

## 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-

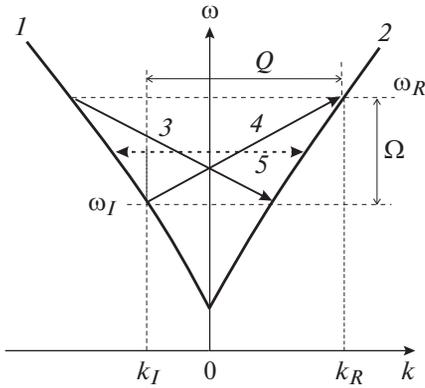


Рис. 1. Диаграмма, поясняющая взаимодействия волн в п.а.в.-м.к.

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 железитриевого 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 магнитоэлектричества. 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

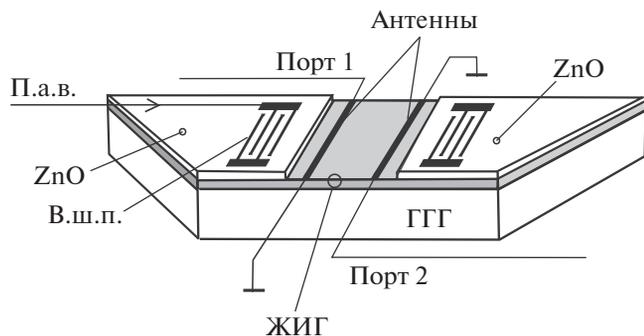


Рис. 2. Конфигурация образцов для исследования режекторного фильтра на основе динамического магнетонного кристалла.

~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

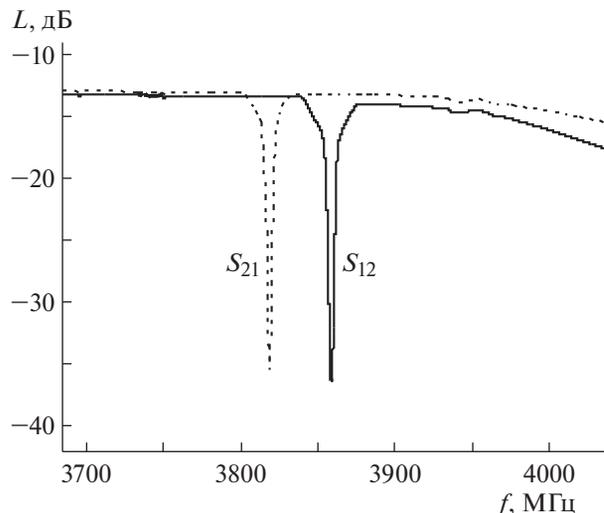
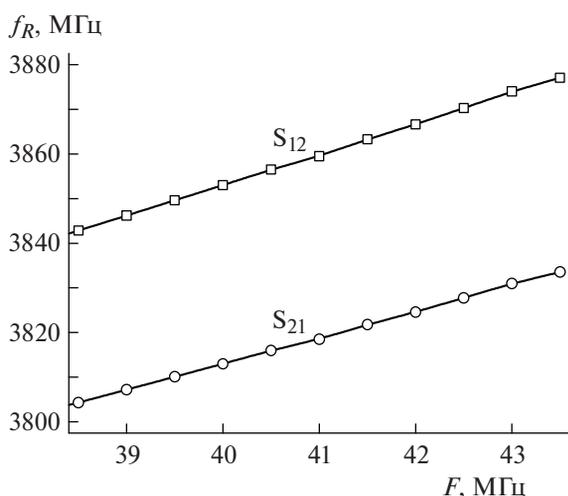


Рис. 3. Измеренные а.ч.х. устройства. Частота п.а.в. 41 МГц, мощность 30 мВт. В.ш.п.: 14 пар электродов с периодом 80 мкм. Пленки: ZnO, толщина 5 мкм; ЖИГ, толщина 8.6 мкм, ширина линии ферромагнитного резонанса 0.7 Э. Апертуры в.ш.п. и антенн равны 5 мм. Магнитное поле смещения 640 Э. Температура окружающей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

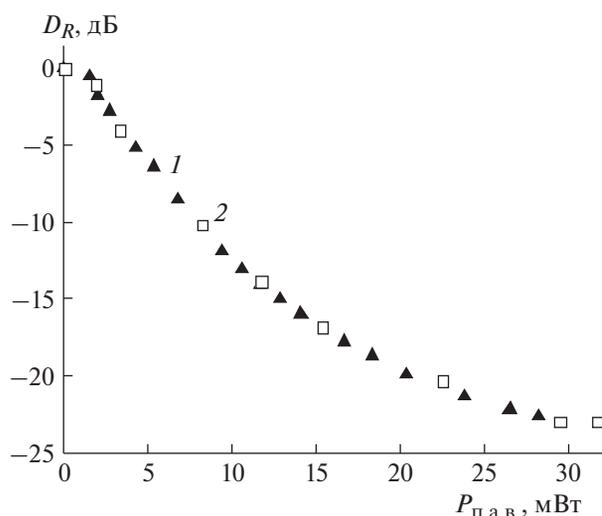


**Рис. 4.** Зависимости частоты режекции  $f_R$  от частоты п.а.в.  $F$ , измеренные из а.ч.х. S-параметров:  $S_{12}$  (п.м.с.в. и п.а.в. распространяются в одном направлении) и  $S_{21}$  (п.м.с.в. и п.а.в. распространяются навстречу друг другу). Образец тот же, что использовался для измерений а.ч.х. 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  $\sim 7$  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.