

*Виноградова М.В., Дроздовский А.В., Зарецкая Г.А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

Влияние магнитной диссипации на закон дисперсии магнетонного кристалла

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования распространения спиновых волн в одномерном кристалле конечной длины. Было показано, что спектр спиновых волн на частотах, вблизи брегговских резонансов, сильно зависит от длины кристалла и величины магнитной диссипации. Экспериментально подтверждено возникновение четырех чередующихся областей с положительной и отрицательной дисперсией, возникшей на частотах вблизи запрещенных зон магнетонного кристалла. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов показало их хорошее количественное и качественное совпадение.

Ключевые слова: Магнитная диссипация, магнетонный кристалл, спиновые волны, дисперсия.

Распространение волн в физических системах и средах с периодически изменяющимися параметрами изучалось в течение многих лет. В последние годы значительно увеличился интерес к исследованию магнитных периодических структур на основе ферромагнитных пленок, такие структуры получили название “магнетонных кристаллов” (МК). Магнетонный кристалл является удобной экспериментальной моделью для исследования линейных и нелинейных спиновых волн (СВ). Ранее было показано, что МК может быть использован для разработки новых устройств [1]. Среди них многофункциональные устройства, объединяющие ограничитель и усилитель отношения сигнал-шум, фазовращатели, генераторы, а также различные датчики для температурных или магнитных полей.

Известно, что при исследовании различных линейных и нелинейных спин-волновых явлений в пленочных ферромагнетиках одним из определяющих факторов является закон дисперсии спиновых волн. При изучении свойств МК расчеты, как правило, делаются для структур с бесконечным числом периодов. Теория предсказывает, как уже говорилось, что спектр собственных состояний $\omega(k)$ таких структур характеризуется наличием разрешенных зон, соответствующих частотам, на которых возможно распространение спиновых волн, а также запрещенных зон, на частотах которых распространение спиновых волн невозможно. Последние обусловлены брегговским резонансом. На дисперсионной характеристике запрещенные зоны магнетонного кристалла проявляются как разрыв.

Однако в случае магнетонных кристаллов, состоящих из ограниченного числа периодов, вместо запрещенных зон имеют место зоны с относительно высоким затуханием СВ. Несмотря на то, что в таких зонах коэффициент передачи СВ сравнительно мал, тем не менее в них имеет место распространение волн. Поэтому частотная зависимость коэффициента передачи спиновых волн (амплитудно-частотная характеристика) магнетонного кристалла конечной длины характеризуется чередованием полос пропускания с малыми и большими потерями. Последние в дальнейшем будем называть “полосами заграждения”. Для ограниченной по длине периодической структуры дисперсионная характеристика не содержит разрывов, в отличие от бесконечной периодической

структуры, но при этом вблизи полос заграждения наблюдается значительное отклонение в законе дисперсии. Все это сильно влияет не только на линейные, но и на нелинейные свойства МК в этом частотном диапазоне, в частности, на образование брэгговских солитонов.

Следует подчеркнуть, что несмотря на разнообразие существующих подходов к описанию свойств магнанных кристаллов, дисперсионные характеристики (спектры) спиновых волн в магнанных кристаллах до настоящего момента детально изучались только теоретически для случая бесконечных периодических магнитных структур. Исследование дисперсионных характеристик магнанных кристаллов конечной длины, содержащих потери, и их сравнение с экспериментально полученными зависимостями отсутствовало.

Целью данной работы было изучение особенностей коэффициента передачи и закона дисперсии магнного кристалла конечной длины и с учетом магнитных потерь.

В качестве объекта исследования нами была выбрана структура, представлявшая собой монокристаллический волновод из пленки железо-иттриевого граната, содержащий неоднородности в виде периодической системы канавок. Данная структура имела период $\Lambda = 400$ мкм, ширину d и глубину ΔL канавок 50 и 2 мкм соответственно, толщина толстой области L_1 равна 12 мкм. При расчете полагалось, что намагниченность насыщения феррита составляла 1750 Гс. Для такого объекта исследования все волноведущие свойства определяются в основном геометрией структуры и свойствами ферромагнитной пленки.

При теоретическом исследовании расчеты проводились при помощи аппарата волновых матриц передачи. Рассмотрим влияние магнитной диссипации на дисперсионные и передаточные характеристики магнного кристалла.

В случае распространения в МК спиновых волн, имеющих несущие частоты вблизи полос заграждения, наряду с дисперсией среды определенную роль играет дисперсия, обусловленная периодичностью структуры. В случае, если условие Брэгга выполняется, волна испытывает брэгговское отражение и по мере распространения в периодической структуре затухает, передавая энергию отраженным волнам. В этом режиме волновое число спиновой волны является комплексным. В случае бесконечного МК падающая волна должна полностью отразиться на частотах брэгговского резонанса. На частотном коэффициенте передачи бесконечного магнного кристалла этот факт должен проявляться в виде запрещенных зон, распространение спиновых волн на которых невозможно.

Было обнаружено, что рост вносимого затухания ведет к росту потерь при передаче СВЧ-сигнала во всей частотной полосе магнного кристалла. При этом на абсолютную глубину полосы заграждения увеличение декремента затухания практически не влияет. При увеличении значения параметра затухания уменьшается вклад переотраженных магнным кристаллом волн в формирование передаточной и дисперсионной характеристик. За счет этого при увеличении значения параметра диссипации на дисперсионной характеристике происходит сглаживание “изгибов”, соответствующих полосам заграждения. Иными словами, происходит уменьшение изгиба дисперсионной кривой, соответствующего полосе заграждения. Данные эффекты при численном моделировании для данной исследовавшейся структуры наиболее заметны при значениях параметра ΔH более 1 Э. Крутизна дисперсионной характеристики $\Delta f/\Delta k$ в зависимости от полуширины линии ферромагнитного резонанса для первых четырех полос заграждения показана на рисунке 1.

Таким образом, при увеличении параметра затухания СВ уменьшается относительная глубина полосы заграждения, а дисперсионная характеристика внутри полосы заграждения изменяет свою крутизну.

В заключение отметим, что наш анализ дал следующий важный теоретический результат. Была обнаружена зависимость дисперсионного коэффициента D от частоты. Как видно из частотной зависимости D в МК, полосы заграждения имеют несколько областей с положительной и отрицательной дисперсией. Коэффициент дисперсии меняет свой знак в

пределах каждой полосы заграждения четыре раза. Ранее этот факт был косвенно подтвержден экспериментально в исследовании [2].

Для проверки рассчитанных спектров магнонных кристаллов был произведен эксперимент. Использувавшиеся в эксперименте образцы магнонных кристаллов были изготовлены путем химического травления пленок ЖИГ. Для этого были отобраны образцы пленок ЖИГ шириной 2 мм и длиной 55 мм. Пленки ЖИГ были выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний галлиевого граната, толщиной 0,5 мм. Пленки ЖИГ имели толщину 12 мкм и намагниченность насыщения 1750 Гс. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса пленок ЖИГ – ΔH была равна 0,6 Э. При этом для проведения эксперимента были выбраны пленки, имеющие свободные поверхностные спины. Чтобы избежать влияния на результаты экспериментов отражения СВ от концов волноводов, их концы были сточены под острыми углами.

На рисунке 2(а) приведены результаты сопоставления экспериментальных и теоретических фазо-частотных характеристик исследованного образца. На вставках продемонстрирована фазо-частотная характеристика исследованного магнонного кристалла в увеличенном масштабе близ второй и четвертой полос заграждения МК. Из рисунка 2(а) видно качественное и количественное совпадение хода фазо-частотных характеристик, полученных экспериментальным и теоретическим путем. При этом видно, что “перегиб” дисперсионной кривой в полосе заграждения магнонного кристалла, полученный экспериментальным путем, совпадает с теоретическим расчетом.

На рисунке 2(б) показано сравнение дисперсионных коэффициентов, которые были получены экспериментально и теоретически. Можно четко увидеть, что существует четыре зоны с разными знаками дисперсионного коэффициента на экспериментальной зависимости. Подобная зависимость наблюдалась в работе [2]. Из рисунка 2 можно увидеть хорошее совпадение с теорией и экспериментом.

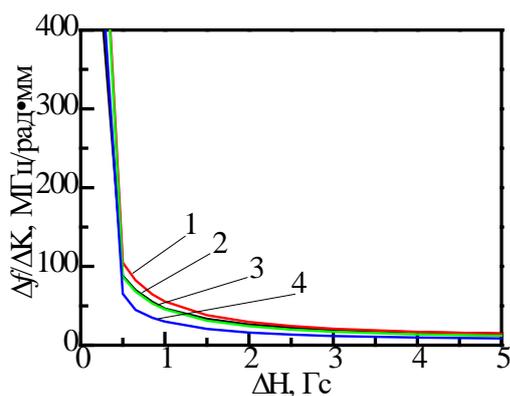


Рис. 1. Крутизна дисперсионной характеристики СВ в центре запрещенной зоны магнонного кристалла, состоящего из 1000 периодов. Цифрами на графике обозначен номер запрещенной зоны кристалла.

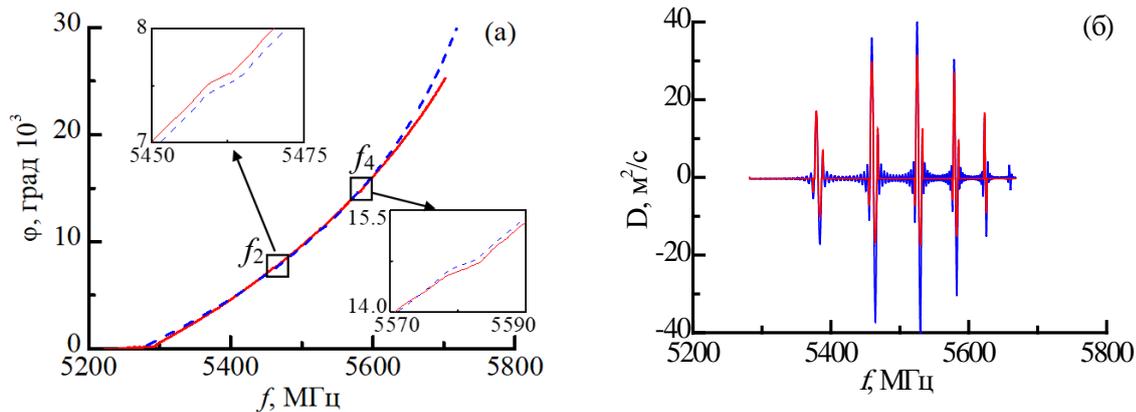


Рис. 2. Экспериментальная (сплошная линия) и теоретическая (штриховая линия) фазо-частотные характеристики (а), дисперсионный коэффициент (б).

В работе изучалось влияние магнитной диссипации на дисперсионные и передаточные характеристики одномерного магнитного кристалла. Было продемонстрировано, что величина магнитной диссипации определяет форму закона дисперсии внутри запрещенной зоны МК. Было показано, что вблизи брэгговского резонанса наблюдается несколько областей с сильной положительной и отрицательной дисперсией. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов показало их хорошее качественное и количественное совпадение в рассматриваемом частотном диапазоне. Полученные данные могут быть использованы для исследований линейных и нелинейных процессов в периодических магнитных структурах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (Грант № 14-12-01296-П).

Библиографический список

1. S. V. Grishin, E. N. Beginin, M. A. Morozova, Yu. P. Sharaevskii, and S. A. Nikitov, J. Appl. Phys. 115, 053908 (2014).
2. A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, V.E. Demidov, S.O. Demokritov, Phys. Rev. B, 81, 180406(R) (2010).