

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

Исследование особенностей процессов формирования пучков спиновых волн в однородных и неоднородных системах связанных микроволноводов

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 214 группы

направления 03.04.01 Прикладные математика и физика

факультета нелинейных процессов

Александровой Юлии Владимировны

Научный руководитель

Зав. кафедрой нелинейной физики

к.ф.-м.н., доцент

подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Зав. кафедрой нелинейной физики

к.ф.-м.н., доцент

подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2020 год

ВВЕДЕНИЕ

Микромагнетизм – это классическая феноменологическая теория, в которой спонтанная намагниченность, магнитная анизотропия и другие эффекты, присущие магнитоупорядоченным веществам, постулируются и учитываются соответствующим образом записанными выражениями для свободной энергии. Эта теория ставит своей задачей найти, исходя только из выражения для свободной энергии и общих уравнений равновесия и движения намагниченности, зависимость намагниченности от координат и времени [1].

Базовой концепцией микромагнитной теории является переход от дискретного рассмотрения магнитных моментов отдельного атома моделируемого образца к непрерывной функции распределения намагниченности. Возможность создания такой феноменологической теории основывается на том, что обменное взаимодействие между соседними спинами является доминирующим фактором, определяющим их ориентацию, тогда как дополнительные учитываемые силы оказывают лишь малое возмущающее воздействие; другими словами, направление спинов на соседних узлах решетки может изменяться лишь на малый угол. Поэтому можно аппроксимировать углы, характеризующие направления спинов, непрерывными функциями координат. Искомой величиной становится вектор намагниченности, компоненты которого непрерывно меняются в пространстве и времени. При этом обычно в теории микромагнетизма предполагается, что длина вектора намагниченности остается постоянной. Равновесное распределение намагниченности можно отыскать путем минимизации свободной энергии ферромагнетика, при дополнительном условии постоянства абсолютного значения вектора намагниченности.

Однако это нелинейное ограничение совместно с необходимостью учета дальнедействующей природы магнитостатического взаимодействия приводит к довольно сложной задаче минимизации, которая может быть аналитически решена только для некоторых простых случаев [1]. Поэтому фактически во всех, практически важных случаях, решение этой задачи возможно только численными методами.

В настоящее время микромагнитное моделирование фактически является стандартным методом изучения магнитных свойств нанообъектов, занимая некоторое промежуточное положение между теорией и экспериментом (условно, этот метод можно назвать численным экспериментом). За последние десятилетия разработано несколько различных подходов для определения равновесной конфигурации намагниченности и расчета ее динамики, при этом наиболее распространённым является подход, основанный на интегрировании динамического уравнения Ландау-Лифшица. Этот метод является наиболее общим и реализован в таких широко известных программах микромагнитного моделирования как OOMMF, Nmag, Mumax3 [2, 3] и magpar. Однако, поскольку в этом подходе вычисляется вся эволюция системы связанных магнитных моментов, начиная с некоторого начального распределения, он является относительно медленным.

Другим методом микромагнитного моделирования является метод, предложенный в лаборатории ЭДСВЧЭ Института Физики им. Киренского. Метод основан на использовании неопределенных множителей Лагранжа для поиска равновесного (основного) состояния намагниченности [4, 5], и определении нормальных мод колебаний намагниченности с помощью линеаризации уравнения Ландау-Лифшица для случая малых отклонений намагниченности относительно основного состояния [6, 7]. Данный метод для определенного класса задач обладает рядом преимуществ по сравнению с вышеупомянутыми пакетами микромагнитного моделирования, в частности, он оптимизирован для решения больших задач на мультипроцессорных многопоточных системах (типа NVIDIA Tesla [8]). Это дает прирост производительности вычислений до десяти раз по сравнению с вычислениями, выполняемыми на центральных процессорах. Следует также отметить, что в последние годы интерес к использованию многопроцессорных систем для решения задач микромагнитного моделирования привлекает большое внимание исследователей, и этой теме посвящено множество работ [2, 9-10].

В общем случае, для расчета зависимости компонент намагниченности от координат и времени необходимо разбивать исследуемую магнитную среду на дискретные ячейки различной пространственной размерности (1D, 2D, 3D). При этом в зависимости от уровня детализации и решаемой задачи под такими ячейками могут пониматься различные по масштабу области среды, например, наночастицы или микрокристаллиты, в пределах которых намагниченность считается однородной.

Совершенствование и активное развитие теоретических и компьютерных методов исследований, быстрый технологический прогресс стимулируют интерес к разработке теории распространения магнитостатических волн (МСВ) в различных нерегулярных микроволноводах.

В наши дни актуальной задачей является исследование магнитных микроструктур, характеристиками которых можно управлять путем изменения статических магнитных полей [11-14]. Магнитные волноведущие структуры на основе пленок железо – иттриевого граната (ЖИГ) представляют большой интерес, так как в них возможно распространение спиновых волн (СВ), обладающих низким значением коэффициента затухания [15, 16]. В планарных системах, на основе ЖИГ – микроволноводов, существует возможность управлять спектром магнитостатических спиновых волн (МСВ) с помощью изменения величины как магнитного поля, так и задание фазы источников.

Таким образом тема выпускной квалификационной работы магистра является актуальной.

Целью выпускной работы является исследование особенностей процессов формирования пучков спиновых волн (СВ) в однородной и неоднородных системах связанных микроволноводов, а также исследование изочастотных характеристик для системы связанных микроволноводов.

В соответствии с поставленной целью основными **задачами** выпускной работы были:

- Разработка программы микромагнитного моделирования процессов распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в одиночном микроволноводе;
- Разработка программы микромагнитного моделирования процессов распространения ПМСВ в однородной системе связанных микроволноводов;
- Разработка программы микромагнитного моделирования процессов распространения ПМСВ в неоднородной системе связанных микроволноводов.

Программы моделирования разрабатывались в программе микромагнитного моделирования MuMax3 [2, 3]. Обработка результатов из программы микромагнитного моделирования выполнялась в математическом пакете MATLAB.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается актуальность работы, перечислены основные цели и задачи.

Глава 1 посвящена методам теоретического и численного исследования процессов распространения спиновых волн в магнитных пленках.

В п. 1.1 представлено описание теоретических основ микромагнитного моделирования.

В п. 1.2 изложены основные понятия принципы и методы построения расчетных моделей для микромагнитного моделирования в среде программ MuMax3.

В п. 1.3 представлены результаты моделирования одиночного микроволновода в MuMax3 с разными граничными условиями. Было показано, что распределение эффективного поля при разных граничных условиях имеет различие только по той координате, вдоль которой задается эффективное поле. Методами микромагнитного моделирования проведен расчет дисперсионных характеристик МСВ в микроволноводе и проведено сравнение полученных результатов с известными аналитическими результатами для безграничной

пленки и поперечно-ограниченного волновода. Показано, что эти результаты качественно совпадают.

Глава 2 посвящена исследованию поведения волнового пучка в однородной системе связанных микроволноводов

П. 2.1 представлена теоретическая модель, основанная на дискретным нелинейным уравнением Шредингер, описывающая поведение волнового пучка в планарной системе микроволноводов.

В п. 2.2 представлена программа микромагнитного моделирования. Моделирование производилось в программе микромагнитного моделирования MuMax3. Создание системы микроволноводов в микромагнитном моделировании производилось из простых примитивов типа кубоида, затем задавались материальные параметры и однородное внешнее магнитное поле.

На основе разработанной программы микромагнитного моделирования проведено сопоставление изочастотных характеристик, полученных ранее в бакалаврской работе для безграничной пленки ЖИГ. Показано, что качественно вид изочастотных характеристик совпадает.

В п. 2.3 производилось исследование распространения волнового пучка в системе $N=21$ связанных микроволноводов расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Проводилось исследование распределения эффективного поля на одном периоде структуры при разных расстояниях между микроволноводами.

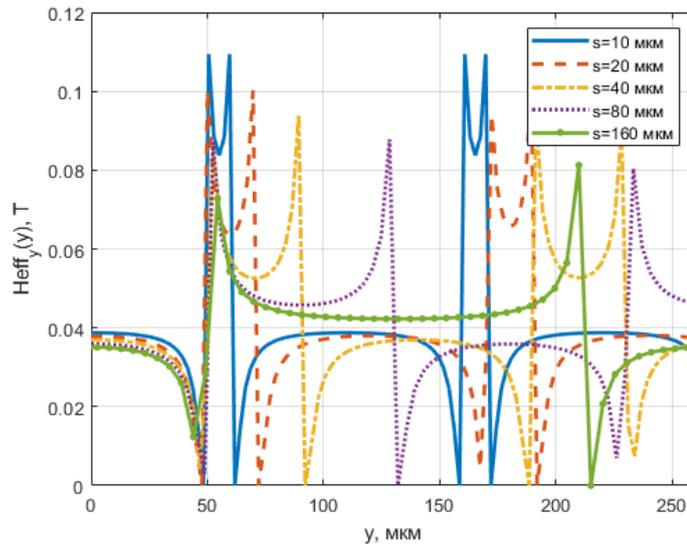


Рис. 1. Распределение эффективного поля на одном периоде структуры при разных расстояниях s между волноводами.

Показано, что в периодической системе микроволноводов эффективное поле внутри волноводов уменьшается при увеличении расстояния s между микроволноводами.

Были построены изочастотные характеристики для такой системы. Показано, что они имеют периодический характер в поперечном направлении относительно распространения спиновых волн. Также сделан вывод, что фиксированной частоте спиновой волны при увеличении расстояния s между микроволноводами периодичность изочастотных характеристик в поперечном направлении уменьшается и режим дифракционного расплывания сменяется режимом распространения спиновой волны в одиночном волноводе.

В п. 2.4 было продемонстрировано возможность управления волновым пучком в системе связанных микроволноводов. Управление производилось заданием сдвига фаз между соседними волноводами.

Глава 3 посвящена исследованию поведения волнового пучка в однородной системе связанных микроволноводов.

П. 3.1 посвящен микромагнитному моделированию неоднородной системы микроволноводов. Был выбран способ задания неоднородности с помощью задания линейно возрастающего поля от одного края исследуемой структуры к другому

по формуле $H(y) = H_0 + \frac{dH \cdot y}{L_y / 2}$, где L_y - длина структуры по оси y , dH - изменение поля, y - координата. При этом значение поля в центральном волноводе остается постоянным (H_0) и равным $400 \cdot 10^{-4}$ Т. Также были построены карты интенсивности для одноволноводного возбуждения и трехволноводного. Было получено, что при градиенте внешнего поля у одноволноводного возбуждения наблюдается характерная особенность - периодическое фокусирование волнового пучка. Прежде всего необходимо отметить, что ширина пучка испытывает периодические пространственные осцилляции вдоль структуры и сопровождается наличием области «перетяжки», где происходит уменьшение поперечных размеров волнового пучка. При трехволноводном возбуждении наблюдаются периодические изгибания волнового пучка.

В п. 3.2 Было продемонстрировано возможность управления волновым пучком в неоднородной системе связанных микроволноводов. Управление производилось заданием сдвига фаз между соседними волноводами. Из полученных результатов следует, что не зависимо от фазы между возбуждаемыми источниками, волна распространяется только в возбуждаемых волноводах. Большой вклад в характер распространения вносить градиент внешнего поля, а не фаза между соседними источниками.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы магистра были получены следующие основные результаты:

1. Изложены основные понятия, принципы и методы построения расчетных моделей для микромагнитного моделирования в среде программ MuMax3.
2. Методами микромагнитного моделирования было исследовано распределение эффективных статических магнитных полей в микроволноводах с различной геометрией и граничными условиями. Показано, что в исследуемых

микроволноводах внутреннее статическое магнитное поле является в большей части объёма волновода однородным. При уменьшении ширины волновода, при сохранении остальных геометрических размеров, внутреннее поле также уменьшается.

3. Рассмотрены некоторые методы расчета АЧХ, ФЧХ и дисперсионных характеристик МСВ в микроволноводе с поглощающими слоями.

4. Методами микромагнитного моделирования проведен расчет дисперсионных характеристик МСВ в микроволноводе и проведено сравнение полученных результатов с известными аналитическими результатами для безграничной пленки и поперечно-ограниченного волновода. Показано, что эти результаты качественно совпадают.

5. Найдена численная модель для исследования волновых пучков в микроволноводах. Проведено сопоставление микромагнитного моделирования и упрощенной модели системы волноводов основанной на НДУШ. Расчеты показали, что результаты качественно совпадают и возможность использования упрощенной модели, значительно сокращает время исследования особенностей распространения волн в такой структуре.

6. Рассмотрены распределения эффективного поля в периодической системе микроволноводов для одного периода структуры при разных расстояниях между микроволноводами. Показано, что в периодической системе микроволноводов эффективное поле внутри волноводов уменьшается при увеличении расстояния s между микроволноводами.

7. Методами микромагнитного моделирования проведен расчет изочастотных характеристик МСВ и проведено сравнение полученных результатов с известными аналитическими результатами для случая безграничной пленке. Показано, что результаты качественно совпадают.

8. На основе разработанной программы микромагнитного моделирования, проведены расчеты дисперсионных характеристик для периодической системы микроволноводов. Изочастотные характеристики для такой системы имеют периодических характер в поперечном направлении относительно

распространения спиновых волн. Также сделан вывод, что фиксированной частоте спиновой волны при увеличении расстояния s между микроволноводами периодичность изочастотных характеристик в поперечном направлении уменьшается и режим дифракционного расплывания сменяется режимом распространения спиновой волны в одиночном волноводе.

9. На основе численной модели проведено исследование возможности управления волновым пучком в планарной системе микроволноводов.

10. Показано, что при возбуждении одиночного волновода в системе идентичных микроволноводов помещенных в неоднородное магнитное поле с линейно возрастающим градиентом, возможно существование блоховских осцилляций спиновых волн, которые могут наблюдаться экспериментально в тонких ферромагнитных пленках. При возбуждении конечного числа микроволноводов одинаковой фазы наблюдается периодическое изгибание волнового пучка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Браун У.Ф. Микромагнетизм. Москва: Наука, 1979
2. mumax3 GPU-accelerated micromagnetism. — <http://mumax.github.io/>
3. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., et al. The design and verification of MuMax3 // AIP Advances, Vol. 4, 2014. P. 107133. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4899186>.
4. Беляев Б.А., Изотов А.В., Лексиков А.А. Микромагнитный расчет равновесного распределения магнитных моментов тонких пленок // ФТТ, Т. 52, № 8, 2010. С. 1549-1556.
5. Изотов А.В., Беляев Б.А., Валиханов М.М., Поленга С.В., Стефанюк А.В. Алгоритм расчета равновесного состояния ферромагнетика на основе метода множителей Лагранжа // Выч. мет. программирование, Т. 13, № 4, 2012. С. 551–558.
6. Изотов А.В., Беляев Б.А. Метод расчета микроволнового спектра поглощения в дискретной модели ферромагнетика // Изв. вузов. Физика, Т. 53, № 9, 2011. С. 21.
7. Беляев Б.А., Изотов А.В. Микромагнитный расчет магнитостатических мод колебаний ортогонально намагниченного диска железо-иттриевого граната // ФТТ, Т. 55, № 12, 2013. С. 2370-2378.
8. Lindholm E., Nickolls J., Oberman S., Montrym J. NVIDIA Tesla: A Unified Graphics and Computing Architecture // IEEE Micro, Vol. 28, No. 2, 2008. pp. 39-55.
9. Lopez-Diaz L., Aurelio D., Torres L., Martinez E., et al. Micromagnetic simulations using Graphics Processing Units // J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 45, 2012. P. 323001.
10. Jermain C.L., G.E.Rowlands, R.A.Buhrman, D.C.Ralph. GPU-accelerated micromagnetic simulations using cloud computing // J. Magn. Mater., Vol. 401, 2016. pp. 320–322.
11. Беспятых Ю.И., Зубков В.И., Тарасенко В.В. Распространение поверхностных магнитостатических волн в ферромагнитной пластине//ЖТФ. 1980. Т.50. №1.С.140.

12. *Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э. Г., Щеглов В.И.* Влияние неоднородности постоянного магнитного поля на траектории поверхностных магнитостатических волн//ПЖТФ.1989.Т.15.№4.С.1
13. *Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И.* Траектории поверхностных магнитостатических волн в неоднородно намагниченных ферритовых пленках//ПЖТФ.1989.Т.15.№4.С.5.
14. *Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И.* Распространение поверхностных магнитостатических волн в неоднородном постоянном магнитном поле типа протяженной ямы//ЖТФ.1990.Т.60.№7.С.138.
15. *Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И.* Распространение поверхностных магнитостатических волн в неоднородном постоянном магнитном поле с профилем типа вала//РЭ.1990.Т.35.№8.С.1617.
16. *Vashkovsky A.V., Lock E.H., Shcheglov V. I., Zubkov V. I.* Passage of surface magnetostatic waves through magnetic «valley» and «ridge» //IEEE Trans.on Magn.1990.V.26.№5.P.1480.
17. *Гуревич А.Г.* Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Гос.Изд. физ.-мат.лит.1960.
18. *Гуревич А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука.1973.
19. *Гуревич А. Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: ФИЗМАТЛИТ.1994.
20. *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. М.: Издательство Саратовского университета, 1993, с.48
21. *G. Venkata, H. Fangohrb, A. Prabhakara* Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics. 2016. -P. 13.
22. *Damon R. W., Eshbach J. R.* Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. J. Phys. Chem. Solids, 1961, vol. 19, P.308-320.
23. *O'Keeffe T.W.* Magnetostatic surface-wave propagation in finite samples / *T.W.O'Keeffe, R.W.Patterson*// –J. Appl. Phys. –1978. –Vol.67. –No9.–pp.4868-4895.

24. *Kittel Ч.* К теории ферромагнитного резонансного поглощения // Ферромагнитный резонанс и поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях. М. 1952. с. 46-55
25. *Ralph Skomski, G.C. Hadjipanayis, D.J. Sellmyer* Effective Demagnetizing Factor of Complicated Particle Mixtures. 2007. -P. 4.
26. *F. Lederer, G.I. Stegeman, D.N. Christodoulides, G. Assanto, M. Segev, Y. Silberberg* Discrete solitons in optics. 2008. –P. 126.
27. *Стальмахов В. С., Игнатьев А. А.* Лекции по спиновым волнам. Саратов, 1983
28. *Локк Э. Г.* Магнитостатические волны в ферритовых пленках и структурах на их основе — Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М. ИРЭ РАН. 2007
29. *Балякин А.А., Рыскин Н.М.* Колебания связанных маятников. Упругие волны в твердых телах. – Саратов: Изд-во СГУ, 2008. – 38 с.