

# Перестраиваемые по частоте СВЧ-фильтры на основе ферритовых материалов. Часть 1

Владимир ГЕВОРКЯН  
gvm@ems.mpei.ac.ru  
Виктор КОЧЕМАСОВ  
Алексей УСТИНОВ

Статья знакомит читателей с принципами создания и основными типами перестраиваемых селективных ферритовых устройств, ожидаемыми параметрами изделий основных мировых производителей. Среди иностранных компаний наибольшую номенклатуру изделий предлагают американские фирмы OMNIIYG (основана в 1973 г.) и Micro Lambda Wireless (основана в 1990 г.). Среди отечественных производителей широкую линейку продукции представляет ОАО «Завод «Магнетон» (Санкт-Петербург), сохранившее свои лидирующие позиции в производстве СВЧ-фильтров еще с советского времени. В достаточно крупных сегментах рынка современных изделий представлены НПО «Фаза» (Ростов-на-Дону), ОАО «НИИ «Феррит-Домен», нижегородский НИПИ «Кварц» и ряд сравнительно новых предприятий. В последние годы появилась реклама продукции китайских производителей.

## Свойства ферромагнетиков и их применение в селективных устройствах

В настоящее время основные технические решения сверхвысокочастотных (СВЧ) селективных устройств на основе гиромангнитных явлений в ферритовых материалах представляют фильтры, для изготовления которых используются либо гиромангнитные резонаторы (чаще всего сферической формы), работающие на эффекте ферромагнитного резонанса, либо пленочные ферритовые волноводы, в которых распространяются магнитостатические спиновые волны. В качестве ферритового материала обычно применяется монокристаллический железо-иттриевый гранат (ЖИГ). Основная особенность и достоинство таких фильтров — возможная электрическая перестройка центральной частоты в широких пределах (до нескольких десятков гигагерц).

### Гиромангнитные СВЧ-резонаторы сферической формы

Гиромангнитный резонатор (ГР) — частотно-избирательный твердотельный элемент СВЧ-устройств, чья работа основана на явлении ферромагнитного резонанса (ФМР), которым характеризуют сложные физические процессы СВЧ-колебаний (прецессии) переменной намагниченности неограниченной среды относительно направления приложения внешнего намагничивающего постоянного поля  $H$ . Напряженность внеш-

него поля определяет круговую резонансную частоту однородной прецессии намагниченности выражением  $\omega_p = \mu_0 \gamma (H \pm H_A)$ , где  $\gamma = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная (здесь и далее используется система СИ);  $\gamma = 1,76 \times 10^{11}$  Кл/кг — гиромангнитное (магнитомеханическое) отношение;  $H$  — напряженность внешнего постоянного магнитного поля, превышающая поле насыщения магнитного материала;  $H_A$  — напряженность эффективного поля магнитной кристаллографической анизотропии. Резонансная частота зависит от свойств материала и практически не связана с геометрическими размерами гиромангнитных резонаторов. Эти резонаторы используются в СВЧ-диапазоне 0,1–110 ГГц, но основная область их применения — сантиметровый диапазон длин волн и длинноволновая часть миллиметрового диапазона.

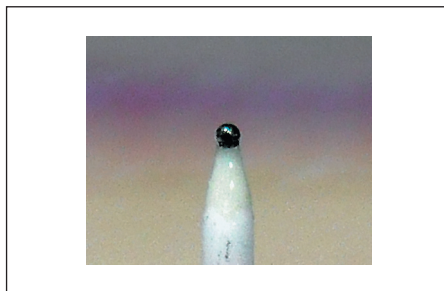


Рис. 1. Шар ЖИГ диаметром 0,5 мм на диэлектрическом держателе — типичный размер ГР сантиметрового диапазона длин волн

Гиромангнитные резонаторы изготавливаются из различных ферритов с малыми магнитными и диэлектрическими потерями, чаще всего из монокристаллов железо-иттриевого граната. Типичный ГР представляет собой оптически полированный шар (рис. 1). Такие модели обычно называют сферическими. Сферические ЖИГ-резонаторы имеют размеры много меньше, чем длина электромагнитной волны в свободном пространстве [1, 2], что для сантиметрового диапазона длин волн соответствует диаметрам 0,3–1,5 мм. Высокая добротность  $Q$  сохраняется в широком диапазоне перестройки

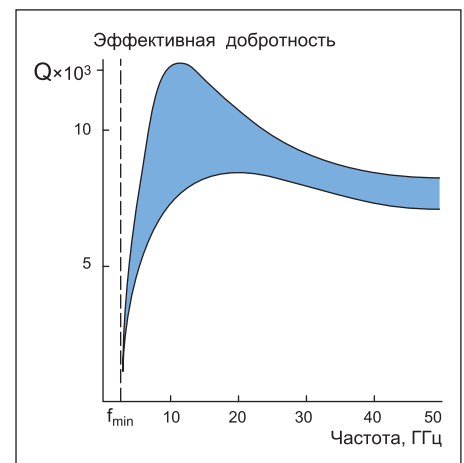


Рис. 2. Типичная зависимость собственной (эффективной) добротности сферического ЖИГ-резонатора от резонансной частоты

(рис. 2). Она убывает с ростом неоднородности постоянного магнитного поля в пределах ГР ввиду возникновения неоднородностей прецессии СВЧ-намагниченности. Неоднородность поля может зависеть как от размеров самого ГР, так и от воздействия конструктивных неоднородностей (например, элементов связи и настройки резонатора). В частности, с ростом диаметра сферы ЖИГ от 1 до 3 мм возможно увеличение полосы резонансной кривой (падение добротности) примерно в 5 раз.

Условие необходимого магнитного насыщения образца ГР определяет нижнюю границу  $f_{\min}$  возможной частоты ФМР, меньше которой потери в резонаторе резко возрастают. Для ЖИГ-резонаторов это примерно 1,7 ГГц, а для менее добротных монокристаллов кальций-висмут-ванадиевого граната — около 600 МГц. Диапазон перестройки ГР ограничен сверху частотой объемного резонанса электромагнитных колебаний в образце, определяемой диэлектрической проницаемостью феррита и его размерами, или практически достижимой напряженностью поля  $H$  магнитной системы. Так, в постоянном магнитном поле напряженностью до  $10^6$  А/м сфера ЖИГ проявляет резонансные свойства на частотах до 40 ГГц с эквивалентной добротностью до  $5 \times 10^3$ . Подчеркнем, что в ГР помимо возбуждения ФМР возможно возбуждение электромагнитных колебаний в объеме шара. При этом сфера ЖИГ ведет себя как диэлектрик с относительной проницаемостью около 15.

Постоянные магнитные поля формируются магнитными системами (МС) из постоянных магнитов или электромагнитов, в которых одна обмотка с большим числом витков обеспечивает насыщение материала резонатора и его перестройку по частоте, а для повышения быстродействия процесса перестройки напряженности поля (и частоты  $\omega_p$  ГР) используют дополнительную обмотку с малым числом витков, обладающую меньшей индуктивностью и, как следствие, инерционностью (рис. 3). Применяются замкнутые МС, экранированные от внешних электромагнитных полей, что предотвращает воздействие на ГР как внешних помех, так и помех, создаваемых самим фильтром в процессе его управления.

С ростом частоты габариты МС увеличиваются и в диапазоне миллиметровых волн ( $\lambda \leq 8$  мм), для снижения массы и габаритных размеров магнитной системы в качестве материала ГР используют высокоанизотропные гексаферриты с  $H_A$  от  $8 \times 10^5$  до  $32 \times 10^5$  А/м.

Благодаря малым размерам в сравнении с длиной волны электромагнитная связь с ГР может быть реализована СВЧ-цепями как с квазисосредоточенными (петли, полупетли), так и с распределенными (поля линий передачи или резонаторов) параметрами. Простейшее резонансное звено (РЗ) СВЧ-фильтра образует ферритовый шар, раз-

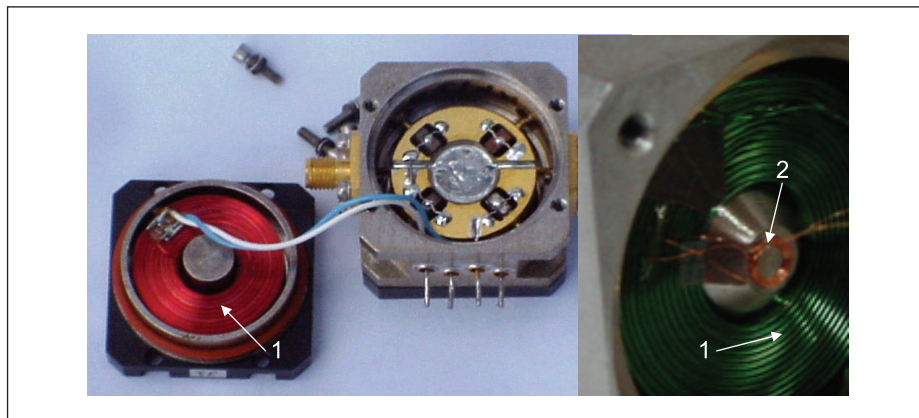


Рис. 3. Магнитная система перестройки частоты ГР в фильтре или генераторе, состоящая из двух катушек: 1 — основной; 2 — спиральной плоской вспомогательной с малым числом витков

мещенный в центре ортогонально установленных (для развязки входов) полупетель, образующих элементы связи ГР (рис. 4). На рисунке условно изображено взаимное положение векторов постоянного поля намагничивания  $H$  и переменного СВЧ-поля  $h$  в представлении феноменологической модели резонатора, вращающегося вокруг оси постоянного магнитного поля.

В любом варианте связи ГР с СВЧ-полем возбуждение колебаний в резонаторе возникает только при «правовинтовом» вращении во времени вектора СВЧ-поля относительно вектора намагничивающего поля. Это обуславливает невзаимные свойства СВЧ-элементов на ГР. Явление используют при сочетании ГР и полых волноводных линий передачи, в которых принципиально наблюдаются точки с правым и левым вращениями векторов магнитного поля бегущей волны.

Гиромагнитные резонаторы применяют в качестве перестраиваемых постоянным магнитным полем резонансных звеньев, помещенных в воздушный зазор МС, который должен быть минимальным, чтобы уменьшить величину тока (точнее, ампер-витков) в катушке и создать необходимые значения напряженности постоянного магнитного поля. Использование ГР в фиксированных по частоте СВЧ-устройствах даже с применением постоянных магнитов не оправдано по массо-габаритным показателям. Эта ниша в конструкциях фильтров и генераторов в диапазоне до 50 ГГц успешно обеспечена твердотельными открытыми диэлектрическими резонаторами.

Кроме относительно больших габаритов перестраиваемых по частоте СВЧ-устройств, определяемых электромагнитом, ограничение в применении ГР обусловлено инерционностью перестройки магнитного поля в зазоре электромагнита (точнее, большой постоянной времени, определяемой высокой индуктивностью обмотки в сравнении с ее омическим сопротивлением), которое управляет частотой. Обычно время перестройки ГР в широком диапазоне частот характеризуется

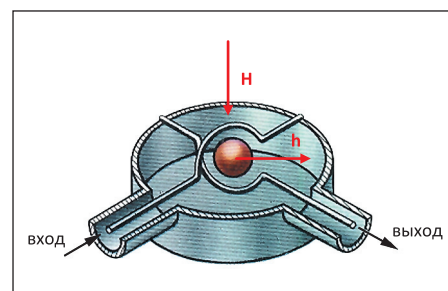


Рис. 4. Простейшее резонансное звено на основе ГР

значением  $6\text{--}30$  мс/ГГц [3] при типичной крутизне управления магнитным полем электромагнита  $10\text{--}20$  МГц/мА [4]. Поэтому они оптимальны для систем с достаточно плавным изменением частоты, например для приборов измерительной техники. Помимо инерционности, недостаток перестраиваемых СВЧ-устройств с ГР связан с необходимым для перестройки источником тока, который с учетом вывода ГР в режим насыщения обычно составляет значения до единиц ампер.

Применение комбинированных магнитных систем, образованных сочетанием постоянного магнита для формирования поля насыщения ГР и электромагнита перестройки частоты, не имеет качественных преимуществ перед электромагнитом, поскольку размер вставки постоянного магнита в контур замкнутого магнитопровода (в простых технических решениях) эквивалентен увеличению воздушного зазора до размера промежутка постоянного магнита, что компенсируется ростом ампер-витков (или тока, или числа витков электромагнита).

Кроме названных, к достаточно проблемным вопросам конструирования устройств с ГР относится обеспечение температурной стабильности резонансной частоты, которая формируется из стабильности собственно ГР (что достигается определенной ориентацией осей монокристалла относительно направления постоянного магнитного поля) и стабильности параметров электромагнита (возможно применение электромагнита в режи-

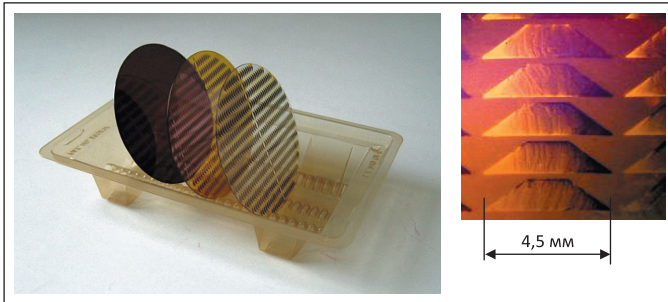


Рис. 5. Эпитаксиальная пленка ЖИГ на подложке ГГГ диаметра 76 мм и массив плечных волноводов, изготовленный химическим травлением по интегральной технологии (слева). Фрагмент того же массива в увеличенном масштабе (справа)

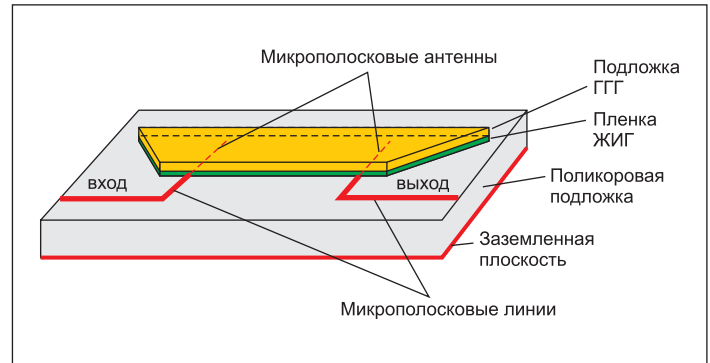


Рис. 7. Конструкция пленочного спин-волнового прибора

ме компенсации температурного смещения резонансной частоты ГР). Тем не менее для собственно ГР из слабоанизотропных ферритов ( $H_A \ll H$ ) кубической симметрии (феррогранаты, феррошпинели), в том числе и ЖИГ, достижим низкий температурный коэффициент частоты (ТКЧ)  $\sim 10^{-6} 1/^\circ$ . В отдельных случаях стабилизацию параметров устройств на ГР усиливают с помощью систем термостагирования, в частности с применением тепловода на полупроводниковых элементах Пельтье, что реализовано в серийных изделиях, выпускаемых НПФ «Микран».

Определенным недостатком ферромагнетиков и всех ГР на их основе является низкий допустимый рабочий уровень мощности (менее 100 мВт), поскольку зависимость свойств феррита от температуры и малый объем образца не позволяют рассеять в нем значительную мощность. В интервале частот  $f_{\min} \leq f \leq 2f_{\min}$  уровень допустимой мощности особенно мал и не превышает 10 мкВт из-за низкого значения порогового СВЧ магнитного поля, при котором происходит переход от линейного режима ФМР к нелинейному. В последнем случае добротность ГР и его связь с СВЧ-цепями падают с увеличением уровня мощности сигнала.

Суммируя сказанное, можно сделать вывод, что создание любых СВЧ-устройств с применением сферических ГР представляет сложную техническую задачу, для успешного решения которой необходим достаточный опыт, знания и технологические возможности.

### Спиновые волны в ферромагнитных пленках и особенности их технического применения

Помимо ГР в виде объемных тел, имеющих сферическую форму, для изготовления СВЧ-приборов используют ферромагнитные пленки. В магнитных пленках на частотах СВЧ-диапазона распространяются спиновые волны (СВ). Физически они являются волнами намагниченности, существующими в магнитоупорядоченных кристаллах — ферромагнетиках, ферримангнетиках и антиферромагнетиках [5–7]. Такие волны могут возбуждаться в очень широком диапазоне частот (от сотен

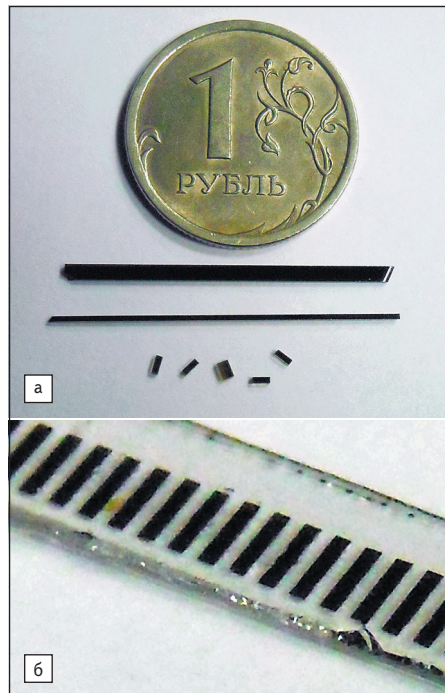


Рис. 6. а) Пленочные ЖИГ-волноводы и резонаторы, полученные путем механической резки эпитаксиальной структуры ЖИГ на ГГГ; б) массив ЖИГ-резонаторов размером 0,5×2,5 мм, сформированный методом химического травления на подложке ГГГ

мегагерц до десятков гигагерц) и относятся к классу медленных электромагнитных волн, поскольку их фазовые скорости значительно меньше скорости света.

Длинноволновые спин-волновые возбуждения с волновыми векторами  $10 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$  часто называют магнитостатическими волнами (МСВ). Мы будем использовать термины «спиновые волны» и «магнитостатические волны» как синонимы в соответствии с традицией, сложившейся при описании волн намагниченности в магнетиках применительно к устройствам спин-волновой электроники. Наиболее часто в спин-волновых устройствах используются монокристаллические пленки ЖИГ, что обусловлено рекордно низкими потерями на распространение спиновых волн.

Пленки ЖИГ эпитаксиально выращиваются на подложках галлий-гадолиниевого граната

(ГГГ) и имеют следующие типичные параметры: толщину 1–100 мкм и намагниченность насыщения 32–151 кА/м, что в системе СГС соответствует  $4\pi M_s$ , равным 400–1900 Гс (в зависимости от количества и типа замещающей примеси). На сравнительно низких частотах, 1–4 ГГц, целесообразно использовать пленки с пониженной намагниченностью, поскольку ею определяется граничная частота области существования трехволновых параметрических процессов, ограничивающих динамический диапазон линейных спин-волновых приборов. Уменьшение намагниченности насыщения снижает эту граничную частоту. Фотографии эпитаксиальных пленочных структур ЖИГ на ГГГ показаны на рис. 5.

Из эпитаксиальных пленок ЖИГ можно изготавливать не только резонаторы, но и планарные тонкопленочные волноводы спиновых волн (рис. 5 и 6), поэтому в отличие от сферических ЖИГ-резонаторов эпитаксиальные пленки ЖИГ находят более разнообразные применения в технике СВЧ. Так, на их основе возможно изготовление дисперсионных и бездисперсионных линий задержки, фазовращателей, фильтров, шумоподавителей, ограничителей мощности, конвольверов, датчиков ускорения, СВЧ-генераторов и других приборов [5–9] на частоты 0,5–20 ГГц. Основные достоинства устройств на пленках ЖИГ — миниатюрность, планарность конструкции и возможность изготовления по интегральной технологии (рис. 5). Это значительно удешевляет их производство.

Типичная конструкция спин-волнового прибора показана на рис. 7. Возбуждение и прием спиновых волн осуществляется антеннами в виде отрезков микрополосковых, копланарных или щелевых линий передачи или их комбинаций. Сверхвысокочастотный ток антенны возбуждает вблизи поверхности ферромагнитной пленки переменное магнитное поле и, соответственно, спиновые волны в пленке, которые в общем случае начинают распространяться в обе стороны от антенны. Волны, достигающие выходной антенны, наводят в ней СВЧ-ток, пропорциональный СВЧ-сигналу. На базе спин-волновых приборов реализуется обработка сигнала — например, задержка, фильтрация или сдвиг фазы.

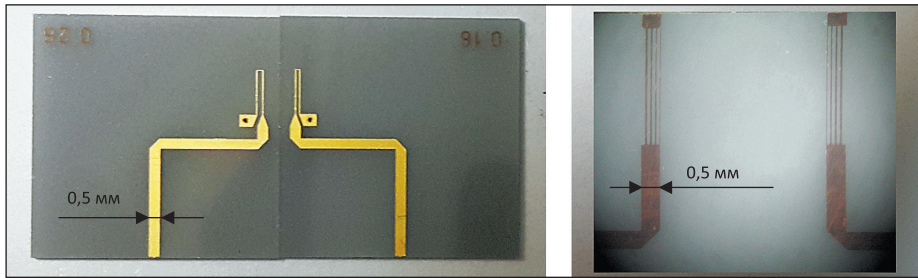


Рис. 8. Многоэлементные микрополосковые антенны типа меандр (слева) и типа решетка (справа), сформированные на поликорковых подложках

В фильтрах на бегущих спиновых волнах (которые получили название «МСВ-фильтры») частотная селекция СВЧ-сигнала обеспечивается особенностями возбуждения и приема спиновых волн, то есть фильтрующими свойствами антенн спиновых волн. Так, для формирования того или иного вида амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра можно использовать конфигурацию многоэлементных антенн (рис. 8). Некоторые идеи получения заданной АЧХ с помощью многоэлементных антенн подобны тем, что применяются в технике поверхностных акустических волн (ПАВ). Однако имеются и существенные отличия, основное из них связано с сильной дисперсией спиновых волн и ее зависимостью от конструктивных параметров устройства. В частности, дисперсия спиновых волн зависит от толщины пленки и взаимной ориентации поля подмагничивания и направления распространения волны [5, 10, 11]. Кроме того, на частотах выше 3 ГГц спиновые волны в пленках ЖИГ затухают слабее, чем ПАВ в ниобате лития. Благодаря зависимости частоты МСВ от внешнего магнитного поля устройства на МСВ допускают электронное управление АЧХ и в отличие от устройств на ПАВ характеризуются менее жесткими требованиями к минимальному топологическому размеру возбуждающих и принимающих преобразователей.

В плане создания магнитных систем и решения вопросов температурной стабильности параметров устройств на МСВ в первом приближении можно ориентироваться на рекомендации, отмеченные в разделе анализа сферических ЖИГ-резонаторов.

## Краткий обзор принципов и вариантов построения фильтров на сферах и пленках ЖИГ

### Фильтры на сферах ЖИГ

Перестраиваемые СВЧ-фильтры, изготавливаемые с помощью сферических ЖИГ-резонаторов, получили коммерческое название «ЖИГ-фильтры» (английское название — YIG filters). Учитывая высокую собственную добротность гиромангнитных резонаторов, ЖИГ-фильтры могут иметь как узкую, так и широкую полосу пропускания, широкий диапазон перестройки по частоте и удобство управления

установкой центральной частоты. Эти параметры ЖИГ-фильтров уникальны. Однако несмотря на малые размеры собственно ГР, габариты устройств с ГР, которые определяются свойствами магнитной системы, выше, чем у фильтров на объемных резонаторах [4].

Принцип построения ЖИГ-фильтров представляет собой традиционный подход формирования АЧХ на базе резонаторов иных типов. В основе проектирования многоэлементных фильтров на ГР — определение требуемых величин коэффициентов связи между соседними РЗ для формирования функции АЧХ низкочастотного прототипа фильтра. Следующий этап — разработка конструктивной реализации нужных величин связи ГР на основе решения внутренней задачи электродинамики.

Технологически простые ЖИГ-фильтры строят на прямоугольных волноводах при непосредственной связи между ГР, что иллюстрирует рис. 9. В таких системах реализуются только малые величины коэффициентов взаимной связи РЗ, а значит — узкие полосы селекции, обусловленные слабыми внешними полями собственно ГР [4].

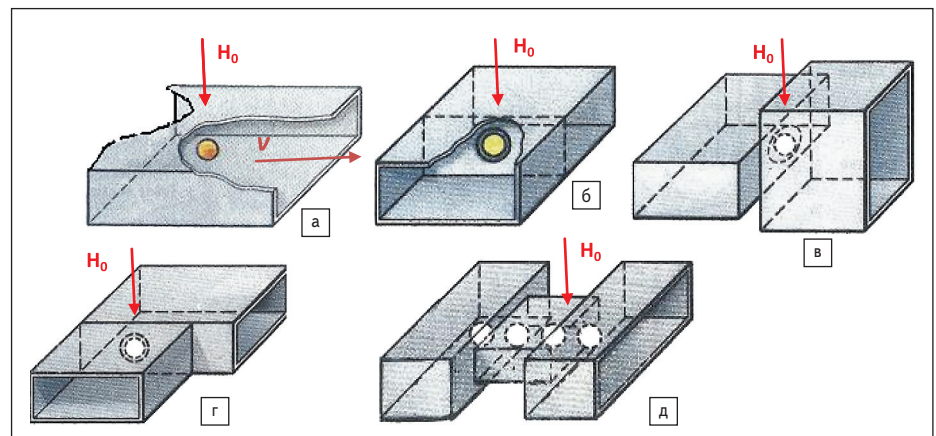


Рис. 9. Схематичные конструкции волноводных фильтров на ГР:

- а) режекторный фильтр с ГР в регулярном прямоугольном волноводе;  
б–г) однозвенный полосно-пропускающий фильтр с ГР в окне диафрагмы;  
д) многозвенный полосно-пропускающий фильтр с взаимосвязанными ГР в отрезке запердеального волновода

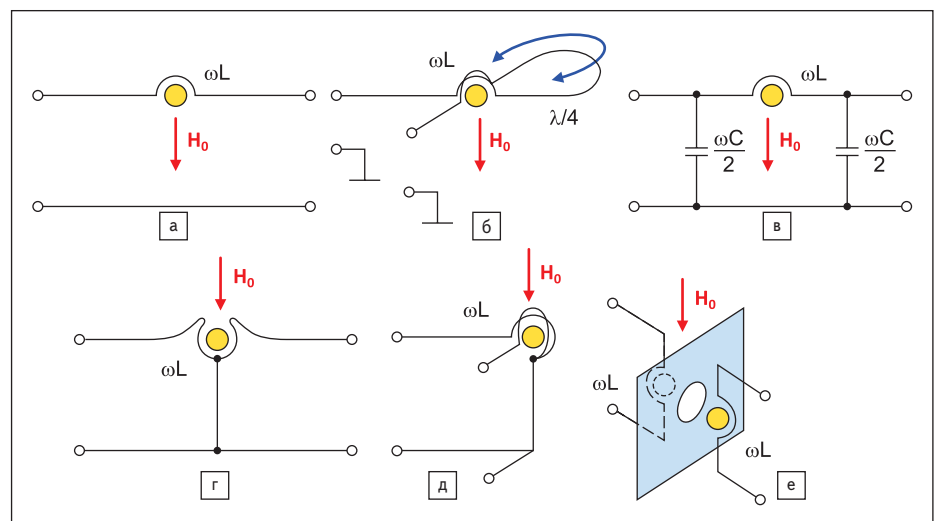


Рис. 10. Схематичные конструкции фильтров с петлевой связью сферических ГР с линиями:

- а, б) режекторные фильтры с ГР в регулярной двувязной линии;  
в) однозвенный режекторный фильтр с частотно-корректирующими емкостными включениями;  
г, д) однозвенный ППФ при связи линий через ГР;  
е) ППФ второго порядка при связи линий через взаимосвязанные ГР, каждый из которых связан петлей с собственной линией передачи

С развитием технологических возможностей появились фильтры с применением петлевой связи между сферами ЖИГ (рис. 10), обеспечивающие большие коэффициенты взаимной связи  $R_3$  и, соответственно, более широкие полосы селекции.

Приведенные на рис. 9 и 10 решения являются весьма упрощенными представлениями, лишенными специфических элементов, на которых мы не будем останавливаться. Отметим лишь принципиальную проблему создания многозвенных селективных устройств с применением ГР, заключающуюся в том, что все гиромангнитные резонаторы в системе связанных  $R_3$  должны находиться в одинаковом внешнем (постоянном) магнитном поле, что выдвигает повышенные конструктивные требования к магнитным зазорам магнитопровода. Трудности возникают с ростом порядка фильтра на ГР.

Еще одна сложная техническая задача создания ЖИГ-фильтров — проблема термостатирования в широком температурном диапазоне, характерном для специальной аппаратуры. В настоящее время эта задача решается применением схемы термостата с термоэлектрическими преобразователями Пельтье, а также внутренних автоматически регулируемых нагревательных элементов, что эффективнее приемов корректирования АЧХ за счет изменения постоянного магнитного поля.

Недостаток всех типов фильтров на ЖИГ-резонаторах — относительно большая инерционность перестройки частоты, которая для ГР (и фильтров) с широкополосной перестройкой (~3 ГГц) и особенно в высокочастотной части сантиметрового диапазона длин волн составляет около ~100 мс [3] и приемлема, как правило, в измерительной аппаратуре, где время перестройки частоты не принципиально. Указываемый в технических условиях (ТУ) на фильтры параметр «постоянная времени», определяемый индуктивностью и активным сопротивлением катушки магнитопровода, например имеющий значения 1–5 мс, не указывает реальное время перестройки и может превышать постоянную времени в 3–5 раз. Однако для фильтров с узкополосной перестройкой частоты время может быть значительно снижено, в частности до значений около 60 мкс/ГГц. Так, в [2] описан фильтр 10-см диапазона с узкополосной перестройкой частоты на 10% за 20 мкс.

#### Фильтры на пленках ЖИГ

Перестраиваемые СВЧ-фильтры, изготавливаемые с помощью эпитаксиальных пленок ЖИГ, получили коммерческое название «МСВ-фильтры» (английское название — MSW filters). Для их построения применяются как пленочные ферромагнитные резонаторы, так и пленочные волноводы, выполненные из пленок ЖИГ. В простейшем случае пленочные МСВ-резонаторы можно формировать из пленок ЖИГ химическим травлением или механической резкой (рис. 6).

На рис. 11 приведены схемы типичных фильтров на основе пленочных ферромагнитных резонаторов, которые в соответствии с традиционной классификацией разделяются на полосно-пропускающие фильтры (ППФ) и полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ). В свою очередь, ПЗФ могут быть реализованы как по схеме «на проход» (рис. 11б), так и по схеме «на отражение» (рис. 11в). Последние имеют один канал для входа и выхода, поэтому для разделения падающего и отраженного СВЧ-сигналов перед входом подобного ПЗФ обычно ставят циркулятор.

Резонатор на спиновых волнах представляет собой ограниченный в плоскости образец из ферромагнитной пленки. Его размеры и форма, а также параметры пленки и величина магнитного поля определяют спектр резонансных частот резонатора.

Как правило, МСВ-резонаторы выполнены в виде диска или прямоугольника. Их резонансный размер обуславливается за счет эффективного отражения спиновых волн от границ пленки. Поскольку характерные длины спиновых волн изменяются от единиц миллиметров до единиц микрометров, размеры резонаторов также соответствуют указанным пределам.

Спектр резонансных частот прямоугольного резонатора определяется (и рассчитывается) с помощью закона дисперсии спиновых волн для дискретных значений волновых чисел, при которых выполняются резонансные условия [5].

Резонаторы на МСВ формируют и с помощью решетки Брегговских отражателей, представляющих собой систему канавок или металлических полосок, расположенных на краях протяженного пленочного ЖИГ-волновода либо в середине волновода между антеннами СВ, как показано на рис. 12.

На рис. 12а изображен полосно-пропускающий фильтр, содержащий входной и выходной преобразователи в виде микро-

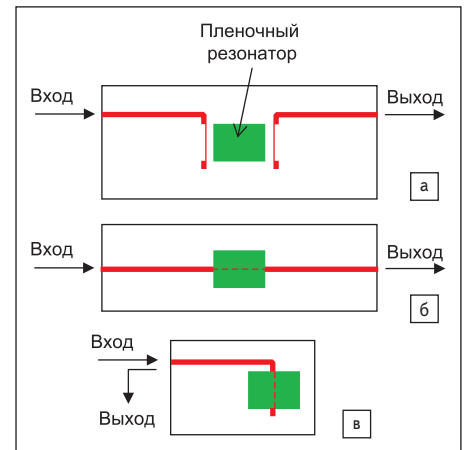


Рис. 11. Схематическое изображение СВЧ-фильтров на основе пленочных ферромагнитных резонаторов: а) ППФ по схеме «на проход»; б) ПЗФ по схеме «на проход»; в) ПЗФ по схеме «на отражение».

полосковых антенн, расположенных на поверхности прямоугольного пленочного волновода перпендикулярно направлению распространения МСВ. На краях волновода нанесена отражательная решетка в виде канавок. Магнитостатическая волна отражается от системы канавок и образует стоячую волну в резонаторе. Максимальный коэффициент отражения наблюдается для определенной длины волны МСВ и связан с периодом отражательных решеток. На рис. 12б,в показаны режекторные МСВ-фильтры. Полосы заграждения формируются на частотах Брегговских резонансов, когда длина спиновой волны кратна периоду решетки. Процесс совершенствования МСВ-резонаторов продолжается до сих пор, однако в настоящее время основное направление создания перестраиваемых СВЧ-фильтров на пленках ЖИГ определяют решения, построенные на применении особенностей возбуждения

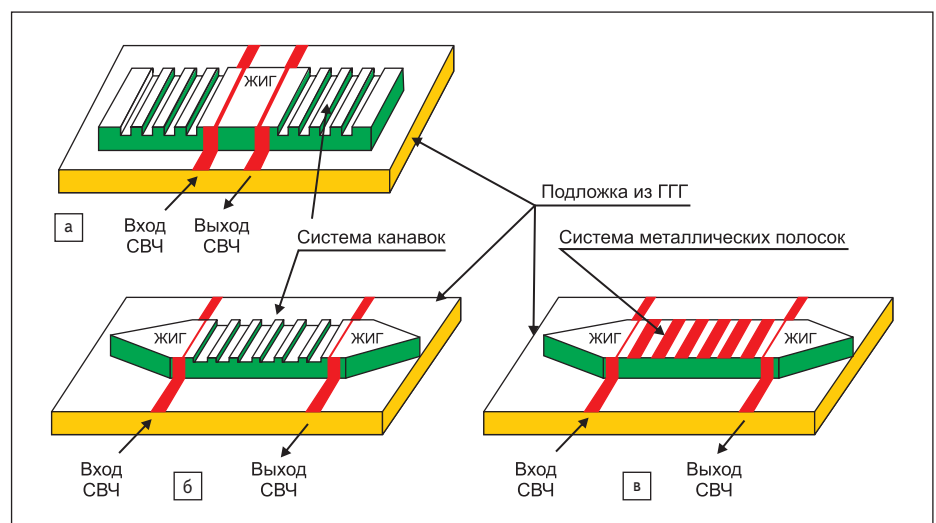


Рис. 12. а) Схематическое изображение полосно-пропускающего фильтра; б, в) полосно-заграждающих фильтров на основе Брегговских отражателей на пленке ЖИГ, выращенной на подложке ГГТ.

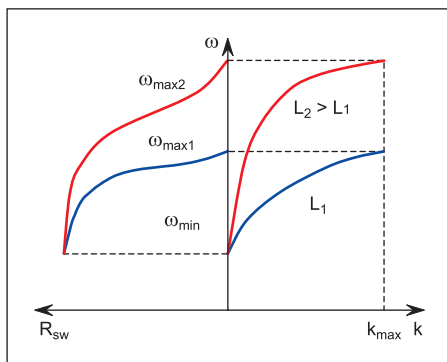


Рис. 13. Влияние толщины пленки  $L$  на формирование частотного диапазона микрополосковой антенны шириной  $w$

и приема распространяющихся спиновых волн в пленочном магнитном волноводе.

Итак, принцип действия спин-волновых СВЧ-фильтров основан на возбуждении, распространении и приеме СВ в эпитаксиальной пленке ЖИГ. Возбуждение и прием СВ обеспечивают преобразователи — отрезки микрополосковых, щелевых или копланарных линий передачи, которые могут возбуждать в пленке спектр как поверхностных, так и объемных СВ разных видов. Однако практический интерес представляет одномодовый режим возбуждения и распространения спиновых волн. Данный режим обеспечивается использованием ферромагнитных пленок со свободными поверхностными спинами [5, 7]. Дисперсия СВ зависит от взаимной ориентации поля подмагничивания и направления распространения СВ в пленке. СВЧ-фильтры чаще всего изготавливают на поверхностных спиновых волнах [10].

Характеристики фильтров (АЧХ, ФЧХ, частотные зависимости входного импеданса, коэффициента отражения, времени задержки и пр.) сложным образом зависят от таких параметров их конструкции, как толщина пленки ЖИГ, расстояние от пленки до металлических экранов, длина и ширина антенн СВ и т. д. [5, 11, 12]. Например, в СВЧ-фильтрах спиновые волны возбуждаются в диапазоне волновых чисел  $0 < k < k_{\max}$ , где  $k_{\max} = 4,8/w$ , а  $w$  — ширина микрополосковой антенны. Для иллюстрации формирования частотного диапазона микрополосковой антенны (и всего спин-волнового устройства в целом) в соответствии с толщиной пленки  $L$  на рис. 13 приведены частотные зависимости сопротивления излучения СВ  $R_{sw}(\omega)$ , совмещенные с дисперсионными кривыми  $\omega(k)$  волны низшего типа. На рисунке видно, что для создания узкополосного устройства необходимо использовать более широкие антенны и более тонкие пленки. Однако при этом падает групповая скорость спиновых волн и, следовательно, увеличиваются потери, вносимые устройством. При необходимости же расширения рабочего диапазона, то есть при применении узких антенн, повы-

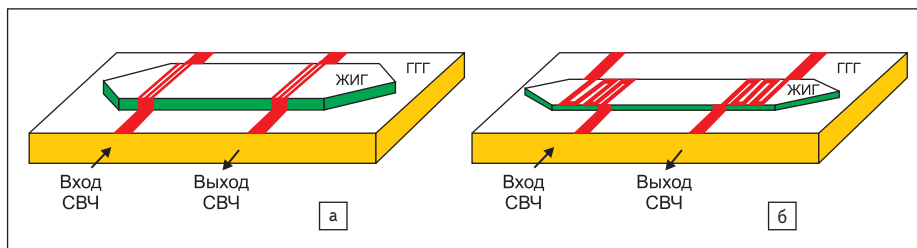


Рис. 14. Спин-волновые фильтры с многоэлементными антеннами: а) типа «решетка»; б) типа «меандр»

шается доля потерь на согласование антенны с подводным трактом, что также приводит к возрастанию общих потерь. Поэтому в каждом отдельном случае характеристики фильтров определяются компромиссом между перечисленными факторами. Помимо названных, используются и иные приемы решения задачи. В частности, для возбуждения и приема спиновых волн применяются многоэлементные антенны (рис. 14).

В общем случае результирующая частотная характеристика комплексного коэффициента передачи спин-волнового фильтра может быть представлена как произведение трех коэффициентов передачи:

$$\dot{H}(\omega) = \dot{H}_{in} \dot{H}_{FF} \dot{H}_{out}$$

где  $\dot{H}_{in}$  и  $\dot{H}_{out}$  суть коэффициенты передачи входной и выходной антенн соответственно, а  $\dot{H}_{FF}$  — коэффициент передачи пленки. Это указывает на алгоритм построения процесса синтеза фильтров с требуемыми характеристиками. На основе пленок ЖИГ (в интервале толщин  $L = 1-100$  мкм) создают как узкополосные (с полосой в несколько мегагерц), так и широкополосные (с полосой в десятки и сотни мегагерц) фильтры [8, 9]. Перестройка центральной частоты фильтров производится за счет изменения магнитного поля в ферритовой пленке подачи тока в катушки управления. Таким образом, на основе распространяющихся спиновых волн могут быть изготовлены СВЧ-фильтры, отвечающие разнообразным техническим требованиям современных радиоэлектронных систем. ■

## Литература

1. Беляков С. В. Гиромангнитный резонатор. Электроника. Энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1991.
2. Рогозин В. В., Чуркин В. И. Ферритовые фильтры и ограничители мощности. М.: Радио и связь, 1985.
3. MicroLambdaWireless. [www.avrex.ru](http://www.avrex.ru)
4. Ильченко М. Е., Мелков Г. А., Мирских Г. А. Твердотельные СВЧ-фильтры. Киев: Техника, 1977.
5. Калиникос Б. А., Устинов А. Б., Баруздин С. А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Монография. Под ред. В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2013.
6. Stancil D. D., Prabhakar A. Spin waves: Theory and applications. Springer, NY, 2009.
7. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994.
8. Вапнэ Г. М. СВЧ-устройства на магнитоэлектрических волнах / Обзоры по электронной технике. Серия 1 // Электроника. 1984. № 8.
9. СВЧ-ферриты. Малый тематический выпуск / ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 2.
10. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // Physics and Chemistry Solids. 1961. Vol. 19.
11. Дмитриев В. Ф., Калиникос Б. А. Возбуждение распространяющихся волн намагниченности микрополосковыми антеннами // Известия вузов СССР. Серия «Физика». 1988. № 11.
12. Дмитриев В. Ф., Калиникос Б. А. Самосоглашенная теория возбуждения спиновых волн микрополосковой антенной в касательно намагниченной слоистой структуре // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33.