

НЕВЗАИМНЫЙ С.В.Ч. РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР, ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

© 2019 г. Р. Г. Крышталь, А. П. Кундин, А. В. Медведь*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. А.В. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

* e-mail: avm@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 08.05.2018 г.

После доработки 08.05.2018 г.

Принята к публикации 05.06.2018 г.

Описаны результаты использования динамического магнонного кристалла, создаваемого поверхностной акустической волной (п.а.в.) в структуре “пленка железиттриевого граната на подложке из галлий-гадолиниевого граната”, для создания перестраиваемого невзаимного с.в.ч.-фильтра. Создан макет фильтра, работающего в диапазоне 3600–4200 МГц при магнитном поле смещения 640 Э, измерены его основные характеристики. На частоте п.а.в. 41 МГц и мощности 30 мВт глубина режекции равнялась 23 дБ. Изменение частоты п.а.в. на 1 МГц смещало частоту режекции на ~7 МГц. Инверсия направления распространения сигнала в устройстве приводила к сдвигу частоты режекции на величину частоты п.а.в. Обсуждаются возможности дальнейшего улучшения параметров устройства.

DOI: 10.1134/S0032816219010154

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностная акустическая волна (п.а.в.), распространяющаяся в твердых телах и слоистых структурах, содержащих пьезоэлектрические слои и магнитостатические спиновые волны (м.с.в.), распространяющиеся в структурах со слоями магнитных материалов, широко используются для обработки информации в течение последних десятилетий. Были предложены и экспериментально испытаны устройства на п.а.в. для обработки сигналов в частотном диапазоне 0.01–3 ГГц и устройства на м.с.в. в диапазоне частот 1–20 ГГц, такие как линии задержки, трансверсальные и полосовые фильтры, генераторы, фазовращатели и т.д. Устройства на п.а.в. обладают превосходными свойствами для практического применения: возможностью создания устройств с независимо задаваемыми частотными и фазовыми характеристиками, с относительно большим динамическим диапазоном и относительно высокой температурной стабильностью [1–4].

Основными преимуществами устройств на м.с.в. над устройствами на п.а.в. являются: существенно более высокие центральные частоты и перестраиваемость параметров путем изменения внешнего магнитного поля. Если в настоящее время многие из устройств на п.а.в. коммерчески доступны, за исключением, скажем, ряда датчи-

ков, развитие которых продолжается и в настоящее время, для успешного применения устройств на м.с.в. требуются дополнительные исследования и разработки. В частности, желательно устранить ранее известные недостатки спин-волновых устройств, которые затрудняют их широкое применение: недостаточная температурная стабильность параметров и относительно небольшой динамический диапазон (см., например, [5, 6]).

В настоящее время исследуются новые применения спин-волновых устройств в высокоскоростной логике, где небольшой динамический диапазон не препятствует их применению [7–10].

В данной работе обсуждаются возможности применения свойств спиновых волн в магнонных кристаллах, создаваемых п.а.в. в магнитных средах, для обработки с.в.ч.-сигналов. Представлены результаты тестирования сравнительно простого прототипа перестраиваемого невзаимного режекторного фильтра, иллюстрирующие его работоспособность.

ПОНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МАГНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Концепция так называемых магнонных кристаллов придает новый импульс развитию устройств, которые используют м.с.в. для обработки информа-

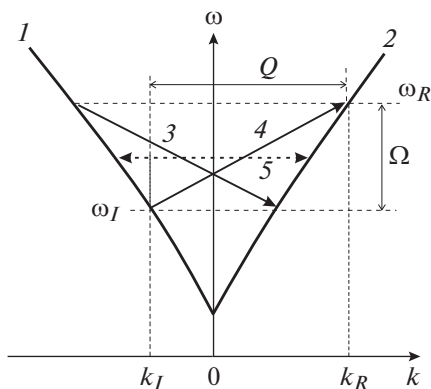


Рис. 1. Диаграмма, поясняющая взаимодействия волн в п.а.в.-м.к.

ции (см., например, [11, 12]). Магنونные кристаллы (м.к.), впервые названные так в [13, 14], представляют собой магнитную среду с периодическими неоднородностями для распространения спиновых волн, в которых имеются запрещенные частотные зоны, определяемые периодом этих неоднородностей. К настоящему времени были предложены и экспериментально испытаны различные конфигурации м.к., был предложен ряд устройств, использующих м.к. для обработки информации, и была экспериментально показана их работоспособность [12, 15–17]. Все это в основном относится к так называемым статическим м.к., магнитные периодические неоднородности в которых создаются в пространстве и постоянны во времени. Имеется лишь небольшое число публикаций, посвященных динамическим м.к. [18, 19], в которых магнитные неоднородности имеют не только в пространстве, но и во времени. Динамические м.к., созданные п.а.в. в пленке железоитриевого граната (ЖИГ), при распространении поверхностной магнитоэлектрической спиновой волны (п.м.с.в.) были описаны в [20–23]. Магнитные неоднородности в магнитных средах создаются п.а.в. благодаря эффекту магнитоэлектрици. Основным физическим явлением, объясняющим особенности такого динамического м.к., является “неупругое рассеяние п.м.с.в. на п.а.в.”. Это явление было исследовано в восьмидесятые годы прошлого века [24–27]. П.м.с.в., распространяющиеся в магнитном материале, в котором также распространяется п.а.в., могут эффективно рассеиваться этой п.а.в., когда удовлетворяются следующие условия неупругого рассеяния (волны распространяются коллинеарно):

$$\omega_R = \omega_I \pm \Omega, \quad |k_R| + |k_I| = |Q|, \quad (1)$$

где $\omega_I = 2\pi f_I$, k_I и $\omega_R = 2\pi f_R$, k_R – частоты и волновые числа соответственно падающей и отраженной п.м.с.в.; $\Omega = 2\pi F$, F и Q – частота и волновое число п.а.в. соответственно; знак “+” соответ-

ствует встречному распространению п.м.с.в. и п.а.в., знак “–” – распространению волн в одном направлении. На рис. 1 схематично показана диаграмма $\omega-k$, поясняющая взаимодействие волн в м.к. П.м.с.в., распространяющиеся в такой среде на частотах, определяемых условиями фазового синхронизма взаимодействующих волн, будут эффективно рассеиваться. Запрещенные зоны возникают для п.м.с.в. вблизи частот согласования фаз. Таким образом, п.а.в. и п.м.с.в. в магнетиках обладают всеми атрибутами магнетонного кристалла, на что было обращено внимание в [20]. Такие магнетонные кристаллы будем обозначать далее как п.а.в.-м.к.

В [20–23] исследованы основные характеристики п.а.в.-м.к. В [20] описаны основные экспериментальные результаты изучения распространения п.м.с.в. в п.а.в.-м.к. Представлены амплитудно-частотные характеристики (а.ч.х.) прошедшей п.м.с.в. при различных параметрах п.а.в. В [22] были показаны экспериментальные результаты исследования влияния магнитной кубической кристаллографической анизотропии на параметры п.а.в.-м.к. в пленках ЖИГ. Главной особенностью такого влияния является появление дополнительных запрещенных зон вместе с существующей без анизотропии нормальной магнетонной запрещенной зоной. Зависимости частот дополнительных магнетонных запрещенных зон и их глубины измерялись как функции частоты и мощности п.а.в. В [21] были представлены экспериментальные результаты исследования невязимности для п.м.с.в. в п.а.в.-м.к. в структуре пленках ЖИГ на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ). В [21] показано, что невязимные свойства для п.м.с.в. в п.а.в.-м.к. существуют в структурах даже с симметричной дисперсионной характеристикой п.м.с.в., распространяющихся в прямом и обратном направлениях.

КОНСТРУКЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВА

На рис. 2 показана конфигурация образцов, наиболее удобных для экспериментального исследования п.а.в.-м.к. на основе структур, состоящих из пленок ЖИГ на подложках ГГГ. Пленки ЖИГ выращивали методом жидкофазной эпитаксии на подложке ГГГ толщиной 500 мкм и кристаллографической плоскости (111). Это так называемая монолитная конфигурация п.а.в.-м.к., которая была описана ранее [20]. Для возбуждения и приема п.а.в. использовались встречно-штыревые преобразователи (в.ш.п.), которые наносились на тонкие пьезоэлектрические пленки ZnO на края структур, как показано на рис. 2. Центральная частота в.ш.п. была равна 41 МГц, вносимые потери L п.а.в.-канала в 50-омном тракте с согласующими элементами равнялись

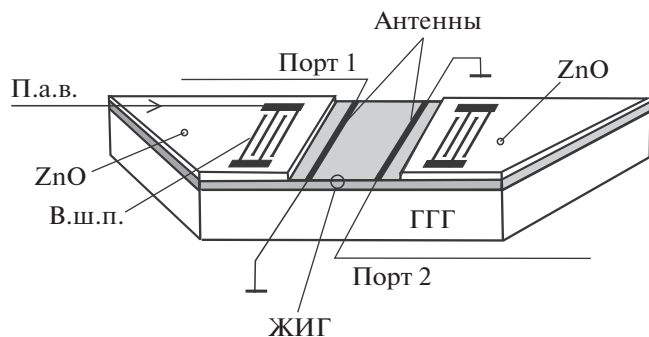


Рис. 2. Конфигурация образцов для исследования режекторного фильтра на основе динамического магнетонного кристалла.

~19 дБ. П.м.с.в. в таких м.к. возбуждались и принимались с помощью алюминиевых полос-антенн шириной 20 и толщиной 0.7 мкм, нанесенных на поверхность пленки ЖИГ на расстоянии 10 мм друг от друга. Эту конфигурацию мы использовали в данной работе для демонстрации работоспособности перестраиваемого режекторного фильтра на основе п.а.в.-м.к. Чтобы уменьшить отражения паразитных волн от краев образцов, края были отрезаны под углом 45°, как это обычно делают в п.а.в. и спин-волновых устройствах [7]. Образцы были помещены в однородное магнитное поле 640 Э, направленное параллельно антеннам. Порты 1 и 2 (рис. 2) использовались для измерений а.ч.х. S -параметров S_{12} и S_{21} в диапазоне частот от 3500 до 4200 МГц, в котором п.м.с.в. могли надежно измеряться в нашем экспериментальном макете. Интенсивность с.в.ч.-сигналов, подаваемых на порты, не превышала значения, выше которого имели место нелинейные эффекты [23].

В м.к. существуют запрещенные частотные зоны, в которых п.м.с.в. не могут распространяться и эффективно отражаются. Таким образом, м.к. может использоваться в качестве режекторного фильтра. Частоты запрещенных зон в статическом м.к. определяются периодом магнитных периодических неоднородностей и не могут быть изменены электронным путем. В п.а.в.-м.к., как показано в [20–22], частоту запрещенных зон и их глубину (центральную частоту и глубину зазоров магнетонных зон) можно изменить, изменив частоту и интенсивность п.а.в. Таким образом, п.а.в.-м.к. является, по сути, электронно-перестраиваемым режекторным фильтром.

На рис. 1 разъясняется функционирование режекторных фильтров на основе п.а.в.-м.к., графически иллюстрируются условия, налагаемые на волновые векторы и частоты взаимодействующих волн (см. уравнение (1)). Линии 1 и 2 на этой диаграмме — это ветви дисперсионных кривых

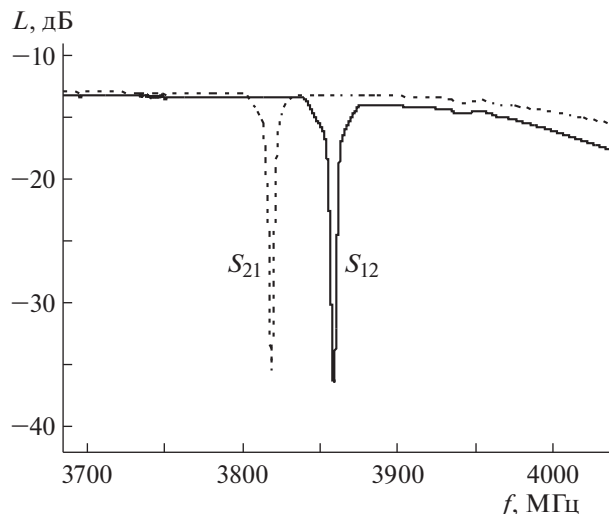


Рис. 3. Измеренные а.ч.х. устройства. Частота п.а.в. 41 МГц, мощность 30 мВт. В.ш.п.: 14 пар электродов с периодом 80 мкм. Пленки: ZnO, толщина 5 мкм; ЖИГ, толщина 8.6 мкм, ширина линии ферромагнитного резонанса 0.7 Э. Апертуры в.ш.п. и антенн равны 5 мм. Магнитное поле смещения 640 Э. Температура окружающей среды 20°C.

п.м.с.в., распространяющихся в противоположных направлениях. Вектор 3 на этом рисунке показывает взаимодействие между падающими и отраженными п.м.с.в., когда микроволновые сигналы подаются на порт 1, а переданные с.в.ч.-сигналы снимают с порта 2 (измеряется параметр S_{12}). Вектор 4 показывает взаимодействие п.м.с.в., когда падающие волны возбуждаются на порте 2, и прошедшие волны принимаются портом 1 (измеряется параметр S_{21}). П.а.в. возбуждается левым в.ш.п. и распространяется в том же направлении, что и падающая п.м.с.в.

Линия 5, соответствующая взаимодействию волн в статической м.к., приведена здесь для сравнения, если бы периодическая магнитная неоднородность с вектором обратной решетки, равным волновому числу п.а.в., была бы создана технологически, без возбуждения п.а.в. В этом случае падающая и отраженная волны не сдвигались бы по частоте друг относительно друга, и в устройствах, основанных на таких структурах, невзаимность не имела бы места.

Измеренные а.ч.х. $L(f)$ макета (вносимые потери L как функция частоты f) представлены на рис. 3 как для параметра S_{12} , так и для S_{21} . Видно, что частота режекции изменяется, когда изменяется направление распространения п.м.с.в. на противоположное, т.е. этот режекторный фильтр обладает свойствами невзаимности. Основные параметры структуры, используемые в этом макете, приведены в подписи к рис. 3.

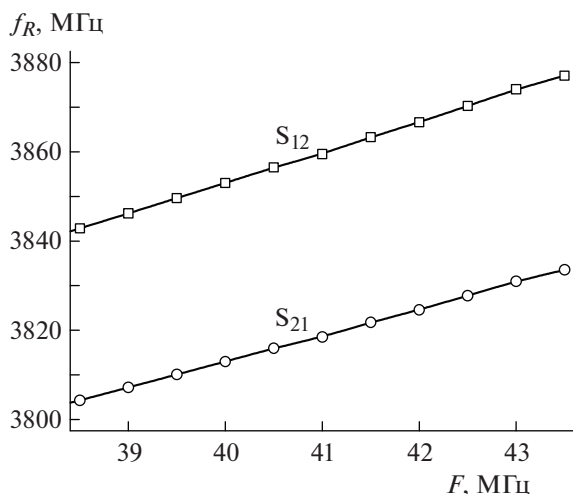


Рис. 4. Зависимости частоты режекции f_R от частоты п.а.в. F , измеренные из а.ч.х. S-параметров: S_{12} (п.м.с.в. и п.а.в. распространяются в одном направлении) и S_{21} (п.м.с.в. и п.а.в. распространяются навстречу друг другу). Образец тот же, что использовался для измерений а.ч.х. на рис. 3.

Частота режекции сдвигается на частоту п.а.в. при инверсии направления распространения п.м.с.в. в соответствии с уравнением (1). Частоты режекции определяются частотой п.а.в. Частоты запрещенных зон можно перестраивать в определенных пределах, изменяя частоту п.а.в., при этом также изменится сдвиг частоты между частотами режекции при инверсии направления распространения п.м.с.в. Измеренные зависимости частот режекции f_R , как функция частоты п.а.в. F , для двух взаимно противоположных направлений распространения п.м.с.в. приведены на рис. 4.

В этом эксперименте п.а.в. возбуждались в.ш.п., ближайшим к порту 1. В нашем эксперименте эти зависимости практически линейны при заданной толщине пленки ЖИГ и при относительно узком диапазоне изменения частоты п.а.в. Как следует из результатов, представленных на рис. 4, в нашем образце изменение частоты п.а.в. на 1 МГц приводит к смещению частоты режекции на ~ 7 МГц. В общем случае, величина этого сдвига определяется формой дисперсионной характеристики п.м.с.в. и, в определенных условиях, может достигать нескольких десятков мегагерц. Частотная ширина режекционного провала определяется шириной магнотной запрещенной зоны в п.а.в.-м.к. и в условиях нашего эксперимента зависит только от затухания п.м.с.в. [20, 21].

Глубина режекции контролируется мощностью п.а.в. Измеренная зависимость глубины режекции от мощности п.а.в. для исследуемого образца представлена на рис. 5. Таким образом, в фильтре на основе п.а.в.-м.к. можно перестраи-

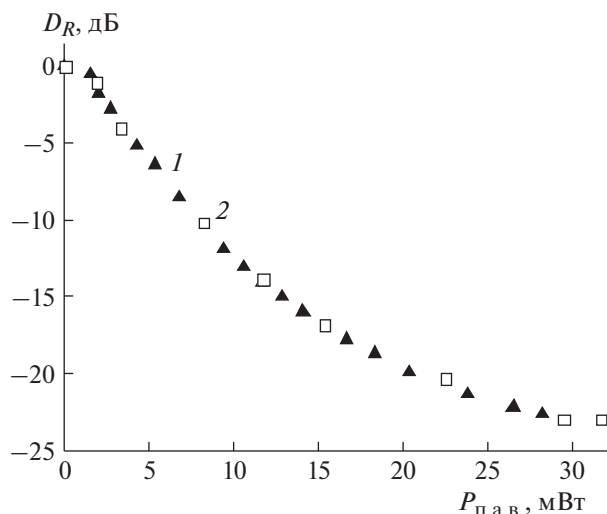


Рис. 5. Измеренная глубина режекции D_R как функция мощности п.а.в. $P_{\text{п.а.в.}}$, в п.а.в.-мк. 1 — измерения при $f_R = 3818$ МГц (п.м.с.в. и п.а.в. распространяются навстречу друг другу), 2 — при $f_R = 3859$ МГц (п.м.с.в. и п.а.в. распространяются в одном направлении). Условия эксперимента такие же, как и при измерениях а.ч.х.

вать, в определенных пределах, частоту и глубину режекции, изменяя частоту и мощность п.а.в. Как уже было сказано, спин-волновые устройства обычно имеют недостаточную температурную стабильность параметров, и возможность перестройки будет полезна для преодоления этого недостатка.

Рабочие частотные диапазоны режекторного фильтра можно настраивать, в довольно широких пределах, путем изменения магнитного поля смещения, как это делается и в других спин-волновых устройствах [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, концепция динамических магнотных кристаллов, создаваемых п.а.в. в структуре пленка ЖИГ—подложка ГГГ, оказалась весьма полезной для создания невзаимных перестраиваемых режекторных фильтров, прототип которого описан в этой статье. Измеренные его основные параметры никоим образом не могут считаться предельными, поскольку целью данной работы было продемонстрировать работоспособность прототипа, и оптимизация параметров не проводилась.

Следует отметить, что не все известные свойства п.а.в.-м.к. были использованы при создании прототипа режекторного фильтра. Как показывают наши оценки [22], особенности п.а.в.-м.к., обусловленные магнитной анизотропией пленок ЖИГ, при применении их в режекторных фильтрах, на порядок уменьшили бы требуемую мощ-

ность п.а.в. для достижения тех же параметров, что были приведены в статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1990.
2. Ruppel Clemens C.W., Tor A. Fjeldly. Advances in surface acoustic wave technology, systems and applications. V. 2. World scientific publishing Co, 2001.
3. Гуляев Ю.В., Хикернелл Ф.С. // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 101.
4. Campbell C. Surface acoustic wave devices and their signal processing applications. Elsevier, 2012.
5. Morgenthaler F.R. // Microwave J. 1982. V. 25. P. 83.
6. Ishak W. S. // Proc. IEEE. 1988. V. 76 (2). P. 171.
7. Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43(26). P. 264002.
8. Khitun A., Bao M., Wang K.L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43(26). P. 264005.
9. Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B. // Nature communications. 2014. V. 5. P. 4700.
10. Acevedo A., Gomez-Arista I., Kolokoltsev O., Sánchez M.M., Guzmán R.C. // Electronics Lett. 2018. V. 54 (7). P. 418.
11. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. // Nat. Phys. 2015. V. 11 (6). P. 453.
12. Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50(24). P. 244001.
13. Krawczyk M., Grundler D. // J. Phys.: Condensed Matter. 2014. V. 26(12). P. 123202.
14. Puzkarski H., Krawczyk M. // Phys. Lett. 2001. V. A282. P. 106.
15. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В., Климов А.А., Тайад Ф., Пресманес Л., Филимонов Ю.А. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77(10). С. 670.
16. Gallardo R.A., Schneider T., Roldán-Molina A., Langer M., Fassbender J., Lenz K., Lindner J., Landeros P. // Phys. Rev. B. 2018. V. 97(14). P. 144405.
17. Садовников А.В., Одинцов С.А., Бегинин Е.Н., Грачев А.А., Губанов В.А., Шешукова С.Е., Шараевский Ю.П., Никитов С.А. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107(1). С. 25.
18. Chumak A.V., Neumann T., Serga A.A., Hillebrands B., Kostylev M.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42(20). P. 205005.
19. Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Chumak A.V., Serga A.A., Vasyuchka V.I., Hillebrands B., Landeranta E., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106(10). P. 102405.
20. Kryshstal R.G., Medved A.V. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100(19). P. 192410.
21. Kryshstal R.G., Medved A.V. // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2015. V. 395. P. 180.
22. Kryshstal R.G., Medved A.V. // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2017. V. 426. P. 666.
23. Kryshstal R.G., Medved A.V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50(49). P. 495004.
24. Медников А.М., Попков А.Ф., Анисимкин В.И., Нам Б.П., Петров А.А., Сливаков А.А., Хе А.С. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 632.
25. Попков А.Ф. // Физика металлов и металловедение. 1985. Т. 59. С. 463.
26. Hanna S.M., Murphy G.P., Sabetfakhri K., Stratakis K. // 1990 IEEE Ultrason. Symp. Proc. 1990. P. 209.
27. Крышталъ П.Г., Медведъ А.В., Попков А.Ф. // Радиотехника и электроника. 1994. № 4. С. 647.