В.А. Дубовой, А.Э. Козин, В.И. Чуркин, Д.Н. Федин
ОАО "Завод "Магнетон"

Групповое время запаздывания в перестраиваемых фильтрах на монокристаллических ферритах

Представлены результаты измерений группового времени запаздывания в полосе пропускания перестраиваемых ферритовых фильтров на МСВ и резонаторах ЖИГ. Проведен анализ полученных данных.

Ключевые слова: перестраиваемые фильтры на ферритовых резонаторах, фильтры на магнитостатических волнах, групповое время запаздывания

Групповое время запаздывания (ГВЗ) - важнейший параметр, который следует учитывать при разработке систем обработки широкополосных сигналов. Значительное изменение времени запаздывания в полосе сигнала приводит к его искажению, что может выражаться в изменении формы импульса, спектра, возникновении фазовых ошибок и т.д.

ГВЗ характеризует фазо-частотную характеристику (ФЧХ), в частности такие важнейшие параметры как линейность фазы и набег фазы в полосе пропускания.

В данной работе приводятся результаты измерения ГВЗ ряда фильтров на поверхностных магнитостатических волнах (ПМСВ) и многозвенных фильтров на ферритовых резонаторах (ФР). По результатам измерений рассмотрены особенности ГВЗ фильтров в зависимости от типа фильтров, толщины эпитаксиальной пленки, количества ФР.

Измерения производились на векторном анализаторе цепей R&S ZVB 20. Параметр ГВЗ (Delay) определялся прибором [1] как отрицательная производная ФЧХ по формуле:

$$Delay = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}, \qquad (1)$$

где $\varphi(\omega)$ – фаза передаточного коэффициента S_{21}, град; $\omega=2\pi f$ – циклическая частота, рад/сек.

На практике [2] полоса пропускания (ПП) фильтра, оценивается по уровню 3 дБ от величины минимальных потерь на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ). После проведенного анализа данных, выявлено, что для оценки равномерности ГВЗ фильтра имеет смысл брать ПП по уровню 2 дБ, так как в этом случае удается выделить участок кривой ГВЗ с хорошей равномерностью (±5нс). При этом изменение уровня измерения с 3 дБ на 2 дБ не значительно уменьшает полосу (единицы мегагерц), так как АЧХ фильтров имеют высокую крутизну склонов.

Фильтры на ПМСВ

Фильтры на ПМСВ имеют характерную особенность увеличения ГВЗ в высокочастотной части ПП что связано с нелинейным характером дисперсионной кривой ПМСВ, распространяющихся в ферритовой пленке. В соответствии с теорией распространения ПМСВ [3] при малых волновых числах групповая скорость распространения выше, а ГВЗ меньше, чем при больших волновых числах. Соответствующий характер ГВЗ наблюдается в ПП фильтра (см. рис 1).

Здесь и далее на двойных диаграммах. Кривая АЧХ отображается сплошной линией (масштаб по оси ординат: 1 деление соответствует 1 дБ потерь), кривая ГВЗ – пунктирной;

вертикальная шкала дана в значениях ГВЗ; текстово-цифровой блок отображает параметры ПП фильтров относительно АЧХ.

Скорость распространения и линейность дисперсионной кривой ПМСВ зависят от толщины пленки. Чем пленка толще, тем выше скорость распространения МСВ и линейность кривой. На практике это выражается в том, что уменьшается среднее значение ГВЗ в ПП и разброс ГВЗ на краях полосы. На рис.1 и 2 приведены АЧХ и ГВЗ для фильтров с толщиной пленки 5,9 мкм и 11 мкм соответственно.

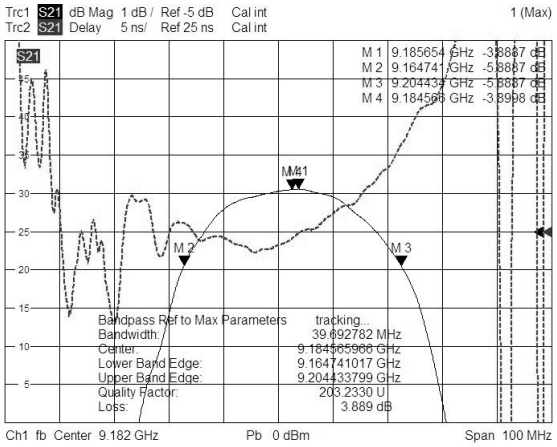


Рис.1

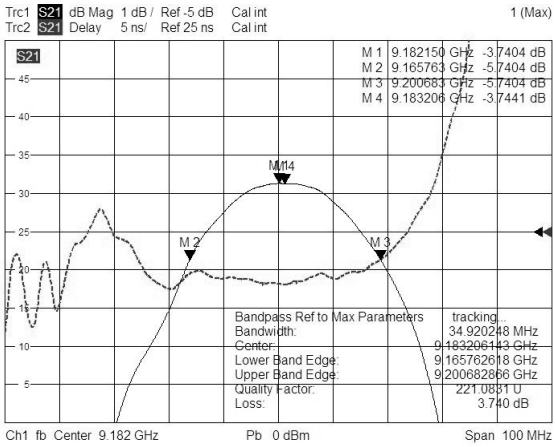


Рис.2

Анализ характеристик показал, что среднее значение ГВЗ мало зависит от частотного диапазона, в котором настроен фильтр на МСВ, и находиться в диапазоне от 5 до 35 нс (зависит от толщины пленки и настроенной ПП фильтра).

Следует отметить влияние на ГВЗ длины пленочного волновода. Из теории и экспериментальных результатов следует возрастание среднего значения и нелинейности ГВЗ в ПП при увеличении расстояния между преобразователями и длины волновода.

Анализ экспериментальных результатов показал, что они находятся в качественном соответствии с имеющейся теорией распространения МСВ.

Влияние неравномерности потерь на ГВЗ

В ходе анализа экспериментальных данных выявлена взаимосвязь неравномерности АЧХ в ПП фильтров и неравномерности ГВЗ (рис.3). В работе [4] показано, что характерные пульсации АЧХ обусловлены в основном интерференцией волн, возбуждаемых преобразователями и отраженных от торцов элемента, образующего пленочный волновод.

В результате в ПП наблюдаются узкие области с сильной дисперсией, что обуславливает значительные изменения линейности ФЧХ и как следствие резкие искажения ГВЗ. Основной способ борьбы с этим явлением – создание краевых поглотителей МСВ. Поглотители формируются на участках ферромагнитной пленки, расположенных вне области возбуждения и распространения МСВ между преобразователями. Поглотители представляют собой оконечные участки волновода, подвергнутые специальной обработке (загрублению поверхности, ионной имплантации, нанесению поглощающих резистивных пленок) и позволяют снижать пульсации до 1 дБ. Эффективными краевыми поглотителями являются зауженные концы пленочного волновода [4] (снижение пульсации до 0,5 дБ).

Комбинирование двух способов, заужение концов пленочного волновода и их механическое загрубление, позволяет получить пульсацию АЧХ менее 0,3 дБ и иметь хорошую равномерность ГВЗ в полосе пропускания (см. рис 4).

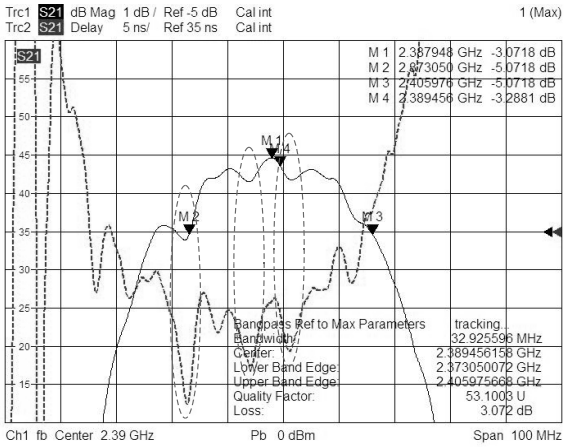


Рис.3

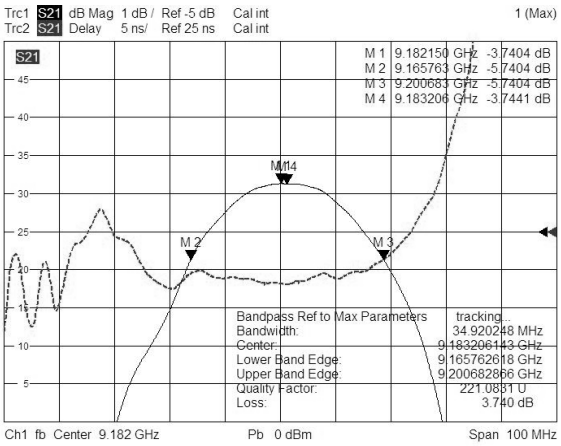


Рис.4

Фильтры на ферритовых резонаторах.

Фильтры на ФР в простейшем случае можно сравнить с многоконтурными параллельными L-C фильтрами. В соответствии со сказанным, в зависимости от настройки их характеристика близка:

- к фильтрам с недостаточной связью между контурами,

- с плоской вершиной, близкой к максимально плоской (в фильтрах на ЖИГ резонаторах идеальная максимально- плоская характеристика не реализуется при числе звеньев более 3),

- характеристике с неравномерностью потерь за счет увеличенной связи между резонаторами (близкой к Чебышевской).

Принято считать, что набег фазы в ПП фильтра зависит от количества ФР. Соответственно, при увеличении числа звеньев фильтров растет ГВЗ. Экспериментально такая тенденция подтверждается.

Типичные АЧХ фильтров с характеристиками близкими к максимально плоской и количеством звеньев 2, 3, 4 ,6 приведены на рис.5,6.

Двухзвенный фильтр ФФЛК2-17

Трехзвенный фильтр ФПИН3-4Л

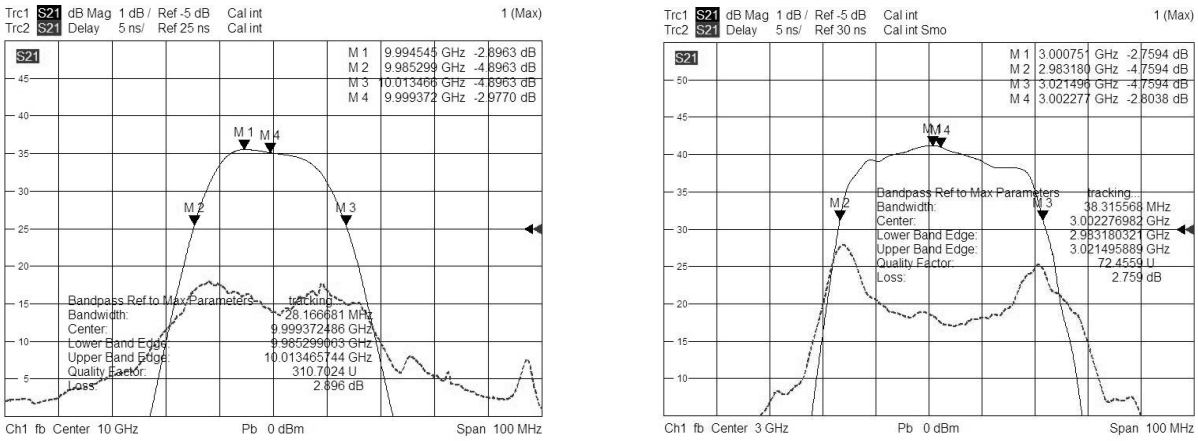
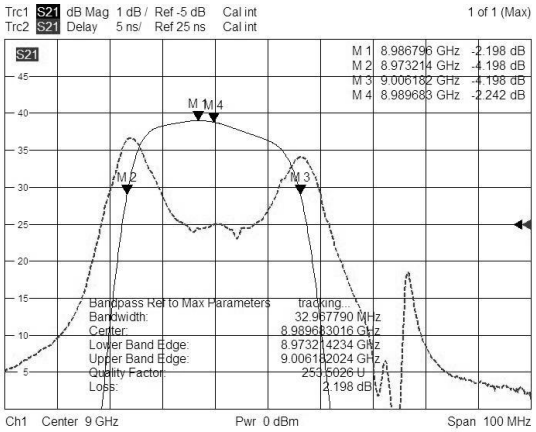


Рис.5

Четырехзвенный фильтр ФКИН2-61



Шестизвенный фильтр

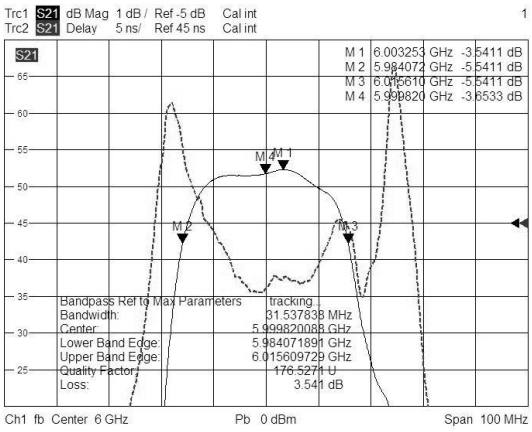


Рис.6

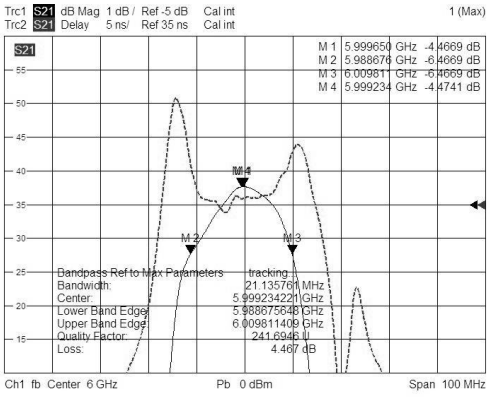
Из АЧХ на рис.4,5 следуют следующие результаты:

- значение ГВЗ в полосе пропускания растет с увеличением количества звеньев;

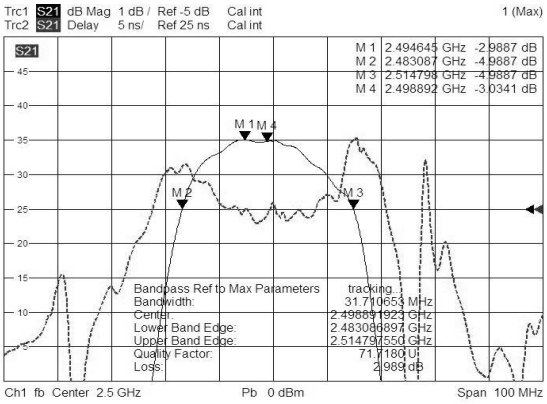
- неравномерность ГВЗ (разность между максимальным и минимальным значением) в полосе пропускания растет с увеличением количества звеньев.

На рис. (рис.7 а-г) показано сравнение ГВЗ фильтров с различным типом АЧХ (узкополосной, с плоской вершиной, типа Чебышевской) на примере 4-х звенного фильтра.

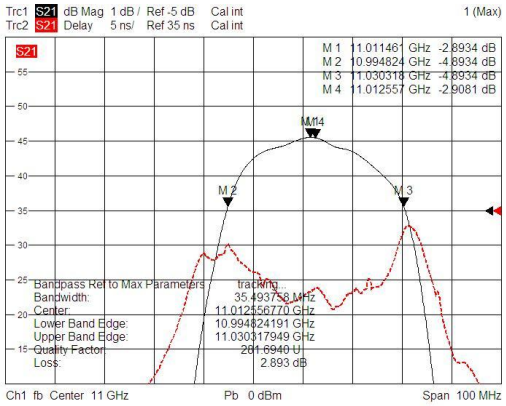
а) Узкая полоса пропускания



б) АЧХ с плоской вершиной на частоте 2.5 ГГц



в) АЧХ с плоской вершиной на частоте 11 ГГц



г) АЧХ типа Чебышевской

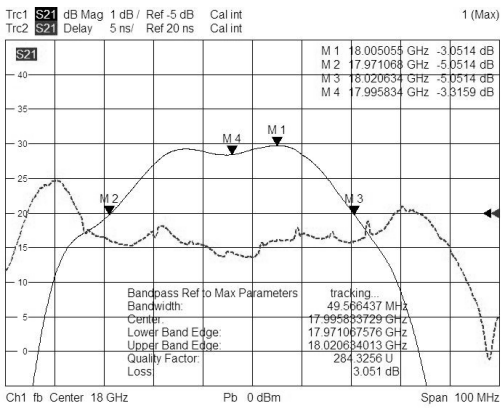


Рис.7

Из характеристик (рис.7) следует, что значение ГВЗ в средине полосы пропускания зависит от коэффициента связи между звеньями, чем больше связь, тем меньше ГВЗ в середине полосы пропускания.

Сравнение характеристик на рис.5, 6 и рис.7 в и многочисленные экспериментальные результаты показывают, что ГВЗ фильтров мало зависит от центральной частоты фильтра.

Существенным фактором, влияющим на характеристику ГВЗ, является наличие магнитостатических колебаний высшего порядка в ФР. В результате возбуждения «паразитных» колебаний появляется узкий провал в виде неравномерности потерь и резкий провал ГВЗ.

Способы борьбы с «паразитными» типами магнитостатических колебаний известны: увеличение ширины линии ФМР резонаторов, увеличение однородности постоянного намагничивающего поля и переменного высокочастотного поля возбуждающего однородную прецессию намагниченности в ФР.

Многозвенные фильтры на ФР имеют многообразие характеристик, которые зависят от настройки фильтров. Изложенные результаты основаны на анализе фильтров, разработанных в ОАО «Завод Магнетон».

Анализ данных показал, что фильтры на ФР и ПМСВ имеют соизмеримые параметры ГВЗ в ПП.

Авторы выражают благодарность Алексеевой Людмиле и Шараповой Валерии за помощь в оформлении результатов работы.

Библиографический список

1. Векторный анализатор цепей R&S ZVB 20. Руководство по эксплуатации.
2. www.magneton.ru, Ферритовые СВЧ приборы: Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры
3. Калиникос Б.А, Устинов А.Б. Сверхвысокочастотные спиновые волны в ферромагнитных пленках, СПб, Издательство «Литера», 2008
4. Дубовицкий С.А, Дергачева С.И, Новиков Г.М, Петрунькин Е.З. Краевые поглотители бегущей магнитостатической волны в виде зауженных по ширине концов ферромагнитной пленки. // Электронная техника. сер. электроника СВЧ, вып. 11(383), 1985. Краткие сообщения, С.71-73.