

09

© 1991 г.

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МСВ ЛИНИИ ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ СИГНАЛА

А. Н. Мясоедов, А. В. Марьягин, Б. П. Нам, Ю. К. Фетисов

Экспериментально исследовано прохождение мощных СВЧ сигналов через линию передачи на поверхностных магнитостатических волнах (ПМСВ) в пленке феррита. Установлено, что амплитуда и фаза выходного сигнала формируются в результате когерентного сложения сигналов МСВ и электромагнитной наводки. Исследованы процессы ограничения мощности поверхностной МСВ и саморазогрева пленки феррита в условиях нелинейного распространения магнитостатических волн. Выполнен расчет амплитудных, фазовых и переходных характеристик МСВ линии передачи при высоких уровнях сигнала.

Введение

Линии передачи на магнитостатических спиновых волнах (МСВ), распространяющихся в планарных магнитных структурах на основе пленок феррита, находят все более широкое применение в устройствах интегральной СВЧ электроники [1]. Характеристики МСВ линий при низких уровнях сигнала, когда волны возбуждаются и распространяются в линейном режиме, исследованы достаточно подробно экспериментально и могут быть рассчитаны теоретически [2]. Изучению же характеристик МСВ линий при высоких уровнях сигнала, когда начинают проявляться нелинейные свойства волн (ограничение амплитуды [3, 4], автомодуляция и стохастизация спектра [5, 6] и т. д.), уделялось гораздо меньше внимания. Вместе с тем такие исследования представляют несомненный интерес с физической точки зрения, поскольку дают новую информацию о нелинейных свойствах МСВ, и имеют важное практическое значение для выбора диапазона рабочих уровней сигнала и расчета параметров устройств.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований прохождения мощных непрерывного и импульсного СВЧ сигналов через линию передачи на поверхностных магнитостатических волнах ПМСВ в области частот трехволновых процессов, исследовано явление саморазогрева пленки феррита в условиях нелинейного распространения ПМСВ, выполнены расчеты амплитудных и фазовых характеристик МСВ линии при высоких уровнях сигнала.

Экспериментальные результаты

В экспериментах использовалась линия передачи, которая содержала пленку замещенного железо-иттриевого граната (ЖИГ) состава $\{Y_3\} [Fe_{3-y}Sc_y] \cdot [Fe_{3-x}Ga_x]O_{12}$ размерами $0.018 \cdot 3 \cdot 20$ мм с намагниченностью насыщения $4\pi M = 380$ Гс и шириной линии однородного ФМР $\Delta H \approx 0.5$ Э, выращенную методом жидкофазной эпитаксии на галлий-гадолиниевой подложке с ориентацией (111) [7]. Возбуждение и прием МСВ проводили с помощью двух закороченных микрополосковых преобразователей шириной 50 мкм и длиной 3 мм с расстоянием между ними $L=4$ мм, напыленных на поликоровой подложке, которая прижималась к пленке феррита. Постоянное магнитное поле, касательное к плоскости пленки и параллельное преобразователям, создавалось электромагнитом.

Напряженность поля выбирали равной $H \leq 4\pi M/3$, что обеспечивало условия для развития нелинейных трехволновых процессов, имеющих наименьший порог, во всем диапазоне частот существования ПМСВ [1]. На частотах $f=600 \dots 800$ МГц и мощностях возбуждающего сигнала $P=10^{-6} \dots 1$ Вт регистрировали амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики, спектр

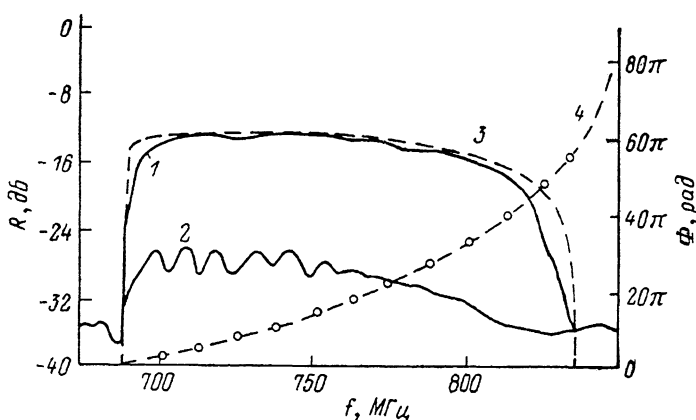


Рис. 1. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики ПМСВ линии передачи. 1, 2 — эксперимент ($P=0.1$ и 40 мВт соответственно); 3, 4 — расчет.

частот прошедшего сигнала в непрерывном режиме и форму отклика линии передачи при возбуждении СВЧ импульсами длительностью $\tau=10^{-5} \dots 10$ с. Пленку феррита можно было нагревать до температуры $T=50^\circ\text{C}$ потоком горячего воздуха и контролировать ее температуру с помощью плоского термосопротивления, приклеенного к галлий-гадолиниевой подложке.

На рис. 1 показаны измеренные и рассчитанная АЧХ линии передачи для разных уровней возбуждающего сигнала. При низких мощностях сигнала $P \ll$

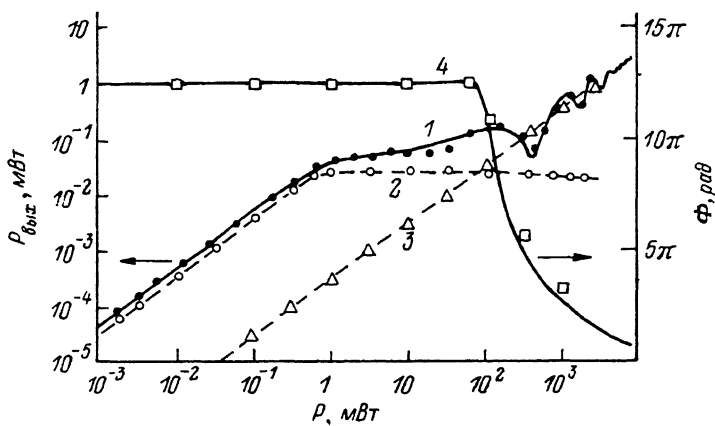


Рис. 2. Зависимости прошедшей мощности $P_{\text{вых}}$ (1), мощности магнитостатической волны $P_{\text{МСВ}}$ (2), мощности электромагнитной наводки $P_{\text{н}}$ (3) и фазы выходного сигнала Φ (4) от мощности входного сигнала P на частоте $f=740$ МГц.

Сплошные кривые — расчет.

≤ 1 мВт (кривая 1) минимальные вносимые потери линии передачи составляли $P_{\text{вн}} \approx 13$ дБ, загораживание вне полосы пропускания равнялось -35 дБ, а форма АЧХ хорошо совпадала с теоретической формой $\eta(f, H, 4\pi M)$ (кривая 3), рассчитанной по методике работы [2] при значениях параметров, соответствующих условиям эксперимента. Повышение мощности возбуждающего сигнала выше 1 мВт (кривая 2) приводило к существенному возрастанию минимальных вносимых потерь и увеличению изрезанности АЧХ, причем на каждой частоте

уровень вносимых потерь немонотонно зависел от мощности возбуждающего сигнала.

ФЧХ линии передачи, измеренная при малом уровне возбуждающего сигнала $P \leq 1$ мВт (точки на рис. 1), также хорошо совпала с теоретической характеристикой $\Phi = k(f) \cdot L$ (кривая 4), рассчитанной с использованием известной дисперсионной зависимости волнового числа k ПМСВ от частоты волны f [8]. Увеличение входной мощности выше некоторого порогового значения $P \sim 10^2$ мВт приводило к монотонному уменьшению фазы выходного сигнала, особенно значительному в высокочастотной части полосы пропускания линии.

Для выяснения механизма формирования характеристик ПМСВ линии передачи была снята зависимость мощности прошедшего сигнала $P_{\text{вых}}$ от уровня входного сигнала P на фиксированной частоте, типичный вид которой показан на рис. 2. Зависимость имела три характерных участка: линейный рост $P_{\text{вых}}$ до значений $P \approx 1$ мВт, область слабого изменения прошедшей мощности в интервале $1 \leq P \leq 10^2$ мВт и участок затухающих осцилляций $P_{\text{вых}}$, переходящий в линейный рост, при $P \geq 10^2$ мВт.

На рис. 2 приведены также зависимости мощности прошедшей ПМСВ $P_{\text{МСВ}}$ и мощности прямой электромагнитной наводки P_n со входа на выход линии передачи от уровня входного сигнала. Раздельное измерение $P_{\text{МСВ}}$ и P_n проводили по методике нестационарного магнитного поля, описанной в [9]. Для этого на вход линии передачи подавали СВЧ импульсы с частотой f и длительностью $\tau = 10$ мкс и одновременно с помощью управляющих низкоиндуктивных катушек меняли напряженность магнитного поля смещения по линейному закону $H(t) = H_0 + \alpha \cdot t$ с крутизной $\alpha \approx 2$ Э/мкс и амплитудой $\alpha \tau \approx 20$ Э. В результате сигнал ПМСВ на выходе линии передачи приобретал сдвиг частоты величиной $\Delta f = (1/2\pi) \cdot (dk/dH) |_{H_0} \cdot \alpha \cdot L \approx 2-5$ МГц, а частота сигнала электромагнитной наводки оставалась неизменной. Мощности $P_{\text{МСВ}}$ и P_n спектральных составляющих регистрировали на спектроанализаторе.

Из рис. 2 видно, что с увеличением уровня входного сигнала переносимая магнитостатической волной мощность $P_{\text{МСВ}}$ сначала линейно росла, а при $P \approx 1$ мВт ограничивалась на уровне $P_{\text{МСВ}} \approx 50$ мкВт и далее оставалась примерно постоянной. Уровень ограничения $P_{\text{МСВ}}$ слабо менялся при перестройке частоты в пределах области частот существования ПМСВ. Ограничение обусловлено оттоком превышающей порог трехволновых процессов мощности на параметрическое возбуждение коротковолновых объемных спиновых волн, а также, по-видимому, уменьшением эффективности линейного возбуждения ПМСВ в запороговом режиме [10]. Мощность прямой электромагнитной наводки P_n определялась особенностями конструктивного исполнения линии передачи и в нашем случае во всем диапазоне изменения P была на 35 дБ меньше мощности входного сигнала. Кроме того, при $P \sim 10 \dots 60$ мВт наблюдали типичные для ПМСВ явления образования гармонических составляющих и стохастизации спектра частот прошедшего сигнала [5, 6]. Фаза прошедшего сигнала Φ , как свидетельствуют экспериментальные данные на рис. 2, практически не менялась вплоть до значений $P \approx 50$ мВт, а затем плавно уменьшалась в несколько раз при достижении максимальной мощности входного сигнала.

На рис. 3, а, б приведены результаты экспериментального исследования прохождения СВЧ импульсов прямоугольной формы различной мощности и длительности через ПМСВ линию передачи. При низких уровнях мощности $P \leq 1$ мВт прошедший импульс ослаблялся, но его форма (кривая 2) повторяла форму возбуждающего импульса независимо от его длительности. В области промежуточных мощностей $1 \leq P \leq 10^2$ мВт наблюдали обнаруженное в [4] явление ограничения уровня плоской вершины прошедшего импульса (кривая 3) с характерным временем переходного процесса, зависящим от частоты f , от нескольких мкс при $P \approx 1$ мВт до ~ 0.3 мкс при $P \sim 10^2$ мВт. Образованию гармонических составляющих и стохастизации спектра сигнала отвечали соответственно появление гармонической амплитудной модуляции и шумовое размытие плоской вершины прошедшего импульса [4, 6].

Наконец, при высоких уровнях мощности $P \leq 10^2$ мВт и малых длительностях $\tau \leq 100$ мкс возбуждающих импульсов прошедший импульс ослаблялся на $\sim 30 \dots 35$ дБ, его форма оставалась близкой к прямоугольной, а с увеличе-

нием τ до нескольких секунд на вершине прошедшего импульса появлялись затухающие аperiodические осцилляции (кривые 4—6 на рис. 3, б). Началь-

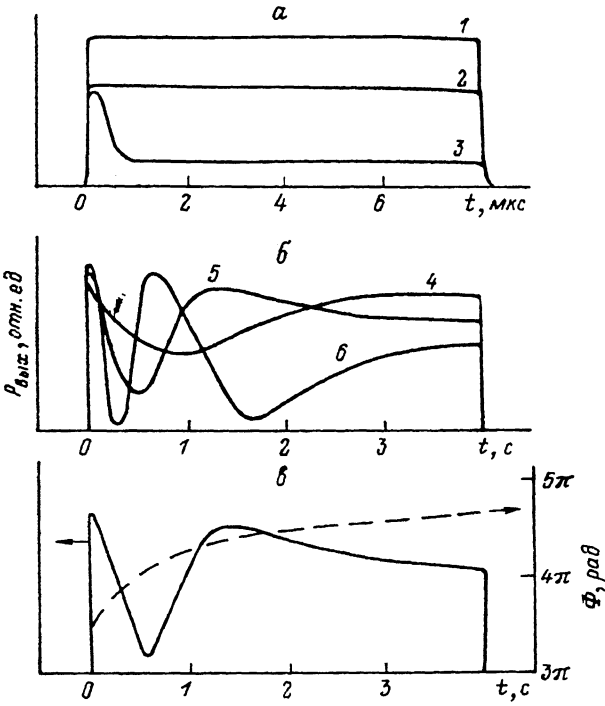


Рис. 3. Отклик ПМСВ линии передачи на возбуждение СВЧ импульсами.

а - форма входного (1) и выходного (2, 3) импульсов при средних уровнях мощности (2 — $P=2$, 3 — 20 мВт); б — форма выходного импульса при высоких уровнях мощности (4 — 100, 5 — 350, 6 — 1000 мВт); в — расчетная зависимость мощности $P_{\text{вых}}$ и фазы Φ прошедшего сигнала от времени при высоких уровнях мощности ($P=350$ мВт).

ный период осцилляций уменьшался и их число возрастало как при увеличении P , так и при смещении по частоте к высокочастотному краю полосы пропускания линии передачи. Полное время затухания аperiodического процесса составляло около 5 с, что свидетельствовало о его тепловой природе.

С целью количественного определения влияния высокого уровня сигнала на характеристики ПМСВ линии передачи были выполнены температурные измерения. Как показали расчеты по результатам измерений смещения нижней

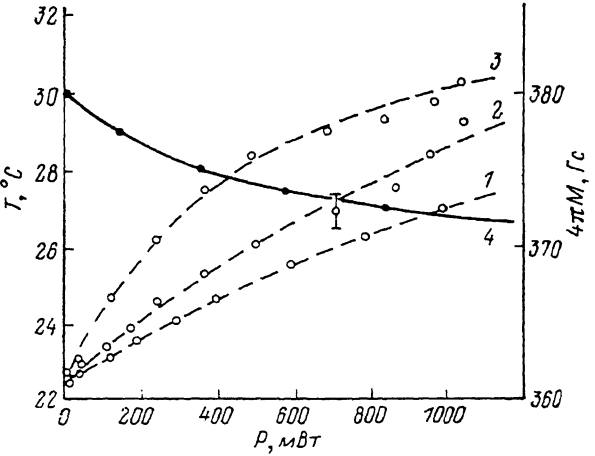


Рис. 4. Зависимость температуры T (1—3) и намагниченности $4\pi M$ (4) пленки феррита от мощности P входного сигнала на разных частотах. f , МГц: 1 — 650; 2 — 820; 3, 4 — 740.

границы области частот существования ПМСВ в режиме слабого сигнала при искусственном нагревании пленки, намагниченность феррита $4\pi M$ практически линейно уменьшалась от 380 до 360 Гс с ростом температуры в интервале $T = 20 \dots 40$ °C.

На рис. 4 приведены измеренные зависимости температуры пленки от уровня входного сигнала для трех частот, соответствующих отсутствию ПМСВ (кривая

1), низкой (кривая 2) и высокой (кривая 3) эффективностям возбуждения ПМСВ в линейном режиме. Видно, что, кроме повышения температуры пленки из-за диэлектрических потерь в структуре без участия магнитостатических волн, происходит также саморазогрев пленки за счет оттока превышающей уровень ограничения $P_{\text{МСВ}}^*$ части мощности ПМСВ на параметрическую генерацию объемных спиновых волн и дальнейшей ее диссипации.

Максимальное изменение температуры пленки в результате саморазогрева зависит от уровня СВЧ сигнала, эффективности возбуждения ПМСВ, т. е. частоты сигнала, степени теплоизоляции линии передачи и в нашем случае составляло $\Delta T \approx 8^\circ\text{C}$. Уменьшение $4\pi M$ феррита с ростом температуры и разогрев пленки при высоких уровнях сигнала приводили совместно к нелинейной зависимости намагниченности насыщения феррита $4\pi M$ от мощности P , вид которой для частоты $f = 740$ МГц также приведен на рис. 4.

Расчет характеристик линии передачи

Данные экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что формирование амплитудных и фазовых характеристик ПМСВ линии передачи происходит в результате когерентного сложения сигнала ПМСВ с сигналом электромагнитной наводки, причем следует учитывать ограничение мощности, переносимой ПМСВ, и саморазогрев пленки феррита в условиях нелинейного распространения магнитостатических волн. Проведем вычисление зависимостей мощности $P_{\text{вых}}$ и фазы Φ выходного сигнала линии передачи на фиксированной частоте от мощности входного сигнала. Для этого используем рассчитанную АЧХ ПМСВ для слабого сигнала $\eta(f, H, 4\pi M)$ (кривая 3 на рис. 1) и найденные экспериментально зависимости мощности $P_{\text{МСВ}}$ (кривая 2 на рис. 2), мощности наводки $P_{\text{н}}$ (кривая 3 на рис. 2) и температуры пленки T (кривая 4 на рис. 4) от мощности P входного сигнала, которые экстраполируем аналитическими функциями

$$P_{\text{МСВ}} \begin{cases} \eta P & \text{при } P \leq 1 \text{ мВт, } P_{\text{н}} = P \cdot 10^{-3.5}, \\ P_{\text{МСВ}}^* & \text{при } P > 1 \text{ мВт, } 4\pi M = 380 - 0.12 \cdot P^{0.6}. \end{cases} \quad (1)$$

Складывая два когерентных сигнала с одной частотой, получаем для мощности и фазы выходного сигнала следующие выражения:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{МСВ}} + P_{\text{н}} + 2\sqrt{P_{\text{МСВ}} \cdot P_{\text{н}}} \cdot \cos(kL), \quad (2)$$

$$\Phi = \int_0^{kL} \left| \frac{P_{\text{МСВ}} + \sqrt{P_{\text{н}} \cdot P_{\text{МСВ}}} \cos \varphi}{P_{\text{МСВ}} + P_{\text{н}} + 2\sqrt{P_{\text{МСВ}} \cdot P_{\text{н}}} \cos \varphi} \right| d\varphi. \quad (3)$$

Здесь учтено, что вследствие малости набега фазы электромагнитной наводки по сравнению с фазой магнитостатической волны ($2\pi f/c$) $L \ll kL$ разность фаз двух сигналов практически равна фазе ПМСВ, а волновое число ПМСВ k вычисляется с помощью дисперсионного уравнения [8] при заданной намагниченности феррита $4\pi M$, которая в свою очередь известным образом зависит от уровня входного сигнала P .

Построенные по формулам (2) и (3) зависимости показаны сплошными линиями на рис. 2. В нелинейном режиме распространения ПМСВ $P_{\text{вых}}$ может медленно увеличиваться (как на рис. 2) или уменьшаться с ростом P в зависимости от значения начальной фазы kL магнитостатической волны, т. е. в зависимости от частоты сигнала. Осцилляции $P_{\text{вых}}$ при больших значениях P возникают из-за изменения фазы ПМСВ вследствие увеличения k при нагревании пленки. Кроме того, нагревание вызывает уменьшение эффективности возбуждения ПМСВ η и соответствующее относительное уменьшение $P_{\text{МСВ}}$, что приводит к затуханию осцилляций на амплитудной характеристике. Фаза прошедшего сигнала с ростом P вначале несколько увеличивается из-за увеличения k , а затем плавно уменьшается по мере сравнения мощностей магнитостатической волны и электромагнитной наводки.

На рис. 3, *в* представлены рассчитанные с помощью уравнений (1)–(3) кривые установления мощности $P_{\text{вых}}$ и фазы Φ сигнала на выходе линии передачи при саморазогреве пленки феррита в режиме возбуждения длинными СВЧ импульсами с частотой $f=740$ МГц. Был выбран характерный для процессов установления теплового равновесия экспоненциальный закон нарастания температуры пленки с постоянной времени $\tau_0 \approx 1$ с и использованы найденные экспериментально зависимости $4\pi M$ феррита от температуры и мощности импульсов.

Как следует из сравнения экспериментальных данных и расчетных кривых, приведенных на рис. 2 и 3, теория хорошо качественно описывает все наблюдаемые явления, а при условии достаточно точного измерения или расчета вспомогательных характеристик линии передачи позволяет получить и количественное согласие. Предложенный метод может быть использован для расчета АЧХ и ФЧХ линий передачи на магнитостатических волнах различных типов, а также процессов установления этих характеристик в импульсном режиме при любых уровнях мощности сигналов.

Заключение

Таким образом установлено, что АЧХ и ФЧХ линии передачи на МСВ формируются в результате когерентного сложения сигналов магнитостатической волны и электромагнитной наводки. При мощностях возбуждающего сигнала ниже пороговых для развития нелинейных трехволновых процессов характеристики линии передачи целиком определяются линейными свойствами МСВ. В диапазоне средних уровней сигнала, когда происходит ограничение переносимой МСВ мощности из-за параметрической генерации объемных спиновых волн, наблюдается увеличение вносимых потерь линии передачи, но фаза прошедшего сигнала по-прежнему задается в основном фазой МСВ. При высоких мощностях амплитуда сигнала наводки сравнивается с амплитудой сигнала когерентной МСВ и имеет место саморазогрев пленки феррита, вызывающий изменение фазы магнитостатической волны, что приводит к осцилляциям мощности и плавному уменьшению фазы прошедшего сигнала.

Авторы выражают благодарность В. П. Рыбакову за помощь в проведении численных расчетов.

Список литературы

- [1] Истан В. С. // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 2. С. 86–104.
- [2] Дмитриев В. Ф., Калинин Б. А. // Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1988. № 11. С. 24–53.
- [3] Shilz W. // Phil. Res. Reports. 1973. Vol. 28. N 1. P. 50–65.
- [4] Есиков О. С., Толокнов Н. А., Фетисов Ю. К. // Тр. V Междунар. конф. по гидромагнитной электронике и электродинамике. М., 1980. Т. 1. С. 58–60.
- [5] Медников А. М. // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 1. С. 242–245.
- [6] Дудко Г. М., Славин А. Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 6. С. 114–119.
- [7] Казаков Г. Т., Марягин А. В., Нам Б. П. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 19. С. 1733–1737.
- [8] Damon R. W., Eshbach J. R. // J. Phys. Chem. Sol. 1961. Vol. 19. N 3–4. P. 308–320.
- [9] Естихивев Н. Н., Преображенский В. Л., Фетисов Ю. К. и др. // ФТТ. 1985. Т. 27. Вып. 1. С. 90–94.
- [10] Чивилева О. А., Анисимов А. П., Гуревич А. Г. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1204–1205.

Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики

Поступило в Редакцию
29 августа 1989 г.