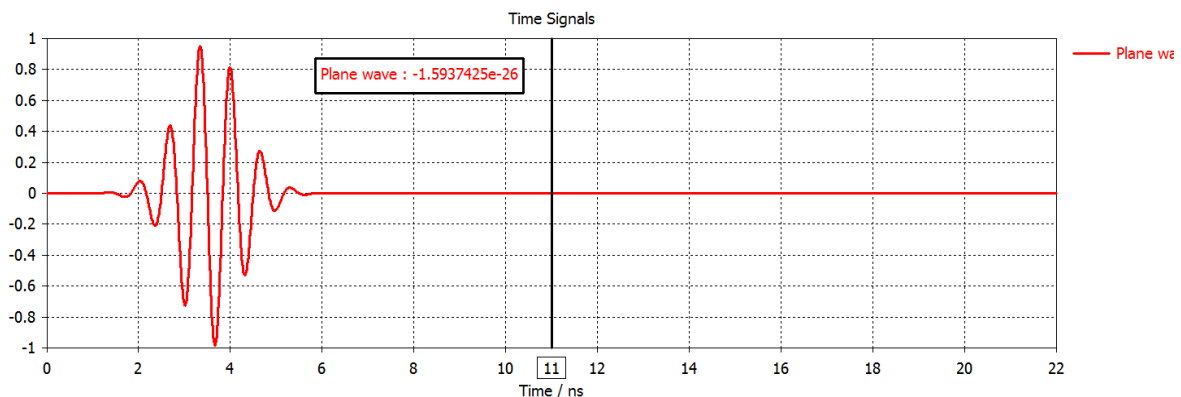


Рис.6. Радиоимпульс протяженностью во времени от 2 нсек до 6 нсек накачки энергии в ДР с прямоугольным спектром от 1 до 2 ГГц.

Энергия электромагнитного поля внутри ДР экспоненциально спадает (рис. 7) за счет излучения. Отметим, что размерность по оси абсцисс на рис. 6. и рис. 7 совпадают.

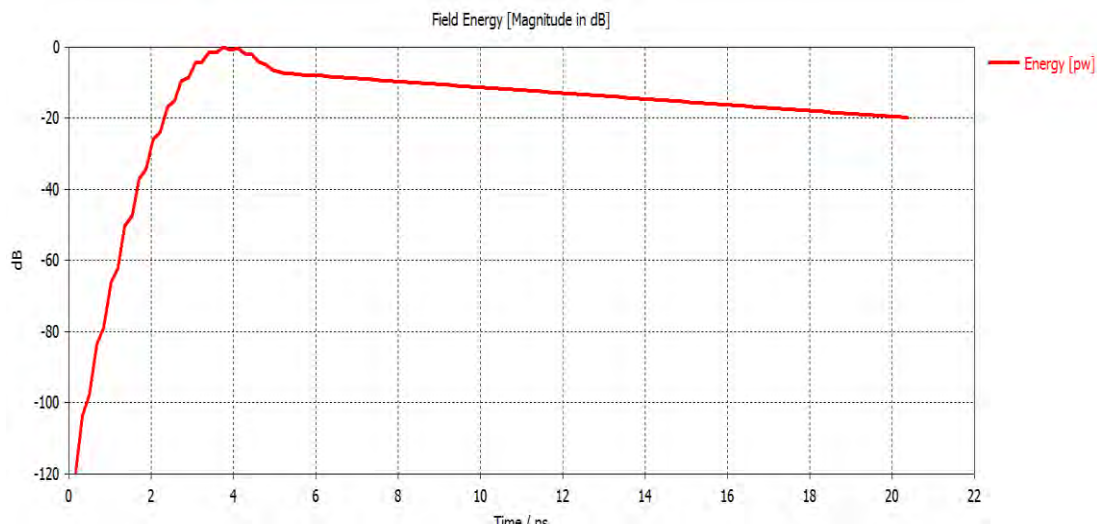


Рис.7. Зависимость от времени энергии электромагнитного поля в ДР

Из данных кривой рис. 7 следует, что примерно от 6 нс до 20,4 нс (за $t=14,4$ нс) экспоненциальное уменьшение энергии электромагнитного поля составляет $\alpha = W(20.4 \text{ нс}) - W(6 \text{ нс}) = -11,74$ дБ, что соответствует уменьшению энергии в $A=10^{-\alpha/10}=14,928$ раз. Так как $A=e^{2t/\tau}$, где $t = 14.4$ нс, то величина постоянной времени переходного процесса $\tau = 2t/\ln A = 2 \times 14.4 / 2.703 = 10.65$ нс. Примем, что постоянная времени ДР аналогична постоянной времени резонансного контура и равна $\tau = Q_n / \pi f_0$, где Q_n -нагруженная добротность ДР, величина которой равна $Q_n = \tau \pi f_0$, при $f_0 = 1,599$ ГГц получим значение $Q_n = 10,65 \times 3.14 \times 1.599 = 53,5$. Таким образом, оба способа определения нагруженной добротности Q_n (практически равной добротности связи на излучение ДР в свободном пространстве) дали согласующиеся величины.

3. Зависимости характеристик диэлектрического резонатора от диэлектрической проницаемости его материала

При применении ДР в качестве элементов СВЧ антенной структуры, важно исследовать, как меняется резонансная частота ДР при изменении относительной диэлектрической проницаемости материалов ДР от $\epsilon=5$ до $\epsilon=100$, используемых на практике. Зависимость резонансной частоты низшего магнитного типа колебаний ДР (диаметром 30 мм и высотой 15 мм),

полученная по данным АЧХ магнитного пробника), показана на рис. 8.



Рис. 8. Зависимость резонансной частоты ДР от относительной диэлектрической проницаемости.

При диэлектрической проницаемости ДР, равной 44, резонансная частота равна 1.599 ГГц, что соответствует данным, показанным выше на рис. 5. Важными параметрами при применения ДР являются его ширина рабочей полосы частот (рис. 9), а также связанная с этим параметром нагруженная добротность ДР (практически равная добротности связи ДР в свободном пространстве) (рис. 10).

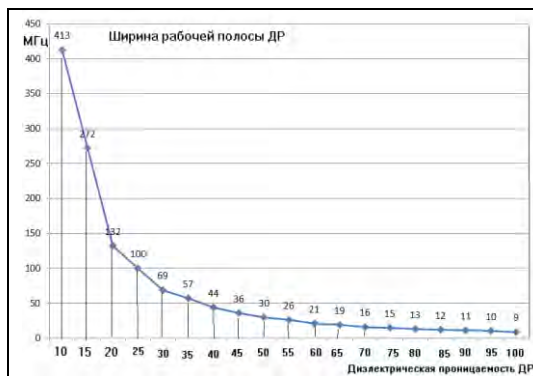


Рис. 9. Зависимость ширины рабочей полосы ДР от относительной диэлектрической проницаемости

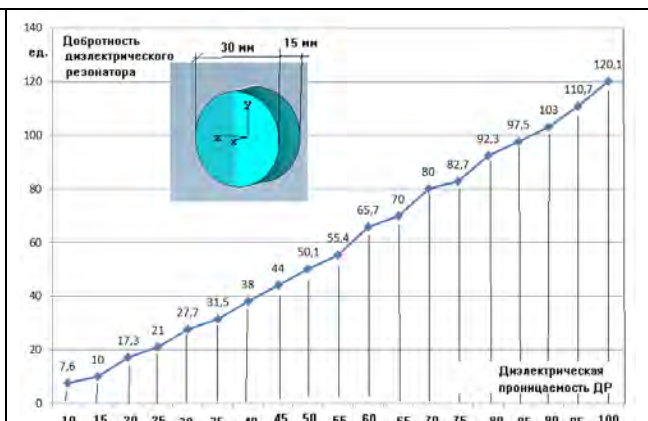


Рис. 10. Изменение нагруженной добротности ДР от его относительной диэлектрической проницаемости

Из данных рис. 10 видно, что нагруженная добротность ДР растет с увеличением значения относительной диэлектрической проницаемости материала ДР, а его резонансная монотонно уменьшается (рис.8). Так как интенсивность возбуждения ДР определяется, в первую очередь, значением нагруженной добротности, то оптимальные радиационные характеристики ДР обеспечиваются в пределах величин относительной диэлектрической проницаемости материала ϵ' от 10 до 25 при условии обеспечения требуемой интенсивности возбуждения ДР на рабочем типе колебаний. При дальнейшем уменьшении ϵ' добротность существенно уменьшается и в пределе $\epsilon' \rightarrow 1$ диэлектрический образец ДР физически исчезает.

4. Направление рассеяния ДР в дальней зоне

На рис. 11 приведена картина рассеянного электрического поля используемого ДР в его окрестности на частоте 1599,3МГц, из которой видно, что ближнее поле достаточно интенсивно в пределах 3-4 диаметров ДР.

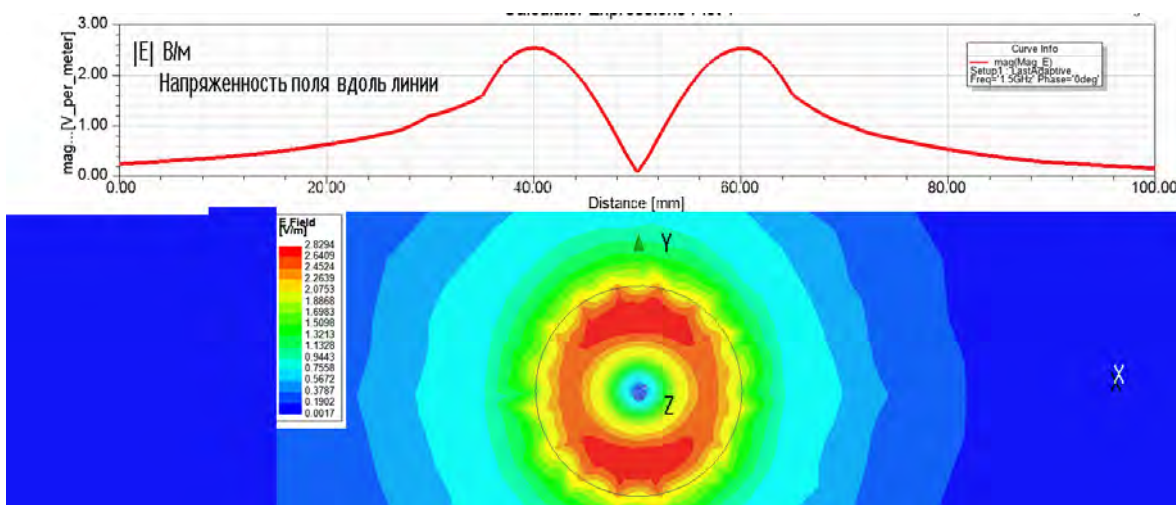


Рис. 11. Электрическое поле рассеяния ДР в плоскости XOY

Характеристика способности ДР на излучение в дальней зоне приведена на рис.12, на котором представлена бистатическая эффективная площадь рассеяния ДР (в дБм²) в полярных координатах, которая подобна диаграмме направленности излучения ДР.

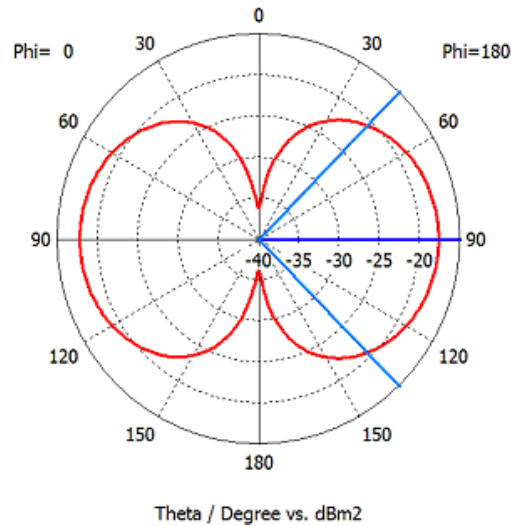


Рис.12. Зависимость площади рассеяния ДР от углов сферической системы координат.

Согласно рис. 12. диаграмма эффективной площади рассеяния электромагнитного поля ДР в свободном пространстве подобна дальнему полю магнитного диполя. Ширина диаграммы по уровню - 3 дБ (выделена прямыми синего цвета) от максимального значения составила $91,4^\circ$ в отличие от соответствующей величины 90° для магнитного диполя. Некоторое расхождение с диаграммой магнитного диполя имеется в заметной эллиптичности кривой, описывающей диаграмму ДР в полярных координатах.

Следует отметить, что на определенных частотах эффективная поверхность рассеяния может существенно уменьшаться, что подтверждается экспериментальными измерениями [2] и что связано с несимметрией АЧХ, на одном из склонов которой наблюдается эффект компенсации резонансной реактивности ДР с нерезонансной реактивностью, обусловленной нерезонансным фоном диэлектрического образца ДР. Аналогичный эффект наблюдается при размещении ДР внутри полости прямоугольного металлического волновода [2,5].

Выводы

В результате численного моделирования задачи возбуждения вынужденных колебаний ДР под действием гармонического во времени электромагнитного поля плоской волны выявлены особенности распределения

электрического и магнитного полей ДР в свободном пространстве при возбуждении в нём низшего магнитного типа колебаний, отличающегося от известного идеализированного $H_{01\delta}$ -типа колебания ДР. Обнаружены эффекты "выпучивания" электрического поля ДР за его боковую цилиндрическую поверхность и "области минимума" магнитного поля внутри ДР, примыкающей к его цилиндрической поверхности, позволившие ввести параметр "эффективного диаметра" ДР и уточнить значение резонансной частоты идеализированного $H_{01\delta}$ -типа колебания ДР для так называемой модели "второго приближения", использующего в граничных условиях на боковой цилиндрической поверхности ДР идеальные "магнитные стенки". Впервые получены частотные характеристики амплитуд вынужденных колебаний магнитного поля ДР в исследуемом L-диапазоне частот. Показано, что результирующее электромагнитное поле ДР и падающей плоской волны в окрестности ДР преимущественно определяется структурой собственного типа колебания ДР. Получены зависимости основных характеристик ДР (резонансная частота, нагруженная добротность) в зависимости от относительной проницаемости материала ДР в широкой полосе частот. Показано, что оптимальные радиационные характеристики ДР обеспечиваются в пределах величин диэлектрической проницаемости материала от 10 до 25 при условии обеспечения требуемой интенсивности возбуждения ДР на рабочем типе колебаний. Рассчитаны значения резонансной частоты и добротности связи ДР со свободным пространством на низшем типе колебания ДР, согласующиеся с известными данными, полученными из строгого решения дисперсионных уравнений для диэлектрического шара. Полученные в работе результаты представляют интерес при разработках антенн на основе диэлектрических резонаторов, получивших широкое распространение в средствах космической и мобильной сотовой связи 5-го поколения.

Литература

1. Richtmyer R.D. Dielectric resonators. // J. App. Phys. 1939. Vol.10. P.391-398.
2. Ильиченко М.Е., ред. Диэлектрические резонаторы. М.: Радио и связь. 1989.

3. Боровиков В.А, ред. Численные методы теории дифракции. М.: МИР. 1982, 200 с.
4. Загер О., Тиси Ф. О собственных и вынужденных модах диэлектрической сферы. // ТИИЭР. 1968. Т.66. №9. С.203.
5. 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.: Центральный исследовательский институт «Электроника», Изд-во ЭТ. Серия 1. Электроника СВЧ, 1990. 64 с.
6. Алексейчик Л.В., Геворкян В.М, Калугин Е.И. Исследование миниатюрных диэлектрических СВЧ резонаторов в качестве антенных СВЧ элементов. // Труды МЭИ, 1981, выпуск 528, с. 31-40.
7. Long S.A., McAllister M.W., Shen L.C. The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983. Vol.31. No.3. P.406-412.
8. Безбородов Ю.М., Массалитин С.Ф. Антенные устройства на диэлектрических резонаторах // Радиотехника. 1986. № 8. С.85-88.
9. Luk K.M., Leung K.W., editors. Dielectric Resonant Antenna. Research Studies Press, 2003.
10. Coulibaly Y., Denidni T.A., Boutayeb H. Broadband microstrip-fed dielectric resonator antenna for X-band applications. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol.7. P.341-345.
11. Soren D., Ghatak R., Mishra R.K., Poddar D.R. Dielectric Resonator Antennas: Designs and Advances // Progress in Electromagnetics Research B. 2014. Vol.60. P.195-213.
12. Leung K.W. State Key Laboratory of Millimeter Waves & Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong Presented to the IEEE LI Section Antenna and Propagation Society on Monday October 8th 2012.
13. Caratelli K.D. Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies. // Shindawi

Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation. 2016. Article ID 6075680. 20 pages. <https://doi.org/10.1155/2016/6075680>

14. Petosa A., Thirakoune S. Rectangular Dielectric Resonator Antennas with enhanced Gain. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2011. Vol.59. No.4. P.1385–1389.

15. Maity S., Gupta B. Closed form expressions to find radiation patterns of rectangular dielectric resonator antennas for various modes. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2014. Vol.62. No.12. P.6524–6527.

16. Malheiros-Silveira G.N., Hernandez-Figueroa H.E. Dielectric resonator nanoantenna coupled to metallic coplanar waveguide. // IEEE Photonics Journal. 2015. Vol.7. No.1. P.1–7.

17. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: Издательство МЭИ. 2012. 152 с.

Для цитирования:

Алексейчик Л.В., Курушин А.А. Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.1>