

## **Исследование спин-волнового согласованного фильтра на пленке железо-иттриевого граната**

*В работе исследован спин-волновой согласованный фильтр на основе активного кольцевого резонатора (АКР) на пленках феррита. Показана связь дисперсионных характеристик спиновых волн в пленках феррита и амплитудно-частотных характеристик АКР. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей расстояния между резонансными пиками при различных толщинах пленки и расстояниях между микрополосковыми антеннами. Показано, что добротность отдельных резонансных пиков достигает величин более 25000.*

**Ключевые слова:** феррит, спиновые волны, активный кольцевой резонатор

Согласованный фильтр представляет собой *частотно-избирательную* систему, выполняющую обработку суммы сигнала и шума наилучшим образом, импульсная характеристика которого представляет собой масштабную копию входного сигнала, которая располагается в зеркальном порядке на оси времени. Такой фильтр с малым ослаблением пропускает гармонические колебания, частоты которых соответствуют тем участкам спектра, где спектральная плотность полезного сигнала отлична от нуля. При этом модуль частотного коэффициента передачи должен быть пропорционален модулю спектральной плотности сигнала т.е. тому вкладу в выходной сигнал, который вносится каждым малым участком на оси частот [1]. Так как согласованный фильтр является оптимальным, то есть имеет максимальное соотношение сигнал/шум, его исследование в области СВЧ частот особенно актуально. Согласованные аналоговые фильтры на ферритовых линиях задержки являются перспективным для исследования с точки зрения простоты перестройки рабочих характеристик с помощью изменения конструкции или поля подмагничивания. В работе исследован согласованный фильтр, основанный на АКР с применением спин-волновой линии задержки.

В результате исследований, проведенных в работах [2, 3], были найдены выражения, описывающие модуль и фазу коэффициента передачи активного кольцевого резонатора по мощности:

$$H_p = \frac{1}{2} \frac{\exp(-\alpha(\omega)d)}{\operatorname{ch}(\alpha(\omega)d) - \cos(k(\omega)d)}, \quad \phi = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sin(k(\omega)d)}{\cos(k(\omega)d) - \exp(-\alpha(\omega)d)} \right] \pm n\pi,$$

где  $\alpha(\omega)$  – обобщенный декремент пространственного затухания сигнала в кольце с учетом коэффициента усиления  $G$  и пространственного декремента затухания спиновых волн,  $k(\omega)$  – волновое число спиновых волн в линии задержки,  $d$  – путь распространения рабочих волн. Не внося значительной погрешности в результаты расчета, в качестве длины кольца  $d$  было выбрано расстояние между входной и выходной микрополосковыми антеннами. Фазовый набег электромагнитных волн в электронных цепях кольца учитывался при малых значениях  $k$  т.к. нельзя точно сказать, что первый резонансный пик в линии задержки является первым во всей цепи АКР.

Формулы приведенные выше, в явном виде, показывают, что существуют определенные значения  $k$ , при которых коэффициент передачи стремится к бесконечности. Такие значения соответствуют резонансным волновым числам, которые вычисляются по формуле

$$k(\omega_{рез}) = \frac{2\pi n}{d}.$$

Ясно, что в случае, когда длина кольца много больше, чем длина рабочей СВ (что типично для спин-волновых устройств), характеристика передачи кольца Рис.2. гся многорезонансной. Ширина резонансных пиков легко регулируется величиной коэффициента усиления, а их положение определяется дисперсионной характеристикой спиновых волн.

В случае компенсации вносимых потерь (декремент пространственного затухания сигнала в кольце  $\alpha(\omega)$  стремиться к нулю), волновые числа  $k(\omega_{рез})$  определяют резонансные частоты через закон дисперсии спиновой волны в линии задержки. Таким образом, дисперсию спиновых волн в линии задержки может быть легко восстановлена из измеряемой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). В соответствии с выше сказанным, и учитывая, что  $k = \frac{\varphi}{d_{лз}}$ , где  $d_{лз}$  - расстояние между антеннами,  $\varphi = 2\pi n$  - фазовый набег спиновых волн (СВ) в линии задержек и  $n$  - порядковый номер пика.

Важно отметить, что формулы, описывающие коэффициент передачи и фазовый набег, могут быть использованы для расчета резонансных кривых и фазовых характеристик кольцевых резонаторов, построенных на основе различных линий передачи волнового сигнала. В качестве примеров можно привести обычные СВЧ микрополосковые или щелевые линии, световоды, акустические волноводы и др. При этом для расчетов АЧХ и ФЧХ различных кольцевых резонаторов необходимо знать закон дисперсии  $k(\omega)$  конкретного волновода, на котором построен резонатор, а также и декремент затухания волны  $\alpha(\omega)$ .

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 монокристаллических пленок железиттриевого граната 6 толщинами 5,7, 9,64 и 13,6 мкм и намагниченностью насыщения 1750, 1660 и 1780 Э соответственно, эпитаксиально 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 мкм, нанесенные на подложку из поликора толщиной 0.5 мм. Расстояние между антеннами составляло 3, 6 и 9 мм. Антенны питались от подводющих микрополосковых линий, имевших волновое сопротивление 50 Ом. Линия задержки размещалась между полюсами постоянного магнита в однородном магнитном поле напряженностью  $H_e = 1226$  Э, которое было

направлено по касательной к плоскости пленки параллельно антеннам СВ. Такая ориентация поля обеспечивала возбуждение в пленке ЖИГ поверхностных спиновых волн. АЧХ активного кольцевого резонатора измерялись при пороговом коэффициенте усиления, выше которого начинались процессы автогенерации.

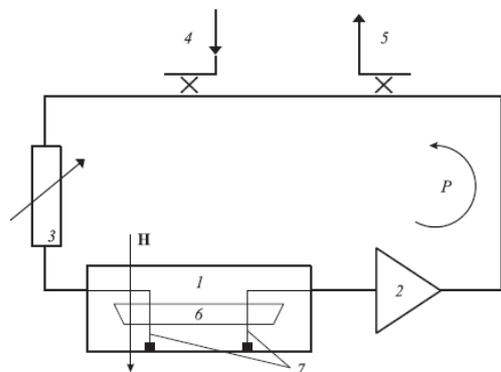


Рисунок 1.

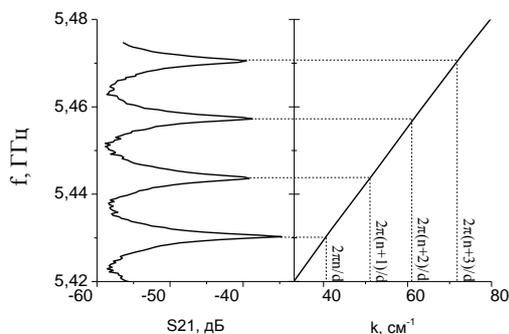


Рисунок 2.

Исследование многополосного СВЧ-фильтра было проведено в три этапа. На первом этапе измеряли АЧХ фильтра для различных значений коэффициента усиления с использованием пленок разной толщины. На втором и третьем этапах изменялось расстояние между микрополосковыми антеннами  $d$  и повторялись измерения, приведенные выше. Измерения показали, что увеличение  $G$  (уменьшение  $\alpha(\omega)$ ) ведет к сужению полос пропускания и увеличению разности значений коэффициента передачи фильтра в полосах пропускания и в полосах заграждения, а также увеличение количества полос пропускания и уменьшение ширины полосы пропускания с увеличением  $d$ .

На Рис.4 представлены результаты сопоставления измеренной АЧХ и рассчитанной дисперсионной характеристики поверхностной спиновой волны. В данном случае расстояние между микрополосковыми антеннами составляло 6 мм, а толщина пленки ЖИГ 13,6 мкм.

Как видно из приведенного рисунка, резонансные волновые числа определяются расстоянием между антеннами, а резонансные частоты находятся из закона дисперсии спиновых волн в линии задержки. Следовательно, АЧХ перестраивается при изменении закона дисперсии спиновых волн, что достигается за счет изменения внешнего магнитного поля.

Рассмотрим влияние толщины пленки феррита и расстояния между антеннами на АЧХ активного кольцевого резонатора. Известно, что спиновые волны в пленках феррита разной толщины имеют различные законы дисперсии. В результате изменяется положение резонансных частот и расстояние между соседними резонансными пиками ( $\Delta f$ ). На Рис. 3 представлены теоретические и экспериментальные зависимости значений  $\Delta f$  от частоты спиновых волн в пленках феррита различной толщиной при расстоянии между антеннами  $d=6$  мм. Вторым фактором, определяющим положение частот пропускания (резонансных частот) является расстояние между антеннами спиновых волн. На Рис. 4 представлены зависимости  $\Delta f$  от частоты для пленки феррита с толщиной 5,7 мкм при различных расстояниях между антеннами спиновых волн. Приведенные на Рис.5 и Рис.6 зависимости позволяют значительно расширить конструкционные возможности создания согласованных фильтров.

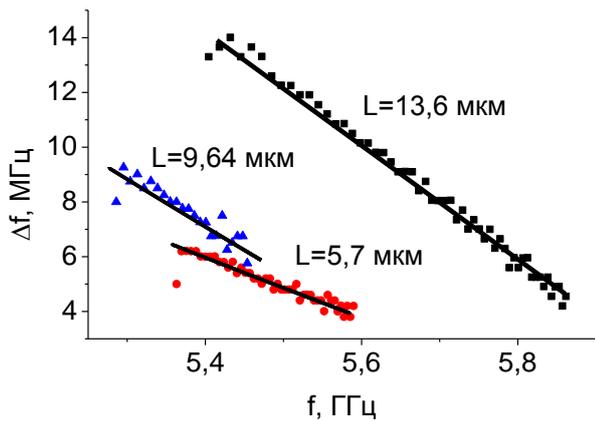


Рисунок 3.

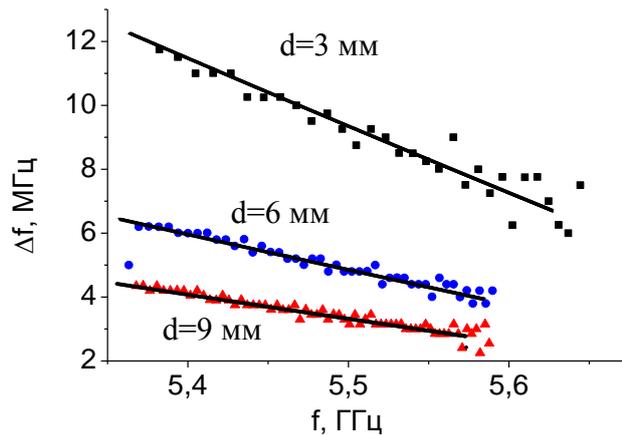


Рисунок 4.

Рассмотрим на примере рис.3.8, 3.9, 3.10, 3.11 возможности перестройки резонансных частот в ферритовой линии задержки, исходя из заданного закона дисперсии.

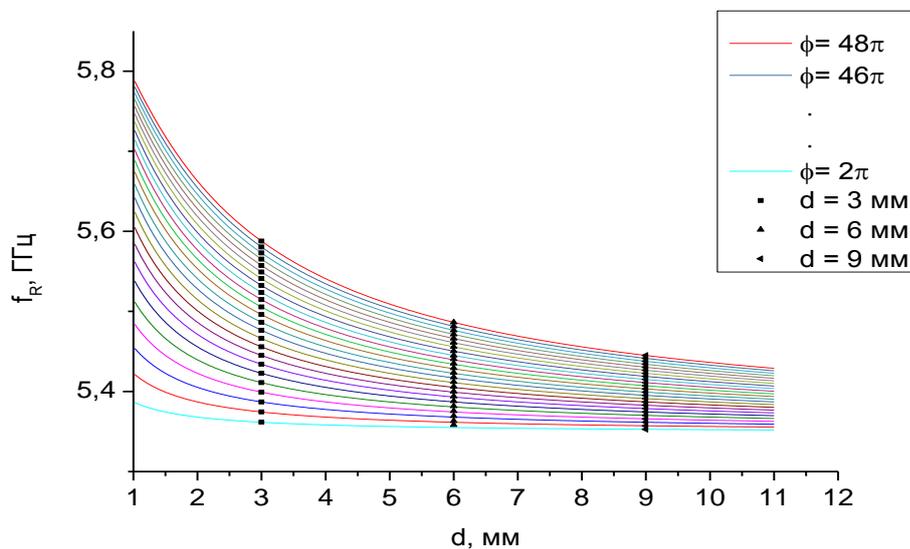


Рисунок 5.

На рис.5 сплошными линиями изображены теоретические зависимости, а точками отмечены экспериментальные резонансные частоты. Видно, что с увеличением расстояния уменьшается ширина полосы пропускания - расстояние между соседними уровнями резонансных кривых, которые на 3дБ ниже резонансного пика. Такая особенность АКР позволяет осуществлять перестройку фильтра. По данным графикам удобно выбирать необходимое расстояние между антеннами для желаемой резонансной характеристики, т.к. можно наблюдать ее поведение в целом.

Отметим, что добротность отдельного резонансного пика АКР зависит от коэффициента усиления усилителя. На Рис. 6 изображены зависимости добротности третьего резонансного пика от расстояния между антеннами для пленок различной толщины. Максимальная добротность достигала значений 25000, 23000 и 18500 для пленок толщиной 13.6, 9.64 и 5,7 мкм, соответственно, и была ограничена сверху переходом АКР в режим

автогенерации. Как видно из рисунка добротность увеличивается с увеличением расстояния между антеннами.

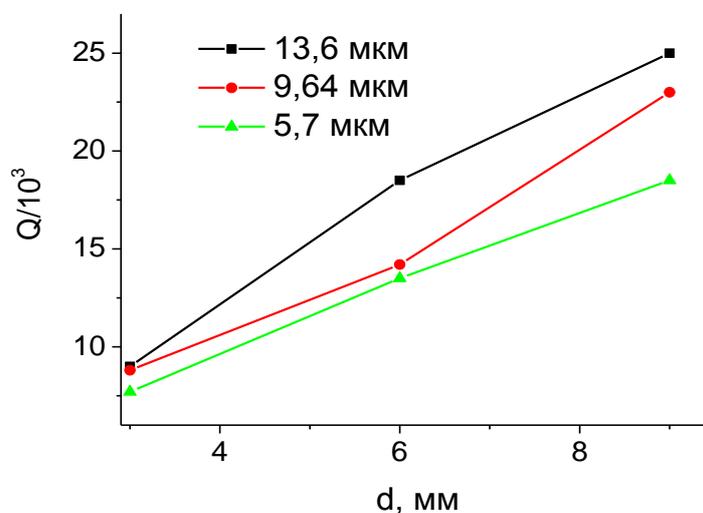


Рисунок 6.

В данной работе приведены теоретические формулы, описывающие модуль и фазу коэффициента передачи активного кольцевого резонатора. Проведено экспериментальное исследование АКР на пленках феррита толщинами 13,6, 9,64 и 5,2 мкм и рассчитаны теоретические зависимости. Показано, что добротность отдельных резонансных пиков достигала значений 25000.

*Работа поддержана грантом российского научного фонда № 14-12-01296.*

#### Библиографический список

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков // Высшая школа. 2000. 3-е изд. С. 430-432.
2. Порохнюк А. А. Исследование оптимальной фильтрации СВЧ-сигнала многополосным спин-волновым кольцевым резонатором / А. А. Порохнюк, А. Б. Устинов, Н. Г. Ковшиков, Б. А. Калиникос // Письма в ЖТФ. 2009. Т.35. В. 18. С. 17-27.
3. Никитин А.А. Теоретическое исследование резонансных свойств активного кольца на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик / А.А. Никитин, А.Б. Устинов, А.А. Семенов, Б.А. Калиникос // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 7. С. 98101