

09; 10; 12

©1992 г.

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА

Г. Т. Казаков, М. Л. Кац, А. Г. Сузарев, Ю. А. Филимонов

Исследовано распространение поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в структуре эпитаксиальная пленка железо-иттриевого граната-ленточный электронный поток (ЭП). Обнаружено, что при прохождении ЭП над поверхностью пленки в области между входным и выходным микрополосковыми преобразователями в амплитуде выходного сигнала ПМСВ возникают особенности — уменьшение или рост, которые связываются с разогревом пленки за счет “оседания” электронов потока на ее поверхность и с наличием в рассматриваемой структуре трех характерных времен t_1 , t_2 , t_3 распространения тепла ($t_1 > t_2 > t_3$), где t_3 и t_2 отвечают времени распространения теплового фронта по толщине пленки и всей структуры пленка-подложка соответственно, а t_1 — время распространения тепла от области пленки, занимаемой ЭП, до места-расположения микрополосковых преобразователей МСВ.

Введение

Возможность изменения условий распространения магнитостатических волн (МСВ) в феррите с помощью электронного потока (ЭП), понижающего ферритовый образец или контактирующего с его поверхностью, обсуждается на протяжении почти 30 лет [1–5]. При этом, как правило, ограничивались теоретическим анализом ситуации, когда электрокинетические волны (ЭКВ), поддерживаемые ЭП, находятся в условиях резонанса с МСВ в феррите, что могло приводить к возникновению неустойчивости в структуре и генерации МСВ. Попытки экспериментально обнаружить эффекты резонансного взаимодействия МСВ и ЭП предпринимались в работах [5–7], где, несмотря на достижение черенковского условия возникновения неустойчивости в системе (скорость дрейфа электронов $v_0 \sim 10^{10}$ см/с более чем на порядок могла превосходить фазовую скорость МСВ $v_\phi = 10^7 - 10^8$ см/с), получить генерацию МСВ не удалось. Вместе с тем в работах [6,7] отмечалось, что прохождение ЭП над пленкой железо-иттриевого граната (ЖИГ) может вызвать значительные изменения выходного сигнала МСВ. Частично результаты этих работ

анализировались в обзоре [8], где, однако, объяснения обнаруженному влиянию ЭП на распространение МСВ в пленке ЖИГ дано не было. В данной работе обращается внимание на возможность иного, не связанного с резонансным взаимодействием ЭКВ и МСВ механизма влияния ЭП, обусловленного изменением условий распространения МСВ в пленке за счет ее нагрева ЭП, и делается попытка связать результаты работ [6,7] с таким тепловым воздействием ЭП на пленку. Кроме того, мы более подробно опишем результаты самих экспериментов по изучению распространения МСВ в структуре феррит-ЭП.

1. Экспериментальная установка и методика эксперимента

Эксперименты проводились на установке, схема которой показана на рис. 1. Электронная пушка 1, представляющая собой пушку Пирса с тремя анодами *b*, формировала над поверхностью пленки ЖИГ 2 ленточный ЭП с поперечными размерами 10×0.5 мм, причем ЭП не касался входного 3 и выходного 4 преобразователей МСВ, которые были размещены на поверхности пленки и разнесены на 14 мм. Пленка крепилась в подвижный держатель, с помощью которого ее можно было удалить от ЭП и поворачивать на углы $\Delta\theta = \pm 15^\circ$ относительно направления распространения ЭП. Электронная пушка с пленкой ЖИГ размещались в объеме 5 с вакуумом, откаченным до 10^{-7} мм рт.ст. между полюсами электромагнита 6 так, что его поле H_0 было касательно к поверхности пленки, ЭП распространялся вдоль H_0 , а величина поля при этом могла меняться от 0 до 900 Э. К катоду пушки *a* прикладывалось импульсное напряжение $V = -500 - 300$ В от высоковольтного модулятора 7, который запускался прямоугольными импульсами от двухканального генератора 8, причем минимально достижимая длительность импульса ЭП составляла $\tau_0 = 10$ мкс при длительности фронтов менее 1 мкс. Для регистрации формы импульса ЭП и величины импульсного тока использовался двухканальный осциллограф 9, на второй канал которого через делитель $R_1 - R_2$ поступали импульсы с коллектора электронной пушки 6.

Для возбуждения МСВ на входную антенну через модулятор 10 подавалась СВЧ мощность с генератора 11, в качестве которого использовался генератор от панорамного измерителя Р2-56. Модулятор мог либо открываться, что позволяло работать в режиме непрерывной генерации, либо модулировать сигнал СВЧ прямоугольными импульсами с длительностью фронтов не более 10 нс и глубиной модуляции больше 20 дБ. Сигнал с выходной антенны усиливался СВЧ усилителем 12 с коэффициентом усиления 20 дБ и через детектор 13 поступал на первый канал осциллографа 9. При необходимости исследования распространения МСВ в непрерывном режиме осциллограф 9 заменялся на приемник панорамного измерителя Р2-56.

Для исследований брались эпитаксиальные пленки ЖИГ на подложках из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) ориентации (111) и толщиной $b = 0.6$ мкм. Пленки имели намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс, ширину линии ФМР $2\Delta H < 1$ Э, толщины $a_1 = 6$ мкм и $a_2 = 11$ мкм и были вырезаны в форме прямоугольных пластин размером 18×10 мм. В качестве преобразователей МСВ 3, 4 использовались проволочные антенны диаметром $d = 70$ мкм, которые располагались по ширине пленки на расстоянии 2 мм от ее торцов и имели длину, равную ширине пленки 10 мм. Пленка крепилась в подвижном держателе и ориентировалась в

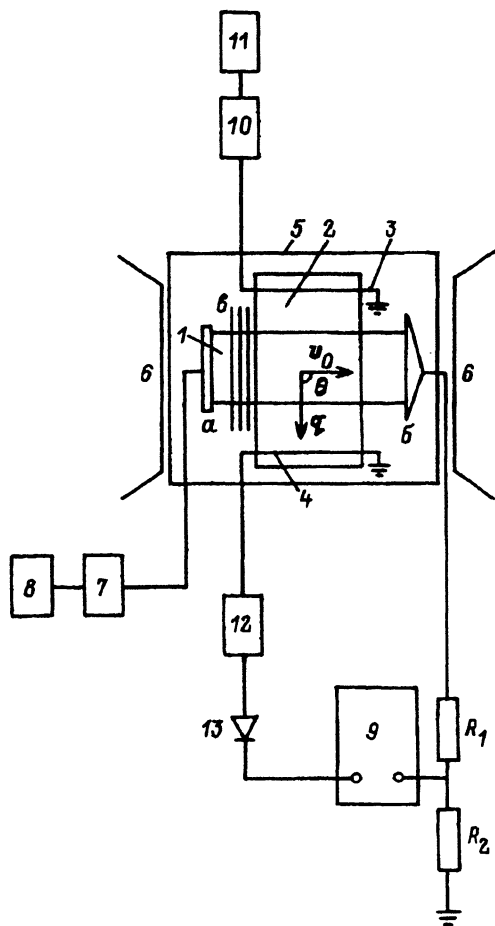


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

поле H_0 таким образом, что угол между направлением волнового числа МСВ q и полем H_0 принимал значение $\theta = 90^\circ$ в случае, когда поле H_0 было параллельно антеннам МСВ и в пленке возбуждалась поверхностная МСВ (ПМСВ) Дэймона-Эшбаха [9]. Вращением держателя на углы $\Delta\theta$ можно было менять величину угла в пределах $\theta = 75 - 105^\circ$, при этом скорость электронов v_0 оставалась параллельной полю H_0 .

Отметим, что пленка располагалась между коллектором и последним анодом электронной пушки, которые находились под потенциалом земли. Поэтому в момент пролета ЭП над пленкой ЖИГ ускоряющее напряжение V на электроны не действует и они движутся по инерции.

Изучалась зависимость амплитуды выходного сигнала ПМСВ от частоты возбуждения f и параметров эксперимента H_0 , v_0 , θ и связь таких зависимостей с длительностью ЭП τ_e .

2. Эксперимент

Эксперименты проводились в диапазоне частот возбуждения ПМСВ $f = 3 - 5$ ГГц, чему отвечали величины магнитных полей $H_0 = 500 - 840$ Э. Использовались две конструкции катода, обеспечивающие предель-

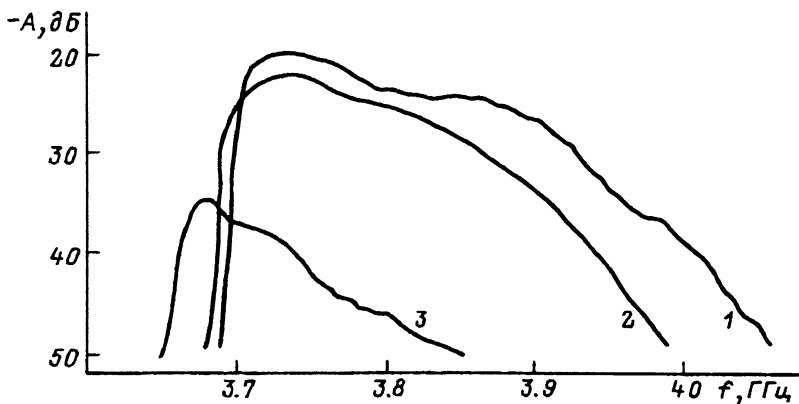


Рис. 2. Трансформация АЧХ макета при воздействии импульса ЭП “большой” длительности ($\tau_{\text{э}} = 10 - 15$ с) в случае $H_0 = 700$ Э, $\theta = 90^\circ$.

1 — $t' = 0$, 2 — 2, 3 — 15 с.

ные токи на коллекторе $I_{k,1} = 7$ мА и $I_{k,2} = 30$ мА. Тянущее напряжение V обеспечивало скорость электронов [10]. Плотность ЭП составляла при значениях тока коллектора $I_{k,1}$, $I_{k,2}$ соответственно $N_1 = (2.8 - 1.2) \times 10^8$ см $^{-3}$ и $N_2 = 1.2 - 0.5 \cdot 10^9$ см $^{-3}$. Мощность ЭП W составляла $W = I_k V = (20 - 90)$ Вт.

а) Влияние импульсов ЭП “большой” длительности. Трансформация амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) макета под влиянием импульса ЭП длительностью $\tau_{\text{э}} = 10 - 15$ с, снятая с индикатора приемника панорамного измерителя Р2 = 65, показана на рис. 2. Через $t' = 2 - 3$ с после включения ЭП частоты возбуждения ПМСВ начинали уменьшаться, за время действия ЭП частотный диапазон возбуждения ПМСВ сдвигался вниз на величину $\Delta f = 30$ МГц, а амплитуда сигнала уменьшалась. Такие изменения АЧХ слабо зависели от величины угла θ , поля H_0 и скорости электронов v_0 . При длительности ЭП $\tau_{\text{э}} > 20$ с поверхность пленки заряжалась за счет оседания электронов и коллекторный ток резко уменьшался.

б) Влияние импульсов ЭП “средней” длительности. При длительности $\tau_{\text{э}} = 1$ с ($\tau_{\text{э}} < t'$) влияние ЭП на АЧХ макета было наиболее заметно при углах $\theta \neq 90^\circ$ и проявлялось главным образом в виде изменения амплитуды ПМСВ. На рис. 3 показаны АЧХ до (кривая 1) и после (кривая 2) включения ЭП для случая, когда углы θ не слишком отличаются от 90° . Как видно, амплитуда ПМСВ в коротковолновой области возрастает на 20–40 дБ, что воспринимается как “расширение” полосы частот возбуждения ПМСВ.

в) Влияние импульсов ЭП “малой” длительности. Влияние ЭП длительностью $\tau_{\text{э}} \sim 10 - 15$ мкс и периодом следования $T_{\text{э}} = 0.03$ с проявлялось селективно, т.е. при определенных наборах параметров f , V_0 , H_0 , θ и существенно зависело от плотности ЭП и толщины пленки ЖИГ. На рис. 4,а показан характер изменения выходного сигнала в пленке ЖИГ толщиной $a_1 = 6$ мкм в случае ЭП плотностью $N_1 = 2.8 \cdot 10^8$ см $^{-3}$ и при параметрах эксперимента $\theta = 87 \pm 0.5^\circ$, частоте $f_1 = 3800$ МГц, $H_0 = 670$ Э, $v_0 = 3 \cdot 10^9$ см/с. Здесь в отличие от случаев а,б для регистрации выходного сигнала использовался осциллограф. Как можно видеть, импульсы ЭП

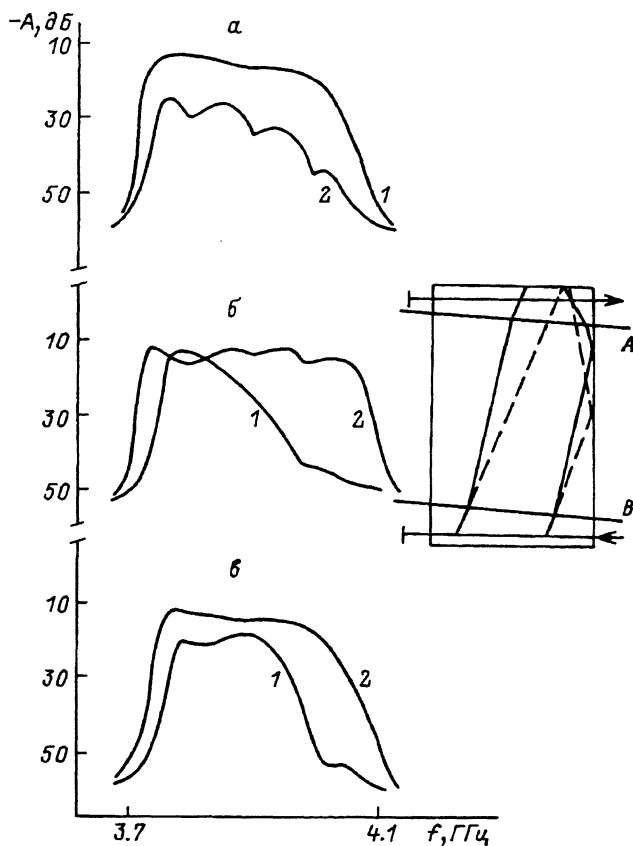


Рис. 3. Трансформация АЧХ макета при воздействии импульса ЭП “средней” длительности ($\tau_a = 1$ с) при нескольких значениях угла θ между полем H_0 и направлением волнового вектора ПМСВ.

$H_0 = 700$ Э, $v_0 = 3 \cdot 10^9$ см/с; θ , град: а — 90, б — 80, в — 100. На вставке траектории ПМСВ в отсутствие ЭП (штриховая линия) и с учетом эффекта преломления ПМСВ на “тепловой” призме, созданной ЭП.

(кривая 1) и изменения амплитуды ПМСВ (кривая 2) совпадают по времени и по форме. Указанные изменения в амплитуде выходного сигнала составляли величину \sim дБ и наблюдались в диапазоне углов $\theta = 87 \pm 2^\circ$, скоростей $v_0 = 3 + 0.3 \cdot 10^9$ см/с, частот $f_1 = 3800 \pm 30$ МГц.

При увеличении плотности потока до величин $N_2 = 1.2 \cdot 10^9$ см $^{-3}$ задний фронт импульса 2 искажался (представление о характере искажений импульса 2 можно получить, проведя огибающую вершин импульсов на рис. 4, б-2), а диапазон изменения параметров f , v_0 , θ , H_0 , в котором регистрировалось возникновение импульса 2, расширялся. В пленке толщиной $a_2 = 11$ мкм такие искажения формы импульса 2 наблюдались наиболее отчетливо, кроме того, общее число частот f_i в зоне возбуждения ПМСВ, на которых наблюдалось влияние ЭП, увеличивалось, достигая в ряде случаев семи. Далее при обсуждении результатов эксперимента мы будем ссылаться лишь на одну из них.

Можно убедиться в том, что ЭП оказывает влияние именно на ПМСВ, а не на прямую электромагнитную наводку между антеннами, рас-

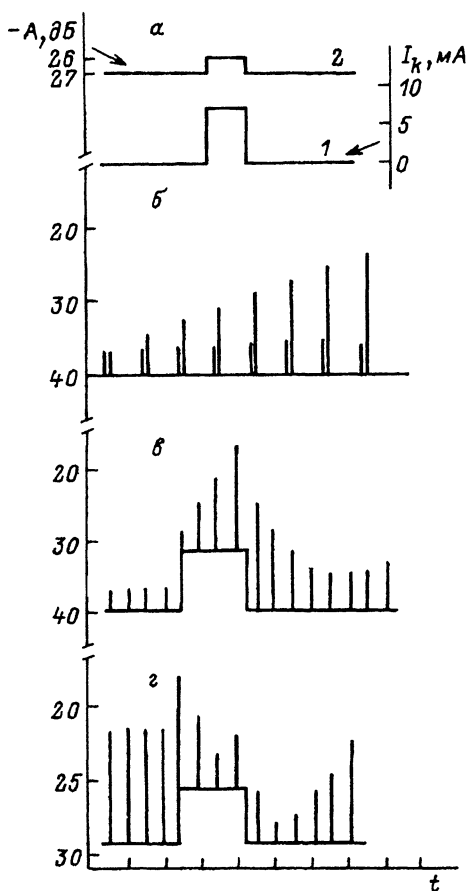


Рис. 4. Изменения сигнала ПМСВ, вызванные тепловым воздействием ЭП малой длительности ($\tau_{\theta} = 10 - 15$ мкс).

a — $H_0 = 670$ Э, $v_0 = 3 \cdot 10^9$ см/с, $f_1 = 3700$ МГц, непрерывный режим распространения ПМСВ;
б-з — $H_0 = 670$ Э, $v_0 = 2.69 \cdot 10^9$ см/с, $f_1 = 3965$ МГц, импульсный режим распространения ПМСВ, *a, в, з* — 10 мс/дел.;
б — 1 мкс/дел.

смотрим распространение импульсов ПМСВ длительностью $\tau_M = 50$ нс, при которой достигалось разделение задержанного импульса ПМСВ и наводки. На рис. 4,б-з представлены осциллограммы импульсов ПМСВ, прошедших через пленку толщиной $a_2 = 11$ мкм при значениях параметров $f_1 = 3965$ МГц, $H_0 = 700$ Э, $v_0 = 2.68 \cdot 10^9$ см/с для углов $\theta_1 = 87^\circ + 2^\circ$ (*б*), 87° (*в*) и $\theta_2 = 93.5^\circ$ (*з*). Моменту включения ЭП здесь соответствует возникновение “пьедестала” — нулевой уровень сдвигается вверх. Из рис. 4, б видно, что импульсы ПМСВ и наводки разделены во времени и ЭП вызывает изменения именно в амплитуде ПМСВ. При угле $\theta = 87^\circ$ ослабление ПМСВ уменьшалось примерно на 10 дБ, а при $\theta = 93.5^\circ$ потери ПМСВ возрастали на 5 дБ.

Характерно, что амплитуда ПМСВ непрерывно меняется как во время действия ЭП, так и после окончания импульса ЭП: наблюдается релаксация свойств среды с временем релаксации 0.1 – 1 мс. Более того, при увеличении длительности импульса ЭП изменение амплитуды ПМСВ оказывается немонотонным (рис. 4,з). Из рис. 4,з также видно, что если во время действия импульса ЭП амплитуда ПМСВ сначала уменьшалась, а затем начинала расти, то восстановление формы импульса ПМСВ после выключения ЭП идет в обратном порядке.

Однако, как и прежде, влияние импульсов ЭП на распространение ПМСВ наблюдалось в достаточно узких диапазонах изменения параметров $f_1 = (3965 \pm 20)$ МГц, $v_0 = 2.68 \pm 0.06 \cdot 10^9$ см/с, $\theta_1 = 87^\circ 36' \pm 45'$ и $\theta_2 = 93^\circ \pm 45'$.

Следует также отметить, что при удалении пленки от ЭП на расстоянии $l > 0.5$ мм все отмеченные выше особенности исчезали.

3. Обсуждение результатов эксперимента

Из результатов эксперимента, описанных в разделе 2а, следует, что ЭП вызывает нагрев пленки. Время начала “движения” зоны возбуждения ПМСВ “вниз” по частоте $t' = 2-3$ с определяется временем диффузии тепла вдоль поверхности пленки от края потока до места расположения антенн МСВ, которое можно определить как [11]

$$t_1 = s^2/D, \quad (1)$$

где D — коэффициент тепловой диффузии; s — расстояние, на которое диффундирует тепло.

Взяв величину коэффициента тепловой диффузии для ЖИГ $D = 0.02$ см/с² [12], для расстояния $s = 2$ мм получим $t_1 = 2$ с, что близко к наблюдаемому в эксперименте. Приращение температуры ΔT в области антенн можно оценить исходя из скорости изменения намагниченности от температуры ρ , которая в диапазоне температур 300–400 К составляет $\rho = 3.3$ Гс/град [12], и, связав величину частотного сдвига зоны ПМСВ Δf с понижением $4\pi M_0$, получим

$$\Delta T = \frac{2f_0\Delta f}{f_H\gamma\rho}, \quad (2)$$

где $f_H = \gamma H_0$, $f_M = \gamma \cdot 4\pi M_0$, $f_0 = \sqrt{f_H^2 + f_M^2}$, $\gamma = 2.8$ МГц/Э — гиромагнитное отношение.

Выражение (2) справедливо при условии $\Delta f \ll f_H$, которое в нашем случае выполнено. С помощью (2) получаем приращение температуры в области антенн МСВ $\Delta T = 14^\circ$. Понятно, что в области, непосредственно занятой ЭП, температура пленки ЖИГ будет выше.

Другой режим теплового воздействия связан с временем диффузии тепла по толщине структуры t_2 , для которого из (1) можно легко получить оценку, взяв $s = a_1 = 0.6$ мм, $t_2 = 0.2$ с. Действительно, при длительности импульса ЭП $t_2 < \tau_0 < t_1$ в структуре образуется тепловая неоднородность, границы которой на поверхности пленки соответствуют границам ЭП. Участок пленки, находящийся под ЭП, будет иметь меньшую намагниченность и может рассматриваться как “тепловая призма”, на которой ПМСВ испытывают преломление аналогично случаям преломления МСВ на металлизированном участке пленки [13] или “скачке” толщины [14].

На вставке к рис. 3,б показаны для этого случая траектории основной моды ПМСВ, исходящие из различных точек входного микрополоска на частоте $f = 3775$ МГц, до (штриховые линии) и после (сплошные линии) включения ЭП, границы которого отмечены наклонными линиями АВ.

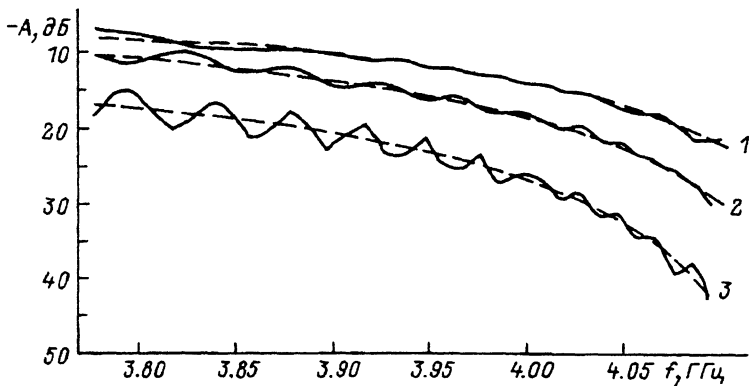


Рис. 5. Результаты расчета АЧХ макета по формуле (3) в отсутствие ЭП при параметрах, отвечающих рис.3, и значениях угла $\Delta\theta = 0$ (1), 5° (2), 7° (3). Штриховая линия — уровень сигнала без учета отражения от края пленки.

При расчетах траекторий учитывалось, что направление групповой скорости ПМСВ при $\theta \neq 90^\circ$ отличается от направления на угол φ [15], а направление и величина \mathbf{q} после отражения от края пленки или преломления на границе “тепловой призмы” рассчитывались по аналогии с работой [16].

Будем дальше обращаться к результатам расчета АЧХ макета

$$A = 20 \lg \left[\sum_{n=1}^N \operatorname{Re} \{ \exp [i(\Phi_1 - \Phi_n - \Gamma_n)] \} / N \right], \quad (3)$$

где N — число траекторий ПМСВ, причем n -й траектории отвечает n -й участок входного микрополоска; k — число прямолинейных участков, на которые разбивается n -я траектория точками “отражения” и “преломления” ПМСВ; $\Phi_n = \left(\sum_{j=1}^k \mathbf{q}_j s_j \right)_n$ — набег фазы ПМСВ вдоль n -й траектории; $\Gamma_n = \left(\sum_{j=1}^k q_j'' |s_j| \right)_n$ — декремент ПМСВ вдоль n -й траектории; \mathbf{q}_j , s_j и q_j'' — волновой вектор, перемещение и мнимая часть волнового числа ПМСВ на j -м участке n -й траектории.

При записи (3) считалось, что излучаемая мощность распределена по полоску равномерно, вкладом высших ширинных мод ПМСВ можно пренебречь из-за большой ширины пленки [17], потери на возбуждение, а также при отражении и преломлении ПМСВ отсутствуют.

На рис. 5 представлены результаты расчета с помощью (3) АЧХ макета в отсутствие ЭП при нескольких значениях угла θ и для случая $N = 1000$, $\Delta H = 0.15 \text{ Э}$. Здесь же штриховыми линиями показаны результаты расчетов в приближении неотражающего края пленки. Из сравнения результатов измерений (рис. 3) и расчетов (рис. 5) АЧХ в отсутствие ЭП видно их соответствие. Отметим, что учет отражений ПМСВ от края пленки приводит к осцилляциям выходного сигнала.

Трансформация АЧХ под влиянием “тепловой призмы” показана на рис. 6. Из рис. 6, а видно, что при намагниченности “призмы” $4\pi M_0 = 1680 \text{ Гс}$ выходной сигнал растет на 5–15 дБ. Этот результат становится очевидным, если учесть возникающий под влиянием прело-

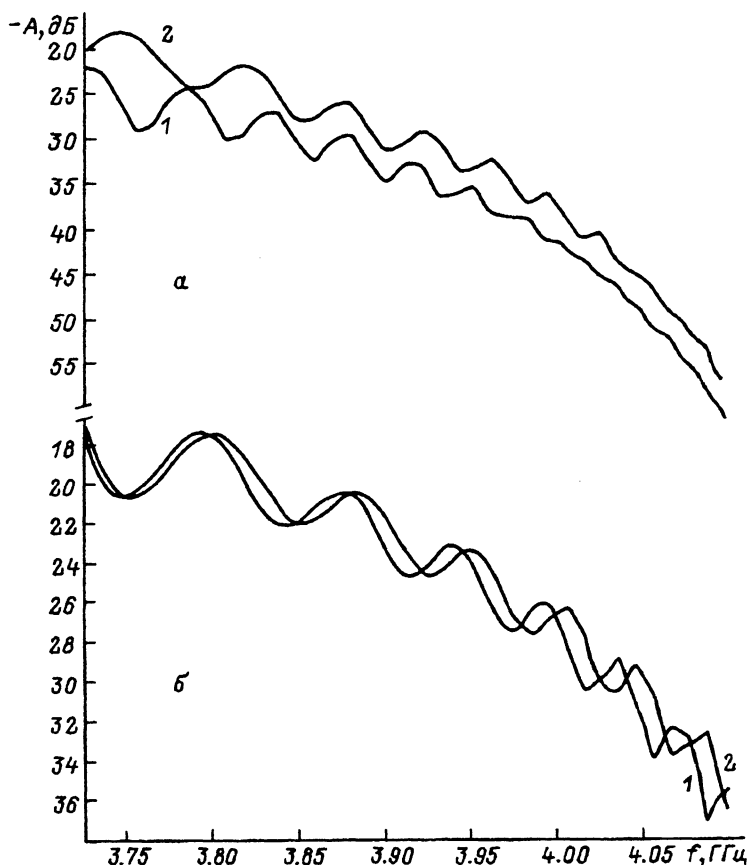


Рис. 6. Расчет АЧХ макета при параметрах эксперимента, отвечающих рис. 3, 4, при средней (а, $\tau_e = 1$ с) и малой (б, $\tau_e = 10 - 15$ мкс) длительностях импульса ЗП в области "тепловой" призмы.
 1 — в отсутствие ЭП, 2 — при нагреве пленки ЖИГ электронным потоком.

мления на "призме" рост числа траекторий ПМСВ в потоке, вдоль которых набег фазы постоянен. Сопоставление результатов расчета и эксперимента (рис. 3) показывает, что при совпадении характера поведения АЧХ наблюдаемый в эксперименте рост сигнала превышает на 20 дБ полученный из расчетов в рамках предложенной модели. Казалось бы, количественного совпадения можно достичь за счет дальнейшего снижения намагниченности "призмы", однако при большом снижении намагниченности этот эффект компенсируется ростом потерь ПМСВ из-за снижения групповой скорости волны на участке "призмы".

Отметим, что незначительное расширение зоны возбуждения ПМСВ в область низких частот, показанное на рис. 3, обуславливается тем, что длинноволновые ПМСВ ($q < 30$ см⁻¹), отвечающие нагретому участку пленки, могут быть возбуждены и приняты преобразователями даже в том случае, когда граница теплового фронта еще не достигла места их расположения.

Рассмотрим теперь влияние импульсов ЭП малой длительности на распространение ПМСВ. Прежде всего отметим, что непрерывное изме-

нение амплитуды ПМСВ во время действия ЭП и наличие времени релаксации свойств среды после окончания импульса ЭП свидетельствуют в пользу теплового нагрева пленки. Поскольку нагревается непосредственно поверхность пленки, то за время действия ЭП длительностью 10–15 мкс распределение температуры по толщине пленки ЖИГ не успевает установиться и по толщине пленки распространяется тепловая волна, имеющая зависимость от координаты по толщине пленки x и времени t [11],

$$T(x, t) = \exp(-Qx) \cdot \exp[i(Qx - 2\pi\nu \cdot t)], \quad (4)$$

где ν — частота и $\theta = \pi\sqrt{\nu/D}$ — волновое число тепловой волны.

При этом максимальная частота ν_{\min} определяется с помощью (1) $\nu_{\min} = 1/t = D/s^2$, где под расстоянием s теперь нужно понимать толщину пленки a_i . Установление распределения температуры $T(x)$, близкого к стационарному, произойдет для пленки толщиной $a_1 = 6$ мкм за время $t_3 = 10 - 15$ мкс, а в пленке толщиной $a_2 = 11$ мкм — за $t_3 = 40 - 60$ мкс. С этим можно связать более заметное проявление эффектов непрерывного изменения амплитуды ПМСВ в момент действия ЭП длительностью $\tau_3 = 10 - 15$ мкс и сразу после его окончания в пленках большей толщины.

Поскольку распределение намагниченности по толщине пленки $4\pi M_0(x)$ непосредственно связано с распределением температуры $T(x)$, то, очевидно, в данном случае распределение намагниченности по толщине в области нагрева будет неоднородным. Кроме того, величина нагрева, а значит, и величина снижения намагниченности будут меньше, чем в рассмотренных выше случаях “большой” и “средней” длительности импульса ЭП.

Отметим, что период следования импульсов ЗП $T_0 = 0.03$ с оказывается на порядок меньше времени диффузии тепла по толщине структуры $t_2 = 0.2$ с, поэтому в промежутке между импульсами ЭП температура и, следовательно, намагниченность пленки ЖИГ под электронным потоком будут, вообще говоря, отличаться от первоначальных своих значений.

С учетом сказанного будем считать, что при “малой” длительности импульса ЭП намагниченность в области призмы составляет $4\pi M_0^1 = 1730$ Гс в момент прохождения импульса над пленкой ЖИГ и $4\pi M_0^2 = 1745$ Гс в промежутке между импульсами, и пренебрежем ее зависимостью от толщины. Результат расчета АЧХ для этого случая показан на рис. 6, б. Можно видеть, что в результате преломления ПМСВ на призме характерные минимумы и максимумы в АЧХ оказываются смещены по частоте относительно исходного состояния. Вследствие этого выходной сигнал может как увеличиваться, так и уменьшаться на величину ~ 3 дБ. Видно также, что в некоторых частотных интервалах сигнал остается неизменным.

Очевидно, что экспериментально описанная ситуация будет воспринята как селективное воздействие со стороны ЭП. При этом, конечно, нужно учесть, что рассматриваемая модель “тепловой призмы” не учитывает неоднородности нагрева пленки как по толщине, так и по ее поверхности; считается, что эффективность отражения ПМСВ от края пленки не зависит от нагрева и одинакова вдоль пленки; не берется в расчет, что одновременно с изменением намагниченности при нагреве меняются другие параметры пленки, например поля анизотропии.

Наконец, обсудим вероятность вклада в экспериментальные результаты механизма резонансного взаимодействия ПМСВ и ЭКВ, поддержива-

емых потоком. Действительно, такой механизм может явиться причиной селективного воздействия ЭП на ПМСВ [1-4]. В этом смысле частоты, на которых наблюдаются изменения в амплитуде ПМСВ, удовлетворяют условиям фазового синхронизма ПМСВ и волны пространственного заряда в потоке с законом дисперсии $\omega = qv_0$. Однако для объяснения с помощью этого механизма изменений в амплитуде ПМСВ при углах $\theta > 90^\circ$ необходимо потребовать участие во взаимодействиях отраженных от коллектора электронов. Кроме того, результатом такого резонансного взаимодействия должно быть (независимо от угла θ) значительное изменение направления переноса энергии ПМСВ [18]: гибридные волны должны распространяться практически вдоль ЭП и сигнал на выходной антенне должен всегда уменьшаться. Следовательно, даже в пренебрежении эффектами релаксации свойств пленки после окончания импульса ЭП необходимо признать, что проявления механизма резонансного взаимодействия ПМСВ и ЭКВ в нашем случае не обнаружено.

Выводы

Таким образом, исследовано распространение ПМСВ в структуре пленка ЖИГ-ленточный электронный поток. Обнаружено, что в момент прохождения ЭП над поверхностью пленки в области между входной и выходной антеннами условия распространения ПМСВ существенно меняются из-за нагрева пленки оседающими на ее поверхность электронами. Характер обнаруженных изменений зависит от длительности воздействия ЭП и определяется существованием трех характерных времен диффузии тепла в структуре: по толщине пленки ЖИГ t_3 и структуры ЖИГ-ГГГ t_2 , а также по поверхности пленки от края потока до места расположения антенн t_1 , $t_3 < t_2 < t_1$. Показано, что в случае, когда угол между волновым числом ПМСВ и внешним магнитным полем отличается от 90° , пропускание над пленкой ЭП длительностью τ_0 , $t_2 < \tau_0 < t_1$, может приводить к увеличению амплитуды выходного сигнала ПМСВ из-за влияния на распространение ПМСВ "тепловой призмы", вызванной нагревом пленки со стороны ЭП.

Авторы выражают глубокую благодарность П.Е.Зильберману за многочисленные дискуссии, которые способствовали постановке данного эксперимента и благотворно влияли на процесс работы. Нам также приятно поблагодарить А.И.Белолишцева, С.Л.Высоцкого и А.Б.Бокарева за помощь в работе, А.В.Стальмахова, В.А.Тюлюкина и А.Б.Валявского за обсуждение полученных результатов.

Реферат статьи Казакова Г.Т. и др. "Тепловое воздействие ленточного электронного потока на распространение поверхностных магнитостатических волн в пленках железиттриевого граната".

Исследовано распространение поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в структуре пленка железиттриевого граната-ленточный электронный поток (ЭП). Обнаружено, что в момент прохождения ЭП над поверхностью пленки в области между входным и выходным микрополосковыми преобразователями, в амплитуде сигнала ПМСВ, прошедшего пленку, возникают особенности, которые в зависимости от длительности ЭП разделяются на три вида. При "большой" длительности (в условиях эксперимента $\tau_0 = 3$ с) наблюдается смещение зоны возбуждения ПМСВ вниз по частоте, сопровождающееся уменьшением амплитуды прошедшего сигнала, которое не зависит от взаимной ориентации волнового вектора ПМСВ q и скорости электронов v_0 , характеризующей

углом θ . При "средней" длительности ЭП τ_0 с и углах $\theta \neq 90^\circ$ наблюдался рост амплитуды прошедшего сигнала на всех частотах, отвечающих "зоне" возбуждения ПМСВ. Воздействие ЭП "малой" длительности ($\tau_0 = 10-15$ мкс) носит селективный характер — наблюдается в узком диапазоне частот, углов и скоростей ЭП. Указанные изменения в амплитуде прошедшего сигнала связываются с разогревом пленки за счет "оседания" электронов потока на ее поверхность и с наличием в структуре трех характерных времен t_1, t_2, t_3 распространения тепла по структуре, где t_3 и t_2 отвечают времени распространения теплового фронта по толщине пленки и всей структуры пленка-подложка, соответственно, а t_1 — время распространения тепла от области пленки, занимаемой ЭП, до места расположения микрополосков.

Список литературы

- [1] Агиезер А.И., Барьяттар В.Г., Пелетминский С.В. // ЖЭТФ. 1963. Т. 45. Вып. 2. С. 337-343.
- [2] Шишкин Л.А., Барьяттар В.Г. // Изв. вызов. Радиофизика. 1965. Т. 8. № 5. С. 942-947.
- [3] Гилинский И.А., Рязанцев К.А. // ФТТ. 1968. Т. 10. Вып. 12. С. 3628-3631.
- [4] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Раевский А.О. // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 9. С. 2580-2586.
- [5] Spector J., Trivelpiece A.W. // J.Appl. Phys. 1964. Vol. 35. N 7. P. 2030-2038.
- [6] Казаков Г.Т., Сутарев А.Г., Филимонов Ю.А. и др. // Тез. II Всесоюз. школы-семинара "Спин-волновая электроника СВЧ". Ашхабад, 1985. С. 17-18.
- [7] Kazakov G.T., Sukharev A.G., Filimonov Yu.A. // Proc. ISSWAS. Novosibirsk, 1986. PtII. P. 300-303.
- [8] Казаков Г.Т., Филимонов Ю.А. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1989. Т. 32. № 1. С. 5-29.
- [9] Damon R.W., Eshbach J.R. // J.Phys. Chem. Sol. 1961. Vol. 18. P. 308-320.
- [10] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966. 452 с.
- [11] Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977. 615 с.
- [12] Яковлев Ю.М., Генделев С.Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М.: Сов. радио, 1975. 360 с.
- [13] Floyd R.E., Sethares J.C. // J.Appl. Phys. 1984. Vol. 55. N 6. PtIIB. P. 2525-2517.
- [14] Вашковский А.В., Шатназарян Д.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 15. С. 908-912.
- [15] Collins J.H., Pizzarello F.A. // Int. J. Electr. 1973. Vol. 34. N 3. P. 319-351.
- [16] Вашковский А.В., Стальмагов А.В., Шатназарян Д.Г. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1988. Т. 31. № 11. С. 67-75.
- [17] Гречушкин К.В., Стальмагов А.В., Тюлюкин В.А. // РЭ. 1990. Т. 35. № 5. С. 977-985.
- [18] Казаков Г.Т., Кац М.Л., Филимонов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 7. С. 65-69.

Институт радиотехники и электроники
Саратовский филиал

Поступило в Редакцию
31 января 1992 г.
В окончательной редакции
29 июня 1992 г.