

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

Управление запрещёнными зонами в многослойных периодических
ферромагнитных структурах со спин-поляризованным током

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 214 группы

направления

03.04.01 Прикладные математика и физика

факультета нелинейных процессов

Скворцова Артема Алексеевича

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент _____

М.А. Морозова

Зав. кафедрой (полное наименование кафедры)

профессор, д.ф.-м.н _____

Н.М. Рыскин

Саратов 2017 г.

Введение

Спиновые волны, распространяющиеся в ферромагнитных плёнках обладают рядом существенных преимуществ перед другими типами волн в твердых телах, среди которых можно особенно отметить следующие: они легко возбуждаются и принимаются практически во всем СВЧ диапазоне; характеристики МСВ зависят от величины и направления внешнего магнитного поля; обладают сильной дисперсией, дисперсионные характеристики МСВ зависят от внешних условий (металлические экраны, периодические границы и т.д.), обладают большим замедлением (10^3 и более); нелинейные эффекты, возникающие при распространении интенсивных МСВ, начинают проявляться уже при относительно малых уровнях мощности (\sim мкВт) и т.д.

Данная работа посвящена исследованию поведения запрещенных зон в слоистых структурах, состоящих из магнетонных кристаллов на основе ферромагнитной пленки и слоя платины. Особенно наличие в них такого явления как запрещенные зоны (ЗЗ). Это явление позволяет создавать на основе магнетонных кристаллов перестраиваемые магнитным полем устройства для обработки и генерации сигналов в микроволновом диапазоне [1-3]. Рассматривается возможность управления запрещенной зоной в магнетонном кристалле с помощью спин-поляризованного тока в платине. Эти свойства, а также ряд других специфических свойств спиновых волн в ферромагнитных средах создают большой потенциал для их использования для обработки и передачи СВЧ сигналов, для осуществления логических операций. Именно поэтому эта работа является актуальной в настоящее время.

Новизна работы заключается в том, что впервые исследуются периодические ферромагнитные структуры, в том числе и многослойные структуры, со слоями платины под действием спин-поляризованного тока.

Цель работы: исследование возможности управления характеристиками запрещенных зон в двух, трёх и пятислойных периодических ферромагнитных структурах, нагруженных слоями платины.

В ходе работы решались следующие **задачи**:

1. Получение дисперсионных соотношений для двух, трёх и пятислойных симметричных и несимметричных периодических ферромагнитных структур.
2. Получение дисперсионных соотношений для исследуемых структур, нагруженных слоями платины под действием спин-поляризованного тока.
3. Исследование особенностей дисперсионных характеристик и механизмов формирования запрещенных зон в таких структурах.
4. Исследование возможности управления характеристиками запрещенных зон исследуемых структурах с помощью изменения геометрических параметров структур и величины спин-поляризованного тока.

Работа состоит из трёх глав. Каждая глава отведена отдельной структуре. Первая глава описывает структуру магнетонный кристалл (МК)-ферромагнитная пленка(ФП) и структуру МК-МК. Вторая глава- структура МК-ФП-МК. Третья глава описывает структуру МК-ФП-МК-ФП-МК. В каждой главе исследуются особенности формирования запрещенных зон и возможности управления запрещенными зонами при изменении геометрических параметров структур и величины спин-поляризованного тока.

Основное содержание работы

Основная часть исследуемых структур показана на рис. 1 Над магнетонным кристаллом сверху располагается слой платины, к которому прикладывается напряжение V , в результате по платине течет электрический ток. В такой системе проявляется Спин Холл эффект[4-5]. В направлении

перпендикулярном току (в направлении оси z) происходит разделение электронов с противоположными направлениями спинов. Таким образом, электроны с одним направлением спинов перейдут к верхней поверхности платины, а электроны с другим направлением спинов перейдут к нижней поверхности платины, т.е. к границе ферромагнитная плёнка-платина.

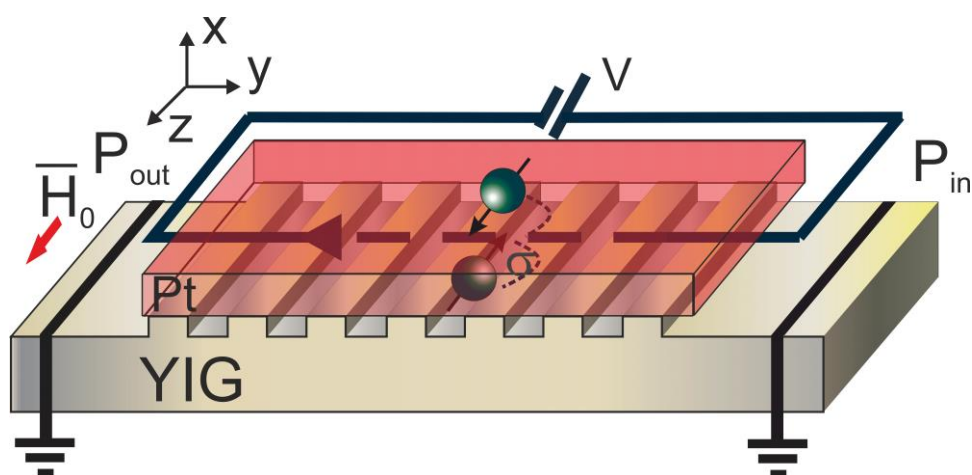


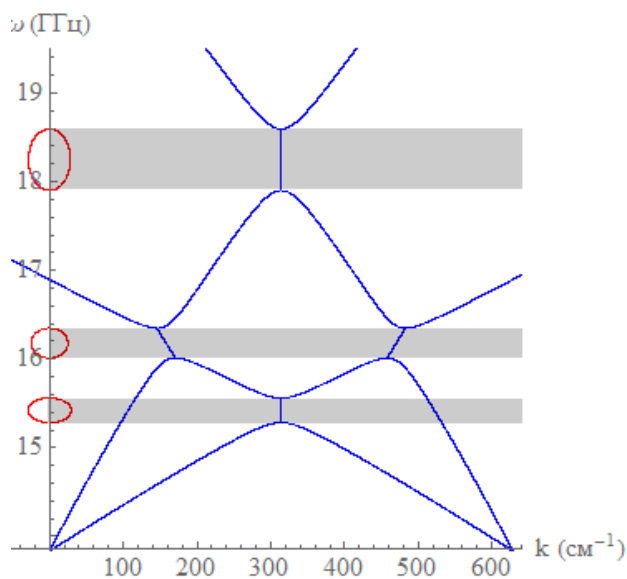
Рис. 1 Магنونный кристалл – платина.

Спины у поверхности платины передают свой угловой момент поверхностным спинам в ферромагнитной плёнке. Спиновый ток рассеивается о границу раздела ферромагнитная плёнка - платина и возбуждает крутящие моменты, действующие на поверхностные спины в ферромагнитной плёнке. Благодаря дипольным и обменным взаимодействиям крутящий момент передается другим спинам вглубь толщины ферромагнитной плёнки и, соответственно, спиновой волне, распространяющейся в ферромагнитной плёнке. То, с каким направлением спинов будут электроны у границы ферромагнитная плёнка - платина зависит от направления тока в платине. Так при положительном напряжении $V > 0$, как показано на рис.2, электрический ток течёт в отрицательном направлении оси y , а электроны перемещаются в направлении $+y$. В результате проявления спин Холл эффекта электроны со спинами в направлении $-z$ смещаются к границе ферромагнитная плёнка - платина. В этом случае спины у границы ферромагнитная плёнка - платина направлены противоположно

направлению оси вокруг которой прецессируют магнитные моменты в ЖИГ (оси z), они увеличивают угол прецессии магнитных моментов в ферромагнитной плёнке, т.е. действуют противоположно затуханию и усиливают спиновую волну. При отрицательном напряжении $V < 0$ спины на границе ферромагнитная плёнка-платина направлены в сторону $+z$ (противоположно тому, как показано на рисунке), т.е. сонаправлены с осью, вокруг которой прецессируют магнитные моменты в ферромагнитной плёнке, т.е. действуют сонаправленно затуханию и ослабляют спиновую волну в ферромагнитной плёнке.

Влияние спинового тока на дисперсионные характеристики ПМСВ в структуре МК/платина-ФП

На рис. 2 приведено дисперсионная характеристика при различной величине спинового тока.



a)

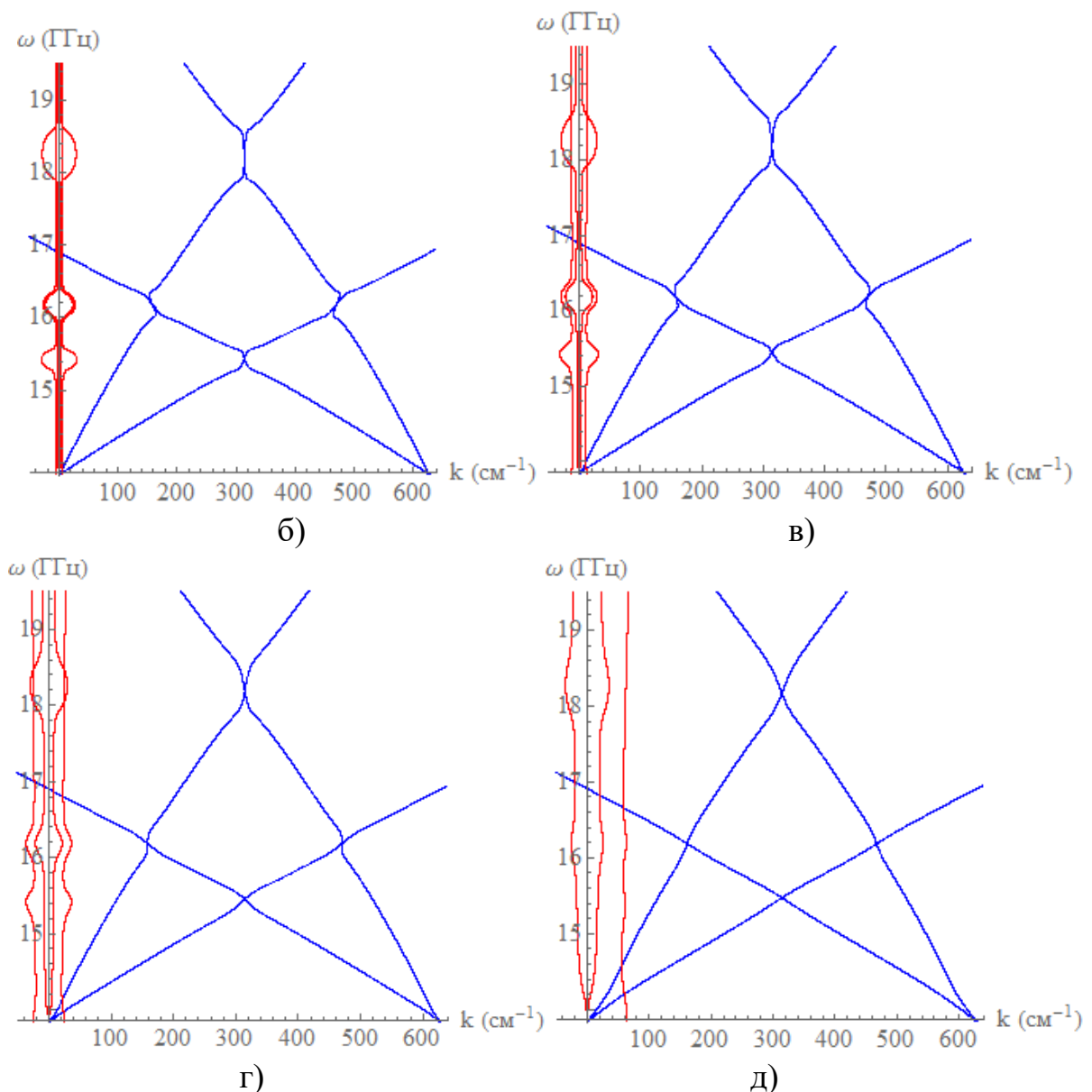


Рис. 2 Дисперсионные характеристики ППСВ в структуре магнонный кристалл/платина-ферромагнитная пленка при разных значениях параметра β : (а) $\beta=0.0$, (б) $\beta=0.05$, (в) $\beta=0.1$, (г) $\beta=0.2$, (д) $\beta=0.5$.

При отсутствии спинового тока имеем обычную дисперсионную характеристику (рис 2а). На нем видны три запрещенные зоны (показаны заливкой) для связанной структуры. При $\beta \neq 0$ $\text{Im}(k) \neq 0$ во всей полосе частот, как видно из рис. 3б-д. Причем $\text{Im}(k)$ положительна и с увеличением величины спинового тока ее величина растет. Также видно, что с увеличением тока пропадают все запрещённые зоны. Вместо запрещенной зоны образуется область с большой групповой скоростью. С

увеличение спинового тока групповая скорость в зоне уменьшается и стремится к групповой скорости в однородной плёнке.

Такая серия рисунков будет строится для каждого рассматриваемого случая. Далее будут приводится только характеристики исследуемой структуры и выводы по ней.

Далее будут построены дисперсионные характеристики для структуры Магнетонный кристалл со слоем платины – ферромагнитная плёнка со слоем платины. На них можно заметить более резкое увеличение $\text{Im}(k)$. При $\beta = 0.2$ можно различить только зону для быстрых волн.

Следом исследуется влияние спинового тока на структуру МК-МК. Приводятся дисперсионные характеристики для МК/платина-МКВ данном случае заметно, что зоны существуют при сильном увеличении спинового тока и даже при $\beta = 0.6$. все еще можно различить обе зоны.

Еще одна структура, рассмотренная в работе, состоит из двух магнетонных кристаллов, к каждому из которых прикладывается слой платины. Тут также заметно более резкое увеличение $\text{Im}(k)$, по сравнению с предыдущим случаем. По всей видимости это происходит, так как в структуре имеется два слоя платины.

Последняя структура, которую мы рассмотрим в первой главе состоит из двух геометрически разных магнетонных кристаллов и двух слоев платины. Здесь имеются три запрещенные зоны. Можно заметить, что при увеличении спинового тока быстрее всего пропадает средняя зона.

Во второй главе исследуется трёхслойная структура МК-ФП-МК.

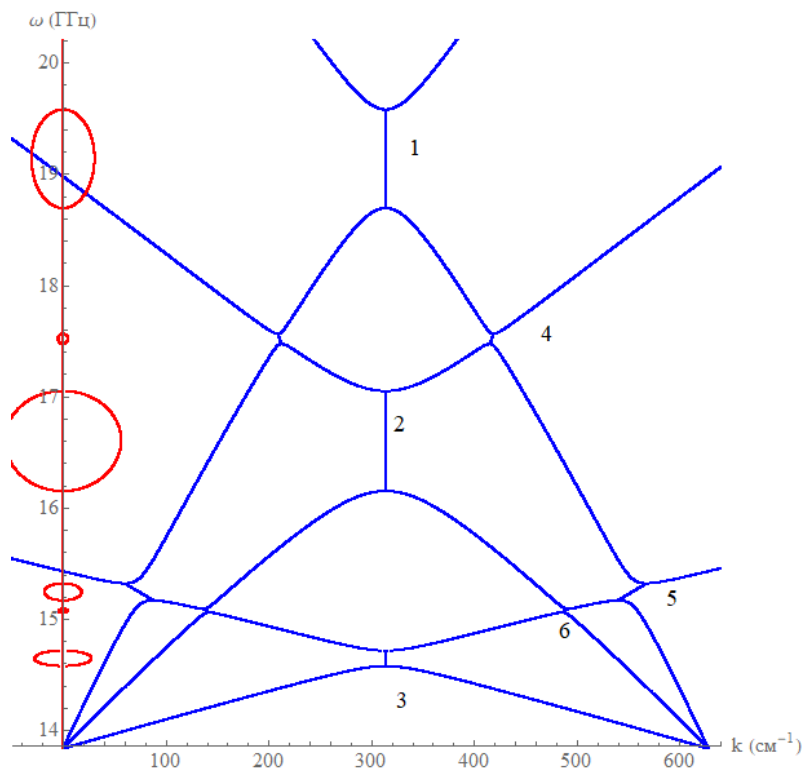


Рис. 3 Дисперсионная характеристика МСВ в структуре МК-ФП-МК,

в ней могут существовать до шести запрещенных зон. Будем исследовать, как будут изменяться запрещенные зоны в зависимости от изменения геометрических параметров и величины спин-поляризованного тока при добавлении слоя платины.

Первым исследуем влияние геометрических параметров структуры на характеристики запрещенных зон. Построена зависимость частоты (ω) от расстояния между ФП и МК 2. На ней отчетливо видно, что в структуре МК-ФП-МК может существовать до шести запрещенных зон. С увеличением расстояния между первым МК и пленкой зона 1 сужается и опускается вниз по частоте. Зоны 2-4 поднимаются по частоте вверх и расширяются. Также на рисунке видно, что зоны 5 и 6 существуют только в некоторых областях. Это объясняется тем, что при симметрии зоны 5 и 6 не могут существовать.

Далее снова исследуем влияние спинового тока. Первая серия дисперсионных характеристик для трехслойной структуры МК-ФП/пленка-МК. Слой платины прикладывается к ферромагнитной пленке. Заметно что нижняя зона абсолютно не изменяется от величины спинового тока.

Следующая серия рисунков, построенная также для структуры где платина приложена к ферромагнитной пленке, но коэффициент связи здесь не равен единице, в следствие чего имеем все три зоны. Здесь можно отметить, что средняя зона исчезает намного медленнее чем верхняя.

Так же построены дисперсионные характеристики для структуры со слоями платины на магнетонных кристаллах. Здесь медленнее всего исчезают верхняя и средняя зоны. При $\beta = 1$ все еще можно заметить очертания мнимых частей этих зон. Быстрее всего исчезают нижняя и дополнительные зоны.

В третьей главе моделируется структура МК-ФП-МК-ФП-МК

Дисперсионное соотношение для структуры строится на основе определителя размером 10×10 . Строки 1,5,9 описывают прямые волны в магнетонных кристаллах, строки 3,7 прямые волны в ферромагнитных пленках. Строки 2,6,10 обратные волны в кристаллах, а 4,8 обратные волны в пленках. Диагональные компоненты, приравненные к нулю, представляют собой дисперсионные соотношения для прямых и встречных ПМСВ в кристаллах и пленках. Недиагональные компоненты включают параметры связи между прямыми и встречными волнами в слоях.

На рис 4 показаны дисперсионные характеристики МСВ в МК-ФП-МК-ФП-МК в отсутствии взаимодействия между волнами в структуре. Показаны дисперсионные характеристики, соответствующие пяти нормальным волнам связанной структуры. Также видно пять прямых нормальных волн и пять встречных нормальных волн. Дисперсионные характеристики имеют девятнадцать точек пересечения. При взаимодействии волн в этих точках формируются запрещенные зоны.

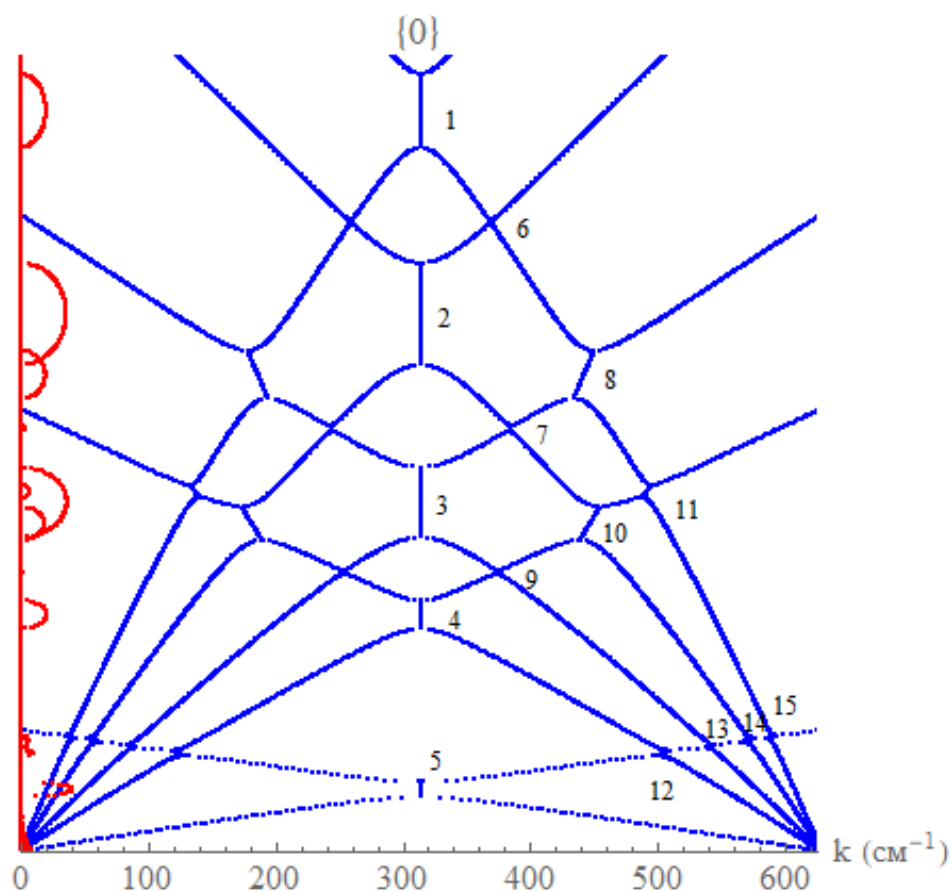


Рис 4. Дисперсионная характеристика МСВ в структуре МК-ФП-МК-ФП-МК

На рис 4 видно, что в структуре могут существовать до 15 запрещенных зон (отмечены цифрами 1-15). Здесь видно пять основных запрещенных зон от трех магнитных кристаллов и двух ферромагнитных пленок (1-5) и десять дополнительных зон образованных взаимодействием волн между собой (6-15). Синим цветом рисуется действительная часть дисперсионного соотношения $\text{Re}(w)$. Красным показана мнимая часть $\text{Im}(w)$.

Так же, как и для трехслойной структуры первым исследуем влияние геометрического параметра, а потом влияние спин-поляризованного тока.

В данной зависимости исследуется положения и ширины запрещенных зон от толщины второго магнитного кристалла. В данном примере увеличивая ширину МК, мы не изменяем общую ширину структуры. Таким образом при увеличении МК, уменьшаются ширина соседних ферромагнитных пленок.

Первой случай, рассмотренный в данной главе, будет МК-ФП-МК-ФП-МК со слоями платины приложенными к ферромагнитным пленкам. Коэффициенты связи равны единице и все элементы структуры одинаковые, поэтому имеем минимальное количество зон. Три основных зоны. Из них только две пропадают полностью.

В следующей серии рисунков коэффициенты связи не равны единице. Средняя основная зона не пропадает вовсе. Так же заметно что $\text{Im}(k)$ достаточно резко растет при $\beta = 1.2$ уже исчезают все зоны кроме средней.

Далее была взята полностью несимметричная структура. В ней наблюдались все пятнадцать запрещенных зон. При увеличении спинового тока практически сразу исчезает большая часть дополнительных зон. Остается только три дополнительных зоны и 5 основных. Последние дополнительные зоны пропадают при $\beta = 1$, а при $\beta = 1.5$ пропадают и основные зоны.

Также построены серии рисунков для объемных и для поверхностей волн. Их основные различия в том, что запрещенные зоны находятся в разных диапазонах частот и в случае объемных волн $\text{Im}(k)$ быстрее растет.

6. Заключение

Проведено теоретическое исследование особенностей формирования запрещенных зон в многослойных периодических ферромагнитных структурах, нагруженных слоями платины при изменении геометрических параметров таких структур и величины спин-поляризованного тока.

Рассмотрены двухслойные структуры типа МК-ФП и МК-МК. Показано, что в структуре МК-МК возможно формирование двух запрещенных зон (в симметричном случае) либо трёх запрещенных зон в несимметричном случае, в структуре МК-ФП формируется три запрещенные зоны. Запрещенные зоны пропадают с увеличением спинового тока. Вместо них образуется область с большой групповой скоростью. При увеличении спинового тока групповая скорость в зоне уменьшается и стремится к групповой скорости в однородной плёнке. В запрещенных зонах быстрая и

медленные волны затухают по-разному. Быстрее всего при увеличении спинового тока пропадает средняя зона, затем зона для медленных волн, затем зона для быстрых волн. В структурах, включающих два слоя платины, запрещенные зоны пропадают быстрее, в структурах с одним слоем платины.

Рассмотрены двухслойные структуры типа МК-ФП-МК. Получено дисперсионное соотношение для МСВ в такой структуре. Показано, что в такой структуре возможно формирование двух запрещенных зон (в симметричном случае) либо шести запрещенных зон (в несимметричном случае). С увеличением расстояния между МК и ФП запрещенные зоны (ЗЗ) сливаются в 1 ЗЗ (в случае симметричной структуры) и сливаются в 4 ЗЗ (в случае несимметричной структуры). С увеличением толщины ФП количество ЗЗ сначала увеличивается до 6, потом уменьшается до 4 (в случае несимметричной структуры). Запрещенные зоны пропадают с увеличением спинового тока при добавлении слоев платины к МК. При добавлении слоя платины к ФП при увеличении спинового тока сохраняется низкочастотная зона (в симметричном случае) либо средняя основная зона (в несимметричном случае).

Рассмотрены пятислойные структуры типа МК-ФП-МК-ФП-МК. Получено дисперсионное соотношение для МСВ в такой структуре. Показано, что в такой структуре возможно формирование семи запрещенных зон (в симметричном случае) либо пятнадцати запрещенных зон (в несимметричном случае). При увеличении ширины среднего МК и уменьшении ширины третьего МК количество ЗЗ увеличивается с 10 до 15 (в этом случае структура становится симметричной), затем снова уменьшается от 15 до 10. Запрещенные зоны пропадают с увеличением спинового тока при добавлении слоя платины к ФП в несимметричной структуре. В симметричном случае при увеличении спинового тока сохраняется третья основная зона.

Таким образом, добавление слоя платины к структурам типа МК-ФП, МК-МК, МК-ФП-МК, МК-ФП-МК-ФП-МК дает возможность эффективно

управлять характеристиками запрещенных зон за счёт изменения спин-поляризованного тока в платине. Управления запрещенными зонами является полезным для функциональной обработки сигналов в СВЧ диапазоне.

7. Список литературы

- [1]M. Krawczyk and D. Grundler, J. Phys. D 26, 123202 (2014).
- [2]S.A. Nikitov, Ph. Tailhades, C.S. Tsai, JMMM, 236, 3, 320-330 (2001).
- [3]V.V. Kruglyak, S. O. Demokritov and D. Grundler, Journal of Physics D, 43, 264001 (2010).
- [4]Морозова М.А., Шараевская А.Ю.// Гетеромагнитная микроэлектроника. 2013. вып. 15. С. 82–93,
- [5]Y.Kato et al., Science 306, 1910 (2004).
- [6] N.P.Stern et al., Nature Phys. 4, 843 (2008).
- [7]D. Marcuse Light transmission optics. Van Nostrand Reinhold Company. New York.1972.
- [8] М. А. Морозова, А. Ю. Шараевская // Дисперсионные характеристики магнитостатических волн в связанных магнетонных кристаллах. Саратов. Изд. СГУ. 2013.С. 4-5.