

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

**Линейные и нелинейные режимы распространения магнитоэлектрических
волн в периодических магнитных структурах**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы
направления 03.03.01 Прикладные математика и физика
факультета нелинейных процессов
Миронова Дмитрия Юрьевича

Научный руководитель
Зав. кафедрой нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент

Е.Н. Бегинин

Зав. кафедрой нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент

Е.Н. Бегинин

Саратов 2021 год

ВВЕДЕНИЕ

Спиновые волны (СВ), распространяющиеся в ферромагнитных пленках и слоистых структурах на их основе, уже многие годы успешно используются для построения различных приборов аналоговой обработки сигналов в диапазоне сверхвысоких частот.

Интерес к спиновым волнам в тонкопленочных средах носит как фундаментальный, так и прикладной характер [1-3]. С фундаментальной точки зрения этот интерес обуславливается тем, что ферромагнитные пленки являются удобной средой для изучения линейных и нелинейных волновых явлений. С прикладной точки зрения интерес к спиновым волнам обусловлен тем, что особенности процессов возбуждения, распространения и детектирования СВ можно использовать при создании таких устройств, как фильтры, резонаторы, линии задержки, генераторы СВЧ колебаний и т.д. Наибольшее применение как в фундаментальных, так и прикладных исследованиях благодаря рекордно низким СВЧ магнитным потерям получили пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Одним из направлений создания магнитных материалов с заранее заданными дисперсионными свойствами является формирование магнитных периодических структур. Сравнительно недавно такие периодические структуры получили так же название «магнонных кристаллов» (МК) по аналогии с фотонными кристаллами [4].

В таких структурах распространяются спиновые волны (магноны). В отличие от фотонных кристаллов, которые используются в оптических системах, МК представляют интерес для использования в микроволновом диапазоне длин волн. Наличие пространственного периода приводит к возникновению в спектре спиновых волн запрещенных зон для волновых чисел.

В последние годы вопросами распространения магнитостатических волн в структурах с различными периодическими неоднородностями уделяется достаточно большое внимание, так как такие структуры могут быть использованы для создания высокочастотных резонаторов, различного рода фильтров и т.д.

Актуальность выпускной квалификационной работы определяется необходимостью создания управляемых магнитным полем функциональных элементов на основе периодических структур для систем обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне радиоволн.

Объектом исследования являются линейный и нелинейные спиновые волны в периодических магнитных структурах.

Предметом является выявление особенностей формирования запрещенных зон спиновых волн в линейном режиме распространения и условий формирования солитонных режимов при распространении нелинейных спиновых в периодических структурах.

Целью выпускной работы является исследование зависимостей параметров запрещенных зон спиновых волн от характеристик периодических магнитных структур и параметров щелевых солитонов от частоты и амплитуды спиновых волн.

В соответствии с целью выпускной квалификационной работы были поставлены основные **задачи**:

1. Разработка программы расчета дисперсионных характеристик и параметров запрещенных зон спиновых волн в периодических структурах на основе метода матриц передачи.
2. Расчет амплитудно-частотных и фазовых характеристик спиновых волн в бесконечных и ограниченных периодических структурах при малых амплитудах спиновых волн.
3. Разработка программы расчета характеристик распространения импульсов спиновых волн большой интенсивности в периодической структуре на основе решения связанных нелинейных уравнений Шредингера.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Глава 1 посвящена получению дисперсионного уравнения поверхностных магнитостатических волн в однородных ферритовых пленках.

Глава 2 посвящена исследованию дисперсионного уравнения методом матриц передачи исследуются частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения, групповых скоростей волн в структурах с конечным числом периодов. Для периодических структур получено дисперсионное уравнение Блоховских волн.

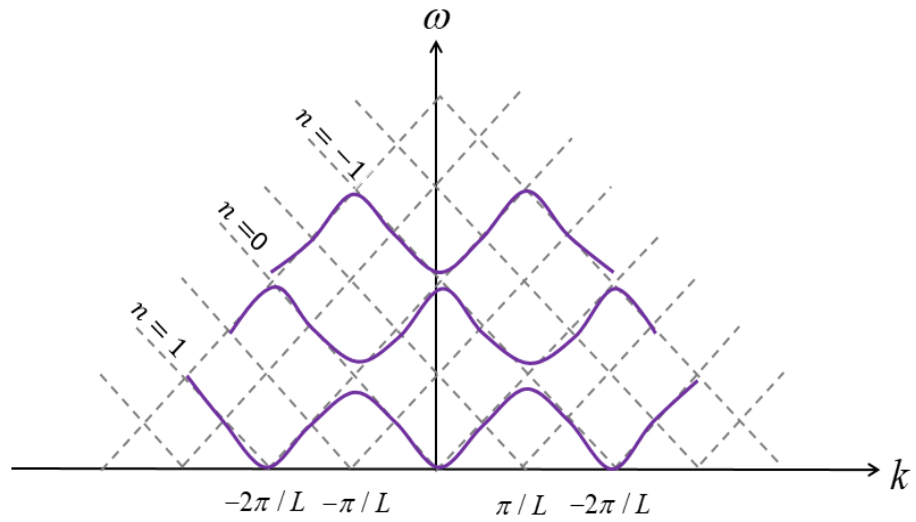
В пункте 2.1 описана периодическая структура и ее общие свойства при распространении в магнитостатических волн Периодические структуры (ПС) обладают рядом особенностей, которые делают их важными для разного типа волн:

1) собственные волны ПС – это бесконечный набор пространственных гармоник, фазовые скорости которых меняются от нуля до бесконечности;

2) в периодических структурах могут распространяться волны, лежащие в жестко ограниченных полосах пропускания.

Любая периодическая структура обладает присущим ей волновым числом $k^1 = 2\pi n / L$, где L – период структуры, $n = 1, 2, 3, \dots$. Решение волнового уравнения в периодической среде, согласно теореме Флоке, можно записать в виде суммы пространственных гармоник $\Psi^1 = \sum A_n \exp(jky)$. При излучении ПС часто пользуются диаграммой Бриллюэна, являющейся графическим представлением дисперсионного соотношения волн в структуре. Пусть дисперсионная зависимость для однородной среды является прямой линией. Если ввести бесконечно малое периодическое возмущение среды, то возникают пространственные гармоники, каждая из которых имеет свою дисперсионную кривую, подобную кривой в однородной среде но смещенную на $2\pi n / L$, как показано на рис. 2.1(а) пунктирными прямыми. В этом случае пространственные гармоники между собой не взаимодействуют.

а)



б)

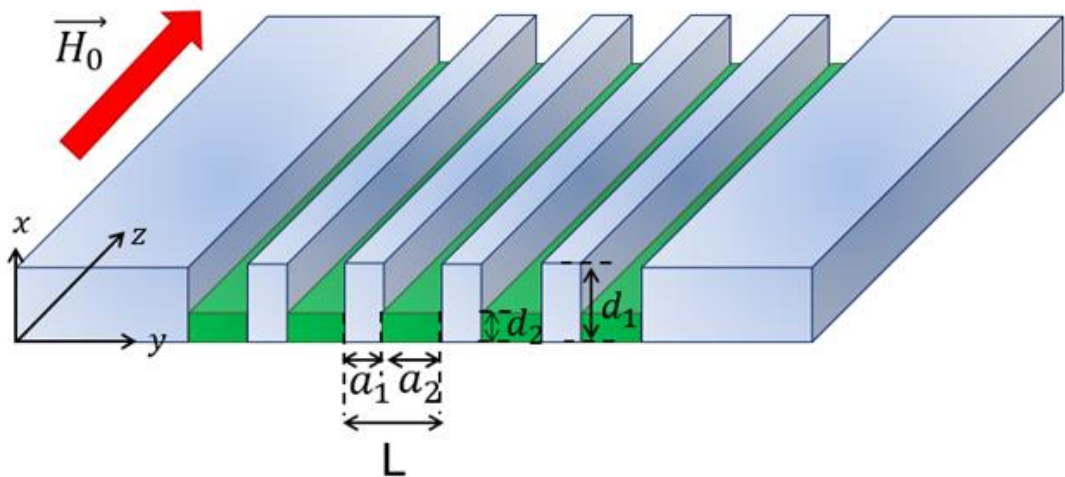


Рис. 2.1. а) – Диаграммы Бриллюэна для среды с бесконечным числом периодов; б) – магнитная пленка с конечным числом периодов.

Если возмущение возрастает, то возникает сильная связь в точках пересечения, где две пространственные гармоники имеют одинаковые волновые векторы и фазовые скорости. Дисперсионные кривые в этом случае имеют такой вид, как показано на рис. 2.1а сплошными линиями. Поскольку групповые скорости двух взаимодействующих гармоник направлены в противоположные стороны, то в окрестностях точек пересечения имеются участки, в которых постоянная распространения является комплексной величиной с изменяющейся

мнимой частью. В этом случае на диаграмме, представленной на рис. 2.1а, возникают полосы непропускания.

В последние годы вопросами распространения магнитостатических волн в структурах с различными периодическими неоднородностями уделяется достаточно большое внимание, так как такие структуры могут быть использованы для создания высокочастотных резонаторов, различного рода фильтров и т.д.

Пункт 2.2 посвящен описанию метода матриц передачи для ПС.

В пункте 2.3 рассматривались блоховские волны и запрещенные зоны в магнетонном кристалле с периодическим изменением толщины ферритового слоя.

В пункте 2.4 представлены графики частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения, также построены зависимости ширины первой запрещенной зоны от фактора заполнения и от индекса модуляции.

Глава 3 посвящена исследованию особенностей формирования щелевых солитонов в периодической магнитной структуре.

В пункте 3.1 были рассмотрены физические процессы, приводящие к появлению нелинейных эффектов в магнитных средах. При изучении процессов распространения нелинейных волн в периодически модулированных средах привело к открытию новых типов солитонных возбуждений. В частности, в работах [10, 11] при изучении распространения нелинейных волн в оптических средах с модулированным коэффициентом диэлектрической проницаемости было теоретически предсказано существование так называемых щелевых (брэгговских) солитонов. Частоты и волновые числа, соответствующие солитонным решениям, лежат в запрещенных зонах (или вблизи их границ) спектра линейных волн системы. Подобные нелинейные решения были затем получены и в других модулированных средах, в частности в кристаллах с микроскопической структурой [12-16] и в магнетиках с несколькими магнитными подрешетками [16]. Помимо щелевых солитонов в модулированных средах могут также существовать солитоны с более сложной структурой и с частотами,

лежащими выше или ниже щели спектра линейных волн (так называемые окошечные солитоны). Такие солитонные решения были впервые получены в работах [17-19]. Движущиеся щелевые и окошечные солитоны являются более сложными по своей структуре. Они образованы двумя нелинейными волнами, распространяющимися в противоположных направлениях с одинаковой частотой.

Упрощенный механизм формирования щелевого солитона заключается в следующем. Если частотный спектр волны лежит в полосе непропускания ПС, то амплитуда волны экспоненциально затухает в направлении ее распространения. Нелинейность в ПС может приводить к деформации дисперсионной характеристики волны и как следствие к сдвигу частот запрещенных зон в сторону более высоких или более низких частот. В результате этого волна с данной частотой может попасть в частотную область дисперсионной характеристики, где волны могут распространяться без затухания (разрешенные зоны). Это явление получило название нелинейного туннелирования [20]. В работе [21] показана возможность образования щелевого солитона, спектр которого лежит в полосе непропускания периодической решетки, образованной чередующимися слоями нелинейного диэлектрика, неограниченными в поперечном направлении. В такой структуре при определенном значении входной мощности может наблюдаться полное прохождение сигнала, частота которого лежит в запрещенной зоне.

В пункте 3.2 рассматривалась ферромагнитная пленка, на поверхности которой нанесены неоднородности в виде канавок. ПС представляет собой ферромагнитную пленку с толщиной d_1 . На поверхности пленки нанесена периодическая структура с периодом L в виде канавок глубиной $\Delta d = d_2 - d_1$, шириной $a_2 = L - a_1$, a_1 - ширина столбика. Предполагается, что в направлении осей x и y структура бесконечна. Система помещена во внешнее магнитное поле \vec{H}_0 направленное вдоль оси z . Вдоль оси y распространяются поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ). Для построения нелинейной модели

рассматриваемой периодической ферромагнитной структуры используем модельные уравнения, аналогичные случаю оптических волн в нелинейных ПС [22, 23].

Пункт 3.3 посвящен определению пороговых уровней мощности и разрушения солитонных режимов распространения ПМСВ.

Как известно [25] одиночные солитоны формируются при превышении амплитуды входного сигнала порогового значения A_p . При дальнейшем увеличении амплитуды A сначала наблюдается формирование многосолитонных последовательностей импульсов, затем (при $A > A_n$) переход к неустойчивым режимам (хаотическим) распространения волн. Проведенный численный расчет показал, что при выбранных параметрах задачи пороговые уровни соответствуют значениям $A_p = 0.039$, $A_n = 0.051$. При амплитуде $A < A_p$ распространения волны имеет линейный характер и в выходном сечении наблюдаются два всплеска с интервалом приблизительно равным длительности входного импульса T_0 (рис. 3.2а) Данные всплески являются результатами дифференцирования во времени переднего и заднего фронта входного прямоугольного импульса, так как в частотной области спектр проходящего импульса получается, как результат перемножения спектра входного импульса на частотный коэффициент прохождения линейной волны через ПС. Как показали проведенные расчеты эти всплески наблюдаются при любых амплитудах входного сигнала. Будем называть эти всплески фронтальными импульсами. Временной интервал между фронтальными импульсами определяет характерный временной масштаб относительно которого удобно определять временные характеристики нелинейных волновых процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование зависимостей параметров запрещенных зон спиновых волн от характеристик периодических магнитных структур и параметров щелевых солитонов от частоты и амплитуды спиновых волн.

В математическом пакете MATLAB были разработаны программы: программа расчета дисперсионных характеристик и параметров запрещенных зон спиновых волн в периодических структурах на основе метода матриц передачи; программа расчета характеристик распространения импульсов спиновых волн большой интенсивности в периодической структуре на основе решения нелинейного уравнения Шредингера. Краткое описание программ содержится в приложении.

Изложена теория для описания распространения волн в структуре. Выведены дисперсионные уравнения для слоя феррита и показано, что изменение толщины ферритового слоя не приводит к изменению граничных частот области существования ПМСВ. Такое свойство может быть использовано для формирования в ферритовом слое областей с периодическими изменяющимися толщинами слоев.

Описан метод матриц передачи для ПМСВ в периодических структурах. Используя этот метод было исследовано распространение ПМСВ в ПС с конечным числом периодов. Построены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения. Показано, что в спектре прошедшей волны наблюдаемой в общем случае бесконечное число частотных зон, в окрестности, которых наблюдаются существенные падения величины коэффициента прохождения. Продемонстрировано, что с увеличением числа периодов N , коэффициент отражения возрастает и стремится к 1, а коэффициент прохождения убывает к значению 0.

В рамках метода связанных волн исследовано распространение супергауссового импульса ПМСВ в периодической структуре с модуляцией толщины ферритового слоя. Численно определены границы линейного,

хаотического и солитонного режимов распространения ПМСВ на частоте первой запрещенной брэгговской зоны. Проведен анализ пространственно-временной эволюции одиночного щелевого солитона.

Таким образом, в линейном режиме распространения ПМСВ в ферритовых структурах с периодическим изменением толщины в дисперсионных характеристиках присутствуют запрещенные зоны. На основе таких структур могут быть созданы частотно селективные устройства обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне радиоволн.

В нелинейном режиме, при амплитуде входного сигнала больше порогового внутри запрещенных зон могут формироваться щелевые солитоны основные характеристики, которых хорошо описываются в рамках теории связанных волн. Такие нелинейные режимы могут быть использованы, например, для реализации функциональных элементов, выполняющих функции переключения СВЧ-мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: ФИЗМАТЛИТ.1994.
2. *Stancil D.D.* *Spin Waves: Theory and applications* [текст] / NY.: Springer, 2009. – 355 с. 17
3. *Adam J.D.* Analog signal processing with microwave magnetics [текст] // Proc.IEEE, -1988. V. 76, № N.2, -P. 159-170
4. *Nikitov S.A., Tailhades Ph, Tsai C.S.*, Spin waves in periodic structures – magnonic crystals [Текст] / S.A. Nikitov, Ph. Tailhades, C. S.Tsai // J. Of Magnetism and magnetic materials. – 2001. – V. 236, – P. 320-330.
5. *Ваишковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. М.: Издательство Саратовского университета, 1993, 316 с.
6. *Гуревич А.Г.* Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Гос.Изд. физ.-мат.лит.1960.
7. *Гуревич А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука.1973.
8. *Альтман Дж. Л.* Устройства сверхвысоких частот, М.: Мир, 1968
9. *Антонец И.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И.* Исследование методом исключения распространения волн через многослойную среду с барьерными неоднородностями. «Журнал радиоэлектроники» №1, 2015
10. *Chen W., Mills D.L.* Phys. Rev. Lett. 58, 2, 160 (1987).
11. *Mills D., Trullinger J.* Phys. Rev. B36, 2, 947 (1987).
12. *Chubykalo O., Kovalev A., Usatenko O.* Phys. Rev. B47, 6, 3153 (1993).
13. *Kovalev A.S., Kladko K.V., Usatenko O.V.* J. Phys. Soc. Jpn. 64, 7, 2455 (1995).
14. *Usatenko O.V., Kovalev A.S., Vialov A.A.* Fluctuation phenomena: Disorder and Nonlinearity / Ed. A.R. Bishop, S. Jimenez, L. Vazquez. World Scientific (1994). P. 286–291
15. *Chubykalo O., Kivshar Yu.* Phys. Rev. E48, 5, 4128 (1993).

16. *Kovalev A.S., Usatenko O.V., Gorbach A.V.* Phys. Rev. E60, 2, 2309 (1999).
17. *Coste J., Peyraud J.* Phys. Rev. B39, 18, 13 086 (1989).
18. *Coste J., Peyraud J.* Phys. Rev. B39, 18, 13 096 (1989).
19. *Peyraud J., Coste J.* Phys. Rev. B40, 18, 12 201 (1989).
20. *Newell A.C.* Nonlinear tunnelling // J. math. phys. 1978. Vol. 19, № 5. P. 1126–1134.
21. *Chen W., Mills D.L.* Gap solitons and the nonlinear optical response of superlattices // Phys. rev. lett. 1987. Vol. 58. P. 160–163.
22. *Кившарь Ю.С., Агравал Г.П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов / Пер. с англ. под ред. Н.Н. Розанова. М.: Физматлит, 2005
23. *Agrawal G.P.* Lightwave Technology. Telecommunication. New Jersey^ John Wiley and Sons. Inc, 2005. С. 315.
24. *Морозова М.А., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е.* Механизмы формирования солитонов огибающей в периодических ферромагнитных структурах. //Изв. вузов «ПНД», т.18, № 5, 2010. С.117
25. *Маломед Б.* Контроль солитонов в периодических средах / Б. Маломед; ред. А.И. Маймистов. – Москва: Физматлит, 2009. – 192 с.