

01; 05; 09

© 1990 г.

УСИЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

Г. А. Мелков, С. В. Шолом

Теоретически и экспериментально изучено параметрическое усиление поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в пленках железо-иттриевого граната. Эксперимент проведен в трехсантиметровом диапазоне длин волн накачки. Исследовано два режима работы — до и после порога параметрического возбуждения спиновых волн. В первом случае коэффициент усиления оказался существенно меньшим единицы, во втором он составлял величину в несколько десятков децибел, однако форма выходного импульса при этом не соответствовала форме входного.

Введение

Одной из нерешенных актуальных задач спин-волновой электроники СВЧ является задача об усилении амплитуды поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ), распространяющейся в тонких ферромагнитных пленках и являющейся носителем информации в большинстве спин-волновых приборов. Предложено несколько способов усиления ПМСВ; мы здесь рассмотрим возможность параметрического усиления ПМСВ продольной накачкой частоты ω_p , в ~ 2 раза большей частоты ПМСВ ω . При продольной накачке ее переменное магнитное поле h параллельно постоянному магнитному полю H , подмагничивающему пленку. В более ранних работах [1] такое усиление в эпитаксиальных пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) наблюдалось лишь после порога спин-волновой неустойчивости в узкой области постоянных магнитных полей H вблизи поля максимального прохождения сигнала ПМСВ H_0 , т. е. для волн с малой величиной волнового числа $k \leq 10 \text{ см}^{-1}$. Кроме того, усиление имело место лишь в малый промежуток времени, следующий непосредственно за моментом включения импульса накачки. В настоящей работе теоретически и экспериментально изучена возможность параметрического усиления ПМСВ с произвольной величиной волнового числа главным образом до порога спин-волновой неустойчивости.

Теория

Принцип действия параметрического усилителя на ПМСВ ясен из рис. 1. В ферритовой пленке 1 входной сигнал на частоте ω с помощью антенны возбуждает ПМСВ с волновым числом k , бегущую по направлению к выходной антенне 3. При этом ПМСВ проходит активную область длиной L (заштрихована на рис. 1), где эта волна испытывает взаимодействие с продольной накачкой частоты $\omega_p \approx 2\omega$, в результате чего выходной сигнал на антенне 3 увеличивается в K раз, а на входной антенне 2 появляется сигнал холостой частоты $\omega_p - \omega$, распространяющийся в обратном направлении по противоположной стороне пленки.

Дифференциальные уравнения, описывающие взаимодействие ПМСВ частоты $\omega \approx \omega_p/2$ с продольной накачкой и учитывающие конечность длины области взаимодействия L , имеют вид [2]

$$\left(\gamma_k + v_k \frac{\partial}{\partial z}\right) A_k + V_k h A_{-k}^* = 0, \quad \left(\gamma_k - v_k \frac{\partial}{\partial z}\right) A_{-k}^* + V_{-k}^* h A_k = 0, \quad (1)$$

где γ_k , v_k — затухание и групповая скорость ПМСВ; A_k , A_{-k} — амплитуды сигнальной и холостой волн с волновым числом k ; z — согласно рис. 1, направление распространения волн.

Граничное условие для сигнальной волны $A_k(0) = A_0$ (амплитуда сигнальной ПМСВ при $z=0$), для холостой $A_{-k}(L) = 0$. $V_k = (g\omega_M/2\omega_p) \exp(-|k|d)$, g — гиромангнитное отношение для электронного спина, $\omega_M = 4\pi g M_0$, M_0 — намагниченность насыщения пленки, d — ее толщина. Выражение для коэффициента параметрической связи V_k было получено с помощью формул работы [3], в которые были подставлены явные выражения для полей и намагниченностей ПМСВ [4]. При вычислении V_k игнорировались обменные эффекты, что оправдано для пленок ЖИГ при $k \ll 10^5 \text{ см}^{-1}$, ибо на опыте чаще всего $k < 10^4 \text{ см}^{-1}$.

С помощью (1) несложно найти коэффициент усиления ПМСВ продольной накачкой

$$K = 2v_k x / [-e^{-xL} (\gamma_k - v_k \cdot x) + e^{xL} (\gamma_k + v_k x)], \quad (2)$$

$$\text{где } x = \{[\gamma_k^2 - (V_k \cdot h)^2] / V_k^2\}^{1/2}.$$

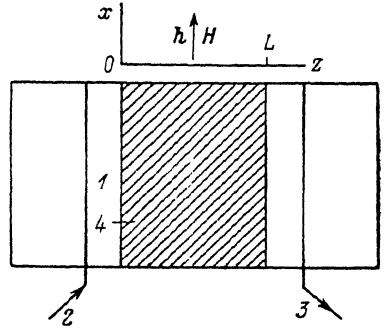


Рис. 1. Схема параметрического усилителя ПМСВ.

1 — ферритовая пленка; 2, 3 — входная и выходная антенны СВЧ; 4 — область действия параметрической накачки (заштрихована), переменное магнитное поле которой параллельно постоянному подмагничивающему полю $h \parallel H$.

Бесконечный коэффициент усиления, т. е. порог возбуждения ПМСВ продольной накачкой, согласно (2), достигается при пороговой амплитуде

$$h_k = \gamma_k \frac{2\omega_p}{g\omega_M} \exp(|k|d) \sqrt{1 + \beta^2 \lambda_k^2 / L^2}. \quad (3)$$

Здесь β — численный коэффициент, являющийся решением уравнения $\text{tg } \beta = -\beta v_k / \gamma_k L$, он слабо зависит от отношения длины свободного пробега ПМСВ $\lambda_k = v_k / \gamma_k$ к длине активной области L : $\beta = \pi$ при $\lambda_k / L \ll 1$, $\beta = \pi/2$ в обратном предельном случае $\lambda_k / L \gg 1$. Отношение $\lambda_k / L = v_k / \gamma_k L$ имеет простой физический смысл и легко находится экспериментально, так как именно оно определяет величину затухания B при распространении ПМСВ через активную область длиной L при отсутствии накачки $B = \exp(L/\lambda_k)$, $B_{дБ} = 8.7 L/\lambda_k$. Аналитическое выражение этого отношения через параметры пленки

$$\frac{\lambda_k}{L} = \frac{8.7}{B_{дБ}} \approx \frac{\omega_M^2 d \exp(-2|k|d)}{2\omega_p L \gamma_k}. \quad (4)$$

Обычно $\lambda_k / L < 1$, что и будет учитываться в дальнейшем.

Как и следовало ожидать, в случае однородной накачки ($L \gg \lambda_k$) для волн с $k=0$ (3) совпадает с выражением для порога возбуждения h_0 плоских спиновых волн (СВ) [3]. С ростом k порог возбуждения ПМСВ увеличивается из-за уменьшения эллиптичности прецессии ПМСВ, а также из-за того, что сигнальная и холостая волны распространяются по противоположным сторонам пленки и с ростом k каждая из них все больше «прижимается» к своей стороне, уменьшая область их взаимодействия друг с другом. В случае конечной длины активной области порог возбуждения ПМСВ еще более увеличивается из-за выноса энергии из области взаимодействия волн с накачкой [5]. Для СВ все эти эффекты отсутствуют. Если же учесть и то, что обычно затухание СВ $\gamma_0 < \gamma_k$, то отношение порогов возбуждения СВ и ПМСВ

$$\frac{h_0}{h_k} = \eta = \frac{\gamma_0}{\gamma_k} \exp(-|k|d) [1 + \beta^2 \lambda_k^2 / L^2]^{-2} \quad (5)$$

всегда оказывается меньше единицы.

Формула (2) сложная для анализа. Запишем ее вначале для случая малых надкритичностей $\varphi^2 = (h/h_k)^2 \ll 1$

$$K = K_e \exp(-L/\lambda_k) = K_e/B. \quad (6)$$

Здесь K_e — коэффициент электронного усиления, показывающий, во сколько раз возросла амплитуда сигнала на выходной антенне после включения накачки,

$$K_e \approx 1 + \zeta^2 L/2\lambda_k \approx 1 + \zeta^2 B_{дБ}/17.4. \quad (7)$$

Без накачки ($\varphi=0$) $K_e=1$, а полный коэффициент усиления K равен обратной величине затухания B .

Из (7) видно, что при малых надкритичностях электронное усиление K_e растет пропорционально мощности накачки; для его увеличения, согласно (4), необходимо уменьшать толщину пленки и увеличивать величину волнового числа ПМСВ, происходящее при этом уменьшение групповой скорости ПМСВ v_k способствует увеличению времени взаимодействия волн с накачкой. Однако полный коэффициент усиления в результате этих мер может даже уменьшиться из-за роста начального затухания B .

В другом предельном случае ($1-\zeta \ll 1$) выражение для коэффициента усиления (2) принимает вид

$$K = (B_{дБ}/8.7) \left\{ \pi^2 (1-\zeta) \left[1 + \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{B_{дБ}}{8.7} \right)^2 \right] \right\}. \quad (8)$$

Согласно (8), максимальный приборный коэффициент усиления достигается при $B_{дБ} \approx 20$ дБ или при $\lambda_k/L = v_k/\gamma_k L \approx 0.43$. В этом случае

$$K_{\max} \approx 1/[\pi^2 (1-\zeta)], \quad (9)$$

откуда видно, что для достижения приемлемых коэффициентов усиления необходим уровень накачки, близкий к пороговому уровню возбуждения ПМСВ ($\zeta=1$, $h=h_k$). Например, $K_{\max}=1$ достигается при $\zeta=0.9$, для больших усиленных требуется еще большее значение надкритичности. Однако из предыдущего ясно, что достичь таких надкритичностей не всегда оказывается возможным, поскольку значительно раньше начинается процесс параметрического возбуждения СВ. Реально это означает, что амплитуда накачки должна быть меньше порога возбуждения СВ или, используя (5), $\zeta < \eta$. Если $\zeta \geq \eta$, то усиление ПМСВ будет происходить в присутствии СВ большой амплитуды, что, безусловно, скажется на характеристиках усиления, как это имело место в монокристаллических ферритах [6]. Оценка η при $B_{дБ}=20$ дБ дает $\eta \leq 0.5$. При соответствующих надкритичностях ($\zeta \leq 0.5$), согласно (2), коэффициент усиления ПМСВ $K \ll 1$, мало и электронное усиление $K_e \sim 1$. Все это означает, что следует ожидать весьма незначительного параметрического усиления ПМСВ продольной накачкой до порога возбуждения плоских спиновых волн. Выше этого порога можно достичь заметных усиленных, но при этом неизбежно проявится нелинейное влияние СВ на ПМСВ.

Эксперимент

В качестве входной и выходной антенн (рис. 1) использовались разомкнутые проволочные антенны диаметром 25 мкм. Накачка на пленку подавалась с помощью открытого диэлектрического резонатора (ДР), непосредственно контактирующего с пленкой ЖИГ. Размер области соприкосновения 3.5×3.5 мм, толщины исследовавшихся пленок $d=0.5-30$ мкм. Электрической составляющей поля стандартного прямоугольного волновода трехсантиметрового диапазона, в который помещался ДР, в нем возбуждался тип колебаний E_{101} , переменное магнитное поле h которого было параллельно оси x (рис. 1) и внешнему постоянному полю H . Направление H соответствовало ПМСВ, бегущей от входной к выходной антенне по верхней поверхности пленки ЖИГ.

Экспериментальная установка позволяла работать как с импульсными, так и с непрерывными сигналами ПМСВ и накачки. В качестве источников сигнала

и накачки использовались клистронные генераторы, мощность накачки усиливалась до $P \sim 5$ Вт с помощью усилителя на ЛВВ. Частота накачки менялась в пределах 9300...9500 МГц, частота ПМСВ $\omega \approx \omega_p/2$.

В результате экспериментальных исследований было установлено следующее. Как и ожидалось, до порога возбуждения спиновых волн $P = P_0$ усиление происходит без каких-либо особенностей: оно имеет место и в непрерывном, и в импульсном режиме работы генераторов сигнала и накачки, форма импульса на выходе соответствует форме импульса на входе, и т. д. При $P \geq P_0$ параметрически возбуждаются СВ, которые существенно изменяют процесс усиления ПМСВ параметрической накачкой. Во-первых, СВ в результате двухмагнитного рассеяния на неоднородностях превращаются в ПМСВ и дают на выходной антенне шумовой сигнал, составляющий по порядку величины $\sim 10^{-10} - 10^{-11}$ Вт [6]. Во-вторых, при $P > P_0$ усиление ПМСВ имеет место лишь в импульсном режиме работы генератора накачки в узком временном интервале сразу после включения импульса накачки. Независимо от формы и длительно-

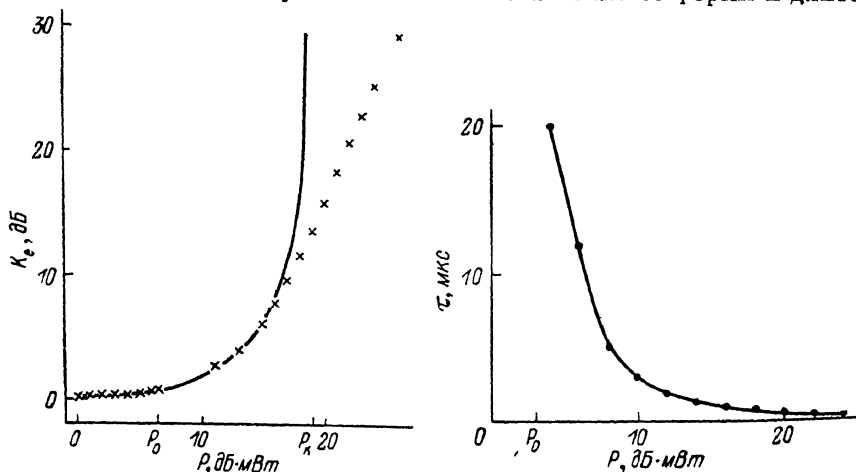


Рис. 2. Зависимость коэффициента электронного усиления поверхностной МСВ от мощности сигнала накачки.

Толщина пленки ЖИГ $d=1.5$ мкм, волновое число ПМСВ $k=220$ см $^{-1}$. Крестики — эксперимент, сплошная линия — теория. P_0 и P_k — пороги параметрического возбуждения СВ и ПМСВ соответственно.

Рис. 3. Зависимость длительности усиленного импульса τ при переходном усилении от мощности сигнала накачки для пленки ЖИГ толщиной 22.6 мкм и волнового числа $k=125$ см $^{-1}$.

сти входного сигнала усиленный сигнал на выходе появляется на фоне шумов в момент включения накачки и имеет длительность τ , его форма колоколообразная. Происходит все это в результате нелинейного четырехмагнитного взаимодействия СВ друг с другом [7]. Благодаря этому взаимодействию параметрически возбужденные СВ подавляют передачу энергии от накачки к еще не возбуждавшимся волнам, в том числе и к ПМСВ. Такая передача возможна лишь в короткое время после включения накачки, пока амплитуда СВ из-за наличия переходных процессов не слишком велика по сравнению с тепловым уровнем. Ясно, что чем больше накачка, тем быстрее растут СВ и тем меньше будет время τ . Усиление ПМСВ при $P > P_0$ мы в дальнейшем будем называть переходным усилением.

Одна из типичных экспериментальных зависимостей коэффициента усиления ПМСВ продольной накачкой изображена на рис. 2. Она измерена для пленки ЖИГ толщиной 1.5 мкм, частота накачки 9456 МГц, волновой вектор ПМСВ $k=220$ см $^{-1}$, $\gamma_k/\gamma_0 \sim 2$, затухание $B_{дБ}=10$ дБ, величина входного сигнала ПМСВ 10^{-8} Вт. До мощностей накачки $P < P_0=6$ дБ, что соответствует мощности накачки 4 мВт, имеет место усиление ПМСВ без параметрического возбуждения СВ. Порог возбуждения СВ P_0 легко определяется экспериментально по регистрации момента скачкообразного увеличения мощности шума на выходной антенне. Сплошной линией на рис. 2 для указанных выше парамет-

ров пленки показана теоретическая зависимость коэффициента усиления ПМСВ от мощности накачки (2); при мощностях $P < P_0$ она хорошо совпадает с экспериментальными результатами. Согласно этой зависимости, а также соотношениям (2), (3) и (5), порог возбуждения ПМСВ оказывается на 12.6 дБ выше порога возбуждения СВ, т. е. $\eta = 0.24$. Из-за малой надкритичности до порога возбуждения СВ ($\zeta \leq \eta$) электронный коэффициент усиления достигает здесь лишь значения $K_e = 0.8$ дБ ($K = -9.2$ дБ). Для всех исследованных пленок максимальные значения K_e не превышали 1. . 2 дБ, только для одной из них ($d = 1.8$ мкм) получено усиление $K_e = 5.2$ дБ. Для этой пленки по неизвестным причинам имело место заметное (в ~ 2 раза) возрастание порога возбуждения СВ. Вообще же, как правило, K_e уменьшалось с увеличением толщины пленки из-за уменьшения отношения порогов η (2). В наших экспериментах оно было меньше точности эксперимента (0.2 дБ) для толщин пленок $d > 6.5$ мкм. Переходное усиление благодаря своей большой величине наблюдалось для всех исследовавшихся пленок.

Согласно рис. 2, переходное усиление ПМСВ с ростом $P > P_0$ вначале следует теоретической зависимости (2), а затем отклоняется от нее в сторону меньших усилений. Этот факт может быть связан с тем обстоятельством, что за время τ амплитуда ПМСВ не всегда успевает достичь стационарного состояния, которому соответствуют уравнения (1) и результат их решения (2). Для описания переходного усиления при $\tau \sim 1/\gamma_k$ следует вместо (1) использовать нестационарные уравнения, добавив в (1) производные по времени. Экспериментальная зависимость длительности усиленного импульса τ при переходном усилении в пленке толщиной 22.6 мкм показана на рис. 3. Видно, что при превышениях накачкой порогового уровня возбуждения СВ на 12 дБ $\tau \sim 1$ мкс, что вполне сравнимо с временем релаксации ПСВ $1/\gamma_k$. При превышениях 20 дБ длительность усиленного импульса ~ 0.2 мкс, что уже заметно меньше $1/\gamma_k$.

Как обычное, так и переходное усиления ПМСВ существенно зависят от величины подмагничивающего поля H , т. е. от волнового числа ПМСВ k . Например, для пленки толщиной $d = 22.6$ мкм переходное электронное усиление при уменьшении H от 975 ($k = 35$ см $^{-1}$) до 900 Э ($k = 170$ см $^{-1}$) увеличивалось на 5 дБ. Заметно увеличивается усиление и в постоянных магнитных полях, соответствующих точкам пересечения спектра ПМСВ со спи-волновыми резонансами (СВР) пленки. Здесь наблюдалось увеличение переходного усиления на 9 дБ (пленка толщиной $d = 22.6$ мкм), а обычного — на ~ 2 дБ (пленка 1.5 мкм). Увеличение усиления при уменьшении поля H и в точках пересечения спектров ПМСВ и СВР связано, по крайней мере частично, с увеличением времени взаимодействия ПМСВ с накачкой в результате уменьшения их групповой скорости.

Полоса частот переходного усиления слабо зависит от мощности накачки и для разных пленок составляет величину 3. . 5 МГц. Для обычного усиления ввиду его малости полосу частот определить не удалось, по грубым оценкам она не превышает 1 МГц.

Выводы

Параметрическое усиление ПМСВ в тонких ферритовых пленках ЖИГ имеет существенно разный характер при мощностях накачки P , бóльших и меньших порога возбуждения плоских спиновых волн P_0 .

При $P < P_0$ форма импульса выходного сигнала, как и для всех других аналоговых усилителей, без каких-либо особенностей повторяет входной сигнал. Однако усиление здесь невелико: электронный коэффициент усиления не превышает в лучшем случае нескольких децибел, а полный коэффициент усиления всегда существенно меньше единицы.

При $P > P_0$ усиление ПМСВ возможно лишь в переходном режиме непосредственно после включения импульса накачки. В этом случае выходной сигнал независимо от входного представляет собой импульс колоколообразной формы длительностью τ . Величина τ при увеличении мощности накачки изменяется от десятков мкс при $P/P_0 \geq 1$ до десятых долей мкс при $P/P_0 \sim 10^2$. Электронное усиление в этом режиме достигает 30 дБ, полное — 20 дБ; полоса частот 3. . 5 МГц.

Список литературы

- [1] *Вашковский А. В., Зубков В. И., Круценко И. В., Мелков Г. А.* // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. Вып. 4. С. 124—126.
- [2] *Львов В. С., Рубеник А. М.* Препринт ИАЭ СО АН СССР. 1976. № 31. 36 с.
- [3] *Schlömann E., Joseph R.* // J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. N 6. P. 1006—1014.
- [4] *Мелков Г. А.* // ФТТ. 1988. Т. 30. Вып. 8. С. 2533—2535.
- [5] *Мелков Г. А., Шолом С. В.* // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 11. С. 3257—3261.
- [6] *Моносов Я. А.* Нелинейный ферромагнитный резонанс. М.: Наука, 1971. 376 с.
- [7] *Захаров В. Е., Львов В. С., Старобинец С. С.* // УФН. 1974. Т. 114. № 4. С. 609—654.

Киевский государственный университет
им. Т. Г. Шевченко

Поступило в Редакцию
26 июля 1989 г.