

## ВЛИЯНИЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ НА ЗАТУХАНИЕ СЛАБОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

А. Н. Анисимов, О. А. Чивилева, А. Г. Гуревич

Приводятся результаты исследования взаимодействия двух СВЧ сигналов, каждый из которых возбуждал в пленке железиттриевого граната поверхностную магнитостатическую волну, причем один из них имел мощность, меньшую порога нелинейности; мощность же второго изменялась в широких пределах и могла существенно превышать пороговую. Наличие запороговой волны приводило к увеличению затухания слабой волны, причем не только на частоте сильного сигнала, но и на некоторых частотах, связанных с появлением сателлитов в его спектре за порогом нелинейности.

Изучение нелинейных явлений, связанных с распространением в магнитных пленках спиновых волн большой амплитуды, представляет интерес как в плане распространения исследований нелинейных процессов в магнитных кристаллах на пленки, так и в прикладном плане. Использование этих явлений в технике СВЧ позволяет конструировать принципиально новые устройства (см., например, [1, 2]). Однако исследованию нелинейных явлений при распространении магнитостатических волн в магнитных пленках посвящено не слишком много работ [3-10]. Две из них [7, 8] посвящены экспериментальному исследованию взаимодействия в магнитных пленках двух поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) — малой амплитуды и большой, которая может превышать пороговую. В этих работах было обнаружено, что наличие сильного сигнала приводит к появлению провалов на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) слабой ПМСВ. Представляет интерес продолжить эти исследования с целью выяснения деталей взаимодействия слабой волны с сильной.

В пленках железиттриевого граната (ЖИГ) возбуждались две ПМСВ. Одна из них возбуждалась генераторным блоком измерителя комплексных коэффициентов передачи с выходной мощностью  $P_{\text{в}}$ , меньшей порога нелинейности 1-го порядка  $P_{\text{пор}}$ ; мощность второго источника  $P_s$  могла существенно превышать  $P_{\text{пор}}$ . Частота непрерывного сильного сигнала составляла  $f_s = 3.2$  ГГц, частота слабого сигнала  $f_w$  изменялась в диапазоне частот  $f_s \pm 150$  МГц. Выбор частоты был обусловлен тем, чтобы как  $f_s$ , так и  $f_w$  попадали в частотную область, для которой разрешен процесс трехмагнного расщепления. Оба сигнала подавались на один либо разные микрополосковые преобразователи, возбуждавшие две ПМСВ, распространявшиеся по одному и тому же пути к приемному преобразователю. К его выходу подключался индикаторный блок измерителя комплексных коэффициентов передачи. Измерения прохождения слабого сигнала проводились в режиме его амплитудной модуляции, так что непрерывный сильный сигнал не воспринимался синхронным детектором измерителя. К приемному преобразователю подключался также анализатор спектра.

Прежде всего было исследовано влияние сильного сигнала на порог нелинейности слабого в зависимости от отстройки  $\delta f = f_w - f_s$  при их возбуждении одной антенной. Оказалось, что влияние сильного сигнала

на порог заметно лишь в узкой области частот вблизи  $f_s$ . Например, при  $P_s = 270$  мкВт оно проявлялось при  $|\delta f| \leq 5$  МГц. При  $|\delta f| = 2$  МГц величина  $P_{\text{пор}}$  возрастала приблизительно в 2 раза.

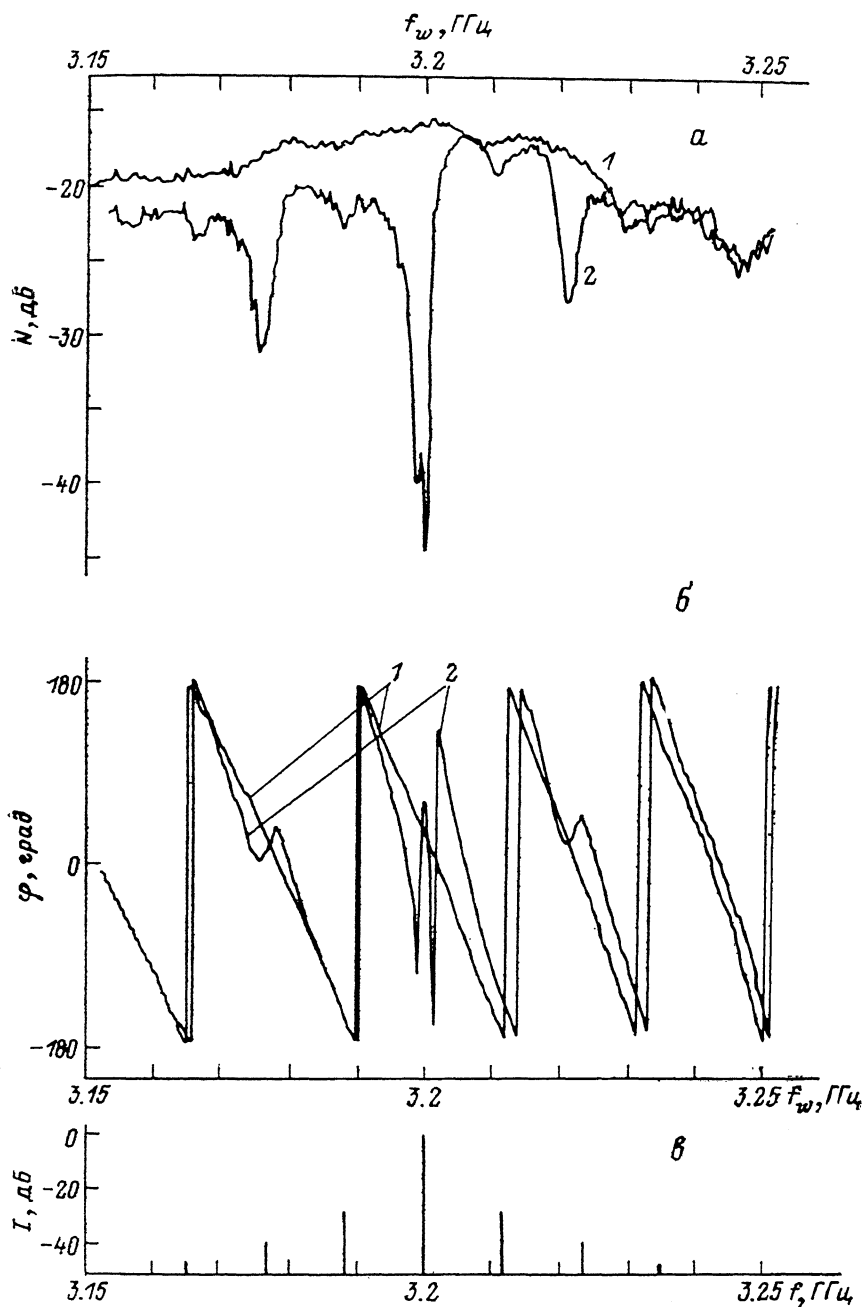


Рис. 1. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики сигнала, переносимого слабой волной при наличии сильной, а также спектр сильной волны (в).

Пленна ЖИГ толщиной 26 мкм, волновое число ПМСВ  $k_s = 350$  см $^{-1}$ ,  $P_s = 0$  (1) и 1 мВт (2)

Исследование коэффициентов передачи слабого сигнала показало, что наличие сильного сигнала приводит к аномалиям на его АЧХ и фазочастотной характеристике (рис. 1). Из рис. 1 видно, что как на частоте  $f_s$ , так и на некоторых частотах  $f_w \neq f_s$  наблюдается резкое увеличение затухания слабой ПМСВ и соответствующие искажения ее фазочастотной

характеристики. Эти аномалии (за исключением аномалии на частоте  $f_s$ ) возникали, когда в спектре сильного сигнала появлялись спутники. Такие спутники были обнаружены в [3] и исследованы в [4]. Рассмотрим более подробно некоторые особенности их возникновения.

Спутники возникали пороговым образом по обе стороны от  $f_s$  при превышении сильным сигналом  $P_{пор}$ . В довольно широком диапазоне мощностей их частоты ( $f_{сат}$ ) практически не зависели от  $P_s$ , но при увеличении мощности число спутников возрастало. Их частоты существенно зависели от толщины пленки  $d$  (рис. 2). При больших толщинах величины  $\Delta f_i = |f_{сат i} - f_s|$  ( $i$  — номер спутника) были приблизительно пропорциональны  $1/d$  и слабо зависели от постоянного магнитного поля  $H_0$ .

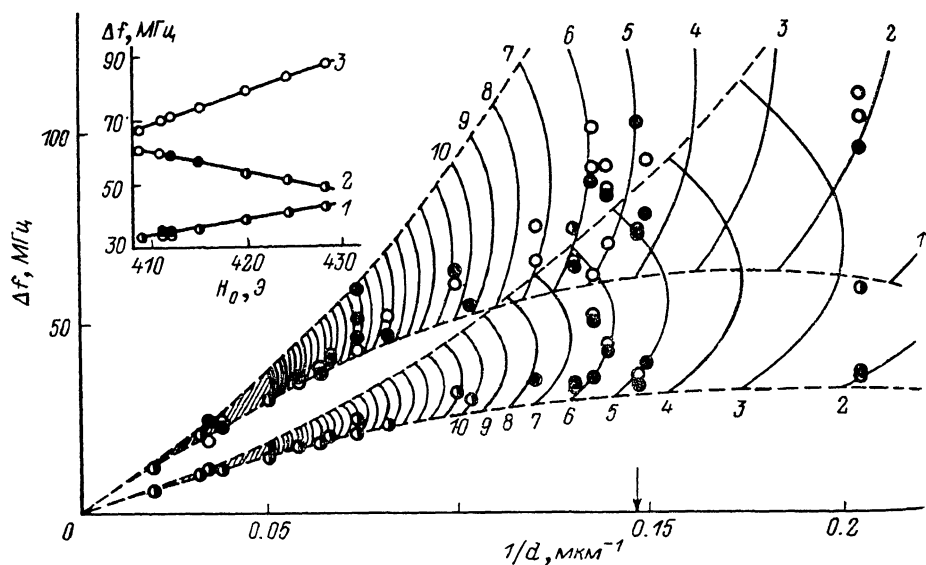


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные зависимости отстройки  $\Delta f$  частот спутников (темные кружки) и провалов на АЧХ слабого сигнала (светлые кружки) от обратной толщины пленки.

Цифры у кривых — номера нижней из пары мод, на которые распадается ПМСВ (см. рис. 3);  $k_s = 350 \text{ см}^{-1}$ ,  $P_s \approx 1 \text{ мВт}$ . На вставке — зависимость  $\Delta f$  от  $H_0$  для толщины, отмеченной стрелкой (6.8 мкм): 1 — для первых спутников и соответствующих им провалов АЧХ, 2 — для вторых спутников, 3 — для наиболее сильных провалов АЧХ. Наполовину затемненные кружки обозначают совпадение светлых и темных кружков.

В [3, 4] отмечалось, что существуют два типа спутников. Для спутников 1-го типа характерны сильная зависимость их частоты от мощности и весьма малые  $\Delta f \sim 1 \text{ МГц}$ . Для спутников 2-го типа величины  $\Delta f$  были значительно большими и зависели от  $H_0$ . В [4] был предложен следующий механизм их возникновения. На первом этапе исходная ПМСВ частоты  $f_s$  параметрически возбуждает две невырожденные обратные объемные магнитостатические волны (ОМСВ), принадлежащие к разным ветвям спектра (модам) ОМСВ (рис. 3). При этом требования сохранения энергии и импульса приводят к тому, что частоты ОМСВ удовлетворяют условию  $f_m + f_n = f_s$  ( $m, n$  — номера мод), а волны распространяются практически перпендикулярно ПМСВ вследствие относительно большой величины их волнового вектора  $k$ . Это подтверждают эксперименты по оптической регистрации продуктов распада запороговой ПМСВ [11–13]. На втором этапе происходит слияние двух ОМСВ, принадлежащих одной ветви спектра, с образованием новой ПМСВ, отличающейся по частоте от исходной на  $|f_m - f_n|$ .

В нашем эксперименте для достаточно тонких пленок, так же как и в [4], наблюдалась существенная зависимость частот спутников от  $H_0$ . Это позволило предположить, что и в нашем случае имеет место пред-

ложенный в [4] механизм их образования. Для проверки этого была рассчитана зависимость  $\Delta f$  от  $1/d$ . При расчете использовался спектр ООМСВ [14] с заменой (для учета обмена)  $H_0$  на  $H_0 + Dk^2$ , где  $D$  — константа неоднородного обмена.<sup>1</sup>

Как видно из рис. 3, существует, как правило, несколько возможностей для распада ПМСВ на ООМСВ с различными номерами мод. Это должно приводить к образованию большого числа спутников. Однако в некоторых пределах изменения  $P_s$ , не слишком превышающих  $P_{пор}$ , возбуждается в первую очередь такая пара, для которой пороговая мощность является наименьшей. Наименьшим порогом обладают волны с наименьшим значением групповой скорости  $|v_g|$ . Практически это приводит

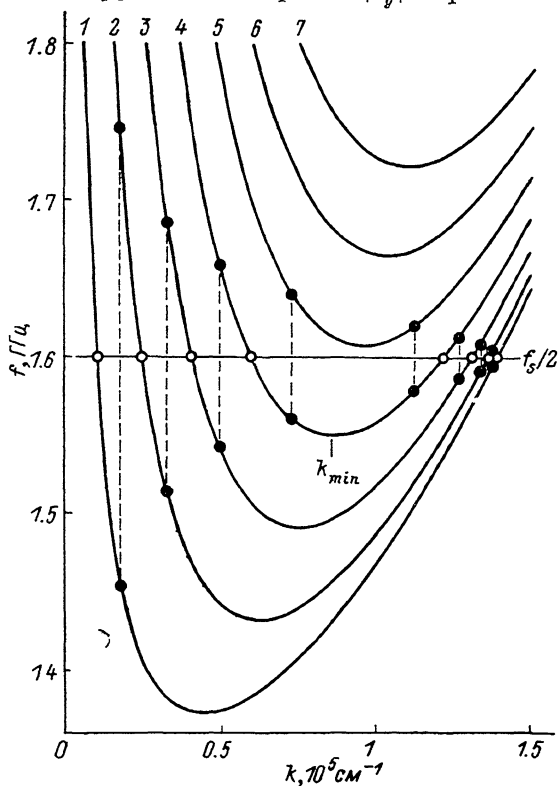


Рис. 3. Участок спектра первых семи мод ООМСВ.

Темные кружки — пары волн, которые могут возбуждаться при невырожденном распаде ПМСВ на ООМСВ соседних мод ( $n-m=1$ ); светлые — вырожденные пары ( $n-m=0$ ). Цифры у кривых — номера мод.  $d=6$  мкм,  $H_0=470$  Э.

к необходимости учета в первую очередь пар ООМСВ с наибольшими номерами мод среди всех возможных при распаде. Частоты спутников, образующихся только за счет слияния таких мод, приведены на рис. 2 для случаев  $n-m=1$  и  $n-m=2$ . Двухзначность частоты при фиксированной толщине  $d$  для каждого  $n-m$  отражает возможность возникновения пар ООМСВ как с  $k > k_{min}$ , так и с  $k < k_{min}$  (рис. 3). Первой возможности соответствуют части кривых рис. 2 с положительной, а второй — с отрицательной производной  $d(\Delta f)/d(1/d)$ .

На рис. 2 приведены также экспериментальные значения частот спутников. Их принадлежность к той или иной части кривых (в зависимости от соотношения  $k$  и  $k_{min}$ ) проверялась по изменению величины  $\Delta f$  при изменении  $H_0$  [4]. Как правило, в первую очередь возбуждались ООМСВ с  $k > k_{min}$ , что, по-видимому, обусловлено меньшими значениями

<sup>1</sup> Было проверено, что результаты такого расчета практически не отличались от результатов, полученных тем же методом, что и в [4].

$|v_g|$  для волн с  $k > k_{\min}$  (рис. 3). В [10] исследовался процесс распада ПМСВ на ООМСВ по регистрации излучения ООМСВ, при этом в первую очередь было зарегистрировано излучение от ООМСВ с  $k < k_{\min}$ . Однако это не противоречит нашим результатам, так как в [10] ООМСВ с большими  $k$  были слабее связаны с приемной антенной. Отметим также, что в [10] наряду с невырожденными распадами были зарегистрированы и вырожденные распады (на ООМСВ одной моды), дающие излучение строго на частоте  $f_s/2$ .

Как видно из рис. 1,  $\epsilon$ , за порогом параметрического возбуждения ООМСВ вокруг сильного сигнала наблюдается целая серия спутников, убывающих по амплитуде по мере удаления от  $f_s$ . Можно предложить по крайней мере два механизма образования более удаленных спутников. Во-первых, они могут быть обусловлены описанным выше механизмом при параметрическом возбуждении ООМСВ с  $k < k_{\min}$ . Как видно из рис. 2, для достаточно тонких пленок частоты спутников, обусловленных ООМСВ с  $k > k_{\min}$  и с  $k < k_{\min}$ , могут существенно различаться. Во-вторых,

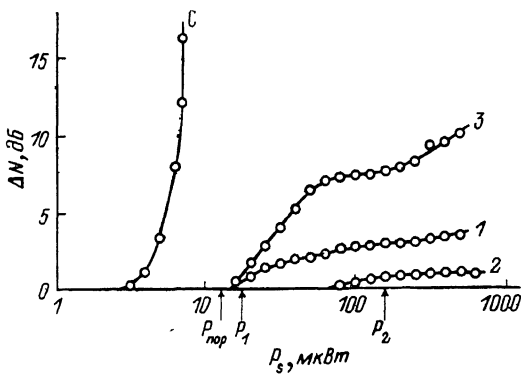


Рис. 4. Зависимости глубин провалов на АЧХ от мощности сильного сигнала.

$C$  — центральный провал на частоте 3200 МГц, 1 — провал на частоте 1-го спутника 3162 МГц, 2 — провал на частоте 2-го спутника 3145 МГц, 3 — наиболее сильный провал (исключая центральный) на частоте 3123 МГц. Пороговые мощности:  $P_{\text{пор}}$  — нелинейности ПМСВ,  $P_1$  — регистрации первых спутников,  $P_2$  — регистрации вторых спутников.  $d=6.8$  мкм (как и на вставке к рис. 2),  $k_s=350$  см $^{-1}$ .

они могут быть обусловлены тем же механизмом, но при невырожденном распаде на ООМСВ с  $n-m > 1$ . На рис. 2 приведены результаты расчета для  $n-m=2$ .

Возвращаясь к аномалиям на частотных характеристиках слабого сигнала, отметим прежде всего, что, как видно из рис. 1, помимо центрального минимума, наиболее сильное влияние сильного сигнала на слабый наблюдается отнюдь не в области частот первых спутников, хотя их амплитуды максимальны. На вставке к рис. 2 показаны экспериментальные полевые зависимости частот спутников и наблюдающихся аномалий для одной из пленок. Видно, что при изменении  $H_0$  частоты спутников изменяются разным образом (кривые 1, 2), что указывает на их связь с ООМСВ, лежащими по разные стороны от  $k_{\min}$ . Амплитуды провалов на АЧХ приведены для той же пленки на рис. 4. Наиболее сильный провал, как оказалось, не связан непосредственно, с каким-либо спутником, а полевая зависимость его отстройки от  $f_s$  ведет себя, как удвоенная  $\Delta f_1$ .

Необходимо отметить, что для достаточно толстых пленок величины  $\Delta f_s$  слабо зависят от  $H_0$  и  $\Delta f_2$  вдвое превышает  $\Delta f_1$  (рис. 2). В этом случае (имевшем место в [7]), как видно из рис. 1, наиболее сильные провалы практически совпадают со вторыми спутниками.

На рис. 4 нанесены также порог нелинейности ПМСВ и значения мощности, при которых становились заметны спутники. Порог нелинейности измерялся по методике, описанной в [15]. Из этого рисунка видно,

что провал в АЧХ на частоте  $f_s$  наблюдается уже при мощностях, существенно меньших порога параметрического возбуждения ООМСВ.

Первые спутники сильного сигнала начинают наблюдаться практически одновременно с наступлением параметрической нелинейности (отличие в наблюдаемых величинах  $P_{пор}$  и  $P_1$  может быть связано с недостаточной чувствительностью анализатора спектра). Практически одновременно возникают и провалы в АЧХ на частотах первых спутников и на частотах  $f_s \pm 2\Delta f_1$ . Одновременно начинает насыщаться глубина провала на частоте  $f_s$ , а его форма начинает искажаться. При дальнейшем повышении мощности появляются вторые спутники и приблизительно одновременно с ними — слабые провалы АЧХ на их частотах.

С целью выяснения механизма влияния сильной волны на слабую были проведены измерения при возбуждении этих волн с разных антенн (рис. 5, б—г). При возбуждении слабой ПМСВ таким образом, что она

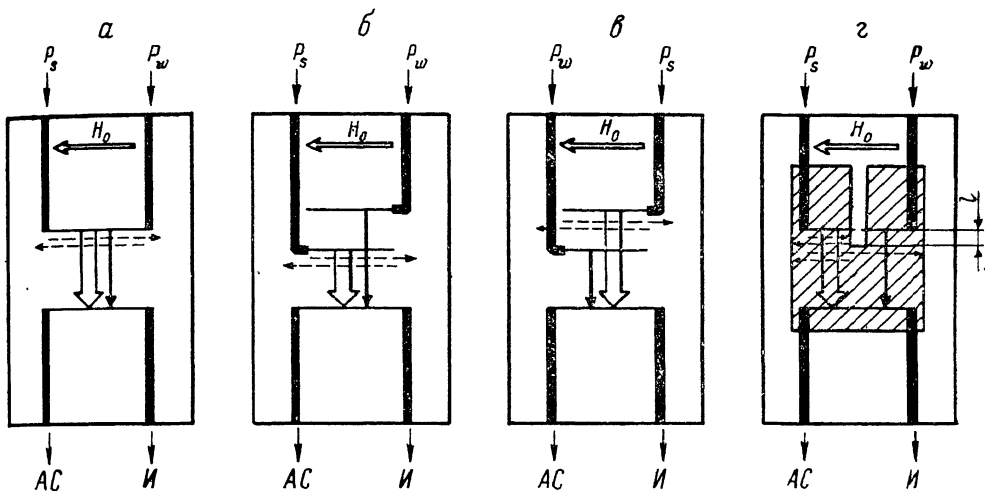


Рис. 5. Используемые в экспериментах ячейки.

Пленки ЖИГ прикладывались сверху (а—в — не показаны, г — пленка заштрихована). АС — анализатор спектра, И — индикаторный блок измерителя комплексных коэффициентов передачи. Стрелками условно обозначены возбуждавшиеся в пленках волны: сильная ПМСВ (толстыми), слабая ПМСВ (тонкими), ООМСВ (штриховыми).

пересекала область возбуждения сильной (рис. 5, б), характер описанных эффектов не изменялся. Это указывает, в частности, на то, что волна большой амплитуды оказывает воздействие не столько на возбуждение слабой волны, сколько на ее распространение в пленке. В случае же, когда слабый сигнал возбуждался антенной, более близкой к приемному преобразователю (рис. 5, в), для появления аномалий требовалась существенно большая мощность  $P_s$ . Ее величина возрастала с увеличением расстояния между возбуждающими преобразователями. Это обусловлено сильным нелинейным затуханием, которое претерпевает сильная ПМСВ вследствие распадных процессов.

Был проведен также следующий эксперимент. Две ПМСВ — большой и малой амплитуды — возбуждались разными антеннами таким образом, что распространялись параллельными путями по разным частям пленки ЖИГ (рис. 5, г). Хотя области распространения волн не пересекались, наличие более мощной приводило к появлению описанных выше аномалий частотных характеристик слабой. По-видимому, это обусловлено взаимодействием слабой ПМСВ с «добежавшими» до нее ООМСВ (как указывалось выше, они распространяются практически перпендикулярно ПМСВ). Наиболее сильное влияние мощной волны на слабую по-прежнему наблюдалось на частоте  $f_s$ . Это может быть обусловлено взаимодействием слабой волны с ООМСВ с частотой  $f_s/2$ , являющимися результатом вырожденного распада. Отметим, что в отличие от преды-

дущих экспериментов при такой геометрии возбуждения волн провал АЧХ на частоте  $f_s$  также возникал пороговым образом (очевидно, вследствие того, что для его образования требовалось наличие ООМСВ, появляющихся за порогом параметрического возбуждения). Для наблюдения описанных эффектов требовались существенно большие  $P_s$ , чем ранее. Это обусловлено затуханием ООМСВ при их распространении из области существования сильной волны в область слабой.

Затем в пленке ЖИГ была прорезана щель, параллельная пути распространения ПМСВ (рис. 5, з). Эта щель препятствовала распространению параметрических ООМСВ в область слабой волны. Длина части щели  $l$ , мешающей распространению ООМСВ, могла изменяться путем перемещения пленки параллельно направлению распространения ПМСВ. При увеличении  $l$  мощность, необходимая для наблюдения аномалий, быстро возрастала. Это связано с тем, что по мере распространения амплитуда сильной волны уменьшается и длина, на которой она остается запороговой, увеличивается с ростом  $P_s$ .

Таким образом, наличие «сильной» ПМСВ с фиксированной частотой  $f_s$  в пленке, по которой распространяется другая, «слабая», ПМСВ, приводит к появлению аномалий частотных характеристик передачи последней (провала на амплитудной и искажения фазовой) вблизи частоты  $f_s$ . Если амплитуда сильной волны превышает порог параметрического возбуждения спиновых волн, появляются дополнительные аномалии частотных характеристик слабой волны. Они имеют место на частотах спутников, механизм образования которых хорошо укладывается в рамки модели, предложенной в [4], а также — особенно сильные — на частотах, отстоящих от  $f_s$  на величину, равную удвоенной отстройке первого спутника. Механизм возникновения этих аномалий, безусловно связанных с параметрическим возбуждением спиновых волн поверхностной волной, нуждается в дальнейшем выяснении.

Авторы признательны А. Г. Темиряеву, Г. А. Мелкову, В. Б. Черепанову и Е. В. Подвигину за очень полезные дискуссии.

#### Список литературы

- [1] Schulz M. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 11. P. 4752—4755.
- [2] Adam J. D., Stitzer S. N. // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. N 6. P. 485—487.
- [3] Медников А. М. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 1. С. 242—245.
- [4] Темиряев А. Г. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 313—319.
- [5] Генкин Г. М., Голубева Н. Г. // Изв. вузов, радиофизика. 1985. Т. 28. № 3. С. 387—388.
- [6] Калинин Б. А. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 3. № 13. С. 811—814.
- [7] Чивилева О. А., Анисимов А. Н., Гуревич А. Г., Яковлев С. В., Аверин А. Н. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 24. С. 1497—1501.
- [8] Вашковский А. В., Зубков В. И., Локк Э. Г., Никитов С. А. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 3. С. 827—832.
- [9] Чивилева О. А., Анисимов А. Н., Гуревич А. Г. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 6. С. 1204—1205.
- [10] Мелков Г. А., Шолом С. В. // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. № 2 (8). С. 712—719.
- [11] Srinivasan G., Patton C. E. // IEEE Trans. 1985. V. MAG-21. N 5. P. 1797—1799.
- [12] Srinivasan G., Patton C. E. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 7. P. 759—761.
- [13] Srinivasan G., Patton C. E., Emtage P. R. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. N 6. P. 759—761.
- [14] Damon R. W., Eshbach J. R. // J. Phys. Chem. Sol. 1961. V. 19. N 3—4. P. 308—320.
- [15] Чивилева О. А., Гуревич А. Г., Анисимов А. Н. и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 6. С. 1774—1782.