

А.С.Татаренко, М.И.Бичурин, Г.Сринивасан

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ СВЧ УСТРОЙСТВА

Design and application of new microstrip microwave filters are considered. Physical principles of operation and calculation of filter parameters on the base of ferrite - piezoelectric composites are determined.

1. Введение

Сочетание магнитных и электрических свойств, а также свойства, обусловленные магнитоэлектрическим (МЭ) взаимодействием, открывают широкие функциональные возможности для создания устройств на основе МЭ композитов. В [1, 2] отмечается, что использование МЭ композитов позволяет:

- повысить быстродействие благодаря меньшей инерционности управляющей системы;
- снизить мощность, потребляемую в цепи управления;
- избавиться от наводок, неизбежно возникающих при управлении магнитным полем;
- упростить конструкцию и технологию изготовления приборов, перейти к интегральным устройствам управления;
- расширить функциональные возможности СВЧ приборов;
- создать принципиально новые приборы.

Среди МЭ фильтров на линиях передачи можно выделить два основных типа [3]: 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 отличие от [4] в данной работе МЭ резонатор представляет собой двухслойный композит на основе монокристаллических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) — пьезоэлектрика PMN-PT.

В фильтрах рассмотренных типов необходимо, чтобы в отсутствие подмагничивающего поля линии передачи были развязаны между собой, в этом случае устройство работает как ограничитель мощности.

2. Магнитоэлектрические СВЧ фильтры

СВЧ фильтры на МЭ композитах проектируются на основе различных проявлений МЭ эффекта. Наиболее сильно МЭ эффект проявляется в виде сдвига резонансной линии ФМР под действием управляющего электрического поля. МЭ композит в этом случае играет роль резонатора. Применение электрического поля позволит осуществить перестройку передаточных характеристик фильтра в широком диапазоне частот и реализовать фильтр-преселектор с электрической перестройкой частоты.

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 — коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитной энергии СВЧ.

В большинстве практических случаев однорезонаторные фильтры имеют недостаточную избирательность и затухание вне полосы пропускания, поэтому рассмотрен наиболее часто встречающийся двухрезонаторный фильтр. В данном случае задача проектирования СВЧ фильтра решалась в два этапа: вначале на основе уравнения баланса мощностей были получены общие выражения для коэффициентов отражения, прохождения и поглощения при включении твердотельного резонатора в качестве неоднородности в линию передачи. Затем были вычислены коэффициенты связи применительно к данному случаю расположения резонаторов в линии передачи с учетом их формы. Полученное выражение для коэффициента связи двухрезонаторного фильтра содержит параметры, которые позволяют провести анализ его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Полосно-пропускающий микрополосковый двухрезонаторный фильтр состоит из корпуса с СВЧ разъемами, в котором закреплена плата из диэлектрического материала. Линии передачи представляют собой связанные микрополосковые линии нерезонансной длины. Резонаторы выполнены в виде МЭ пластин состава ЖИГ — РМН-РТ, намагниченного резонансным магнитным полем H_r . Развязка между линиями определяется величиной зазора между линиями передачи. Связь между линиями передачи осуществляется с помощью резонаторов, намагниченных до величины резонансного поля H_r . Коэффициент связи резонатора с линией передачи определяется как отношение собственной добротности резонатора к добротности связи [5]. Перестройка параметров фильтра осуществляется с помощью электрического поля.

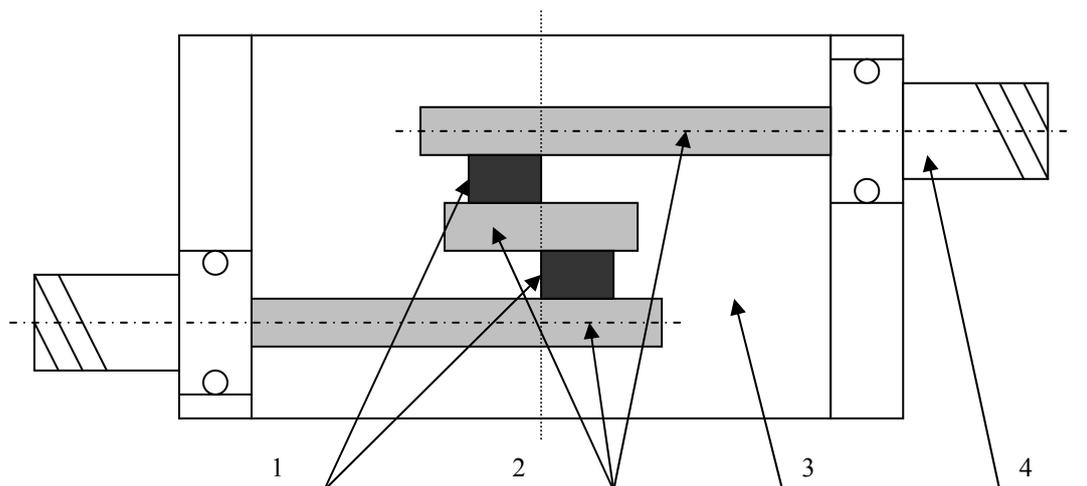


Рис. 1. Конструкция двухрезонаторного МЭ фильтра. 1 — МЭ резонаторы, 2 — линии передачи, 3 — подложка, 4 — разъем СВЧ

В качестве рабочей модели двухзвенного фильтра принято каскадное соединение двух однозвенных фильтров, соединенных отрезком линии передачи нерезонансной длины, выполняющим роль элемента связи между звеньями. С целью перестройки параметров фильтра в данной работе используется микроволновый МЭ эффект [4]. Суть эффекта состоит в сдвиге линии ФМР под действием внешнего управляющего электрического поля. Используемый образец представляет собой слоистую структуру, магнитная часть которой состоит из пленки ЖИГ, нанесенной на подложку из гадолиний галлиевого граната (ГГГ). Пьезоэлектриком является тонкая пластинка из РМН-РТ. Для получения двухслойной структуры магнитная и пьезоэлектрическая части склеены тонким слоем эпоксидного клея.

Для построения АЧХ фильтра использовано полученное выражение для коэффициента связи микрополоскового двухрезонаторного МЭ фильтра. В результате соотношение для вносимых потерь двухзвенного фильтра определяется выражением:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{1}{|T|^2},$$

здесь $T = 2KK^* / \Delta$; $K = \frac{k}{1+i\xi}$; $K^* = -i \frac{k}{1+i\xi}$; $\Delta = (1+K)^2 - K^{*2}$; $\xi = \frac{H_r - H + \Delta H_E}{\Delta H}$;

$$k = \frac{16VM_0}{h^2 \lambda z_0 \Delta H} \left(\operatorname{arctg} \frac{z_0}{Z\sqrt{\varepsilon}} + \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{3z_0}{Z\sqrt{\varepsilon}} \right)^2,$$

где T — коэффициент передачи двухзвенного фильтра; V — объем МЭ резонатора; M_0 — намагниченность насыщения; H_r — резонансное поле; ΔH_E — величина сдвига резонансной линии под действием управляющего электрического поля; H — постоянное магнитное поле; ΔH — полуширина линии ФМР; λ — длина волны в линии передачи; z_0 — волновое сопротивление микрополосковых линий передачи; $Z = 120\pi$; ε — относительная диэлектрическая проницаемость подложки; ξ — обобщенная расстройка; K и K^* — комплексные коэффициенты связи двухрезонаторного фильтра; k — коэффициент связи однорезонаторного фильтра.

Для расчета параметров перестраиваемого фильтра и построения его АЧХ необходимо учесть влияние микроволнового МЭ эффекта.

3. Расчет параметров МЭ фильтра

В работе проведен расчет микроволнового МЭ эффекта и получены выражения для сдвига резонансной линии во внешнем электрическом поле: $\Delta H_E = AE$, где A — магнито-электрическая константа, зависящая от параметров композита; E — внешнее управляющее электрическое поле. Ввиду громоздкости полученных выражений результаты расчетов приведены на графиках (рис. 2 и 3).

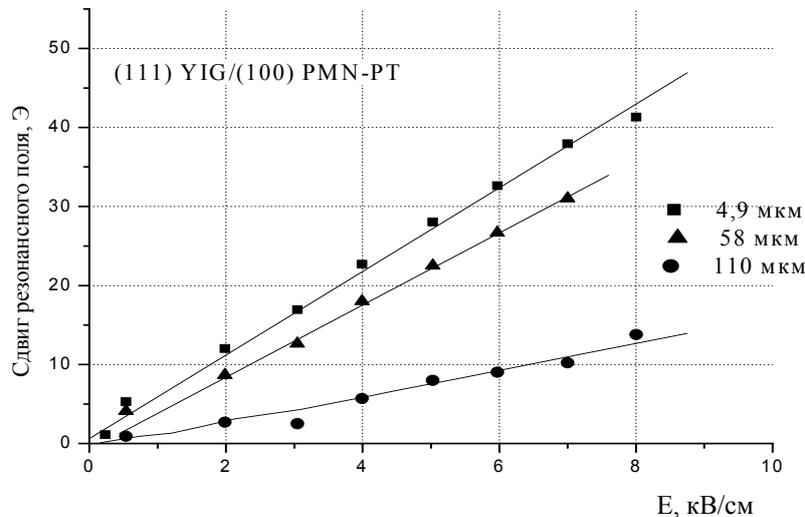


Рис. 2. Зависимость сдвига резонансного магнитного поля от напряженности управляющего электрического поля для пленок ЖИГ различной толщины. H параллельно [111]

Как следует из рис.2, величина сдвига зависит от толщины пленки ЖИГ. Максимальный сдвиг, равный 40 Э, приходится на пленку толщиной 4,9 мкм (при толщине ГГГ 0,3 мм). С учетом того, что ширина линии ФМР равна 10 Э, полученный сдвиг в 40 Э позволяет осуществить эффективную перестройку параметров двухрезонаторного МЭ фильтра.

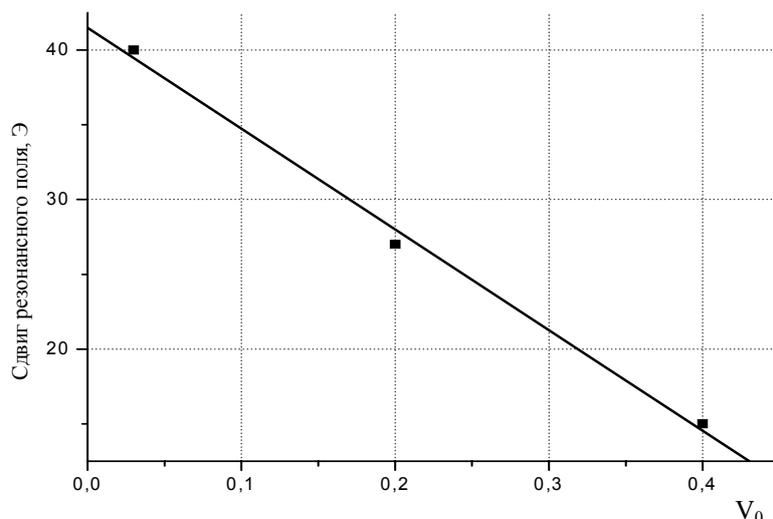


Рис. 3. Зависимость сдвига резонансной линии от объемного соотношения ЖИГ и PMN-PT при $E = 8$ кВ/см. $V_0 = V_{\text{ЖИГ}}/V_{\text{PMN-PT}}$

Наблюдаемая линейная зависимость величины сдвига от объемного соотношения ЖИГ и PMN-PT может быть объяснена внутренними искажениями пленок ЖИГ и указывает на необходимость применения на практике тонких пленок.

Расчет вносимых потерь фильтра выполнен при помощи математического пакета MAPLE-7 и графически представлен на рис. 4.

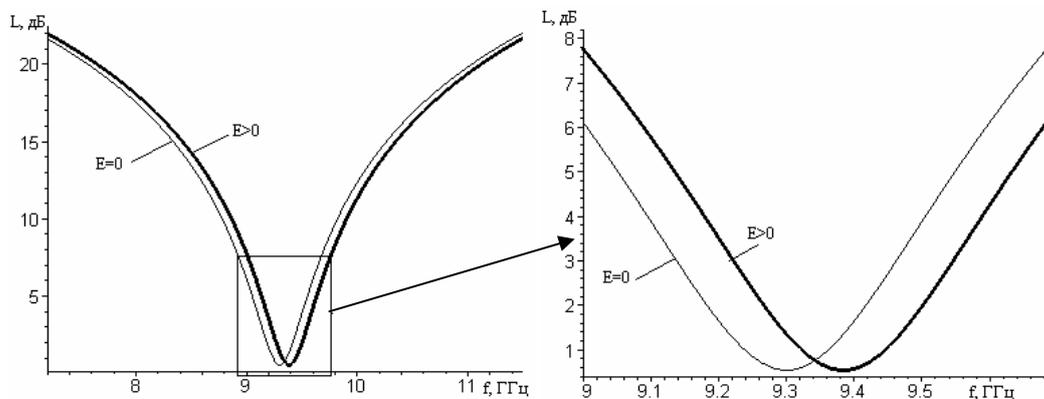


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика двухрезонаторного МЭ фильтра. Материал подложки ФЛАН10-2 ($\epsilon = 10$), намагниченность насыщения — $4\pi M_0 = 1760$ Гс, полуширина линии ФМР — $\Delta H = 5$ Э, $\Delta H_E = 30$ Э, резонатор выполнен в виде прямоугольной пластины размерами $4,0 \times 1,0 \times 0,4$ мм, резонансная частота фильтра — 9,3 ГГц

Сравнение с ферритовыми полосно-пропускающими фильтрами показывает, что полученная нами АЧХ фильтра приблизительно совпадает с характеристиками двухзвенных ферритовых фильтров на основе сфер ЖИГ.

4. Заключение

Предложена модель СВЧ фильтра на основе композиционных феррит-пьезоэлектрических резонаторов. Проведен расчет характеристик двухрезонаторного фильтра с резонаторами в виде монокристаллических МЭ пластин состава ЖИГ — РМН-РТ, намагниченных резонансным магнитным полем.

Электрическое управление параметрами СВЧ фильтров открывает новые возможности для их применения и создания на их основе устройств с высоким быстродействием, малыми габаритами и современными технологиями.

-
1. Сегнетомагнитные вещества. Сб. науч. тр. М.: Наука, 1990. 184 с.
 2. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. // *Ferroelectrics*. 1997. V. 204. №1-4. P. 311-315.
 3. Рогозин В.В., Чуркин В.И. Ферритовые фильтры и ограничители мощности. М.: Радио и связь, 1985. 262 с.
 4. Bichurin M.I., Kornev I.A., Petrov V M., Tatarenko A.S., Kiliba Yu.V. and Srinivasan G. // *Phys. Rev. B*. 2001. V. 64. P. 094409-094415.
 5. Ильченко М.Е., Кудинов Е.В. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. Киев: Изд-во КГУ, 1973. 174 с.