

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

Исследования линейной и нелинейной динамики спиновых волн в связанных  
гетероструктурах

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 214 группы

направления

03.04.01 Прикладные математика и физика

факультета нелинейных процессов

Грачева Андрея Андреевича

Научный руководитель  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

Е. Н. Бегинин

Зав. кафедрой нелинейной физики  
профессор, д.ф.-м.н

\_\_\_\_\_

Н.М. Рыскин

Саратов 2017 г.

**Введение.** Развитие идей магноники [1,2], направленных на исследование процессов переноса магнитного момента или спина электрона вместо переноса заряда, открывает новые возможности применения спиновых волн для построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазоне на новых физических принципах [3,4]. Большое число работ в этом направлении посвящено исследованию устройств на основе слоистых структур, состоящих из ферромагнитной пленки, например, железо-иттриевого граната (ЖИГ) и сегнетоэлектрических (СЭ) [5-9] и пьезоэлектрических слоев [10-17]. В ряде работ показана возможность использования таких структур для создания перестраиваемых электрическим полем фазовращателей, работающих в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, фильтров, линий задержки и резонаторов [13-17].

Использование латеральных магнитных микроструктур представляется важным для разработки элементов межсоединений в планарных топологиях магнонных сетей [18-21]. Управление перестройкой частоты с помощью магнитного поля для устройств магноники происходит медленно и требует большого расхода энергии. В отличие от этого, электрическая настройка гораздо быстрее. Использование пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических слоёв позволяет существенно расширить функциональность ЛС-микроволноводов за счет дополнительной возможности двойного управления их характеристиками. В последних управление характеристиками распространяющихся волн осуществляется путем изменения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости слоистой мультиферроидной структуры при помощи вариации внешних электрического и магнитного полей соответственно. Это приводит к изменению дисперсионных характеристик волн, распространяющихся в структуре [22]. Возможность перестройки электрическим полем ЖИГ-пьезоэлектрических СВЧ устройств [12] позволяет разрабатывать магнонные волноводы с управляемой

деформацией. Электрическое поле вызывает деформацию слоя пьезоэлектрика вследствие обратного пьезоэффекта. Деформация передается ЖИГ плёнке, которая механически связана с пьезоэлектрическим слоем. Из-за обратного эффекта магнитострикции (эффект Виллари) в ЖИГ плёнке изменяется внутреннее магнитное поле.

Задача об управлении спектром спиновых волн в латеральных гетероструктурах актуальна, поскольку с помощью изменения свойств сегнетоэлектрического или пьезоэлектрического слоя возможным становится управление связью волн, распространяющихся в латеральных магнитных гетероструктурах.

Целью работы настоящей магистерской работы является численное и экспериментальное исследование динамики распространения и возможность управления спектром спиновых волн, распространяющихся в латеральных гетероструктурах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведено экспериментальное и численное исследование режимов формирования пространственных структур при распространении гибридных электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) в системе латеральных мультиферроиков, образованных из параллельно ориентированных ферромагнитных микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем.
2. Произведено численное моделирование исследования спектра спиновых волн в управляемых деформациями латеральных магнитных гетероструктурах.
3. Произведено исследование особенностей и условий формирования пространственных дискретных солитонов в случае поверхностных и обратных объёмных магнитостатических волн в системе  $n$ -латеральных

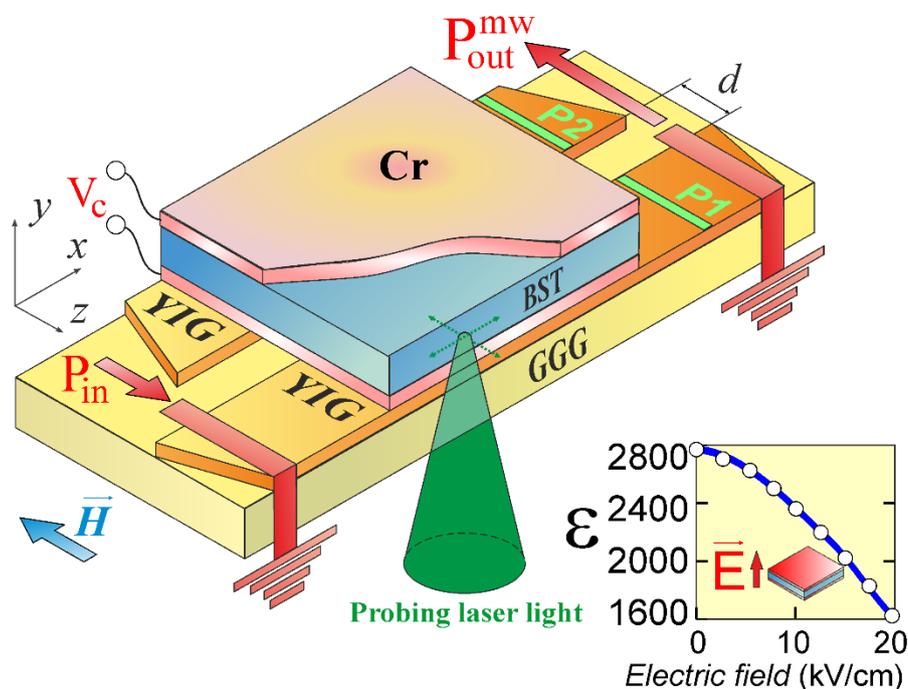
ферритовых микроволноводов численными методами и методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые показано управление спектром спиновых волн в латеральной системе, путем создания локальных деформаций в данной системе. Впервые продемонстрировано явление дискретной дифракции в системе латеральных ЖИГ микроволноводов.

Научная значимость работы обусловлена тем, что использование таких структур открывает возможность для создания перестраиваемых электрическим и магнитным полями фазовращателей, работающих в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, фильтров, линий задержки, резонаторов, а также элементов межсоединений в планарных топологиях магнитных сетей.

Работа будет состоять из трёх глав. В первой главе, на основе экспериментального исследования и расчета электродинамических характеристик электромагнитных спиновых волн исследованы особенности гибридизации мод в структурах из СЭ-слоя и латеральных магнитных микроволноводов. Во второй главе будет исследована латеральная структура типа плёнка ЖИГ – пьезоэлектрик и произведена оценка влияния деформации пьезоэлектрического слоя на спектр спиновых волн, распространяющихся в латеральной структуре. В третьей главе численно и экспериментально продемонстрировано явление дискретной дифракции и генерации пространственных дискретных солитонов в системе латеральных ЖИГ микроволноводов.

**Глава 1.** В первой главе проведены экспериментальное и теоретическое исследования режимов формирования пространственных структур при распространении гибридных электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) в системе латеральных мультиферроиков, образованных из параллельно ориентированных ферромагнитных микроволноводов с сегнетоэлектрическим слоем. При выполнении измерений методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии (БЛС) [23] на частотах вблизи ферромагнитного резонанса с помощью методики селекции модовых паттернов обнаружено резкое увеличение пространственных масштабов перекачки мощности между микроволноводами. Расчеты характеристик распространения ЭМСВ в латеральной мультиферроидной структуре конечной ширины показывают, что энергетический обмен между пленками обусловлен особенностями межмодовой связи волн. Исследованы механизмы гибридизации поперечных мод и трансформация спектров ЭМСВ в мультиферроидной структуре при изменении электрического поля, приложенного к слою сегнетоэлектрика.

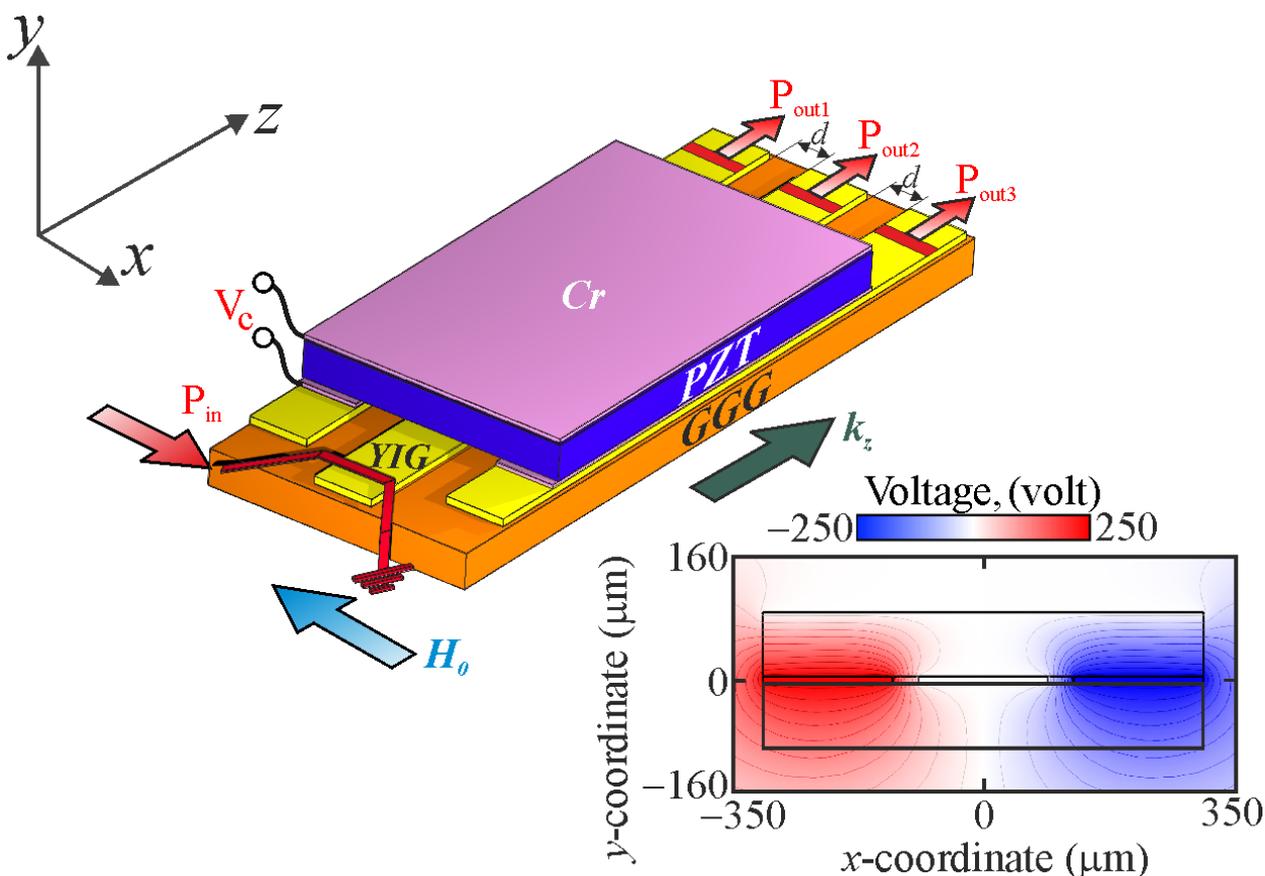


**Рис.1.** Схематический вид латеральной слоистой гетероструктуры. (Вставка) Диэлектрическая проницаемость СЭ слоя, измеренная при разных значениях электрического поля.

Магнитные микроволноводы изготовлены из тонкопленочного ферритмагнетика железо-иттриевого граната в виде латеральных полос с расстоянием от края до края  $d = 40$  мкм. Плёнка ЖИГ с толщиной  $t_1 = 7.7$  мкм и намагниченностью насыщения  $M_0 = 139$  Гс была эпитаксиально выращена на подложке из галлий гадолиниевого граната [(ГГГ),  $Gd_3Ga_5O_{12}$ ] толщиной 500 мкм. Ширина обоих микроволноводов  $w = 200$  мкм. Магнитные микроволноводы обозначены как  $S_1$  и  $S_2$ . Ширина обоих микроволноводов составляет  $w = 210$  мкм. Керамический слой титаната бария-стронция [(БСТ),  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$ ] толщиной 450 мкм с размерами в плоскости  $5 \times 0,46$  мм<sup>2</sup> отделён от слоя ЖИГ с помощью электрода из хрома толщиной 30 нм, который напылён на нижней поверхности СЭ слоя. На верхней части СЭ напылён электрод толщиной 40 мкм. Благодаря достаточно большой толщине СЭ слоя, верхний электрод не влияет на распространение спиновых волн в плёнке ЖИГ. Электрическое напряжение  $V_c$  в диапазоне 0–900 В (электрическое поле) подается на электроды для изменения электрической проницаемости СЭ слоя. Электрическое поле в СЭ слое изменяется в пределах 0–15 кВ/см. Этот диапазон приводит к изменению диэлектрической проницаемости (см. вставку на рис. 1). Была проанализирована трансформация коэффициента передачи рассматриваемой структуры при изменении приложенного электрического поля  $E$  от 0 до 15 кВ/см. Образец помещается в однородное статическое магнитное поле  $H = 1200$  Э, ориентированное вдоль оси  $z$  для эффективного возбуждения в микроволноводе  $S_1$  поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ). Возбуждение ПМСВ в микроволноводе  $S_1$  выполняется с помощью микрополосковой линии с микроволновыми преобразователями шириной 30 мкм и длиной 1 мм. Когда спиновая волна распространяется вдоль направления  $x$ , она превращается в гибридную электромагнитную спиновую волну (ЭМСВ) в области, где происходит взаимодействие плёнок ЖИГ с СЭ слоем. ЭМСВ распространяется вдоль латеральных микроволноводов  $S_1$  и  $S_2$ , нагруженных на СЭ как суперпозиция симметричных и антисимметричных мод [21] соседних магнитных плёнок. Выходной преобразователь крепится к

$S_1$  на расстоянии 6 мм от входного преобразователя (см. Рис. 1). Таким образом, ЭМСВ достигают области ЖИГ плёнок, где нет СЭ слоя, где они преобразуется обратно в ПМСВ и принимаются выходным микрополосковым преобразователем [24].

**Глава 2.** Во второй главе будет произведено численное моделирование исследования спектра спиновых волн в управляемых деформациями латеральных магнитных гетероструктурах. С помощью численного моделирования, основанного на методе конечных элементов и с помощью микромагнитного моделирования исследована динамика спиновых волн, распространяющихся в системе латеральных микроволноводов с пьезоэлектрическим слоем.



**Рис. 2.** Схема рассматриваемой структуры. (Вставка) Распределение электрического потенциала, приложенного к электродам.

На рисунке 2 схематически показана рассматриваемая структура, состоящая из трёх латеральных микроволноводов, полученных с помощью

метода лазерной резки из плёнки ЖИГ, толщиной 10 мкм, находящейся на подложке из галлий-гадолиниевого граната. На данной латеральной системе будет расположен пьезоэлектрический слой цирконата-титаната свинца с напылёнными на него электродами из хрома толщиной 50 мкм на нижней стороне (где непосредственно происходит связь плёнки ЖИГ и пьезоэлектрического слоя) и толщиной 250 мкм на верхней части пьезоэлектрического слоя для создания эффективной локальной деформации каждой из плёнок ЖИГ. Структура помещена в однородное статическое магнитное поле  $H=1200$  Э, направленного вдоль короткой оси микроволноводов для эффективного возбуждения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ). Электрическое напряжение  $V_c=-250\dots250$  В будет прикладываться к электродам. Внешнее электрическое поле в пьезоэлектрическом слое будет изменяться  $E=-12.5\dots12.5$  кВ/см.

С помощью метода конечных элементов была произведена оценка влияния деформации на внутренне магнитное поле магнитных микроволноводов. С помощью микромагнитного моделирования, основанного на решении уравнения Ландау-Лифшица методом конечных разностей показано распространение спиновых волн в латеральной структуре при различных значениях внешнего электрического поля. Таким образом, показано двойное управление (электрическим и магнитным полями) в латеральной структуре. Перестройка магнитным полем может быть выполнена путем смещения величины внешнего магнитного поля, в то время как перестройка электрическим полем возможна благодаря изменению свойств пьезоэлектрического слоя, путем вариации приложенного электрического поля.

**Глава 3.** В третьей главе произведено исследование особенностей и условий формирования пространственных дискретных солитонов в случае поверхностных и обратных объёмных магнитостатических волн в системе  $n$ -

латеральных ферритовых волноводов численными методами и методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии.

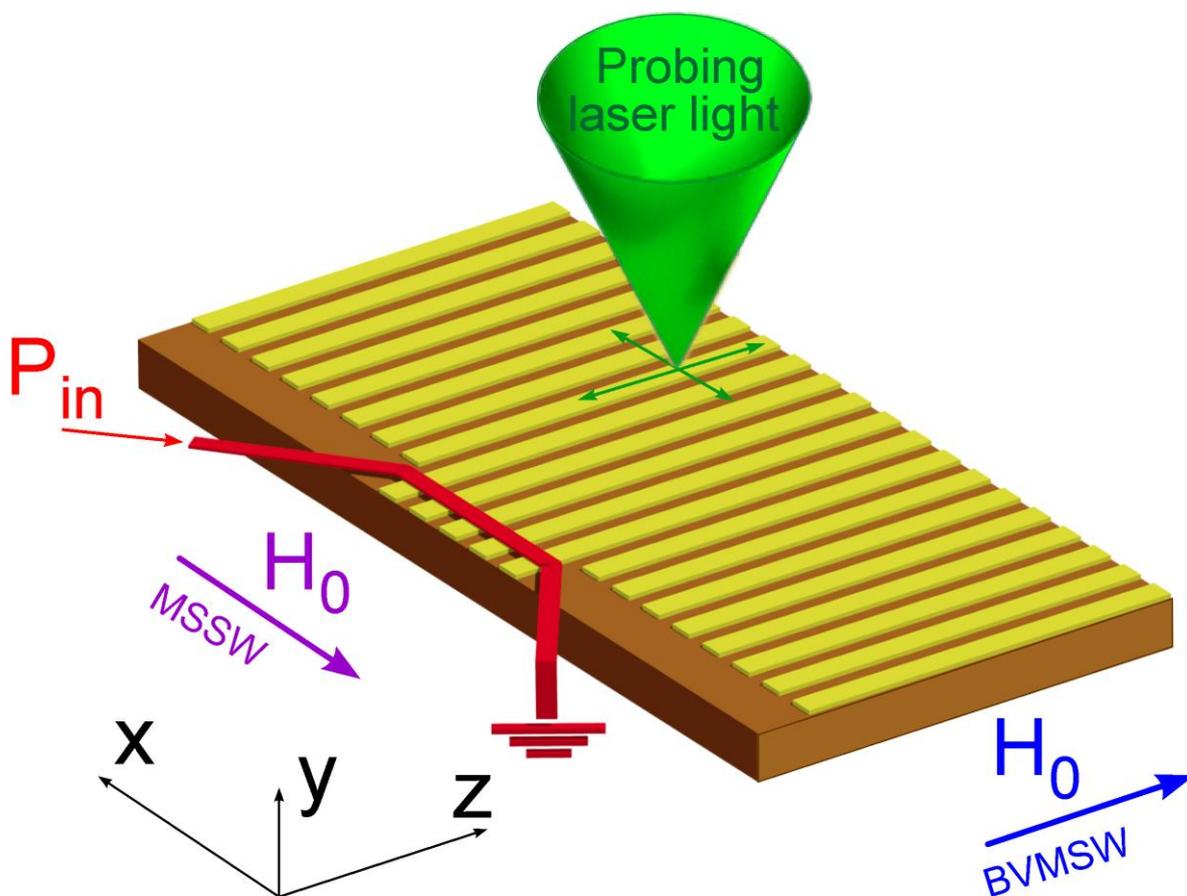


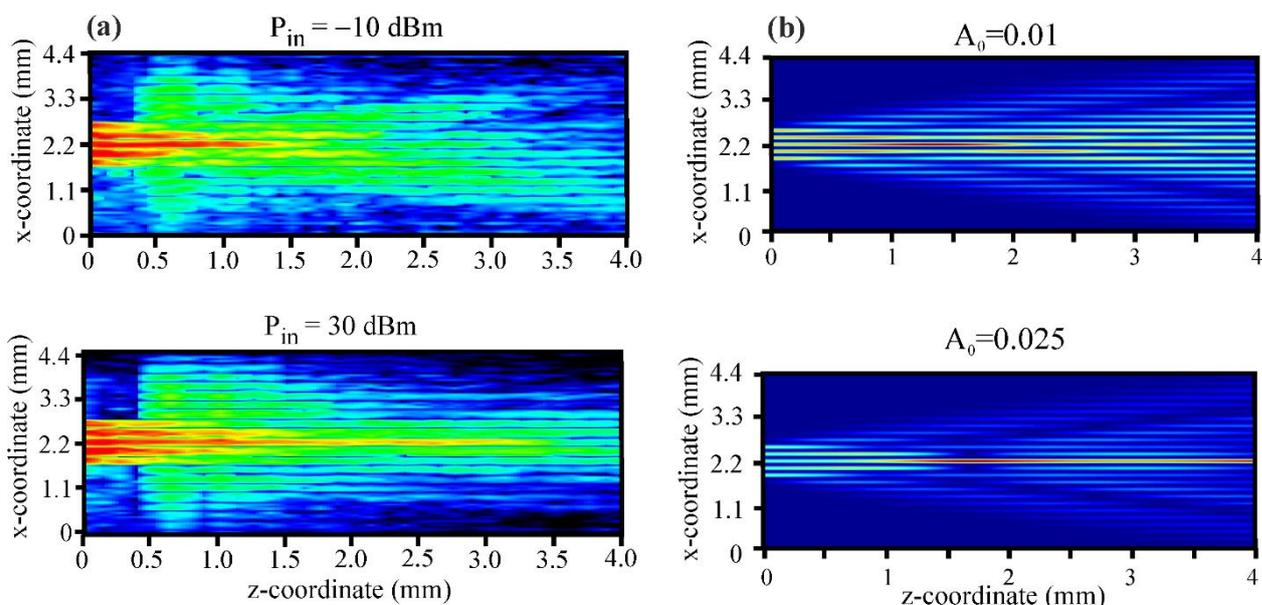
Рис. 3. Схема рассматриваемой структуры.

Схематически данная структура приведена на рисунке 3. Система состоит из 25 латеральных микроволноводов, полученных с помощью метода лазерной резки из плёнки ЖИГ, толщиной 10 мкм, находящейся на подложке из галлий-гадолиниевого граната, толщина каждого микроволновода 10 мкм, ширина – 200 мкм, периодичность данной системы составляет 240 мкм. Будут рассматриваться два вида волн, распространяющиеся в такой структуре, это – поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ), которым соответствует нормальная дисперсия и направление внешнего магнитного поля по оси  $x$  ( $H_{MSSW}$  на рисунке 3), и обратные объёмные магнитостатические волны (ООМСВ), которым соответствует аномальная дисперсия и направление внешнего магнитного поля по оси  $z$  ( $H_{BVMSW}$  на рисунке 3). Величина внешнего магнитного поля  $H_0 = 1200$  Э.

При численном моделировании рассматриваемой структуры будет использовано дискретное нелинейное уравнение Шрёдингера [25]

$$i \frac{dA_n}{dz} + \beta A_n - C(A_{n+1} + A_{n-1}) + \gamma |A_n|^2 A_n = 0, \text{ где } A_n - \text{амплитуда } n\text{-го волновода, } \beta -$$

коэффициент дисперсии одиночного волновода,  $C$  – коэффициент связи между волноводами и  $\gamma$  – коэффициент нелинейности.



**Рис. 4** Карты интенсивности ООМСВ в системе латеральных микроволноводов при изменении мощности входного сигнала, полученные экспериментально (а) и полученные при численном моделировании (б).

Методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии была исследована пространственная динамика интенсивности ООМСВ. На рисунке 4 (а) показаны двумерные пространственные карты  $4 \times 4.5 \text{ мм}^2$ , где градациями цвета закодирована интенсивность ООМСВ  $I(x,z)$  на частоте 5.1 ГГц. Видно, что при увеличении мощности входного сигнала режим дифракционного распространения спиновых волн сменяется образованием светлого дискретного солитона. На рисунке 4 (б) показан результат численного моделирования на такой же частоте, при этом видно, что при увеличении амплитуды входного сигнала, также наблюдается образование пространственного солитона.

**Заключение.** Таким образом, в первой главе, на основе экспериментального исследования и расчета электродинамических характеристик ЭМСВ выявлены особенности гибридизации мод в структурах из СЭ-слоя и латеральных магнитных микроволноводов на частотах вблизи частоты ферромагнитного резонанса касательно намагниченной ферромагнитной пленки. Исследованы механизмы трансформации дисперсионных характеристик при изменении напряженности постоянного электрического поля. Показано, что при распространении ЭМСВ на частотах вблизи частоты ферромагнитного резонанса существуют режимы селективной перекачки мощности, характеризующиеся существенно различными пространственными масштабами.

Во второй главе показано, показана трансформация собственных мод магнитных микроволноводов, связанная с управляемой деформацией пьезоэлектрического слоя. Показано эффективное переключение спиновых волн за счет изменения приложенного электрического поля, что позволяет рассматривать предложенную структуру в качестве управляемого магнитного ответвителя мощности СВЧ-сигнала.

В третьей главе численно и экспериментально исследована динамика распространения спиновых волн в массиве, состоящем из латеральных ЖИГ микроволноводов. Экспериментально продемонстрировано явление дискретной дифракции в системе латеральных ЖИГ микроволноводов. Для МСВ показано, что поперечный размер пучка может уменьшаться при увеличении амплитуды волны. Выявлены особенности и условия формирования темных и светлых солитонов в случае поверхностных и обратных объемных МСВ, а именно, показано, что угол направления волнового фронта определяет порог мощности волны, при котором реализуется режим распространения, ограниченного в поперечном направлении пучка МСВ.

## Список литературы:

1. S. A. Nikitov, D.V. Kalyabin, I. V. Lisenkov et al. (Collaboration), *Phys. Usp.* 58, 1099 (2015).
2. V.E. Demidov, S. Urazhdin, A. Zholud, A.V. Sadovnikov, A.N. Slavin and S.O. Demokritov, *Sci. Rep.* 5, 8578 (2015).
3. C.S. Davies, A. Francis, A.V. Sadovnikov, S.V. Chertopalov, M.T. Bryan, S.V. Grishin, D.A. Allwood, Y.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov, and V.V. Kruglyak, *Phys. Rev. B* 92, 020408(R) (2015).
4. A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, and B. Hillebrands, *Nature Physics* 11, (2015).
5. A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, K.V. Bublikov, S.V. Grishin, S.E. Sheshukova, Yu. P. Sharaevskii, and S.A. Nikitov, *J. Appl. Phys.* 118, 203906 (2015).
6. A. Toprak and O. Tigli, *Appl. Phys. Rev.* 1, 031104 (2014).
7. V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, and P. Edenhofer, *J. Appl. Phys.* 91, 10007 (2002).
8. Y.K. Fetisov and G. Srinivasan, *Appl. Phys. Lett.* 87, 103502 (2005).
9. С.Н. Мигунов, А.А. Волков, Г.А. Командин, А.Н. Лобанов, Б.П. Горшунов, Ю. И. Головки, В.М. Мухортов, Ю.И. Юзюк, *Журнал технической физики* 78, 99 (2008).
10. M. Bichurin and D. Viehland, *Magnetoelectricity in Composites*, Pan Stanford Publishing, Singapore, (2012).
11. G. Srinivasan and Y. K. Fetisov. *Ferroelectrics* 342.1, 65-71, (2006).
12. Y. K. Fetisov and G. Srinivasan *Applied Physics Letters* 88, 143503, (2006)
13. А.А. Никитин, А.Б. Устинов, А.А. Семенов, Б.А. Калиникос, *Письма в ЖТФ* 40, 1 (2014).
14. C. Nan, M.I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, and G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.* 103, 031101 (2008).

15. U. Özgür, Y. Alivov, and H. Morkoç, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*, 20, 9, (2009).
16. G. Srinivasan, I.V. Zavislyak, and A.S. Tatarenko, *Appl. Phys. Lett.* 89, 152508 (2006).
17. A.B. Ustinov, G. Srinivasan, and Y.K. Fetisov, *J. Appl. Phys.* 103, 063901 (2008).
18. A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, D.V. Romanenko, Yu.P. Sharaevskii, and S.A. Nikitov, *Appl. Phys. Lett.* 107, 202405 (2015).
19. A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.A. Odincov, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, and S.A. Nikitov, *Appl. Phys. Lett.* 108, 172411 (2016).
20. A.Y. Annenkov, S.V. Gerus, and S.I. Kovalev, *J. Comm. Technology and Electronics* 41, 196 (1996).
21. А.Ю. Анненков, С.В. Герус, С.И. Ковалев, *Журнал технической физики* 68, 91 (1998).
22. A.A. Semenov, S.F. Karmanenko, V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, G. Srinivasan, A.N. Slavin, and J.V. Mantese, *Appl. Phys. Lett.* 88, 033503 (2006).
23. S.O. Demokritov, B. Hillebrands, A.N. Slavin, *Phys. Rep.*, V. 348, P. 441-489 (2001).
24. V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, S.F. Karmanenko, A.A. Semenov and P. Edenhofer, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 51, 2090 (2003).
25. F. Lederer, G. Stegeman, D. Christodoulides, G. Assanto, *Phys. Rep*, V. 463, P. 1-126 (2008).