

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СПЛИТ-КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ВКЛЮЧЕНИЕМ ФЕРРИТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.Н.Лобекин, М.И.Бичурин

MODELING OF A METASTRUCTURE BASED ON SPLIT-RING RESONATORS INCLUDING THE FERRITE ELEMENTS

V.N.Lobekin, M.I.Bichurin

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, slavalobekin@gmail.com

Проведено компьютерное моделирование метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов с включением ферритовых элементов ЖИГ (железо-иттриевый гранат) на подложке ГГГ (галлий-гадолиниевый гранат) с целью исследования возможности перестройки линии ферромагнитного резонанса четырех ферритовых резонаторов под действием внешнего магнитного поля. Показана конструкция метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов с размещением ферритовых элементов ЖИГ-ГГГ и эквивалентная схема подключения резонаторов. Данная структура рассматривалась ранее в плане использования для разработки микрополоскового фильтра. Моделирование осуществлялось с помощью инструмента для трехмерного моделирования ВЧ/СВЧ полей HFSS Ansoft. Полученные в результате проведенного моделирования амплитудно-частотные характеристики ферромагнитного резонанса показывают возможность перестройки резонансной линии под действием внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: сплит-кольцевой резонатор, метаструктура, ферромагнитный резонанс, железо-иттриевый гранат

Для цитирования: Лобекин В.Н., Бичурин М.И. Моделирование метаструктуры на основе сплит-кольцевых резонаторов с включением ферритовых элементов // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.91–95. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).91-95](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).91-95)

A computer simulation of a metastructure based on four split-ring resonators with the inclusion of YIG (yttrium-iron garnet) ferrite elements on a GGG (gallium-gadolinium garnet) substrate was carried out in order to study the possibility of tuning the ferromagnetic resonance (FMR) line of 4 ferrite resonators under the influence of an external magnetic field. The design of a metastructure based on four split-ring resonators with YIG-GGG ferrite resonators and an equivalent resonator connection circuit are presented. This structure was considered earlier in terms of use for the development of a microstrip filter. The simulation was carried out using the Ansoft HFSS 3D modeling tool for RF/microwave fields. The obtained amplitude-frequency characteristics of the FMR show the possibility of resonance line tuning under the influence of an external magnetic field.

Keywords: split-ring resonator, metastructure, ferromagnetic resonance, yttrium-iron garnet

For citation: Lobekin V.N., Bichurin M.I. Modeling of a metastructure based on split-ring resonators including the ferrite elements // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.91–95. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).91-95](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).91-95)

Введение

Метаструктуры на основе сплит-кольцевых резонаторов разной формы (π -форма, S-форма, U-форма, сплит-Н-форма и др.) представляют особый интерес для исследований за счет своих уникальных свойств, не встречающихся в природе. Метаматериалы — искусственные материалы, содержащие периодический массив субволновых включений, известных как сплит-кольцевые резонаторы. Они могут вместе демонстрировать макроскопически наблюдаемые эффективные значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon < 0$) и магнитной проницаемости ($\mu < 0$), которые не встречаются в природе и широко используются для измерения различных характеристик материалов.

Метаматериалы находят различное применение в технике: линии передачи [1], СВЧ датчики [2,3], фильтры [4-10], антенны [11] и др.

В данной работе рассматривается возможность перестройки линии ФМР четырех ферритовых резонаторов, включенных в метаструктуру, состоящую

из четырех сплит-кольцевых резонаторов, под действием внешнего магнитного поля.

Конструкция метаструктуры на основе сплит-кольцевых резонаторов

Конструкция, выполненная на подложке керамического ламината Duroid 6010.2LM размерами 30×24 мм и толщиной 1,9 мм, с относительной диэлектрической проницаемостью 10,2 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0023, представлена на рис.1. В данной конструкции подобраны оптимальные размеры сплит-кольцевых резонаторов, которые были сведены к одинаковым размерам. Микрополосковая линия передачи является элементом возбуждения с волновым сопротивлением 50 Ом, сплит-кольцевой резонатор и заземление выполнено из меди с толщиной металлизации 0,035 мм. Также на рис.1 представлена эквивалентная схема с последовательным RLC резонансным контуром, где в зазоре сплит-кольцевого резонатора образуется емкость C_s , а контур сплит-кольцевого резонатора соответствует индуктивности L_s .

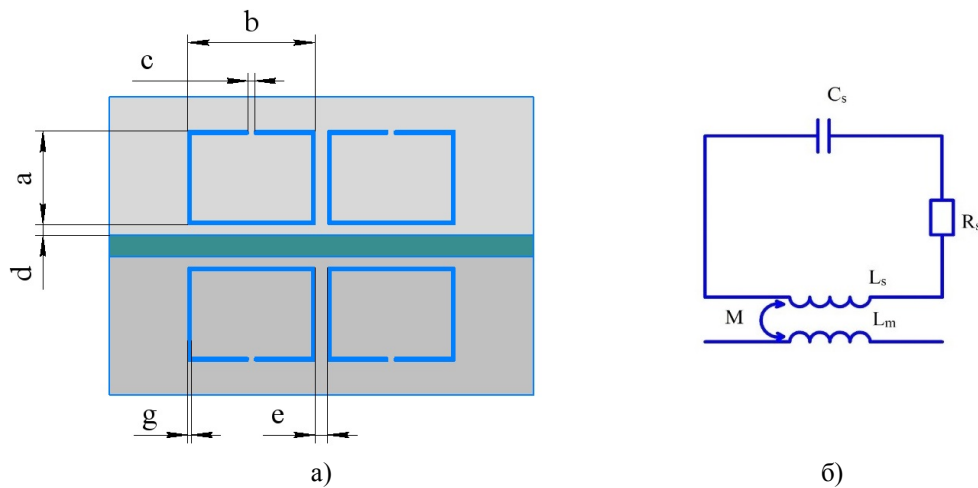


Рис.1. Структура метаматериалов на основе сплит-кольцевых резонаторов: а) конструкция метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов, $a = 5$ мм, $b = 7$ мм, $c = 0,15$ мм, $d = 0,65$ мм, $e = 2$ мм, $g = 0,2$ мм; б) эквивалентная электрическая схема

Расположение сплит-кольцевого резонатора в непосредственной близости от микрополосковой линии позволяет использовать магнитное поле, возникающее при распространении квази-Т-волны. Оно индуцирует циркулирующий ток в контуре сплит-кольцевого резонатора. В квазистатическом представлении сплит-кольцевой резонатор может быть аппроксимирован индуктивностью и емкостью в виде последовательного LC-резонаторного контура. В частности, сам резонатор образует индуктивность, а зазор в резонаторе — емкость. Резонанс имеет место в сплит-кольцевом резонаторе, когда энергия, накопленная в емкости, сбалансирована с магнитной энергией, накопленной в индуктивности.

Компьютерное моделирование метаструктуры

Моделирование проводилось в программе Ansys HFSS — программном инструменте для трехмерного электромагнитного моделирования и разработки высокочастотных радиоэлектронных и антенных устройств. ANSYS HFSS использует новейшие алгоритмы и методы электродинамического расчета. Пользователю предоставляется возможность выбо-

ра, какой метод расчета следует использовать в той или иной задаче электромагнитного моделирования. Каждая из вычислительных технологий ANSYS HFSS основана на мощном автоматизированном вычислительном процессе, в котором пользователю требуется задать геометрию, свойства материалов и способ представления результатов, и на основе этих данных HFSS автоматически сформирует соответствующую сетку разбиения объекта для выполнения быстрого и точного расчета.

Для исследования возможности перестройки линии ФМР под действием внешнего магнитного поля в метаструктуру на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов включалось разное количество ферритовых ЖИГ элементов (от одного до четырех). Элементы ЖИГ в форме диска диаметром $D = 0,6$ мм и толщиной $s = 0,2$ мм включались в зазоры между микрополосковой линией и сплит-кольцевыми резонаторами.

В результате проведенного компьютерного моделирования получены амплитудно-частотные характеристики линии ФМР под действием внешнего магнитного поля, представленные на рис.2-5.

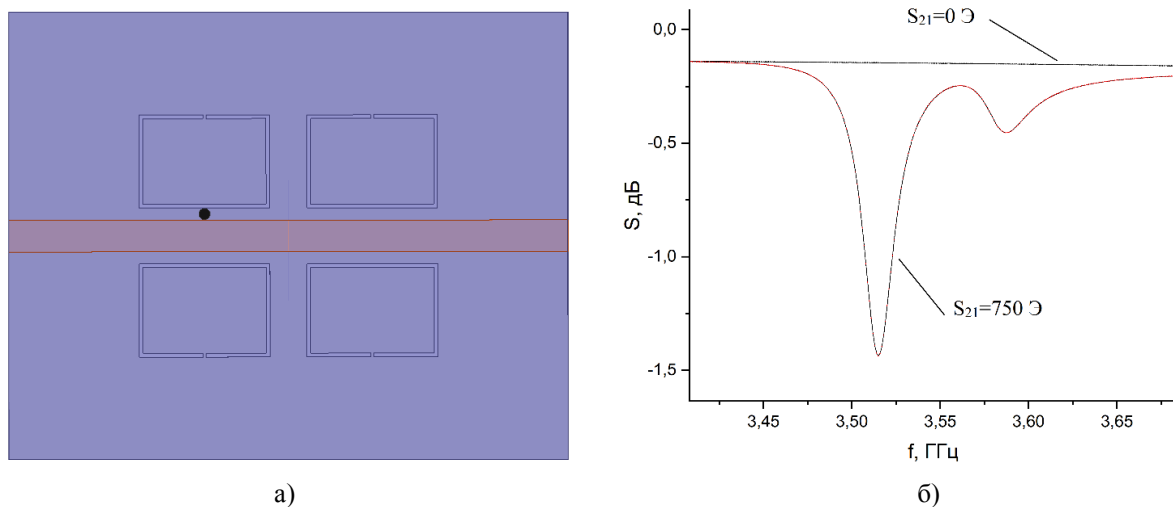
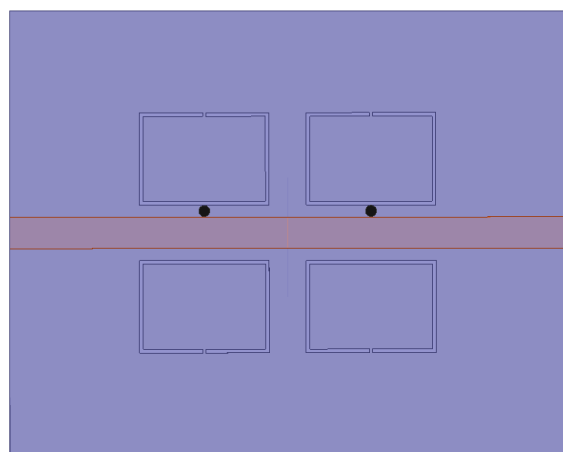
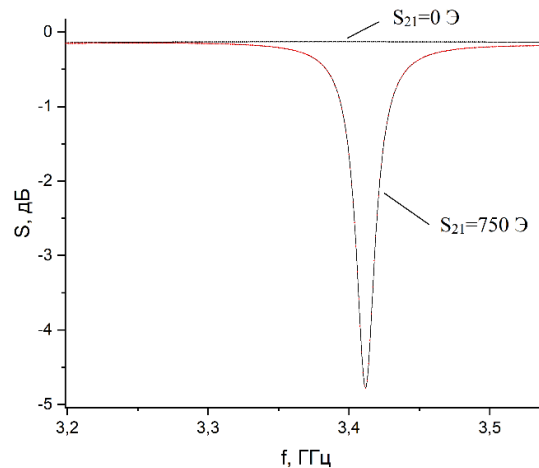


Рис.2. Результаты моделирования метаструктуры с одним элементом ЖИГ: а) метаструктура с включением одного элемента ЖИГ; б) амплитудно-частотная характеристика линии ФМР 1-го элемента ЖИГ

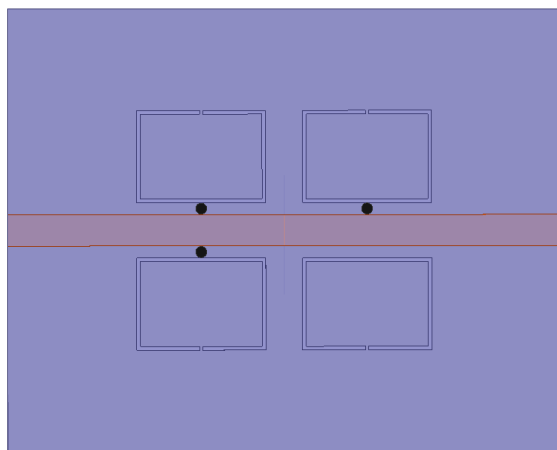


а)

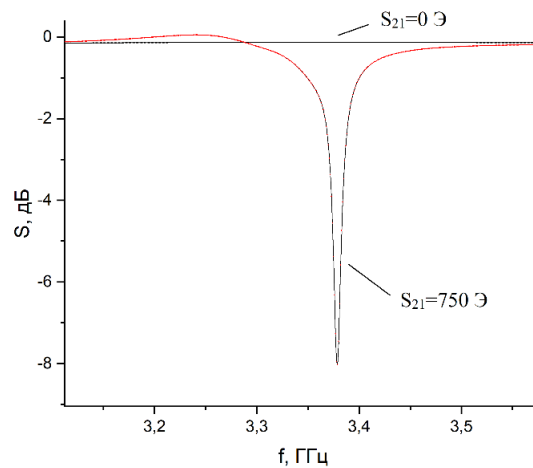


б)

Рис.3. Результаты моделирования метаструктуры с двумя элементами ЖИГ: а) метаструктура с включением двух элементов ЖИГ; б) амплитудно-частотная характеристика линии ФМР 2-х элементов ЖИГ

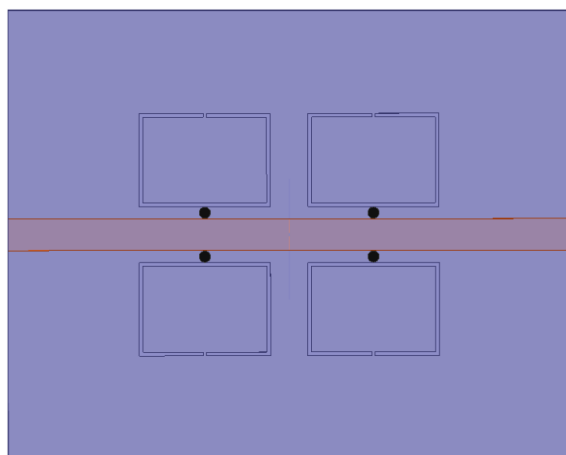


а)

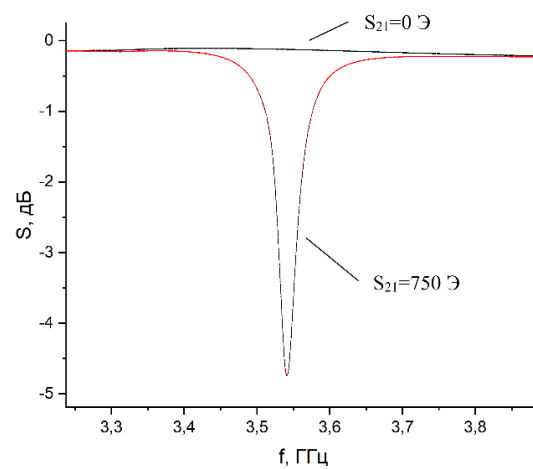


б)

Рис.4. Результаты моделирования метаструктуры с тремя элементами ЖИГ: а) метаструктура с включением трех элементов ЖИГ; б) амплитудно-частотная характеристика линии ФМР 3-х элементов ЖИГ



а)



б)

Рис.5. Результаты моделирования метаструктуры с четырьмя элементами ЖИГ: а) метаструктура с включением 4-х элементов ЖИГ; б) амплитудно-частотная характеристика линии ФМР 4-х элементов ЖИГ

Результаты проведенного компьютерного моделирования показывают влияние внешнего магнитного поля на линию ФМР ферритовых элементов ЖИГ, включенных в метаструктуру на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов. Проявляется сдвиг линии ФМР по частоте, что говорит о возможности электронной перестройки с помощью магнитного поля. Этот результат показывает, что возникает возможность создавать управляемые устройства на основе метаматериалов.

Также в результате проведенного исследования были получены результаты усиления линии ФМР благодаря включению ферритовых элементов ЖИГ в метаструктуру на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов с одинаково приложенным внешним магнитным полем $H_0 = 750$ Э (рис.6). Ширина линии ФМР с включением одного ферритового элемента составила 21,1 МГц; двух элементов — 21 МГц, трех элементов — 13,2 МГц, четырех элементов — 33,4 МГц. Сдвиг линии ФМР в диапазоне от 750 Э до 1000 Э составил 0,71 ГГц для всех вариантов включений ферритовых элементов.

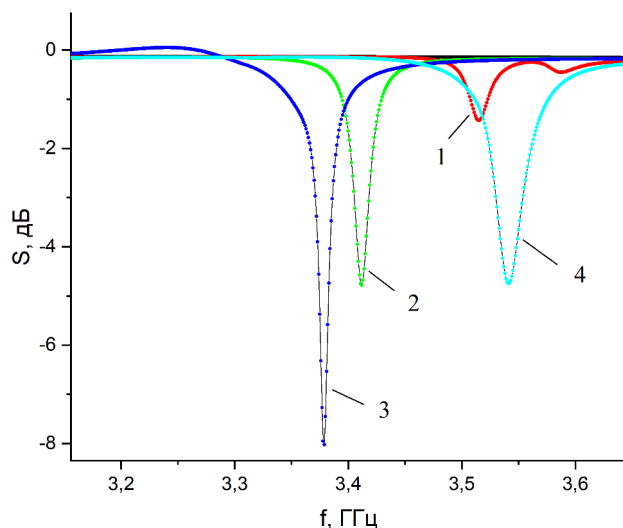


Рис.6. Амплитудно-частотные характеристики ферромагнитного резонанса с включением разного количества элементов ЖИГ. 1 — S_{21} , 1 элемент ЖИГ; 2 — S_{21} , 2 элемента ЖИГ; 3 — S_{21} , 3 элемента ЖИГ; 4 — S_{21} , 4 элемента ЖИГ

Включение двух ферритовых элементов ЖИГ позволило усилить амплитуду линии ФМР в 3,34 раза по сравнению с включением одного ферритового элемента ЖИГ. Включение трех ферритовых элементов ЖИГ позволило усилить в 1,67 раза по сравнению с включением двух ферритовых элементов ЖИГ и в 5,6 раза по сравнению с включением одного ферритового элемента ЖИГ. Включение четырех ферритовых элементов ЖИГ такую динамику уже не показало, при этом амплитуда линии ФМР упала до уровня включения двух ферритовых элементов ЖИГ. Как итог, на рис.7 показан спектр метаструктуры и линия ФМР от трех резонаторов ЖИГ, которые могут быть использованы в качестве передаточной характеристики нового микрополоскового фильтра.

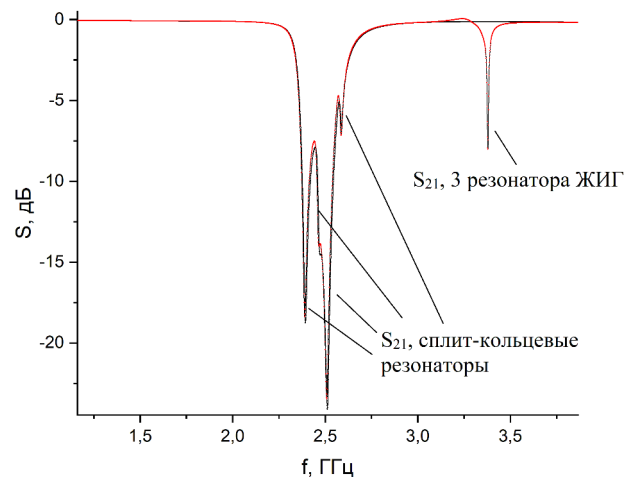


Рис.7. Амплитудно-частотные характеристики сплит-кольцевых резонаторов метаструктуры и линии ФМР с включением трех резонаторов ЖИГ

Включение трех ферритовых элементов в метаструктуру, на основе которой можно сконструировать микрополосковый фильтр, позволяет либо усилить характеристику такого фильтра, либо сдвинуть по частоте резонансную характеристику линии ФМР к резонансным характеристикам метаструктуры и тем самым ее дополнить с возможностью перестройки внешним магнитным полем.

Заключение

В статье рассмотрена метаструктура на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов с включением разного количества ферритовых элементов ЖИГ. Проведено компьютерное моделирование метаструктуры, выполнен сравнительный анализ полученных амплитудно-частотных характеристик линии ФМР с включением разного количества ферритовых элементов ЖИГ. Результат показывает сдвиг линии ФМР по частоте под влиянием магнитного поля, который составил 0,71 ГГц во всех случаях в диапазоне от 750 Э до 1000 Э. Также включение ферритовых элементов ЖИГ и приложение внешнего магнитного поля $H_0 = 750$ Э к этим элементам привело к усилению линии ФМР в несколько раз, что, в свою очередь, позволит усилить передаточную характеристику микрополоскового фильтра, разработанного на основе метаматериалов. Оптимальный результат получился при включении трех ферритовых элементов ЖИГ в метаструктуру. В дальнейшем планируется провести подробное исследование влияния геометрического расположения ферритовых элементов ЖИГ в метаструктуре на основе сплит-кольцевых резонаторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-07-00168.

1. Gil M., Bonache J., Selga J. et al. Broadband resonant-type metamaterial transmission lines // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2007. Vol.17(2). P.97–99. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890327>
2. Withayachumnankul W., Jaruwongrunsee K., Tuantranont A. et al. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric

- characterization // *Sensors Actuators A: Physical*. 2013. Vol.189. P.233–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.027>.
3. Naqui J., Durán-Sindreu M., Martín F. Alignment and position sensors based on split ring resonators // *Sensors*. 2012. Vol.12(9). P.11790–11797. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120911790>
 4. Al-Naib I.A., Jansen C., and Koch M. Single metal layer CPW metamaterial bandpass filter // *Progress Electromag. Res. Lett.* 2010. Vol.17. P.153–161.
 5. Liu J.C., Shu D.-S., Zeng B.H., Chang D.-C. Improved equivalent circuits for complementary split-ring resonator-based high-pass filter with c-shaped couplings // *IET Microw. Antennas Propag.* 2008. Vol.2(6). P.622–626.
 6. Mondal P., Mandal M., Chaktabarty A., Sanyal S. Compact bandpass filters with wide controllable fractional bandwidth // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* 2006. Vol.16(10). P.540–542. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.882401>
 7. Gil M., Bonache J., García-García J., et al. Composite right/left-handed metamaterial transmission lines based on complementary split-rings resonators and their applications to very wideband and compact filter design // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2007. Vol.55(6). P.1296–1304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.897755>
 8. Luo X., Qian H., Ma J.-G., Li E. Wideband bandpass filter with excellent selectivity using new CSRR-based resonator // *Electron. Lett.* 2010. Vol.46(20). P.1390–1391. DOI: <https://doi.org/10.1049/el.2010.1817>
 9. Liu J.-C., Lin H.-C., Zeng B.-H., et al. An improved equivalent circuit model for CSRR-based bandpass filter design with even and odd modes // *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* 2010. Vol.20(4). P.193–195. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2042548>
 10. Лобекин В.Н., Бичурин М.И., Зуева Е.А. Применение метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов // *Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки*. 2021. №4(125). С.43–46. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).43-46](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).43-46)
 11. Hossain M.I., Faruque M.R.I., Islam M.T., Ali M.T. Design and analysis of coupled-resonator reconfigurable antenna // *Applied Physics A*. 2016. Vol.122. Article number: 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9520-6>
 - Wireless Compon. Lett., 2007, vol. 17(2), pp. 97–99. doi: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890327>
 2. Withayachumnankul W., Jaruwongrunsee K., Tuantranont A., et al. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors Actuators A: Physical*, 2013, vol. 189, pp. 233–237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.027>
 3. Naqui J., Durán-Sindreu M., Martín F. Alignment and position sensors based on split ring resonator. *Sensors*, 2012, vol. 12(9), pp. 11790–11797. doi: <https://doi.org/10.3390/s120911790>
 4. Al-Naib I.A., Jansen C., and Koch M. Single metal layer CPW metamaterial bandpass filter. *Progress Electromag. Res. Lett.*, 2010, vol. 17, pp. 153–161.
 5. Liu J.C., Shu D.-S., Zeng B.H., Chang D.-C. Improved equivalent circuits for complementary split-ring resonator-based high-pass filter with c-shaped couplings. *IET Microw. Antennas Propag.*, 2008, vol. 2(6), pp. 622–626.
 6. Mondal P., Mandal M., Chaktabarty A., Sanyal S. Compact bandpass filters with wide controllable fractional bandwidth. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2006, vol. 16(10), pp. 540–542. doi: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.882401>
 7. Gil M., Bonache J., García-García J., et al. Composite right/left-handed metamaterial transmission lines based on complementary split-rings resonators and their applications to very wideband and compact filter design. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2007, vol. 55(6), pp. 1296–1304. doi: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.897755>
 8. Luo X., Qian H., Ma J.-G., Li E. Wideband bandpass filter with excellent selectivity using new CSRR-based resonator. *Electron. Lett.*, 2010, vol. 46 (20), pp. 1390–1391. doi: <https://doi.org/10.1049/el.2010.1817>
 9. Liu J.-C., Lin H.-C., Zeng B.-H., et al. An improved equivalent circuitmodel for CSRR-based bandpass filter design with even and odd modes. *IEEE Microw.Wireless Compon. Lett.*, 2010, vol. 20(4), pp. 193–195. doi: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2042548>
 10. Lobekin V.N., Bichurin M.I., Zueva E.A. Primeneniye metastruktury na osnove chetyrekh split-kol'tsevykh rezonatorov [Application of metasstructure based on four split-ring resonators]. *Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences*, 2021, no. 4(125), pp. 43–46. doi: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).43-46](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).43-46)
 11. Hossain M.I., Faruque M.R.I., Islam M.T., Ali M.T. Design and analysis of coupled-resonator reconfigurable antenna. *Applied Physics A*, 2016, vol. 122, art. no. 2. doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9520-6>

References

1. Gil M., Bonache J., Selga J., et al. Broadband resonant-type metamaterial transmission lines. *IEEE Microw.*