

- [5] Валиев К.А., Великов Л.В., Махматов Р.Х., Прохоров А.М. // ДАН СССР. 1985. Т. 284. № 3. С. 595-598.
- [6] Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь, 1988. 250 с.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
12 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 8

26 апреля 1989 г.

05.2; 06.2; 09

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН С ЭЛЕКТРОНАМИ ПРОВОДИМОСТИ В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЕ ФЕРРИТ-ПОЛУПРОВОДНИК

И.Г. Кудряшкин, Ю.К. Фетисов

Взаимодействие магнитостатических волн (МСВ) с носителями заряда в пленочной структуре феррит-полупроводник приводит к целому ряду эффектов, перспективных для использования в устройствах спинволновой электроники [1]. До настоящего времени исследовалось, в основном, влияние МСВ на электроны проводимости полупроводника и эффекты усиления МСВ [2]. Вместе с тем, значительный интерес с точки зрения управления характеристиками МСВ представляет вопрос о влиянии пленки полупроводника на дисперсию и затухание волн, который рассматривался только теоретически [3, 4].

В данной работе экспериментально изучалось распространение поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в планарной структуре, содержащей пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) и полупроводника $GaAs$ p -типа проводимости. Пленка ЖИГ, выращенная методом ЖФЭ на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) с ориентацией (111) и размерами $4 \cdot 10$ мм², имела толщину $d = 3.9$ мкм, намагниченность насыщения $4\pi Ms = 1760$ Гс и ширину линии однородного ферромагнитного резонанса $\Delta H \approx 0.5$ Э. Пленки p - $GaAs$, изготовленные автоэпитаксией на изолирующих подложках размерами $1 \cdot 4$ мм², имели одинаковую толщину $a = 16.4$ мкм, а равновесная концентрация N_e и холловская подвижность μ электронов проводимости изменялись в пределах $8 \cdot 10^{19}$ - $7 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и 100 - 5000 см²/В·с соответственно.

Пленку полупроводника прижимали к пленке ЖИГ и всю структуру помещали во внешнее касательное намагничивающее поле \vec{H} ,

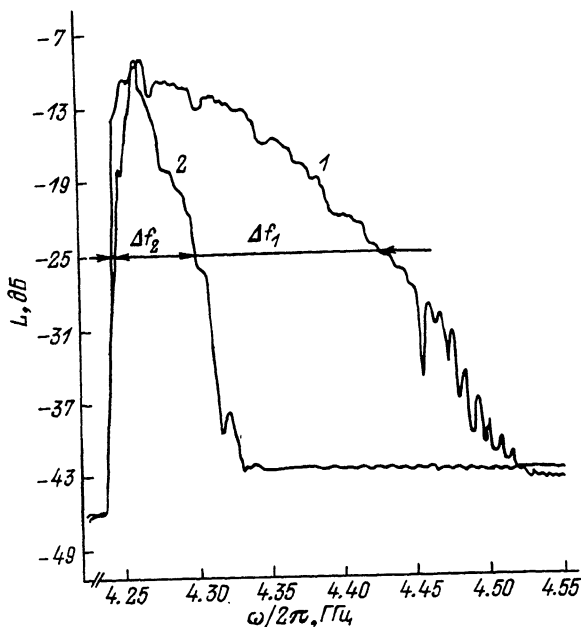


Рис. 1. АЧХ ПМСВ для свободной пленки ЖИГ (1) и тонкопленочной структуры ЖИГ - $p\text{-GaAs}$ (2).

перпендикулярное направлению распространения волн. При расстоянии между возбуждающим и приемным микрополосковыми преобразователями МСВ 2.66 мм длина пути распространения волн по границе феррит-полупроводник составляла 1.0 мм. Регистрировали частотную зависимость амплитуды сигнала передачи (АЧХ) ПМСВ в диапазоне частот 4–10 ГГц при уровнях возбуждающей мощности менее 0.1 мВт. Дисперсионные характеристики ПМСВ на границе феррит-полупроводник рассчитывали по результатам измерений фазы прошедшей волны в свободной пленке феррита и в пленке феррита с прижатым к ней образцом полупроводника.

Обнаружено, что электроны проводимости полупроводника оказывают существенное влияние как на дисперсию, так и на степень затухания магнитостатических волн в пленке феррита. На рис. 1 показаны типичные АЧХ сигнала передачи волн для свободной пленки ЖИГ

(1) и при наложении пленки $p\text{-GaAs}$ с $\mu \approx 80 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ и $N_e \approx 7.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (2). Видно, что наличие пленки полупроводника приводит к сужению АЧХ со стороны больших частот, в то время как минимальные вносимые потери практически не возрастают. Это обусловлено изменением дисперсии и увеличением затухания ПМСВ с волновыми числа-

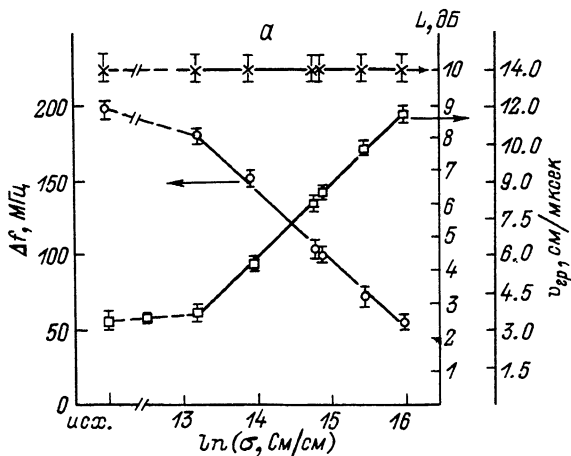
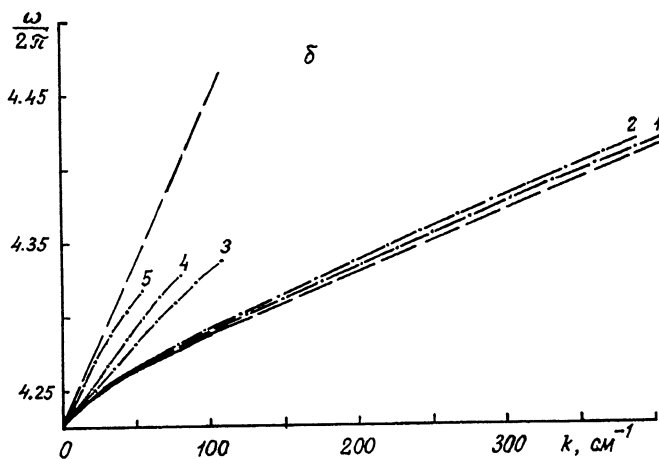


Рис. 2

а) Зависимость ширины АЧХ Δf , минимальных вносимых потерь L и групповой скорости $v_{гр}$ ПМСВ от проводимости полупроводника σ в тонкопленочной структуре ЖИГ - n -GaAs.



б) Дисперсия ПМСВ свободной пленки ЖИГ (1) и в тонкопленочной структуре ЖИГ - n -GaAs при разных проводимостях

σ ($\frac{см}{см}$): 2 - $5.5 \cdot 10^3$; 3 - $2.7 \cdot 10^4$; 4 - $5.1 \cdot 10^4$; 5 - $9.0 \cdot 10^4$.

Пунктирные кривые соответствуют расчетной дисперсии ПМСВ в свободной и металлизированной пленках ЖИГ.

ми $k \geq 50 \text{ см}^{-1}$. Рис. 2, а демонстрирует зависимость ширины АЧХ Δf , измеренной по уровню -25 дБ , минимальных вносимых потерь ϵ и максимальной величины групповой скорости $v_{гр}$ ПМСВ от проводимости σ пленки $\mu\text{-GaAs}$. Изменение σ полупроводника в пределах $(0.5-9.0) \cdot 10^4 \frac{\text{см}}{\text{М}}$ привело к сужению АЧХ в ≈ 4 раза и увеличению групповой скорости волн также в ≈ 4 раза. Отметим, что аналогичный эффект увеличения $v_{гр}$ ПМСВ на 25% наблюдался в [5]. Рассчитанные по экспериментальным данным дисперсионные кривые ПМСВ на границе феррит-полупроводник показаны на рис. 2, б. С увеличением σ дисперсионная кривая ПМСВ плавно смещается от дисперсионной кривой волны на свободной поверхности феррита ($\sigma = 0$) в сторону дисперсионной кривой на металлизированной поверхности феррита ($\sigma = \infty$).

Для объяснения наблюдаемых эффектов используем дисперсионное уравнение ПМСВ в планарной структуре феррит-полупроводник, полученное стандартным методом в магнитостатическом безобменном приближении без учета магнитных потерь:

$$e^{2kld} = \frac{\mu - s\mu_a + 1}{\mu + s\mu_a + 1} \cdot \frac{\mu + s\mu_a - \xi}{\mu - s\mu_a + \xi}, \quad \text{где} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{k}{\beta} \cdot \frac{(\beta+k)e^{2\beta a} - (\beta-k)}{(\beta+k)e^{2\beta a} + (\beta-k)}, \quad \beta^2 = k^2 - \frac{2i}{\delta^2}, \quad \delta^2 = \frac{c^2}{4\pi\omega\sigma},$$

$$\mu = 1 + \frac{\omega_H \omega_M}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \mu_a = \frac{\omega \omega_M}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \omega_H = \gamma H,$$

$\omega_M = \gamma 4\pi Ms$, $k = k' + ik''$ - комплексное волновое число, $\gamma = 2.8 \frac{\text{МГц}}{\text{Э}}$, c - скорость света, параметр $s = \pm 1$ задает направление распространения волны. Влияние пленки полупроводника на дисперсию и затухание волны описывается комплексным параметром ξ , коэффициент β определяет уменьшение амплитуды высокочастотных полей вглубь полупроводника, δ - глубина скин-слоя. Представленное уравнение позволяет рассчитать дисперсию $k'(\omega)$ и обусловленный проводимостью пространственный декремент затухания $k''(\omega)$ ПМСВ в структуре с произвольным соотношением параметров. В предельных случаях (1) переходит в известные дисперсионные уравнения для ПМСВ, распространяющихся в свободной ($\sigma \rightarrow 0$, $\xi \rightarrow 1$) или металлизированной с одной стороны ($\sigma \rightarrow \infty$, $\xi \rightarrow 0$) пленках феррита.

В представленных экспериментах толщина скин-слоя полупроводника менялась в пределах $\delta = 19-76 \text{ мкм}$, т.е. была сравнима с толщиной пленки $\mu\text{-GaAs}$. Поэтому для расчета дисперсии ПМСВ (рис. 2 б) следует использовать уравнение (1). Однако характер влияния полупроводника на характеристики МСВ легко устано-

вить для предельного случая тонкой пленки полупроводника а δ , когда высокочастотные поля экранируются лишь частично и закон дисперсии близок к дисперсии ПМСВ $k'_0(\omega)$ в свободной пленке феррита. При этом параметр, описывающий влияние полупроводника на характеристики ПМСВ, принимает вид $\xi = 1 - \frac{a\sigma^2}{k}$ [6]. После линеаризации уравнения (1) для длинных волн $ka \ll 1$ получаем:

$$k''d = \frac{ad}{2\delta^2 k'_0} \cdot \frac{\omega^2 - \omega_H^2 - \omega_H \omega_M}{(\omega_H + \frac{\omega_M}{2})^2 - \omega^2} \approx \frac{ad}{\delta^2}, \quad (2)$$

$$k'd = k_0 d - \left(\frac{ad}{\delta^2}\right)^2 \cdot \frac{\omega + \omega_H}{\omega + \omega_H + \frac{\omega_M}{2}} \cdot \frac{1}{k'_0 d}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что декремент затухания k'' ПМСВ в структуре феррит-полупроводник линейно растет с увеличением проводимости σ и толщины полупроводника a , происходит уменьшение волнового числа k' и соответствующее увеличение групповой скорости $v_{гр}$ волны на той же частоте ω , что и наблюдалось в эксперименте. Наблюдаемое монотонное увеличение $v_{гр}$ ПМСВ с малыми k' сложно реализовать другим способом, например, с помощью изменения зазора в структуре пленка феррита-металлический экран, где при $k' \rightarrow 0$ $v_{гр}$ всегда равна групповой скорости волны на металлизированной поверхности феррита.

Таким образом, показано, что взаимодействие электронов проводимости с магнитостатическими волнами позволяет в широких пределах управлять дисперсионными характеристиками и затуханием МСВ в тонкопленочной структуре феррит-полупроводник.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Беспятых Ю.И., Вашковский А.В., Зубков В.И., Кильдишев В.Н., // Микроэлектроника. 1978. Т. 7. В. 5. С. 430-443.
- [2] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. // РИЭ. 1978. Т. 23. В. 5. С. 897-917.
- [3] De W a m e s R.E., W o l f r a m T. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. N 13. P. 5243-5246.
- [4] M a s u d a M., C h a n g N.S., M a t s u o Y. // IEEE Trans. 1974. V. MTT-22. N 2. P. 132-135.
- [5] Вашковский А.В., Зубков В.И., Кузнецов П.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. В. 20. С. 1231-1234.
- [6] Бугаев А.С., Галкин О.Л., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. В. 8. С. 485-488.