

УДК 548 537.611.46

ВЛИЯНИЕ СВЧ СИГНАЛА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНКАХ

А. В. Ваиковский, В. И. Зубков, Э. Г. Локк, С. А. Никитов

Приведены результаты экспериментального исследования распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) в условиях, когда на пленку ЖИГ действует монохроматический СВЧ сигнал большой мощности, частота которого лежит в диапазоне существования ПМСВ. Обнаружено, что воздействие СВЧ сигнала большой мощности ведет к возникновению нескольких частотных зон ослабления амплитуд бегущих в пленке ЖИГ ПМСВ в зависимости от величины постоянного магнитного поля, намагниченности насыщения пленок, частоты и мощности монохроматического СВЧ сигнала. Подробно описаны свойства указанных частотных зон ослабления амплитуд ПМСВ и объяснены причины возникновения каждой из них: это либо четырехмагнотные процессы рассеяния, либо трехмагнотные процессы распада.

Исследование нелинейных явлений, возникающих в ферромагнетиках при воздействии СВЧ сигнала большой мощности, является одной из актуальных проблем физики твердого тела [1-3]. До настоящего времени основное внимание уделялось явлениям, связанным с параметрическим возбуждением спиновых волн в нормально намагниченных ферритовых образцах [2-5]. Однако возможность создания устройств аналоговой обработки СВЧ сигнала, работающих на поверхностных магнитостатических волнах (ПМСВ), распространяющихся в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) [6-8], делает актуальным изучение нелинейных явлений при распространении ПМСВ в касательно намагниченных пленках ЖИГ как в чисто физическом [9], так и прикладном [8] аспектах. Эти явления остаются наименее исследованными: им посвящены лишь работы [9-12], в которых изучались процессы первого порядка (трехмагнотные). Процессы более высокого порядка (в частности, четырехмагнотные) оказались неисследованными. В настоящей работе, в частности, впервые приводятся результаты наблюдения четырехмагнотных процессов взаимодействия ПМСВ.

Нами исследовались нелинейные явления, возникающие при распространении ПМСВ, когда в частном диапазоне их существования на пленку ЖИГ воздействует монохроматический СВЧ сигнал большой мощности (далее сильный СВЧ сигнал). Эксперименты проводились на пленках ЖИГ с намагниченностями насыщения $4\pi M_0$ от 1740 до 1800 Гс, шириной резонансной линии $2\Delta H$ от 0.4 до 0.75 Э и толщинами от 8 до 15 мкм. ПМСВ в них возбуждались отрезком микрополосковой линии (МПЛ), прием осуществлялся таким же отрезком МПЛ, параллельным первому и расположенному на расстоянии 6 мм от возбуждающего. Ленточный проводник МПЛ имел длину 6 мм, ширину 50 мкм и располагался на неметаллизированной стороне поликоровой подложки.

На возбуждающую МПЛ через вентили и тройник подавались два СВЧ сигнала: один — слабый с частотой f_0 от генераторного блока измерителя комплексных коэффициентов передачи, второй — сильный с частотой f_1 от СВЧ генератора. Слабый сигнал свипировался по частоте.

Сигнал с приемной МПЛ подавался либо на индикаторный блок измерителя комплексных коэффициентов передачи, либо на анализатор спектра, при этом в первом случае наблюдалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) передачи слабого сигнала через пленку ЖИГ. Такая методика позволила исследовать нелинейные явления, возникающие при действии как одного сильного сигнала, так и слабого и сильного сигналов вместе.

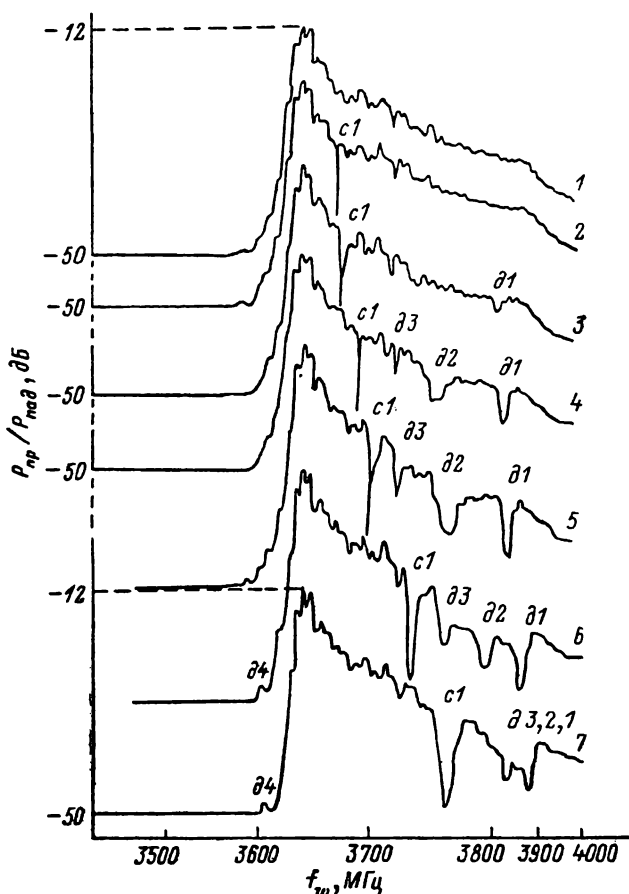


Рис. 1. Зависимости отношения прошедшей мощности к падающей ($P_{пр}/P_{пад}$) от частоты слабого сигнала f_w на различных частотах сильного сигнала f_s при мощности сильного сигнала $P_s=9$ мВт, мощности слабого сигнала $P_w=4$ мкВт, поле $H_0=668$ Э.

f_s , Мгц: 1 — 0, 2 — 3674, 3 — 3684, 4 — 3700, 5 — 3708, 6 — 3742, 7 — 3762.

Полученные результаты проиллюстрированы на примере пленки ЖИГ, которая имела размеры 4×15 мм, толщину 9.8 мкм, $2\Delta H=0.65$ Э, $4\pi M_0=1760$ Гс.

Наблюдались два типа явлений: одни были обусловлены наличием обоих (сильного и слабого) сигналов, другие — наличием только сильного сигнала, что, однако, не мешает им сказываться на АЧХ передачи слабого сигнала через пленку ЖИГ. Первый тип явлений наблюдался при частоте сильного сигнала $f_s < 2f_H$ (где $f_H=|\gamma|H_0$, γ — гиромагнитное отношение, H_0 — постоянное магнитное поле), второй — при $f_s > 2f_H$. $f_s=2f_H$ — граница области существования трехмагнонных процессов распада, которые возможны при $f_s > 2f_H$. Оба типа явлений приводили к появлению на АЧХ пиков затухания — провалов, отличающихся, однако, по виду на экране индикатора. Чтобы различать провалы между собой, провалы, связанные с первым типом явлений, называются далее «дополнительными», а со вторым — «сигнальными». Сигнальные провалы в от-

ликие от дополнительных всегда заполнены шумом. Сигнальным назван также провал на частоте сильного сигнала f_s . Значения частоты f_s , при которых возникали те или иные явления, и частотная полоса всех провалов по их основанию зависели от величины постоянного магнитного поля H_0 , намагниченности насыщения пленки ЖИГ $4\pi M_0$ и мощности сильного сигнала P_s , а центральные частоты провалов — только от первых двух параметров.

Перейдем к описанию явлений первого типа. На рис. 1 представлен набор АЧХ без (кривая 1) и при воздействии сильного сигнала (кривые 2—7). АЧХ совмещены по частотной шкале f_ω (оси абсцисс) и разнесены по отношению прошедшей мощности к падающей $P_{пр}/P_{пвх}$ (оси ординат). Видно, что в АЧХ на частоте сильного сигнала f_s всегда возникает сигнальный провал, который обозначен на кривых 2—7 как «с1». Кроме него, с увеличением частоты f_s при некоторых ее значениях $f_{s,д1}$ возникают дополнительные провалы. Первый из них (далее первый дополнительный), наблюдаемый при $f_s \geq f_{s,д1}$ и обозначенный на кривых 3—7 как «д1», отличается тем, что даже при значительном изменении частоты (на 110 МГц) сдвигается на АЧХ слабо (на 10 МГц).

При дальнейшем увеличении частоты f_s , когда $f_s \geq f_{s,д2,3}$, между сигнальным и первым дополнительным провалами возникает сразу два дополнительных провала на АЧХ (см. кривые 4—7), называемых далее вторым и третьим дополнительными провалами и обозначенных соответственно как «д2» и «д3». Сумма центральных частот второго и третьего дополнительных провалов равна сумме центральных частот сигнального и первого дополнительного провалов.

При еще большем увеличении частоты f_s (см. кривые 6 и 7) появляется четвертый дополнительный провал, обозначенный как «д4». Сумма центральных частот первого и четвертого дополнительных провалов равна $2f_s$.

С ростом частоты f_s сигнальный провал приближается к первому дополнительному провалу, при этом первый, второй и третий дополнительные провалы начинают сливаться в один провал (см. кривую 7), который с увеличением f_s уменьшается по глубине и при $f_s = 3780$ МГц исчезает одновременно с четвертым дополнительным провалом.

Еще до исчезновения дополнительных провалов при $f_s > 2f_H$ начинают наблюдаться явления второго типа. Они проявляются в том, что расширяется сигнальный провал (см. кривые 6 и 7), края которого «замазываются» шумом. После исчезновения дополнительных провалов при $f_s = 3784$ МГц на частоте $f_\omega = 3772$ МГц появляется еще один провал, называемый далее вторым сигнальным провалом. Он существует в некотором диапазоне частот и в отличие от дополнительных провалов заполнен шумом, а его глубина меньше, чем у сигнального провала. Интересно ведет себя его центральная частота $f_{\omega c2}$ с увеличением f_s : она меняется как бы по синусу между предельными значениями $f_{\omega c2 \min}$ и $f_{\omega c2 \max}$, определяемыми полем H_0 ($f_{\omega c2 \min} = 3776$ МГц, $f_{\omega c2 \max} = 3796$ МГц). Как только центральная частота второго сигнального провала принимает значение $f_{\omega c2 \max}$ (что происходит при $f_s = 3796, 3830, 3850$ МГц), на АЧХ возникает еще один заполненный шумом провал (называемый далее третьим сигнальным провалом), центральная частота которого равна $2f_s - f_{\omega c2 \max}$. На частоте $f_s = 3796$ МГц сигнальные провалы сливаются и образуют широкий провал с тремя вершинами (3794, 3796, 3798 МГц).

Наблюдение выходного сигнала на анализаторе спектра в отсутствие слабого сигнала показывает, что при $f_s > 2f_H$ около частоты f_s всегда существует симметричная шумовая область, интенсивность шума в которой на частоте f_s имеет минимум, а вблизи нее ($\pm 5 \div 10$ МГц) максимумы. В тех диапазонах изменения частоты f_s , где наблюдались второй и третий сигнальные провалы, также существуют вторая и третья шумовые области. Наибольшую интенсивность всегда имеет вторая шумовая область, а наименьшую — третья. При увеличении поля H_0 вторая шумовая область сдвигается в сторону более высоких частот.

Описанная картина сильно зависит от мощности сигнала и величины поля H_0 . С увеличением поля H_0 второй и третий дополнительные провалы существуют только в определенном интервале частот $\Delta f_{s,2,3}$, который при дальнейшем увеличении поля H_0 стягивается в нуль. Значение поля $H_0^{кр}$, выше которого второй и третий дополнительные провалы не возникают, и диапазон частот $\Delta f_{s,2,3}$, в котором они существуют, зависят от мощности P_s ($H_0^{кр}$ и $\Delta f_{s,2,3}$ уменьшаются с уменьшением P_s). В условиях, когда второй и третий дополнительные провалы не возникают, первый и четвертый дополнительные провалы существуют в строго определенном диапазоне частот $\Delta f_{s,1,4}$. Так, при $P_s \leq 0.5$ мВт и $H_0 >$

> 650 Э только при изменении частоты f_s от 3750 до 3800 МГц возникают ярковыраженный первый и очень слабовыраженный четвертый дополнительные провалы. Наблюдается также возникновение слабой по интенсивности шумовой области вокруг частоты f_s , когда $f_s > 2f_H$. На частотах f_s , равных 3820 и 3840 МГц, и при мощности $P_s \approx 0.25$ мВт возникают оди-

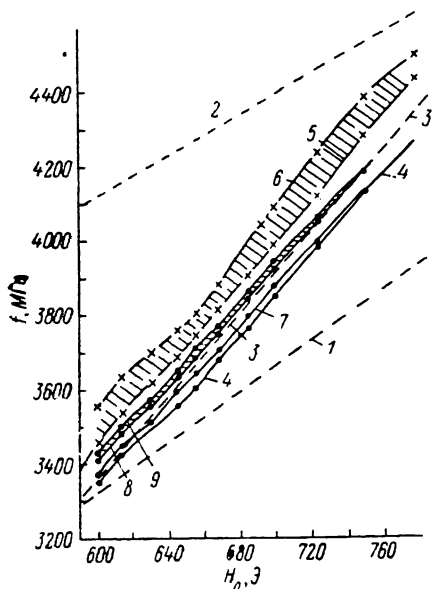


Рис. 2. Зависимость частотных границ провалов и спектра МСВ от постоянного магнитного поля H_0 при $P_s = 9$ мВт и $P_w = 4$ мкВт.

Линии 1 и 2 соответствуют нижней и верхней границам спектра ПМСВ; прямая 3 — частоте $2f_H$; кривая 4 — минимальной частоте f_s , при которой появляется первый дополнительный провал; кривые 5 и 6 — нижней и верхней частотам первого дополнительного провала; кривая 7 — минимальной частоте f_s , при которой появляется второй дополнительный провал; кривые 8 и 9 — нижней и верхней частотам второго дополнительного провала.

наковые по интенсивности и узкополосные (ширина полосы частот по основанию ~ 1 МГц) второй и третий сигнальные провалы, обусловленные автомодуляцией [9]. Они существуют до мощностей P_s порядка 2.8–3 мВт. При $P_s \geq 3.5$ мВт наблюдается картина, описанная выше для $P_s = 9$ мВт.

Характерным для дополнительных провалов является то, что четвертый и третий дополнительные провалы выражены слабее соответственно первого и второго дополнительного провалов. Особенно это относится к четвертому дополнительному провалу, который не виден на кривых 1–5 рис. 1, хотя при применении специальных мер его удается обнаружить. Характерным для сигнальных провалов является слабая интенсивность третьего сигнального провала по сравнению со вторым при $P_s > 3.5$ мВт.

Для понимания физических процессов, ответственных за возникновение дополнительных провалов на АЧХ, необходимо определить, какое место в спектре ПМСВ занимают их частоты при заданной частоте. Для этого на рис. 2 показаны границы спектра ПМСВ (кривая 1 — нижняя граница $f_v = \sqrt{f_H(f_H + f_M)}$, где $f_M = |\gamma| 4\pi M_0$, прямая 2 — верхняя граница $f_c = f_H + \frac{1}{2} f_M$), граница области существования трехмагнанных процессов $f_s = 2f_H$ (прямая 3).

Из рис. 2 видно, что нижние и верхние частотные границы дополнительных провалов лежат выше прямой 3, при этом границы первого дополнительного провала лежат выше частотных границ второго дополнительного провала, которые в свою очередь расположены выше частотных границ третьего дополнительного провала (на рис. 2 последние не показаны). Частотные границы первого дополнительного провала никогда не пере-

секают прямой 3, а второго дополнительного провала пересекают прямую 3. После пересечения верхней границей второго дополнительного провала прямой 3 второй и третий дополнительные провалы больше не наблюдаются, значение поля $H_0^{кр} \approx 750$ Э.

Обнаружено, что с ростом мощности P_s нижние граничные частоты дополнительных провалов практически не меняются (уменьшаются на $8 \div 10$ МГц), а верхние — быстро растут (кривые 6 и 9 смещаются вверх). Поле $H_0^{кр}$ увеличивается с ростом мощности P_s .

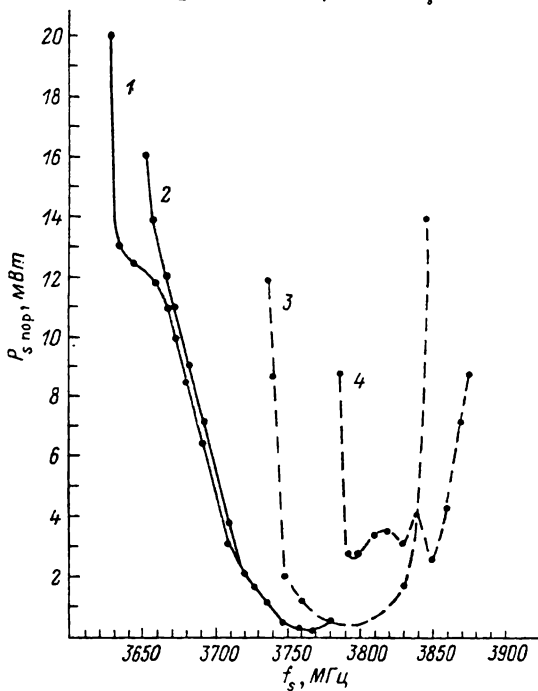


Рис. 3. Зависимость порогов возникновения P_s пор дополнительных и сигнальных провалов от частоты сильного сигнала f_s при поле $H_0=668$ Э.

Кривая 1 — порог возникновения первого и четвертого дополнительных провалов, кривая 2 — второго и третьего дополнительных провалов, кривая 3 — шумовой области около частоты f_s , кривая 4 — второго и третьего сигнальных провалов.

В зависимости от мощности P_s , процессы возникновения всех провалов имеют пороговый характер: они возникают скачком при некотором значении P_s пор, своем для каждой пары провалов. На рис. 3 представлены зависимости порогов P_s пор возникновения дополнительных провалов шумовой области около частоты f_s и второй шумовой области от частоты сильного сигнала f_s . Кривые 1 и 2 подтверждают описанную выше картину поведения дополнительных провалов. Пороги возникновения первой и второй шумовых областей слабо зависят от частоты f_s при ее изменении на 60—70 МГц, при этом для второй области минимумы и максимумы P_s пор связаны с изменением центральной частоты второго сигнального провала. Дополнительные провалы не наблюдаются, как только их пороги пересекают кривую 3.

Возникновение дополнительных и сигнальных провалов обусловлено процессами параметрического возбуждения спиновых волн, возникающими в результате неустойчивости интенсивной ПМСВ, возбужденной сильным сигналом. По нашему мнению, возникновение первого и четвертого дополнительных провалов объясняется четырехмагнонным процессом (слиянием двух магнонов с последующим распадом на два новых), поскольку для частот и волновых векторов ПМСВ, вызывающих эти про-

валы, и интенсивной ПМСВ выполняются законы сохранения, свойственные только четырехмагنونным процессам [2-5]. При этом эти законы удовлетворяются, когда четвертый дополнительный провал вызван: на частотах f_s кривых 2-4 рис. 1 — объемными МСВ, распространяющимися почти под прямым углом к интенсивной ПМСВ; на частоте f_s кривой 5 — ПМСВ, распространяющейся в противоположную сторону от интенсивной ПМСВ и ПМСВ, вызывающей первый дополнительный провал; на частотах f_s кривых 6 и 7 — ПМСВ, распространяющейся в ту же сторону, что и остальные две ПМСВ. В этом и лежит причина отсутствия или наблюдения четвертого дополнительного провала на кривых рис. 1. Наличие четырехмагنونных процессов подтверждает и то, что при изменении частоты f_s частота первого дополнительного провала сдвигается несущественно. Это вызвано тем, что ПМСВ, обуславливающая этот провал, возбуждается на верхнем участке спектра и для нее при незначительном изменении частоты волновое число может изменяться сильно.

Возникновение второго и третьего дополнительных провалов тоже укладывается в законы сохранения четырехмагنونных процессов, однако их возникновение также может быть обусловлено либо процессом трехмагنونного распада уже образовавшихся ПМСВ, вызывающих первый дополнительный провал, либо процессом распада с образованием акустических волн. Возникновение второго и третьего сигнальных провалов вызвано трехмагنونными процессами, поскольку они возникают на частотах $f_s > 2f_H$.

Таким образом, в работе впервые установлено, что влияние сильного сигнала на спектр ПМСВ проявляется в появлении в зависимости от величины постоянного магнитного поля, а также мощности и частоты сильного сигнала от одной до четырех зон ослабления ПМСВ, обусловленных трех- и четырехмагنونными процессами. Описанные выше явления должны приводить к существенному изменению АЧХ устройств на МСВ, что указывает на ошибочность противоположных утверждений в [8].

Л и т е р а т у р а

- [1] Гуревич А. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1960. 408 с.
- [2] Моносов Я. А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. М.: Наука, 1971. 376 с.
- [3] Захаров В. Е., Львов В. С., Старобинец С. С. УФН, 1974, т. 114, № 4, с. 609—654.
- [4] Калинин Б. А. Автореф. докт. дис. Л., ФТИ им. Иоффе, 1985. 33 с.
- [5] Зильберман П. Е., Никитов С. А., Темиряев А. Г. Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 42, № 3, с. 92—94.
- [6] Collins J. K., Pizzarello F. A. Intern. J. Electronics, 1973, vol. 34, N 3, p. 319—351.
- [7] Sethares J. C. J. Appl. Phys., 1982, vol. 53, N 3, pt 2, p. 2646—2651.
- [8] Adam J. D., Stitzer S. N. Appl. Phys. Lett., 1980, vol. 36, N 6, p. 485—487.
- [9] Медников А. М. ФТТ, 1981, т. 23, № 1, с. 242—245.
- [10] Темиряев А. Г. ФТТ, 1987, т. 29, № 2, с. 313—319.
- [11] Генкин Г. М., Голубева Н. Г. Изв. вузов, Радиофизика, 1985, т. 28, № 3, с. 387—388.
- [12] Калинин Б. А. Письма в ЖТФ, 1983, т. 3, № 13, с. 811—814.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
17 июня 1987 г.
В окончательной редакции
20 октября 1987 г.