

05.2; 05.4

© 1992

УГЛОВАЯ И ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТИ ЗАТУХАНИЯ  
 ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН  
 В СТРУКТУРЕ ФЕРРИТ -  
 ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИК

В.И. Зубков, Б.М. Лебедь,  
 Э.Г. Локк, В.Д. Харитонов,  
 В.И. Щеглов, С.В. Яковлев

В связи с перспективностью использования слоистых структур феррит - высокотемпературный сверхпроводник (ниже структур Ф-ВТСП) для создания различных устройств спинволновой электроники СВЧ [1] представляет интерес исследование влияния движения вихрей Абрикосова на распространение поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ) в таких структурах. Хотя этому исследованию и посвящен ряд теоретических [2-4] и экспериментальных [3, 5-8] работ, некоторые аспекты взаимодействия ПМСВ и вихрей Абрикосова остались невыясненными из-за различных трудностей. Ниже приведены результаты экспериментального исследования угловой и частотной зависимостей затухания ПМСВ в структуре Ф-ВТСП, обусловленного движением таких вихрей.

Экспериментально установлено, что в структурах Ф-ВТСП возбуждаются ПМСВ с малыми волновыми числами  $k$  (в [3, 6, 7] с  $k < 50 \text{ см}^{-1}$ , а в [5, 8] с  $k < 300 \text{ см}^{-1}$ ). Закон дисперсии таких ПМСВ практически неотличим от законов дисперсии ПМСВ в структурах феррит-металл и феррит-диэлектрик-металл [3-5, 8]. Однако неожиданно большое затухание ПМСВ в структуре Ф-ВТСП по сравнению с их затуханием в ферритовой пленке и в структуре феррит-металл [3-8] правильно оценивается только на основе закона дисперсии ПМСВ в структуре Ф-ВТСП [3, 4]. Наиболее четко объяснение такого поведения дисперсии и затухания ПМСВ дано в [4], где получено дисперсионное соотношение для ПМСВ в структуре Ф-ВТСП с учетом движения вихрей Абрикосова:

$$i \zeta D_0 - D_m = 0, \quad (1)$$

где

$$\zeta = B_0 \Phi_0 k \sin^2 \varphi [4\pi d_c (\omega \eta - i\beta)]^{-1}, \quad (2)$$

$D_0 = 0$  и  $D_m = 0$  - дисперсионные соотношения для ПМСВ в ферритовой пластине и в структуре феррит-металл (идеальный),  $B_0$  -

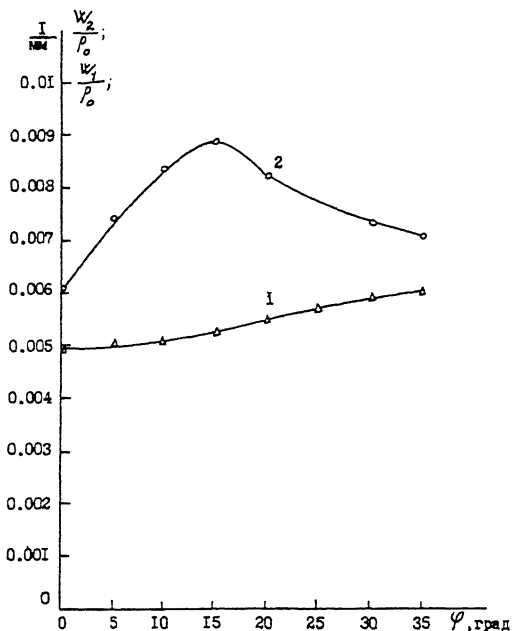


Рис. 1. Зависимости отношений погонных затуханий  $W_{1,2}$  к мощности СВЧ сигнала  $P_0$  от угла  $\varphi$ . Кривые: 1 -  $W_1 P_0^{-1}$ ; 2 -  $W_2 P_0^{-1}$ .

статическая индукция магнитного поля в ВТСП,  $\Phi_0$  - квант магнитного потока,  $k$  - волновое число ПМСВ,  $\varphi$  - угол между волновым вектором  $\vec{k}$  и нормалью к полю подмагничивания  $H_0$ ,  $\omega = 2\pi f$  - частота ПМСВ,  $\eta$  - коэффициент вязкого трения в ВТСП,  $\beta$  - коэффициент жесткости, учитывающий пиннинг,  $d_c$  - толщина пленки ВТСП.

Из (1) видно, что при  $\zeta \rightarrow 0$  влияние ВТСП на дисперсию ПМСВ в ферритовом слое аналогично влиянию идеального металла, а при  $\zeta \rightarrow \infty$  влияние ВТСП отсутствует.

Если пиннинг настолько велик, что  $\beta \gg \omega \eta$ , то „вихревые“ потери ПМСВ малы, и влияние ВТСП обуславливает закон дисперсии ПМСВ, отличный как от  $\mathcal{D}_0 = 0$ , так и от  $\mathcal{D}_m = 0$ . Во всех известных экспериментах [3, 5-8] такая ситуация не наблюдалась.

Если пиннинг мал, то  $\zeta$  вещественно, и влияние ВТСП обуславливает закон дисперсии ПМСВ, близкий к  $\mathcal{D}_m = 0$ , при наличии затухания ПМСВ, вызванного движением вихрей Абрикосова. При  $\zeta \ll 1$  это затухание  $\Gamma(\omega, \varphi)$  равно:

$$\Gamma(\omega, \varphi) = \zeta \mathcal{D}_0(\omega, \varphi) [\partial \mathcal{D}_m(\omega, \varphi) / \partial \omega]^{-1}. \quad (3)$$

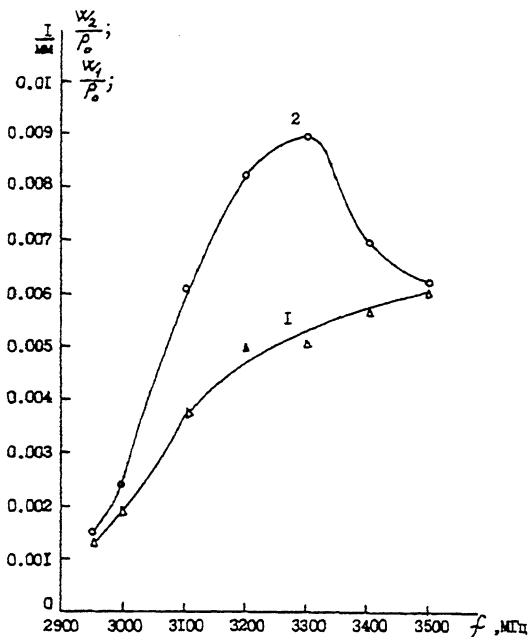


Рис. 2. Зависимости отношений погонных затуханий  $W_{1,2}$  к мощности СВЧ сигнала  $\rho_0$  от частоты ПМСВ  $f$ . Кривые: 1 -  $W_1 \rho_0^{-1}$ ; 2 -  $W_2 \rho_0^{-1}$ .

С одной стороны,  $\Gamma(\omega; \varphi) = 0$  при  $\zeta = 0$  (из-за того, что угол  $\varphi = 0$  и сила Лоренца, действующая на вихри Абрикосова, равна нулю), и монотонно растет с увеличением угла  $\varphi$ . С другой стороны, при приближении угла  $\varphi$  к углу отсечки  $\varphi_{отс}$  длина ПМСВ стремится к нулю, так что она не может проникать в ВТСП и тратить свою энергию на движение вихрей Абрикосова, поэтому и затухание  $\Gamma(\omega, \varphi_{отс})$  также должно стремиться к нулю. Это означает, что функция  $\Gamma(\varphi)$  имеет максимум при некотором угле  $\varphi_{max}$ , удовлетворяющем неравенству:

$$0 < \varphi_{max} < \varphi_{отс}. \quad (4)$$

Из (1) и (2) следует, что при любом угле  $\varphi$  в пределах (4) максимум должна иметь и зависимость  $\Gamma(\omega)$ . Хотя формулы (1)–(4) строго справедливы для тонкой пленки ВТСП ( $d_c < k^{-1}$ ), качественные выводы сохраняются и для случая „толстого“ ВТСП.

Эксперименты по измерению зависимостей  $\Gamma(\omega)$  и  $\Gamma(\varphi)$ , как и дисперсии в [8], проводились на частотах 2–4 ГГц при температуре  $T = 77$  К. Структура Ф-ВТСП состояла из контактирующих пленки железиттриевого граната (ЖИГ) с размерами

25x25 мм<sup>2</sup> и толщиной 12.5 мкм с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0$ , равной 1830 Гс при T=300 К и 2565 при T=77 К, и пластины из керамики состава  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  размерами 3x3x10 мм<sup>3</sup>, имеющей температуру перехода в сверхпроводящее состояние (нижняя граница)  $T_c=90$  К и ширину перехода  $\Delta T_c=4$  К. Постоянное подмагничивающее поле  $H_0$ , равное 366 Э, прикладывалось в плоскости пленки ЖИГ. Возбуждение и прием ПМСВ осуществлялись подвижными проволочными антеннами диаметром 12 мкм и длиной 4 мм, ориентированными под углом  $\varphi$  к полю  $H_0$  и ребру в 10 мм образца ВТСП. Дисперсия ПМСВ в этой структуре изучена в [8]. Определялись зависимости погонных (на единичный отрезок пути пучка ПМСВ)затуханий мощности при прохождении СВЧ-сигнала через пленку ЖИГ ( $W_1$ ) и структуру Ф-ВТСП ( $W_2$ ) от частоты ПМСВ  $f$  и угла  $\varphi$ . При этом сначала возбуждающая антенна ставилась под произвольным углом  $\varphi$  в пределах (4) и снимались зависимости  $W_1(f)$  и  $W_2(f)$ , затем частота ПМСВ устанавливалась равной частоте  $f_{max}$ , на которой наблюдался максимум зависимости  $W_2(f)$ , и снимались зависимости  $W_1(\varphi)$  и  $W_2(\varphi)$  (смотри ниже рис. 1), и, наконец, устанавливался угол  $\varphi$ , равный углу  $\varphi_{max}$ , на котором наблюдался максимум зависимости  $W_2(\varphi)$ , и снова снимались зависимости  $W_1(f)$  и  $W_2(f)$  (рис. 2). На рис.1 и 2 погонные затухания  $W_1$  и  $W_2$  нормированы на мощность  $P_0$ , поступающую на возбуждающую МСВ антенну (соответственно кривые 1 и 2). Очевидно, что отношения  $W_{1,2}/P_0$  прямо пропорциональны  $T(\omega, \varphi)$ . На рис. 1 частота ПМСВ  $f = f_{max}=3300$  МГц, а на рис. 2 угол  $\varphi = \varphi_{max}=15^\circ$ . Из рис. 1 и 2 видно, что эксперимент подтверждает монотонный характер зависимостей  $W_1(f)$  и  $W_1(\varphi)$ , как это следует из соотношения  $D_0=0$ , и немонотонный характер зависимостей  $W_2(f)$  и  $W_2(\varphi)$ , как это следует из (1) и (3) и [4]. Однако существуют и некоторые отличия между экспериментальными данными и результатами, предсказываемыми теорией [4]. Так из рис. 1 видно, что при углах  $\varphi=0$  и  $\varphi \rightarrow \varphi_{отс}$  имеет место „вихревое“ затухание ПМСВ (кривая 2 идет выше кривой 1), хотя по [4] этого не должно быть (вихревое затухание ПМСВ при  $\varphi=0$  впервые обнаружено в [7]). Возможно, что оно связано с существованием вихрей Джозефсона.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Альтман А.Б., Лебедь Б.М., Никифоров А.В., Яковлев И.А., Яковлев С.В. // СФХТ (сверхпроводимость: физика, химия, техника). 1990. Т. 3. № 10. Ч. 1. С. 2205-2216.
- [2] Попков А.Ф. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 5. С. 9-14; // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 9. С. 112-117.

- [3] Анфиногенов В.Б., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Котелянский И.М., Ползикова Н.И., Суханов А.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 14. С. 24-28; // СФХТ. 1989. Т. 2. № 12. С. 5-14.
- [4] Беспятых Ю.И., Симонов А.Д., Харитонов В.Д. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 23. С. 27-32.
- [5] Лебедь Б.М., Яковлев С.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 19. С. 27-29.
- [6] Чивилева О.А., Гуревич А.Г., Анисимов А.Н., Карманенко С.Ф. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 3. С. 17-20.
- [7] Альтман А.Б., Лебедь Б.М., Никифоров А.В., Яковлев С.В. // СФХТ. 1990. Т. 3. № 4. С. 564-569.
- [8] Вашковский А.В., Зубков В.И., Лебедь Б.М., Локк Э.Г., Шеглов В.И., Яковлев С.В. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 9. С. 67-70.

Институт радиотехники  
и электроники РАН  
(Фрязинская часть)

Поступило в Редакцию  
13 мая 1992 г.