

УДК 621.372

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СВЧ ВЕНТИЛЯ
НА КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ****В.Н.Лобекин, Д.В.Снисаренко, А.С.Татаренко****COMPUTER MODELING OF A MAGNETOELECTRIC MICROWAVE ISOLATOR BASED
ON A COPLANAR TRANSMISSION LINE****V.N.Lobekin, D.V.Snisarenko, A.S.Tatarenko***Институт электронных и информационных систем НовГУ, slavalobekin@gmail.com*

Исследовано влияние диэлектрической проницаемости подложки магнитоэлектрического СВЧ вентиля, реализованного на копланарном волноводе с использованием феррит-пьезоэлектрической структуры гадолиний-галиевый гранат, железо-иттриевый гранат, цирконат-титанат свинца на смещение линии ферромагнитного резонанса. Проведено компьютерное моделирование в программе HFSS Ansoft. Получена зависимость влияния диэлектрической проницаемости подложки на параметры линии передачи, приводящей к смещению линии ФМР.

Ключевые слова: *магнитоэлектрический СВЧ вентиль, компьютерное моделирование, HFSS Ansoft*

In this research, we present an estimation of relative permittivity influence of the substrate of magnetoelectric microwave isolator on the FMR line shift. The isolator is based on a coplanar waveguide with ferrite-piezoelectric structure of the gadolinium halide garnet, iron yttrium garnet, and plumbum zirconate titanate. A computer simulation was carried out using the HFSS Ansoft program, and the dependence of influence of the substrate dielectric constant on the transmission line parameters, resulting in a shift of the FMR line, was obtained.

Keywords: *magnetoelectric microwave isolator, computer modeling, HFSS Ansoft*

Введение

В последние годы исследованию и моделированию магнитоэлектрических (МЭ) СВЧ устройств посвящено много работ [1-5].

Исследование МЭ эффекта в композиционных структурах, содержащих ферромагнитные и сегнетоэлектрические слои [6-8], представляет интерес для создания нового поколения устройств СВЧ твердо-

тельной электроники, таких как вентили [1,4,5], фазовращатели [9-11], фильтры [12,13], аттенюаторы [13]. Данные устройства активно используются в различных областях: телевидении, радиолокации, радиовещании и связи.

В данной работе рассмотрено влияние диэлектрической проницаемости подложки ϵ МЭ СВЧ вентиля на смещение линии ферромагнитного резонанса (ФМР) в магнитоэлектрических структурах. Проведе-

но моделирование МЭ копланарного СВЧ вентиль на подложках ФЛАН с различной диэлектрической проницаемостью ϵ ; получена зависимость влияния диэлектрической проницаемости подложки на параметры линии передачи, что приводит к смещению линии ФМР.

МЭ копланарный СВЧ вентиль

В основе невзаимных СВЧ устройств лежат особые физические процессы в гиротропных средах, условия распространения электромагнитных волн в которых зависят от степени намагниченности среды, направления распространения поля, частоты и других параметров полей и сред распространения. Практически наиболее широко используемым видом устройств этого класса являются ферритовые вентили, циркуляторы на основе ЖИГ-резонаторов.

Вентили проектируются таким образом, чтобы вносимые потери для падающей волны были минимальны, а для отраженной, т.е. распространяющейся в обратном направлении — максимальны. Вентили, поглощая отраженные волны в линии передачи и улучшая тем самым согласование различных элементов цепи, используются для защиты СВЧ генераторов от изменений сопротивления нагрузки, для построения развязывающих цепей, в качестве элементов измерительных установок. Тем самым исследование СВЧ вентиля актуально. Роль гиротропной среды в них осуществляет ферритовый или МЭ образец в виде пластины, стержня, и т.д., в котором выполняются особые виды взаимодействия составляющих E и H электромагнитного поля в намагниченном ферритовом образце.

Использование МЭ композиционной структуры в СВЧ вентиле позволяет повысить быстродействие; снизить мощность, потребляемую в цепи управления, упростить конструкцию, расширить функциональные возможности СВЧ приборов [12].

В качестве резонатора в работе использована слоистая структура феррит-пьезоэлектрик. Резонатор состоит из пластины пьезоэлектрика ЦТС-13 размерами 10 мм×1 мм×0,5 мм и пластины феррита ЖИГ 10×1×0,2 мм [5].

Компьютерное моделирование МЭ СВЧ вентиля

Моделирование МЭ СВЧ невзаимных устройств в современных программах сквозного моделирования, вычисляющих многомодовые S -параметры и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах, значительно упрощает подбор оптимальных параметров таких устройств [3]. В настоящее время на практике применяется множество пакетов трехмерного электродинамического моделирования, таких как HFSS Ansoft, FEKO, CST Microwave Studio и др. с использованием метода моментов и его модификаций, а также метода конечных элементов.

FEKO представляет собой всеобъемлющее программное обеспечение, широко используемое в телекоммуникационной, автомобильной, аэрокосмической и оборонной промышленности. Использо-

вание FEKO позволяет проводить эффективный анализ широкого спектра задач (в том числе антенн, СВЧ-компонентов и медико-биологических систем), размещение антенн на электрически больших структурах, расчет рассеяния, а также исследование электромагнитной совместимости. FEKO также предлагает инструменты с учетом решения более сложных электромагнитных взаимодействий.

AWR Microwave Office — это удобное программное обеспечение со всеми возможностями, необходимыми для точного моделирования СВЧ компонентов. Microwave Office включает линейное моделирование, моделирование гармонического сигнала во временной области и электромагнитное моделирование. Программа включает в себя анализ линейных и нелинейных шумов и может моделировать нелинейное поведение, присутствующее в СВЧ устройствах. AWR Microwave Office не может моделировать в трехмерном пространстве, но является мощным инструментом для СВЧ схем [14].

Наиболее универсальным с точки зрения решения трехмерных задач в области СВЧ и одним из самых наглядных пакетов, позволяющих при этом проводить анализ довольно сложных структур, является Ansoft HFSS.

HFSS использует для решения уравнений электродинамики метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM), включающий адаптивное генерирование и деление ячеек. HFSS предоставляет возможности моделирования антенн, делителей мощности, схем коммутации, волноводных элементов, фильтров СВЧ и трехмерных неоднородностей, описание которых сводится к созданию чертежа структуры, точному заданию материала, идентификации портов и требуемых характеристик.

На рис.1 в окне работы с моделью — конструкция МЭ СВЧ вентиля, состоящая из копланарной линии передачи на подложке ФЛАН и МЭ резонатора, помещенного в центр щели. Уширение щели до 1,2 мм; ширина центрального проводника — 1,4 мм; относительная диэлектрическая проницаемость подложки — 10-90, толщина подложки — 1 мм; подмагничивающее поле H_0 — 3000 Э.

Процесс проектирования с помощью HFSS включает в себя ряд стандартных шагов:

1. Создание модели анализируемой структуры, в том числе:
 - создание трехмерной графической модели структуры (чертежа);
 - задание параметров материалов, из которых состоит структура.
2. Определение электродинамических параметров структуры, включающее:
 - задание граничных условий на поверхностях, формирующих анализируемый объект;
 - определение и калибровка портов;
 - задание параметров решения.
3. Электродинамический анализ исследуемого объекта, в том числе:

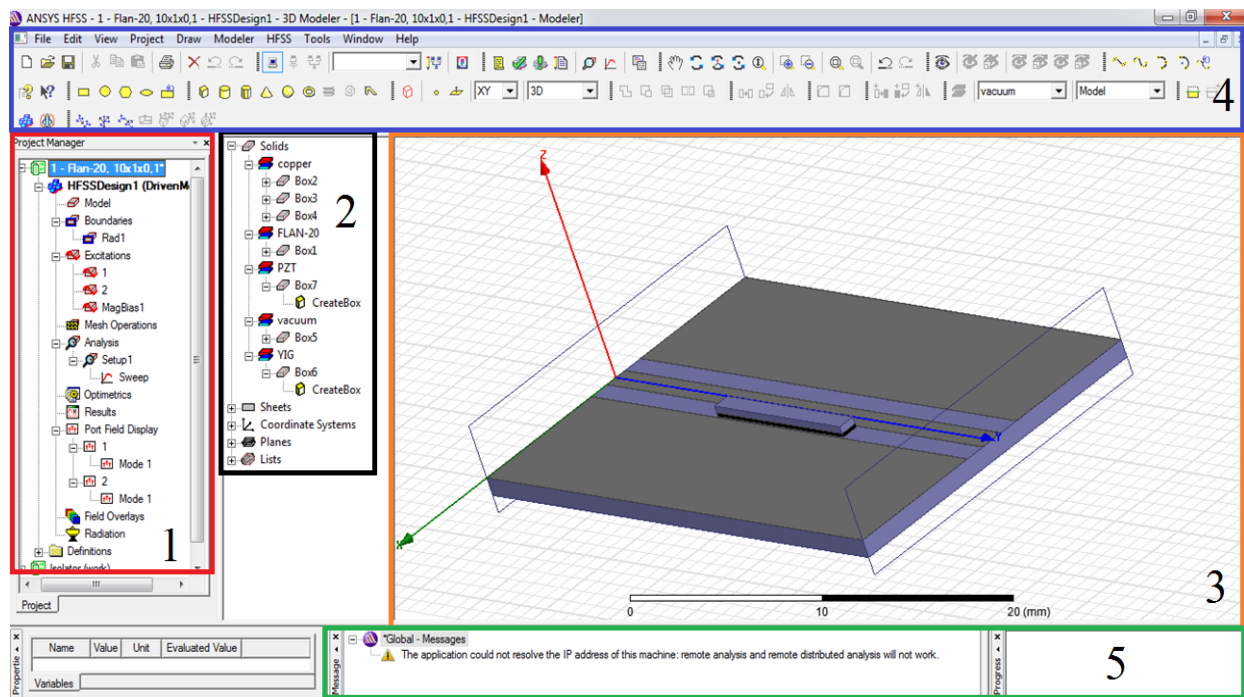


Рис.1. Окно программы HFSS Ansoft. 1 — дерево проекта; 2 — дерево модели; 3 — окно для работы с моделью; 4 — инструментальная панель; 5 — окно диагностики моделирования

- анализ объекта в полосе частот;
- параметрический анализ и оптимизация объекта;

4. Визуализация результатов электродинамического анализа, включающая:

- построение графиков в декартовых, полярных координатах, диаграмм Смита, диаграмм направленности и т.д.;
- анимация распределений электромагнитного поля и электрического тока;
- сохранение результатов анализа в файлах данных [5].

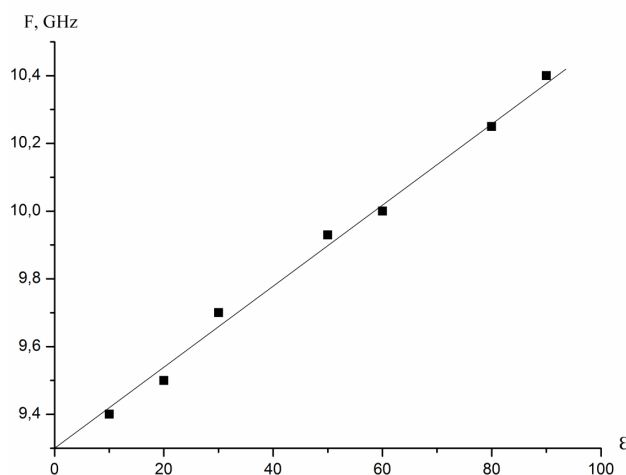


Рис.2. Зависимость влияния диэлектрической проницаемости на параметры линии передачи

На рис.2 представлена линейная зависимость влияния диэлектрической проницаемости ϵ подложки ФЛАН на параметры линии передачи. Для МЭ СВЧ

вентилей с диэлектрической проницаемостью подложки $\epsilon = 10$ частота ФМР составила 9,4 ГГц, для $\epsilon = 90$ частота ФМР — 10,4 ГГц. Увеличение диэлектрической проницаемости подложки приводит к изменению волнового сопротивления, влияющему на параметры линии передачи, приводящему к смещению линии ФМР.

Результаты моделирования позволяют подобрать оптимальные параметры подложки МЭ копланарного СВЧ вентилей для дальнейших экспериментов и моделирования.

Заключение

В статье представлены результаты исследования МЭ копланарного СВЧ вентилей. Проведено моделирование СВЧ вентилей в программе HFSS Ansoft, получена зависимость влияния диэлектрической проницаемости подложки ФЛАН на параметры копланарной линии передачи, приводящей к смещению линии ФМР. Рассмотрен МЭ копланарный СВЧ вентиль, композиционная структура феррит-пьезоэлектрик, проведено исследование линии ФМР. Результаты моделирования МЭ СВЧ вентилей, реализованного на копланарном волноводе позволили установить линейную зависимость влияния диэлектрической проницаемости на параметры линии передачи, приводящей к смещению линии ФМР.

Статья подготовлена по итогам исследования, проведенного в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №11.7069.2017/8,9.

1. Лаврентьева Д.В., Татаренко А.С. Магнитоэлектрический управляемый копланарный СВЧ вентиль-аттенуатор // Вестник НовГУ. 2014. №81. С.55-58.
2. Хаванова М.А., Камайкин В.А., Татаренко А.С. и др. Моделирование СВЧ антенны, основанной на мультиферроиковых слоистых структурах // Вестник НовГУ. 2015. №8 (91). С.64-70.
3. Лаврентьева Д.В., Татаренко А.С. Моделирование магнитоэлектрических управляемых невязимных СВЧ устройств // Вестник НовГУ. 2016. №4 (95). С.69-72.
4. Снисаренко Д.В., Татаренко А.С., Коваленко Д.В., Лобекин В.Н. Моделирование магнитоэлектрического СВЧ вентиля-аттенуатора реализованного на щелевой линии передачи // Вестник НовГУ. 2016. №7 (98). С.89-93.
5. Лобекин В.Н., Снисаренко Д.В., Татаренко А.С., Бичурин М.И. Исследование магнитоэлектрического СВЧ вентиля на основе феррит-пьезоэлектрических структур // Вестник НовГУ. 2018. №1 (107). С.74-76.
6. Филиппов Д.А., Бичурин М.И., Петров В.М. и др. Резонансное усиление магнитоэлектрического эффекта в композиционных феррит-пьезоэлектрических материалах // ФТТ. 2004. Т.46. №9. С.1621-1627.
7. Petrov V.M., Bichurin M.I., Saplev A.F. et al. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer // Journal of Applied Physics. 2017. V.121. P.224103.
8. Bichurin M., Filippov D., Petrov V. et al. Resonance Magneto-Electric Effects in Layered Magnetostrictive-Piezoelectric Composites // Physical Review B. 2003. V.68. doi 10.1103/PhysRevB.68.132408.
9. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. Magnetolectric microwave phase shifters // Ferroelectrics. 1997. V.204. P.311-319.
10. Татаренко А.С., Бичурин М.И., Филиппов А.В., Сринивасан Г. СВЧ фазовращатель на основе феррит-пьезоэлектрических композиционных материалов // Вестник НовГУ. 2004. №28. С.156-158.
11. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Bichurin M.I. Magnetolectric microwave phase shifter // Appl. Phys. Lett. 2006. V.88. P.183507.
12. Татаренко А.С., Бичурин М.И., Сринивасан Г. Магнитоэлектрические фильтрующие СВЧ устройства // Вестник НовГУ. 2004. №26. С.168-172.
13. Бичурин М.И., Петров Р.В., Татаренко А.С. Магнитоэлектрические СВЧ устройства для ФАР // Современные проблемы науки и образования. 2011. №4. [Эл. ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4727>.
14. Сиркели А.И., Драч В.Е. Обзор САПР моделирования СВЧ-устройств // Интерактивная наука. 2017. Вып.1 (11). С.139-141.
15. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2015, no. 8(91), pp. 64-70.
16. Lavrent'eva D.V., Tatarenko A.S. Modelirovanie magnitoelektricheskikh upravliaemykh nevezaimnykh SVCh ustroystv [Modeling of controlled magnetolectric nonreciprocal microwave devices]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2016, no. 4(95), pp. 69-72.
17. Snisarenko D.V., Tatarenko A.S., Kovalenko D.V., Lobekin V.N. Modelirovanie magnitoelektricheskogo SVCh ventilia-atteniuatora realizovannogo na shchelevoi linii peredachi [Modeling of a magnetolectric (ME) microwave isolator-attenuator formed on a slot line]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2016, no. 7(98), pp. 89-93.
18. Lobekin V.N., Snisarenko D.V., Tatarenko A.S., Bichurin M.I. Issledovanie magnitoelektricheskogo SVCh ventilia na osnove ferrit-p'ezoelektricheskikh struktur [Research of a magnetolectric microwave isolator based on ferrite-piezoelectric structures]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2018, no.1(107), p.74-76.
19. Filippov D.A., Bichurin M.I., Petrov V.M. et al. Rezonansnoe usilenie magnitoelektricheskogo effekta v kompozitsionnykh ferrit-p'ezoelektricheskikh materialakh [Resonant amplification of the magnetolectric effect in ferrite-piezoelectric composites]. Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State, 2004, vol. 46, no.9, pp.1674-1680.
20. Petrov V.M., Bichurin M.I., Saplev A.F., Tatarenko A.S., Lobekin V.N. Electric field induced broadening of magnetic resonance line in ferrite/piezoelectric bilayer. Journal of Applied Physics, 2017, vol. 121, p. 224103.
21. Bichurin M.I., Filippov D.A., Petrov V.M., Laetsin V.M., Poddubnaya N.N., Srinivasan G. Resonance magneto-electric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites. Physical Review B, 2003, vol. 68(13). doi: 10.1103/PhysRevB.68.132408.
22. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. Magnetolectric microwave phase shifters. Ferroelectrics, 1997, vol.204, no. 1, pp. 311-319.
23. Tatarenko A.S., Bichurin M.I., Filippov A.V., Srinivasan G. SVCh fazovrashchatel' na osnove ferrit-p'ezoelektricheskikh kompozitsionnykh materialov [SHF phaserotator on basis of ferrit-piezo-electric composite materials]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2004, no. 28, pp. 156-158.
24. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Bichurin M.I. Magnetolectric microwave phase shifter. Applied Physics Letters, 2006, vol. 88, no. 18, p. 183507.
25. Tatarenko A.S., Bichurin M.I., Srinivasan G. Magnitoelektricheskie fil'truiushchie SVCh ustroistva [The SHF magnetolectric filter devices]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2004, no. 26, pp. 168-172.
26. Bichurin M.I., Petrov R.V., Tatarenko A.S. Magnitoelektricheskie SVCh ustroistva dlia FAR [Magnetolectric microwave devices for phased array]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia – Modern problems of science and education, 2011, no. 4.
27. Sirkeli A.I., Drach V.E. Obzor SAPR modelirovaniia SVCh-ustroystv [The review of CAD for simulation of microwave devices]. Interaktivnaia nauka – Interactive science, 2017, no. 1(11), pp. 139-141.

References

1. Lavrent'eva D.V., Tatarenko A.S. Magnitoelektricheskii upravliaemyi koplanarnyi SVCh ventil'-atteniuator [Controlled magnetolectric coplanar microwave isolator-attenuator]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2014, no.81, p.55-58.
2. Khavanova M.A., Kamaikin V.A., Tatarenko A.S., Petrov R.V., Porokhniuk A., Ueda T., Tomita S. Modelirovanie SVCh anteny, osnovannoi na multiferroikovykh sloistyykh strukturakh [Modeling of microwave antenna based on the multiferroic layered structures]. Vestnik NovGU. Ser.