

УДК

Спин-волновой режекторный фильтр K_u -диапазона с цифровым управлением

М.И. Мартынов

ОАО «Завод Магнетон»

Аннотация: В работе рассматриваются результаты разработки режекторного фильтра K_u диапазона частоты с цифровым управлением. Центральная частота полосы заграждения фильтра составила 14 ГГц с диапазоном перестройки в 1 ГГц. Полоса заграждения по уровню минус 40 дБ от уровня внеполосных потерь составила 40~42 МГц в нормальных условиях. Управление фильтром выполнено в виде отдельного модуля драйвера с 10-и разрядным ЦАП. Представлены результаты измерений S-параметров в при различных температурах.

Ключевые слова: режекторный фильтр, полосно-заграждающий фильтр, спиновые волны, ЖИГ, МСВ.

1. Введение

Электромагнитная совместимость и помехозащищённость остаются проблемами в современных системах связи и обнаружения. Задачи устранения узкополосных помех могут решаться за счет сужения полосы пропускания каналов приемника или применением режекторных фильтров. Способность спиновых волн осуществлять режекцию СВЧ сигнала за счет пространственно-периодической модуляции дисперсии известна [1,2]. Однако, сложно назвать такое решение приемлемым с практической стороны. При этом можно выделить работы [3,4], где показана возможность практической реализации механизма поглощения при использовании копланарных преобразователей. В данной работе рассматривается режекторный фильтр, в котором используются микрополосковые преобразователи спиновых волн.

2. Характеристики фильтра

Образец фильтра, представленный в данной работе является логическим продолжением работы, проведенной ранее [5]. Основной задачей при разработке являлось повышение центральной частоты фильтра в середину K_u -диапазона частот. Для достижения данных частот магнитная система фильтра была изменена:, магнитный зазор уменьшен до 2 мм, а толщина постоянных магнитов увеличена. В новой конфигурации магнитной системы, была получена напряженность магнитного поля ~5000 Э, что позволило поднять центральную частоту до 14,5 ГГц. Как и в более ранней работе, использовались SmCo магниты для обеспечения постоянного магнитного поля. Микрополосковые преобразователи были выполнены на подложке из поликора толщиной 0,5 мм и были оптимизированы под расширенный диапазон частот. Спиновые волны возбуждались в нелегированной пленке ЖИГ толщиной 4 мкм. АЧХ без подачи тока в катушки управления и перестройка с максимальным током в 0,41 А приведены на рисунке 1. Полоса заграждения по уровню минус 40 дБ от уровня внеполосных потерь составила 42 МГц.

Коэффициент прямоугольности фильтра, рассчитанный как

$$K_p = \frac{\Delta f_{-3\text{дБ}}}{\Delta f_{-30\text{дБ}}}, \quad (1)$$

где $\Delta f_{-3\text{дБ}}$ – ширина полосы заграждения по уровню минус 3 дБ от уровня внеполосных потерь, а $\Delta f_{-30\text{дБ}}$ – ширина полосы заграждения по уровню минус 30 дБ от уровня внеполосных потерь, составил 2,51.

С учетом значительного повышения напряженности магнитного поля в магнитной системе, были измерены зависимости ширин полос режекции в зависимости от перестройки центральной частоты. Полосы режекции измерены по уровням минус 3, 30 и 40 дБ от уровня внеполосных потерь в диапазоне ± 2 ГГц от частоты без подачи тока управления. Фильтр управлялся двуполярным источником тока для перестройки влево и вправо по частоте. Полученные зависимости приведены на рисунке 2.

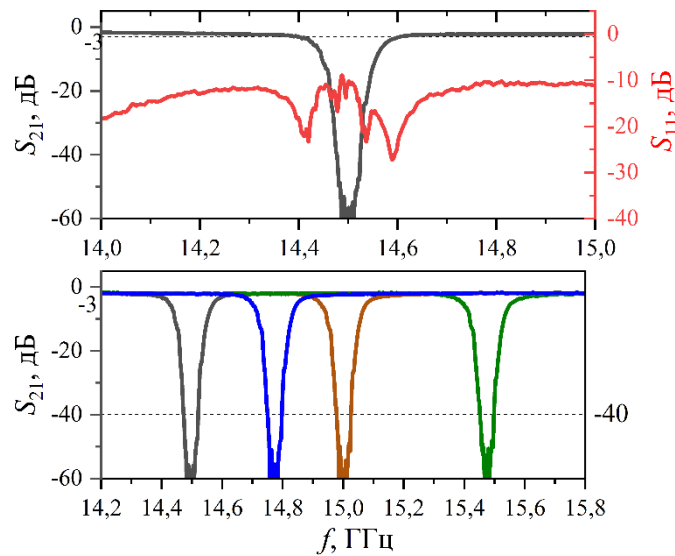


Рисунок 1. S -параметры режекторного фильтра до термостабилизации

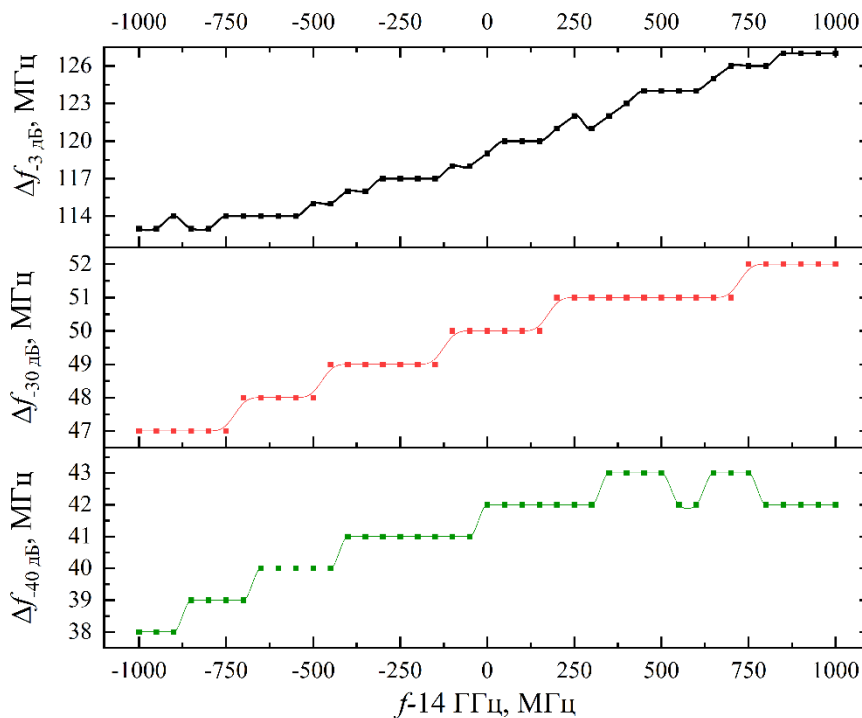


Рисунок 2. Ширины полосы режекции по уровням -3, -30 и -40 дБ от уровня внеполосных потерь в нормальных условиях при перестройке центральной частоты на ± 1 ГГц.

Снижение/увеличение напряженности магнитного поля и центральной частоты фильтра приводит к сужению/расширению полосы режекции, причем, в абсолютных величинах, наибольшему изменению подвергается полоса по уровню минус 3 дБ. Максимальное относительное изменение полосы режекции по всем уровням не превысило 10% при перестройке в рассматриваемом диапазоне частот.

Внеполосные потери режекторных фильтров на спиновых волнах зависят от двух параметров: погонных потерь в микрополосковых преобразователях и индуктивной составляющей волнового сопротивления линии нагруженной пленкой ЖИГ. На рисунке 3 приведены графики КСВН фильтра и внеполосных потерь в диапазоне 1-18 ГГц. По характеру данных кривых можно увидеть, что пленка ЖИГ увеличивает отражения по входу и потери слева от центральной частоты фильтра. Справа от центральной частоты КСВН не превышает 1,75, а потери до 17,5 ГГц не превосходят 2 дБ.

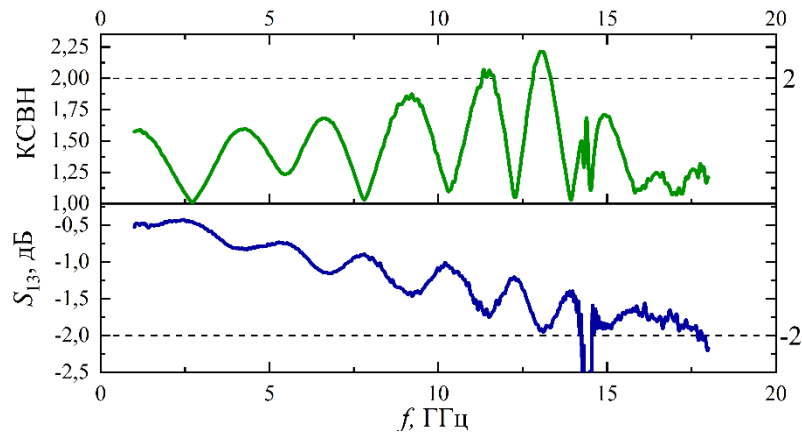


Рисунок 3. КСВН и внеполосные потери режекторного фильтра

К фильтру был подключен 10-и битный драйвер со встроенным ЦАП, для управления центральной частотой посредством цифрового кода через последовательный интерфейс. Фото фильтра с драйвером управления приведено на рисунке 4.

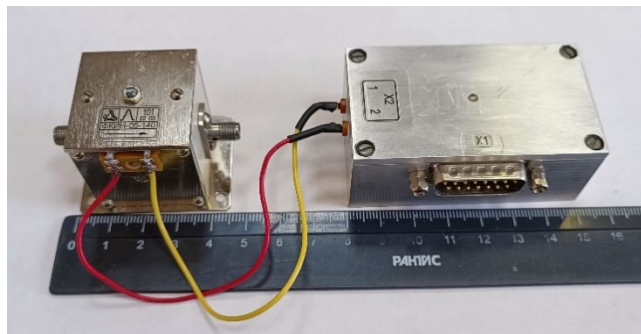


Рисунок 4. Фото режекторного фильтра с 8-битным драйвером

После температурной стабилизации, центральная частота фильтра была снижена до 14,026 ГГц (рисунок 5). Драйвер настраивался так, чтобы код управления «0» соответствовал 14,026 ГГц, а код «250» соответствовал 14,708 ГГц. Фактический диапазон перестройки от «0» до «250» составил 685 МГц. Потребляемая мощность драйвера, при этом составила 4,5 Вт на максимальной частоте.

На рисунке 6 изображено семейство АЧХ при различных кодах управления. Шаг кода между кривыми равен 25. Фактический кодовый дискрет перестройки частоты составил 2,74 МГц. Видно, что перестройка центральной частоты происходит линейно в зависимости от кода управления и во всем диапазоне

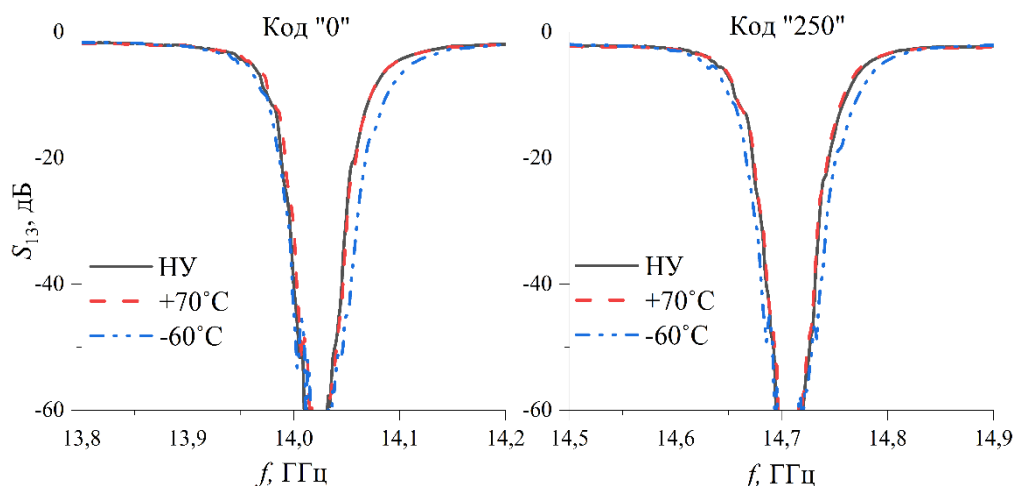


Рисунок 7. Полоса режекции при температурах минус 60°C, ну и плюс 70°C на кодах управления «0» и «250».

3. Заключение

Характеристики фильтра, полученные в рамках разработки, на практике показывают возможность реализации режекции СВЧ сигнала на основе поверхностных спиновых волн в K_u диапазоне частот. В образце явно выражен механизм эффективного поглощения электромагнитных волн в области спектра спиновых волн, что позволяет минимизировать отражения в рабочей полосе частот. Малые вносимые потери фильтра позволяют интегрировать такие фильтры на входе приемных трактов сигнала.

Список литературы

1. Ordoñez-Romero C. L. et al. Pulsed spin wave propagation in a magnonic crystal //Journal of Applied Physics. – 2019. – Т. 126. – №. 8. – С. 083902.
2. Sadovnikov A. V. et al. Spin-wave drop filter based on asymmetric side-coupled magnonic crystals //Physical Review Applied. – 2018. – Т. 9. – №. 5. – С. 051002.
3. Atoev M. D. et al. Study of a Tunable Band-Stop Filter on a Symmetrical Coplanar Line //2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2019. – С. 1-4.
4. Takhtamyshyan V., Babichev R. Simulation of a band-stop filter based on coplanar waveguide //2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2017. – С. 376-379.
5. Мартынов М. И., Дубовой В. А. Перестраиваемые полосно-заграждающие фильтры на спиновых волнах с центральными частотами 9, 8 ГГц и 11, 5 ГГц //Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – С. 526-530.