



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(5)

Обзорная статья
УДК 537.622.4, 537.87, 537.226.4, 621.315.592

DOI: 10.18500/0869-6632-003003
EDN: ZJHKXN

Резонансные и нелинейные явления при распространении магнитоэлектрических волн в мультиферроидных, полупроводниковых и металлизированных структурах на основе ферромагнитных плёнок и магнетонных кристаллов

М. А. Морозова ✉, О. В. Матвеев

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия
E-mail: ✉mamorozovama@yandex.ru, olvmatveev@gmail.com

Поступила в редакцию 4.06.2022, принята к публикации 23.06.2022, опубликована 30.09.2022

Аннотация. Целью данной работы является составление обзора нового и плодотворного научного направления в магнетонике, которое выросло из работ доктора физико-математических наук, профессора Юрия Павловича Шараевского и связано с исследованиями резонансных и нелинейных явлений при распространении магнитоэлектрических волн в ферромагнитных плёнках, ферромагнитных плёнках с периодическими неоднородностями (магнетонных кристаллах), связанных (слоистых и латеральных) ферромагнитных структурах, а также ферромагнитных структурах со слоями другой физической природы (полупроводниковыми, сегнетоэлектрическими, пьезоэлектрическими, слоями нормального металла). **Методы.** Используются экспериментальные и теоретические методы исследования спин-волновых возбуждений в широком классе структур с ферромагнитными слоями. В частности, экспериментальные радиофизические методы СВЧ-измерений и оптические методы мандельштам-бриллюэновской спектроскопии. Для построения теоретических моделей использованы: метод связанных волн, метод свивания магнитных проницаемостей на границах слоёв, метод матриц передачи, длинноволновое приближение. **Результаты.** Представленные результаты имеют общенаучное значение для понимания основных закономерностей совместного влияния связи, периодичности и взаимодействий разной физической природы (влияние на магнитоэлектрическую волну деформации в периодических структурах с пьезоэлектриком, электромагнитной волны в структурах с сегнетоэлектриком, электрического тока в структурах с полупроводником, спинового тока в структурах с нормальным металлом). В прикладном плане выявленные эффекты открывают широкие возможности для создания новых устройств спин-волновой электроники с возможностью динамического управления характеристиками при изменении электрического и магнитного поля, а также мощности входного сигнала. **Выводы.** Приведен обзор наиболее интересных результатов, полученных авторами совместно с Юрием Павловичем Шараевским и являющихся идейным продолжением заложенных им основ.

Ключевые слова: ферромагнитная пленка, магнитоэлектрическая волна, магнетонный кристалл, полупроводник, сегнетоэлектрик, пьезоэлектрик, нормальный металл.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №19-79-20121 (экспериментальные исследования) и Российского фонда фундаментальных исследований, грант №19-29-03049-мк (теоретические исследования).

Для цитирования: Морозова М. А., Матвеев О. В. Резонансные и нелинейные явления при распространении магнитоэлектрических волн в мультиферроидных, полупроводниковых и металлизированных структурах на основе ферромагнитных плёнок и магнетонных кристаллов // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 5. С. 534–553. DOI: 10.18500/0869-6632-003003. EDN: ZJHKXN

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Resonant and nonlinear phenomena during the propagation of magnetostatic waves in multiferroic, semiconductor and metallized structures based on ferromagnetic films and magnonic crystals

M. A. Morozova✉, O. V. Matveev

Saratov State University, Russia

E-mail: ✉mamorozovama@yandex.ru, olvmatveev@gmail.com

Received 4.06.2022, accepted 23.06.2022, published 30.09.2022

Abstract. Purpose of this work is to compile an overview of a new and fruitful scientific direction in magnonics, which grew out of the works of Ph.D., Professor Yuri Pavlovich Sharaevsky, and related to the study of resonant and nonlinear phenomena during the propagation of magnetostatic waves in ferromagnetic films, ferromagnetic films with periodic inhomogeneities (magnonic crystals), coupled (layered and lateral) ferromagnetic structures, as well as ferromagnetic structures with layers of a different physical nature (semiconductor, ferroelectric, piezoelectric, normal metal layers). *Methods.* Experimental and theoretical methods have been used to study spin-wave excitations in a wide class of structures with ferromagnetic layers. In particular, experimental radiophysical methods of microwave measurements and optical methods of Mandelstam-Brillouin spectroscopy. For the construction of theoretical models, the following methods are used: the method of coupled waves, the method of crosslinking magnetic permeability at the boundaries of layers, the method of transmission matrices, long-wave approximation. *Results.* The presented results are of general scientific importance for understanding the basic laws of the joint influence of coupling, periodicity and interactions of different physical nature (the influence on the magnetostatic wave of deformation in periodic structures with piezoelectric, electromagnetic wave in structures with ferroelectric, electric current in structures with semiconductor, spin current in structures with normal metal). In applied terms, the identified effects open up wide opportunities for creation of new devices of spin-wave electronics with the possibility of dynamic control of characteristics when changing the electric and magnetic fields, as well as the power of the input signal. *Conclusions.* The review of the most interesting results obtained by the authors together with Yuri Pavlovich and which are an ideological continuation of the foundations laid by him is given.

Keywords: ferromagnetic film, magnetostatic wave, magnonic crystal, semiconductor, ferroelectric, piezoelectric, normal metal.

Acknowledgements. This work was supported by Russian Science Foundation, grant №19-79-20121 (experimental studies) and Russian Foundation for Basic Research, grant №19-29-03049-mk (theoretical studies).

For citation: Morozova MA, Matveev OV. Resonant and nonlinear phenomena during the propagation of magnetostatic waves in multiferroic, semiconductor and metallized structures based on ferromagnetic films and magnonic crystals. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2022;30(5):534–553. DOI: 10.18500/0869-6632-003003

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

В данной статье приведен краткий обзор нового и плодотворного научного направления в магнонике, которое выросло из работ Шараевского Юрия Павловича и связано с исследованиями резонансных и нелинейных явлений при распространении магнитостатических волн в ферромагнитных плёнках, ферромагнитных плёнках с периодическими неоднородностями (магنونных кристаллах), связанных (слоистых и латеральных) ферромагнитных структурах, а также ферромагнитных структурах со слоями другой физической природы (полупроводниковых, сегнетоэлектрических, пьезоэлектрических, слоев нормального металла). В широко известной монографии «Магнитостатические волны в электронике СВЧ» [1] Вашковским А. В., Стальмаховым В. С., Шараевским Ю. П. был заложен фундамент для развития, в частности, и данного направления, получены основополагающие закономерности, открывшие широкие возможности для дальнейших работ многих ученых как в нашей стране, так и за рубежом. Практически все идеи, изложенные в монографии, пошли в народ, получили дальнейшее развитие, явились толчком

для огромного количества важных открытий в этой области, сделанных позднее как учениками Юрия Павловича Шараевского, так и в других научных группах. Авторам статьи посчастливилось учиться и работать с этим уникальным человеком. Для нас Юрий Павлович явился не только мудрым учителем, но и идейным вдохновителем, настоящим гуру! Наш путь в науке полностью определила тесная работа с этим неординарным учёным, долгие научные обсуждения, споры, поиск истины, а затем удивительные открытия. В настоящей статье приводится выборочный обзор наиболее интересных, на наш взгляд, результатов, полученных авторами совместно с Юрием Павловичем и являющихся идейным продолжением заложенных им основ.

В последние годы магноники — новое направление в электронике — привлекает широкое внимание исследователей. В устройствах магноники для передачи сигнала используются спиновые волны [1–5]. Работы в данной области являются чрезвычайно актуальными, поскольку в перспективе позволят разработать новое поколение приборов и устройств передачи и обработки данных, с характеристиками, которые невозможно было получить ранее. В отличие от обычных СВЧ-приборов, спин-волновые или магنونные приборы имеют расширенные возможности, благодаря управлению как с помощью внешнего магнитного поля, так и при воздействиях иной физической природы (например, деформаций, электромагнитных волн, электрического и спинового тока). Более того, многие полупроводниковые интегральные технологии могут легко совмещаться с устройствами на основе принципов магноники.

Одной из основных структур, предлагаемых для создания магنونной компонентной базы, являются магنونные кристаллы (МК, magnonic crystal — MC) — периодические структуры на основе магнитных материалов [6–8]. МК, за счёт формирования запрещённых зон (ЗЗ) — полос непропускания в спектре спиновых волн, являются функционально более гибкими и обладают большими возможностями для управления характеристиками, по сравнению с однородными магнитными структурами. В этом случае важной является задача управления характеристиками запрещённых зон в спектре распространяющихся волн. Управление характеристиками запрещённых зон предлагалось осуществлять как статически, например, за счёт изменения геометрических параметров, изменения материалов, изменения граничных условий, создания дефектов, так и динамически, например, с помощью магнитного и электрического поля, создания температурного градиента, распространения акустических волн и т. д.

Наиболее перспективными ферромагнитными материалами для задач магноники являются нано- и микроплёнки железиттриевого граната (ЖИГ) в связи с предельно низкими СВЧ-потерями и слабой магнитной анизотропией [9]. Нелинейные эффекты в плёнках ЖИГ проявляются при сравнительно малых уровнях входной мощности. Основными нелинейными эффектами в МК в области четырёхмагنونных процессов распада являются нелинейный сдвиг запрещённых зон и формирование щелевых солитонов [10, 11].

Альтернативным способом управления характеристиками ЗЗ и нелинейных волновых процессов в МК может быть использование нагрузок разной физической природы.

Если в качестве нагрузки используется второй ферромагнитный слой (ферромагнитная плёнка или МК), структура представляет собой связанную ферромагнитную структуру. За счёт связи между магнитными каналами существенно меняются динамические свойства волновых процессов и реализуются новые типы спин-волновых возбуждений. Связанные структуры существенно расширяют функциональные возможности радиофизических систем, так как появляется дополнительный управляющий параметр — связь. Исследования связанных ферромагнитных структур являются актуальными в связи с возрастающей необходимостью объединения отдельных магنونных элементов обработки сигналов в магنونные сети [12, 13].

Магнитный способ управления может быть реализован в широком диапазоне частот, но при этом управление осуществляется сравнительно медленно и требует значительного энергопотреб-

ления. В свою очередь, электрический способ управления быстрее магнитного. Для реализации электрического управления линейными и нелинейными спин-волновыми возбуждениями, в ферромагнитных структурах на основе однородных (непериодических) ферромагнитных пленок используют нагрузки, свойствами которых можно управлять путём приложения электрического поля. Такими нагрузками могут быть: сегнетоэлектрические (СЭ, FE) и пьезоэлектрические (ПЭ, PE) слои, слои полупроводникового (ПП, SC) материала, нормальные металлы (НМ, NM). Физические механизмы влияния электрического поля, приложенного к нагрузке, на характер спин-волновых процессов в ферромагнитной плёнке в каждом случае будут различны.

В случае феррит-сегнетоэлектрических мультиферроидных структур на основе ферромагнитной плёнки и слоя СЭ, электромагнитная волна, распространяющаяся в слое СЭ, оказывает влияние на спектральные характеристики спиновых волн в ферромагнитной плёнке [14]. На частотах, близких к частоте фазового синхронизма электромагнитной волны и спиновой волны, возникают гибридные электромагнитно-спиновые волны (ГЭМСВ, HEMSW).

Деформация в пьезоэлектрической нагрузке за счёт магнитоупругого эффекта приводит к изменению внутреннего магнитного поля в ферромагнитной плёнке с магнитострикцией. Непериодические структуры типа ферромагнитная плёнка/ПЭ легли в основу нового направления микро- и нанoeлектроники — стрейнтроники [15].

Электронный транспорт в полупроводниковых нагрузках, за счёт действия силы Лоренца, приводит к изменению затухания и спектральных характеристик спиновых волн. В периодических ферромагнитных структурах с ПП-нагрузками теоретически показана возможность создания и подавления ЗЗ в спектре спиновых волн [16]. Современные технологии разработки ЖИГ-полупроводниковых структур, подтверждают возможность интеграции КМОП (CMOS) электроники и магноники [17].

Другой способ справиться с затуханием лежит в области спинтроники (или спиновой электроники). В устройствах спинтроники наряду с зарядом используется спин частиц, связанный с наличием у него собственного механического момента. Спиновый ток в нормальном металле, за счёт передачи спинового крутящего момента на интерфейсе ферромагнитная пленка/НМ может приводить к усилению либо ослаблению спиновых волн в ферромагнитной пленке [18].

Таким образом, задачи, которые рассматриваются в обзоре и посвящены исследованию линейных и нелинейных волн в периодических ферромагнитных структурах, а также в мультиферроидных структурах и гетероструктурах на основе полупроводника или нормального металла, являются важными и представляют значительный научный интерес. Исследуемые структуры обладают как преимуществами периодических структур (формирование запрещенных зон, щелевых солитонов), преимуществами связанных структур (пространственная перекачка мощности), так и преимуществами взаимодействий возбуждений разной физической природы (влияние на спиновую волну деформации в структурах с ПЭ, электромагнитной волны в структурах с СЭ, электрического тока в структурах с ПП, спинового тока в структурах с НМ). Таким образом, исследуемые структуры открывают новые потенциальные возможности по функциональной обработке спин-волновых СВЧ-сигналов, требующие детального фундаментального исследования. Это позволяет считать тему работы актуальной для современной радиофизики.

В работе приведен краткий обзор новых резонансных и нелинейных эффектов в гетероструктурах на основе магнетных кристаллов и слоёв, характеристиками которых можно управлять с помощью магнитного и электрического поля (ферромагнитных, сегнетоэлектрических, пьезоэлектрических, полупроводниковых, слоёв на основе нормальных металлов), а также механизмов совместного влияния связи, периодичности и взаимодействий разной физической природы, которые позволяют эффективно управлять волновыми процессами для создания устройств СВЧ-электроники с новыми функциональными возможностями на принципах магноники.

1. Связанные ферромагнитные пленки

В последние годы связанные ферромагнитные структуры активно предлагаются для задач нанoeлектроники и наноразмерной магноники, например, в качестве делителей мощности, направленных ответвителей, бинарных логических элементов [13, 19]. Однако первые шаги в систематизации теоретических и экспериментальных подходов к исследованию многослойных ферромагнитных систем приведены в [1]. В дальнейшем это направление также получило развитие (например, в СГУ под руководством Юрия Павловича Шараевского) в области нелинейной динамики. В частности, построена нелинейная волновая модель для описания спин-волновой эволюции прямых объемных магнитоэстатических волн (ПОМСВ) и поверхностных МСВ (ПМСВ) в связанной ферромагнитной структуре. Модель представляет собой систему волновых уравнений для амплитуд огибающих симметричной и антисимметричной волн с линейной и нелинейной (когерентной либо некогерентной) связью. На основе численного решения волновых уравнений выявлены такие нелинейные эффекты, как эффект захвата, эффект сопровождения, нелинейные биения, модуляционная неустойчивость [20–22].

В последние годы интенсивное развитие экспериментальной базы Саратовского университета позволило провести и детальные экспериментальные исследования многослойных ферромагнитных структур. Так, при использовании установки мандельштам–бриллюэновской спектроскопии, позволяющей исследовать пространственно-временное распределение интенсивности спиновых волн в плоскости ферромагнитных микроструктур, был обнаружен эффект подавления пространственной перекачки мощности между слоями структуры при увеличении мощности входного сигнала [23].

Структура из ферромагнитных пленок ФП-1/ФП-2 (FF-1/FF-2) была сформирована на основе плёнок ЖИГ толщиной 12 мкм, разделенных пластиной слюды толщиной 50 мкм. Сигнал подавался на вход ФП-1. На рис. 1, а приведена карта пространственного распределения интенсивности рассеянного света (пропорционального интенсивности спиновой волны), полученная с помощью технологии мандельштам–бриллюэновской спектроскопии. При малой входной мощности в ФП-2

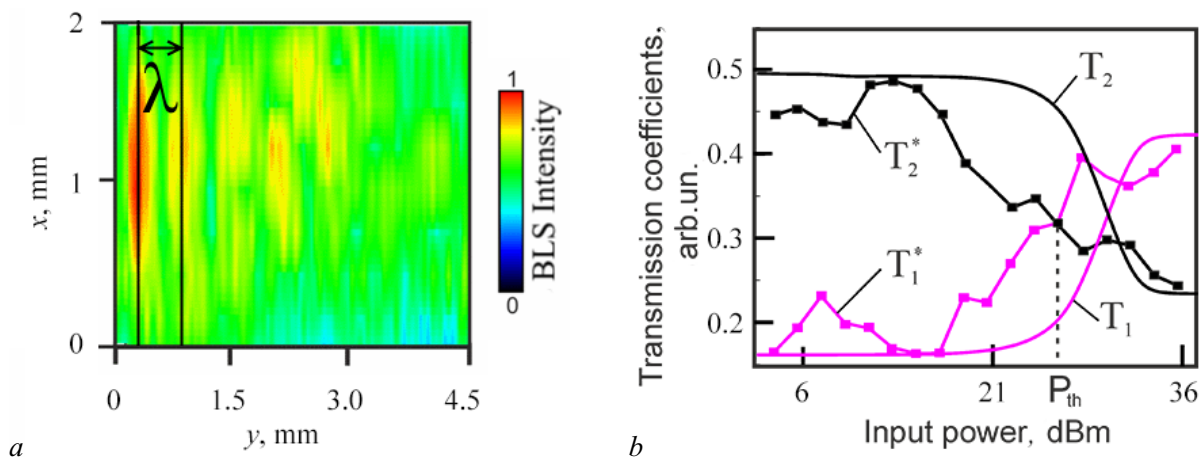


Рис. 1. а – Распределение интенсивности спиновых волн в ФП-2 при входной мощности $P_{in} = 6$ дБм. б – Экспериментальная (точечные кривые) и теоретическая (сплошные кривые) зависимости коэффициентов пропускания для ФП-1 (розовые кривые) и ФП-2 (черные кривые) от мощности входного сигнала (цвет online)

Fig. 1. а – The distribution of the intensity of spin waves in the FF-2 at an input power of $P_{in} = 6$ dBm. б – Experimental (point curves) and theoretical (solid curves) dependences of the transmission coefficients for FF-1 (pink curves) and FF-2 (black curves) on the input signal power (color online)

видна картина чередующихся максимумов и минимумов (с пространственным периодом λ) интенсивности вдоль направления распространения y , что объясняется периодической перекачкой сигнала между ФП-1 и ФП-2. При большой мощности периодическое распределение сигнала в пленках не наблюдается. Выберем точку наблюдения в максимуме сигнала в ФП-2 при малой входной мощности, например, на расстоянии $l = 3\lambda/2$ от входа. На этом расстоянии весь сигнал, который подавался в ФП-1, перекачался в ФП-2. На рис. 1, *b* приведена зависимость коэффициентов пропускания ФП-1 и ФП-2 от мощности входного сигнала P_{in} . Видно, что существует такая пороговая мощность P_{th} , при которой коэффициенты пропускания равны. При уровне входного сигнала выше порогового большая часть мощности сосредоточена в ФП-1. Следовательно, имеет место эффект подавления перекачки. На основе теоретической модели показано, что механизм эффекта подавления обусловлен увеличением разности фаз между сигналами в каждой плёнке.

2. Магنونные кристаллы

Появление термина «магنونный кристалл», как периодической ферромагнитной структуры, принято связывать с работами Никитова С. А. [6, 24]. В ранних работах Ю. П. Шараевского также сообщается о исследованиях ферромагнитных структур с периодическими граничными условиями [1, 25]. На базе Саратовского университета под руководством Юрия Павловича активно проводились теоретические и экспериментальные исследования магنونных кристаллов.

Исследованы особенности формирования брэгговских запрещенных зон, а также ряд нелинейных эффектов, таких как нелинейный сдвиг запрещенной зоны и нелинейного переключения (между режимами пропускания и непропускания МК) при увеличении мощности входного сигнала. Особое внимание уделялось таким важным нелинейным эффектам, как модуляционная неустойчивость и формирование щелевых солитонов. Щелевые солитоны — это солитоны огибающей спиновой волны, которые формируются за счёт эффективного взаимодействия прямой и отраженной от неоднородностей спиновых волн на частотах, лежащих в запрещенной зоне в линейном случае. Впервые показана возможность формирования щелевых солитонов в МК в работе [26]. При малой входной мощности (фиолетовая кривая на рис. 2) сигнал отражается от МК, как от линейной брэгговской решетки (импульсы 1 и 2 соответствуют фронту и срезу входного прямоугольного импульса). При увеличении входной амплитуды имеет место формирование щелевого солитона (импульсы GS на рис. 2). Скорость щелевого солитона растёт с увеличением амплитуды (задержка $\Delta\tau$ — уменьшается). Проводились также и экспериментальные наблюдения щелевых солитонов в МК на основе пленки ЖИГ толщиной 10 мкм с глубиной канавки 1 мкм и периодом 200 мкм.

Рассмотрены особенности распространения магнитоэлектрических волн в МК с дефектами.

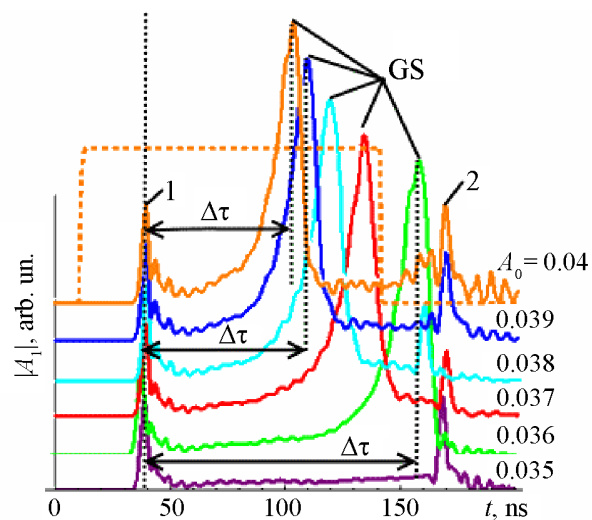


Рис. 2. Профили входного импульса (пунктирная кривая) и импульса на выходе МК (сплошные кривые) при разной амплитуде входного импульса (цвет online)

Fig. 2. Profiles of the input pulse (dotted curve) and the pulse at the MC output (solid curves) at different input pulse amplitudes (color online)

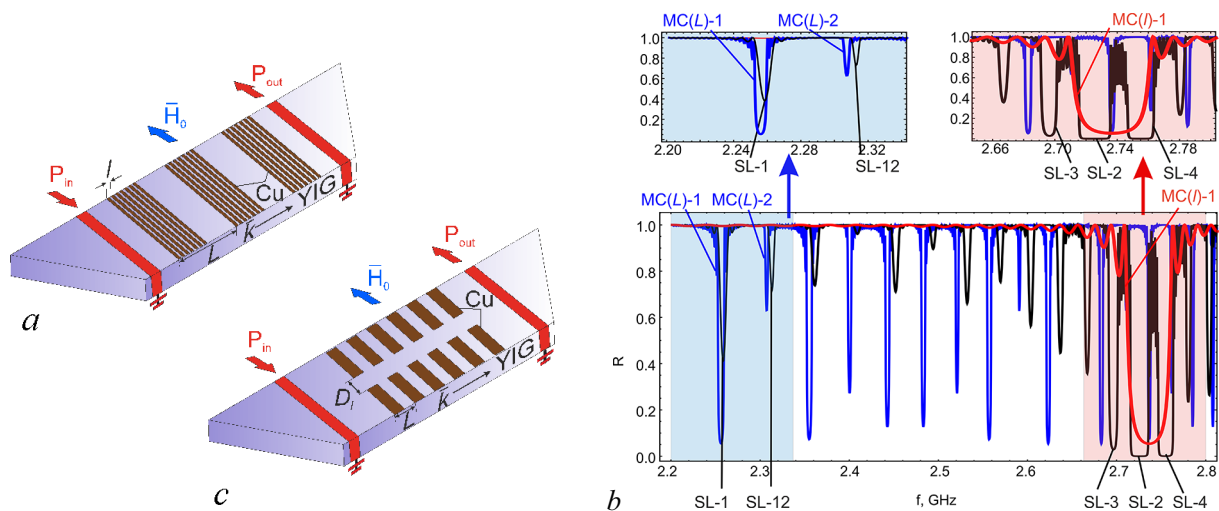


Рис. 3. Схемы магнной суперрешетки (a) и МК с распределенным дефектом (c). b — Передаточные характеристики ПМСВ в МК с периодом l (красные кривые), МК с периодом L (синие кривые) и в магнной суперрешетке (черные кривые) (цвет online)

Fig. 3. Schemes of magnon superlattice (a) and MC with a line defect (c). b — Transfer characteristics of the MSSW in the MC with period l (red curves), MC with period L (blue curves) and in the magnon superlattice (black curves) (color online)

В частности, рассмотрен МК с периодической системой дефектов — магнной суперрешетке (рис. 3, a) [27]. Методом сшивания магнных проницаемостей, изложенном в [1], получено дисперсионное соотношение для ПМСВ в суперрешетке с периодическими граничными условиями в виде системы металлических полосок с двумя периодами (l и L). Показано, что в такой структуре имеет место формирование двух запрещенных зон при волновых числах и частотах, отличных от брэгговских для МК с периодами l и L (закрашенные области SL-3 и SL-4 на рис. 3, b), и двух зон — при волновых числах и частотах, совпадающих с брэгговскими (SL-1 и SL-2 на рис. 3, b). Частотный интервал и интервал волновых чисел между SL-3 и SL-4 определяется отношением периодов l и L . Исследованы нелинейные эффекты при распространении спиновых волн в такой структуре [28].

Рассмотрен МК с периодическими граничными условиями в виде металлических полосок, содержащий распределенный дефект (рис. 3, c) [29]. Распределенный дефект формировался путем разрыва ферромагнитной пленки с периодическими граничными условиями и формирования области пленки с однородными граничными условиями. Построена волновая модель, проведено экспериментальное исследование. Показано, что в зависимости от ширины дефекта (D_l) ЗЗ может формироваться как выше по частоте, так и ниже по частоте, относительно ЗЗ ПМСВ в МК без дефекта.

3. Связанные магнные кристаллы

Одним из ключевых направлений исследований в научной группе под руководством Юрия Павловича являлось исследование связанных магнных кристаллов. Причем объектом исследования были как латеральные связанные структуры, ферромагнитные волноводы в которых находятся в одной плоскости, так и многослойные сэндвич-структуры.

Построена теоретическая модель для описания спин-волновой эволюции и получены дисперсионные соотношения для ПМСВ и ПОМСВ. Модель представляет собой систему четырех уравнений, связь между которыми определяется двумя линейными коэффициентами связи: первым — электродинамическим, обусловленным связью между МСВ, распространяющимися в

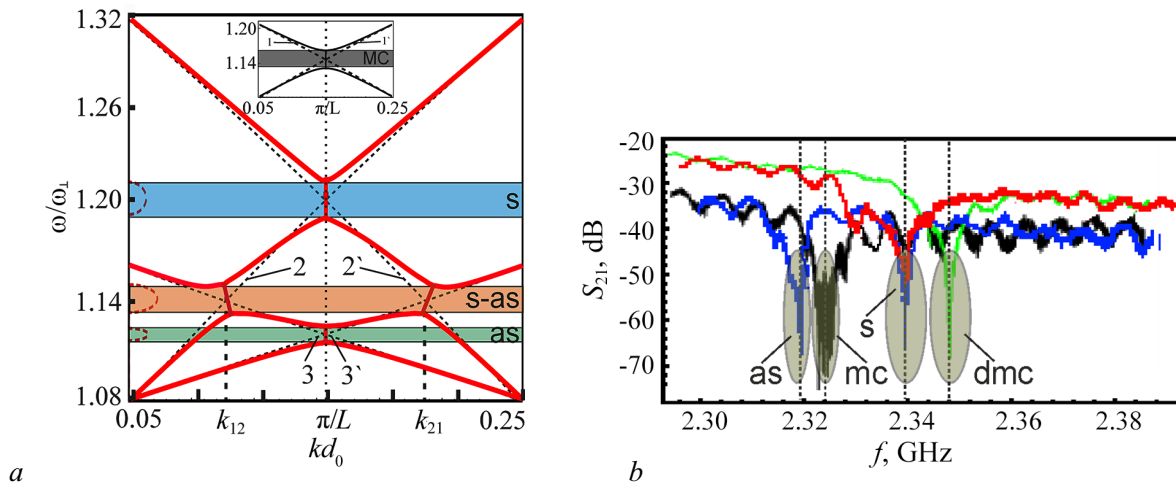


Рис. 4. *a* — Теоретические дисперсионные характеристики ПМСВ в МК-1/МК-2 с периодом L . На вставке — характеристики ПМСВ в одиночном МК. *b* — Экспериментальные АЧХ ПМСВ в латерально связанных МК-1 и МК-2 при возбуждении симметричной волны (красная кривая) и при возбуждении симметричной и антисимметричной волн (синяя кривая), а также в одиночном МК (черная кривая) и МК удвоенной ширины (зеленая кривая). Области ЗЗ выделены овалами (цвет online)

Fig. 4. *a* — Theoretical dispersion characteristics of MSSW in MC-1/MC-2 with period L . On the insert there are characteristics of the MSSW in a single MC. *b* — Experimental frequency response of MSSW in laterally coupled MC-1 and MC-2 with excitation of a symmetric wave (red curve) and with excitation of symmetric and antisymmetric waves (blue curve), as well as in a single MC (black curve) and a double-width MC (green curve). The band gaps are highlighted by ovals (color online)

разных МК, и зависящим от толщины диэлектрика (χ), вторым — определяющим связь между прямыми и отраженными волнами в одном МК, которая зависит от геометрических размеров периодической «ячейки» (κ).

На основе теоретического и экспериментального исследования выявлен механизм формирования запрещенных зон. На рис. 4, *a* приведены дисперсионные характеристики для симметричной (пунктирная линия 2) и антисимметричной (пунктирная линия 3) нормальных волн в связанных однородных пленках. Соответствующие характеристики для отраженных волн обозначены 2' и 3'. На частотах фазового синхронизма взаимодействие четырех описанных типов волн приводит к формированию ЗЗ (s, as, s/as, показаны заливкой). Возможно формирование одной, двух, трёх либо четырех ЗЗ в области первого брэгговского резонанса. На вставке к рис. 4, *a* показана дисперсионная характеристика для ПМСВ в одном МК. В этом случае за счёт взаимодействия прямой (линия 1) и отраженной (линия 1') волн формируется одна ЗЗ (mc, показана заливкой) [30]. Рассмотрено влияние способа возбуждения (возбуждение одной либо двух нормальных мод) на формирование запрещенных зон. Так, при возбуждении только симметричной нормальной волны (сигналы равной мощности в фазе подаются в МК-1 и МК-2) наблюдается одна запрещённая зона (красная кривая на рис. 4, *b*). При возбуждении двух нормальных волн (сигнал подается в МК-1 либо в МК-2) наблюдаются две запрещённые зоны — запрещённая зона для симметричных волн и запрещённая зона для антисимметричных волн (синяя кривая на рис. 4, *b*) [31].

Рассмотрены особенности нелинейных процессов при распространении МСВ в слоистой структуре МК-1/МК-2 (рис. 5, *a*). Построена нелинейная волновая модель для описания пространственно-волновой эволюции ПОМСВ и ПМСВ. Модель представляет собой систему из четырех уравнений связанных волн, описывающих линейную и нелинейную связь между амплитудами огибающих прямых и отраженных волн в МК-1/МК-2. На основе численного решения волновых уравнений и проведения экспериментальных исследований выявлены такие нелиней-

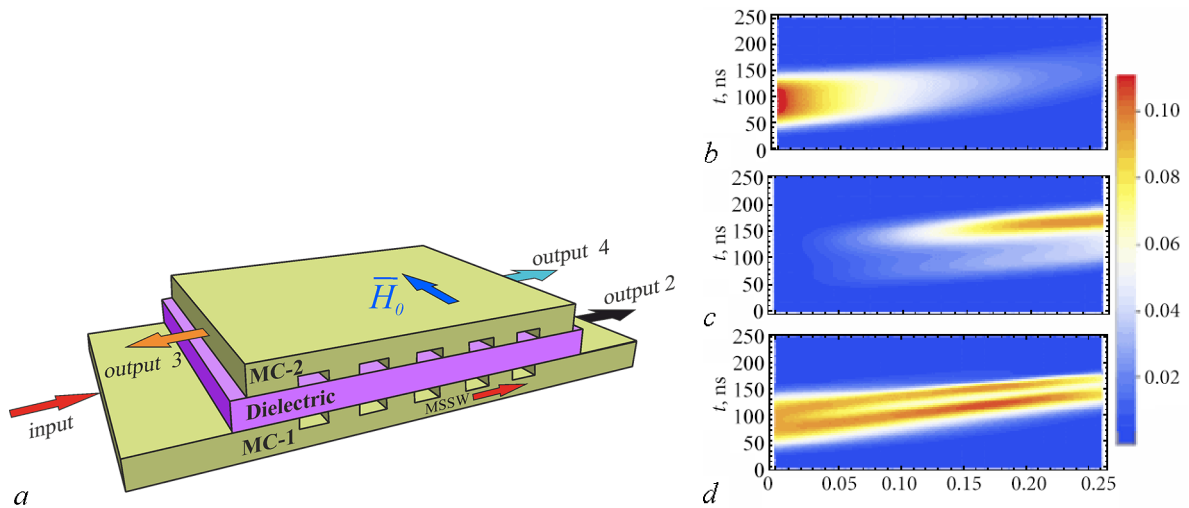


Рис. 5. *a* – Схема структуры МК-1/МК-2. Пространственно-временная эволюция амплитуды огибающей прямой волны в МК-2 при амплитуде входного сигнала $A_0 = 0.01$ (*b*) и $A_0 = 0.04$ (*c*); *d* – в МК-1 при $A_0 = 0.07$ (цвет online)

Fig. 5. *a* – Scheme of the MC-1/MC-2 structure. The spatiotemporal evolution of the amplitude of the envelope of the forward wave in MC-2 at the amplitude of the input signal $A_0 = 0.01$ (*b*) and $A_0 = 0.04$ (*c*); *d* – in MC-1 at $A_0 = 0.07$ (color online)

ные эффекты, как одиночное и двойное нелинейные переключения (рис. 5, *b, c, d*), нелинейная перекачка щелевых солитонов.

В частности, показано, что в структуре МК-1/МК-2, в зависимости от коэффициентов связи, описывающих линейную связь между прямыми и отраженными волнами в МК-1 (МК-2) (параметр κ) и между прямыми (отраженными) волнами в соседних слоях (параметр χ), реализуются различные режимы разделения сигнала по двум либо трём портам связанной структуры при увеличении входной мощности (рис. 6). Возможно «одиночное нелинейное переключение» типа 1 (область параметров SS-1 на рис. 6) – при малой входной мощности импульс отражается от МК-1, при большой – выходит из МК-1; «одиночное нелинейное переключение» типа 2 (область SS-2 на рис. 6) – при малой входной мощности импульс выходит из МК-2, при большой – из МК-1. Если коэффициенты связи близки по величине, возможен эффект «двойного нелинейного переключе-

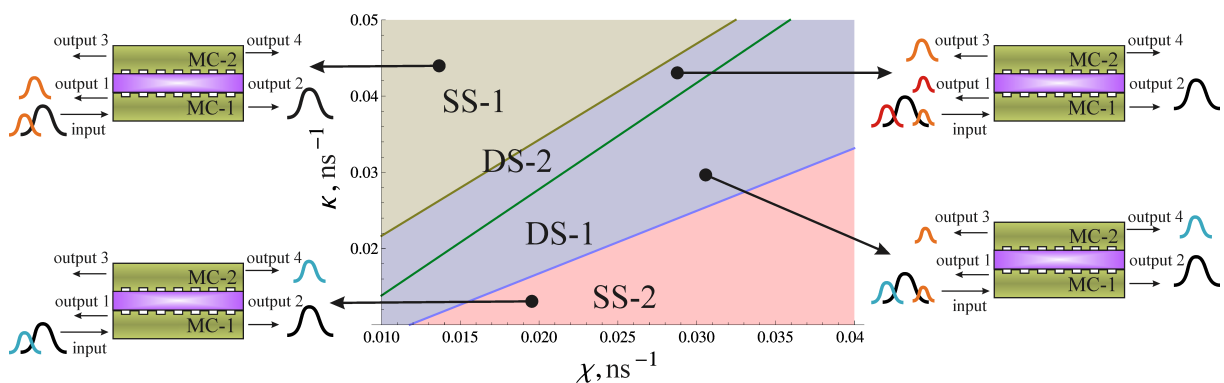


Рис. 6. Карта параметров (κ, χ), иллюстрирующая различные режимы нелинейных переключений при увеличении амплитуды входного сигнала. На вставках – схемы структуры МК-1/МК-2 (проекция zy) (цвет online)

Fig. 6. A parameter map (κ, χ) illustrating various regimes of nonlinear switching with an increase in the amplitude of the input signal. On the inserts there are schemes of the MC-1/MC-2 structures (zy projection) (color online)

ния». При «двойном нелинейном переключении» типа 1 (область DS-1 на рис. 6) — при малой входной мощности импульс отражается от МК-2 (см. рис. 5, b), при увеличении входной мощности имеет место первое переключение — импульс проходит через связанную структуру и выходит из МК-2 (см. рис. 5, c), при дальнейшем увеличении мощности имеет место второе переключение — импульс выходит из МК-1 (см. рис. 5, d). При «двойном нелинейном переключении» типа 2 (область параметров DS-2 на рис. 6) — при малой входной мощности импульс отражается от МК-1, при увеличении входной мощности имеет место первое переключение — импульс отражается от МК-1, при дальнейшем увеличении амплитуды имеет место второе переключение — импульс выходит из МК-2. Основным механизмом эффекта двойного нелинейного переключения является одновременное проявление нелинейных эффектов, характерных для одиночного МК и для двух однородных плёнок, имеющих разные пороговые мощности [32].

В дальнейшем, развитие технологии мандельштам-бриллюэновской спектроскопии позволило наблюдать эффект «двойного нелинейного переключения» типа 1 [33]. Эффект двойного нелинейного переключения типа 1 позволяет рассматривать структуру МК-1/МК-2 в качестве базового элемента для систем многофункциональной обработки сигналов. Структура МК-1/МК-2 является четырехпортовой структурой с одним входом и четырьмя выходами (см. рис. 5, a). При снятии сигнала с порта 3 структура выполняет функции ограничителя мощности, при снятии сигнала с порта 4 имеет место выделение сигналов в некотором диапазоне мощностей, при снятии сигнала с порта 2 — подавление слабых сигналов. При снятии сигнала со всех портов структура позволяет выполнять функции пространственного разделения сигналов разного уровня мощности: сигнал малой мощности будет выходить с порта 3, сигнал большой мощности — с порта 2, средней мощности — с порта 4.

4. Структуры магнонный кристалл/полупроводник и магнонный кристалл/нормальный металл

Важным направлением, которое было заложено в ранних работах Юрия Павловича, является исследование влияния различных нагрузок конечной проводимости на волны, распространяющиеся в ферромагнитных пленках [34, 35]. Такие нагрузки могут представлять собой как металлические, так и полупроводниковые экраны. В этом случае актуальным является исследование влияния упорядоченного движения зарядов — электрического тока в полупроводнике и упорядоченного движения спинов — спинового тока в НМ на распространение магнитоэлектрических волн в МК.

В частности, рассматривается влияние электрического тока на распространение ПМСВ в МК, нагруженном слоем ПП (МК/ПП). Методом сшивания магнитных проницаемостей на границах слоев, впервые изложенном в [1], получено дисперсионное соотношение, построена нелинейная волновая модель для описания пространственно-временной эволюции огибающей в исследуемой структуре. Для экспериментального исследования использовалась структура на основе МК, нагруженного пластиной легированного кремния, через которую пропускать электрический ток. На АЧХ ПМСВ в такой структуре в отсутствие тока виден ярко выраженный минимум, который соответствует запрещенной зоне (красная кривая на рис. 7, a). Если движение зарядов в ПП сонаправлено с распространением ПМСВ, ЗЗ сдвигается в низкочастотную область. Противоположное направление движения зарядов в ПП никак не влияет на положение ЗЗ [36].

Проведены исследования нелинейных явлений в МК/ПП. Показано, что при увеличении входной мощности имеет место формирование щелевого солитона (импульсы GS на рис. 7, b). Порог формирования, скорость и амплитуда солитона определяется скоростью и направлением движения зарядов в ПП [37].

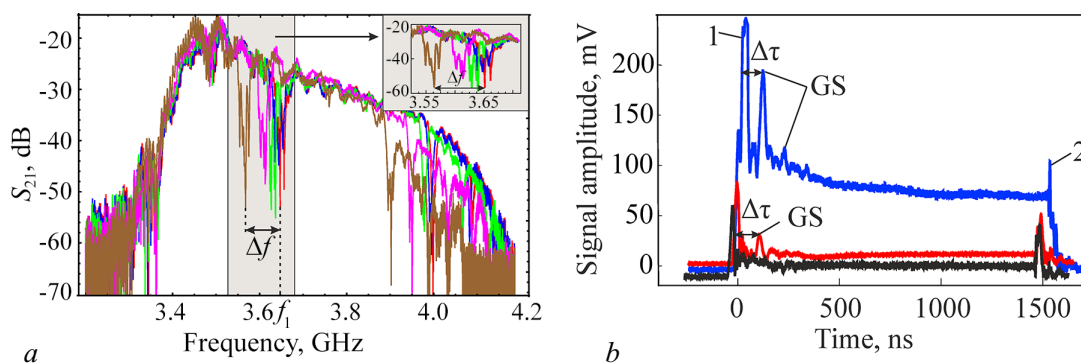


Рис. 7. *a* – АЧХ ПМСВ в структуре МК/ПП при входной мощности 11 дБм и напряженности электрического поля: 0 (красная кривая), 2.5 кВ/см (синяя кривая), 5 кВ/см (зеленая кривая), 7.5 кВ/см (розовая кривая), 10 кВ/см (коричневая кривая). *b* – Временные профили выходных импульсов при различных уровнях входной мощности и напряженности: 11 дБм и 0 кВ/см (черная кривая), 23 дБм и 0 кВ/см (красная кривая), 30 дБм и 0.2 кВ/см (синяя кривая)

Fig. 7. *a* – MSSW frequency response in the structure MC/SC at an input power of 11 dBm and electric field strength: 0 (red curve), 2.5 kV/cm (blue curve), 5 kV/cm (green curve), 7.5 kV/cm (pink curve), 10 kV/cm (brown curve). *b* – Time profiles of output pulses at different input power and voltage levels: 11 dBm and 0 kV/cm (black curve), 23 dBm and 0 kV/cm (red curve), 30 dBm and 0.2 kV/cm (blue curve)

Рассмотрено влияние спинового тока на характер спин-волновых процессов при распространении МСВ в МК, нагруженном слоем нормального металла (МК/НМ). При протекании электрического тока в НМ, за счёт спинового эффекта Холла, в направлении, перпендикулярном электрическому току, протекает спиновый ток, связанный с движением электронов, обладающих заданным направлением спинов. Построена волновая модель, получено дисперсионное соотношение для ПМСВ в такой структуре. Рассмотрена возможность управления характеристиками запрещенных зон в МК с помощью спинового тока в НМ. Рассмотрено влияние спинового тока на нелинейные эффекты при распространении магнитоэлектрических волн в структурах типа МК/НМ и ФП-1/НМ/ФП-2.

5. Структуры магнетонный кристалл/сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл/пьезоэлектрик

Другим типом нагрузок, способным обеспечить электрическое управление характером спин-волновых возбуждений в ферромагнитных пленках, являются сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические нагрузки. В этом случае актуальным является исследование влияния электромагнитных волн в СЭ нагрузке и деформаций в нагрузке из ПЭ на распространение магнитоэлектрических волн в МК.

В структуре МК/СЭ, за счёт взаимодействия МСВ в МК и электромагнитной волны в СЭ образуется гибридная электромагнитно-спиновая волна. Построена волновая модель и получены дисперсионные соотношения для ГЭМСВ. Дисперсионная характеристика ГЭМСВ имеет две ветви, соответствующие быстрой и медленной волнам. Показано, что механизм формирования запрещенных зон в такой структуре заключается в следующем. За счет взаимодействия прямой (прямая 1 на рис. 8, *a*) и отраженной (прямая 1' на рис. 8, *a*) медленной ГЭМСВ на частоте фазового синхронизма (отмечена точкой *B*) образуется основная ЗЗ (механизм её формирования аналогичен механизму формирования ЗЗ в одиночном МК). За счет взаимодействия на частоте фазового синхронизма (отмечена точкой *C*) прямой быстрой ГЭМСВ (прямая 2) и отраженной медленной ГЭМСВ (прямая 1') образуется гибридная ЗЗ. В одиночном МК такая зона не формируется.

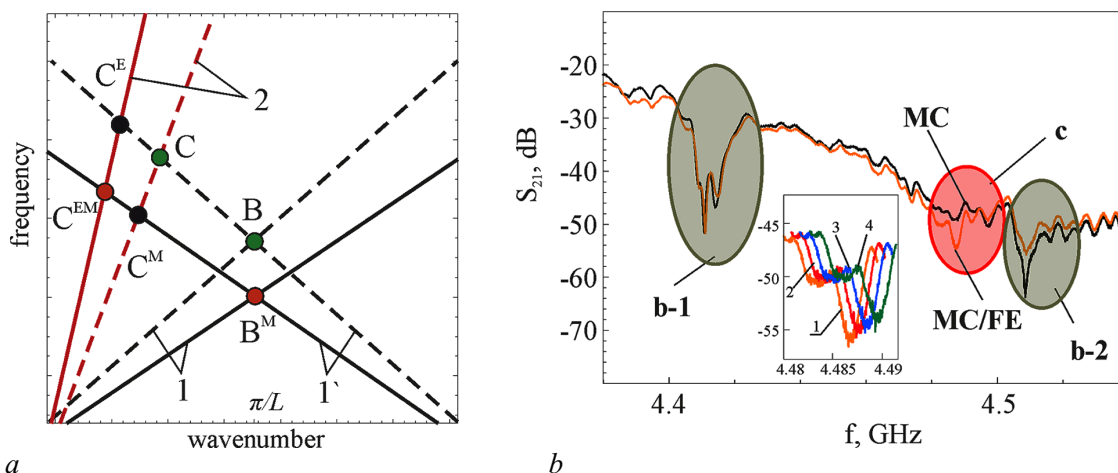


Рис. 8. *a* – Схематическое изображение дисперсионных характеристик прямой (линия 1) и отраженной (линия 1') медленных ГЭМСВ, а также прямой (линия 2) и отраженной быстрых ГЭМСВ. Пунктирными линиями показаны линейные режимы, сплошными – нелинейные. *b* – АЧХ ПМСВ в МК (черная кривая) и ГЭМСВ в структуре МК/СЭ (оранжевая кривая). На вставке – фрагмент АЧХ ГЭМСВ в МК/СЭ при напряженности электрического поля: 0 (кривая 1), 6 кВ/см (кривая 2), 12 кВ/см (кривая 3), 16 кВ/см (кривая 4). Области ЗЗ отмечены овалами (цвет online)

Fig. 8. *a* – Schematic representation of the dispersion characteristics of forward (line 1) and reflected (line 1') slow GEMSW, as well as forward (line 2) and reflected fast GEMSW. The dotted lines show linear regimes, the solid ones – nonlinear ones. *b* – The frequency response of MSSW in MC (black curve) and GEMSW in the structure MC/FE (orange curve). In the insert, there is the fragment of the frequency response of the GEMSW in MC/FE at the electric field strength: 0 (curve 1), 6 kV/cm (curve 2), 12 kV/cm (curve 3), 16 kV/cm (curve 4). The band gaps areas are marked with ovals (color online)

При учете только магнитной нелинейности увеличение амплитуды приводит к уменьшению намагниченности МК. В результате центр основной запрещенной зоны оказывается ниже по частоте (точка B^M), чем в линейном случае, показанном точкой. Центр гибридной запрещенной зоны (точка C) сдвигается вниз по частоте и по волновому числу и попадает в точку C^M . При учете только электрической нелинейности с увеличением амплитуды происходит уменьшение значения диэлектрической проницаемости СЭ (что характерно для непрозрачных диэлектриков). В этом случае положение центра гибридной зоны сдвигается вверх по частоте (точка C^E) и вниз по волновому числу, относительно линейного случая. На положение центра основной зоны электрическая нелинейность не влияет. При учете обоих типов нелинейности центр гибридной запрещенной зоны будет расположен, соответственно, в точке C^{EM} , а центр основной зоны – в точке B^M . Видно, что действие электрической нелинейности на положение гибридной запрещенной зоны противоположно действию магнитной нелинейности и, в общем случае, может ее скомпенсировать.

Показана возможность двойного управления (электрическим и магнитным полями) характеристиками запрещенных зон [38]. На экспериментальной АЧХ одиночного МК (черная кривая на рис. 8, *b*) видны провалы, соответствующие первой (b-1) и второй (b-2) основным брэгговским запрещенным зонам. При наложении слоя СЭ (пластины титаната бария стронция (БСТ)) на МК на АЧХ (оранжевая кривая) появляется дополнительный провал, соответствующий гибридной запрещенной зоне (*c*). При приложении электрического поля к слою СЭ гибридная запрещенная зона сдвигается вверх по частоте, как показано на вставке к рис. 8, *b*.

Рассмотрена структура типа МК-1/СЭ/МК-2 [39]. Дисперсионная кривая для ГЭМСВ в этом случае расщепляется на три ветви, соответствующие быстрой и двум медленным ГЭМСВ. На частотах фазового синхронизма, за счёт взаимодействия трёх прямых и трёх отраженных волн, формируется пять запрещенных зон (если структура симметричная), три из которых являются

основными, так как они формируются за счёт взаимодействия медленных ГЭМСВ и механизм их формирования аналогичен механизму формирования ЗЗ в структуре МК-1/МК-2. Две зоны являются гибридными, так как формируются за счёт взаимодействия быстрых и медленных ГЭМСВ и в структуре МК-1/МК-2 такие зоны не формируются.

Предложен принцип частотного мультиплексирования/демультиплексирования сигналов с магнитным и электрическим управлением на основе структуры МК/СЭ/ФП.

Рассмотрено влияние деформаций на распространение магнитостатических волн в МК. В частности, рассмотрено влияние магнитострикции ферромагнитной среды на характер спин-волновых процессов при распространении ПМСВ в МК. ПМСВ за счёт магнитострикции возбуждает поперечную упругую волну в МК. В свою очередь, за счёт взаимодействия МСВ и упругой волны образуется магнитоупругая волна. Построена теоретическая модель и выявлен механизм формирования дополнительных ЗЗ за счёт взаимодействия прямых и отраженных магнитоупругих волн.

Рассмотрено влияние деформации на характер спин-волновых процессов при распространении МСВ в МК, нагруженном слоем пьезоэлектрика (МК/ПЭ). При приложении электрического поля к слою ПЭ возникает деформация. Деформация передается МК с магнитострикцией, приводит к изменению внутреннего эффективного магнитного поля и оказывает влияние на характеристики ЗЗ. Получены дисперсионные соотношения для ПМСВ в МК/ПЭ. Продемонстрирована возможность двойного управления шириной и положением ЗЗ при изменении величины магнитного и электрического поля [40].

Показано, что если в структуре МК/ПЭ слой ПЭ обладает свойствами гистерезиса (на примере оксида гафния), то на основе такой структуры возможна реализация функций записи, хранения и считывания информации.

Заключение

Приведенные в обзоре результаты расширяют фундаментальные представления о физических процессах в периодических магнитных структурах. В частности, волновая модель, описывающая распространение магнитостатических волн в связанных магнетонных кристаллах, открывает возможность изучения широкого спектра нелинейных явлений, обусловленных влиянием связи и периодичности в слоистых периодических структурах на основе магнитных плёнок, а также может представлять интерес при исследовании нелинейных явлений в связанных периодических структурах различной физической природы.

Вместе с тем, представленные результаты имеют общенаучное значение для понимания основных закономерностей совместного влияния связи, периодичности и взаимодействий разной физической природы (влияние на спиновую волну деформации в периодических структурах с ПЭ, электромагнитной волны в структурах с СЭ, электрического тока в структурах с ПП, спинового тока в структурах с НМ).

В прикладном плане выявленные эффекты, открывают широкие возможности для создания новых устройств спин-волновой электроники в диапазоне СВЧ с возможностью динамического управления характеристиками при изменении электрического и магнитного поля, а также мощности входного сигнала. В частности, на базе структуры связанных магнетонных кристаллов возможно создание устройств пространственного разделения сигналов разного уровня мощности, подавления сигналов большой мощности, подавления слабых сигналов, выделения сигналов в некотором диапазоне мощностей [41]. На основе связанных магнетонного кристалла и ферромагнитной плёнки, разделенных слоем сегнетоэлектрика, возможно создание устройства, позволяющего осуществлять частотное мультиплексирование/демультиплексирование сигналов [42]. На основе

МК с пьезоэлектрической нагрузкой, обладающей свойством гистерезиса, может быть создан функциональный элемент, осуществляющий запись, хранение и считывание информации [43].

По нашему мнению, идеи Юрия Павловича, заложенные ещё в книге «Магнитостатические волны в электронике СВЧ» и нашедшие свое развитие в результатах, приведенных в данном обзоре, ещё не одно десятилетие будут вдохновлять учёных и давать пищу для ума и творческого поиска на благо фундаментальной и прикладной мировой науки!

Авторы выражают огромную благодарность и признательность д.ф.-м.н., профессору Ю. П. Шараевскому за огромный багаж знаний, творческое вдохновение, бесценные обсуждения и прорывные идеи, давшие возможность получения представленных результатов.

Список литературы

1. *Вашковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П.* Магнитостатические волны в электронике СВЧ. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1993. 312 с.
2. *Гуревич А. Г., Мелков Г. А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.
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. A., Sheshukova S. E., Duquesne J.-Y., Marangolo M., 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 // *J. Phys. Condens. Matter.* 2021. Vol. 33, no. 41. P. 413001. DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a.
4. *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.* Магноники — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // *УФН.* 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510m.1099.
5. *Никитов С. А., Сафин А. Р., Калябин Д. В., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Логунов М. В., Морозова М. А., Одинцов С. А., Осокин С. А., Шараевская А. Ю., Шараевский Ю. П., Кирилук А. И.* Диэлектрическая магноники — от гигагерцев к терагерцам // *УФН.* 2020. Т. 190, № 10. С. 1009–1040. DOI: 10.3367/UFNr.2019.07.038609.
6. *Гуляев Ю. В., Никитов С. А.* Магنونные кристаллы — спиновые волны в периодических структурах // *Доклады Академии наук.* 2001. Т. 380, № 4. С. 469–471.
7. *Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B.* Magnon spintronics // *Nature Physics.* 2015. Vol. 11, no. 6. P. 453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
8. *Krawczyk M., Grundler D.* Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // *J. Phys. Condens. Matter.* 2014. Vol. 26, no. 12. P. 123202. DOI: 10.1088/0953-8984/26/12/123202.
9. *Шараевский Ю. П., Морозова М. А., Гришин С. В.* Магнитостатические волны в электронике СВЧ // В кн.: *Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы* / под ред. Трубецкова Д. И., Храмова А. Е., Короновского А. А. Гл. 11. М.: Физматлит, 2009. С. 348–379.
10. *Chumak A. V., Serga A. A., Hillebrands B.* Magnonic crystals for data processing // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2017. Vol. 50, no. 24. P. 244001. DOI: 10.1088/1361-6463/aa6a65.

11. *Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A.* Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, no. 14. P. 142513. DOI: 10.1063/1.3386540.
12. *Sharaevskiy Y. P., Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Morozova M. A., Sheshukova S. E., Sharaevskaya A. Y., Grishin S. V., Romanenko V., Nikitov S. A.* Coupled spin waves in magnonic waveguides // In: Demokritov S. O. (ed) *Spin Wave Confinement: Propagating Waves*. 2nd ed. Ch. 2. New York: CRC Press, 2017. P. 47–76. DOI: 10.1201/9781315110820-3.
13. *Khitun A., Bao M., Wang K. L.* Magnonic logic circuits // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2010. Vol. 43, no. 26. P. 264005. DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264005.
14. *Nikitin A. A., Nikitin A. A., Kondrashov A. V., Ustinov A. B., Kalinikos B. A., Lähderanta E.* Theory of dual-tunable thin-film multiferroic magnonic crystal // *J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 122, no. 15. P. 153903. DOI: 10.1063/1.5000806.
15. *Бухараев А. А., Звездин А. К., Пятаков А. П., Фетисов Ю. К.* Стрейнтроника — новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах // *УФН*. 2018. Т. 188, № 12. С. 1288–1330. DOI: 10.3367/UFN.2018.01.038279.
16. *Гуляев Ю. В., Нукитов С. А.* Распространение поверхностных магнитостатических волн в пленках феррита с периодической полупроводниковой структурой // *ФТТ*. 1983. Т. 25, № 8. С. 2515–2517.
17. *Sidorenko A.* *Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics: From Superconducting Qubits to Self-Organized Nanostructures*. Cham: Springer, 2018. 270 p. DOI: 10.1007/978-3-319-90481-8.
18. *Zhou Y., Jiao H., Chen Y.-T., Bauer G. E. W., Xiao J.* Current-induced spin-wave excitation in Pt/YIG bilayer // *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 88, no. 18. P. 184403. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.184403.
19. *Wang Q., Pirro P., Verba R., Slavin A., Hillebrands B., Chumak A. V.* Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler // *Science Advances*. 2018. Vol. 4, no. 1. P. e1701517. DOI: 10.1126/sciadv.1701517.
20. *Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Шешукова С. Е., Жаманова М. К.* Исследование эффектов самовоздействия магнитостатических волн в ферромагнитной структуре на основе системы уравнений Шредингера с когерентной или некогерентной связью // *ФТТ*. 2012. Т. 54, № 8. С. 1478–1486.
21. *Бегинин Е. Н., Морозова М. А., Шараевский Ю. П.* Нелинейные эффекты самовоздействия волн в 2D-связанных ферромагнитных структурах // *ФТТ*. 2010. Т. 52, № 1. С. 76–82.
22. *Шараевский Ю. П., Малюгина М. А., Яровая Е. В.* Модуляционная неустойчивость поверхностных магнитостатических волн в структурах типа ферромагнетик–диэлектрик–ферромагнетик // *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32, № 3. С. 33–39.
23. *Morozova M. A., Romanenko D. V., Matveev O. V., Grishin S. V., Sharaevskiy Y. P., Nikitov S. A.* Suppression of periodic spatial power transfer in a layered structure based on ferromagnetic films // *J. Magn. Magn. Mater.* 2018. Vol. 466. P. 119–124. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.06.077.
24. *Nikitov S. A., Tailhades P., Tsai C. S.* Spin waves in periodic magnetic structures–magnonic crystals // *J. Magn. Magn. Mater.* 2001. Vol. 236, no. 3. P. 320–330. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00470-X.
25. *Букесов С. А., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П.* Поверхностные магнитостатические волны в структуре с периодическими границами // Тез. Докл. III Всесоюзной школы — семинара «Спинволновая электроника СВЧ». Краснодар, 1987. С. 31–32.
26. *Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Шешукова С. Е.* Механизмы формирования солитонов огибающей в периодических ферромагнитных структурах // *Известия вузов. ПНД*. 2010. Т. 18, № 5. С. 111–120. DOI: 10.18500/0869-6632-2010-18-5-111-120.

27. *Morozova M. A., Sadovnikov A. V., Matveev O. V., Sharaevskaya A. Y., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Band structure formation in magnonic Bragg gratings superlattice // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. Vol. 53, no. 39. P. 395002. DOI: 10.1088/1361-6463/ab95c0.
28. *Morozova M. A., Matveev O. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A., Sadovnikov A. V.* Nonlinear signal processing with magnonic superlattice with two periods // *Appl. Phys. Lett.* 2022. Vol. 120, no. 12. P. 122407. DOI: 10.1063/5.0083133.
29. *Morozova M. A., Grishin S. V., Sadovnikov A. V., Romanenko D. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Band gap control in a line-defect magnonic crystal waveguide // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, no. 24. P. 242402. DOI: 10.1063/1.4937440.
30. *Morozova M. A., Sharaevskaya A. Y., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Romanenko D. V., Beginin E. N., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures // *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120, no. 22. P. 223901. DOI: 10.1063/1.4971410.
31. *Morozova M. A., Grishin S. V., Sadovnikov A. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Magnonic bandgap control in coupled magnonic crystals // *IEEE Trans. Magn.* 2014. Vol. 50, no. 11. P. 4007204. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2321611.
32. *Морозова М. А., Матвеев О. В., Шараевский Ю. П.* Распространение импульсов в нелинейной системе на основе связанных магнетонных кристаллов // *ФТТ.* 2016. Т. 58, № 10. С. 1899–1906.
33. *Morozova M. A., Matveev O. V., Romanenko D. V., Trukhanov A. V., Mednikov A. M., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Nonlinear spin wave switches in layered structure based on magnonic crystals // *J. Magn. Magn. Mater.* 2020. Vol. 508. P. 166836. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166836.
34. *Прокушкин В. Н., Шараевский Ю. П.* Поверхностные магнитостатические волны в ферритовой структуре с импедансными границами // *Радиотехника и электроника.* 1987. Т. 32, № 8. С. 1750–1752.
35. *Прокушкин В. Н., Шараевский Ю. П.* Влияние реактивной импедансной нагрузки на характеристики магнитостатических волн // *Радиотехника и электроника.* 1993. Т. 38, № 9. С. 1551–1553.
36. *Morozova M. A., Romanenko D. V., Serdobintsev A. A., Matveev O. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Magnonic crystal-semiconductor heterostructure: Double electric and magnetic fields control of spin waves properties // *J. Magn. Magn. Mater.* 2020. Vol. 514. P. 167202. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167202.
37. *Матвеев О. В., Романенко Д. В., Морозова М. А.* Линейные и нелинейные эффекты в структурах на основе магнетонных кристаллов и полупроводников // *Письма в ЖЭТФ.* 2022. Т. 115, № 5–6. С. 379–383. DOI: 10.31857/S1234567822060052.
38. *Morozova M. A., Grishin S. V., Sadovnikov A. V., Romanenko D. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A.* Tunable bandgaps in layered structure magnonic crystal–ferroelectric // *IEEE Trans. Magn.* 2015. Vol. 51, no. 11. P. 2802504. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2446763.
39. *Морозова М. А., Матвеев О. В., Шараевский Ю. П., Никитов С. А.* Управление запрещенными зонами в слоистой структуре магнетонный кристалл–сегнетоэлектрик–магнетонный кристалл // *ФТТ.* 2016. Т. 58, № 2. С. 266–272.
40. *Grachev A. A., Matveev O. V., Mruczkiewicz M., Morozova M. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sadovnikov A. V.* Strain-mediated tunability of spin-wave spectra in the adjacent magnonic crystal stripes with piezoelectric layer // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 118, no. 26. P. 262405. DOI: 10.1063/5.0051429.
41. *Морозова М. А., Матвеев О. В., Романенко Д. В., Шараевский Ю. П., Никитов С. А.* Устройство на магнитостатических волнах для пространственного разделения СВЧ-сигналов разного уровня мощности. Патент № 2702916 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/22 : заявл. 07.05.2019 : опубл. 14.10.2019. Заявитель: ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. 13 с.

42. *Бегинин Е. Н., Садовников А. В., Попов П. А., Шараевская А. Ю., Калябин Д. В., Стогний А. И., Морозова М. А., Никитов С. А.* Функциональный компонент магноники на многослойной ферромагнитной структуре. Патент № 2702915 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/218 : заявл. 25.01.2019 : опубл. 14.10.2019. Заявитель: ИПЭ им В. А. Котельникова РАН. 11 с.
43. *Морозова М. А., Матвеев О. В., Романенко Д. В., Медников А. М.* Наноразмерные мультиферроики для применения в магнонной нейроморфной архитектуре // *Наноиндустрия*. 2021. Т. 14, № S7(107). С. 685–687. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.685.687.

References

1. *Vashkovskii AV, Stalmakhov VS, Sharaevskii YP.* Magnetostatic Waves in Microwave Electronics. Saratov: Saratov University Publishing; 1993. 312 p. (in Russian).
2. *Gurevich AG, Melkov GA.* Magnetization Oscillations and Waves. Boca Raton: CRC Press; 1996. 464 p.
3. *Barman A, Gubbiotti G, Ladak S, Adeyeye AO, Krawczyk M, Gräfe J, Adelman C, Cotofana S, Naeemi A, Vasyuchka VI, Hillebrands B, Nikitov SA, Yu H, Grundler D, Sadovnikov AV, Grachev AA, Sheshukova SE, Duquesne JY, Marangolo M, Csaba G, Porod W, Demidov VE, Urazhdin S, Demokritov SO, Albisetti E, Petti D, Bertacco R, Schultheiss H, Kruglyak VV, Poimanov VD, Sahoo S, Sinha J, Yang H, Münzenberg M, Moriyama T, Mizukami S, Landeros P, Gallardo RA, Carlotti G, Kim JV, Stamps RL, Camley RE, Rana B, Otani Y, Yu W, Yu T, Bauer GEW, Back C, Uhrig GS, Dobrovolskiy OV, Budinska B, Qin H, van Dijken S, Chumak AV, Khitun A, Nikonov DE, Young IA, Zingsem BW, Winklhofer M.* The 2021 magnonics roadmap. *J. Phys. Condens. Matter*. 2021;33(41):413001. DOI: 10.1088/1361-648X/abec1a.
4. *Nikitov SA, Kalyabin DV, Lisenkov IV, Slavin AN, Barabanenkov YN, Osokin SA, Sadovnikov AV, Beginin EN, Morozova MA, Sharaevskiy YP, Filimonov YA, Khivintsev YV, Vysotsky SL, Sakharov VK, Pavlov ES.* Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics. *Phys. Usp.* 2015;58(10):1002–1028. DOI: 10.3367/UFNe.0185.201510m.1099.
5. *Nikitov SA, Safin AR, Kalyabin DV, Sadovnikov AV, Beginin EN, Logunov MV, Morozova MA, Odintsov SA, Osokin SA, Sharaevskaya AY, Sharaevskiy YP, Kirilyuk AI.* Dielectric magnonics: from gigahertz to terahertz. *Phys. Usp.* 2020;63(10):945–974. DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609.
6. *Gulyaev YV, Nikitov SA.* Magnonic crystals and spin waves in periodic structures. *Doklady Physics*. 2001;46(10):687–689. DOI: 10.1134/1.1415579.
7. *Chumak AV, Vasyuchka VI, Serga AA, Hillebrands B.* Magnon spintronics. *Nature Physics*. 2015;11(6):453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
8. *Krawczyk M, Grundler D.* Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure. *J. Phys. Condens. Matter*. 2014;26(12):123202. DOI: 10.1088/0953-8984/26/12/123202.
9. *Sharaevskii YP, Morozova MA, Grishin SV.* Magnetostatic waves in microwave electronics. In: *Trubetskov DI, Hramov AE, Koronovskii AA, editors. Methods of Nonlinear Dynamics and Chaos Theory in Problems of Microwave Electronics. Vol. 2. Nonstationary and Chaotic Processes. Ch. 11.* Moscow: Fizmatlit; 2009. P. 348–379 (in Russian).
10. *Chumak AV, Serga AA, Hillebrands B.* Magnonic crystals for data processing. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017;50(24):244001. DOI: 10.1088/1361-6463/aa6a65.
11. *Ustinov AB, Drozdovskii AV, Kalinikos BA.* Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing. *Appl. Phys. Lett.* 2010;96(14):142513. DOI: 10.1063/1.3386540.
12. *Sharaevskiy YP, Sadovnikov AV, Beginin EN, Morozova MA, Sheshukova SE, Sharaevskaya AY,*

- Grishin SV, Romanenko V, Nikitov SA. Coupled spin waves in magnonic waveguides. In: Demokritov SO, editor. Spin Wave Confinement: Propagating Waves. 2nd ed. Ch. 2. New York: CRC Press; 2017. P. 47–76. DOI: 10.1201/9781315110820-3.
13. Khitun A, Bao M, Wang KL. Magnonic logic circuits. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2010;43(26):264005. DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264005.
 14. Nikitin AA, Nikitin AA, Kondrashov AV, Ustinov AB, Kalinikos BA, Lähderanta E. Theory of dual-tunable thin-film multiferroic magnonic crystal. *J. Appl. Phys.* 2017;122(15):153903. DOI: 10.1063/1.5000806.
 15. Bukharaev AA, Zvezdin AK, Pyatakov AP, Fetisov YK. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and material science. *Phys. Usp.* 2018;61(12):1175–1212. DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279.
 16. Gulyaev YV, Nikitov SA. Surface magnetostatic wave propagation in ferrite films with a periodic semiconductor structure. *Soviet Physics, Solid State.* 1983;25(8):2515–2517 (in Russian).
 17. Sidorenko A. Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics: From Superconducting Qubits to Self-Organized Nanostructures. Cham: Springer; 2018. 270 p. DOI: 10.1007/978-3-319-90481-8.
 18. Zhou Y, Jiao H, Chen YT, Bauer GEW, Xiao J. Current-induced spin-wave excitation in Pt/YIG bilayer. *Phys. Rev. B.* 2013;88(18):184403. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.184403.
 19. Wang Q, Pirro P, Verba R, Slavin A, Hillebrands B, Chumak AV. Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler. *Science Advances.* 2018;4(1):e1701517. DOI: 10.1126/sciadv.1701517.
 20. Morozova MA, Sharaevskii YP, Sheshukova SE, Zhamanova MK. Investigation of self-action effects of magnetostatic waves in ferromagnetic structures in terms of the system of Schrödinger equations with coherent or incoherent coupling. *Physics of the Solid State.* 2012;54(8):1575–1583. DOI: 10.1134/S1063783412080227.
 21. Beginin EN, Morozova MA, Sharaevskii YP. Nonlinear effects of self-action of waves in 2D coupled ferromagnetic structures. *Physics of the Solid State.* 2010;52(1):79–86. DOI: 10.1134/S1063783410010130.
 22. Sharaevskii YP, Malyugina MA, Yarovaya EV. Modulation instability of surface magnetostatic waves in ferromagnet-dielectric-ferromagnet structures. *Tech. Phys. Lett.* 2006;32(2):110–112. DOI: 10.1134/S1063785006020064.
 23. Morozova MA, Romanenko DV, Matveev OV, Grishin SV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Suppression of periodic spatial power transfer in a layered structure based on ferromagnetic films. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;466:119–124. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.06.077.
 24. Nikitov SA, Tailhades P, Tsai CS. Spin waves in periodic magnetic structures–magnonic crystals. *J. Magn. Magn. Mater.* 2001;236(3):320–330. DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00470-X.
 25. Bukesov SA, Stalmakhov VS, Sharaevskii YP. Surface magnetostatic waves in a structure with periodic boundaries. In: Abstracts of III All-Union School – Seminar «Spin wave Microwave Electronics». Krasnodar; 1987. P. 31–32 (in Russian).
 26. Morozova MA, Sharaevskii YP, Sheshukova SE. Mechanisms of formation of envelope solitons in periodic ferromagnetic structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2010;18(5):111–120 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2010-18-5-111-120.
 27. Morozova MA, Sadovnikov AV, Matveev OV, Sharaevskaya AY, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Band structure formation in magnonic Bragg gratings superlattice. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2020;53(39):395002. DOI: 10.1088/1361-6463/ab95c0.
 28. Morozova MA, Matveev OV, Sharaevskii YP, Nikitov SA, Sadovnikov AV. Nonlinear signal processing with magnonic superlattice with two periods. *Appl. Phys. Lett.* 2022;120(12):122407. DOI: 10.1063/5.0083133.

29. Morozova MA, Grishin SV, Sadovnikov AV, Romanenko DV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Band gap control in a line-defect magnonic crystal waveguide. *Appl. Phys. Lett.* 2015;107(24):242402. DOI: 10.1063/1.4937440.
30. Morozova MA, Sharaevskaya AY, Sadovnikov AV, Grishin SV, Romanenko DV, Beginin EN, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures. *J. Appl. Phys.* 2016;120(22):223901. DOI: 10.1063/1.4971410.
31. Morozova MA, Grishin SV, Sadovnikov AV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Magnonic bandgap control in coupled magnonic crystals. *IEEE Trans. Magn.* 2014;50(11):4007204. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2321611.
32. Morozova MA, Matveev OV, Sharaevskii YP. Pulse propagation in a nonlinear system on the basis of coupled magnonic crystals. *Physics of the Solid State.* 2016;58(10):1967–1974. DOI: 10.1134/S1063783416100243.
33. Morozova MA, Matveev OV, Romanenko DV, Trukhanov AV, Mednikov AM, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Nonlinear spin wave switches in layered structure based on magnonic crystals. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;508:166836. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166836.
34. Prokushkin VN, Sharaevskii YP. Surface magnetostatic waves in a ferrite structure with impedance boundaries. *Soviet Journal of Communications Technology and Electronics.* 1987;32(8):1750–1752 (in Russian).
35. Prokushkin VN, Sharaevskii YP. Influence of reactive impedance load on magnetostatic waves characteristics. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 1993;38(9):1551–1553 (in Russian).
36. Morozova MA, Romanenko DV, Serdobintsev AA, Matveev OV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Magnonic crystal-semiconductor heterostructure: Double electric and magnetic fields control of spin waves properties. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;514:167202. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167202.
37. Matveev OV, Romanenko DV, Morozova MA. Linear and nonlinear effects in structures based on magnonic crystals and semiconductors. *JETP Letters.* 2022;115(6):343–347. DOI: 10.1134/S0021364022100228.
38. Morozova MA, Grishin SV, Sadovnikov AV, Romanenko DV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Tunable bandgaps in layered structure magnonic crystal–ferroelectric. *IEEE Trans. Magn.* 2015;51(11):2802504. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2446763.
39. Morozova MA, Matveev OV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Tuning the bandgaps in a magnonic crystal–ferroelectric–magnonic crystal layered structure. *Physics of the Solid State.* 2016;58(2):273–279. DOI: 10.1134/S1063783416020207.
40. Grachev AA, Matveev OV, Mruczkiewicz M, Morozova MA, Beginin EN, Sheshukova SE, Sadovnikov AV. Strain-mediated tunability of spin-wave spectra in the adjacent magnonic crystal stripes with piezoelectric layer. *Appl. Phys. Lett.* 2021;118(26):262405. DOI: 10.1063/5.0051429.
41. Morozova MA, Matveev OV, Romanenko DV, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Spin wave device for directional coupling of microwave signals of different power level. Patent No. 2702916 C1 Russian Federation, IPC H01P 1/22 : appl. 07.05.2019 : publ. 14.10.2019. Assignee: Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS. 13 p. (in Russian).
42. Beginin EN, Sadovnikov AV, Popov PA, Sharaevskaya AY, Kalyabin DV, Stognii AI, Morozova MA, Nikitov SA. Functional component of magnonics based on a multi-layered ferromagnetic structure. Patent No. 2702915 C1 Russian Federation, IPC H01P 1/218 : appl. 25.01.2019 : publ. 14.10.2019. Assignee: Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS. 11 p. (in Russian).
43. Morozova MA, Matveev OV, Romanenko DV, Mednikov AM. Nanoscale multiferroics for magnonic neuromorphic architecture. *Nanoindustry.* 2021;14(S7(107)):685–687 (in Russian). DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.685.687.



Морозова Мария Александровна — родилась в Саратове (1977). Доктор физико-математических наук, профессор кафедры нелинейной физики, ведущий научный сотрудник лаборатории «Метаматериалы» Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов — элементная база магноники и спинтроники, обработка и генерация информационных сигналов в диапазоне СВЧ, волновые явления в магнитных материалах (в магнетонных кристаллах, в многослойных ферромагнитных, мультиферроидных и гетероструктурах). Автор свыше 200 научных публикаций по указанным направлениям.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: mamogozovama@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4442-2443
AuthorID (eLibrary.Ru): 112875

Матвеев Олег Валерьевич — родился в Саратове (1991). Окончил с отличием факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета по направлению «Физика открытых нелинейных систем» (2013). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (2019). Работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории «Метаматериалы» Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов — спиновые волны в магнитных материалах, нелинейные явления (солитоны, автомодуляция, хаос) в тонких ферромагнитных плёнках и структурах на их основе, магнетонная логика, обработка спинволновых сигналов в магнитных материалах. Автор свыше 50 научных работ по данной тематике.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: olvmatveev@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2320-907X
AuthorID: 786916