

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ РЕЗОНАТОРОВ МИКРОВОЛНОВОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**В.Н.Лобекин, Р.Г.Кафаров, А.С.Татаренко*, В.Е.Муравьев*****RESEARCH OF THE COUPLING OF RESONATORS OF A MICROWAVE MAGNETOELECTRIC BAND-PASS FILTER USING COMPUTER SIMULATION****V.N.Lobekin, R.G.Kafarov, A.S.Tatarenko*, V.E.Muravev****Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, slavalobekin@gmail.com***Санкт-Петербургский горный университет, Tatarenko_AS@pers.spmi.ru*

В современных условиях успешное развитие электронной техники обусловлено исследованием и внедрением новых материалов с широким диапазоном физических свойств для создания на их основе приборов и устройств, работающих на новых физических принципах. Последние несколько десятилетий характеризовались значительным ростом активности в области исследования материалов, в которых обнаруживается взаимосвязь электрических и магнитных свойств. Особый интерес представляют магнитоэлектрические материалы, свойства которых проявляются при комнатных температурах и относительно небольших магнитных полях, поскольку такие материалы являются перспективными для практических применений. В работе представлена конструкция и рассмотрен принцип действия магнитоэлектрического СВЧ-фильтра. Проведено моделирование в программе HFSS Ansoft, получены амплитудно-частотные характеристики фильтра.

Ключевые слова: магнитоэлектрические материалы, магнитоэлектрический эффект, СВЧ-фильтр, резонатор, моделирование

Для цитирования: Лобекин В.Н., Кафаров Р.Г., Татаренко А.С., Муравьев В.Е. Исследование связи резонаторов микроволнового магнитоэлектрического полосового фильтра с помощью компьютерного моделирования // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.96-101. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).96-101](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).96-101)

In modern time, the successful development of electronic technology is due to the research and industrial usage of new materials with a wide range of physical properties to design on their basis devices operating on new physical principles. The last few decades have been characterized by a significant increase in activity in the field of materials research, in which the relationship between electrical and magnetic properties is manifested. Of particular interest are magnetoelectric materials whose properties are manifested at room temperatures and relatively low magnetic fields since such materials are promising for practical applications. The design and principle of operation of a magnetoelectric microwave filter is presented. The simulation was carried out in the HFSS Ansoft program. The amplitude-frequency characteristics of the filter were obtained.

Keywords: magnetoelectric materials, magnetoelectric effect, microwave filter, resonator, modeling

For citation: Lobekin V.N., Kafarov R.G., Tatarenko A.S., Muravev V.E. Research of the coupling of resonators of a microwave magnetoelectric band-pass filter using computer simulation // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.96-101. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).96-101](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).96-101)

Введение

Возможная связь между электричеством и магнетизмом в твердотельных изоляторах была впервые предложена Кюри [1] в 1894 г. на основе соображений симметрии, а затем названа Дебаем [2] в 1926 г. магнитоэлектрическим (МЭ) эффектом. Ландау и Лифшиц в 1959 г. постулировали, что такой МЭ-эффект является линейным в магнитных кристаллах определенного класса симметрии, где они использовали в качестве примера управление намагниченностью электрическим полем. Наличие такого линейного МЭ-эффекта в антиферромагнетике Cr_2O_3 было предсказано Дзялошинским [3] в том же году, что быстро подтвердилось экспериментами, проведенными Астровым в 1960–1961 гг. [4,5].

В настоящее время исследования в области магнитоэлектричества вышли далеко за рамки поиска линейного МЭ эффекта в магнитных кристаллах определенной симметрии. Линейные и/или нелинейные

МЭ эффекты были обнаружены с 1960-х гг. [6] в однофазных мультиферроидных материалах, которые имеют сегнетоэлектрический и магнитный порядок в одной фазе, а с 1970-х гг. — в МЭ композитах и гетероструктурах [7–9], которые состоят из пьезоэлектрических и магнитных материалов. Управление магнетизмом электрическим полем было обнаружено с 2000-х гг. [10,11] в магнитно-диэлектрических гетероструктурах.

МЭ-эффект обеспечивает преобразование свободной магнитной и электрической энергии в отсутствие каких-либо источников электрического тока, что приводит к рассеиванию сверхмалого количества тепла. Такое бестоковое преобразование энергии лежит в основе потенциала использования МЭ-эффекта во многих современных технологиях [12–16]. В частности, мы обсудим возможности и проблемы использования управления намагниченностью электрическим полем (обратный МЭ-эффект). За современными разработками приборов стоят новые материалы [17] и устройства, которые работают на гораздо более

высоких частотах, чем когда-либо прежде, и эта тенденция, вероятно, сохранится.

Электричество и магнетизм всегда имели тесную связь. Существуют различные способы управления магнетизмом с помощью напряжения:

1) использование однофазных мультиферроиков, где в материале сосуществуют различные типы ферроидных порядков (например, ферромагнитные и сегнетоэлектрические);

2) поверхностные заряды или модуляция плотности носителей, которые могут модифицировать электронную зонную структуру ультратонких металлических слоев или полупроводников;

3) магнитоионика, которая относится к управляемому напряжением движению ионов, как правило, через слои, находящиеся в контакте с жидкими электролитами или ионными проводниками (например, Gd_2O_3 или HfO_2);

4) электрохимические окислительно-восстановительные реакции;

5) обусловленная деформацией связь в пьезоэлектрических/магнитоэлектрических гетероструктурах.

Каждый из этих подходов сталкивается с некоторыми недостатками:

1) нехватка доступных однофазных мультиферроиков и ограниченная сила магнитоэлектрической связи при комнатной температуре;

2) ограниченная глубина проникновения электрического поля внутрь полупроводников и полное экранирование электрического поля на поверхности металлов;

3) низкая скорость и ограниченная выносимость в магнитоионных системах;

4) отсутствие точного контроля над химическими реакциями и их кинетикой;

5) эффекты зажима с подложкой и потребность в хороших интерфейсах в композитных мультиферроиках, опосредованных деформацией.

Несмотря на эти специфические ограничения, все вышеперечисленные механизмы могут быть использованы для изменения свойств ферромагнитных материалов (анизотропия, коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, взаимодействие Дзялошинского — Мориа и т. д.) в той или иной степени при изменении напряжения [18]. Поэтому необходим дальнейший прогресс для решения и преодоления текущих проблем. Сильная деформационно-опосредованная МЭ связь в магнитных/сегнетоэлектрических гетероструктурах имеет большой потенциал для различных сверхвысокочастотных мультиферроидных устройств. В статье рассмотрены некоторые перспективы развития МЭ полосовых СВЧ-фильтров [19].

Перестраиваемые полосовые фильтры СВЧ с управлением магнитным и электрическим полем

Полосовые СВЧ-фильтры на тонкопленочных резонаторах, использующиеся в радиоприемных устройствах и радиотехнических средствах измерений, обладают высокой добротностью, компактными размерами, малыми потерями, предпочтительной температурной стабильностью и совместимой с интегральной схемой обработкой. Однако большинство современ-

ных полосовых фильтров имеют фиксированную частоту работы, что приводит к громоздкости и дороговизне электроники реконфигурируемых систем связи. Одним из перспективных направлений развития СВЧ-техники в настоящее время является разработка СВЧ магнитоэлектрических устройств. Применение МЭ устройств позволяет избавиться от вышеперечисленных недостатков. Возможность управления перестройкой параметрами фильтров с помощью двойного управления как магнитным, так и электрическим полями, позволяет использовать преимущества перестраиваемых по частоте ферритовых и сегнетоэлектрических СВЧ-устройств, разработанных и внедренных ранее.

Моделирование СВЧ перестраиваемых устройств в программах сквозного моделирования, вычисляющих многомодовые S -параметры, значительно упрощает подбор оптимальных параметров линии передачи (размеров и относительной диэлектрической проницаемости подложки, размеров проводников) и параметров МЭ резонаторов (размеров, формы, материала). Нами проведено компьютерное моделирование МЭ полосопропускающего СВЧ-фильтра в программе HFSS Ansoft, получены зависимости сдвига частоты ферромагнитного резонанса, проведено сравнение параметров фильтра в зависимости от формы МЭ резонаторов, используемых в фильтре.

СВЧ-фильтры на МЭ композитах [20] проектируются на основе различных проявлений МЭ эффекта. Наиболее сильно он проявляется в виде сдвига резонансной линии ферромагнитного резонанса (ФМР) под действием управляющего электрического поля [21]. МЭ композит в этом случае играет роль резонатора. Применение электрического поля позволяет осуществить перестройку характеристик фильтра в широком диапазоне частот и реализовать фильтр-преселектор с электрической перестройкой частоты.

Полосно-пропускающий микрополосковый двухрезонаторный МЭ фильтр представляет собой плату из диэлектрического материала, на которой располагаются линии передачи в виде связанных микрополосковых линий нерезонансной длины. Резонаторы выполнены в виде МЭ пластин состава железиттриевого граната (ЖИГ) — титаната цирконата свинца (ЦТС), намагниченных резонансным магнитным полем. Развязка между линиями измеряется величиной зазора между линиями передачи, связь между которыми осуществляется с помощью резонаторов, намагниченных до величины резонансного магнитного поля. Коэффициент связи резонатора с линией передачи определяется как отношение собственной добротности резонатора к добротности связи. Перестройка параметров фильтра осуществляется с помощью магнитного или электрического поля. В качестве модели двухзвенного фильтра принято каскадное соединение двух однозвенных фильтров, соединенных отрезком линии передачи нерезонансной длины.

Для инженерных расчетов резонансных устройств удобным является метод анализа, в котором линия передачи СВЧ и резонатор рассматриваются как связанная система. Степень связи характеризуется коэффициентом, через который описываются основные характеристики линии передач с резонатором

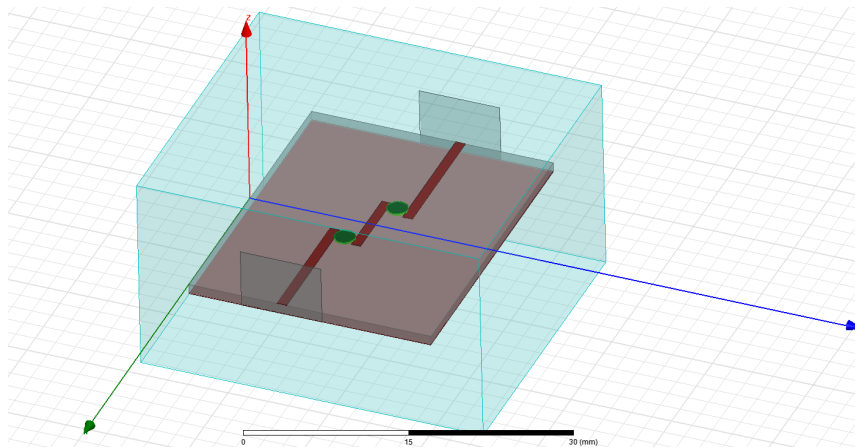


Рис.1. Модель двухзвенного МЭ СВЧ-фильтра с дисковыми резонаторами ЖИГ/ЦТС

— коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитной энергии СВЧ.

Среди МЭ фильтров на линиях передачи можно выделить два основных типа: с непосредственной связью МЭ резонаторов и со связью МЭ резонаторов через линию передачи. Фильтры первого типа образованы двумя линиями передачи, связанными цепочкой намагниченных до ферромагнитного резонанса (ФМР) и непосредственно взаимодействующих (связанных) между собой МЭ резонаторов. Фильтры второго типа образованы каскадным соединением звеньев, в каждом из которых две линии передачи связаны одним намагниченным до ФМР МЭ резонатором. Если в фильтрах второго типа в отдельных резонаторах линии передачи связаны, как в фильтрах первого типа, при помощи цепочки МЭ резонаторов, то их можно отнести к фильтрам с комбинированными связями.

В фильтрах рассмотренных типов необходимо, чтобы в отсутствие подмагничивающего поля линии передачи были развязаны между собой.

В большинстве практических случаев однорезонаторные фильтры имеют недостаточную избира-

тельность и затухание вне полосы пропускания, поэтому рассмотрен наиболее часто встречающийся двухрезонаторный фильтр.

Для расчета параметров перестраиваемого фильтра и построения его АЧХ было проведено моделирование двухзвенного полосно-пропускающих фильтров с использованием программ HFSS Ansoft. Сегодня инженеры и ученые с помощью различных компьютерных программ моделируют конструкции, устройства и процессы во всех областях инженерных, производственных и научных исследований. С помощью современных платформ можно анализировать как отдельные, так и взаимосвязанные физические процессы. Среда разработки моделей с разнообразными алгоритмами исследований, которая позволяет пройти все этапы от построения геометрической модели, задания свойств материалов и описания физики задачи до решения и визуализации результатов моделирования, в настоящее время широко используется [22,23].

На рис.1 представлена компьютерная модель двухзвенного СВЧ-фильтра.

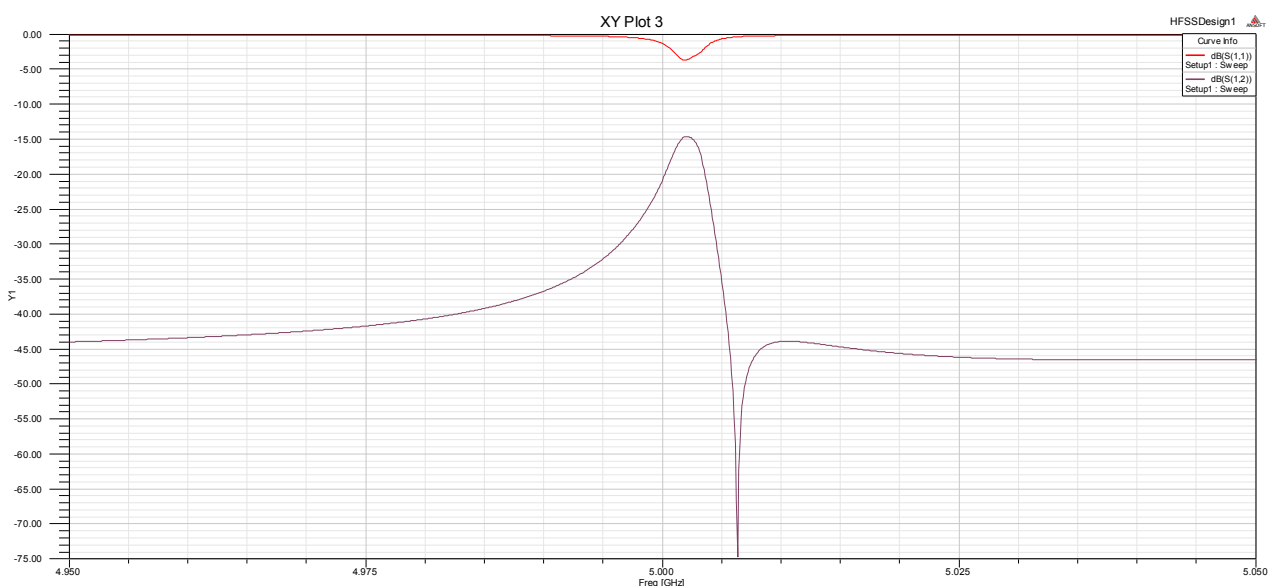


Рис.2. АЧХ двухзвенного фильтра в подмагничивающем магнитном поле 137000 А/м (1720 Э); расстояние между линиями — 1,85 мм, диаметр дисков — 2 мм

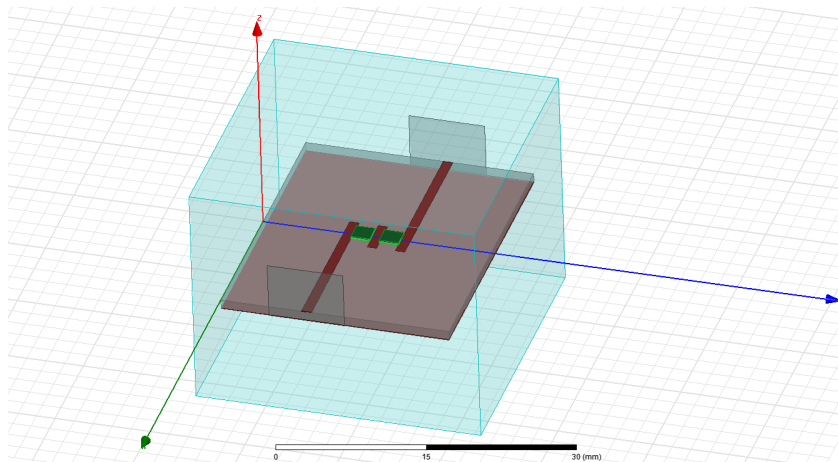


Рис.3. Модель №1. Двухзвенный ППФ. Резонаторы выполнены в виде квадрата со стороной равной 1,8 мм

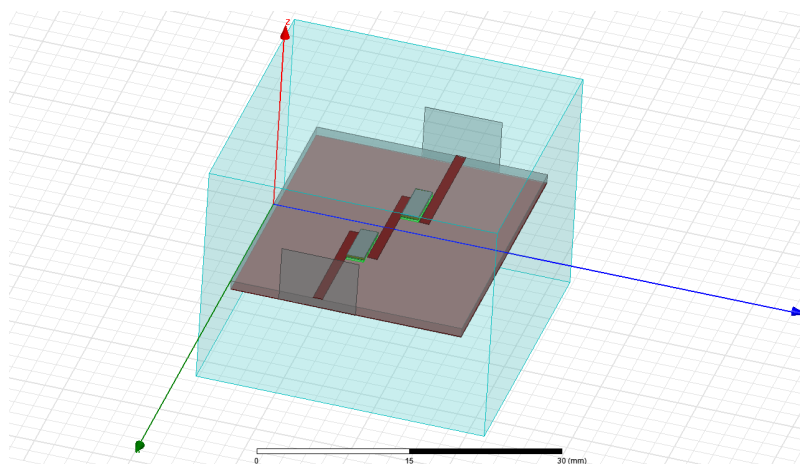


Рис.4. Модель №2. Двухзвенный ППФ ширина резонаторов равна 1.8 мм, длина резонаторов составляет 5 мм.

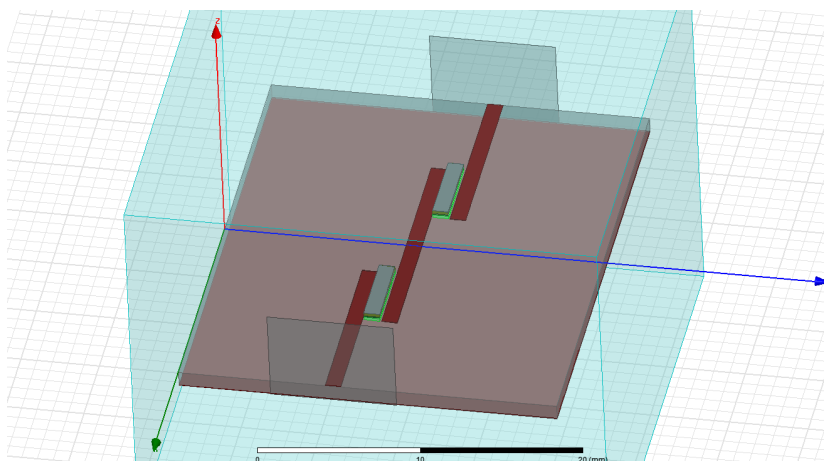


Рис.5. Модель №3. Двухзвенный ППФ ширина резонаторов — 1 мм

Результаты моделирования АЧХ двухзвенного СВЧ-фильтра с дисковыми резонаторами показаны на рис.2.

В двухрезонаторной модели с резонаторами в виде дисков не удалось получить приемлемого согласования, поэтому проведено моделирование с резонаторами в виде прямоугольных пластин. Рассмотрено три варианта исполнения (рис.3–5).

Результаты моделирования АЧХ двухзвенного СВЧ-фильтра с прямоугольными резонаторами,

полученные для модели №3, представлены на рис.6. Данная модель продемонстрировала наиболее приемлемые результаты для практического применения фильтров.

Проведенное моделирование показало, что данная методика анализа зависимостей характеристик фильтров от различных геометрических параметров позволяет быстро получить решение и выработать рекомендации для дальнейшего моделирования структуры исследуемых устройств СВЧ.

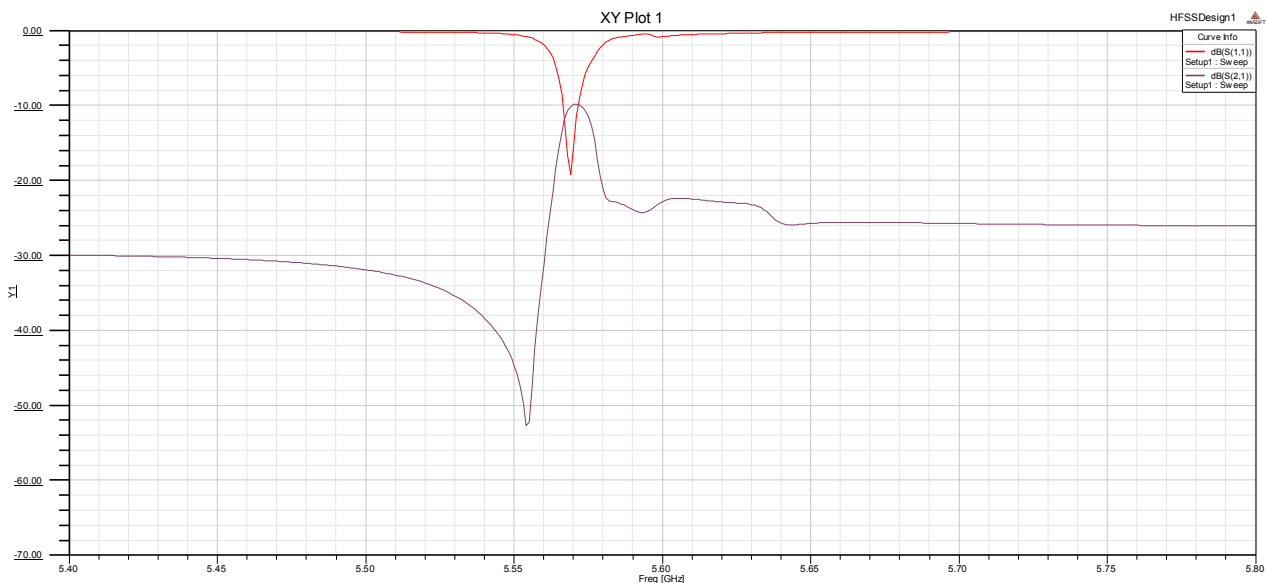


Рис.6. Результаты моделирования к варианту исполнения модели №3

На основании проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Предпочтительная форма МЭ резонаторов — прямоугольная. В этом случае удалось достичь лучшего согласования при сравнимой форме АЧХ.
2. Ширина резонаторов и расстояние между микрополосковыми линиями передачи может быть выбрано в пределах 1-2 мм.
3. Потери в полосе пропускания — 7–10 дБ.
4. Потери в полосе заграждения — 30–35 дБ.
5. Паразитные резонансы располагаются близко к основному, однако при определенной конфигурации резонаторов и микрополосковых линий амплитуда паразитных резонансов может быть незначительной.
6. Достигнута приемлемая для практических целей прямоугольность АЧХ фильтра.

Помимо моделирования АЧХ полоснопропускающего магнитоэлектрического фильтра СВЧ-диапазона необходимо провести исследование влияния геометрии МЭ резонатора на характеристики управления фильтром. Смоделировать управление магнитным полем возможно непосредственным использованием возможностей программы. Однако моделирование таких физических явлений, как магнитострикция, за счет которой реализуется управление АЧХ-фильтра электрическим полем, в программе HFSS не предусмотрено. Тем не менее, с помощью простой связи между электрическим полем и смещением резонансной линии ФМР, которая определяется выражением $\delta H = AE$, можно провести моделирование управления АЧХ электрическим полем. Задавая величину магнитного поля и используя значение магнитоэлектрического коэффициента A , тем самым получаем зависимость резонансного сдвига от электрического поля. Коэффициент A можно определить экспериментальным путем [24]. Для пленки ЖИГ величина магнитоэлектрического коэффициента составляет 2-4 МГц/кВ·см. Таким образом, программы компьютерного моделирования позволяют провести анализ характеристик МЭ полоснопропускающих СВЧ-фильтров, в частности исследовать зависимость характеристик от геометрии МЭ резонаторов.

Заключение

Представлены результаты исследования, проведенного методом компьютерного моделирования. Разработаны рекомендации по выбору параметров конструкции магнитоэлектрических планарных СВЧ полоснопропускающих фильтров: в качестве базовой конструкции выбрать вариант двухрезонаторного фильтра с прямоугольными резонаторами. Предложены габаритные размеры резонаторов: длина — 5 мм, ширина — 1,5 мм, толщина подложки ГТГ — 0,2 мм, толщина пленки ЖИГ — 0,1 мм, толщина пьезоэлектрика ЦТС — 0,2 мм; длина пластины ЦТС должна превышать длину ферритовой компоненты на величину, достаточную для крепления выводов электродов (предпочтительно холодная контактная сварка). Основой фильтра служит плата с микрополосковыми линиями передачи, расстояние между микрополосковыми линиями для установки резонаторов: ширина резонаторов — +0,1 мм; подложка для формирования микрополосковой линии: материал — ФЛАН, поликор, сапфир; толщина — 0,2–0,5 мм; микрополосковые линии с волновым сопротивлением 50 Ом, геометрические размеры в зависимости от параметров выбранной подложки.

В ходе работы был смоделирован прототип магнитоэлектрического двухзвенного полоснопропускающего СВЧ-фильтра и проведен анализ его работы. Полосковые СВЧ-фильтры в приемных трактах устройств играют важную роль, заключающуюся в подавлении сигналов, выходящих за пределы полосы. Они широко применяются как в коммерческой продукции, так и в изделиях военного назначения. Фильтр является реактивной схемой, пропускающей частоты желаемой полосы частот и при этом практически полностью задерживающей частоты всех других полос. Полученные результаты открывают дальнейшие перспективы для продолжения исследования магнитоэлектрических СВЧ-фильтров.

1. Curie P. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1894, vol.3, p. 393.
2. Debye P. Bemerkung zu einigen neuen Versuchen über einen magneto-elektrischen Richteffect. *Z. Phys.*, 1926, vol. 36, p. 300.
3. Dzyaloshinskii I.E. Magnetoelectric effects in antiferromagnetics. *Sov. Phys. JETP*, 1959, vol.10, p. 628. Available at: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_010_03_0628.pdf.
4. Astrov D.N. The magnetoelectric effect in antiferromagnetics. *Sov. Phys. JETP*, 1960, vol. 11, p. 708. Available at: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_011_03_0708.pdf.
5. Astrov D. N. Magnetoelectric effect in chromium oxide. *Sov. Phys. JETP*, 1961, vol. 13, p. 729. Available at: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_013_04_0729.pdf.
6. Ascher E., Rieder H., Schmid H., Stossel H. Some Properties of Ferromagnetoelectric Nickel-Iodine Boracite, $\text{Ni}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{I}$. *J. Appl. Phys.*, 1966, vol. 37, p. 1404.
7. Den Boomgaard J. Van, Terrell D. R., Born R. A. J., Giller H. F. J. I. An in situ grown eutectic magnetoelectric composite material. *J. Mater. Sci.*, 1974, vol. 9, p. 1705.
8. Run A. M. J. G. Van, Terrell D. R., and Scholing J. H. An in situ grown eutectic magnetoelectric composite material. *J. Mater. Sci.*, 1974, vol. 9, p. 1710.
9. Den Boomgaard J. Van, Run A. M. J. G. Van, Suchtelen J. Van. Magnetoelectricity in piezoelectric-magnetostrictive composites. *Ferroelectrics*, 1976, vol. 10, p. 295.
10. Ohno H., Chiba D., Matsukura F., Omiya T., Abe E., Dietl T., Ohno Y., Ohtani K. Electric-field control of ferromagnetism. *Nature*, 2000, vol. 408, p. 944.
11. Chiba D., Yamanouchi M., Matsukura F., and Ohno H. Electrical manipulation of magnetization reversal in a ferromagnetic semiconductor. *Science*, 2003, vol. 301, p. 943.
12. Wang Y., Li J., Viehland D. Magnetoelectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives. *Mater. Today*, 2014, vol. 17, p. 269.
13. Hu J.-M., Yang T., Wang J., Huang H., Zhang J., Chen L.-Q., Nan C.-W. Purely Electric-Field-Driven Perpendicular Magnetization Reversal. *Nano Lett.* 15, 616 (2015).
14. Carman G. P., Sun N. Strain-mediated magnetoelectrics: Turning science fiction into reality. *MRS Bull.*, 2018, vol. 43, p. 822.
15. Viehland D., Wuttig M., McCord J., Quandt E. Magnetoelectric magnetic field sensors. *MRS Bull.*, 2018, vol. 43, p. 834.
16. Domann J., Wu T., Chung T.-K., Carman G. Strain-mediated magnetoelectric storage, transmission, and processing: Putting the squeeze on data. *MRS Bull.*, 2018, vol. 43, p. 848.
17. Brigadnov I.A., Dorfmann A. Mathematical modeling of magneto-sensitive elastomers, *International Journal of Solids and Structures*, 2003, vol. 40, iss. 18, pp. 4659–4674.
18. Hu J.-M., Nan C.-W. Opportunities and challenges for magnetoelectric devices, *APL Mater.*, 2019, vol. 7, p. 080905.
19. Srinivasan G., Tatarenko A.S., Bichurin M.I. Electrically tunable microwave filters based on ferromagnetic resonance in ferrite-ferroelectric bilayers. *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no. 10, p. 596.
20. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kapralov G.N., Kiliba Yu.V., Bukashev F.I., Smirnov A.Yu., Tatarenko A.S. Magnetoelectric Microwave Devices. *Ferroelectrics*, 2002, vol. 280, p. 211.
21. Bichurin M.I., Kornev I.A., Petrov V.M., Tatarenko A.S., Kiliba Yu.V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric/magnetostrictive multilayer composite. *Phys. Rev. B*, 2001, vol. 64, 094409, pp. 1–6.
22. Vasilev B.Y., Tung L.Van, Ilukena D. Research on the switching algorithm of voltage vectors in the direct torque control system. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2018, pp. 1–7.
23. Vasilev B.U., Zyryin V.O. Algorithmic methods to improve the semiconductor converter performance effectiveness. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2016, pp. 1–6.
24. Tatarenko A.S., Gheevarghese V., Srinivasan G., et al. Microwave magnetoelectric effects in ferrite—piezoelectric composites and dual electric and magnetic field tunable filters. *J Electroceram*, 2010, vol. 24, pp. 5–9.