

А.И. Фирсенков¹, В.А. Дубовой¹, В.И. Чуркин¹, А.Э. Козин^{1,2},
Д.Н. Федин¹, А.Б. Устинов²

¹ОАО «Завод «Магнетон»

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Ферритовые СВЧ фильтры с электронной перестройкой полосы пропускания в широком диапазоне частот

Приводятся результаты разработки электрически перестраиваемых полосно-пропускающих ферритовых фильтров СВЧ диапазона на магнитостатических волнах и сферических резонаторах.

Ключевые слова: перестраиваемые ферритовые фильтры, магнитостатические волны, сферические ферритовые резонаторы.

Перестраиваемые полосно-пропускающие ферритовые фильтры (ФФ) нашли широкое применение в качестве электронной компонентной базы в ряде отраслей промышленности: радиоэлектронике, технике связи, приборостроении. В настоящее время ФФ применяются в приемо-передающих трактах РЛС, в высотомерах самолетов и вертолетов, навигационной бортовой аппаратуре самолетов, навигационной аэродромной аппаратуре, в радиорелейной и космической связи СВЧ, в системах радиоразведки, анализаторах спектра и других приборах измерительной техники. Основное их назначение – избирательное по частоте выделение полезного сигнала и подавление преднамеренных помех, паразитных сигналов, гармоник. По принципу действия и виду объекта ферритовой среды различают фильтры на монокристаллических ферритовых резонаторах (ФР) железо-иттриевого граната (ЖИГ), и фильтры на магнитостатических волнах (МСВ), распространяющихся в монокристаллических ЖИГ пленках.

Номенклатура ФФ перекрывает широкий диапазон рабочих частот (300 МГц ÷ 40 ГГц), обеспечивая такие важные свойства, как высокую избирательность (до 36 дБ/октаву, коэффициент прямоугольности 2), загораживание вне полосы пропускания (90÷110 дБ), низкие потери в полосе пропускания (не более 4 дБ), широкие пределы полос пропускания (от 0.1% до 5%). Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров приведены на рисунках 1 и 2.

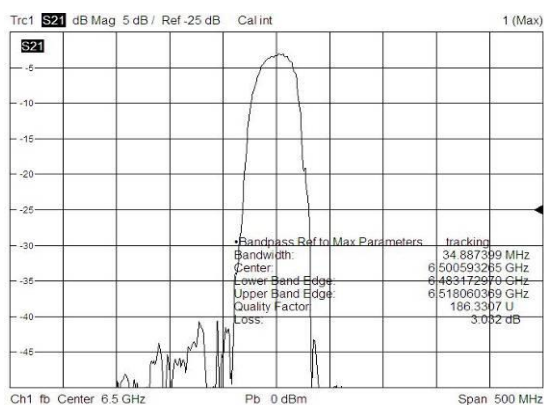


Рисунок 1. АЧХ фильтра на МСВ

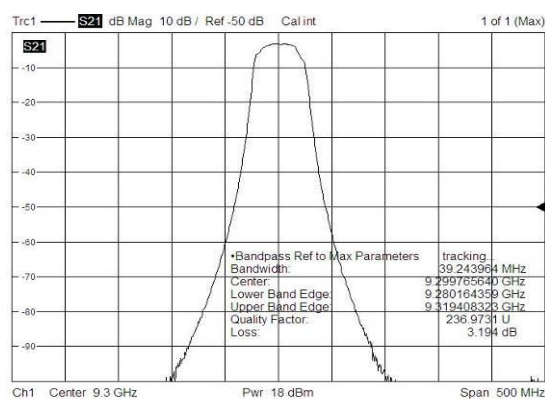


Рисунок 2. АЧХ шестизвенного фильтра на ФР

ФФ изготавливаются в коаксиальном, микрополосковом, волноводном, и комбинированном исполнении, с электрической и механической перестройкой частоты. Номенклатура опытных и серийно выпускаемых перестраиваемых фильтров превышает два десятка наименований [1].

Для разработки новых поколений радиосистем существует потребность ухода вверх по частоте и получения компонентов с широким диапазоном частотной перестройки. Таким требованиям в настоящее время наилучшим образом удовлетворяют СВЧ фильтры производства "ОАО "Завод "Магнетон", изготовленные на основе сферических резонаторов из ЖИГ.

Перестройка центральной частоты фильтров производится за счет изменения поля подмагничивания сферы ЖИГ путем подачи тока в катушки управления. Фильтры могут иметь встроенные опорные постоянные магниты и работать без подачи тока управления на фиксированной частоте, и перестраиваются от фиксированной частоты с помощью тока управления. Перестройка центральной частоты в сторону более высоких частот, и в сторону более низких частот зависит от полярности напряжения, подаваемого на катушки фильтра.

В настоящее время разработаны и выпускаются перестраиваемые ФФ на ЖИГ резонаторах с количеством звеньев до шести, с коаксиальными и микрополосковыми выводами. Технические решения, обеспечивающие получение параметров на уровне мировых, защищены патентами [2,3].

Параметры коаксиальных ФФ на ферритовых резонаторах приведены в таблице 1.

Проведенная модернизация фильтров на ферритовых резонаторах за счет сокращения зазора магнитной системы позволила уменьшить их габариты при сохранении их электрических параметров и выйти на уровень лучших зарубежных аналогов фирм Micro Lambda Wireless, Inc. и Teledyne Microwave.

Таблица 1. Параметры перестраиваемых фильтров на ферритовых резонаторах

Тип	ТУ, опытный	Диапазон перестройки, ГГц	Число звеньев	Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	Минимальные потери, дБ	Заграждение, дБ	Габариты, мм		
							Габариты после модернизации*, мм		
							Длина	Ширина	Высота
ФКИН3-10-0.4-0.6	Опытный	0.4÷0.6	4	7 ÷ 14	7.0	80-90	25	25	25
ФКИН3-10 ФКИН3-11	ЕСКФ. 430441.013ТУ	0.5÷2.0 2 ÷ 4	4	10÷30 20÷70	8.0 4.0				
ФКИН2-60 ФКИН2-61	ЕСКФ. 430441.012 ТУ	4 ÷ 8 8 ÷ 12	4	18÷50 25÷60	4.5	80-90	30* 35*	30* 35*	25* 30*
ФФЛК2-17	ПЯ0226.004ТУ	1 ÷ 12	2	12÷60	5.0	55-70	35	35	40
ФКИН2-60-6 ФКИН2-61-6	Опытный	4 ÷ 8 8 ÷ 12	6	25÷50 30÷60	5.0	100-110	35	35	44
ФКИН2-61-1-12 ФКИН2-61-2-12	Опытный	1 ÷ 12 2 ÷ 12	4	12÷45	7.0 6.0	80-90	35	35	44
ФКИН2-61-2-18 ФКИН2-61-8-18	Опытный	2 ÷ 18 8 ÷ 18	4	20÷70	7.0 4.0	80-90	35*	35*	30*
ФКИН2-61-12-26 ФКИН2-61-18-26	Опытный	12 ÷ 26 18 ÷ 26	4	10÷100 30÷100	6.0 4.0	70 70	40*	40*	45*
ФКИН2-60В	Опытный	8-37.5	4	10-120	3-6	50-80	50	50	60

*Интервал температур от -10°C до +70 °C

Как отмечалось ранее ОАО "Завод "Магнетон" разрабатывает также и фильтры на основе эпитаксиальных пленок ЖИГ. Преимуществом таких фильтров является планарность конструкции, что позволяет их изготавливать в интегральном исполнении. Принцип работы фильтров на МСВ основан на преобразовании электромагнитной волны в поверхностную магнитостатическую (спиновую) волну, распространяющуюся в тонкой ферритовой пленке. С помощью входного и выходного преобразователей формируется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра с высокой избирательностью. Перестройка центральной частотой фильтров производится путем изменения тока в катушках управления.

Фильтры на МСВ являются невзаимными устройствами, так как при передаче сигнала с выхода на вход имеют потери более 20-25 дБ, что значительно превышает потери со входа на выход. В результате при использовании фильтров снижается взаимное влияние каскадов, между которыми находится фильтр, и уменьшается влияние КСВн нагрузки в тракте.

Среди преимуществ фильтров на МСВ также следует отметить высокую скорость перестройки частоты (до 10 МГц/мкс). Перспективность увеличения скорости управления системой, использующей такие фильтры, заключается в опережении противника с целью упреждения и противодействия. За счет высокой скорости перехода на другую рабочую частоту увеличивается помехозащищенность системы и ее работоспособность при воздействии помех.

Фильтры на МСВ могут быть изготовлены с полосой пропускания от 20 до 200 МГц, идентичными характеристиками перестройки центральной частоты. Фильтры предназначены для работы в СВЧ тракте с волновым сопротивлением 50 Ом. В таблице 2 приведены параметры фильтров на МСВ с коаксиальными выводами и габаритными размерами (длина x ширина x высота) 26x28x30мм.

Таблица 2. Параметры коаксиальных перестраиваемых фильтров на МСВ

Тип	ТУ, опытный	Диапазон значений начальной фиксированной частоты, ГГц	Электрическая перестройка центральной частоты от начальной, ГГц	Полоса пропускания по уровню -3 дБ*, МГц	Минимальные потери, дБ	Заграждение, дБ
ФКИС2-12-2-8	Опытный	1.5 ÷ 8	1	20 ÷ 50	4.0	50
ФКИС2-12	ЕСКФ. 430441.020ТУ	8-10	1	30÷60	4.5	50
ФКИС2-12А	ЕСКФ. 430441.020ТУ	10-12	1	30÷60	4.5	40
ФКИС2-12-12-20	Опытный	12 ÷ 20	0.5	30÷70	4.5	40

*- возможно изменение полосы пропускания.

В настоящее время ведется разработка МСВ фильтров с низкими вносимыми потерями и широким диапазоном перестройки частоты. Остановимся на полученных на настоящий момент результатах более подробно.

В качестве волновода МСВ в макете фильтра была использована эпитаксиальная пленка железо-иттриевого граната толщиной 9 мкм. Пленка намагничивалась по касательной так,

чтобы в ней распространялись поверхностные МСВ.

Для измерения характеристик макет помещался в зазор между полюсами лабораторного электромагнита. АЧХ экспериментального макета фильтра, измеренные для разных значений полей подмагничивания H , показаны на рис. 3. Результаты измерений показали, что в диапазоне магнитных полей от 1150 Э до 1530 Э фильтр перестраивается в диапазоне 5140-6320 МГц. В этом диапазоне минимальные вносимые потери составляли 2.4-2.9 дБ (рис. 4), а обратные потери – более 20 дБ. Полоса пропускания, измеренная по уровню минус 3 дБ от уровня минимальных вносимых потерь, составляла 28-34 МГц.

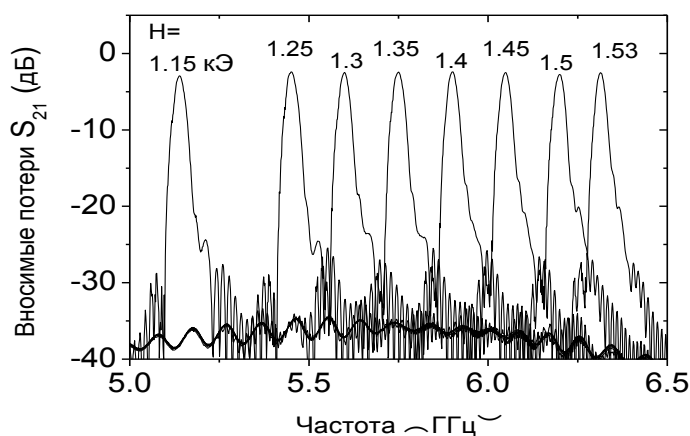


Рисунок 3. АЧХ макета фильтра в диапазоне магнитных полей $H = 1150-1530$ Э.

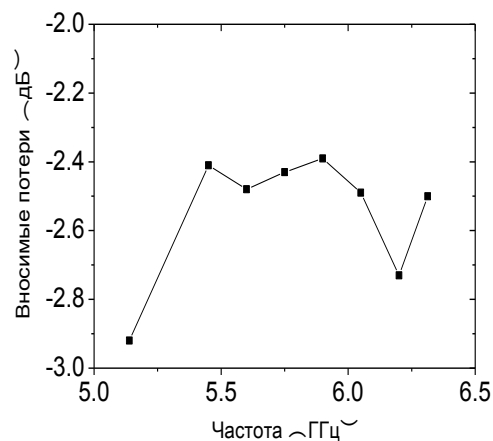


Рисунок 4. Минимальные вносимые потери макета фильтра

Рисунок 5 показывает АЧХ макета фильтра в лабораторном электромагните, изготовленного на замещенной пленке ЖИГ с намагниченностью насыщения 800 Гс. При изменении поля подмагничивания от 710 до 930 Э макет фильтра перестраивался в диапазоне 3-3.6 ГГц. Ширина полосы составляла 35 МГц, вносимые потери составляли 3.2 дБ. Для увеличения развязки между входной и выходной антеннами были использованы специальные металлические экраны. Время задержки СВЧ сигнала в фильтре составляло 29 нс.

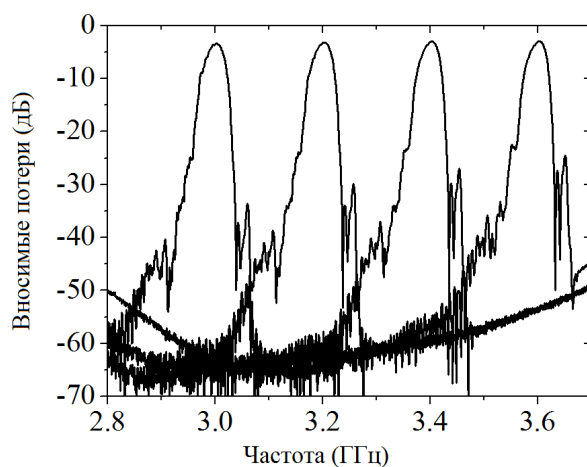


Рисунок 5. АЧХ макета фильтра на основе замещенной пленки ЖИГ, в диапазоне магнитных полей $H=710-930$ Э.

На рисунках 6 и 7 приведены АЧХ опытного образца фильтра S-диапазона, изготовленного на замещенной пленке ЖИГ с пониженной намагниченностью насыщения. Диапазон перестройки полосы пропускания фильтра - 2...2.7 ГГц. Ширина полосы пропускания - 25...34 МГц, вносимые потери - не более 3 дБ.

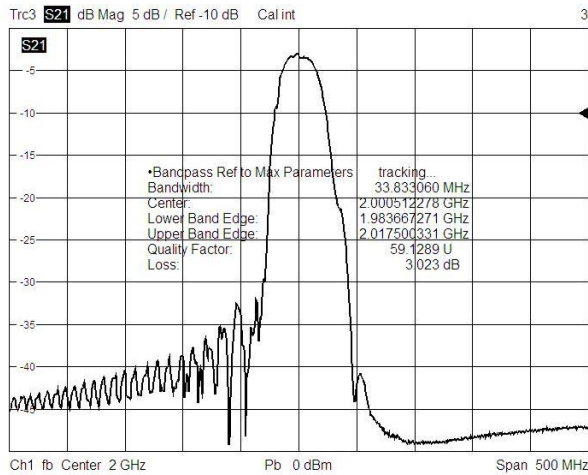


Рисунок 6. АЧХ фильтра на основе замещенной пленки ЖИГ на нижней частоте диапазона перестройки

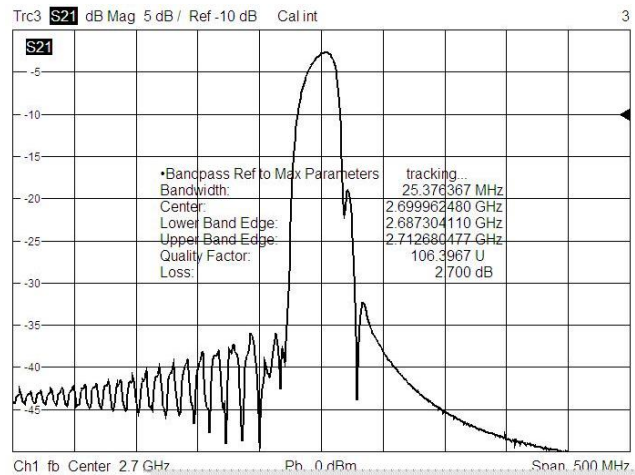


Рисунок 6. АЧХ фильтра на основе замещенной пленки ЖИГ на верхней частоте диапазона перестройки

Библиографический список

1. ОАО «Завод Магнетон» [Электронный ресурс]: Ферритовые СВЧ приборы: Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры Режим доступа: www.magneton.ru.
2. Патент на полезную модель № 128785 от 27.05.2013г.
3. Патент на полезную модель № 148202 от 27.10.2014г.