

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

**Исследование особенностей перекачки  
магнитостатических волн в связанных ферромагнитных  
пленках**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы  
направления 03.03.01 Прикладные математика и физика  
Факультета нелинейных процессов  
Бородкина Никиты Васильевича

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

М.А.Морозова

Заведующий кафедрой  
профессор, д. ф. – м. н.

Н.М.Рыскин

Саратов 2016 год

## Введение

Исследования магнитостатических волн (МСВ) в магнитоупорядоченных структурах занимают важное место среди огромного многообразия разного рода волн, таких как электромагнитные волны, акустические волны и др. Изучение колебательных и волновых процессов в ферромагнетиках имеет уже богатую историю и является в настоящее время одним из фундаментальных разделов радиофизики.

В твердых телах могут распространяться волны различных типов – электромагнитные (быстрые), акустические (медленные) и спиновые (очень медленные) волны. Спиновые волны, представляющие собой распространение возмущений прецессии магнитных моментов атомов в узлах кристаллических решёток в магнитоупорядоченных структурах, условно можно разделить на дипольные спиновые и обменные спиновые. При больших значениях волнового числа  $k$  влияние обменного взаимодействия существенно и в ферромагнетиках возбуждаются обменные спиновые волны. При малых значениях волнового числа обменное взаимодействие не играет существенной роли в формировании спектра спиновых волн, такие волны называются дипольными спиновыми волнами или магнитостатическими волнами. Различают три типа магнитостатических волн: прямые объемные волны в нормально намагниченных пленках феррита, обратные объемные волны в касательно намагниченных пленках и поверхностные МСВ в касательно намагниченных пластинах феррита.

Широкое использование магнитостатических волн стало возможным в связи с получением высококачественных магнитных плёнок, обладающих малыми магнитными и диэлектрическими потерями, плёнок железо-иттриевого граната (ЖИГ). Магнитостатические волны в пленках ЖИГ легче всего возбуждаются на частотах СВЧ диапазона. МСВ обладают рядом существенных преимуществ перед другими типами волн в твердых телах: легко возбуждаются и принимаются практически во всем СВЧ диапазоне (потери передачи малы), характеристики МСВ зависят от величины и

направления внешнего магнитного поля, обладают сильной дисперсией, дисперсионные характеристики МСВ зависят от внешних условий, нелинейные эффекты, возникающие при распространении интенсивных МСВ, начинают проявляться уже при относительно малых уровнях мощности ( $\sim$ мкВт).

Исследование магнитоэлектрических волн в одиночной ферромагнитной пленке в настоящее время изучено достаточно подробно. Представляет интерес исследование МСВ в связанных ферромагнитных структурах. Связанные структуры расширяют функциональные возможности различных СВЧ устройств, за счет введения дополнительного управляющего параметра-коэффициента связи. Как известно, в связанной структуре происходит перекачка мощности на некоторой длине структуры, которая зависит от различных параметров этой структуры. В связи с этим актуальной является задача по исследованию особенностей перекачки в зависимости от параметров структуры.

В последние годы существенный интерес начинает проявляться к изучению нелинейных явлений на магнитоэлектрических волнах, распространяющихся в ферромагнитных плёнках. Исследования нелинейных явлений в ферромагнитных структурах приводит к ряду особенностей, в частности само модуляции, переход к хаосу и возможности существования солитонов огибающей. В связи с этим в данной дипломной работе является актуальным исследование длины перекачки от мощности входного сигнала.

**Цель дипломной работы** состоит в исследовании особенностей линейной и нелинейной перекачки сигнала в слоистой структуре из двух связанных ферромагнитных пленок, в зависимости от основных параметров системы и мощности входного сигнала.

**Основные задачи**, решаемые в работе, заключаются в следующем:

- исследование дисперсионных характеристик поверхностных МСВ в структуре, состоящей из двух связанных ферромагнитных пленок;

- исследование длины перекачки в двух связанных ферромагнитных пленках в зависимости от частоты входного сигнала, величины внешнего магнитного поля, расстояния между двумя ферромагнитными пленками, намагниченности ферромагнитных пленок;
- исследование характера перекачки между слоями структуры в зависимости от мощности входного сигнала.

Работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка использованных источников.

В первой главе приведено общее дисперсионное соотношение для слоистой ферромагнитной структуры, приведено дисперсионное соотношение и проведен анализ дисперсионных характеристик для поверхностных магнитостатических волн в одиночной пластине и структуре, состоящей из двух одинаковых ферромагнитных пленок. Во второй главе проведено исследование длины перекачки в связанной структуре при изменении различных параметров (расстояния между двумя пленками, величины внешнего магнитного поля, намагниченности двух пленок, величины частоты входного сигнала). В третьей главе приведены линейные и нелинейные волновые уравнения для магнитостатических волн в связанной структуре, проведено исследование длины перекачки и особенностей перераспределения мощности между пленками структуры в зависимости от амплитуды входного сигнала.

### **Основное содержание работы.**

**В Главе 1 «Дисперсионное уравнение для слоистой ферромагнитной структуры»** приводится общее дисперсионное соотношение для МСВ в слоистых структурах и частный случай, соответствующий ПМСВ в двух связанных ферромагнитных пленках (рис.1). Исследованы особенности дисперсионных характеристик ПМСВ в двух связанных ферромагнитных пленках.

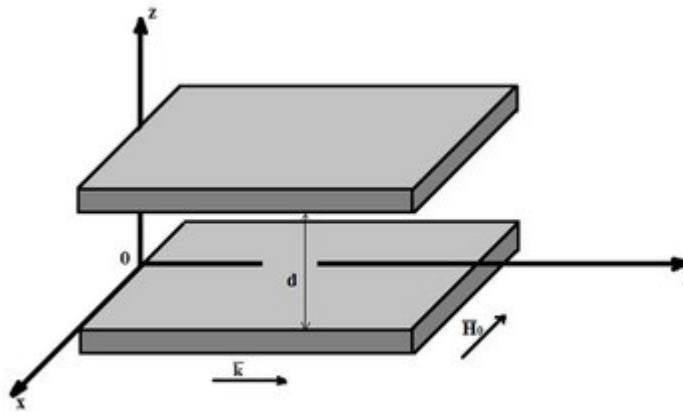


Рис.1.

Получено дисперсионное соотношение для структуры, состоящей из двух связанных одинаковых ферромагнитных пленок:

$$\frac{2\mu \coth kt + \mu^2 - \mu_a^2 + 1}{\mu^2 - 2\rho\mu - \mu_a^2 - 1} * \frac{2\mu \coth kt + \mu^2 - \mu_a^2 + 1}{\mu^2 + 2\rho\mu - \mu_a^2 - 1} = e^{-2kd} \quad (1)$$

Были представлены дисперсионные характеристики для ПМСВ в связанных ферритовых пленках в зависимости от расстояния между пленками (рис.2), внешнего магнитного поля и намагниченности пленок.

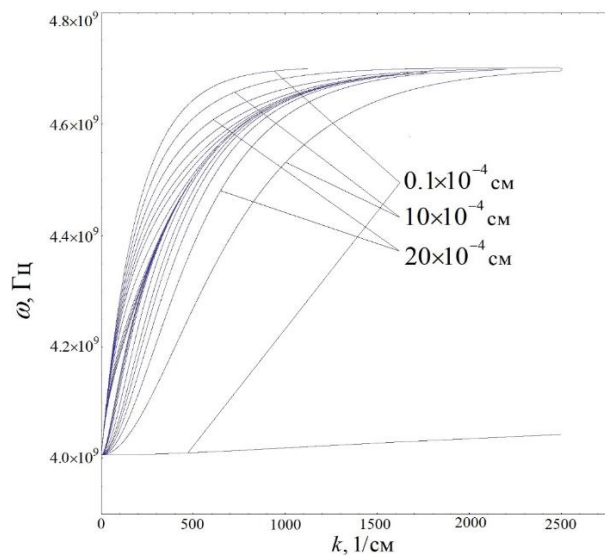


Рис.2.

Таким образом, в первой главе было показано, что в отличие от волны в одиночной структуре, в связанных структурах появляются две волны, быстрая и медленная, близкие по дисперсиям и характеристикам друг к

другу. Видно, что полоса пропускания ПМСВ в связанной структуре сдвигается вверх по частоте при увеличении поля  $H_0$  и намагниченности пленок  $M_0$ .

**В Главе 2 «Исследование длины перекачки в связанной структуре»** приводятся результаты исследования на основе дисперсионного соотношения зависимости длины перекачки в связанной ферромагнитной структуре от основных параметров задачи. Исследуется зависимость длины перекачки от частоты входного сигнала, величины внешнего магнитного поля, расстояния между ферромагнитными плёнками, намагниченности плёнок.

Была рассмотрена связанная структура, состоящая из двух одинаковых ферромагнитных пленок (рис.1). Так как во всей полосе пропускания дисперсия обеих волн нормальная, волны возбуждаются одновременно и связаны между собой. Это приводит периодической перекачке энергии из одной волны в другую. Длина, на которой происходит линейная перекачка мощности сигнала из одной пленки в другую, определяется как:

$$L = 2\pi/\Delta k, \quad (2)$$

где  $\Delta k = |k_1 - k_2|$ , где  $k_1$  и  $k_2$  - волновые числа для быстрой и медленной волны при одинаковой частоте.

Были представлены графики зависимости длины перекачки от частоты входного сигнала, от величины внешнего магнитного поля, от геометрических и магнитных параметров структуры.

На рис.3 в соответствие с (2) построены кривые зависимости длины перекачки от частоты входного сигнала  $\omega$  при разном расстоянии между двумя пленками при величине внешнего поля  $H_0=800$  Э.

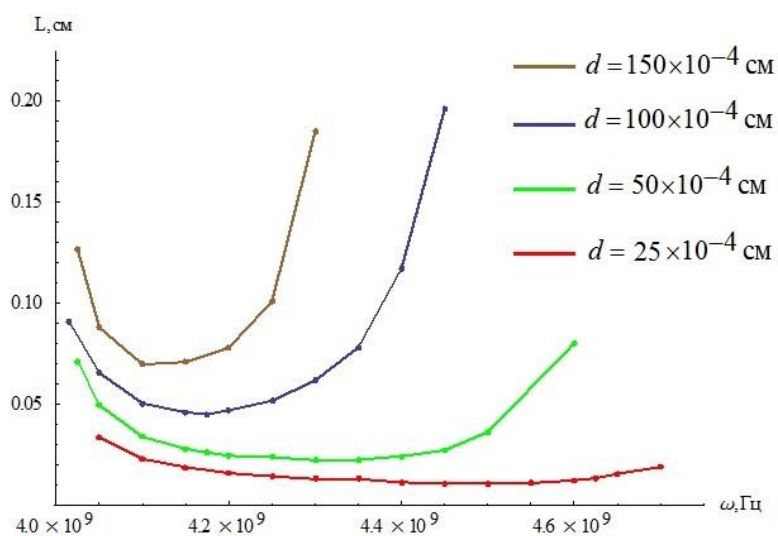


Рис.3.

На рис.4 в соответствие с (2) построены кривые зависимости длины перекачки от частоты входного сигнала  $\omega$  при разной величине внешнего магнитного поля  $H_0$  при расстоянии между двумя пластинами  $d = 100 * 10^{-4}$  см.

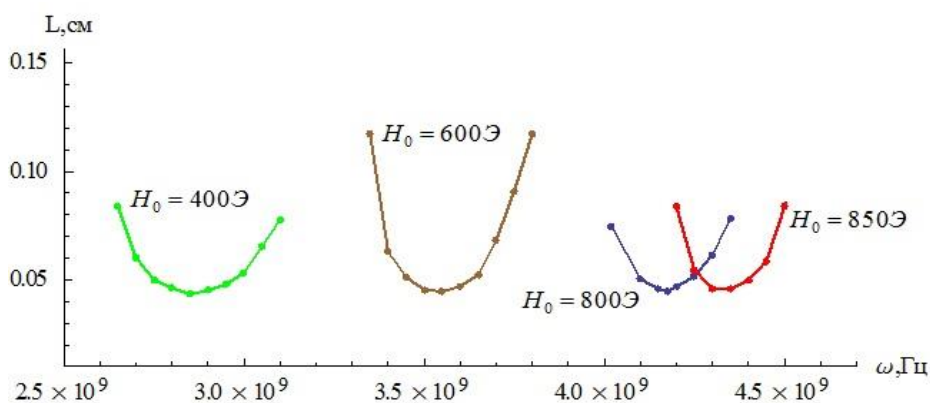


Рис.4.

На рис.5 в соответствие с (2) построены кривые зависимости длины перекачки от величины внешнего магнитного поля  $H_0$  при разной частоте сигнала  $\omega$ .

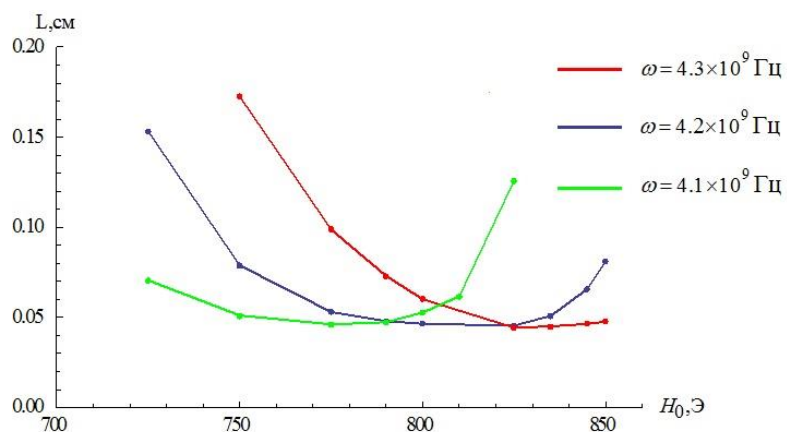


Рис.5.

На рис.6 в соответствие с (2) построены кривые зависимости длины перекачки от величины внешнего магнитного поля  $H_0$  при разном расстоянии между пленками  $d$ .

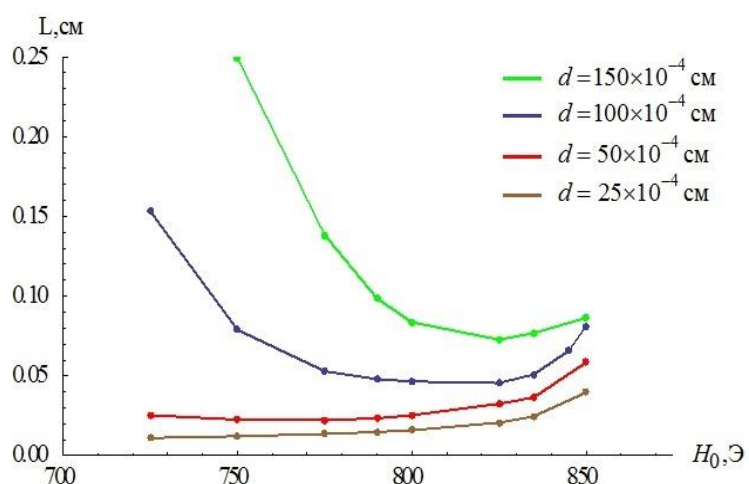


Рис.6.

На рис.7 в соответствие с (2) построены кривые зависимости длины перекачки от расстояния между двумя ферромагнитными пленками  $d$  при величине внешнего магнитного поля  $H_0 = 800$  Э при разной величине входного сигнала  $\omega$ .



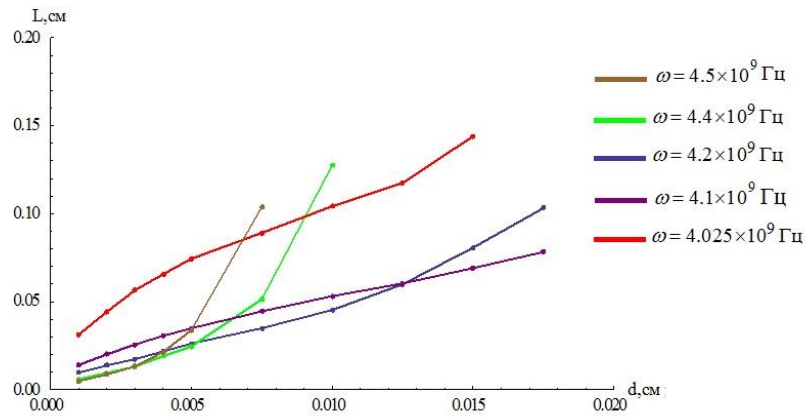


Рис.7.

На рис.8 в соответствии с (2) построены кривые зависимости длины перекачки от величины намагниченности ферромагнитных пленок  $M_0$  при внешнем магнитном поле  $H_0 = 800$  Э и при разной частоте сигнала  $\omega$ .

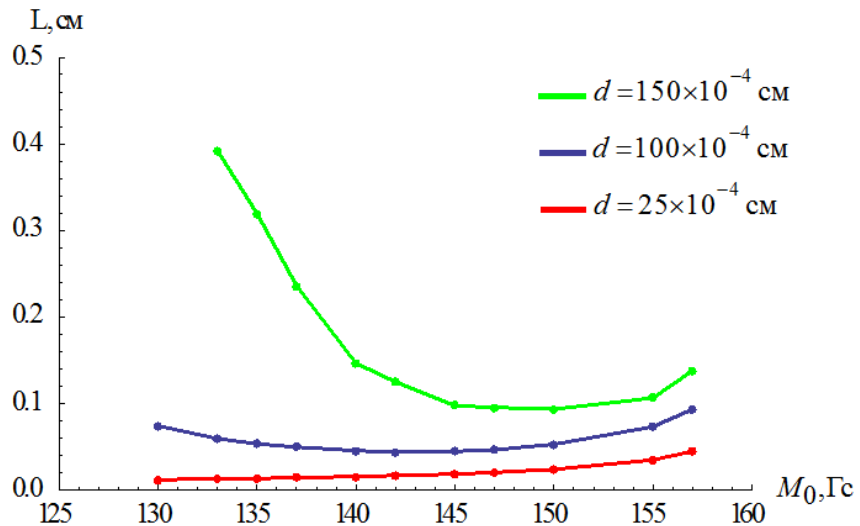


Рис.8.

Таким образом, в главе 2 показано, что длина перекачки существенным образом зависит от частоты входного сигнала, расстояния между двумя пластинами, величины внешнего магнитного поля, намагниченности ферритовых пластин. При характерных параметрах связанной структуры, состоящей из плёнок ЖИГ с диэлектрической прослойкой толщиной порядка толщины плёнок, длина перекачки изменяется в диапазоне от 0 до 0.1 см.

**В Главе 3 «Перекачка мощности в зависимости от амплитуды входного сигнала»** приведены линейные и нелинейные волновые уравнения для магнитостатических волн в структуре из двух связанных

ферромагнитных плёнок. На основе решения уравнений исследованы особенности перераспределения мощности между слоями такой структуры в линейном и нелинейном случаях. Проведено исследование зависимости длины перекачки в связанной ферромагнитной структуре от мощности входного сигнала.

Рассмотрим уравнения связанных волн с нелинейным членом:

$$\frac{d\psi_1}{dx} = i\beta_1(|\psi_1|^2 + 2|\psi_2|^2)\psi_1 + iC_{св}\psi_2 \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_2}{dx} = i\beta_2(|\psi_2|^2 + 2|\psi_1|^2)\psi_2 + iC_{св}\psi_1 \quad (4)$$

На рис.9а и рис.9б в соответствие с (3) и (4) построены решения нелинейных волновых уравнений при амплитуде входного сигнала равного  $\psi_0 = 1$ . Подача сигнала происходит на первую пленку. На графиках наблюдается полная перекачка мощности из одной пластины в другую.

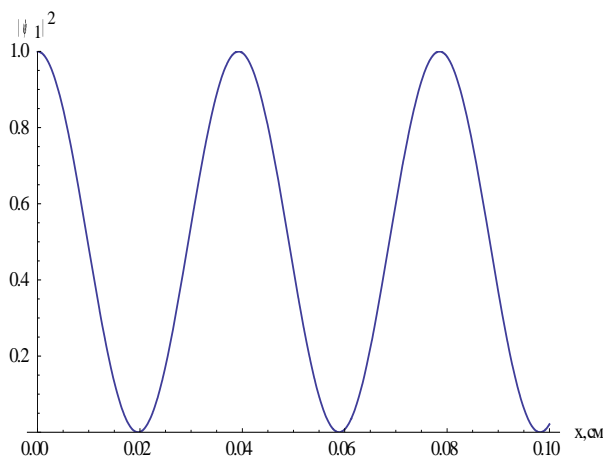


Рис.9а.

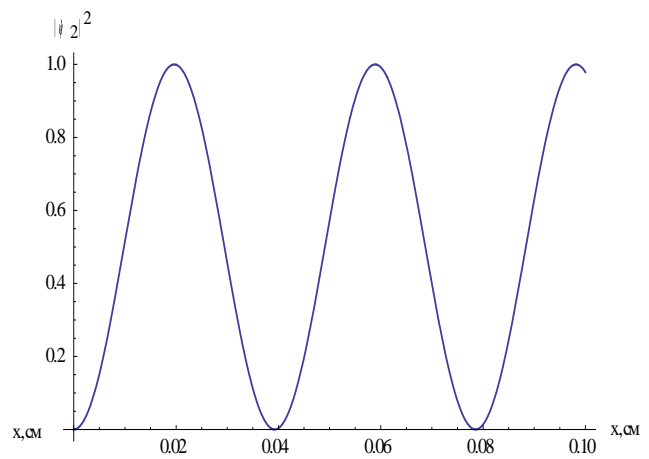


Рис.9б.

На рис.10а и рис.10б в соответствие с (3) и (4) построены решения нелинейных волновых уравнений при амплитуде входного сигнала равного  $\psi_0 = 7$ . Подача сигнала происходит на первую пленку. На графиках наблюдается, что большая часть мощности входного сигнала выходит через первую пластину.

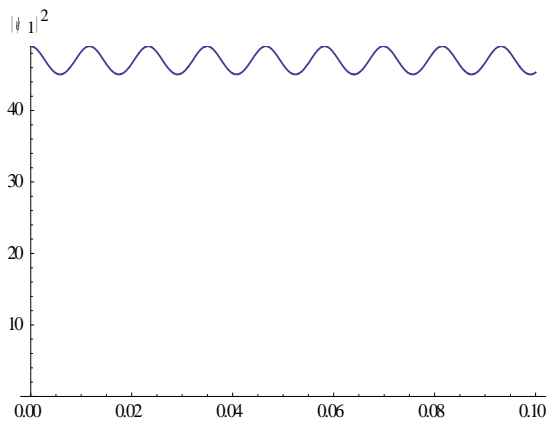


Рис.10а.

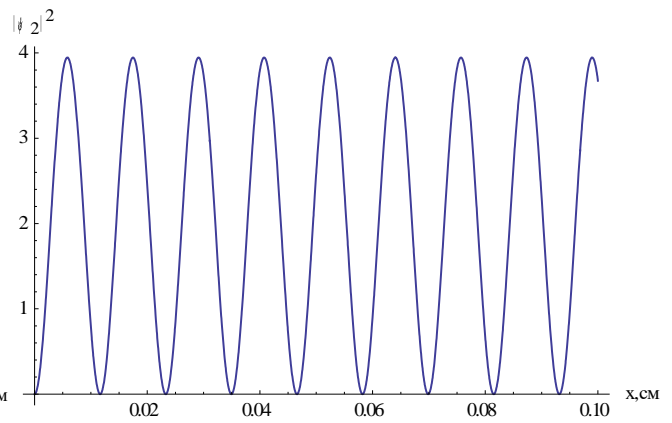


Рис.10б.

На рис.11а и рис.11б в соответствии с (3) и (4) построены решения нелинейных волновых уравнений при амплитуде входного сигнала равного  $\psi_0 = 10$ . Подача сигнала происходит на первую пленку. На графиках наблюдается, что почти вся мощность входного сигнала выходит через первую пластину.

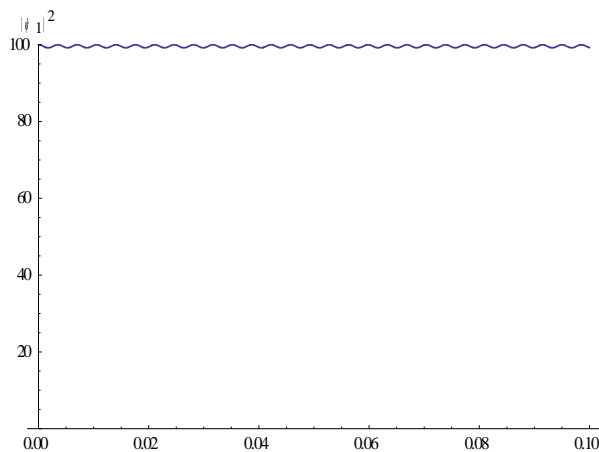


Рис.11а.

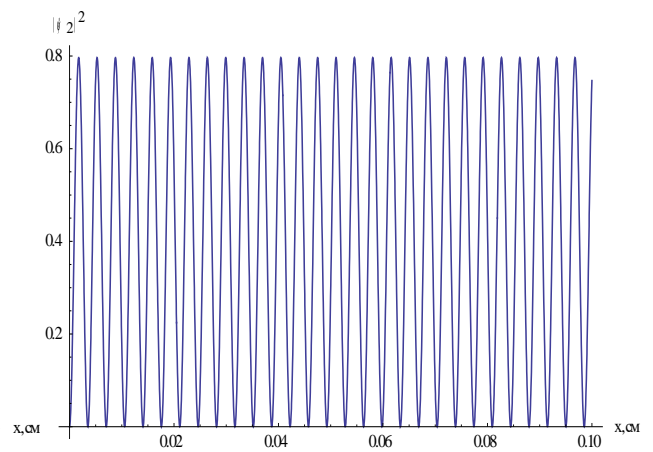


Рис.11б.

Таким образом, в главе 3 показано, что в зависимости от амплитуды входного сигнала изменяется длина перекачки мощности сигнала и доля мощности, выходящая из каждой пластины. В частности, при увеличении амплитуды входного сигнала перекачка является полной, и длина перекачки увеличивается, при дальнейшем увеличении амплитуды входного сигнала уменьшается часть мощности, перекачиваемая во вторую плёнку, при большой входной амплитуде сигнал практически “не замечает” входную плёнку. Таким образом, в зависимости от входной амплитуды сигнал выходит через разные порты связанной структуры. Так, если выбрать длину

структуры равной  $nL/2$ ,  $n=1,2,3\dots$ , то при малой входной амплитуде сигнал выйдет из плёнки 2, а при большой амплитуде из плёнки 1.

### **Заключение**

В работе проведено исследование линейных и нелинейных волновых процессов при распространении поверхностных магнитостатических волн в связанной структуре, представляющей собой две ферромагнитные плёнки, разделенных слоем диэлектрика. В ходе выполнения дипломной работы были получены следующие основные результаты.

1. Проведён анализ дисперсионных характеристик поверхностных МСВ в двух связанных ферромагнитных пленках. Построены кривые поверхностных МСВ в одинаковых связанных ферритовых пластинах без экранов при различных параметрах и в одиночной пластине. В отличие от волны в одиночной структуре, в связанных структурах появляются две волны, быстрая и медленная, которые распространяются на одной частоте с разными волновыми числами  $k$  и разными фазовыми скоростями.
2. Проведен анализ зависимости длины перекачки от различных параметров, а именно частота входного сигнала, намагниченности ферромагнитных пленок, величины внешнего магнитного поля и расстояния между двумя ферромагнитными пленками. Получено, что длина перекачки  $L$  увеличивается при увеличении расстояния между двумя связанными одинаковыми ферромагнитными пленками. При увеличении намагниченности пленок, частоты входного сигнала и величины внешнего магнитного поля длина перекачки уменьшается до своего минимального значения и при дальнейшем увеличении этих параметров длина перекачки начинает увеличиваться.
3. Проведено исследование особенностей перекачки сигнала в зависимости от мощности входного сигнала. Показано, что в зависимости от амплитуды входного сигнала изменяется длина перекачки, а также доля мощности, выходящей из каждой пластины. В

частности, при увеличении амплитуды входного сигнала перекачка является полной, но увеличивается длина перекачки, при дальнейшем увеличении амплитуды входного сигнала уменьшается часть мощности, перекачиваемая во вторую плёнку, при большой входной амплитуде сигнал практически “не замечает” входную плёнку.

Таким образом, структура, состоящая из двух связанных ферромагнитных плёнок, может выполнять функции линейного и нелинейного делителя мощности. Причём то, в каком соотношении разделится сигнал между выходными портами определяется частотой входного сигнала, величиной внешнего магнитного поля, расстоянием между плёнками и амплитудой входного сигнала.