

**А. В. Дроздовский¹, А.Б. Устинов¹,
Б.А. Калинин¹, А.А. Сташкевич²**

¹ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
²Университет Париж 13, Франция

Распространение интенсивных спиновых волн внутри запрещенной зоны магнетонного кристалла

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования особенностей распространения интенсивных спиновых волн в нелинейной магнетонной периодической структуре – магнетонном кристалле. Обнаружено, что наличие явлений линейной и нелинейной диссипации спиновых волн приводит к тому, что с увеличением амплитуды спиновой волны в одномерном магнетонном кристалле перестает выполняться условие эффективного брэгговского резонанса. Рост амплитуды спиновой волны вызывает сдвиг по частоте, частотное расширение и уменьшение относительной глубины полос заграждения.

Ключевые слова: магнетонные кристаллы, ферриты, нелинейные колебания и волны

Пространственно-периодические структуры (или как их еще называют – “магнетонные кристаллы” (МК)), изготовленные из высококачественных монокристаллических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) могут найти применение при разработке устройств спин-волновой электроники, предназначенных для обработки СВЧ-сигнала. Такие структуры обладают рядом преимуществ, таких как перестраиваемая дисперсионная характеристика и относительно небольшие потери на распространение сигнала (менее 30 дБ/мкс). В таких средах на дисперсионной характеристике на частотах брэгговского резонанса существуют разрывы, а передаточная характеристика представляет собой чередование разрешенных и запрещенных зон. В последних распространение спиновых волн невозможно. Однако, как показывают недавние исследования [1] в реальных структурах конечной длины при наличии потерь разрывы на дисперсионной характеристике отсутствуют, а передаточная характеристика представляет собой чередование зон с относительно малыми и большими вносимыми потерями. Последние будем называть зонами заграждения. При расчете сверхвысокочастотных коэффициентов передачи таких структур, как правило, делаются два допущения: структура полагается пространственно неограниченной, а нелинейными процессами, свойственными ферромагнетикам пренебрегают, полагая систему строго линейной [2]. В данной работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования влияния амплитуды спиновой волны на передаточную характеристику конечного нелинейного магнетонного кристалла.

Рассмотрим коротко основную идею работы. При относительно небольших значениях мощности входного сигнала возбуждение спиновых волн в магнетонных кристаллах хорошо описывается линейной теорией. В то же время известно, что рост мощности спиновой волны, распространяющейся в ферромагнетической пленке, приводит к

возникновению стабильных нелинейных эффектов двух типов. Оба эти эффекта обусловлены процессами четырехволнового распада спиновых волн [3, 4]. К первому типу относят процесс нелинейного затухания спиновых волн, получающийся в результате передачи энергии от основной (длинноволновой) спиновой волны к волнам с много большим значением волнового числа. Ко второму типу относят нелинейный сдвиг волнового числа и сдвиг частот спиновых волн, обусловленный преобразованием основной спиновой волны в волны с близлежащими значениями волновых чисел. Физически ясно, что в случае рассматриваемой периодической структуры значения волнового вектора несущей спиновой волны, при котором наблюдаются зоны непропускания, жестко детерминированы и рост мощности должен приводить к сдвигу амплитудно-частотной характеристики и зон заграждения по частоте.

В качестве объекта исследования нами был выбран одномерный магнетонный кристалл, изготовленный из монокристаллической пленки ЖИГ, толщиной 12 мкм, выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната, путем создания периодической системы канавок на поверхности пленки. Исследовавшийся образец магнетонного кристалла имел следующие параметры – толщину 12 мкм, ширину 2 мм и длину 55 мм. Канавки имели глубину около 2 мкм, ширину 50 мкм и период 400 мкм. Геометрия экспериментального образца магнетонного кристалла была выбрана из тех соображений, чтобы в его спектре пропускания наблюдалось несколько полос заграждения СВ.

Полосы заграждения в магнетонных кристаллах формируются за счет брегговских резонансов на частотах на которых выполняется условие

$$\varphi(\omega) = 2\pi n, \quad (1)$$

здесь $\varphi(\omega)$ фазовый набег спиновых волн на одном периоде структуры; $n=1, 2, 3, \dots$ – целые числа. Закон дисперсии и период магнетонного кристалла определяют частотное положение полос заграждения. В случае нелинейного магнетонного кристалла в выражении (1) необходимо дополнительно учитывать нелинейный фазовый набег, возникающий в результате затухания спиновых волн [3]. Тогда выражение (1) стоит переписать, как

$$\varphi_{\text{Lin}}(\omega) + \varphi_{\text{NLin}}(\omega, U) = 2\pi n, \quad (2)$$

здесь $\varphi_{\text{Lin}}(\omega)$ – линейный фазовый набег, $\varphi_{\text{NLin}}(\omega, U)$ – нелинейный фазовый набег. Вследствие диссипации СВ нелинейный фазовый набег будет различным на различных участках магнетонной периодической структуры. Таким образом условие эффективного брегговского резонанса (фазовый набег на определенной частоте на каждом участке структуры кратен 2π) не выполняется.

Результаты теоретического исследования для структуры состоящей из 10 периодов при различных значениях декремента линейного затухания представлены на рис. 1. Значение декремента линейного затухания полагалось равным $\omega_r = 2\pi|\gamma|\Delta H$, где γ – гиромагнитное отношение, ΔH – параметр диссипации материала – ширина линии

ферромагнитного резонанса. Значения величин ΔN указано цифрами на рис. 1. Вид полученных зависимостей можно объяснить следующим образом. По мере увеличения вносимых материалом потерь растет падение амплитуды СВ на каждом участке структуры. Поскольку падение амплитуды на одном периоде происходит по экспоненциальному закону, то при росте потерь будет увеличиваться разброс между значением амплитуд СВ в каждом периоде структуры (рис. 1 (а)). Это приведет к увеличению разницы между соседними периодами по добавке к нелинейному фазовому набегу и, как следствие, частотам брэгговских резонансов. Ближе к концу структуры, там, где амплитуда СВ относительно невелика, этот разброс будет меньше и резонансные частоты будут ближе к друг другу и к значению резонансных частот при заведомо линейном распространении СВ. Поэтому при росте потерь частотный минимум полосы заграждения сдвигается вверх по частоте, а ее относительная глубина уменьшается (полоса заграждения “замазывается”).

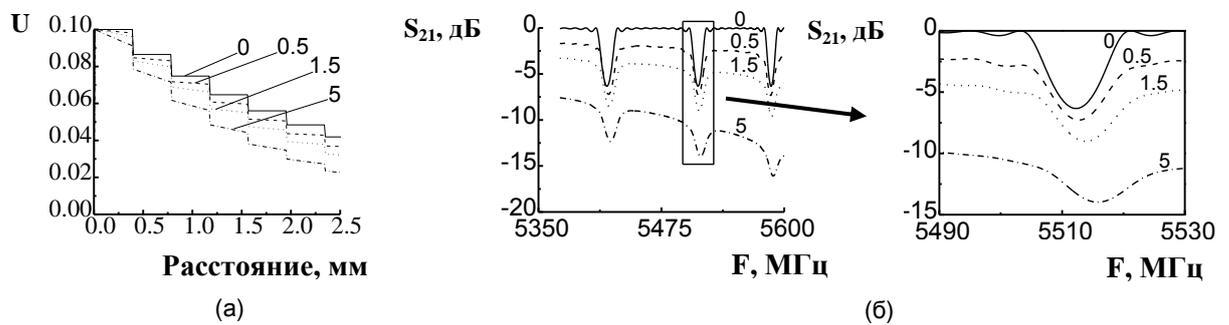


Рисунок 1

Данные зависимости будут определять и вид передаточной характеристики МК и при различных значениях мощности. Результаты моделирования показали, что по мере увеличения амплитуды входной СВ дополнительно может “включаться” механизм нелинейного затухания СВ, что приводит к более резкому падению амплитуды СВ на нескольких первых периодах структуры. На следующих периодах механизм линейного затухания будет ограничивать амплитуды СВ, сводя их примерно к одному значению. Таким образом, на некотором расстоянии от начала периодической структуры (примерно на расстоянии 5–8 периодов) разброс резонансных частот отдельных периодов становится незначительным (менее 0,5 МГц), и далее такую структуру условно можно считать периодической с точки зрения ее волноведущих свойств. В то же время резонансные частоты первых периодов структуры будут сильно различаться, смещаясь по частоте вниз (в случае касательного намагничивания магнетонного кристалла) при увеличении мощности сигнала.

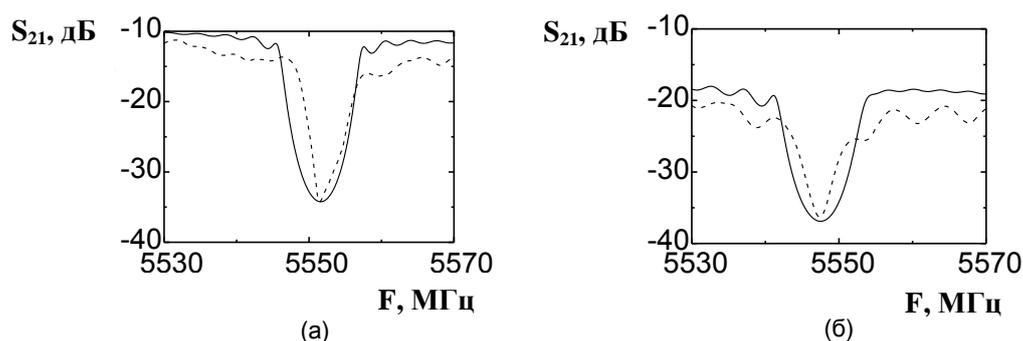


Рисунок 2

Поскольку брэгговские резонансные частоты всего МК определяются суммой всех резонансов отдельных периодов, то частотный минимум полосы заграждения будет также смещаться вниз по частоте, а сама полоса заграждения будет расширяться. Одновременно с этим, за счет нелинейного затухания будут увеличиваться вносимые МК потери. Сопоставление передаточных характеристик магнетонного кристалла входной мощности 0 и 100 дБм приведено на рис. 2 (а) и рис. 2 (б), соответственно (на рис. 2 сплошная линия – результат моделирования, пунктирная – экспериментальные данные).

Таким образом амплитуда СВ и декременты затухания феррита определяют вид и частотное положение коэффициента передачи магнетонного кристалла. Подобные зависимости должны наблюдаться в любой пространственно-периодической структуре, изготовленной из нелинейных материалов, в которых закон дисперсии зависит от амплитуды сигнала.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки России в рамках программы «Научные и педагогические кадры инновационной России», Российским Фондом Фундаментальных Исследований и Стипендии Президента РФ.

Библиографический список

1. Seshadri S.R. A transmission line model for magnetic waves on a thin film // –J. Appl. Phys. –1986. –Vol. 60. (5). –P. 1758-1768.
2. Puzzkarski, H. Magnonic crystals – the magnetic counterpart of photonic crystals / H. Puzzkarski, M. Krawczyk // Solid State Phenomena, – 2003. Vol. 94, – P. 125-134.
3. Ustinov A.B. A microwave nonlinear phase shifter / Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. – 2008. - Vol. 93. P. 102504.
4. Scott M.M. Nonlinear damping of high-power magnetostatic waves in yttrium-iron-garnet films / Patton C.E., Kostylev M.P., Kalinikos B.A. // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 95. P. 6294-6390.