

05;09

Исследование оптимальной фильтрации СВЧ-сигнала многополосным спин-волновым кольцевым резонатором

© А.А. Порохнюк, А.Б. Устинов, Н.Г. Ковшиков, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“, Санкт-Петербург
E-mail: spinlab@eltech.ru

Поступило в Редакцию 30 марта 2009 г.

Впервые исследована оптимальная фильтрация импульсного СВЧ-сигнала многополосным активным кольцевым спин-волновым резонатором. Кольцевой резонатор был построен на спин-волновой линии задержки, изготовленной на основе монокристаллической пленки железо-иттриевого граната, и СВЧ-усилителя в цепи обратной связи. Резонатор имел гребенчатую форму амплитудно-частотной характеристики с большим количеством полос пропускания. Показано, что сигнал в виде периодической последовательности прямоугольных СВЧ-импульсов фильтруется наилучшим образом в том случае, когда положение гармоник спектра сигнала совпадает с положением полос пропускания резонатора. Таким образом, активный кольцевой спин-волновой резонатор можно использовать как оптимальный СВЧ-фильтр периодических импульсных СВЧ-сигналов.

PACS: 85.70.Ge, 75.30.Ds

Одним из перспективных направлений развития микроэлектроники является разработка сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов на основе ферритовых пленок, например монокристаллических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ). К преимуществам таких приборов относятся планарность их конструкций, легкость получения разнообразных рабочих характеристик приборов путем выбора их топологии, а также возможность перестройки рабочих характеристик за счет изменения поля подмагничивания пленки. Кроме того, спиновые волны (СВ), распространяющиеся в высококачественных пленках ЖИГ, имеют сравнительно низкое затухание, а именно, менее $30 \text{ dB}/\mu\text{s}$ в диапазоне сверхвысоких частот.

В настоящее время уже разработано и исследовано большое многообразие спин-волновых приборов (см., например, [1–5]). Одним из них является активный кольцевой резонатор [6–8]. Известно, что такой резонатор обладает высокими значениями добротности (порядка 50 000) и имеет спектр резонансных частот, близкий к эквидистантному. Фильтр, изготовленный на основе такого резонатора, имеет гребенчатую форму амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), схожую с АЧХ оптимальных фильтров, широко применяемых в радиотехнике (см., например, [9]). Вместе с тем возможности оптимальной фильтрации СВЧ-сигналов с помощью таких фильтров до сих пор остаются неизученными.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности применения многополосного активного кольцевого фильтра на спиновых волнах для оптимальной фильтрации периодических СВЧ-сигналов. Напомним, что под оптимальным фильтром понимается частотно-избирательная система, выполняющая обработку суммы сигнала и шума некоторым наилучшим образом. Ясно, что для периодического СВЧ-сигнала, частотный спектр которого имеет дискретную структуру, оптимальным будет являться фильтр, имеющий гребенчатую форму АЧХ. При этом частотное положение полос пропускания фильтра должно соответствовать частотам гармонических составляющих спектра выделяемого сигнала. В таком случае из смеси известного сигнала с белым шумом фильтр будет пропускать на выход гармонические колебания, частоты которых отвечают лишь тем участкам спектра, где спектральная плотность сигнала отлична от нуля.

Блок-схема экспериментального макета многополосного активного СВЧ-фильтра приведена на рис. 1. Устройство представляло собой кольцевую схему, состоящую из спин-волновой линии задержки 1, широкополосного СВЧ-усилителя 2, переменного аттенюатора 3 и двух направленных ответвителей 4 и 5. Спин-волновая линия задержки играла роль частото задающего элемента. Она задавала частоты полос пропускания активного фильтра. Широкополосный СВЧ-усилитель как активный элемент компенсировал потери в схеме. Переменный аттенюатор использовался для регулировки величины компенсации потерь. Сигнал вводился в схему через направленный ответвитель 4, а обработанный сигнал снимался на выходе направленного ответвителя 5.

Линия задержки была изготовлена на основе монокристаллической пленки железо-иттриевого граната 6 толщиной $5.7 \mu\text{m}$ и намагниченно-

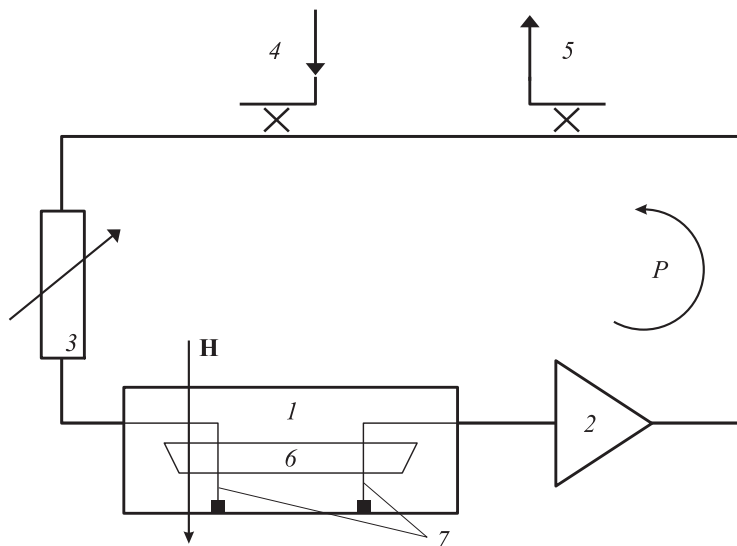


Рис. 1. Блок-схема многополосного активного СВЧ-фильтра.

стью насыщения 1950 Ое, эпитаксially выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната толщиной 0.5 мм. Для возбуждения спиновых волн в пленке и для их приема использовались микрополосковые антенны 7 длиной 2 мм и шириной 50 μm , нанесенные на подложку из поликора толщиной 0.5 мм. Расстояние между антеннами составляло 8 мм. Антенны питались от подводных микрополосковых линий, имевших волновое сопротивление 50 Ω . Линия задержки размещалась между полюсами постоянного магнита в однородном магнитном поле напряженностью $H_e = 1360$ Ое, которое было направлено по касательной к плоскости пленки параллельно антеннам СВ. Такая ориентация поля обеспечивала возбуждение в пленке ЖИГ поверхностных спиновых волн.

Рассмотрим принцип работы многополосного фильтра на основе активного кольцевого резонатора. Входной СВЧ-сигнал, подающийся на направленный ответвитель 4, начинает циркулировать в кольце. Распространяясь по кольцу, сигнал испытывает ослабление в спиновой линии задержки и в переменном аттенуаторе, а в СВЧ-усилителе — усиливается. Обозначим потери сигнала в линии задержки

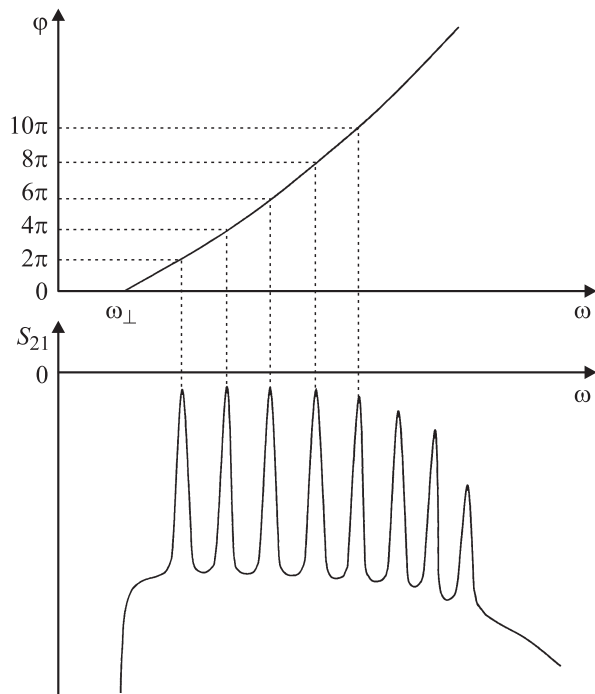


Рис. 2. Качественное изображение зависимости фазового набега СВЧ-сигнала на длине кольца (сверху) и амплитудно-частотной характеристики кольца (снизу).

за L . Широкополосный СВЧ-усилитель с переменным аттенуатором обеспечивает регулируемое усиление СВЧ-сигнала в кольце. Такое усиление обычно называют коэффициентом усиления кольца и обозначают за G . Активный кольцевой резонатор работает как многополосный СВЧ-фильтр тогда, когда G меньше, чем L . В противном случае он работает как СВЧ-генератор. Значение G , при котором кольцо переходит в режим автогенерации, можно использовать как реперную точку. В настоящей работе такое значение G было принято за 0 dB.

Принцип формирования полос пропускания активного кольцевого фильтра качественно поясняет рис. 2. Полосы пропускания формируются на частотах, соответствующих резонансным частотам кольца.

В кольце имеет место СВЧ-резонатор, если фазовый набег сигнала кратен 2π . Условие резонанса записывается в виде $k_{sw}(f)d_{sw} + \varphi_e = 2\pi n$, где k_{sw} — волновое число спиновой волны в пленке ЖИГ, f — несущая частота, d_{sw} — длина пути распространения волны, φ_e — фазовый набег СВЧ-сигнала в электронной цепи кольца, а n — целое положительное число, нумерующее резонансные частоты кольца. Отметим, что частотный диапазон существования спиновых волн является функцией магнитного поля [10]. Поэтому значениями резонансных частот активного кольцевого резонатора можно управлять в широком частотном диапазоне, варьируя магнитное поле.

Исследование многополосного СВЧ-фильтра было проведено в два этапа. На первом этапе измеряли АЧХ фильтра для различных значений $G < 0$. Полученные результаты показали, что увеличение G ведет к сужению полос пропускания и увеличению разности значений коэффициента передачи фильтра в полосах пропускания и в полосах заграждения. Данный факт находится в хорошем соответствии с ранее полученными результатами [6,8].

Для проведения экспериментальных исследований по оптимальной фильтрации периодического СВЧ-сигнала было выбрано значение $G = -6$ dB. Фрагмент АЧХ фильтра для такой величины G показан на рис. 3, а. Из рисунка видно, что полосы пропускания с минимальными потерями лежали в диапазоне частот 5970–6000 МГц. В этом диапазоне расстояние между полосами пропускания составляло около 4.4 МГц. Соотношение между вносимыми потерями в полосах пропускания и заграждения для экспериментальной конструкции фильтра было около 10 dB.

На втором этапе исследований было проведено изучение фильтрующих свойств фильтра. На вход фильтра подавался сигнал в виде периодической последовательности прямоугольных СВЧ-импульсов. Сигнал, снимаемый с выхода фильтра, делился на два сигнала. Один из них подавался на анализатор спектра, а другой после детектирования — на осциллограф. При этом измерялись и осциллограммы сигнала на выходе фильтра.

Сначала был исследован режим оптимальной фильтрации. Такой режим достигался, когда несущая частота входной последовательности импульсов f_0 была равна 5985.3 МГц (рис. 3, б). Данная частота соответствовала одной из центральных полос пропускания фильтра. Частота следования импульсов составляла 4.4 МГц при скважности 50%. В этом

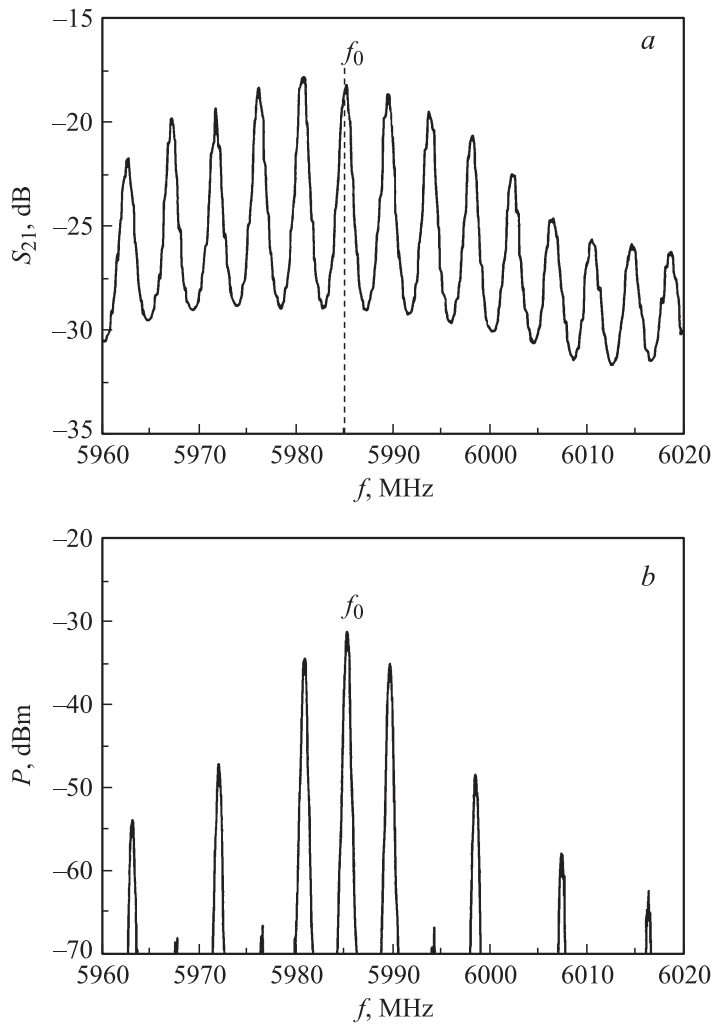


Рис. 3. Фрагмент АЧХ активного фильтра (а). Спектр сигнала на выходе фильтра в режиме оптимальной фильтрации (б).

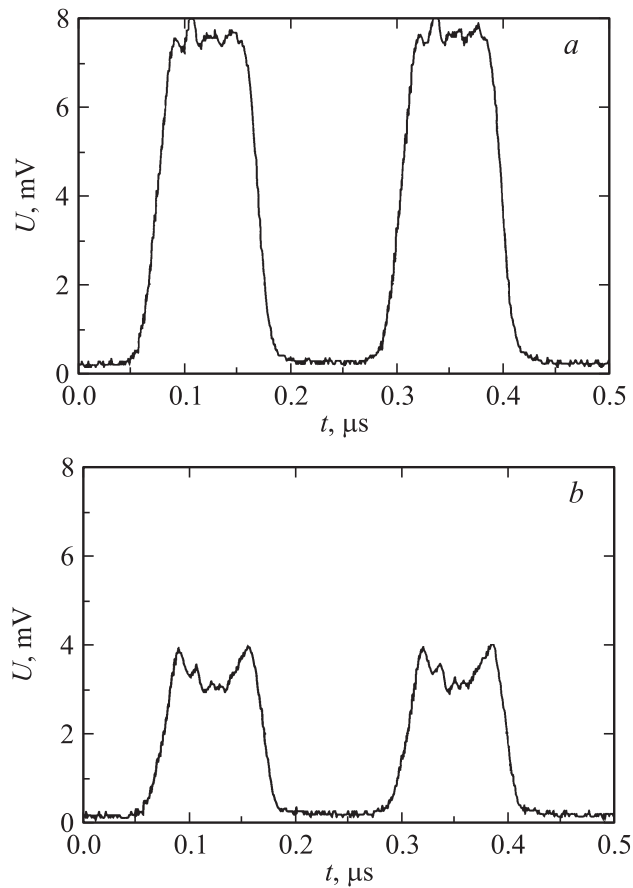


Рис. 4. Осциллограммы СВЧ-сигналов на выходе фильтра в режиме оптимальной фильтрации входного СВЧ-сигнала на частоте $f_0 = 5985.3$ MHz (a) и при отстройках частоты входного сигнала от f_0 на $\Delta f = 0.6$ MHz (b) и $\Delta f = 2.2$ MHz (c). Зависимость относительного ослабления входного СВЧ-сигнала от величины отстройки от частоты оптимальной фильтрации (d).

случае гармоники частотного спектра входного сигнала отстояли от несущей частоты на частоты, кратные 4.4 MHz, и попадали в соседние полосы пропускания фильтра. Такой периодический импульсный СВЧ-

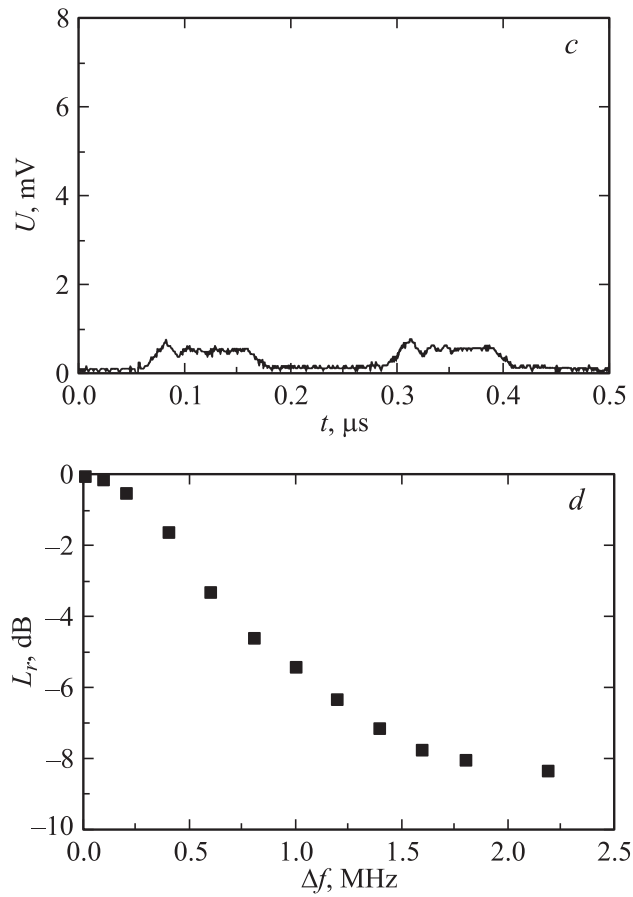


Рис. 4 (продолжение).

сигнал проходил на выход фильтра с минимальными искажениями и потерями. Осциллограммы выходного сигнала, записанные в режиме оптимальной фильтрации, показаны на рис. 4, *a*.

Затем была изучена фильтрация описанного выше сигнала при отстройке его несущей частоты от значения f_0 . На рис. 4, *d* точками показаны результаты измерений относительного ослабле-

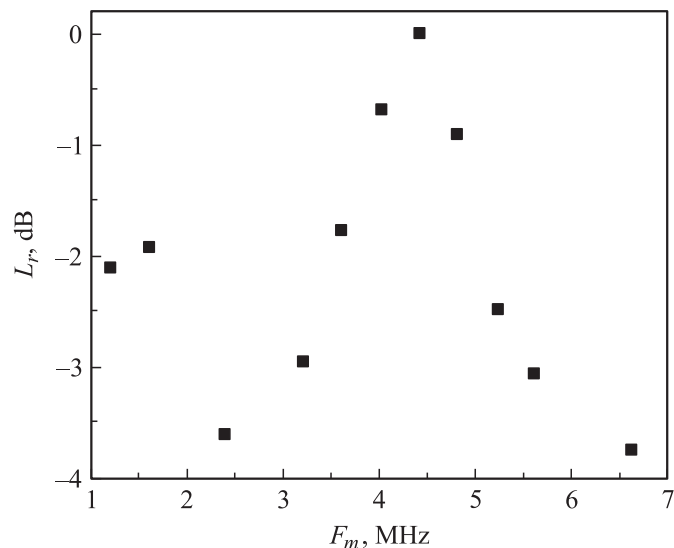


Рис. 5. Зависимость относительного ослабления входного СВЧ-сигнала от частоты его модуляции.

ния L_r , вносимого фильтром, которое было рассчитано по формуле $L_r(\Delta f) = 10 \lg(P_{out}(\Delta f)/P^*)$, где Δf — отстройка от частоты оптимальной фильтрации f_0 , $P_{out}(\Delta f)$ — пиковая мощность сигнала на выходе фильтра при отстройке на Δf , а P^* — пиковая мощность сигнала на выходе фильтра на частоте f_0 . Как видно из графика, увеличение частоты отстройки Δf от 0 до 2.2 МГц, т.е. до значения, равного половине разности частот между полосами пропускания фильтра, приводило к дополнительному ослаблению мощности входного сигнала на величину около 8.5 дБ. Такое значение ослабления хорошо согласуется с соотношением между потерями, вносимыми фильтром в полосах пропускания и заграждения. На рис. 4, *b* и *c* приведены примеры осциллограмм сигналов, наблюдавшихся на выходе фильтра при значениях Δf , соответственно равных 0.6 и 2.2 МГц.

На последнем этапе эксперимента была изучена фильтрация сигналов в виде периодических последовательностей прямоугольных СВЧ-импульсов с несущей частотой, соответствовавшей частоте оптималь-

ной фильтрации $f_0 = 5985.3$ МГц, но с различными частотами следования импульсов F_m . Результаты измерений относительного ослабления L_r , вносимого фильтром для разных значений F_m , показаны на рис. 5. Из графика видно, что входной сигнал фильтровался наилучшим образом и испытывал наименьшее ослабление для случая $F_m = 4.4$ МГц, т.е. для случая, когда все гармоники спектра входного сигнала попадали в полосы пропускания фильтра.

Из проведенного исследования следует, что многополосный СВЧ-фильтр на основе спин-волнового активного кольцевого резонатора наилучшим образом фильтрует такой периодический СВЧ-сигнал, несущая частота и гармонические составляющие спектра которого лежат в полосах пропускания фильтра. Следовательно, многополосный фильтр будет оптимальным для отдельно взятого сигнала. Варьируя параметрами конструкции фильтра, такими как толщина пленки ЖИГ и расстояние между антеннами спиновых волн, можно получать различные частотные интервалы между его соседними полосами пропускания. Поэтому такой фильтр может быть использован в качестве оптимального для фильтрации разного вида периодических импульсных СВЧ-сигналов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 08-02-00959), Федерального агентства по науке и инновациям и Совета по грантам президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-2124.2008.2 и МК-2804.2008.8), Федерального агентства по образованию РФ (проекты РНП/2.1.1.371), а также Администрации Санкт-Петербурга.

Список литературы

- [1] Исхак В.С. // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 2. С. 86–104.
- [2] Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитоэлектронные волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. 316 с.
- [3] Adam J.D., Davis L.E., Dionne G.F., Schloemann E.F., Stützer S.N. // IEEE Trans. MTT. 2002. V. 50. P. 721–737.
- [4] Ustinov A.B., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 172511/1-3.
- [5] Ustinov A.B., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 102504/1-3.
- [6] Demidov V.E., Kalinikos B.A., Kovshikov N.G., Edenhofer P. // Electron. Lett. 1999. V. 35. P. 1856–1857.

- [7] *Fetisov Y.K., Kabos P., Patton C.E.* // Electron. Lett. 1996. V. 32. P. 1894–1895.
- [8] *Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 193512/1-3.
- [9] *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 2005. 462 с.
- [10] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.