

Перестраиваемые полосно-заграждающие фильтры на спиновых волнах с центральными частотами 9,8 ГГц и 11,5 ГГц

М.И. Мартынов, В.А. Дубовой

ОАО «Завод Магнетон»

Аннотация: в данной работе представлены результаты разработки двух перестраиваемых полосно-заграждающих фильтров на спиновых волнах с центральными частотами 9,8 и 11,5 ГГц без подачи тока управления. Рассмотрены параметры перестройки центральной частоты. Проведена термостабилизация фильтров и исследованы параметры фильтров в зависимости от температуры в диапазоне от минус 60°C до +70°C.

Ключевые слова: полосно-заграждающий фильтр, режекторный фильтр, спиновые волны, магнитостатические волны

1. Введение

Фильтры на спиновых волнах исследуются и разрабатываются уже 40 лет [1] и являются уникальными, перестраиваемыми СВЧ приборами, позволяющими обеспечивать высокую прямоугольность АЧХ. Такие фильтры используют явление спиновых волн в ферритах, спектр которых обеспечивает частотную селекцию. При создании таких фильтров, как правило используют низший тип колебаний спиновых волн и поэтому, зачастую, их называют фильтрами на магнитостатических волнах. Наибольшее распространение получил полосно-пропускающий тип фильтров [2,3], при этом перестраиваемые полосно-заграждающие фильтры представлены, преимущественно, на основе ферромагнитного резонанса в сферах железо-иттриевого граната (ЖИГ) [4]. Фильтры на сферах обладают существенным достоинством в виде широкого диапазона перестройки центральной частоты (две октавы и более), однако, имеют недостатки в виде больших габаритов и массы, низкой прямоугольности и сложной термостабилизации. Фильтры на спиновых волнах позволяют реализовать АЧХ полосно-заграждающих фильтров эквивалентные 8-16-ти звенным фильтрам на сферах ЖИГ, при использовании одного волновода из пленки ЖИГ.

2. АЧХ макетов фильтров

В рамках данной работы была поставлена задача разработки заграждающих фильтров в диапазоне частотой выше 9 ГГц в стандартном форм-факторе полосно-пропускающих фильтров, выпускаемых ОАО «Завод Магнетон». Требование к величине заграждения в полосе составляло 40 дБ. Остальные параметры нормировались по данной величине. Фильтры были разработаны в коаксиальном исполнении с максимальными фактическими размерами 51x40x34 мм (ШxВxГ) (Рисунок 1).

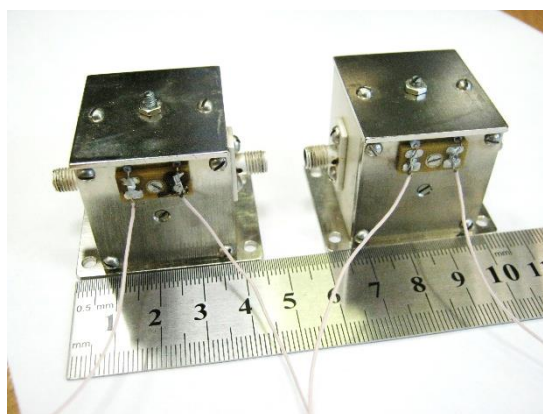


Рисунок 1. Полосно-заграждающие фильтры с центральными частотами 9,8 ГГц (слева) и 11,5 ГГц (справа)

В качестве основного типа колебания была выбрана поверхностная спиновая волна в пленке ЖИГ. Возбуждение такого типа волн было реализовано за счет перпендикулярной ориентации вектора магнитной индукции к направлению волнового вектора в плоскости пленки ЖИГ. Полоса заграждения формировалась в области малых волновых чисел спектра спиновой волны, за счет чего возбуждение в пределах спектра происходило наиболее эффективно. В фильтрах использовались нелегированные пленки ЖИГ с толщинами в 7 и 4 мкм для обеспечения разных по ширине полос заграждения. Магнитная система выполнена в виде комбинации постоянного магнита, который обеспечивал работу, на заданной частоте, без тока в катушках управления, и электромагнита для реализации электрической перестройки.

На рисунке 2 представлены амплитудно-частотные характеристики двух фильтров, с указанием ширины полос заграждения по уровням минус 3 и минус 40 дБ. АЧХ были сняты на векторном анализаторе цепей Rohde&Schwarz ZVB-20. Как видно из рисунка коэффициент прямоугольности фильтров составил 3,06 и 3,51 соответственно. Однако стоит учитывать, что данный коэффициент прямоугольности рассчитан от уровня абсолютного нуля потерь, а не от уровня минимальных потерь.

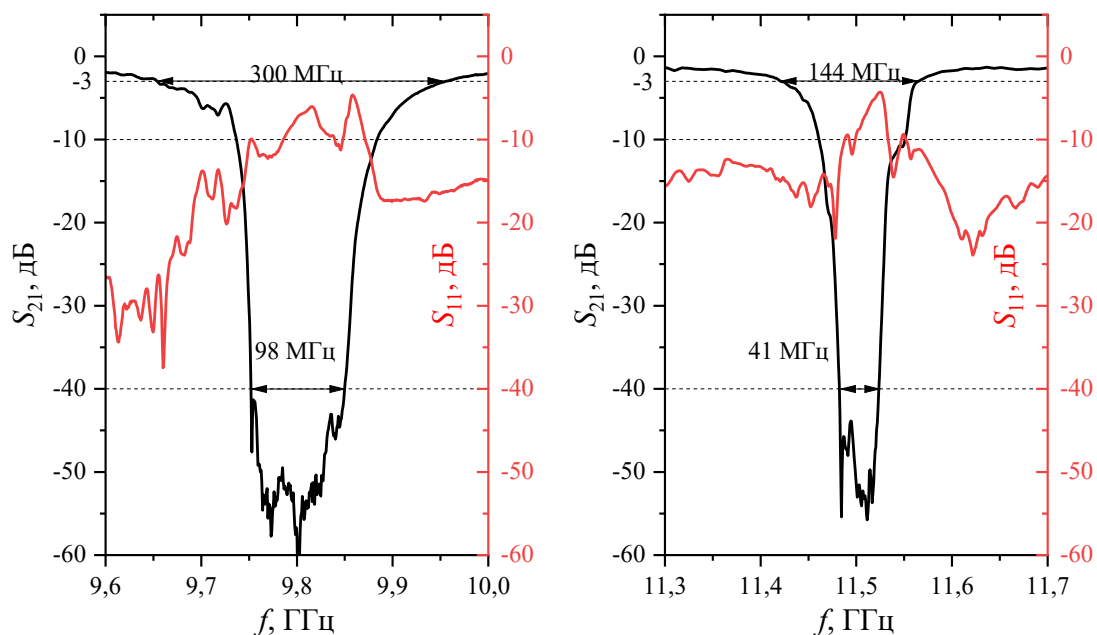


Рисунок 2. АЧХ полосно-заграждающих фильтров с центральными частотами 9,8 ГГц (слева) и 11,5 ГГц (справа)

По уровням минус 10 и минус 40 дБ коэффициент прямоугольности равен 1,49 и 2,2 соответственно.

Также, по S_{11} , видно, что загораживание в полосе носит смешанный характер и обеспечивается как внутренним отражением, так и диссипацией спиновой волны.

Конструкции загораживающих фильтров на спиновых волнах таковы, что имеют ограничения по ширине диапазона частот. Как правило, диапазон ограничен степенью согласования преобразователей спиновых волн с линией, на которую они нагружены, и внутренними отражениями спиновой волны. На рисунке 3 представлены АЧХ фильтров в диапазоне 1–18 ГГц, по которым видно, что потери вне полосы загораживания не превышают 3 дБ (отмечено штриховой линией). В данном случае, потери вне полосы обусловлены рассогласованием преобразователей спиновых волн.

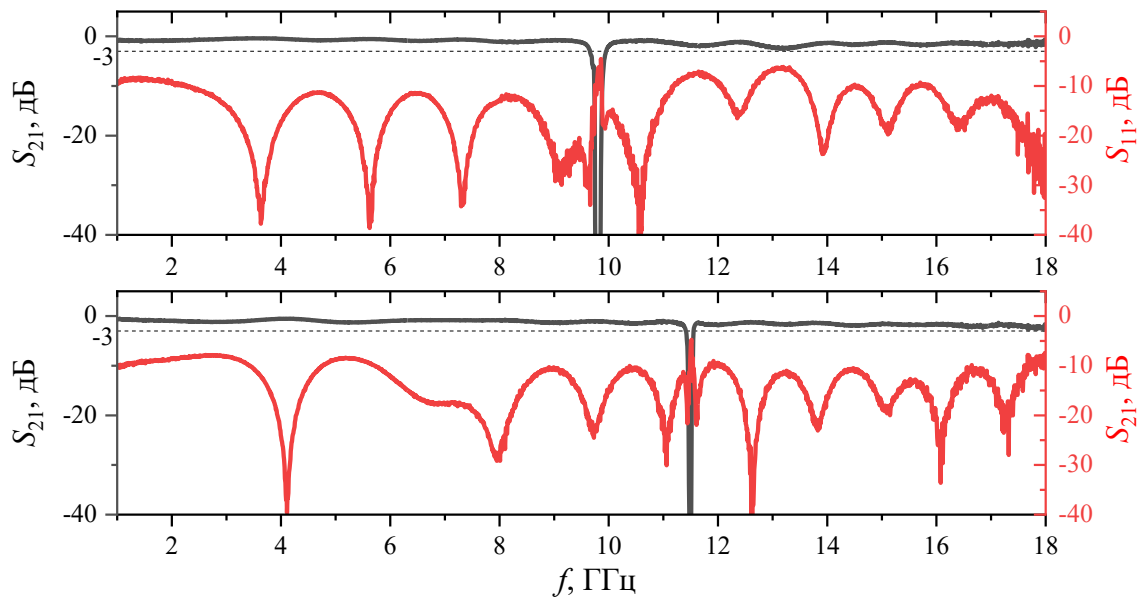


Рисунок 3. АЧХ полосно-загораживающих фильтров в диапазоне 1-18 ГГц.

3. Электрическая перестройка центральной частоты

Изменение частоты фильтра обуславливается сдвигом спектра спиновых волн под действием изменения напряженности магнитного поля, в котором находится ферритовый волновод. При этом критически важным является величина напряженности магнитного поля в сечении волновода. В данном случае, перестройка осуществлялась подачей тока от лабораторного источника в катушки магнитной системы фильтра. Результаты измерений АЧХ при различном токе управления для двух фильтров представлены на рисунке 4. По уровню минус 40 дБ нанесена реперная линия, по которой видно, что оба фильтра обеспечивают заданное подавление при перестройке в 1 ГГц.

В работе использовалось однополярное управление катушками электромагнита для перестройки частоты. Несмотря на видимые преимущества двуполярного управления, при таком подходе возникает ряд проблем в виде гистерезиса магнитной системы и сильной неоднородности поля при обратном напряжении.

Смещение частоты вправо определяется величиной тока и намагниченностью насыщения магнитной системы. На рисунке 4(а) видно, что увеличение тока с 0 до 0,2 А дает больший вклад, чем последующие скачки тока. Данный результат обусловлен тем, что магнитопровод фильтра находился в ненасыщенном состоянии, а после тока в 0,2 А перешел в насыщение. Более слабый эффект насыщения магнитопровода видно и на рисунке 4(б).

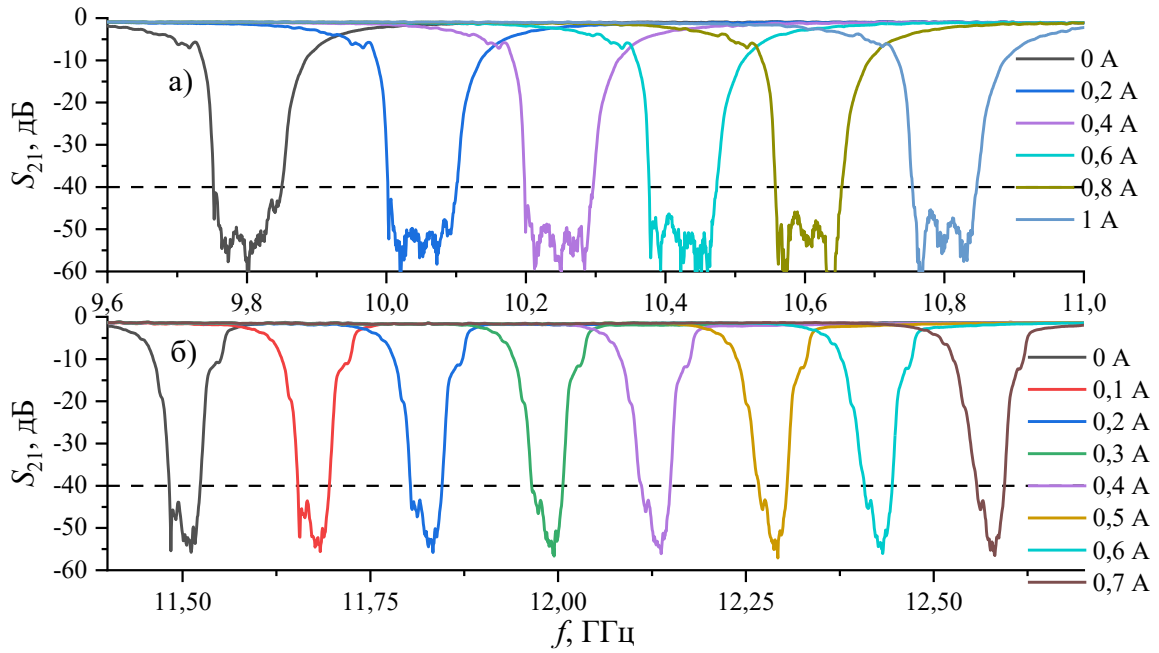


Рисунок 4. Электрическая перестройка центральной частоты фильтров в зависимости от тока управления.

4. Термостабилизация

Последним этапом работы стала термостабилизация фильтров в диапазоне температур от минус 60 °С до +70 °С. Компенсация дрейфа частоты выполнялась шунтированием магнитного поля фильтра. На рисунке 5 представлены результаты измерений центральной частоты при изменении температуры.

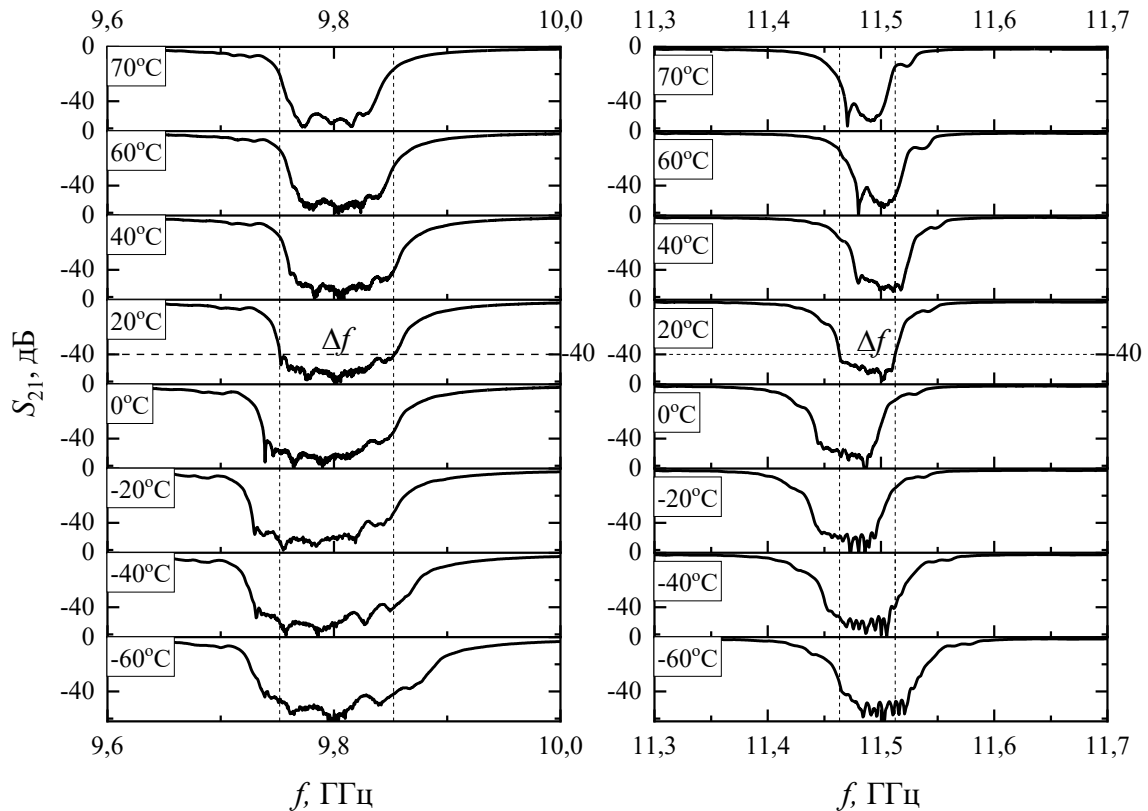


Рисунок 5. Термостабильность полосы заграждения фильтров на спиновых волнах.

При воздействии температур фильтры находились в камере ESPEC SH-262 и были подключены к анализатору цепей, то есть контроль параметров проводился без изъятия фильтров из климатической камеры

Видно, что шунтирование магнитного поля обеспечивает высокую стабильность центральной частоты, однако не избавляет от температурных изменений намагниченности пленки ЖИГ, что приводит к изменению ширины возбуждаемого спектра спиновых волн, и, следовательно, к изменению ширины полосы заграждения. Искажение профиля полосы, в свою очередь, связано с возмущениями поля, которые вносит магнитный шунт.

5. Заключение

Фильтры, полученные в рамках данной работы, имеют характеристики, сравнимые с немногочисленными коммерческими образцами заграждающих фильтров на спиновых волнах, представленными на мировом рынке. В сравнении с заграждающими фильтрами на сферах, данные образцы отличаются технологической простотой.

Диапазон перестройки в 1 ГГц ограничен, в данном случае, габаритами фильтра, а также однополярным типом управления.

Проблемы термостабильности, решенные при разработке, показывают, что магнитное шунтирование обеспечивает высокую стабильность центральной частоты заграждения. Обнаруженное изменение коэффициента формы полосы заграждения будет исследовано и скорректировано в дальнейших работах.

Список литературы

1. Adam J., Daniel M. The status of magnetostatic devices //IEEE Transactions on Magnetics. – 1981. – Т. 17. – №. 6. – С. 2951-2956.
2. Устинов А. Б., Калинико Б. А. Полосно-пропускающий фильтр на спиновых волнах с перестройкой в диапазоне 4-12 ГГц //Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2016. – Т. 2. – С. 164-164.
3. Попина С. М. и др. Разработка перестраиваемых полосно-пропускающих фильтров на магнитостатических спиновых волнах в К-диапазоне частот //СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2019). – 2019. – С. 87-88.
4. Кувшинов В., Кочемасов В., Горбачев В. Устройства на основе ЖИГ-резонаторов-продукция компании Micro Lambda Wireless. Часть 1 //Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2014. – №. 6. – С. 157-160.