

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Алексей Николаевич Чумаченко

июня 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

по диссертации **Матвеева Олега Валерьевича** «Нелинейные явления в слоистых и мультиферроидных структурах на основе магнетонных кристаллов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика», выполненной на кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

**Тема диссертационной работы** утверждена приказом ректора от 22.05.2019 г. №110-Д.

Соискатель **Матвеев Олег Валерьевич** окончил в 2013 году ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского» по специальности «Физика открытых нелинейных систем» с присвоением квалификаций «Физик», «Системный аналитик».

Справка об обучении № 42.1-2019 выдана 07.06.2019 года ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского».

В период подготовки диссертации с 2013 по 2017 гг. соискатель обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия. В настоящее время является соискателем (Приказ №110-Д от 22.05.2019 г.) для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - «Радиофизика», работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории «Метаматериалы» ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

**Научный руководитель** - Морозова Мария Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора от 22.05.2019 г. №110-Д, представила положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других научных учреждений.

На заседании присутствовали:

Трубецков Дмитрий Иванович, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой электроники колебаний и волн СГУ;

Филимонов Юрий Александрович, д.ф.-м.н., профессор, директор СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Аникин Валерий Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, декан физического факультета СГУ;

Рыскин Никита Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Шараевский Юрий Павлович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры нелинейной физики СГУ;

Четвериков Александр Петрович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики СГУ;

Безручко Борис Петрович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ;

Бегинин Евгений Николаевич, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики СГУ;

Морозова Мария Александровна, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры нелинейной физики СГУ;

Гришин Сергей Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры электроники колебаний и волн СГУ;

Савин Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры нелинейной физики СГУ;

Егоров Евгений Николаевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры электроники колебаний и волн СГУ;

Садовников Александр Владимирович, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики открытых систем СГУ;

Титов Владимир Николаевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники колебаний и волн СГУ;

Каретникова Татьяна Андреевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры нелинейной физики СГУ;

Хивинцев Юрий Владимирович, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Высоцкий Сергей Львович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Дудко Галина Михайловна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Рожнев Андрей Георгиевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Исаева Ольга Борисовна, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Фунтов Александр Андреевич, ассистент кафедры электроники колебаний и волн СГУ;

Титов Алексей Владимирович, ассистент кафедры электроники колебаний и волн СГУ;



Скороходов Валентин Николаевич, заведующий учебной лабораторией кафедры электроники колебаний и волн СГУ;

Романенко Дмитрий Владимирович, ассистент кафедры нелинейной физики СГУ;

Павлов Евгений Сергеевич, научный сотрудник СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

*Рецензенты диссертации:*

Четвериков Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики физического факультета ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представил положительный отзыв;

Безручко Борис Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета nano- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представил положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

### **Заключение**

Диссертация Матвеева О.В. посвящена исследованию нелинейных процессов, имеющих место при распространении спиновых волн в композитных структурах на основе магнетонных кристаллов, ферромагнитных пленок и сегнетоэлектриков. В работе изучаются механизмы связи волн в таких структурах как в линейных, так и в нелинейных режимах.

**Соответствие специальности.** Содержание диссертации отвечает специальности 01.04.03 - «Радиофизика» (физико-математические науки), удовлетворяя п. 2,3.

#### **Научная новизна**

1. Построена нелинейная волновая модель, описывающая пространственно-временную эволюцию амплитуд огибающих прямых и отраженных волн в структуре двух связанных магнетонных кристаллов в виде системы четырех нелинейных уравнений связанных волн.

2. Исследован нелинейный механизм связи в слоистой структуре на основе связанных ферромагнитных пленок. Показано, что нелинейная связь приводит к подавлению линейной перекачки сигнала между слоями структуры, что объясняется увеличением разности фаз распространяющихся волн при увеличении амплитуды входного сигнала. Показано, что пороговое значение мощности входного сигнала, необходимое для наблюдения указанного эффекта, определяется геометрическими и магнитными параметрами структуры, а также величиной магнитного поля.

3. Выявлен эффект двойного нелинейного переключения в структуре двух связанных магнетонных кристаллов (МК-1 и МК-2). Эффект заключается в следующем: при малой амплитуде входной импульс отражается от МК-2; при увеличении входной амплитуды имеет место первое переключение – импульс проходит через структуру и выходит из МК-2; при дальнейшем увеличении амплитуды имеет место второе переключение – импульс выходит из МК-1. Основным механизмом данного эффекта

является совместное проявление эффекта нелинейного подавления перекачки (характерного для слоистых структур) и эффекта нелинейного сдвига запрещенной зоны (характерного для периодических структур). Определены условия, необходимые для наблюдения эффекта двойного нелинейного переключения.

4. Получены дисперсионные соотношения для гибридной электромагнитно-спиновой волны в мультиферроидных структурах магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик – магнетонный кристалл при касательном намагничивании. Выявлен механизм формирования дополнительных гибридных запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса в таких структурах, связанный с взаимодействием прямых и отраженных гибридных электромагнитно-спиновых волн.

5. Исследован механизм совместного действия электрической и магнитной нелинейности на характеристики запрещенных зон в структуре магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик. Показано, что за счёт действия магнитной нелинейности уменьшается намагничённость ферромагнитной среды и гибридная зона сдвигается вниз по частоте. За счёт действия электрической нелинейности уменьшается диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической среды и гибридная зона сдвигается вверх по частоте. Показано, что действие электрической нелинейности может компенсировать действие магнитной нелинейности на гибридную запрещенную зону.

6. Показана возможность динамического двойного (электрического и магнитного) управления характеристиками запрещенных зон в мультиферроидных структурах магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик и магнетонный кристалл – сегнетоэлектрик – магнетонный кристалл. В частности, при увеличении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика, которая зависит от приложенного электрического поля, все запрещенные зоны сдвигаются вниз по частоте, а при увеличении напряженности магнитного поля, приложенного к ферромагнитному слою, все запрещенные зоны сдвигаются вверх по частоте.

**Научная значимость** работы состоит в расширении фундаментальных представлений о физических процессах в связанных периодических магнитных и мультиферроидных структурах. В частности, построенная волновая модель, 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.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности использования выявленных эффектов для создания новых устройств спин-волновой электроники в СВЧ-диапазоне с возможностью динамического управления характеристиками при изменении электрического и магнитного поля, а также мощности входного сигнала. В частности, на базе исследованных структур возможно создание устройств пространственного разделения сигналов разного уровня мощности, устройств частотного мультиплексирования/демультиплексирования сигналов.



### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Поведение огибающей магнитоэлектрической волны в слоистой структуре, состоящей из двух магнетных кристаллов, в предположении, что связь между слоями носит электродинамический характер, а нелинейность каждого слоя обусловлена изменением продольной составляющей вектора намагниченности, можно описать на основе модели в виде четырёх нелинейных уравнений связанных волн для огибающих прямых и отраженных волн в каждом слое.

2. В слоистой структуре на основе связанных ферромагнитных плёнок существует пороговое значение мощности входного сигнала, при превышении которого наблюдается эффект подавления пространственной перекачки, обусловленный увеличением разности фаз между волнами в каждой плёнке вдоль направления распространения за счет действия нелинейности.

3. В слоистой структуре на основе связанных магнетных кристаллов при увеличении мощности входного сигнала имеет место эффект двойного нелинейного переключения, который обусловлен совместным проявлением эффекта нелинейного подавления перекачки (характерного для слоистых структур) и эффекта нелинейного сдвига запрещенной зоны (характерного для периодических структур).

4. В слоистых мультиферроидных структурах на основе магнетных кристаллов и сегнетоэлектрика взаимодействие прямых быстрых и отраженных медленных гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре приводит к формированию дополнительных запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса, по сравнению со структурами на основе магнетных кристаллов.

**Личный вклад.** Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором. Автор также совместно с научным руководителем принимал участие в выборе направлений исследования и постановке основных задач, анализе и интерпретации полученных результатов. Экспериментальные исследования выполнялись совместно с научным руководителем и Романенко Д.В.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием физически обоснованных теоретических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, качественным и количественным соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов обработки экспериментальных данных, а также сравнением теоретических результатов с полученными в работе экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в работе, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях: International Symposium Spin Waves (Санкт-Петербург, 2018 г.); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Москва, 2017 г.); XXV-XXVIII международные конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо) (Севастополь, 2015-2018 гг.); International Workshop Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures – BrillMics (Саратов, 2014). VI Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism»

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Поведение огибающей магнитоэлектрической волны в слоистой структуре, состоящей из двух магнетных кристаллов, в предположении, что связь между слоями носит электродинамический характер, а нелинейность каждого слоя обусловлена изменением продольной составляющей вектора намагниченности, можно описать на основе модели в виде четырёх нелинейных уравнений связанных волн для огибающих прямых и отраженных волн в каждом слое.

2. В слоистой структуре на основе связанных ферромагнитных плёнок существует пороговое значение мощности входного сигнала, при превышении которого наблюдается эффект подавления пространственной перекачки, обусловленный увеличением разности фаз между волнами в каждой плёнке вдоль направления распространения за счет действия нелинейности.

3. В слоистой структуре на основе связанных магнетных кристаллов при увеличении мощности входного сигнала имеет место эффект двойного нелинейного переключения, который обусловлен совместным проявлением эффекта нелинейного подавления перекачки (характерного для слоистых структур) и эффекта нелинейного сдвига запрещенной зоны (характерного для периодических структур).

4. В слоистых мультиферроидных структурах на основе магнетных кристаллов и сегнетоэлектрика взаимодействие прямых быстрых и отраженных медленных гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре приводит к формированию дополнительных запрещенных зон в области первого брэгговского резонанса, по сравнению со структурами на основе магнетных кристаллов.

**Личный вклад.** Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором. Автор также совместно с научным руководителем принимал участие в выборе направлений исследования и постановке основных задач, анализе и интерпретации полученных результатов. Экспериментальные исследования выполнялись совместно с научным руководителем и Романенко Д.В.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием физически обоснованных теоретических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов, качественным и количественным соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов обработки экспериментальных данных, а также сравнением теоретических результатов с полученными в работе экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в работе, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях: International Symposium Spin Waves (Санкт-Петербург, 2018 г.); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Москва, 2017 г.); XXV-XXVIII международные конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо) (Севастополь, 2015-2018 гг.); International Workshop Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures – BrillMics (Саратов, 2014). VI Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism»



магнонный кристалл // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2015. – Т. 4. – С. 154335.

8. Morozova M.A., **Matveev O.V.**, Sharaevskii Y.P. Nonlinear waves in coupled magnonic crystals // International Workshop Brillouin and Microwave Spectroscopy of Magnetic Micro- and Nanostructures. – Saratov, 2014. - P. 37.

9. **Матвеев О.В.**, Морозова М.А. Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в мультиферроидных структурах // XVI Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. – Саратов, 2015. – С. 102.

10. **Матвеев О.В.**, Морозова М.А. Нелинейный направленный ответвитель на основе связанных магнонных // Сборник материалов 25-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). – Севастополь, 2015. – С. 545-546.

11. **Матвеев О.В.**, Морозова М.А. Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в двухслойных мультиферроиках // XVII научная школа «Нелинейные волны». – Нижний Новгород, 2016. – С. 98.

12. Морозова М.А., **Матвеев О.В.** Влияние геометрических параметров на нелинейные эффекты в структуре связанных магнонных кристаллов // Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами». – Саратов, 2016. – С. 71-72.

13. **Matveev O.V.**, Morozova M.A. Nonlinear dispersion characteristics of hybrid spinelectromagnetic waves in two-layered multiferroics // VI Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2016). - Krasnoyarsk, 2016. – P. 582.

14. Morozova M.A., **Matveev O.V.**, Romanenko D.V., Sharaevskii Yu.P. Nonlinear phenomena in layered structures based on magnonic crystals // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). - Moscow, 2017. – P. 215.

15. **Матвеев О.В.**, Романенко Д.В., Морозова М.А. Функциональная обработка нелинейных сигналов в связанных магнонных кристаллах // XII Всероссийская конференция молодых ученых «Нанофотоника, наноэлектроника, нелинейная физика». – Саратов, 2017. – С. 334.

16. Morozova M.A., **Matveev O.V.**, Romanenko D.V. Tunable band gaps in composite multiferroic structures based on magnonic crystals and ferroelectric slab // International Symposium «Spin Waves 2018». - Saint Petersburg, 2018 - P. 133.

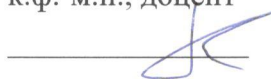
17. **Матвеев О.В.**, Морозова М.А. Исследование особенностей распространения щелевых солитонов в структуре связанных магнонных кристаллов // Сборник материалов 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2018. – С.891-896.

**Грантовая поддержка.** Результаты работы были использованы при выполнении НИР, поддержанных проектами РФФИ (гранты № 13-07-12409-офи-м, № 14-07-00273-а, № 14-02-00577-а, № 15-07-05901-а, № 16-29-14021-офи-м, №18-37-00373-мол\_а, № 19-02-00075-а, № 19-29-03049-мк), проектами РНФ (грант № 16-19-10283, № 19-79-20121).

Диссертация Матвеева О.В. «Нелинейные явления в слоистых и мультиферроидных структурах на основе магнитных кристаллов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» представляет собой целостное исследование актуальной радиофизической научной задачи. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация **рекомендуется** к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Заключение принято на расширенном заседании кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». На заседании присутствовало 7 докторов наук и 13 кандидатов наук по профилю диссертации. Результаты открытого голосования: «за» - 20 чел.; «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел. (протокол №10 от 18 июня 2019 г.).

Заведующий кафедрой нелинейной физики  
Факультета нелинейных процессов  
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»  
к.ф.-м.н., доцент



Бегинин Евгений Николаевич

