

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВЧ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ФАР

Бичурин М.И., Петров Р.В., Татаренко А.С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», Великий Новгород, Россия, e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru

Центральной проблемой СВЧ техники является построение приемных, передающих и приемно-передающих модулей фазированной антенной решетки (ФАР) с заданными характеристиками. Они должны обеспечивать решение различных требований к ФАР по чувствительности, мощности, диапазону частот и др. В данном сообщении предлагается использовать слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры в сочетании с резонансными явлениями для проектирования магнитоэлектрических (МЭ) СВЧ устройств и модулей ФАР на их основе. Использование электромеханического, ферромагнитного и магнитоакустического резонансов, магнитодипольных и электродипольных переходов в этих структурах позволяет проектировать новые СВЧ МЭ устройства и создавать на их основе различные модули. Оценки показывают, что такой МЭ приемный модуль может обеспечивать в 3-см диапазоне чувствительность на уровне 30дБ при полосе пропускания 30МГц.

Ключевые слова: магнитоэлектрические устройства, фазированные антенные решетки, СВЧ

техника.

Magnetolectric microwave devices for phased array

M.I. Bichurin, R.V. Petrov, A.S. Tatarenko

Novgorod State University, Velikiy Novgorod, Russia, e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru

The central problem of microwave technology is the construction of receiving, transmitting and receiving-transmitting modules of phased array with specified characteristics. Modules should provide the solution of the different qualifying standards to phased array in sensitivity, capacity, frequency range, etc. In this paper we propose to use the layered ferrite-piezoelectric structures in combination with the resonant phenomena for the design of magnetolectric microwave devices and modules on their basis for phased array. The use of electromechanical, ferromagnetic and magnetoacoustics resonances, magnetic dipole and electric dipole transitions in these structures allows to one to design the new microwave ME devices and to create on their basis the various modules. Estimates show that such receiving magnetolectric module can provide in the 3-cm frequency range by the 30 dB sensitivity and 30MHz bandwidth.

Keywords: magnetolectric devices, phased array, MICROWAVE techniques.

Введение

Центральной проблемой СВЧ техники является построение приемных, передающих и приемно-передающих модулей фазированной антенной решетки (ФАР) с заданными характеристиками. Они должны обеспечивать решение различных требований к ФАР по чувствительности,

мощности, диапазону частот и др. В данном сообщении предлагается использовать слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры в сочетании с резонансными явлениями для проектирования магнитоэлектрических (МЭ) СВЧ устройств и модулей ФАР на их основе. Слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры [1] являются идеальным объектом для создания СВЧ МЭ устройств [2-3]. Использование электромеханического, ферромагнитного и магнитоакустического резонансов, магнитодипольных и электродипольных переходов в этих структурах позволяет проектировать новые СВЧ МЭ устройства [4-6] и создавать на их основе различные модули [7].

Приемный МЭ модуль

В качестве примера рассмотрим МЭ приемный модуль ФАР (рис.1). Основными элементами данного модуля являются: приемная микрополосковая антенна [7]; фильтр-преселектор [8], предотвращающий перегрузку приемного тракта; аттенюатор, обеспечивающий амплитудное распределение сигнала по раскрытию решетки; фазовращатель [9], задающий фазовое распределение сигнала; гиратор [10] для обеспечения согласования элементов тракта; усилитель, состоящий из одного или более каскадов активного усиления, и детектор для выделения огибающей сигнала. Ниже приведено краткое описание конструкций перечисленных элементов МЭ модуля. На рис. 1 приведён пример реализации МЭ приемного блока СВЧ ФАР, в целом реализованного на МЭ устройствах.

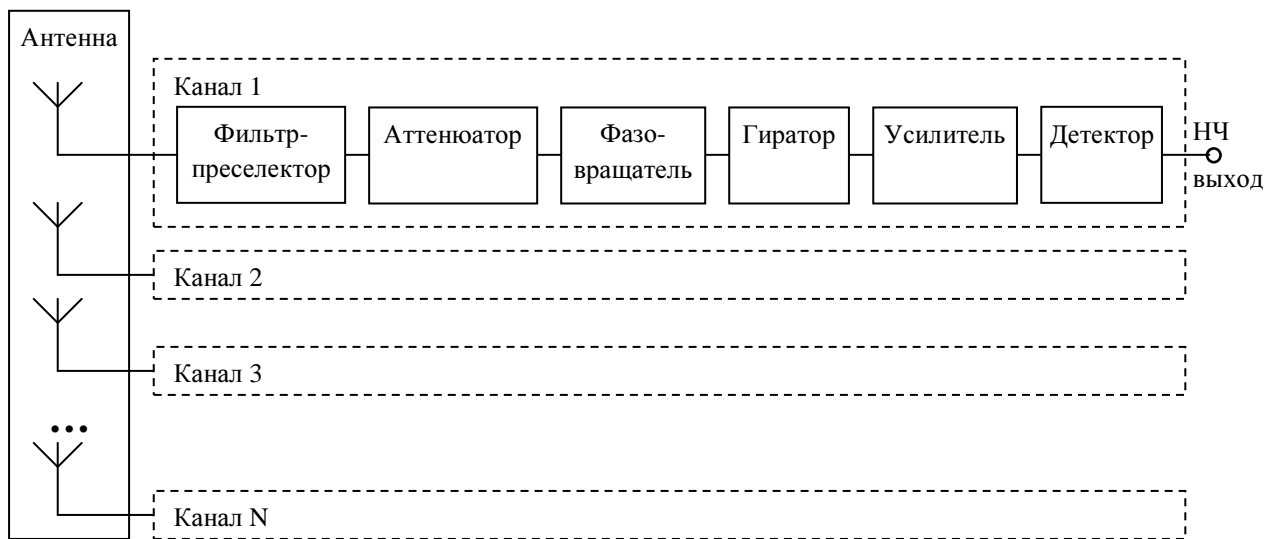


Рисунок 1. Пример реализации приемного МЭ СВЧ блока ФАР

Приемная микрополосковая антенна

В технике СВЧ часто применяются щелевые и прямоугольные излучатели, они имеют малые размеры и являются достаточно технологичными, что позволяет конструировать на их основе ФАР. МЭ щелевая антенна СВЧ диапазона представляет собой прямоугольную

диэлектрическую пластину (подложку) размером 35x25x1 мм с диэлектрической проницаемостью 5 из материала ФЛАН ($\epsilon=5$, $\text{tg}\delta$ не более 0,0001), металлизированную с двух сторон. Нижняя сторона металлизации заземлена, на верхней стороне от края антенны прорезана щель: длина 11 мм, ширина 0,5 мм. В подложке вырезано прямоугольное углубление, в которое установлен прямоугольный образец 3x3 мм – плёнка железо-итриевого граната (ЖИГ) толщиной 6,4 мкм на подложке галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 0,45 мм. Сверху, на плёнку ЖИГ приклеен диск из пьезокерамики ЦТС диаметром 5 мм, толщиной 0,2 мм. Диск с обеих сторон металлизирован, к его металлизированным сторонам подведены электроды для подачи управляющего напряжения. Диск ЦТС, совместно с плёнкой ЖИГ, составляет МЭ элемент. При подаче на диск ЦТС управляющего напряжения, в результате МЭ взаимодействия меняются свойства СВЧ поля, проходящего через элемент. Этим достигается возможность управления СВЧ характеристиками устройства. Для создания необходимого подмагничивающего поля с обратной стороны антенны расположен небольшой магнит, регулируемый с помощью диэлектрического винта. В дальнейшем для этой цели может быть использован пленочный магнит. Антенна соединяется с волноведущим трактом разъёмом типа SMA. Диапазон частот, в котором проводились измерения, находился от 800 МГц до 10 ГГц. На частоте 2,4 ГГц при величине управляющего поля в 200 В и длине щели 11 мм уменьшение коэффициента отражения составило 16 дБ.

Фильтр-преселектор

СВЧ фильтры на МЭ композитах [3,8] проектируются на основе различных проявлений МЭ эффекта. Наиболее сильно МЭ эффект проявляется в виде сдвига резонансной линии ФМР под действием управляющего электрического поля [1,4]. 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 ЖИГ – ниобата титаната магния (НТМ), намагниченных резонансным магнитным полем. Развязка между линиями определяется величиной зазора между линиями передачи. Связь между линиями передачи осуществляется с помощью резонаторов, намагниченных до величины резонансного магнитного поля. Перестройка параметров фильтра осуществляется с помощью электрического поля. На рисунке 2 представлена конструкция микрополоскового двухрезонаторного МЭ фильтра.

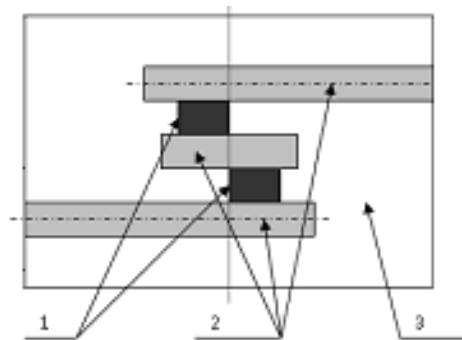


Рисунок 2. Конструкция двухрезонаторного МЭ фильтра. 1 – МЭ резонаторы, 2 – линии передачи, 3 – подложка.

Для двухрезонаторного МЭ фильтра получены следующие характеристики на частоте 7,4 ГГц: прямые потери – 11,4 дБ, развязка – 25дБ; полоса пропускания – 30МГц.

Аттенюатор

МЭ аттенюатор [3] представляет собой микрополосковую линию, в которой с помощью шлейфов длиной $3\lambda/8$ и $\lambda/8$ создана область с круговой поляризацией СВЧ поля (рис.3). В эту область помещен МЭ резонатор, состоящий из диска ЖИГ на подложке из ГГГ и диска НТМ. Внешнее магнитное поле, прикладываемое к образцу, создает резонансное поле и служит для выбора рабочей частоты устройства. Управляющее электрическое поле прикладывается к электродам, нанесенным на пьезоэлектрик.

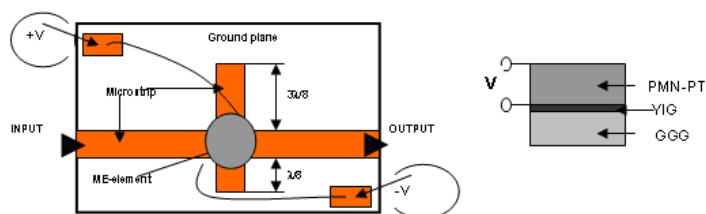


Рисунок 3. Конструкция МЭ СВЧ аттенюатора (слева), МЭ элемент (справа)

На частоте 7,25 ГГц динамический диапазон однозвенного МЭ аттенюатора на частоте 7,25 ГГц составил 20 дБ.

Фазовращатель

Микрополосковый СВЧ МЭ фазовращатель 3 см диапазона разработан [7,9] на основе трехслойной МЭ структуры, состоящей из монокристаллических НТМ и ЖИГ на подложке из ГГГ. Принцип действия фазовращателя основан на микроволновом МЭ эффекте, заключающемся в сдвиге линии ФМР под действием электрического поля. Основой конструкции проходного фазовращателя является микрополосковая линия передачи на составной подложке: диэлектрик и МЭ диск толщиной до 1 мм и диаметром 2 мм, служащий СВЧ резонатором. В

объеме МЭ резонатора при помощи шлейфов 0,125 и 0,375 длины волны создается круговая поляризация магнитного поля. Резонатор установлен в область круговой поляризации микроволнового магнитного поля, постоянное магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости образца. В отличие от МЭ аттенюатора рабочая точка для уменьшения потерь выбирается на дисперсионной кривой вне области резонанса. Используемый композит представляет собой слоистую структуру, магнитная часть которой состоит из пленки ЖИГ, нанесенной на подложку из ГГГ. Пьезоэлектриком является тонкая пластинка из НТМ. Работа фазовращателя основана на следующем: для выбора рабочей точки, лежащей на дисперсионной кривой, к резонатору прикладывается внешнее магнитное поле на частоте, близкой к резонансу. Под воздействием управляющего напряжения, прикладываемого к электродам, расположенным на торцах МЭ резонатора, вследствие микроволнового МЭ эффекта происходит сдвиг линии ФМР и реализуется электрическое управление параметрами фазовращателя. Для однозвенного МЭ фазовращателя на частоте 8,42 ГГц получен плавный фазовый сдвиг величиной 40 град. в электрическом поле 10 кВ/см.

Гиратор

В отличие от известного в технике СВЧ гиратора на эффекте Фарадея, который осуществляет поворот фазы на 180° , гиратор с использованием МЭ эффекта обладает способностью также инвертировать импеданс линии передачи и преобразовывать входное напряжение в ток и наоборот [10]. Гиратор на МЭ эффекте имеет компактную форму благодаря используемому сосредоточенному элементу, что позволяет существенно сократить габаритные размеры СВЧ гиратора и применять его в технике СВЧ для инвертирования импеданса и поворота фазы электромагнитной волны. Элементы МЭ резонатора расположены на диэлектрической подложке. В разрыв микрополосковой линии установлен МЭ элемент, охваченный петлёй, соединённой с микрополосковой линией. МЭ элемент представляет собой в данном случае слоистую структуру: один слой это пленка ЖИГ толщиной 6.4 мкм на подложке ГГГ толщиной 450 мкм. Размер ферритового элемента – квадрат со стороной 3 мм. Второй слой – это пьезоэлектрик типа ЦТС с толщиной 200 мкм и диаметром 5 мм с нанесёнными на обе стороны металлизированными обкладками. Два слоя (ЖИГ и ЦТС) склеены между собой клеем на основе этил-цианоакрилата. Данное устройство позволяет регулировать активное сопротивление линии передачи на частоте около 3 ГГц на 5 Ом, реактивное на 10 Ом при постоянном подмагничивающем поле 503 Э и приложенном постоянном электрическом поле 260 В. В дальнейшем планируется проектирование СВЧ гиратора, в котором будет использован МЭ эффект в области магнитоакустического резонанса [6]: при этом постоянное магнитное поле настраивается на режим ферромагнитного резонанса, а размеры образца должны удовлетворять условию электромеханического резонанса для экстремального увеличения МЭ коэффициента при условии совпадения ферромагнитного и электромеханического резонансов.

Селективный МЭ СВЧ детектор

Детектор можно использовать для выделения огибающей СВЧ сигнала в модулях ФАР. Детектор состоит из диэлектрической подложки с минимальными потерями в области рабочих частот, на которой сформирована микрополосковая линия передачи. На подложке полосковыми шлейфами длиной $\lambda/8$ и $3\lambda/8$ создается область круговой поляризации магнитного поля СВЧ сигнала. С обратной стороны платы прикреплен постоянный магнит в форме диска, создающий резонансное подмагничивающее поле. Чувствительный элемент помещен в область пучности магнитного поля и представляет собой слоистый композит в форме диска состава: пьезоэлектрик-феррит-планарный полупроводниковый диод. Разделительные конденсаторы, представляющие собой разрыв микрополосковой линии передачи, предотвращают распространение управляющего электрического сигнала в СВЧ тракт. Фильтры низких частот, сформированные последовательно соединенными полосковыми линиями с разным волновым сопротивлением, предотвращают распространение СВЧ сигнала к входу отсчетного устройства. Устройство позволяет детектировать СВЧ сигнал простым и эффективным способом, обладает совместимостью с планарными устройствами, широким температурным диапазоном, низким энергопотреблением, частотной избирательностью и высоким быстродействием частотной перестройки, управляемой электрическим полем.

Заключение

Полученные результаты показывают перспективность рассмотренных МЭ СВЧ устройств для приемных модулей ФАР. По оценкам такой МЭ приемный модуль может обеспечивать в 3-см диапазоне чувствительность на уровне 30 дБ при полосе пропускания 30 МГц. Разработка и применение новых слоистых феррит-пьезоэлектрических структур с повышенными свойствами позволит существенно улучшить характеристики модулей и ФАР в целом.

Список литературы

1. Бичурин М.И., Петров В.М. Магнитный резонанс в слоистых феррит-сегнетоэлектрических структурах // ЖТФ.1988. № 11. Т.58. С.2277-2278.
2. Бичурин М.И. Магнитоэлектрические материалы и их применение в технике СВЧ // Вестник НовГУ, Сер.: Естеств. и техн. науки. 2001. №19. С. 7-12.
3. 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. 280. P. 211-218.
4. 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. 64. 094409(1-6) (2001).

5. Bichurin M.I., Filippov D.A., Petrov V.M., Laletsin V.M., Paddubnaya N., Srinivasan G. Resonance magnetoelectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites // Phys. Rev. B. 68. 132409(1-4) (2003).
6. Bichurin M.I., Petrov V.M., Ryabkov O.V., Averkin S.V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at magnetoacoustic resonance in single-crystal ferromagnetic-ferroelectric heterostructures // Phys. Rev. B. 72. 060408(R) (2005).
7. Bichurin M.I., Petrov R.V. Magnetolectric Phasers For PAS. Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition on Satellite Communications (ICSC'96). Moscow, 1996. P. 172-176.
8. Петров Р.В., Бичурин М.И., Воробьев Ю.Д., Килиба Ю.В. Полосовой перестраиваемый магнитоэлектрический СВЧ фильтр // Сб. докл. Международного форума по проблемам науки, техники и образования. 1997. МИИГАИК. М., 1997. С. 234-238.
9. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. Magnetolectric microwave phase shifters // Ferroelectrics. 1997. 204. P.311-318.
10. Бичурин М.И., Петров Р.В., Филиппов А.В. Гиратор СВЧ магнитоэлектрический // Патент 2357356. Н03Н011/42. 2009.

Рецензенты:

Захаров А.Ю., д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

Корнышев Н.П., д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник НИИ ПТ «РАСТР», г. Великий Новгород.

Работа получена 05.09.2011.