

09

Влияние мощной волны накачки на распространение объемных спиновых волн в пленке феррита

© Ю.К. Фетисов

Московский государственный институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)

Поступило в Редакцию 22 ноября 1999 г.

Экспериментально исследовано влияние мощной волны накачки на распространение обратных объемных спиновых волн в продольно намагниченной пленке феррита. В области магнитных полей и частот, где разрешены трехволновые процессы распада объемной волны, наблюдалось сужение полосы частот распространения и последующее полное подавление объемных спиновых волн при увеличении мощности накачки.

При возбуждении спиновых волн (СВ) и колебаний в ферритовых пленках наблюдается целый ряд нелинейных явлений, включая формирование солитонов огибающей, параметрическое усиление волн, хаос, бистабильность и другие явления, которые представляют интерес с физической точки зрения и могут найти применение в устройствах твердотельной сверхвысокочастотной электроники. Для понимания таких явлений важно знать особенности взаимодействия двух или нескольких СВ различной мощности, одновременно распространяющихся в пленке феррита.

Спиновые волны малой мощности не взаимодействуют друг с другом, однако при больших интенсивностях нелинейность магнитной подсистемы феррита приводит к взаимовлиянию волн. Обнаружено, что мощная

поверхностная СВ вызывает увеличение затухания [1–3] и незначительное изменение волновых чисел [4] поверхностных СВ малой мощности, распространяющихся в той же пленке. Эффект наблюдался в узких интервалах частот, расположенных вблизи частоты накачки, и объяснен влиянием параметрически возбужденных магнонов, образовавшихся в результате трехволновых процессов распада волны накачки [5,6]. Рассматривалось [7] также воздействие однородной накачки с частотой вне области частот трехволновых процессов на характеристики объемных СВ и продемонстрировано [8] параметрическое усиление объемных СВ однородной накачкой в узком интервале частот вблизи половины частоты накачки.

В настоящей работе впервые обнаружено эффективное влияние мощной объемной СВ накачки на затухание слабой объемной СВ, распространяющейся в той же пленке феррита. Эффект наблюдался в области частот трехволновых взаимодействий, имел пороговый характер и отличался значительной широкополосностью.

Измерения проводились в стандартной геометрии линии передачи [1]. Линия содержала пленку феррита железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной $8.7 \mu\text{m}$, с размерами в плоскости $2 \times 20 \text{mm}$, намагниченностью насыщения $4\pi M = 1750 \text{Gs}$ и шириной линии однородного ферромагнитного резонанса 0.6Oe , выращенную методом жидкофазной эпитаксии на немагнитной подложке. Возбуждение и прием СВ в пленке ЖИГ проводились с помощью двух микрополосковых преобразователей шириной по $50 \mu\text{m}$ и длиной 2mm , расположенных вблизи поверхности пленки на расстоянии 4mm друг от друга. Вся структура помещалась между полюсами электромагнита во внешнее однородное касательное магнитное поле H_e , направленное вдоль длинной оси пленки и перпендикулярно преобразователям. Такая геометрия обеспечивала возбуждение в пленке ЖИГ обратных объемных спиновых волн (ООСВ) [9]. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) линии передачи регистрировались с помощью панорамного измерителя P2-78 в линейном режиме распространения СВ при мощности сигнала $P = -10 \text{dB} \cdot \text{m}$. Одновременно от отдельного генератора через усилитель и тройник на входной преобразователь подавался непрерывный монохроматический сигнал накачки с фиксированной частотой f_p в диапазоне от 2 до 6GHz и мощностью P_p до $+20 \text{dB} \cdot \text{m}$. Для устранения взаимного влияния панорамного измерителя и генератора в измерительной схеме использовались вентили.

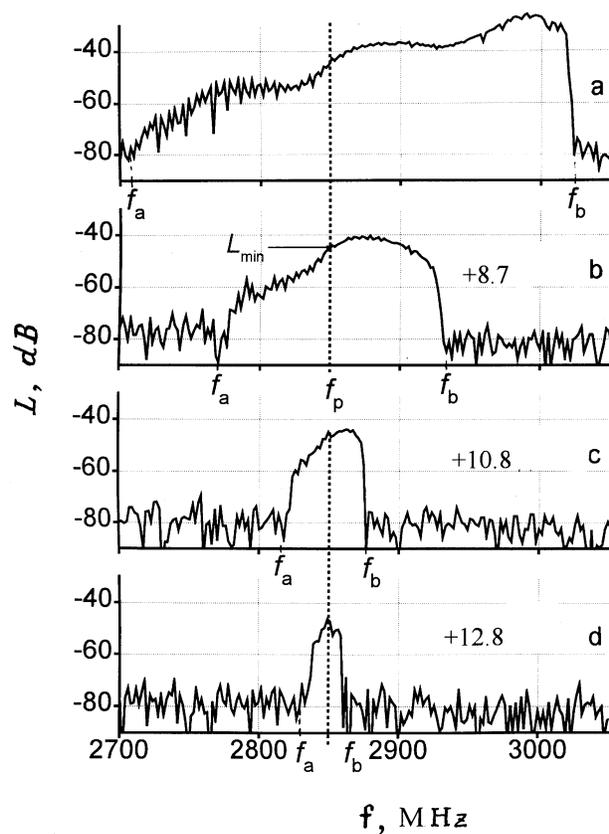


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики ООСВ линии передачи в магнитном поле $H = 490$ Ое при различных мощностях накачки. Для рисунка (а) накачка отсутствует, цифры на рисунках (b–d) соответствуют мощности накачки P_p в единицах $\text{dB} \cdot \text{m}$.

На рис. 1, а приведена типичная АЧХ линии передачи (зависимость потерь прохождения, выраженных в dB , $L = 10 \cdot \lg(P_{\text{out}}/P)$ от частоты сигнала f) при напряженности поля $H_e = 490$ Ое в отсутствие накачки. Внутри области частот шириной около 300 MHz по уровню -80 dB от нижней граничной частоты f_a до верхней граничной частоты f_b

сигнал в пленке ЖИГ передается спиновыми волнами. Теоретически [9], безобменные ООСВ в касательно намагниченном слое феррита могут существовать в полосе частот от $f_L = \gamma H$ до $f_U = \gamma \sqrt{H(H + 4\pi M)}$, где $\gamma = 2.8 \text{ МГц/Ое}$ — гиромагнитное отношение. Приравнивание измеренной $f_b = 3020 \text{ МГц}$ и теоретической f_U верхних граничных частот дает величину эффективного поля в феррите $H = 513 \text{ Ое}$. Незначительное отличие измеренного H_e и рассчитанного H полей целиком обусловлено эффектами размагничивания и анизотропией пленки ЖИГ, что не учитывалось в расчетах. Измеренная частота нижней границы $f_a = 2710 \text{ МГц}$ также была выше рассчитанной $f_L = 1436 \text{ МГц}$, так как преобразователь шириной $50 \text{ }\mu\text{м}$ возбуждал только волны с волновыми числами от нуля до $\sim 600 \text{ м}^{-1}$ и частотами вблизи верхней частоты f_U диапазона ООСВ.

Рис. 1, *b-d* демонстрирует влияние волны накачки с частотой f_p , попадающей внутрь полосы частот ООСВ, на форму АЧХ линии передачи. Для наглядности частота накачки $f_p = 2850 \text{ МГц}$ выбрана примерно в середине диапазона частот ООСВ. При увеличении мощности накачки наблюдалось монотонное увеличение нижней f_a и уменьшение верхней f_b граничных частот, приводящее в итоге к полному исчезновению полосы пропускания сигнала. Уровень пропускания L_p (показан на рис. 1, *c*) на частоте накачки сначала медленно уменьшался с ростом мощности накачки, а затем скачком падал до уровня шума. На рис. 2 показаны зависимости наблюдаемых граничных частот f_a и f_b и уровня пропускания L_p от мощности накачки P_p , построенные по результатам измерений. Видно, что сужение полосы передачи ООСВ носит пороговый характер и начинается в данном случае при мощности накачки $P_p \approx +5 \text{ дБ} \cdot \text{м}$, а полное подавление проходящего сигнала до уровня шума -80 дБ имеет место при мощности накачки около $+15 \text{ дБ} \cdot \text{м}$.

В магнитном поле $H_e = 490 \text{ Ое}$ эффективное влияние непрерывной волны накачки на АЧХ линии передачи наблюдалось для любых значений частоты накачки, лежащих внутри полосы частот ООСВ. При возрастании мощности во всех случаях происходило сужение полосы пропускания как сверху, так и снизу к частоте накачки. При этом мощность накачки, обеспечивающая полное подавление полосы пропускания, возрастала при смещении частоты накачки к верхней или нижней границам АЧХ линии передачи.

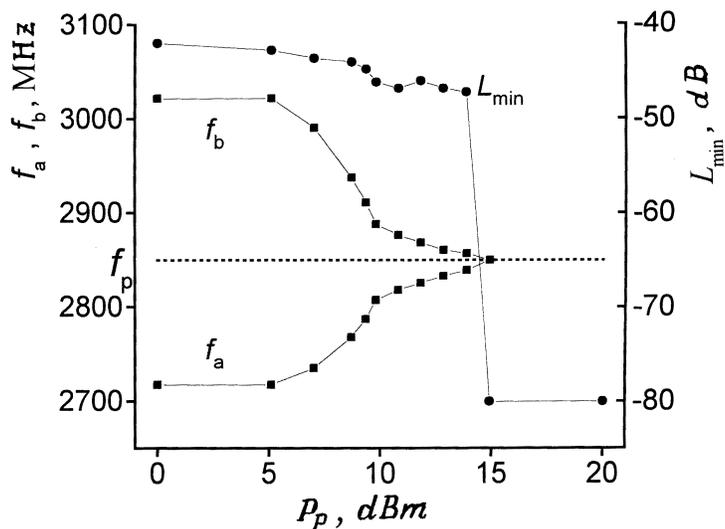


Рис. 2. Зависимости нижней f_a и верхней f_b наблюдаемых граничных частот полосы ООСВ линии передачи и уровня потерь L_p на частоте накачки f_p от мощности накачки P_p .

Аналогичные измерения были проведены для различных значений напряженности магнитного поля. При уменьшении поля до $H_e = 200$ Ое и соответствующем смещении АЧХ в область частот вблизи 1700 МГц, минимальные потери ООСВ линии передачи возрастали до -40 dB, однако эффект сохранялся и полное подавление сигнала наблюдалось при мощности накачки менее -5 dB · м. С увеличением напряженности поля влияние накачки на АЧХ линии передачи ослабевало. При полях $H_e > 580$ Ое в диапазоне частот $f > 3300$ МГц накачка практически не оказывала влияния на форму АЧХ линии передачи вплоть до значений мощности $P_p = +20$ dB · м.

Результаты измерений свидетельствуют, что воздействие накачки на АЧХ линии передачи связано с процессами распада мощной ООСВ волны накачки на объемные спиновые волны. Условия фазового синхронизма для трехволновых процессов имеют вид: $f_p = f_1 + f_2$ и $\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$, где (f_p, \mathbf{k}_p) , (f_1, \mathbf{k}_1) и (f_2, \mathbf{k}_2) — частоты и волновые

векторы волны накачки и родившихся объемных волн соответственно. Детальный анализ законов дисперсии безобменных ООСВ в пленке феррита показывает [10], что ООСВ волна накачки с малым волновым числом k_p может распадаться на две ООСВ с большими волновыми числами k_1 и k_2 , принадлежащие различным модам и распространяющиеся в противоположных направлениях, частоты которых f_1 и f_2 примерно равны и близки к $f_p/2$. Из условия попадания половинной частоты накачки в область частот ООСВ следует, что такие процессы возможны только в области магнитных полей меньше критического $H_c = 4\pi M/3$ и на частотах меньше критической $f_c = \gamma\sqrt{H_c(H_c + 4\pi M)}$. Для пленки ЖИГ, подставляя значения параметров, находим, что $H_c = 583$ Ое и $f_c = 3266$ МГц. Рассчитанные значения хорошо совпадают с границей диапазона полей и частот, где наблюдалось влияние накачки на АЧХ линии передачи.

Увеличение затухания слабой ООСВ, формирующей АЧХ линии передачи, в присутствии мощной ООСВ волны накачки может быть обусловлено некогерентным рассеянием слабой волны на параметрически возбужденных объемных спиновых волнах. При малых превышениях мощности накачки над порогом, так же как и в [6], возбуждались только низшие объемные моды в узкой полосе частот, далеко отстоящей от частоты накачки f_p , что приводило к подавлению периферийной части АЧХ в области низких частот. Дальнейшее увеличение мощности накачки вызывало, по-видимому, возбуждение высших объемных мод, соответствующее расширение диапазона частот и последующую стохастизацию возбужденных спиновых волн, что и явилось причиной сужения наблюдаемой АЧХ вокруг частоты накачки f_p . Более высокая эффективность и широкополосность подавления объемных СВ мощной накачкой, по сравнению с аналогичным эффектом подавления поверхностных СВ [1–4], обусловлена увеличением длины области пленки, где имело место некогерентное рассеяние ООСВ, так как в рассматриваемом случае параметрически возбужденные волны распространялись вдоль продольной оси пленки, а не поперек. Для однозначной интерпретации механизма воздействия волны накачки на АЧХ ООСВ линии передачи необходима разработка теории, описывающей поведение СВ в пленках феррита при высоких мощностях сигнала.

В заключение отметим, что эффект сужения АЧХ линии передачи на ООСВ под действием мощной волны накачки может послужить основой для создания сверхвысокочастотных фильтров с электрически управляемой шириной полосы пропускания.

Список литературы

- [1] Чивилева О.А., Анисимов А.Н., Гуревич А.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 24. С. 1497–1501.
- [2] Ваишковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Никитов С.А. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 3. С. 827–832.
- [3] Анисимов А.Н., Чивилева О.А., Гуревич А.Г. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 6. С. 1621–1628.
- [4] Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 1. С. 318–332.
- [5] Медников А.М. // ФТТ. 1981. Т. 23. N 1. С. 242–245.
- [6] Темирязов А.А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 313–319.
- [7] Круценко И.В., Мелков Г.А., Уханов С.А. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 12. С. 3434–3436.
- [8] Kolodin P.A., Patton C.E., Kalinikos B.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. N 9. P. 1976–1979.
- [9] Damon R.W., Eshbach J.R. // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. N 3–4. P. 308–320.
- [10] Преображенский В.Л., Рыбаков В.П., Фетисов Ю.К. // РЭ. 1988. Т. 33. N 6. С. 1218–1225.