

Д. А. Попов, А. Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование спектра дипольно-обменных спиновых волн в нормально намагниченных ферромагнитных пленочных волноводах¹

Впервые теоретически изучены дисперсионные характеристики спиновых волн в нормально намагниченных пленочных волноводах конечной ширины с учетом как дипольного, так и обменного взаимодействий.

Спиновые волны, ферромагнитные пленки

В течение последнего десятилетия возрос интерес к исследованию магнитных микро- и наноструктур. В связи с этим стала актуальной проблема расчета спектра спиновых волн (СВ) в ограниченных по ширине пленках.

Впервые спектр СВ в безобменном приближении был построен в [1] для безграничной пленки. Спектр СВ с учетом как дипольного, так и обменного взаимодействий для безграничной пленки, описан в [2]. Несмотря на большое число экспериментальных исследований ограниченных в плоскости пленочных образцов, теоретических работ в этом направлении крайне мало. Так, в [3] исследован спектр спиновых волн в ферромагнитном прямоугольном стержне в безобменном приближении. В [4] разработана теория, учитывающая как дипольное и обменное взаимодействия, так и неоднородность распределения внутреннего поля в пленочном волноводе конечных поперечных размеров. Выполнено теоретическое исследование спектра спиновых волн в касательно намагниченном волноводе.

В настоящей статье представлено исследование спектра дипольно-обменных спиновых волн в нормально намагниченных ферромагнитных пленочных волноводах. Рассмотрены регулярные волноводы прямоугольного сечения толщиной L и шириной w (рис. 1). Считалось, что волновод не ограничен в направлении распространения спиновой волны и намагничен до насыщения внешним однородным магнитным полем H_0 , направленным перпендикулярно плоскости волновода. Бегущая спиновая волна распространяется вдоль оси z и характеризуется продольным волновым числом k .

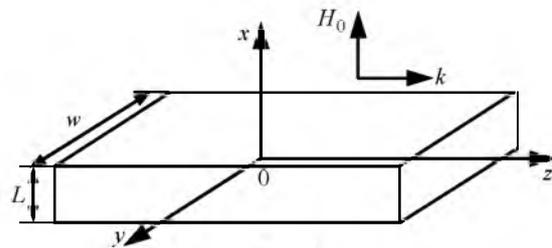


Рис. 1

Расчет спектра СВ проведен с учетом неоднородности внутреннего магнитного поля. Неоднородность поля является следствием неэллипсоидальной формы волновода, как показано в [4]. Известно, что полный спектр дисперсионных характеристик СВ в прямоугольном волноводе состоит из большого количества мод, квантуемых по толщине (толщинные моды, их нумерация задается числом n), каждая из которых расщепляется на большое количество мод, квантуемых по ширине (ширинные моды, их нумерация задается числом q). При расчетах невозможно построить полный спектр, кроме того, на практике системы возбуждения СВ имеют ограничения по количеству возбуждаемых ими высших мод. В связи с этим далее исследованы дисперсионные кривые нескольких толщинных мод, начиная с моды низшего типа ($n=1$) и заканчивая некоторой высшей модой с номером n_{\max} , а также дисперсионные кривые нескольких ширинных мод с индексами $0 \leq q \leq q_{\max}$. Условием правильности расчета отдельной спектральной кривой является сходимость решения для каждой отдельной моды, которая зависела от количества взятых мод. Для удобства исследования спектра ширинные и толщинные моды рассматриваются по отдельности, причем при исследовании только толщинных мод примем $q_{\max} = 1$. Разделять спектры толщинных и ширинных мод

¹ Работа поддержана госзаданием Минобрнауки РФ и Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 15-32-20357 мол_а_вед).

можно, только если сходимость решения для одного типа мод не влияет на сходимость решения для мод другого типа. Так, например сходимость спектра нормально намагниченного пленочного волновода, зависит лишь от количества ширинных мод и не зависит от количества толщинных мод.

На рис. 2, а показаны результаты численного расчета спектра дисперсионных характеристик в виде зависимости частоты f от волнового числа k для первых пяти толщинных мод ($n_{\max} = 5$, $q_{\max} = 1$) прямоугольного пленочного волновода, нормально намагниченного внешним полем $H_0 = 3000$ Э. Расчеты проводились для параметров материала, соответствующих железоиттриевому гранату (ЖИГ): намагниченности насыщения $4\pi M_s = 1750$ Гс, константе неоднородного обмена $\alpha = 3.1 \cdot 10^{-12}$ см² и гиромагнитному отношению $\gamma = 2.8$ МГц/Э. На верхней и на нижней поверхностях пленки спины считаем свободными, на боковых гранях – закрепленными.

Спектр на рис. 2, а получен для волновода толщиной $L = 10$ мкм и шириной $w = 250$ мкм. На рис. 2, б показан профиль внутреннего магнитного поля H_{int} вдоль оси y , полученный из решения статической задачи. Среднее значение внутреннего поля $\bar{H}_{\text{int}} = 1300$ Э.

Из рис. 2, а следует, что частота нижней границы спектра, соответствующая частоте ферри-

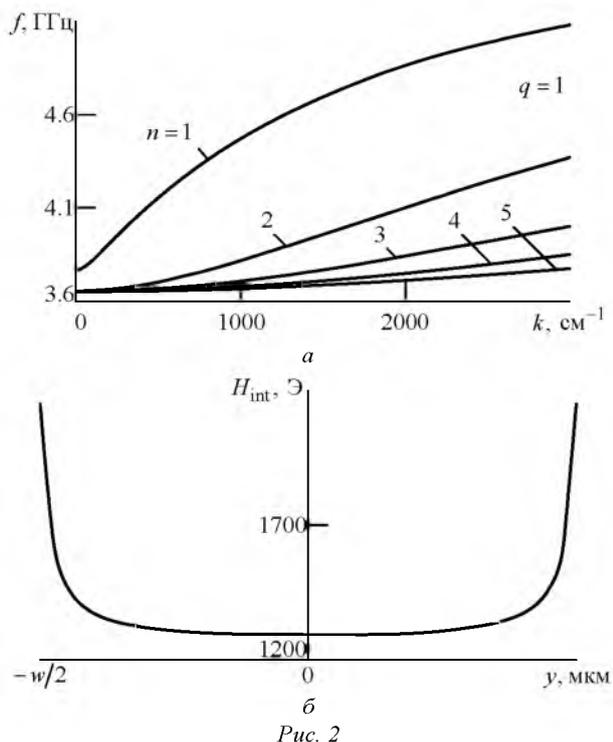


Рис. 2

магнитного резонанса (ФМР) $f_H = \gamma \bar{H}_{\text{int}}$, составляет $f_{\min} = 3.64$ ГГц. По сравнению с частотой ФМР для пленки, не ограниченной в плоскости xOy , $f_H = \gamma(H_0 - M_s) = 3.5$ ГГц, частота нижней границы спектра имеет большее значение. Указанный эффект является следствием неоднородности внутреннего поля, приводящего к увеличению его усредненного значения.

В отличие от спектра неограниченного пленочного волновода, где все дисперсионные характеристики исходят из частоты ФМР, в спектре ограниченного по ширине волновода частота основной толщинной моды ($n = 1$, $q = 1$) при $k = 0$ отстоит примерно на 1 ГГц от высших мод ($n = 2, 3, 4, \dots$, $q = 1$). Указанный подъем частоты основной моды объясняется тем, что результирующий волновой вектор \mathbf{k} является суммой продольной составляющей k и поперечных составляющих $k_q = q\pi/w$ и $k_n = n\pi/L$, соответствующих волновым числам ширинных и толщинных мод соответственно. Поэтому вблизи $k = 0$ возникает волноводный эффект, приводящий к появлению частоты отсечки, лежащей выше $\gamma \bar{H}_{\text{int}}$. Для высших мод данный эффект выражен менее явно в силу малой групповой скорости этих мод для безграничной пленки при $k = 2\pi/w$.

На рис. 3, а показан спектр для волновода толщиной $L = 1$ мкм и шириной $w = 25$ мкм, т. е. с поперечными размерами, уменьшенными в 10 раз по сравнению с рассмотренным ранее. Результаты показывают, что пропорциональное уменьшение размеров волновода не меняет распределения внутреннего поля (рис. 2, б), однако вид спектра существенно меняется. С уменьшением размеров возрастает влияние обменного взаимодействия, характеризуемого константой, что следует из зависимости для частот мод в безграничной пленке:

$$f_n = f_H + \frac{\gamma \alpha M_s k_n^2}{2\pi} = f_H + \frac{\gamma \alpha M_s (n\pi/w)^2}{2\pi}.$$

Таким образом, с уменьшением ширины волновода w частоты мод возрастают, причем в тем большей степени, чем выше номер моды n . В результате дисперсионные характеристики высших мод пересекают характеристику основной моды.

Для демонстрации влияния обмена на спектр толщинных мод приведен рис. 3, б, полученный для тех же параметров, что и рис. 3, а, но в безобменном приближении ($\alpha = 0$). Как можно видеть, дисперси-

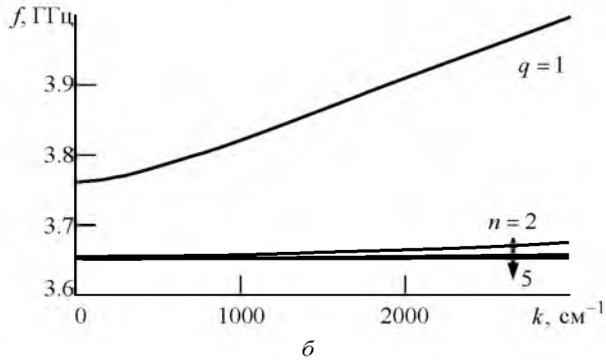
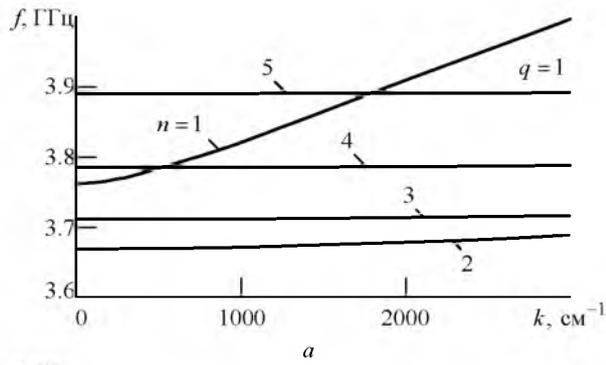


Рис. 3

онная характеристика основной моды ($n = 1, q = 1$) в безобменном приближении также существенно смещается вверх по частоте, демонстрируя волноводный эффект. Однако для мод высших типов этого смещения практически не наблюдается, в связи с чем перекрытия спектров не происходит.

Таким образом, в нормально намагниченных ограниченных по ширине пленочных волноводах кроме обменного забрасывания дисперсионных линий высших мод присутствует волноводный эффект, в основном влияющий на поведение основной моды. Варьирование геометрических размеров такого волновода дает широкие возможности по управлению спектром спиновых волн.

Как известно [2], эффект дипольной гибридизации слабо проявляется в пленках со свободными поверхностными спинами, даже если соблюдается условие неравенства нулю интеграла перекрытия между модами. Для иллюстрации этого факта приведен спектр для волновода с размерами $L = 1$ мкм и $w = 25$ мкм, но с закрепленными на верхней и на нижней поверхностях пленки поверхностными спинами (рис. 4, сплошные линии – спектр с учетом межмодового расталкивания, штриховая линия – основная мода без учета этого эффекта). Под действием дипольного расталкивания спектр усложняется. Особенно сильно искажается дисперсионная характеристика основной моды (штриховая линия на рис. 4 показывает, как должна выглядеть эта характеристика без растал-

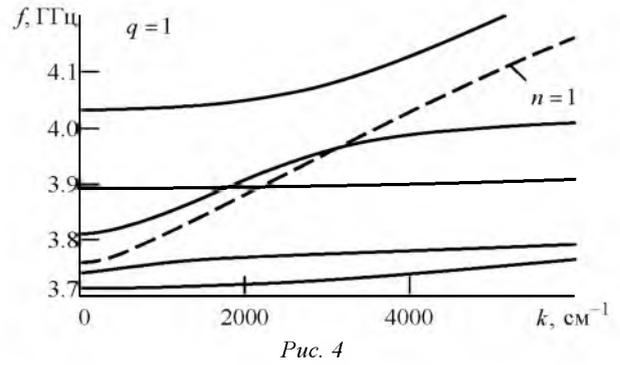
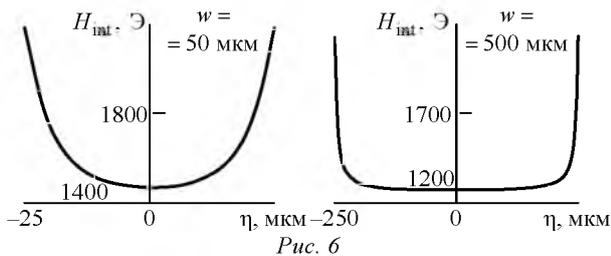
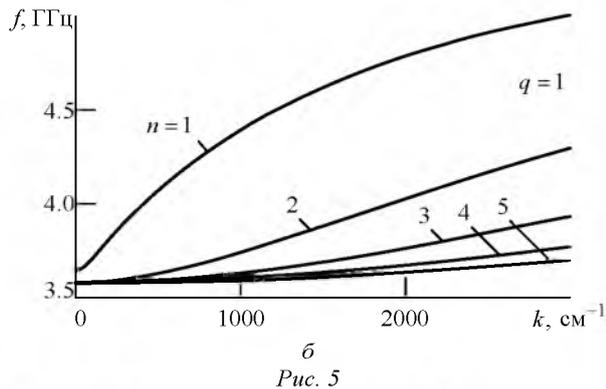
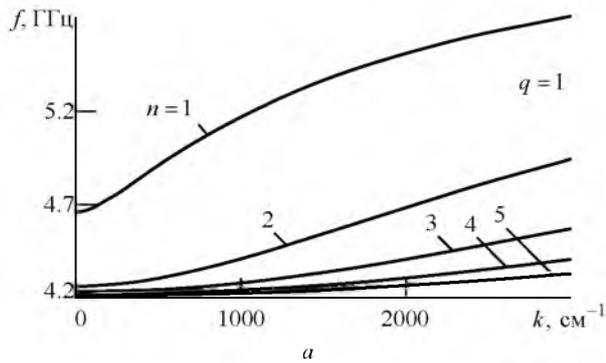


Рис. 4

кивания). Кроме того, становится невозможным поставить в соответствие отдельно взятой дисперсионной характеристике номер шириной моды. Однако можно различить, что межмодовое расталкивание наблюдается у мод с нечетными номерами n (первой и третьей, первой и пятой).

Сравнительный анализ спектров на рис. 3, а и 4 показывает, что частоты низших толщинных мод при $k = 0$ приблизительно равны для обоих типов закрепления. Данный факт не свойствен спектру, рассчитанному в приближении безграничной пленки, для которого частота низшей моды при $k = 0$ в случае свободных поверхностных спинов всегда ниже этой частоты при закрепленных поверхностных спинах.

Как показано в [4], изменение отношения толщины пленки к ее ширине (L/w) существенно влияет на неоднородность внутреннего поля. При этом меняется значение среднего внутреннего поля, влияющее на спектр СВ. На рис. 5 показаны спектры для двух волноводов одинаковой толщины $L = 10$ мкм, но имеющих различные ширины: $w = 50$ мкм (рис. 5, а) и $w = 500$ мкм (рис. 5, б), намагниченных внешним магнитным полем $H_0 = 3000$ Э с соответствующими профилями внутреннего поля (рис. 6). Средние значения внутреннего поля $\bar{H}_{int} = 1500$ Э при $w = 50$ мкм и 1275 Э при $w = 500$ мкм. Из рис. 5 можно сделать вывод, что с уменьшением w ширины волновода и, тем самым, с увеличением \bar{H}_{int} спектр располагается на более высоких частотах. Причем из рис. 5, б также следует, что по мере увеличения ширины волновода спектр СВ приближается к спектру безграничной пленки. Это обусловлено тем, что с расширением волновода среднее внутреннее поле стремится к предельному значению $H_{int} = H_0 - M_s = 1250$ Э, а сдвиг по частоте для низшей толщинной моды при $k = 0$ будет уменьшаться вплоть до момента, пока данная мода не достигнет частоты ферромагнитного резонанса f_H .



Главной отличительной чертой спектра СВ для ограниченного волновода по сравнению со спектром безграничной пленки является дополнительное расщепление каждой толщинной моды на ряд ширинных мод. На рис. 7 приведен случай расщепления низшей толщинной моды на 40 первых ширинных мод для волновода с $L = 10$ мкм и

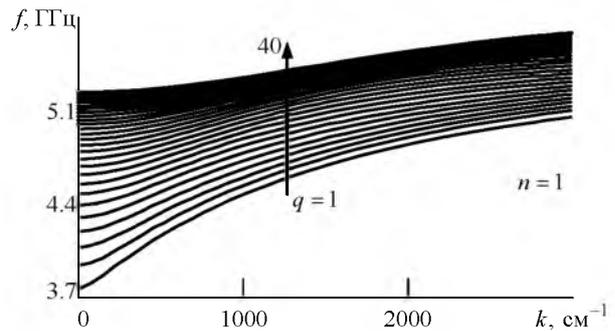


Рис. 7

$w = 250$ мкм. Такое большое число толщинных мод обусловлено достаточной сходимостью высших мод (сходимость мод подробно рассмотрена в [4]). Распределение переменной намагниченности по сечению волновода для таких мод сильно зависит от степени неоднородности внутреннего поля вдоль его ширины. Как можно видеть из рисунка, весь спектр сосредоточен в некотором диапазоне частот от f_{\min} до f_{\max} . Кроме того, по мере роста номера ширинной моды спектр сгущается.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует и объясняет ряд эффектов, возникающих в ограниченных по ширине ферромагнитных пленочных волноводах. Показано, что основным следствием конечной ширины волновода является возникновение волноводного эффекта вблизи $k = 0$, который заключается в появлении частоты отсечки низшей толщинной моды, лежащей выше $\gamma \bar{H}_{\text{int}}$. Среднее значение внутреннего поля зависит от размеров пленочного волновода. Кроме того, в волноводе конечной ширины существует расщепление каждой толщинной моды на большое количество ширинных мод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic Modes of a Ferromagnetic Slab // J. Phys. and Chem. Solids. 1961. Vol. 19, iss. 5. P. 308–320.
2. Kalinikos B. A., Slavin A. N. Theory of Dipole-Exchange Spin Wave Spectrum for Ferromagnetic Films with Mixed Exchange Boundary Conditions // J. Phys. C. 1986. Vol. 19. P. 7013–7033.
3. Auld B. A., Mehta K. B. Magnetostatic Waves in a Transversely Magnetized Rectangular Rod // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 4081–4083.
4. Григорьева Н. Ю., Попов Д. А., Калиникос Б. А. Спектр дипольно-обменных спиновых волн в анизотропном ферромагнитном волноводе прямоугольного сечения // ФТТ. 2014. Т. 56, вып. 9. С. 1746–1755.

D. A. Popov, A. B. Ustinov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Investigation of Dipole-Exchange Spin Wave Spectrum in ferromagnetic film waveguide

Dispersion characteristics of spin waves in normally magnetized film waveguides having a finite width are investigated theoretically for the first time. Simulation takes into account both the dipole and exchange interactions.

Spin waves, ferromagnetic film waveguide

Статья поступила в редакцию 7 июля 2016 г.