

УДК 621.3.029.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА СВЯЗАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ

Б. А. Беляев^{1,2,*}, К. В. Лемберг^{1,2}, академик РАН В. Ф. Шабанов^{1,3}

Поступило 24.07.2019 г.

На модифицированных диэлектрических резонаторах (ДР) цилиндрической формы в СВЧ-диапазоне исследован аналог оптического волновода, состоящего из цепочки металлических наночастиц. Два нижайших резонанса ДР соответствуют дипольной и квадрупольной модам колебаний аналогично плазменным колебаниям в сферических наночастицах. Показано, что волновод, состоящий из семи резонаторов, обладает высокими частотно-селективными свойствами и сравнительно малыми потерями, если в формировании его полосы пропускания участвуют резонансы квадрупольных мод колебаний. Характеристики исследованного волновода почти не изменяются при его изгибе на 90° , а сечение локализации основной части распространяющейся в нём энергии в 5 раз меньше длины электромагнитной волны, что примерно соответствует оптическим волноводам на плазменных колебаниях в наночастицах.

Ключевые слова: волновод, плазмонный резонанс, электромагнитно связанные резонаторы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893240-245>

Известно, что для передачи оптических сигналов в устройствах оптроники необходимы волноводные линии с поперечными размерами, существенно меньшими длины световой волны. Поэтому активно исследуются оптические волноводы из цепочек электромагнитно взаимодействующих металлических наночастиц в виде шариков или эллипсоидов [1–3], поперечные размеры которых в десятки раз меньше поперечных размеров традиционных оптоволоконных линий передачи. В металлических частицах размерами порядка десятков нанометров на частотах оптического диапазона наблюдаются резонансы мультипольных мод плазменных колебаний, обладающие достаточно высокой добротностью [4], так как длина свободного пробега электронов в таких частицах значительно превышает размеры частиц. При построении оптических волнопроводов исследователи, как правило, используют резонансы только нижней — дипольной моды колебаний наночастиц, однако экспериментально показано [5], что энергия световой волны в цепочке наночастиц более эффективно передаётся на резонансах не дипольной, а квадрупольной моды колебаний.

Несмотря на большой объём проводимых в настоящее время исследований, анализ опублико-

ванных результатов показывает, что характеристики оптических волнопроводов из наночастиц пока не удовлетворяют практическим требованиям, поэтому ещё рано говорить о широком использовании таких волнопроводов. Потери мощности в них слишком велики и составляют десятки децибел даже при передаче сигнала на расстояния порядка длины световой волны, и при этом наблюдается большая неравномерность частотной зависимости потерь в полосе пропускания. Однако в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) подобные конструкции волнопроводов, построенных из резонансных структур, хорошо изучены [6], и они, обладая сравнительно высокими характеристиками, широко применяются, например, в качестве замедляющих систем.

В настоящей работе в СВЧ-диапазоне исследуется аналог оптического волновода, построенный на цилиндрических диэлектрических резонаторах из высокочастотной керамики ТБНС, имеющей относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 80$. Обнаруженные закономерности поведения характеристик исследуемого волновода на цепочке связанных диэлектрических резонаторов от его конструктивных параметров, несомненно, будут полезны при настройке реальных оптических волнопроводов на цепочках взаимодействующих наночастиц.

КОНСТРУКЦИЯ ВОЛНОВОДА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ

Волновод представлял собой цепочку из взаимодействующих диэлектрических цилиндров с диаметром основания 25 мм и высотой 19 мм из кера-

¹Институт физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Красноярск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

³Сибирский государственный университет науки
и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск

*E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

мики ТБНС с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$. Спектр электромагнитных колебаний такого резонатора представлен штриховой линией на рис. 1. Из множества резонансов, наблюдаемых в спектре, интерес представляют только два резонанса, которые соответствуют дипольной (TE_{011}) и квадрупольной (TE_{012}) модам колебаний. Эти моды являются аналогами дипольных и квадрупольных мод плазменных колебаний в металлических наночастицах, на которых конструируют, как уже отмечалось, оптические волноводы.

Для “удаления” из спектра паразитных резонансов исходный цилиндрический резонатор был модифицирован: вдоль его оси было просверлено отверстие диаметром 12 мм, а перпендикулярно оси он был разделён на две равные части, зазор между которыми шириной 2,5 мм заполнен вспененным полистиролом с низкой относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. В результате два нижайших резонанса в спектре такого резонатора (сплошная линия на рис. 1) соответствуют дипольной и квадрупольной модам колебаний. В табл. 1 для модифицированного резонатора показана структура высокочастотных магнитных полей дипольной и квадрупольной мод колебаний, приведены их резонансные частоты и собственные добротности, полученные расчётом 3D-модели резонатора в программе CST Microwave Studio. Конфигурация высокочастотных полей квадрупольной моды колебаний препятствует излучению энергии из резонатора, поэтому его добротность значительно выше, чем

добротность на дипольной моде. Отметим, что в металлических наноразмерных сферах [4] значения добротности резонансов плазменных колебаний как дипольной, так и квадрупольной моды мало отличаются от приведённых в табл. 1.

В волноводе связь между резонаторами может осуществляться двумя способами. В первом дипольный момент, ориентированный вдоль оси резонатора, ортогонален направлению распространения волны, и такой тип связи называют ТМ-связью (transversal mode). Во втором типе связи дипольный момент ориентирован вдоль направления распространения волны, и этот тип называют ЛМ-связью (longitude mode). Ориентация резонаторов в цепочке для их ТМ- и ЛМ-связей показана на вставках рис. 2. Важно отметить, что волновод, построенный на связанных резонаторах, по существу, является полосно-пропускающим фильтром [12], при этом ширина его полосы пропускания определяется величиной связи резонаторов, которая обратно пропорциональна величине зазоров между ними.

Очевидно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) исследуемого волновода зависит от типа связи резонаторов в нём. Для сравнения на рис. 2 показаны рассчитанные в программе электродинамического анализа CST Microwave Studio АЧХ волноводов с ТМ- и ЛМ-связью, состоящих из пяти резонаторов, находящихся на одинаковом расстоянии в 10 мм друг от друга. Численный расчёт проведён при слабой связи входного и выходного резонаторов с внешними линиями передачи для лучшего разрешения отдельных пиков на АЧХ, обу-

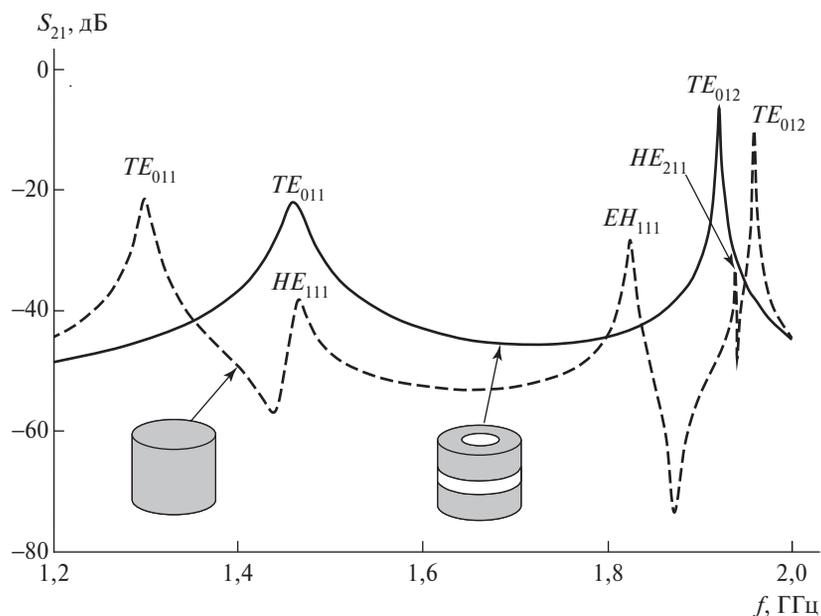
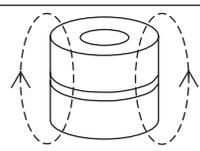
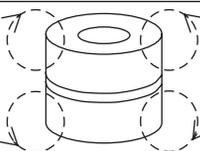


Рис. 1. Спектры электромагнитных колебаний исходного (штриховая линия) и модифицированного (сплошная линия) диэлектрических резонаторов цилиндрической формы.

Таблица 1. Характеристики дипольной и квадрупольной мод колебаний модифицированного диэлектрического резонатора

Мода колебаний	Распределение высокочастотных магнитных полей	Частота собственных колебаний (длина волны)	Собственная добротность резонанса
TE_{011} (магнитный диполь)		1,55 ГГц (194 мм)	50
TE_{012} (магнитный квадруполь)		1,94 ГГц (155 мм)	700

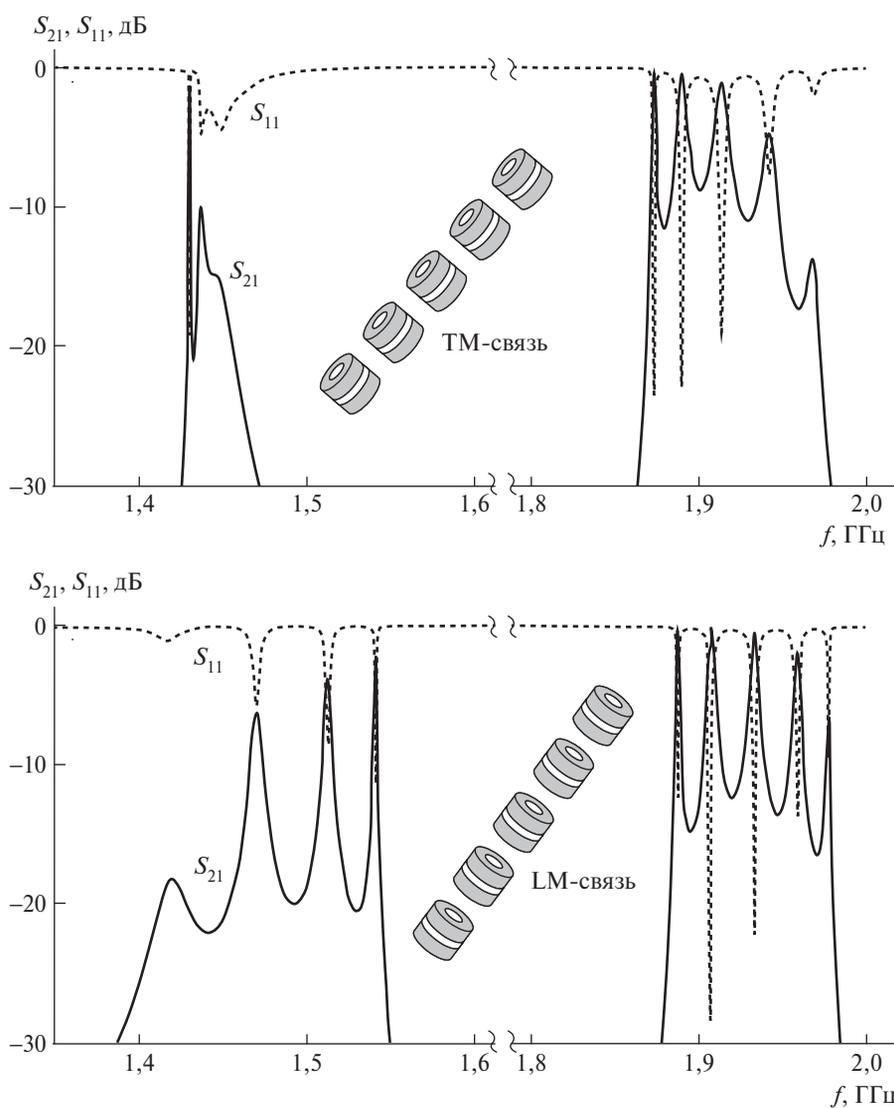


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики волноводов с ТМ- и ЛМ-связью резонаторов в цепочке и при их слабой связи с внешними линиями передачи (сплошные линии — прямые потери, точки — потери на отражение).

словленных расталкиванием резонансных частот взаимодействующих резонаторов.

Видно, что при ТМ-связи взаимодействие резонаторов на дипольной моде колебаний очень слабое, поэтому полоса пропускания узкая и в ней наблюдается только часть резонансных пиков. На квадрупольной моде взаимодействие резонаторов существенно больше, в результате видны все пять резонансных пиков, а ширина полосы пропускания увеличилась в несколько раз. Кроме того, по частотным зависимостям прямых потерь S_{21} и потерь на отражение S_{11} видно, что для получения равномерной АЧХ в полосах пропускания волновода потребуются не только коррекция связей резонаторов, но и подстройка их резонансных частот. Следует отметить, что в результате взаимодействия частоты резонаторов на дипольной моде колебаний понизились примерно на 100 МГц (табл. 1), а на квадрупольной моде понижение существенно меньше, и оно составляет величину примерно 20 МГц.

При ЛМ-связи (рис. 2) сильное взаимодействие резонаторов наблюдается как на дипольной, так и на квадрупольной моде колебаний, однако только на квадрупольной моде в полосе пропускания видны все пять резонансов, и при этом связи между резонаторами почти сбалансированы. Заметим, что при ЛМ-связи частоты резонаторов в результате взаимодействия на дипольной моде колебаний понизились примерно на 50 МГц (табл. 1), а на квадрупольной моде почти не изменились.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ВОЛНОВОДА

Для исследования характеристик разработанного волновода были изготовлены два опытных образца, состоящих из семи диэлектрических резонаторов. Учитывая тот факт, что добротность резонатора на квадрупольной моде колебаний значительно больше, чем на дипольной моде, именно квадрупольная мода была выбрана в качестве рабочей для формирования полосы пропускания волновода. При этом в конструкциях, представленных на фотографии рис. 3, использовалась ЛМ-связь между резонаторами, что позволило разместить их на гибком тefлоновом стержне с низкой относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,2$, который практически не влиял ни на связи, ни на резонансные частоты резонаторов. Такая конструкция значительно упростила сборку опытных образцов и их настройку. Крайние резонаторы волновода подключались к коаксиальным портам с волновым сопротивлением 50 Ом через элементы связи в виде ин-

дуктивных петель, в которых структура высокочастотных электромагнитных полей на центральной частоте полосы пропускания соответствовала структуре полей в резонаторах.

Перед изготовлением волновода настройка полосы пропускания производилась ручным параметрическим синтезом его 3D-модели в программе численного электродинамического анализа, используя стандартный способ настройки СВЧ-фильтров [7]. При настройке конструкции для определённости были зафиксированы ширина полосы пропускания $\Delta f = 80$ МГц и центральная частота полосы $f_0 = 1940$ МГц, что соответствует относительной ширине полосы $\Delta f/f_0 = 4,1\%$. При этом подбирались зазоры между резонаторами для балансировки связей между ними, зазоры между индуктивными петлями и крайними резонаторами для установления оптимальной связи с портами, а также подбирались толщины диэлектрической прослойки между керамическими кольцами каждого из резонаторов для коррекции их резонансных частот. Волновод считался настроенным, когда максимумы потерь на отражение в его полосе пропускания не превышали уровень -14 дБ. Полученные размеры зазоров после настройки волновода использовались при сборке конструкций опытных образцов.

На рис. 3 представлены частотные зависимости прямых потерь и потерь на отражение настроенного прямолинейного волновода, измеренные на векторном анализаторе цепей в широкой полосе частот. Как и следовало ожидать, эти характеристики для изогнутого под углом 90° волновода почти не отличаются, поэтому их не приводим. Для сравнения на вставке рис. 3 приведены АЧХ обоих волноводов в области полосы пропускания. Видны незначительные отличия, в частности, минимальные потери в полосе пропускания для прямого волновода составляют $\sim 2,5$ дБ, а для изогнутого $\sim 3,5$ дБ.

Кроме ширины полосы пропускания и величины потерь в ней к основным характеристикам неэкранированных волноводов также относятся его нормированные на длину волны протяжённость l_λ и размер поперечного сечения S_λ , в котором локализуется основная часть распространяющейся энергии электромагнитной волны. Учитывая, что исследуемый волновод имел длину 220 мм, а длина волны на центральной частоте его полосы пропускания $\lambda \approx 155$ мм, $l_\lambda \approx 1,4$. Сечение, по которому распространялась энергия электромагнитной волны, имело диаметр ~ 30 мм, т.е. $S_\lambda \approx 0,2$. Границей этого сечения считалось расстояние, на котором уровень СВЧ-мощности на 10 дБ меньше её максимального значения

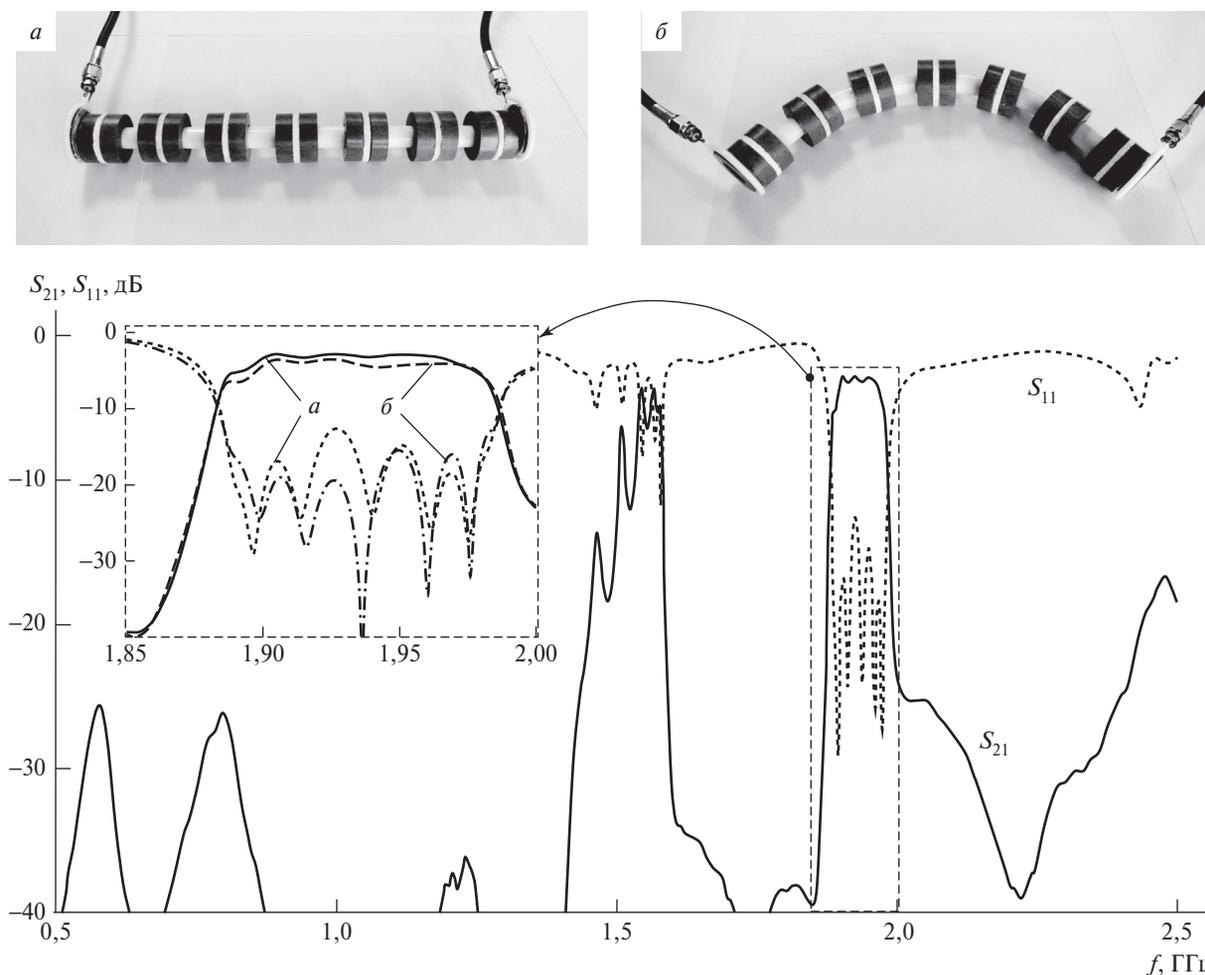


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики прямого волновода (сплошные линии — прямые потери, точки — обратные потери). На вставке показана полоса пропускания в укрупнённом масштабе для прямого волновода (*a*) и для изогнутого под прямым углом (*б*).

в резонаторе. Важно отметить, что в оптических волноводах, в которых используются плазменные резонансы в цепочке из наноразмерных металлических частиц, наблюдается примерно такая же локализация электромагнитной энергии световой волны, как и в исследованном волноводе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для известной конструкции оптического волновода из цепочки электромагнитно связанных металлических наночастиц разработан и исследован в СВЧ-диапазоне аналог, построенный на модифицированных диэлектрических резонаторах цилиндрической формы, в которых два нижайших резонанса соответствуют дипольной и квадрупольной модам колебаний, соответствующих плазменным колебаниям в наночастицах. Исследованный волновод состоял из семи резонаторов и настраивался как полосно-пропускающий фильтр подбором резонансных частот и величины связей не только ре-

зонаторов друг с другом, но и крайних резонаторов с внешними линиями передачи так, чтобы максимумы отражений СВЧ-мощности в полосе пропускания устройства были не более -14 дБ. При этом в формировании полосы пропускания участвовали резонансы только квадрупольных мод колебаний.

Показано, что волновод обладает высокими частотно-селективными свойствами и сравнительно малыми потерями в полосе пропускания. Отметим, что при изгибе волновода на 90° его характеристики почти не изменяются. Важно также отметить, что благодаря использованию для изготовления резонаторов керамики с высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$ размер поперечного сечения волновода, в котором локализуется основная часть распространяющейся энергии, в 5 раз меньше длины электромагнитной волны. Эта характеристика примерно такая же, как у оптических волноводов, в которых используются плазменные резонансы в цепочке из наноразмерных металлических частиц.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № RFME-FI60417X0179.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zou Sh., Schatz G.C.* Metal Nanoparticle Array Waveguides: Proposed Structures for Subwavelength Devices // *Phys. Rev. B.* 2006. V. 74. P. 125 111-1–125 111-5.
2. *Markel V.A., Sarychev A.K.* Propagation of Surface Plasmons in Ordered and Disordered Chains of Metal Nanospheres // *Phys. Rev. B.* 2007. V. 75. P. 085426-1–085426-11.
3. *Jacak W., Krasnyj J., Jacak J., Chepok A., Jacak L., Donderowicz W., Hu D.Z., Schaadt D.M.* Undamped Collective Surface Plasmon Oscillations along Metallic Nanosphere Chains // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 108. P. 084304-1–084304-12.
4. *Belyaev B.A., Tyurnev V.V.* Resonances of Electromagnetic Oscillations in a Spherical Metal Nanoparticle // *Microwave and Optical Technology Letters.* 2016. V. 58. № 8. P. 1883–1886.
5. *Бабин В.М., Воробьев В.В., Медведев А.С., Мирончук Е.С., Нариц А.А., Кондорский А.Д.* Спектральные особенности распространения электромагнитного поля вдоль цепочки наночастиц // *Краткие сообщения по физике ФИАН.* 2013. Т. 5. С. 23–28.
6. *Syms R.R.A., Young I.R., Solymar L.* Low-Loss Magneto-Inductive Waveguides // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006. № 39. P. 3945–3951.
7. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Шабанов В.Ф.* Оптический полосно-пропускающий фильтр на основе трехкомпонентной многослойной структуры // *ДАН.* 2014. Т. 456. № 4. С. 413–416.

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE TRANSMISSION LINE BASED ON COUPLED DIELECTRIC RESONATORS

B. A. Belyaev^{1,2}, K. V. Lemderg^{1,2}, Academician of the RAS V. F. Shabanov^{1,3}

¹*Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

³*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received July 24, 2019

An analogue of optical waveguide consisting of metallic nanoparticles chain was investigated using modified cylindrical dielectric resonators (DR) in the microwave range. The two lowest resonances of the DR correspond to the dipole and quadrupole modes of oscillations similar to plasma oscillations in spherical nanoparticles. It is shown that a waveguide consisting of seven resonators has high frequency selective properties and relatively low losses, if the resonances of quadrupole modes are used to form its bandwidth. The characteristics of the studied waveguide remain almost unchanged at its bending by 90°. Cross-section of the main part of energy localization in waveguide is 5 times less than the length of the electromagnetic wave, which roughly corresponds to the optical waveguides based on plasmon oscillations in nanoparticles.

Keywords: waveguide, plasmon resonance, electromagnetically coupled resonators.