

На правах рукописи

Черкасский Михаил Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛИТОНОВ ОГИБАЮЩЕЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-СПИНОВЫХ ВОЛН В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ И
МУЛЬТИФЕРРОИДНЫХ СТРУКТУРАХ

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) на кафедре физической электроники и технологии

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Калиникос Борис Антонович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Григорьев Андрей Дмитриевич,
профессор кафедры радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург.

кандидат физико-математических наук,
доцент Гришин Сергей Валерьевич,
доцент кафедры электроники, колебаний и волн Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится «24» декабря 2013 г. в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь совета Д 212.238.08 по защите докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

Е.А. Смирнов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Исследование солитонов является фундаментальной задачей современной физики нелинейных явлений. Изучение солитонов происходит во многих ее областях: физике волновых явлений в ферромагнитных пленках, нелинейной оптике [1], гидродинамике [2], физике низких температур [3] и в других направлениях. К моменту начала работы над диссертацией основы теории солитонов были разработаны достаточно хорошо [4]. Однако результаты натуральных и численных исследований порождали и порождают новые теоретические задачи. Ярким примером тому являются результаты численного эксперимента Ферми, Паста и Улама, которые после теоретической интерпретации Забуски и Крускала стали причиной «второго открытия солитонов». В последние годы был обнаружен ряд новых нелинейных эффектов, требующих теоретической интерпретации. Среди таких нелинейных эффектов можно назвать следующие: хаотические солитоны [5,6], наблюдение фракталов [7] и др. Таким образом, в настоящее время мы наблюдаем рост интереса к изучению солитонов.

Фундаментальное значение солитонов в науке является следствием их свойств: будучи нелинейными объектами и распространяясь в нелинейной среде, они проявляют как линейные свойства частиц, так и линейные свойства волновых пакетов. В математике открытие солитонов положило начало созданию метода обратной задачи рассеяния, который позволил найти точные решения многих нелинейных дифференциальных уравнений [4]. В физике благодаря открытию солитонов нашли объяснение многие нелинейные эффекты, а именно, стабильное распространение импульсов в нелинейных дисперсионных средах [2], результаты развития неустойчивости монохроматических сигналов [8], формирование волновых «пульс» [9] и др. Отметим, что прикладной интерес к исследованию солитонов связан, в частности, с разработками нелинейных устройств обработки и передачи информации для систем телекоммуникаций.

Различают статические и динамические солитоны. Например, в магнитоупорядоченных средах или оптических волокнах могут формироваться динамические солитоны – солитоны огибающей распространяющихся волн. Для исследования солитонов огибающей волн на частотах СВЧ диапазона наиболее удобными являются ферромагнитные пленки и структуры на их основе. В таких средах способны распространяться спиновые волны (СВ). Солитоны огибающей спиновых волн могут быть описаны с помощью нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [10]. Существует ряд работ, в которых показывается, что для более точного описания солитонных процессов классическое НУШ необходимо модифицировать. В частности, необходимо добавить в него члены, описывающие линейное и нелинейное затухание, возбуждение, высшие дисперсионные члены, а также нелинейность, отличную от кубической. Таким образом, в настоящее время все больше исследователей направляют свое внимание на разработку новых теоретических моделей, описывающих наблюдаемые в экспериментах солитонные явления. Отсюда следует, что результаты исследований, представленные в диссертации, являются актуальными.

Кроме собственно солитонов огибающей в магнитоупорядоченных материалах исследуются и другие нелинейные явления. К ним относятся

собственная, наведенная и связанная модуляционная неустойчивость, хаос, возвращаемость Ферми-Паста-Улама, бистабильность и др. Отметим, что солитоны огибающей не являются независимым нелинейным явлением. Они, вне сомнений, суть только одно из проявлений нелинейной динамики спин-системы магнитоупорядоченных сред. Вследствие этого перед исследователями стоит фундаментальная проблема поиска общей модели, наиболее целостно описывающей всю нелинейную динамику. Исследование солитонов огибающей, которое представлено в данной диссертационной работе, является шагом в решении этой фундаментальной проблемы.

Свойства солитонов огибающей определяются характеристиками волноведущей среды. В последние годы началось активное исследование слоистых мультиферроидных сред, то есть сред, состоящих из ферромагнитных и сегнетоэлектрических слоев (см. [11,12] и литературу в них). Их линейные волновые свойства изучены достаточно хорошо. В то же время к моменту начала работы над диссертационным исследованием была опубликована всего одна работа, посвященная возможности существования солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн (ЭСВ), распространяющихся в неограниченной среде, состоящей из полубесконечных слоев ферромагнетика и сегнетоэлектрика [13]. Таким образом, к моменту начала работы над диссертацией солитоны огибающей в мультиферроидных слоистых средах оставались неисследованными. Кроме того, был недостаточно изучен ряд солитонных явлений в ферромагнитных пленках.

Целью диссертационной работы является исследование особенностей процессов формирования и распространения солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн в ферромагнитных пленках и мультиферроидных структурах.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнены с помощью методов математической физики, электродинамики и численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

В соответствии с поставленной целью **основными задачами диссертационного исследования** являются:

- 1) Исследование процессов формирования и распространения светлых солитонов огибающей спиновых и электромагнитно-спиновых волн с учетом линейного и нелинейного затухания;
- 2) Исследование пространственных темных солитонов огибающей обратных объемных спиновых волн в условиях нелинейного затухания;
- 3) Разработка теории, описывающей солитонные процессы, происходящие в безграничной мультиферроидной среде с учетом нелинейности сегнетоэлектрика и нелинейности ферромагнетика;
- 4) Исследование нелинейных волновых пакетов, распространяющихся в двухслойной мультиферроидной структуре, обладающей двойной нелинейностью.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) Определены характерные особенности процессов формирования и распространения светлых солитонов огибающей различного порядка. Установлено влияние формы, длительности и амплитуды входного импульса на параметры выходного светлого солитона.

- 2) Разработана теория, описывающая модуляционную неустойчивость и порог образования светлых солитонов огибающей, распространяющихся в дисперсионной среде, обладающей нелинейностью третьего и пятого порядка, а также нелинейным затуханием третьего и пятого порядка.
- 3) Проведено численное моделирование нелинейного уравнения Гинзбурга-Ландау с учетом нелинейного затухания. Моделирование позволило дать интерпретацию экспериментально обнаруженных пространственных темных солитонов огибающей обратных объемных спиновых волн.
- 4) Получены формулы, описывающие нелинейный закон дисперсии электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в безграничной продольно намагниченной мультиферроидной среде, обладающей как магнитной, так и электрической волновыми нелинейностями. Выведено модифицированное нелинейное уравнение Шредингера, описывающее распространение волн в указанной среде.
- 5) Получены формулы, описывающие нелинейный закон дисперсии электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в двухслойной мультиферроидной структуре, обладающей двойной нелинейностью. Проведен анализ влияния различных типов нелинейности на солитонные процессы.

Новые научные результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили сформулировать следующие **научные положения, выносимые на защиту**:

- 1) Линейное затухание спиновых волн приводит к изменению порядка светлых солитонов огибающей в том случае, когда длительность входных импульсов превышает длительность, при которой порог образования фундаментальных светлых солитонов минимален.
- 2) Нелинейное затухание обратных объемных спиновых волн приводит к обогащению частотного спектра входного двухчастотного возбуждения. Начальное обогащение спектра создает возможность для возникновения наведенной модуляционной неустойчивости, которая по мере своего развития приводит к образованию темных солитонов огибающей.
- 3) В мультиферроидных средах возможна смена типа возбуждаемых солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн. Эффект смены типа солитонов обусловлен тем, что волновые электрическая и магнитная нелинейности среды конкурируют между собой.
- 4) Волновая электрическая нелинейность сверхвысокочастотных поверхностных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в двухслойной мультиферроидной структуре YIG-BSTO, позволяет формироваться светлым солитонам огибающей из входного гауссовского импульса при несущих волновых числах $k < 25 \text{ rad/cm}$. Увеличение несущего волнового числа входного гауссовского импульса до величины более 30 rad/cm приводит к эффекту смены характера эволюции входного сигнала: вместо светлого солитона формируется импульс, имеющий форму близкую к прямоугольной.

Теоретическая и практическая ценность диссертационной работы состоит в следующем:

- 1) Построена теория солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в искусственной мультиферроидной структуре, состоящей из слоя ферромагнетика и слоя сегнетоэлектрика;

- 2) Создана компьютерная программа, позволяющая проводить численное моделирование процессов формирования и распространения солитонов огибающей спиновых и электромагнитно-спиновых волн;
- 3) Определены условия, при которых происходит нелинейное сжатие СВЧ импульсов, распространяющихся в ферромагнитных пленках. Показано, что данный режим может быть положен в основу новых приборов и устройств обработки СВЧ сигналов;
- 4) Получены новые знания о волновых процессах, происходящих в мультиферроидных структурах, обладающих двойной нелинейностью. Такие знания могут быть использованы при разработке новых приборов и устройств СВЧ техники.

Достоверность результатов подтверждается хорошим согласованием результатов численных расчетов и экспериментальных данных. **Апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и симпозиумах: Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, Россия, 2007), Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета (Санкт-Петербург, Россия, 2008-2013), Spin Waves International Symposium (Санкт-Петербург, Россия, 2011 и 2013), International Magnetism Conference «INTERMAG» (Ванкувер, Канада, 2012), Всероссийская научно-техническая конференция «Микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, Россия, 2012), The Sixth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2012 (Санкт-Петербург, Россия, 2012) и VIII всероссийская конференция для молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, Россия, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также 14 работ в материалах международных и российских научно-технических конференций. Список печатных работ автора по теме диссертации приведен в конце работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 171 наименование. Основная часть работы изложена на 125 страницах машинописного текста. Работа содержит 25 рисунков.

Содержание работы

Во введении кратко обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная и практическая ценность полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Состояния исследований сверхвысокочастотных волновых процессов в ферромагнитных пленках и мультиферроиках» посвящена обзору литературы по теме диссертации. В заключение обзора литературы сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Глава 2 «Светлые и темные солитоны огибающей в ферромагнитной пленке» описывает результаты исследований светлых и темных солитонов огибающей спиновых волн, распространяющихся в ферромагнитной пленке. Материалы, содержащиеся в данной главе, излагаются в трех параграфах. В первом

параграфе излагаются результаты численного моделирования процессов распространения светлых солитонов огибающей. В процессе диссертационного исследования было проведено несколько серий численных экспериментов в режимах, для которых выполняется соотношение $T_{NL} \leq T_D$, где T_{NL} – нелинейное время, а T_D – дисперсионное время [2].

Первая серия была посвящена исследованию прямоугольных входных импульсов, не имеющих исходной фазовой модуляции. Вторая серия численных экспериментов проводилась для входных импульсов, которые задаются функцией гиперболического секанса. В качестве уравнения, описывающего эволюцию импульсов, было использовано нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) с учетом затухания [2]. При этом в численных экспериментах исследовались как прямые, так и обратные объемные спиновые волны.

По итогам первой серии численных экспериментов были установлены следующие закономерности. Во-первых, характер эволюции входного импульса зависит от его формы. При использовании импульсов, отличных от тех, которые описываются функцией гиперболического секанса в режимах, когда $T_{NL} \leq T_D$, в процессе распространения сигнала наблюдается нелинейная суперпозиция солитонной динамики и динамики несолитонной части импульса. Для того, чтобы разделить эти два вида динамических процессов распространения сигнала, следует использовать входной импульс в форме гиперболического секанса. Во-вторых, на динамику распространения сигнала оказывает сильное влияние соотношение между амплитудой входного импульса и порогом светлых солитонов различных порядков. Если амплитуда входного импульса больше порога образования светлых солитонов первого порядка, но не равна пороговой для солитонов высших порядков, то в процессе распространения сигнала у импульса наблюдается некоторый постоянный «пьедестал», сохраняющий свою форму.

Вторая серия численных экспериментов была посвящена исследованию эволюции входных импульсов в форме гиперболического секанса. Подобные импульсы не имеют несолитонной части, что облегчает исследование солитонных процессов. Таким образом, на вход ферромагнитной пленки подавался сформировавшийся солитон огибающей. При этом было проведено исследование светлых солитонов с помощью численного моделирования нелинейного уравнения Шредингера, учитывающего линейное затухание. Исследование показало, что в случае входного временного импульса в форме гиперболического секанса с длительностью τ_{min} , при которой порог образования солитонов минимальный, существует участок пути распространения солитона, на котором солитон сохраняет свою форму. При этом время сохранения формы солитона равно дисперсионному времени T_D . Было обнаружено также, что указанный участок не существует, если длительность входного импульса меньше τ_m .

Было установлено, что в волноведущей среде, подчиняющейся НУШ с линейным затуханием, существует эффект смены порядка солитонов. Показано, что данный эффект обусловлен пересечением пороговых кривых в области длительностей входных импульсов, больших τ_{min} .

Второй параграф содержит вывод обобщенного нелинейного уравнения Шредингера. В нем дается вывод формулы для инкремента модуляционной

неустойчивости и формулы, описывающей пороги образования светлых солитонов огибающей, распространяющихся в среде, подчиняющейся обобщенному нелинейному уравнению Шредингера. Полученное выражение позволяет предсказать пороги образования светлых солитонов огибающей из входных импульсов произвольной формы, распространяющихся в дисперсионной среде, обладающей нелинейностью третьего и пятого порядков, а также нелинейным затуханием третьего и пятого порядков.

Третий параграф посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию пространственных темных солитонов огибающей спиновых волн, распространяющихся в ферромагнитной пленке. Отличительной особенностью проведенных исследований является то, что они были выполнены с учетом нелинейного затухания. Численное моделирование, результаты которого излагаются в третьем параграфе, показало, что именно благодаря нелинейному затуханию формируются темные, а не светлые солитоны.

В процессе численного моделирования было обнаружено, что на начальном участке пути распространения входного сигнала наблюдается сильное нелинейное затухание. Оно значительно уменьшает амплитуду входного сигнала. При этом часть сигнала, которая имеет большую амплитуду, испытывает высокое затухание, а часть, имеющая низкую амплитуду, затухает медленнее. Такой эффект приводит к обогащению частотного спектра генерируемого образования. После этого начинается нелинейное взаимодействие между гармониками спектра – развивается индуцированная неустойчивость в условиях нелинейного затухания. В момент времени, когда процесс приобретает стабильный характер, начинается формирование темных солитонов огибающей.

Таким образом, был сделан вывод о том, что обычно используемое нелинейное уравнение Шредингера не способно дать теоретической интерпретации наблюдаемых в эксперименте темных солитонов огибающей обратных объемных спиновых волн. Поэтому для объяснения экспериментально наблюдавшихся пространственных темных солитонов целесообразно использовать уравнение Гинзбурга-Ландау.

Глава 3 «Светлые и черные солитоны огибающей электромагнитно-спиновых волн в продольно намагниченной безграничной мультиферроидной среде» посвящена теоретическому исследованию светлых и черных солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в мультиферроидной волноведущей среде, обладающей как электрической, так и магнитной волновыми нелинейностями. Глава содержит пять параграфов.

Первый параграф является вводным. Во втором параграфе вводится предположение о виде электрической и магнитной волновых нелинейностей и находится нелинейный закон дисперсии. Хорошо известно, что интенсивная волна постоянной частоты, распространяясь в нелинейной среде, может изменять ее параметры. Так, в случае волн прецессии намагниченности в ферромагнетике увеличение амплитуды волны приводит к уменьшению постоянной составляющей намагниченности и, следовательно, к изменению волнового вектора несущей волны. В случае электромагнитных волн в диэлектрических волноводах при увеличении амплитуды электрического поля волны изменяется диэлектрическая проницаемость [1]. Вышеуказанные эффекты в ферромагнетике естественно называть *магнитной волновой нелинейностью*, а в диэлектрике – *электрической волновой нелинейностью*. Изучаемой

мультиферроидной среде присущи оба типа нелинейности. Следует отметить, что ранее исследование солитонов огибающей, которые могут возбуждаться в среде с двойной волновой нелинейностью, не проводилось.

Прямой учет волновых магнитной и электрической нелинейностей дает закон дисперсии, зависящий как от $|u|^2$, так и от $|\mathbf{E}|^2$. Нелинейный закон дисперсии является основой для получения нелинейного дифференциального уравнения, описывающего солитонные процессы, происходящие в среде. При этом удобно получить уравнение, содержащее только одну переменную, описывающую амплитуду волны. Поскольку напряженность электрического поля и намагниченность связаны с помощью уравнений Максвелла, поэтому существует возможность исключить одну из них. После выполнения необходимых математических преобразований был получен нелинейный закон дисперсии, зависящий только от нормированной амплитуды переменной намагниченности. В данном параграфе проведен анализ влияния каждого типа волновой нелинейности на вид закона дисперсии. Установлено, что на медленные ЭСВ волновые электрическая и магнитная нелинейности оказывают аддитивное влияние, а на быстрые ЭСВ – конкурирующее.

В третьем параграфе показано, что для исследования солитонов, распространяющихся в среде, обладающей двойной нелинейностью, необходимо модифицировать нелинейный член НУШ – вместо нелинейного коэффициента следует использовать сумму нелинейных магнитного и электрического коэффициентов $N_{M3} + N_{E3}$. При исследовании влияния волновых электрической и магнитной нелинейностей установлено, что дисперсионный коэффициент медленных ЭСВ меньше нуля $D_2 < 0$, в то время как сумма нелинейных коэффициентов третьего порядка больше нуля $N_{M3} + N_{E3} > 0$. Следовательно, для медленных ЭСВ способны формироваться светлые солитоны огибающей. Также показано, что дисперсионная кривая быстрых волн имеет два участка (см. рисунок 1 в работе [ЧЗ]). На участке от частоты отсечки до частоты, при которой происходит пересечение линейной и нелинейной дисперсионных кривых, выполняются неравенства $D_2 > 0$ и $N_{M3} + N_{E3} < 0$. Это говорит о возможности формирования светлых солитонов огибающей для данного участка кривой. Установлено, что на участке быстрой дисперсионной кривой для частот, лежащих выше частоты пересечения, имеет место $D_2 > 0$ и $N_{M3} + N_{E3} > 0$. Следовательно, для волн, соответствующих быстрой дисперсионной кривой и имеющих частоты выше частоты пересечения, способны формироваться темные солитоны огибающей.

В четвертом параграфе получены формулы для порога образования светлых солитонов огибающей и нелинейного времени в среде, обладающей двойной волновой нелинейностью. Проведен анализ влияния каждого типа нелинейности на порог образования светлых солитонов огибающей быстрых и медленных ЭСВ.

В пятом параграфе излагаются результаты моделирования темных солитонов. Показано, что в СВЧ диапазоне по мере распространения солитона происходит генерация симметричной пары серых солитонов огибающей, а сам исходный черный солитон сужается до $\tau = 7$ ns, т. е. более чем в 5 раз. О солитонной природе полученных импульсов также говорит наличие скачка фазы на π радиан в точке минимума амплитуды солитона и скачки фазы серых солитонов

на $\pi/2$ радиан (см. рисунок 1(a)). Пример солитона, сформировавшегося в терагерцевом диапазоне частот, показан на рисунке 1(b). В этом случае происходила компрессия входного импульса более чем в 11 раз. Также наблюдалось увеличение порядка генерируемых серых солитонов.

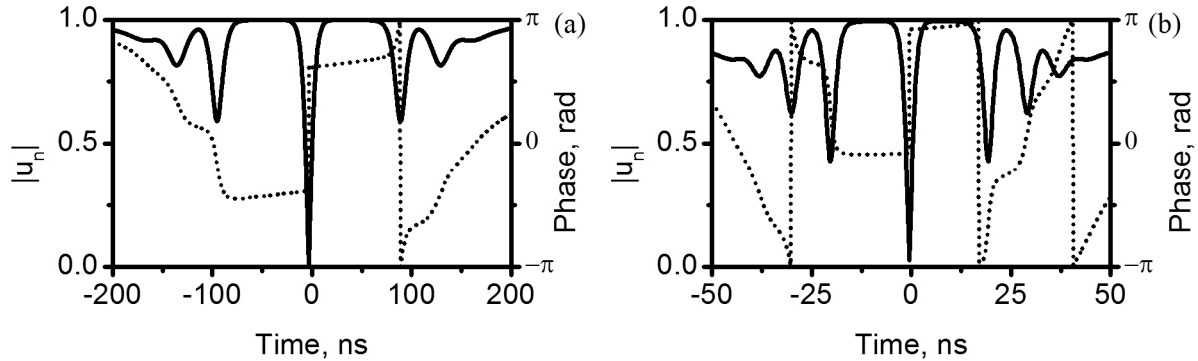


Рисунок 1 – На рисунке (а) показан профиль черного солитона огибающей ЭСВ при несущей частоте $f = 1 \text{ GHz}$ в момент времени $t = 13 \mu\text{s}$, а на рисунке (б) – на частоте $f = 135 \text{ GHz}$ и $t = 1.6 \mu\text{s}$. Сплошной линией показана нормированная амплитуда, а пунктирной – фаза огибающей. Правая ось соответствует нормированной на $|u| = 10^{-2}$ амплитуде огибающей ЭСВ, а левая ось – фазе огибающей

Глава 4 «Светлые солитоны огибающей электромагнитно-спиновых волн в искусственном слоистом мультиферроике» посвящена исследованию свойств солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в искусственной мультиферроидной структуре, состоящей из слоя ферромагнетика и слоя сегнетоэлектрика.

В первом параграфе описывается процесс вывода нелинейного закона дисперсии, учитывающего двойную волновую нелинейность исследуемой структуры. Для этого были выполнены следующие шаги: выведен линейный закон дисперсии, задан вид нелинейности в каждой волноведущей подсистеме, найдена связь между переменной намагниченностью и напряженностью электрического поля несущей волны. В результате был выведен нелинейный закон дисперсии, содержащий только одну динамическую переменную.

Проведен анализ нелинейного закона дисперсии. В результате анализа установлено, что весь диапазон волновых чисел и частот можно разделить на три области: область, где преобладает электрическая нелинейность; область, где преобладает магнитная нелинейность, а также переходную область. Было показано, что разные типы нелинейности приводят к разным знакам нелинейного члена модифицированного НУШ. Так, электрическая нелинейность стремится сместить величину $N_{M3} + N_{E3}$ в положительную сторону, а магнитная – сделать ее отрицательной. Таким образом, два типа нелинейности конкурируют между собой.

Второй параграф посвящен расчету коэффициентов модифицированного нелинейного уравнения Шредингера. Для нахождения значений коэффициентов

модифицированного НУШ была использована теория, развитая в предыдущей главе, а также выведенный в предыдущем параграфе нелинейный закон дисперсии.

Результаты расчета нелинейного коэффициента показаны на рисунке 2. Из рисунка видно, что магнитная нелинейность стремится к нулю в области $k < 25$ rad/cm. Этот эффект связан с перераспределением энергии ЭСВ – она концентрируется, в основном, в сегнетоэлектрическом слое, а не в ферромагнитной пленке.

В области $25 < k < 30$ rad/cm влияние магнитной нелинейности возрастает и она выходит на насыщение при $k > 30$ rad/cm. Следует отметить, что при этом значение $N_{M3} + N_{E3}$ стремится к значению нелинейного коэффициента для ЭСВ, распространяющихся в одиночной ферромагнитной пленке. Электрическая нелинейность при выбранном значении N_ϵ не способна существенно повлиять на значение нелинейного коэффициента при $k > 25$ rad/cm. Однако в области $k < 25$ rad/cm, когда энергия ЭСВ сосредоточена, в основном, в сегнетоэлектрическом слое, электрическая нелинейность начинает играть существенную роль, что проявляется как возрастание величины $N_{M3} + N_{E3}$.

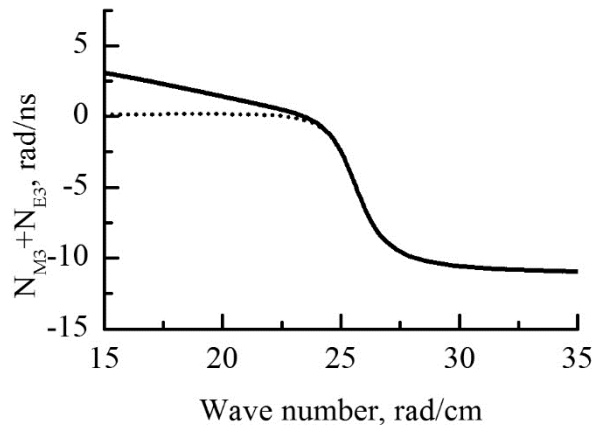


Рисунок 2 – Зависимость суммы нелинейных коэффициентов от волнового числа. Пунктирная кривая соответствует случаю учета только магнитной нелинейности. Сплошная кривая соответствует одновременному учету обоих типов нелинейности

Третий параграф содержит результаты численного моделирования образующихся нелинейных волновых пакетов. Согласно критерию Лайтхилла [2] при $(N_{M3} + N_{E3})D_2 < 0$ могут формироваться светлые солитоны огибающей. Именно благодаря электрической нелинейности в области $k < 25$ rad/cm сумма нелинейных коэффициентов становится положительной и критерий Лайтхилла выполняется. При $k > 25$ rad/cm влияние электрической нелинейности уменьшается, а влияние магнитной нелинейности начинает возрастать и поэтому сумма $N_{M3} + N_{E3}$ меняет знак.

Численное моделирование было выполнено для этих двух типичных случаев. При этом важно отметить, что начальные условия в обоих расчетах задавались в виде гауссовского импульса, но указанный импульс в ходе эволюции трансформировался в совершенно различные выходные импульсы. Результаты моделирования для случая $k < 25$ rad/cm представлены на рисунке 3(а), из

которого видно, что при $t = 7.5$ ns формируется светлый солитон огибающей. О солитонной природе полученного волнового образования говорит постоянство фазы огибающей внутри импульса.

Результаты моделирования для случая $k > 30$ rad/cm приведены на рисунке 3(b). Проведенный расчет показал изменение характера эволюции импульса. Изменение было вызвано в первую очередь изменением знака суммы нелинейных коэффициентов третьего порядка. При этом в момент времени $t = 32$ ns начинал формироваться импульс, форма которого была близка к прямоугольной. Следует отметить, что фронты импульса имели «тонкую структуру».

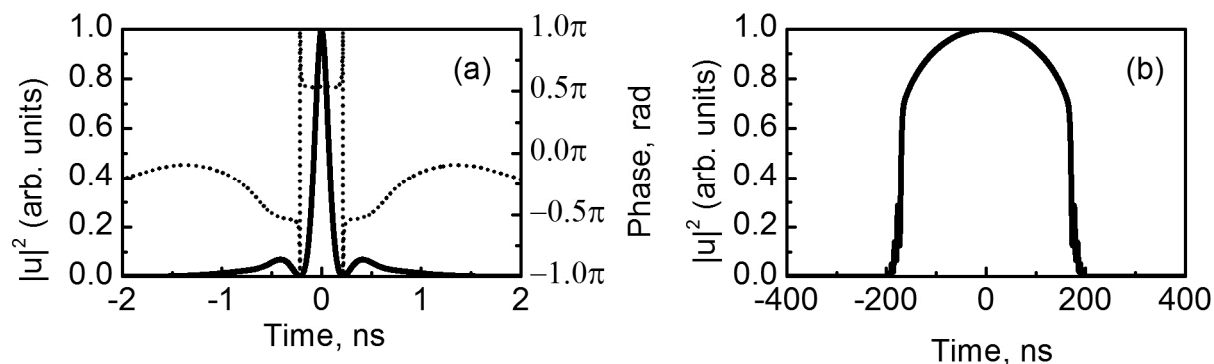


Рисунок 3 – (a) Профиль светлого солитона огибающей ЭСВ при $t = 7.5$ ns. Левая ось, показывающая квадрат амплитуды, нормирована на $|u_1|^2 = 0.431$, а (b) профиль импульса при $t = 32$ ns. Левая ось нормирована на $|u_2|^2 = 0.108$. Сплошными линиями обозначена амплитуда огибающей в квадрате, а линией из точек – фаза огибающей.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

Список литературы

1. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. — М.: Физматлит, 2005. — 648 с.
2. Remoissenet M. Waves called solitons: Concepts and Experiments. 3rd — Berlin: Springer-Verlag, 1999. — 327 p.
3. Kevrekidis P.G., Frantzeskakis D.J., Carretero-González R. Emergent Nonlinear Phenomena in Bose-Einstein Condensates. — Berlin: Springer-Verlag, 2008.
4. Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. Теория солитонов: метод обратной задачи. — М.: Наука, 1980. — 320 с.
5. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П. Генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2008. Т. 88, № 10. — С. 743-747.

6. Ustinov A.B., Demidov V.E., Kondrashov A.V., Kalinikos B.A., Demokritov S.O. Observation of the Chaotic Spin-Wave Soliton Trains in Magnetic Films // *Physical Review Letters*. 2011. Vol. 106, No. 1. — P. 017201.
7. Wu M., Kalinikos B.A., Carr L.D., Patton C.E. Observation of Spin-Wave Soliton Fractals in Magnetic Film Active Feedback Rings // *Physical Review Letters*. 2006. Vol. 96, — P. 187202.
8. Zakharov V.E., Ostrovsky L.A. Modulation instability: The beginning // *Physica D*. 2009. Vol. 238, — P. 540-548.
9. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. Brillouin light scattering studies of confined spin waves: linear and nonlinear confinement // *Physics Reports*. July, 2001. Vol. 348, No. 6. — P. 441-489.
10. Звездин А.К., Попков А.Ф. К нелинейной теории магнитостатических спиновых волн // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1983. Т. 84, № 2. — С. 606-615.
11. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 103, — P. 031101.
12. Sun N.X., Srinivasan G. Voltage Control of Magnetism in Multiferroic Heterostructures and Devices // *Spin*. 2012. Vol. 3, No. 2. — P. 1240004.
13. Глушченко А.Г. Поверхностные нелинейные волны в структуре феррит-сегнетоэлектрик // *Физика твердого тела*. 1991. Т. 33, № 6. — С. 1635-1639.

Список работ автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

- Ч1. Черкасский М. А., Ковшиков Н. Г., Калиникос Б. А. Наблюдение модуляционной неустойчивости и солитонов огибающей спиновых волн в ферромагнитных пленках области сосуществования четырехволновых и трехволновых параметрических процессов // *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52, № 10. — С. 1981-1986.
- Ч2. Черкасский М. А., Калиникос Б. А. Солитоны огибающей электромагнитно-спиновых волн в искусственном слоистом мультиферроике // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2013. Т. 97, № 11. — С. 707-711.
- Ч3. Черкасский М. А., Калиникос Б. А. Солитоны огибающей электромагнитно-спиновых волн в продольно намагниченной безграничной мультиферроидной среде // *Письма в Журнал технической физики*. 2013. Т. 39, № 3. — С. 87-94.
- Ч4. Ordóñez-Romero C. L., Cherkasskii M. A., Qureshi N., Kalinikos B. A., Patton C. E. Direct Brillouin light scattering observation of dark spin-wave envelope solitons in magnetic films (Прямое наблюдение темных солитонов огибающей спиновых волн с помощью спектроскопии рассеяния света Мандельштама-Бриллюэна) // *Physical Review B*. 2013. Vol. 87, No. 17. — P. 174430.

Другие публикации и материалы международных и Всероссийских конференций:

- Ч5. Черкасский М. А., Жарычев С. В., Ковшиков Н. Г. Модуляционная неустойчивость и преобразование частоты поверхностных спиновых волн в пленках железиттриевого граната // *Материалы Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и инновации в технических университетах"* / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург, Россия, 10-12 октября, 2007 г. С. 162-164.
- Ч6. Дроздовский А. В., Черкасский М. А. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов формирования светлых солитонов огибающей спиновых волн в тонкопленочных магнетонных кристаллах: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых / СПбГЭТУ, 63-я научно-техническая конференция

- профессорско-преподавательского состава университета. Санкт-Петербург, Россия, 26 января – 6 февраля, 2010 г. С. 27-31.
- Ч7. Ordenez-Romero C. L., Cherkasskii M. A., Kalinikos B. A., Qureshi N., Patton C. E., Wu M. Direct Brillouin Light Scattering Observation of Dark Spin-Wave Envelope Solitons in Magnetic Thin Films // The 2010 International Conference on Microwave Magnetism / Northeastern University, Boston, MA, USA, June 1-4, 2010. P. 83.
- Ч8. Wang Z., Wu M., Cherkasskii M. A., Kalinikos B. A. Observation of Black Spin Wave Soliton Pairs in Magnetic Thin Films // Bulletin of the American Physical Society. Annual Meeting of the Four Corners Section of the APS, - Vol. 55. Ogden, Utah, USA, October 15 – 16, 2010.
- Ч9. Wang Z., Wu M., Cherkasskii M. A., Kalinikos B. A. Observation of Black Spin Wave Soliton Pairs in Yttrium Iron Garnet Thin Films // The 55th Conference on Magnetism and Magnetic Materials. Program. Atlanta, GA, USA, November 14 – 18, 2010. P. 32.
- Ч10. Cherkasskii M. A., Wang Z., Wu M., Kalinikos B. A. Observation of Black Spin Wave Soliton Pairs in Yttrium Iron Garnet Thin Films // Spin Waves 2011 International Symposium. Program. Abstracts / Ioffe Physical-Technical Institute. St. Petersburg, Russia, June 5-11, 2011. P. 57
- Ч11. Черкасский М. А., Дроздовский А. В. Влияние нелинейных и дисперсионных свойств магнитных материалов на процессы формирования солитонов спиновых волн: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых / СПбГЭТУ, 65-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Санкт-Петербург, Россия, 24 января - 4 февраля, 2012 г. С. 32-36.
- Ч12. Drozdovskii A. V., Ustinov A. B., Cherkasskii M. A., Kalinikos B. A. Generation of bright and dark spin wave envelope soliton trains through self-modulational instability in magnonic crystals // IEEE International Magnetism Conference INTERMAG 2012. Vancouver, Canada, 7-11 May, 2012.
- Ч13. Nikitin A. A., Ustinov A. B., Cherkasskii M. A., Kalinikos B. A. "Dual-tunable multiferroic active ring microwave resonator // IEEE International Magnetism Conference INTERMAG 2012. Vancouver, Canada, 7-11 May, 2012.
- Ч14. Черкасский М. А., Калиникос Б. А. Теоретическое моделирование нелинейного сжатия СВЧ импульсов в устройствах на ферритовых пленках: Сборник трудов конференции // Всерос. научно-техническая конференция "Микроэлектроника СВЧ" / СПбГЭТУ. Санкт-Петербург, Россия, 4-7 июня, 2012 г. Т. 2, - С. 271-273. ,
- Ч15. Drozdovskii A. V., Cherkasskii M. A. Insertion loss and dispersion of spin waves in magnonic crystals of finite length // Metamaterials '2012: The Sixth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. St. Petersburg, Russia, 17 – 22 September, 2012. P. 330-332.
- Ч16. Черкасский М. А., Калиникос Б. А. Моделирование черных солитонов огибающей электромагнитно-спиновых волн в безграничной мультиферроидной среде: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых / СПбГЭТУ, 66-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Санкт-Петербург, Россия, 1 февраля – 8 февраля, 2013 г. С. 27-31.
- Ч17. Cherkasskii M. A., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Dark Soliton Formation Processes in Ferrite Films and Artificial Multiferroics at Terahertz Frequency Range // Spin Waves 2013. International Symposium. Program. Abstracts / Ioffe Physical-Technical Institute. St. Petersburg, Russia, June 9-15, 2013. P. 157
- Ч18. Черкасский М. А., Калиникос Б. А. Светлые солитоны огибающей электромагнитно-спиновых волн в искусственном слоистом мультиферроике с двойной нелинейностью // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. VIII Всерос. конф. молодых ученых / Саратовский университет. Саратов, Россия, 3–5 сентября, 2013 г. С. 254-255.