

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.3>

УДК: 537.862; 537.876; 537.6

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ С ФЕРРИТОВЫМ ВОЛНОВОДОМ МУЛЬТИЭЛЕКТРОДНЫЕ МИКРОАНТЕННЫ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ-ПРИЕМА СПИНОВЫХ ВОЛН

Ю.В. Хивинцев, В.К. Сахаров, А.В. Кожевников, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов

Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
410019, Саратов, ул. Зеленая, 38

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2023 г.

Аннотация. Изготовлены и протестированы мультиэлектродные микроантенны для спиновых волн интегрированные с ферритовым волноводом – пленкой железиттриевого граната. Исследованы микроантенны двух типов: с параллельным соединением проводников – «решетка» и с последовательным соединением проводников – «меандр». Продемонстрирована работоспособность подобных микроантенн для возбуждения-приема поверхностной и обратной объемной магнитостатических волн длиной в десятки микрометров. Показано, что для волн длиной в десятки микрометров с помощью микроантенн типа решетка можно обеспечить высокую (десятки мегагерц) селективность возбуждения-приема. Тогда как с использованием микроантенн типа «меандр» для этого же диапазона длин волн удастся не только обеспечить селективность, но и существенно (до 10 дБ) повысить эффективность возбуждения-приема по сравнению с микроантенной в виде одиночного проводника. Отмечается, что использованию таких микроантенн для более коротких спиновых волн могут препятствовать взаимное влияние СВЧ полей от соседних проводников, а также возрастающая роль омических потерь в проводниках.

Ключевые слова: спиновые волны, возбуждение спиновых волн, мультиэлектродные антенны для спиновых волн, пленки железоиттриевого граната.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания «Спинтроника» (FFWZ-2022-0009).

Автор для переписки: Хивинцев Юрий Владимирович khivintsev@gmail.com

Введение

Одним из активно развиваемых направлений современной электроники является магنونика, в основе которой лежит использование для обработки информации эффектов распространения спиновых волн (СВ), и на принципах которой можно строить устройства аналоговой обработки СВЧ сигналов и различного рода вычислительные системы [1-3]. При этом для магنونных устройств одну из ключевых ролей играют системы возбуждения и приема СВ. В последние годы, в связи с общей тенденцией к миниатюризации, значительное внимание уделяется разработке преобразователей – антенн для коротких СВ [4]. Актуальными являются задачи повышения эффективности, а также обеспечения селективности возбуждения-приема, которые могут быть решены с использованием мультиэлектродных антенн [5].

Следует отметить, что мультиэлектродные антенны активно исследовались несколько десятков лет назад [6], однако лишь для СВ длиной в сотни микрометров. Для субмикронных СВ можно ожидать проявления особенностей связанных с уменьшением размеров антенн – использованием микроантенн (МА). Использование мультиэлектродных МА для возбуждения СВ ранее рассматривалось, по-видимому, лишь теоретически в работе [5], где анализировались МА типа «меандр» применительно к субмикронным СВ. Поэтому представляет интерес экспериментально протестировать мультиэлектродные МА применительно к более коротким СВ, чем это было ранее, что и являлось целью данной работы.

В работе изготовлены и протестированы мультиэлектродные МА с использованием в качестве волноводов для СВ пленок железоиттриевого граната (ЖИГ). Исследуются МА, интегрированные с пленкой ЖИГ, для диапазона длин волн в десятки микрометров.

1. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Исследуемые образцы представляли собой пленку ЖИГ с сформированными на ее поверхности МА для возбуждения-приема спиновых волн – см. Рис. 1. Были изготовлены и протестированы три типа МА: одиночная микрополоска (Рис. 1а) – далее МА «полоска»; периодическая система из микрополосок, соединенных параллельно (Рис. 1б) – далее МА «решетка»; периодическая система из микрополосок, соединенных последовательно (Рис. 1в) – далее МА «меандр». МА имели контактные площадки на концах микрополосок для соединения с измерительным коаксиальным трактом с помощью СВЧ зондов.

Для изготовления образцов использовались пленки ЖИГ, выращенные на подложках гадолиний галлиевого граната ориентации (111) методом жидкофазной эпитаксии. МА с контактными площадками изготавливались из меди толщиной $\sim 0.5 - 0.7$ мкм, используя технологии магнетронного распыления, фотолитографии и ионного травления.

Были изготовлены и протестированы два набора образцов, каждый из которых изготавливался в едином технологическом цикле на одной пленке ЖИГ. Для первого набора использовалась пленка ЖИГ толщиной 4 мкм с эффективной намагниченностью насыщения $4\pi M = 1.82$ кЭ. На этой пленке был сформирован набор из МА «решетка» с числом микрополосок $N = 6$ и различным периодом их следования $\Lambda = 20, 40, 60$ и 80 мкм, а также МА «полоска» для сравнения. Ширина микрополосок в указанных МА была $w = 8$ мкм, расстояние между ближайшими проводниками возбуждающей и приемной МА (см. Рис. 1) составляло $L = 92$ мкм. Для второго набора образцов использовалась пленка ЖИГ толщиной 0.8 мкм с $4\pi M = 1.96$ кЭ, на которой

были изготовлены МА «меандр» с периодом следования микрополосок $\Lambda = 32$ мкм и различным их числом $N = 2, 4, 8, 16$, а также МА «полоска» для сравнения. Параметры МА в этом случае были: $w = 4$ мкм, $L = 64$ мкм. В обоих наборах образцов длина (апертура) МА составляла 100 мкм.

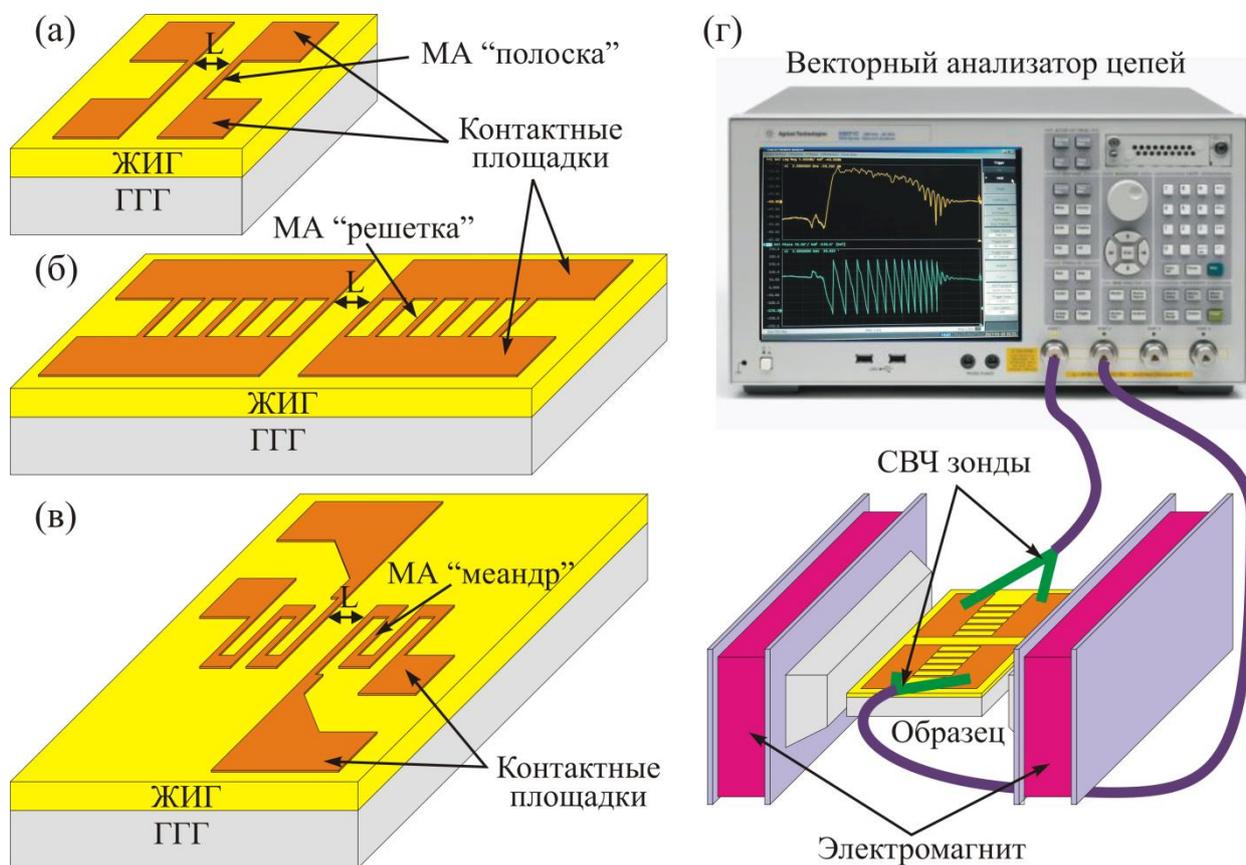


Рис. 1. Геометрия исследуемых образцов с МА в виде: (а) одиночной микрополоски; (б) периодической системы из микрополосок, соединенных параллельно; (в) периодическая система из микрополосок, соединенных последовательно в меандр. (г) Схема измерений.

Отметим, что, исходя из взаимной ориентации токов в микрополосках исследуемых мультиэлектродных МА, для МА «решетка» условие максимальной эффективности возбуждения-приема можно записать:

$$k(f) \times \Lambda = 2\pi n, \quad (1)$$

где k – волновое число, зависящее от частоты f , а n – натуральное число.

Для МА «меандр» аналогичное условие имеет вид:

$$k(f) \times \Lambda = \pi(2n - 1). \quad (2)$$

Для МА «полоска» селективные свойства на возбуждение-прием определяются шириной полоски, она эффективна вплоть до $k \approx \pi/w$ [6].

Тестирование изготовленных образцов осуществлялось с помощью векторного анализатора цепей с использованием СВЧ зондовой станции и электромагнита. Образец помещался в электромагнит, осуществлялся контакт МА и подводящих СВЧ трактов, и измерялись амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ, соответственно) коэффициентов передачи и отражения (S параметры) при различной величине фиксированного поля подмагничивания. ФЧХ использовались для расчета экспериментальных дисперсионных характеристик спиновых волн по стандартной процедуре [4]. Измерения проводились при величинах поля подмагничивания $H = 0.12 - 2.5$ кЭ. Поле прикладывалось касательно к пленке ЖИГ либо вдоль, либо перпендикулярно микрополоскам. Первый случай отвечает возбуждению и распространению между МА поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в области частот $[f_0, f_S]$, а второй – обратной объемной магнитостатической волны (ОМСВ) в области частот $[f_H, f_0]$, где $f_0 = \gamma \times (H \times (H + 4\pi M))^{1/2}$ – длинноволновая граница спектра этих волн, $f_H = \gamma \times H$ и $f_S = \gamma \times (H + 4\pi M/2)$ – коротковолновые границы спектра ОМСВ и ПМСВ, соответственно, $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение [7].

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

2.1. МА «решетка»

На Рис. 2 приведены результаты эксперимента по возбуждению и прохождению ПМСВ в структурах с МА «решетка». Для сравнения показаны также результаты измерений для МА «полоска».

Эффективность прохождения ПМСВ при использовании МА «полоска» монотонно возрастала по мере роста H для исследуемого диапазона полей (Рис. 2а): от -25 дБ при $H = 0.12$ кЭ до -13 дБ при $H = 2.5$ кЭ. При этом зона прохождения ПМСВ во всем диапазоне возбуждения и прохождения волны была относительно равномерной с монотонным спадом коэффициента передачи по мере увеличения частоты (при фиксированном H), что связано с увеличением затухания ПМСВ из-за падения ее групповой скорости. Существенные

осцилляции в АЧХ наблюдались лишь вблизи верхней границы зоны прохождения сигнала вследствие его интерференции с сигналом прямой электромагнитной наводки между МА. Максимальные волновые числа составили $\sim 4 \times 10^3$ рад/см (Рис. 2б). Ниже частоты f_0 также наблюдалось прохождение сигнала в узкой полосе частот (Рис. 2а), что, по всей видимости, связано с возбуждением ООМСВ за счет контактных площадок и ее прохождением до приемной МА.

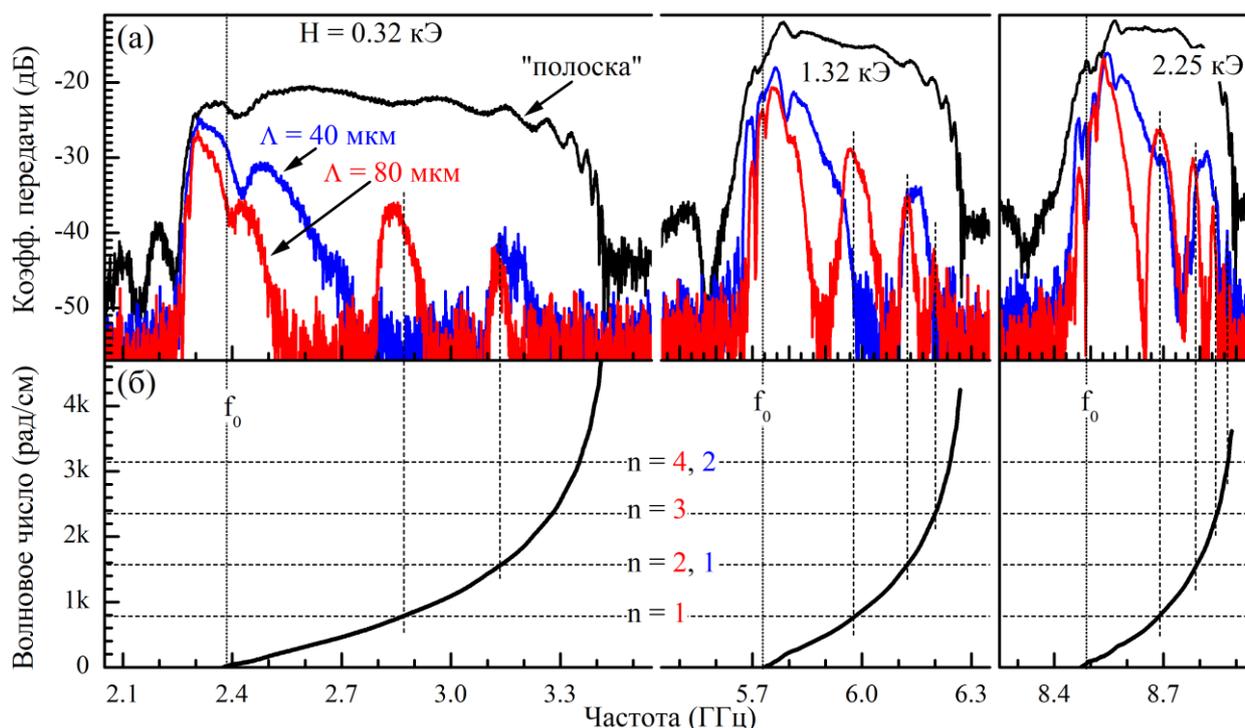


Рис. 2. (а) АЧХ коэффициента передачи и (б) восстановленная из ФЧХ дисперсионная зависимость ПМСВ для МА «решетка» с периодом $\Lambda = 80$ и 40 мкм и МА «полоска» при различных H . Вертикальные пунктирные линии – длинноволновая граница спектра ПМСВ. Штриховые линии – волновое число и частота, удовлетворяющие условию (1) при различных n . Между цветами кривых и подписей взаимное соответствие.

Использование МА «решетка» приводило к тому, что в полосе частот существования ПМСВ формировались узкие полосы прохождения сигнала, максимум которых хорошо согласовался с условием (1) для различных пространственных гармоник МА (Рис. 2а и б). При этом коэффициент передачи в максимуме указанных полос был заметно (> 10 дБ) меньше, чем на тех же частотах при использовании МА «полоска». При использовании МА

с $\Lambda = 80$ мкм ширина первой ($n = 1$) такой полосы (по уровню -3 дБ от максимума) составляла от ~ 70 до 40 МГц при варьировании от минимума до максимума поля подмагничивания. С ростом n ширина указанных полос и отвечающий им коэффициент передачи уменьшались.

При уменьшении Λ происходило смещение указанных полос возбуждения, в соответствии с (1), в область более высоких частот и сопровождалось снижением эффективности возбуждения-приема. Это, в частности, можно наблюдать на Рис. 2а, где полоса возбуждения для $n = 1$ при $\Lambda = 40$ мкм, совпадающая по частоте с $n = 2$ при $\Lambda = 80$ мкм, имеет приблизительно такой же коэффициент передачи. Отметим, что при этом полоса $n = 1$ при $\Lambda = 40$ мкм была гораздо шире, чем $n = 2$ при $\Lambda = 80$ мкм, и была приблизительно той же ширины, что и $n = 1$ при $\Lambda = 80$ мкм.

Помимо указанных полос возбуждения, обусловленных периодичностью микрополосок в МА, наблюдалась также полоса возбуждения вблизи f_0 . Указанная полоса возбуждения обусловлена с одной стороны паразитным возбуждением, благодаря СВЧ токам, текущим по контактными площадкам, а с другой – тем, что весь набор из микрополосок выступает, как единый проводник шириной $\Lambda \times (n - 1) + w$. Последнее объясняет уширение полосы с уменьшением Λ (Рис. 2а) – уже антенна, шире полоса возбуждаемых ею частот.

В целом, полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями, выполненными для более длинных СВ [6], указывая на возможность использования МА «решетка» для обеспечения селективности возбуждения-приема СВ длиной в десятки микрометров. При этом снижение эффективности возбуждения с уменьшением Λ , по всей видимости, связано с тем, что СВЧ магнитные поля от соседних микрополосок начинают перекрываться, приближая общее суммарное поле от всей МА к более однородному. Это снижает интеграл перекрытия суммарного СВЧ поля от МА с высокочастотной намагниченностью волны, определяющий эффективность возбуждения-приема. Понятно, что с дальнейшим уменьшением Λ этот эффект

будет возрастать, и целесообразность использования такого рода МА для микронных и субмикронных волн остается под вопросом.

2.2. МА «меандр»

На Рис. 3 показаны результаты эксперимента с образцами МА «меандр» при возбуждении ПМСВ и ООМСВ. В этом случае для ПМСВ, возбуждаемой-принимаемой МА «полоска», наблюдались особенности качественно аналогичные описанным в предыдущем разделе. Максимальные k составили $\sim 10^4$ рад/см за счет в два раза более узкой МА (Рис 3б). Следует отметить, что, в целом, особенности, наблюдавшиеся с данным типом образцов, качественно были аналогичными при различных N , поэтому проиллюстрированы лишь для $N = 0.81$ кЭ.

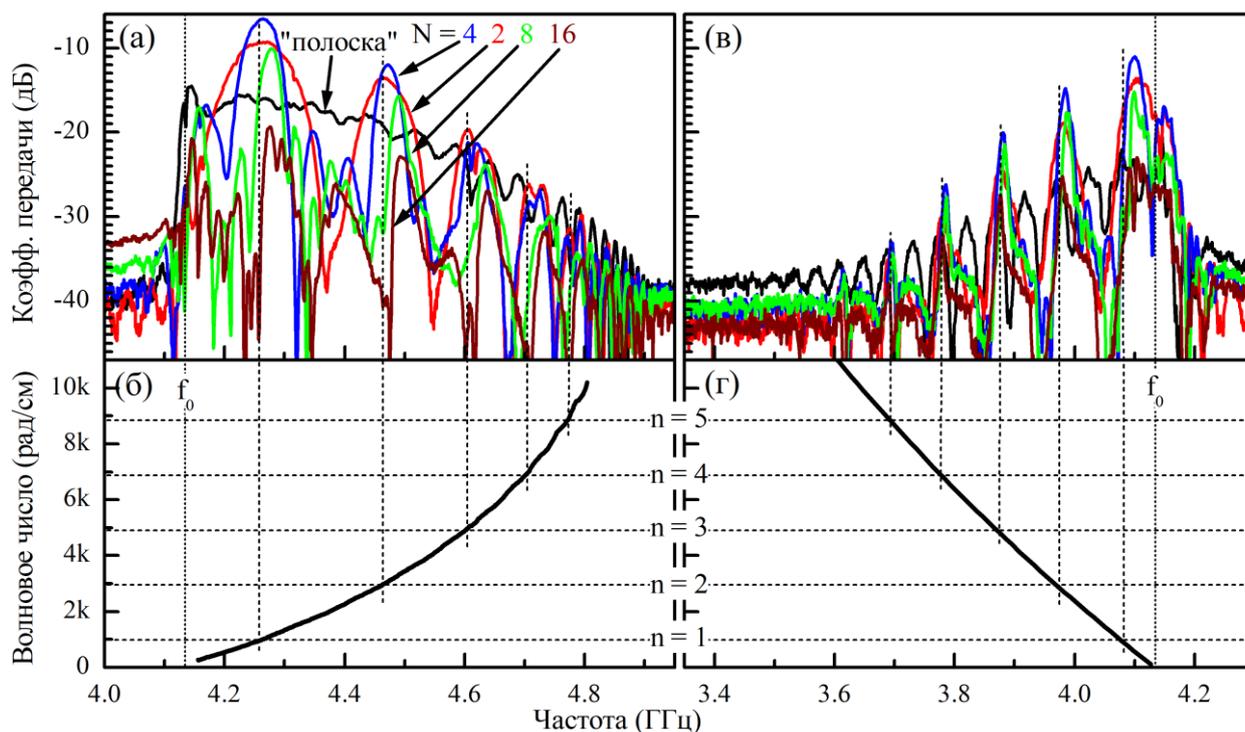


Рис. 3. (а, в) АЧХ коэффициента передачи и (б, г) дисперсионная зависимость ПМСВ (а, б) и ООМСВ (в, г) для МА «меандр» с различным $N = 2, 4, 8, 16$ и МА «полоска» ($N = 1$) при $N = 0.81$ кЭ. Вертикальные пунктирные линии – длинноволновая граница спектра ПМСВ и ООМСВ. Штриховые линии – волновое число и частота, удовлетворяющие условию (2) при различных n . Между цветами кривых взаимное соответствие.

Использование МА «меандр», как и в предыдущем случае с МА «решетка», разбивала спектр ПМСВ на серию зон прохождения сигнала, которые в этом

случае хорошо согласовывались с условием (2), и ширина которых уменьшалась с ростом n и N . Однако в случае МА «меандр» наблюдался целый ряд существенных особенностей.

Во-первых, коэффициент передачи, соответствующий этим зонам прохождения, в случае МА «меандр» мог быть существенно (до 10 дБ) выше по сравнению с МА «полоска» на тех же частотах (Рис 3а). С увеличением N коэффициент передачи сначала возрастал, затем уменьшался, наивысшая эффективность была достигнута при $N = 4$. При этом снижение эффективности следует связать с влиянием омических потерь – с увеличением N растет общая длина проводника и омические потери в нем снижают эффективность возбуждения.

Во-вторых, при использовании МА «меандр» отсутствует эффективное возбуждение волн вблизи f_0 самим меандром. Наблюдаемую передачу сигнала вблизи f_0 следует отнести исключительно на возбуждение волны за счет контактных площадок. С ростом N уменьшалась ширина зон возбуждения. В частности, ширина зоны возбуждения $n = 1$ составила $\sim 100, 55$ и 30 МГц для $N = 2, 4$ и 8 , соответственно, при $H = 0.81$ кЭ.

В случае ООМСВ даже при использовании МА «полоска» АЧХ коэффициента передачи была сильно изрезана. Это связано с более низкой эффективностью возбуждения ООМСВ и, как следствие, с сильным влиянием прямой электромагнитной наводки между МА на результат измерений за счет интерференции с полезным сигналом. Тем не менее, и в этом случае можно видеть эффект селективности и повышения эффективности возбуждения с помощью МА «меандр» по сравнению с МА «полоска». Повышение эффективности возбуждения было того же порядка, что и в случае ПМСВ. Отметим, что в этом случае из-за сильного влияния прямой электромагнитной наводки не удалось получить дисперсионную зависимость из экспериментальной ФЧХ. Поэтому на Рис. 3г приведена теоретическая дисперсионная зависимость ООМСВ, построенная по параметрам, полученным из эксперимента с ПМСВ. В этом случае также видно хорошее соответствие

положении зон передачи сигнала с условием (2), подтверждая, что их происхождение связано именно с селективными свойствами МА.

Результаты, полученные для МА «меандр», также находятся в согласии с предшествующими исследованиями, выполненными для более длинных волн [6]. Специфической особенностью, выявленной для малых размеров, является снижение эффективности за счет возрастающей роли омических потерь в проводнике. Этот эффект также является существенным препятствием на продвижение в область более коротких волн, поскольку это требует дальнейшего уменьшения ширины проводников, что, естественно, увеличит омические потери.

Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты показали принципиальную возможность использования мультиэлектродных антенн для селективного возбуждения спиновых волн с длинами в десятки микрометров. С точки зрения повышения эффективности возбуждения предпочтительными выглядят антенны типа «меандр». Однако использование более коротких спиновых волн ведет к необходимости уменьшения ширины микрополосок, составляющих антенну, что повышает омические потери и снижает эффективность антенн. Поэтому компромиссным вариантом видится комбинация «решетки» и «меандра» – параллельное соединение нескольких «меандров» с небольшим числом периодов.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания «Спинтроника» (FFWZ-2022-0009).

Литература

1. Demokritov S.O., Slavin A.N. Magnonics: from fundamentals to applications. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – 262 p.
2. Никитов С.А., Калябин Д.В., Лисенков И.В., Славин А.Н., Барабаненков Ю.Н., Осокин С.А., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Морозова М.А., Шараевский Ю.П., Филимонов Ю.А., Хивинцев Ю.В., Высоцкий С.Л., Сахаров В.К., Павлов Е.С. Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1099-1128. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0185.201510m.1099>
3. Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A.O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelman C., Cotofana S., Naeemi A., Vasyuchka V.I., Hillebrands B., Nikitov S.A., Yu H., Grundler D., Sadovnikov A.V., Grachev A., Sheshukova S.E., Duquesne Y., Marangolo A., Csaba G., Porod W., Demidov V.E., Urazhdin S., Demokritov S.O., Albisetti E., Petti D., Bertacco R., Schultheiss H., Kruglyak V.V., Poimanov V.D., Sahoo S., Sinha J., Yang H., Münzenberg M., Moriyama T., Mizukami S., Landeros P., Gallardo R.A., Carlotti G., Kim J.-V., Stamps R.L., Camley R.E., Rana B., Otani Y., Yu W., Yu T., Bauer G.E.W., Back C., Uhrig G.S., Dobrovolskiy O.V., Budinska B., Qin H., van Dijken S., Chumak A.V., Khitun A., Nikonov D.E., Young I.A., Zingsem B.W., Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2021. V. 33(41). – 413001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/abec1a>
4. Khivintsev Y.V., Filimonov Y.A., Nikitov S.A. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas // Applied Physics Letters. – 2015. – V. 106. – 052407. <https://doi.org/10.1063/1.4907626>
5. Connelly D.A., Csaba G., Aquino H.R.O., Bernstein G.H., Orlov A., Porod W., Chisum J. Efficient electromagnetic transducers for spin-wave devices // Scientific Reports. – 2021. – V. 11(1). – P. 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97627-3>

6. Вапнэ Г.М. СВЧ устройства на магнитоэлектрических волнах // Обзоры по электронной технике. Серия. 1. Электроника СВЧ. Вып. 8 (1060). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1984. – 80 с.
7. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1961. V. 19. – P. 308-320.
[https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5)

Для цитирования:

Хивинцев Ю.В., Сахаров В.К., Кожевников А.В., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. Интегрированные с ферритовым волноводом мультиэлектродные микроантенны для возбуждения-приема спиновых волн. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.3>