

Распространение магнитоэлектронных волн в структуре феррит–высокотемпературный сверхпроводник при наличии транспортного тока в сверхпроводнике

© А.В. Вашковский, В.И. Зубков, Э.Г. Локк

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
141120 Фрязино, Московская обл., Россия

(Поступила в Редакцию 24 апреля 1997 г.
В окончательной редакции 8 июля 1997 г.)

В пленочной структуре феррит–высокотемпературный сверхпроводник исследовано влияние транспортного тока в сверхпроводнике на амплитудно-частотную характеристику и дисперсию поверхностных магнитоэлектронных волн (МСВ), распространяющихся в ферритовой пленке. Обнаружено, что характер энергообмена между МСВ и сверхпроводящей пленкой существенно изменяется в зависимости от величины транспортного тока; в частности, в одном интервале значений тока энергия может передаваться как от МСВ сверхпроводнику, так и обратно, а в другом интервале значений тока наблюдается только эффективное положение энергии МСВ сверхпроводником.

Открытие в 80-х годах высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), технология изготовления и параметры которых в основном уже изучены [1–4], привело к появлению исследований физических явлений и эффектов, возникающих в слоистых структурах на основе ВТСП. В частности, статические и динамические свойства составных структур ферромагнетик–ВТСП резко отличаются от свойств структур ферромагнетик–нормальный металл, что в значительной мере связано с такими особенностями поведения сверхпроводников второго рода в магнитном поле, как выталкивание магнитного потока из образца (эффект Мейснера–Оксенфельда) и возникновение смешанного состояния в интервале магнитных полей $H_{c1} < H < H_{c2}$, когда проникновение магнитного потока в ВТСП осуществляется посредством вихрей Абрикосова, или флюксонов (H_{c1} и H_{c2} — нижнее и верхнее критические поля сверхпроводника соответственно).

Значительное число работ, в которых исследовались свойства структур феррит–ВТСП, было посвящено анализу взаимодействия решетки вихрей сверхпроводника с обменными и безобменными магнитоэлектронными волнами (МСВ) в ферритовой пленке. Идеи, развитые в этих работах, в основном заключаются в следующем: 1) принципиально возможно осуществить усиление МСВ либо при движении магнитных вихрей со скоростью, сравнимой с фазовой скоростью распространения МСВ (черенковский механизм усиления) [5], либо за счет возникновения неустойчивости МСВ при наличии на вольт-амперной характеристике сверхпроводника участка с отрицательной дифференциальной проводимостью [6,7]; 2) вихри сверхпроводника могут совершать вынужденные колебания под действием полей МСВ (этот эффект часто называют увлечением вихрей МСВ) [8,9], при этом в сверхпроводнике возникает эдс, экспериментально обнаруженная в [10]; 3) возможно возбуждение МСВ в ферритовой пленке за счет рассеяния однородного высокочастотного магнитного поля на неподвижных вих-

рях [11–13], причем в результате резонансного взаимодействия МСВ с вихрями могут возбуждаться и короткие обменные МСВ [9,14]; 4) энергия МСВ может эффективно передаваться сверхпроводнику путем взаимодействия с движущимися вихрями или рассеиваться на решетке вихрей [5,15–17], причем передаваемая энергия может быть сравнимой по величине с собственным затуханием МСВ [17].

В ряде работ исследовались дисперсия и затухание МСВ в структуре феррит–ВТСП [17–24], причем в некоторых случаях в спектре МСВ наблюдались пики поглощения энергии МСВ [19,20].

Однако до сих пор не изучено влияние транспортного тока в сверхпроводнике на распространение МСВ в структуре феррит–ВТСП. Результаты экспериментов, поставленных с целью исследования этого влияния, описываются в настоящей работе.

1. Экспериментальная установка, параметры структур феррит–ВТСП, метод измерения дисперсии

Эксперименты проводились на установке, позволяющей измерять амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) коэффициента передачи при температурах $t = 77.4$ и $\cong 300$ К. Исследуемые гибридные пленочные структуры феррит–ВТСП реализовывались при механическом прижиме пленки ВТСП к ферритовой пленке в пределах площади их соприкосновения (рис. 1). Намагничивание структур феррит–ВТСП осуществлялось однородным магнитным полем H_0 величиной 210 Ое, приложенным в плоскости пленок. МСВ, распространяющиеся через структуру феррит–ВТСП, возбуждались и принимались расположенными на свободной поверхности ферритовой пленки подвижными антеннами (рис. 1), которые имели преобразователи из позолоченной вольфрамовой проволоки длиной 3.5 mm

Параметры пленок ВТСП

Параметры	ВТСП № 1	ВТСП № 2	ВТСП № 3	ВТСП № 4	ВТСП № 5	ВТСП № 6
Состав ВТСП	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_7$	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_7$
Толщина ВТСП d , μm	0.8	0.8	0.8	2.0	0.5	1.0
Размеры ВТСП, μm	4.5×15	5.3×12.8	5×15	4×20	5.5×10.5	5×6
Состав подложки	MgO	Al_2O_3	Al_2O_3	MgO	MgO	MgO
Температура перехода T , К	87	80	89	90	93	91
Критический ток I_{cr} , А	0.96	1.5	0.94	1.15	0.295	0.46
Критическая плотность тока J_{cr} , 10^4 A/cm^2	2.67	3.58	2.35	1.44	1.07	0.92
Удельное сопротивление ρ_{hisc}^{300} , $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$	8.35	11.69	10.6	24.1	7.8	36.2

и толщиной $12 \mu\text{m}$, находившиеся на расстоянии 9 mm друг от друга. Механическая система позволяла перемещать антенны во взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости пленок и поворачивать их вокруг оси, перпендикулярной поверхности пленок. Измерения при $t = 77.4 \text{ K}$ проводились без использования термостата при погружении СВЧ-макета в сосуд, заполненный жидким азотом. Используемый способ охлаждения позволял использовать при $t = 77.4 \text{ K}$ все преимущества описанной экспериментальной установки (подвижность антенн и пленки ВТСП относительно ферритовой пленки).

В качестве ферритовой пленки в экспериментах использовалась выращенная на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной $10.2 \pm 0.1 \mu\text{m}$ с шириной линии резонанса $2\Delta H = 0.75 \text{ Oe}$ и намагниченностями насыщения $4\pi M_0^{300} = 1843 \text{ G}$ при $t = 300 \text{ K}$ и

$4\pi M_0^{77} = 2480 \text{ G}$ при $t = 77.4 \text{ K}$. Пленка ЖИГ имела форму, близкую к треугольной (со сторонами $\cong 17, 16$ и 13 mm), и ориентировалась таким образом, что ни одна из сторон пленки не была параллельной возбуждающему и приемному преобразователям. Такая ориентация и неправильная форма пленки препятствовали возникновению резонансных эффектов при распространении МСВ, которые наблюдаются в виде сильной изрезанности АЧХ (ослабление в минимумах АЧХ достигает уровня электромагнитной наводки) при использовании образцов прямоугольной формы с шириной, равной длине преобразователя. В выбранной пленке ЖИГ при $t = 77.4 \text{ K}$ возбуждались МСВ с $k \leq 500 \text{ cm}^{-1}$, что характерно не для любых пленок ЖИГ: в большинстве исследованных нами пленок возбуждались МСВ лишь с волновыми числами $k \leq 50 \text{ cm}^{-1}$, что происходило, по-видимому, из-за возникновения в пленках ЖИГ упругих напряжений, обусловленных наличием даже незначительных примесей Ga, Sc, La, Pb и др. АЧХ магнитостатических волн в использованной пленке как при $t = 300 \text{ K}$, так и при $t = 77.4 \text{ K}$ имела небольшую изрезанность из-за интерференции с электромагнитной наводкой с перепадом ослабления между соседними минимумами и максимумами $\cong 2-4 \text{ dB}$, что характерно для выбранного расстояния между преобразователями. Отмечалось также понижение общего уровня АЧХ на $10-15 \text{ dB}$ при возбуждении МСВ с волновыми числами $\cong 20 \text{ cm}^{-1}$ из-за дифракционной расходимости волнового пучка.

Все исследованные структуры феррит-ВТСП были реализованы на основе описанной выше пленки ЖИГ и отличались друг от друга лишь параметрами ВТСП, которые приведены в таблице. Использовались монокристаллические пленки ВТСП, изготовленные методом магнетронного распыления. Плоскость ab , которая обуславливает анизотропию и слоистую структуру монокристаллических ВТСП и определяется расположением плоскостей атомов меди и кислорода в элементарной ячейке кристалла, была параллельной плоскости подложки, что подтверждалось сравнением приведенных в таблице величин удельных сопротивлений пленок ρ_{hisc}^{300} при $t = 300 \text{ K}$ с данными, полученными в [25]. Критические поля H_{c1} и H_{c2} при приложении поля H_0 параллельно плоскости ab имеют величины $H_{c1} \cong 50-120 \text{ Oe}$ и

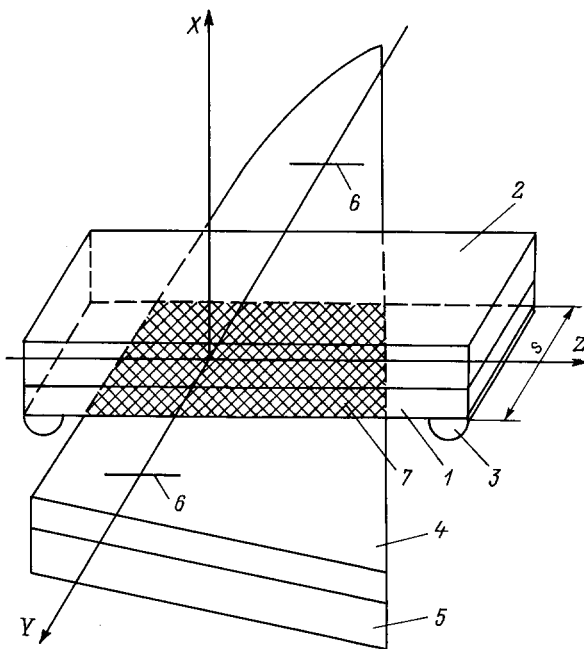


Рис. 1. Схема экспериментального макета. 1 — пленка ВТСП, 2 — подложка пленки ВТСП, 3 — контакты, 4 — ЖИГ, 5 — подложка ГГГ, 6 — возбуждающий и приемный преобразователи, 7 — среда феррит-ВТСП (заштрихована).

$H_{c2} \cong 160 \text{ kOe}$ [26,27]. Таким образом, при выбранной величине поля $H_0 = 210 \text{ Oe}$ в пленках ВТСП существовала вихревая структура. Контроль сверхпроводящих свойств пленок проводился по эффекту Мейсснера–Оксенфельда. Для защиты ВТСП от воздействия паров воды на поверхность большинства пленок был напылен слой CeO_2 толщиной не более 100 \AA , что было намного меньше длины волны самых коротких из наблюдавшихся МСВ и не оказывало влияния на результаты экспериментов. Для пропускания через пленку ВТСП тока на ее краях (параллельно коротким сторонам образца) изготавливались контакты путем напыления полосок золота шириной $\cong 2 \text{ mm}$ (рис. 1), на которые в свою очередь напылялись медь, а затем индий. Со стороны подложки образец ВТСП был приклеен к держателю, вместе с которым мог подниматься над пленкой ЖИГ, что использовалось для определения дисперсии в среде феррит–ВТСП.

Ток в пленках ВТСП создавался с помощью источника постоянного стабилизированного напряжения, которое могло меняться от 0.1 до 30 V . Для регулирования и измерения силы тока в цепь последовательно с пленками включались реостат ($\rho = 30 \Omega$) и амперметр.

В среде феррит–ВТСП, так же как и в среде феррит–металл, измерение дисперсии МСВ путем перемещения одной из антенн технически неосуществимо. При использовании интерференционного метода [21], обычно предполагается, что началу спектра МСВ соответствует величина волнового числа $k = 0$, и по этому опорному значению находятся остальные k . В настоящей работе опорное значение k определяется экспериментально описываемым далее способом. На некоторой фиксированной частоте при расстоянии между преобразователями l набег фазы для свободной ферритовой пленки равен

$$\chi_f = k_f l, \quad (1)$$

где k_f — волновое число в свободной ферритовой пленке. При распространении МСВ через структуру феррит–ВТСП фазовый набег определяется выражением

$$\chi_{f-h} = k_f(l-s) + k_{f-h}s, \quad (2)$$

где k_{f-h} — неизвестное волновое число в среде феррит–ВТСП, s — протяженность среды феррит–ВТСП, равная ширине пленки ВТСП. Разность фаз $\Delta\chi = \chi_{f-h} - \chi_f$ может быть измерена при плавном поступательном поднятии пленки ВТСП над ферритовой пленкой на высоту в несколько миллиметров (когда МСВ перестанут "ощущать" наличие "экрана"), а измеренное значение k_{f-h} в дальнейшем может использоваться в качестве опорного при определении волновых чисел на других частотах по ФЧХ. Следует лишь отметить, что частоту f , на которой производится измерение $\Delta\chi$, необходимо выбирать из условия однозначности функции $k(f)$ при любых зазорах между ферритовой пленкой и ВТСП (при измерениях это легко контролируется по отсутствию разрывов на ФЧХ в окрестности частоты f).

2. Распространение МСВ через структуру феррит–ВТСП

Далее описывается распространение поверхностных МСВ (ПМСВ) через структуру ЖИГ–ВТСП № 4 для случая, когда волны распространяются перпендикулярно H_0 , а МСВ-преобразователи и длинная сторона пленки ВТСП ориентированы параллельно полю H_0 . Особенности и отличия, имевшие место при распространении МСВ через другие структуры ЖИГ–ВТСП, будут отмечаться по ходу изложения.

Опишем вначале распространение ПМСВ через структуру феррит–ВТСП при $t \cong 300 \text{ K}$. Эксперименты по

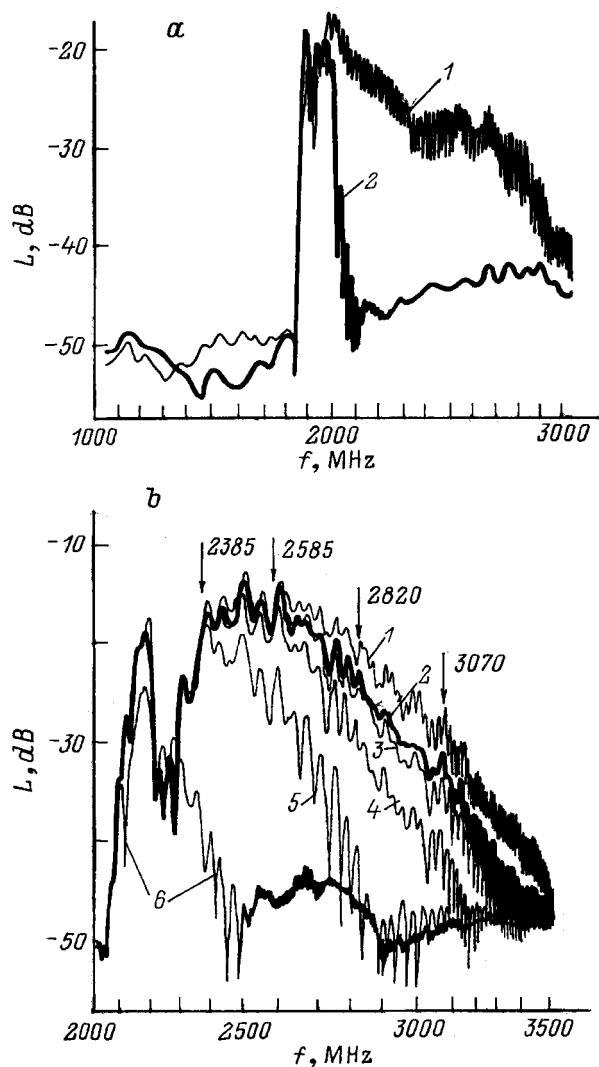


Рис. 2. Эпюры АЧХ-коэффициента передачи ПМСВ при $t = 300$ (а) и 77.4 K (б) в постоянном магнитном поле $H_0 = 210 \text{ Oe}$. а) 1 — в свободной пленке ЖИГ, 2 (жирным) — при прохождении через структуру ЖИГ–ВТСП № 4; б) 1 — в свободной пленке ЖИГ (приведен лишь фрагмент АЧХ от 2600 до 3500 MHz), 2–6 — при прохождении через структуру ЖИГ–ВТСП № 4 при наличии в пленке ВТСП тока различной величины. 1 (А): 2 — 0, 3 — 0.5, 4 — 0.7, 5 — 1, 6 — ВТСП в резистивном состоянии.

казали, что пленки ВТСП в случае, когда они плотно прижаты к пленкам ЖИГ, являются эффективными поглотителями энергии МСВ. Сравнение АЧХ коэффициента передачи ПМСВ для случаев распространения волны в свободной пленке ЖИГ и через структуру феррит-ВТСП (т.е. когда в СВЧ-макете на рис. 1 пленка ВТСП отсутствует и присутствует) показывает, что во втором случае энергия ПМСВ на частотах f , больших некоторого значения $f_b \cong 2150$ МГц, полностью поглощается пленкой ВТСП (эпюры 1 и 2 на рис. 2, а соответственно). Для определения величины волнового числа k_b , соответствующего частоте f_b , были измерены дисперсионные зависимости ПМСВ в среде феррит-ВТСП $f_{f-s}^{300}(k_{f-s}^{300})$ и в свободной ферритовой пленке $f_f^{300}(k_f^{300})$. Эти зависимости отличались незначительно лишь для $f < 2050$ МГц (экспериментальные точки для $f_{f-s}^{300}(k_{f-s}^{300})$ и для $f_f^{300}(k_f^{300})$ на рис. 3), а для $f > 2050$ МГц полностью совпадали (поэтому экспериментальные точки для $f_{f-s}^{300}(k_{f-s}^{300})$ не приведены при $f > 2050$ МГц). Величина k_b оказалась равной $\cong 110$ см⁻¹. Аналогичный характер зависимость $f_{f-s}^{300}(k_{f-s}^{300})$ имела и в других структурах феррит-ВТСП, а величины k_b лежали в пределах 100–130 см⁻¹. Дисперсия $f_{f-s}^{300}(k_{f-s}^{300})$ хорошо аппроксимируется расчетной дисперсией для среды феррит-диэлектрик-металл с толщиной диэлектрического зазора $w \cong 500$ мкм, в то время как при аналогичной аппроксимации дисперсии для среды феррит-ВТСП, реализованной на основе ВТСП-керамики, хорошее совпадение достигалось для $w = 73$ мкм [22].

Опишем теперь распространение ПМСВ через структуры феррит-ВТСП при $t = 77.4$ К. После перехода ВТСП в сверхпроводящее состояние ПМСВ с большими k начинали проходить через структуру феррит-ВТСП,

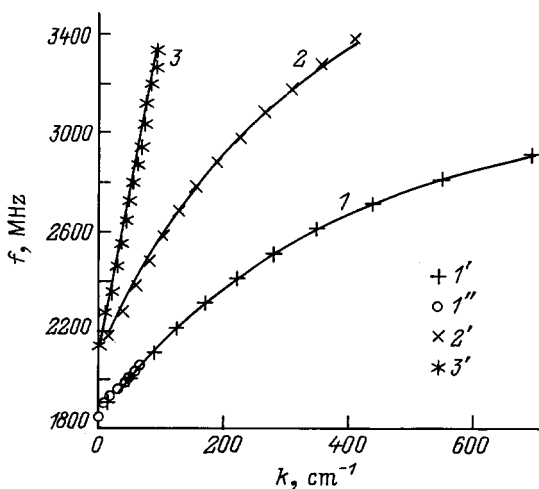


Рис. 3. Дисперсионные зависимости $f(k)$ поверхностных МСВ для поля $H_0 = 210$ Ое. Сплошные кривые — расчет, точки — эксперимент. 1, 1' — в свободной пленке ЖИГ при $t \cong 300$ К, 1'' — в структуре феррит-ВТСП при $t = 300$ К, 2, 2' — в свободной пленке ЖИГ при $t = 77.4$ К, 3 — в структуре феррит-металл при $t = 77.4$ К, 3' — в структуре феррит-ВТСП при $t = 77.4$ К.

что видно из сравнения АЧХ коэффициента передачи ПМСВ, распространяющейся в свободной пленке ЖИГ и через структуру феррит-ВТСП (кривые 1 и 2 на рис. 2, б соответственно). Измеренные дисперсионные зависимости ПМСВ в свободной пленке ЖИГ $f_f^{77}(k_f^{77})$ и в структуре ЖИГ-ВТСП № 4 $f_{f-s}^{77}(k_{f-s}^{77})$ показаны на рис. 3, где для сравнения приведены также рассчитанные дисперсии ПМСВ в свободной ферритовой пленке (кривая 2) и в структуре феррит-металл (кривая 3). Результаты, приведенные на рис. 3 и полученные при измерении дисперсии в других структурах феррит-ВТСП, показали хорошее совпадение зависимости $f_{f-s}^{77}(k_{f-s}^{77})$ с дисперсией в структуре феррит-металл, в то время как для сред феррит-ВТСП, реализованных на основе поликристаллических пленок и ВТСП-керамики, такое совпадение наблюдалось не всегда [22]. При измерении дисперсии в структуре феррит-диэлектрик-ВТСП, выполненном для двух толщин диэлектрического зазора ($w = 300$ и 130 мкм), также наблюдалось хорошее совпадение полученных зависимостей с аналогичными, рассчитанными для структуры феррит-диэлектрик-металл.

Анализируя описанные выше дисперсию структуры феррит-ВТСП и АЧХ, можно отметить, что, несмотря на заметное увеличение групповой скорости ПМСВ в среде феррит-ВТСП по сравнению с групповой скоростью в свободной ферритовой пленке, потери ПМСВ изменились незначительно, что видно из сравнения эпюр 1 и 2 на рис. 2, б. Однако то же наблюдалось и при использовании вместо пленки ВТСП металлической полосы такой же ширины. Это объясняется тем, что распространение ПМСВ через структуры феррит-ВТСП и феррит-металл сопровождается резким уменьшением волновых чисел до величин, при которых усиливается дифракционное расплывание волновых пучков, из-за чего часть энергии ПМСВ не попадает на приемный преобразователь. Кроме того, в структурах феррит-ВТСП, по-видимому, происходит электронное поглощение энергии МСВ, сходное с наблюдаемым в структурах феррит-полупроводник [21].

Рассмотрим теперь влияние транспортного тока в сверхпроводнике на характеристики ПМСВ. АЧХ коэффициента передачи ПМСВ, распространяющихся через структуру ЖИГ-ВТСП № 4, при наличии в пленке ВТСП постоянного транспортного тока I показаны на рис. 2, б (кривые 3–5). Как видно из этого рисунка, с увеличением величины тока возрастают потери ПМСВ, причем более значительное увеличение потерь наблюдается в высокочастотной части спектра. Эксперименты показали, что во всех исследованных пленках ВТСП можно создать постоянный транспортный ток I , не превышающий некоторого критического значения I_{cr} . При попытке установить в какой-либо из пленок ток, больший I_{cr} (например, увеличивая питающее напряжение), величина тока скачком становится равной $\cong 0.7I_{cr}$, а характер АЧХ поверхностных магнитостатических волн принимает вид (эпюра б на рис. 2, б), сходный с АЧХ ПМСВ при $t \cong 300$ К,

когда ВТСП находится в резистивном состоянии (эпоха 2 на рис. 2,а): в обоих случаях через структуру феррит–ВТСП не проходят ПМСВ с $k > k_b \cong 110 \text{ cm}^{-1}$, что легко установить по зависимостям $f(k)$ (кривые 1 и 2 на рис. 2). Это закритическое состояние ВТСП характеризуется переходом из сверхпроводящего в резистивное состояние, причем наблюдаемый переход не связан с увеличением тока I до величины, при которой возникает поле порядка H_{c2} и разрушается сверхпроводимость, а обусловлен наличием в электрической цепи контактов сверхпроводник–нормальный металл: с увеличением I выделяющееся на золотых контактах количество тепла растет пропорционально I^2 и в определенный момент достигает величины, при которой теплоотвод с помощью жидкого азота становится неэффективным. Известные методы получения больших плотностей тока J , использующие импульсное питающее напряжение и сужение рабочего участка пленки ВТСП [28], не применялись, поскольку резко уменьшили бы площадь соприкосновения феррита и ВТСП, ухудшив взаимодействие между МСВ и вихрями. Отметим, что эксплуатация образцов ВТСП в закритическом состоянии либо при токах, близких к критическому, приводит к выгоранию сверхпроводящего слоя вблизи золотых контактов, что можно установить по увеличению сопротивления ВТСП R_{hsc}^{300} при $t = 300 \text{ K}$. Поэтому в таблице параметров ВТСП приведены величины удельных сопротивлений ρ_{hsc}^{300} , определенные по измерениям R_{hsc}^{300} до начала эксплуатации пленок, и величины I_{cr} и соответствующей критической плотности тока J_{cr} , полученные при первом измерении.

Было обнаружено, что ни в одной из исследованных структур феррит–ВТСП изменение транспортного тока в диапазоне значений $0 < I < I_{cr}$ не оказывало влияния на ФЧХ коэффициента передачи ПМСВ, т.е. дисперсия ПМСВ всегда описывалась кривой 3, приведенной на рис. 3. Таким образом, приведенные на рис. 2,б изменения в АЧХ ПМСВ, происходящие с увеличением I , полностью обусловлены поглощением энергии МСВ сверхпроводящей пленкой (отражения волн от границы раздела сред феррит–феррит–ВТСП обнаружено не было, что характерно и для границы раздела сред феррит–феррит–металл при используемой геометрии [29–31]). Механизм передачи энергии МСВ сверхпроводнику могут иметь самую разнообразную природу [9,16,17]; в частности, за счет энергии МСВ может возникать движение решетки вихрей либо может происходить рассеяние МСВ на решетке вихрей и на неоднородностях, обусловленных наличием в пленке ВТСП примесей, дислокаций и зерен. С помощью анализа экспериментальных результатов можно попытаться установить, какой из механизмов передачи энергии МСВ сверхпроводнику реализуется в действительности. На рис. 4 приведены зависимости $P_a/P_0(J)$ для нескольких частот, где P_a/P_0 — отношение поглощаемой мощности к падающей мощности на каждый миллиметр протяженности среды феррит–ВТСП, а J — плотность тока в пленке ВТСП № 4, определяемая как отношение I к площади поперечного сечения ВТСП.

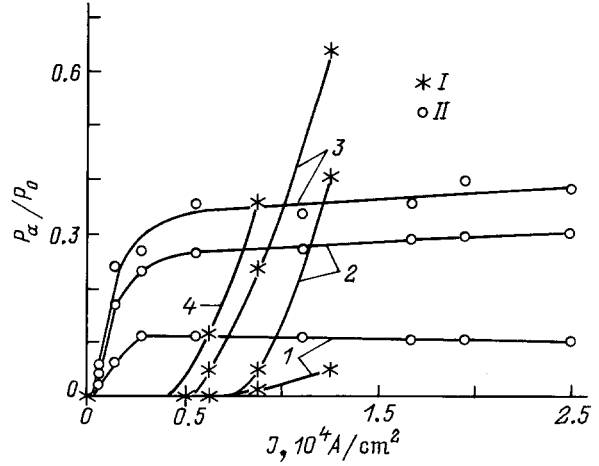


Рис. 4. Зависимости отношения поглощаемой мощности к падающей P_a/P_0 на миллиметр протяженности среды феррит–ВТСП от плотности тока J в структурах ЖИГ–ВТСП № 4 (I) и ЖИГ–ВТСП № 1 (II) для нескольких частот f (в скобках приведены значения волнового числа k , фазовой v_p и групповой v_g скоростей ПМСВ на данной частоте в структуре феррит–ВТСП) f (МГц): 1 — 2385 ($k = 18.14 \text{ cm}^{-1}$, $v_p = 82.61 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$, $v_g = 1.464 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$), 2 — 2585 ($k = 32.31 \text{ cm}^{-1}$, $v_p = 50.27 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$, $v_g = 1.362 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$), 3 — 2820 ($k = 50.31 \text{ cm}^{-1}$, $v_p = 35.22 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$, $v_g = 1.253 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$), 4 — 3070 ($k = 71.14 \text{ cm}^{-1}$, $v_p = 27.11 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$, $v_g = 1.15 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$).

Величина P_a/P_0 вычислялась по формуле

$$P_a/P_0 = 1 - 10^{-\Delta L/10}, \tag{3}$$

а ΔL определялось по экспериментальным измерениям как

$$\Delta L = (L - L_0)/\alpha. \tag{4}$$

Здесь L — ослабление на АЧХ коэффициента передачи ПМСВ при данной плотности тока J в пленке ВТСП, L_0 — аналогичное ослабление при $J = 0$, а α — отношение протяженности среды феррит–ВТСП s к единице протяженности 1 mm, для которой определяется величина P_a/P_0 . Частоты, на которых измерялись зависимости $\Delta L(J)$, показаны стрелками над кривыми АЧХ на рис. 2,б. Как видно из рис. 4, весь диапазон плотностей тока $0 < J < J_{cr}$ можно условно разбить на два интервала $0 < J < J_{th}$ и $J_{th} < J < J_{cr}$, в пределах которых изменение J приводит к характерному для данного интервала изменению значений P_a/P_0 . Величину пороговой плотности тока J_{th} для структуры ЖИГ–ВТСП № 4 можно считать в среднем равной $\cong 0.55 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ (J_{th} — изменяется незначительно — примерно от $0.7 \cdot 10^4$ до $0.4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ при изменении частоты ПМСВ). В первом интервале плотностей токов ($0 < J < J_{th}$) отношение P_a/P_0 в среднем было близко к нулю и носило флуктуационный, нестабильный во времени характер во всем частотном диапазоне существования ПМСВ, т.е. при измерении ослабления L на фиксированной частоте

можно было наблюдать хаотическое медленное (с частотой $\cong 1$ Hz) флуктуирование мгновенного значения L вокруг некоторого среднего значения L_{av} с максимальным отклонением от L_{av} в пределах $\pm L_d$. Таким образом, невозможно было получить две одинаковые АЧХ коэффициента прохождения ПМСВ для одного и того же значения J . Флуктуирование становилось заметным при $J \geq 0.1 \cdot 10^4$ А/см², немного усиливаясь с увеличением J , так что на некоторых частотах значения $L_{av}(J = J_{th})$ отклонялись от L_0 не более чем на ± 0.5 dB, а $L_d \cong 1.5$ dB. При $J > J_{th}$ флуктуирование постепенно прекращалось. На зависимостях $P_a/P_0(J)$ экспериментальные точки для интервала значений $0 < J < J_{th}$ не приведены, поскольку в среднем $P_a/P_0 \cong 0$. Некоторое представление о флуктуационном процессе можно получить из рис. 2, б, сравнивая АЧХ ПМСВ для значения $I = 0.5$ А, при котором флуктуирование еще сохранялось, с АЧХ для $I = 0$ (кривые 3 и 2 соответственно). Из этого рисунка видно, что на некоторых частотах L ($I = 0.5$ А) немного больше L_0 , а на некоторых немного меньше L_0 .

Во втором интервале плотностей токов $J_{th} < J < J_{cr}$ отношение P_a/P_0 сильно зависит от величины J , т.е. иначе говоря, сверхпроводящая пленка с увеличением J отбирает энергию у ПМСВ все в больших количествах (рис. 4 и кривые 4, 5 на рис. 2, б).

Исследование влияния транспортного тока на АЧХ ПМСВ и измерение зависимостей $P_a/P_0(J)$ в других структурах феррит-ВТСП, в частности в структуре ЖИГ-ВТСП № 1 (рис. 4), показали, что влияние транспортного тока на характеристики ПМСВ может отличаться от описанного на примере структуры ЖИГ-ВТСП № 4. Так, в структуре ЖИГ-ВТСП № 1 весь диапазон значений J можно условно разбить на три интервала: $0 < J < J_{th}$, $J_{th} < J < J_{sat}$ и $J_{sat} < J < J_{cr}$, где J_{sat} — насыщающая плотность тока. В первых двух интервалах характер зависимостей $P_a/P_0(J)$ был сходен с имевшим место в структуре ЖИГ-ВТСП № 4 с той лишь разницей, что пороговая плотность тока J_{th} имела сравнительно небольшую величину $\cong 0.035 \cdot 10^4$ А/см². В третьем интервале ($J_{sat} < J < J_{cr}$) вид АЧХ практически не менялся с увеличением транспортного тока и отношение P_a/P_0 оставалось вблизи уровня, достигнутого при $J = J_{sat}$. Отметим, что структура ЖИГ-ВТСП № 1 была единственной из исследованных, у которой на зависимостях $P_a/P_0(J)$ наблюдался участок, характерный для режима насыщения.

В структуре ЖИГ-ВТСП № 2 изменение транспортного тока в пределах $0 < I < I_{cr}$ не влияло на АЧХ ПМСВ, но при попытке установить ток, больший критического, АЧХ скачком принимала вид, подобный приведенному на рис. 2, б (эпюра б).

В структуре ЖИГ-ВТСП № 3 во всем интервале значений плотностей тока $0 < J < J_{cr}$ зависимость $P_a/P_0(J)$ носила флуктуационный характер, причем флуктуации начинали наблюдаться при $J \geq 0.6 \cdot 10^4$ А/см², значения L_{av} отличались от L_0 на ± 3 dB, а L_d было $\cong \pm 1.5$ dB.

В структуре ЖИГ-ВТСП № 5 зависимости $P_a/P_0(J)$ были аналогичны соответствующим для структуры ЖИГ-ВТСП № 4 и $J_{th} \cong 0.5 \cdot 10^4$ А/см².

В структуре ЖИГ-ВТСП № 6 пороговое значение плотности тока J_{th} было близко к нулю, а характер зависимости $P_a/P_0(J)$ во всем интервале значений $0 < J < J_{cr}$ напоминал квадратичные параболы.

Для структуры ЖИГ-ВТСП № 4 было проведено также исследование, при котором в геометрии, изображенной на рис. 1, возбуждающий и приемный преобразователи были ориентированы под углом $\varphi = 22^\circ$ относительно направления поля. В этом случае на границах раздела сред феррит-феррит-ВТСП происходило преломление ПМСВ, причем особенности этого преломления были такими же, как и на границах раздела сред феррит-металл, описанного в [31]. При такой геометрии влияние транспортного тока на характеристики ПМСВ в основном было подобным описанному выше для $\varphi = 0$, лишь значение пороговой плотности тока J_{th} уменьшилось в среднем до $0.35 \cdot 10^4$ А/см².

Отметим, что изменение направления тока I на противоположное ни для $\varphi = 22^\circ$, ни для $\varphi = 0$ не приводило к изменению характера влияния тока на распространение ПМСВ.

3. Анализ экспериментальных результатов

Несмотря на имеющиеся в характере влияния транспортного тока на характеристики ПМСВ в различных структурах феррит-ВТСП при $t = 77$ К, анализ экспериментальных результатов позволяет выявить ряд общих закономерностей.

1) Дисперсионные зависимости $f(k)$ в структурах феррит-ВТСП и феррит-диэлектрик-ВТСП, выполненных на основе монокристаллической пленки ВТСП, подобны аналогичным зависимостям в структурах феррит-металл и феррит-диэлектрик-металл с такой же толщиной диэлектрического слоя.

2) Наличие транспортного тока в пленке ВТСП не влияет на характер дисперсионной зависимости $f(k)$ в структуре феррит-ВТСП.

3) Между ПМСВ, распространяющимися в ферритовой пленке, и пленкой ВТСП, по которой течет транспортный ток, при определенных условиях может происходить эффективный энергообмен, причем, по видимому, в структурах феррит-ВТСП реализуется и может наблюдаться экспериментально несколько процессов энергообмена, обусловленных различными механизмами взаимодействия между ПМСВ и ВТСП.

4) Один из предполагаемых процессов, происходящих при наличии транспортного тока в пленке ВТСП, характеризуется тем, что энергия может передаваться как от ПМСВ сверхпроводнику, так и обратно; этот процесс имеет небольшую интенсивность и наблюдается как хаотическое медленное (с частотой $\cong 1$ Hz)

флуктуирование мгновенного значения ослабления L на АЧХ коэффициента передачи ПМСВ вокруг некоторого среднего значения L_{av} с максимальным отклонением от L_{av} в пределах $\pm L_d$. Обычно значения L_{av} отклоняются не более чем на 3 dB от ослабления L при $J = 0$, а L_d не превышает 1.5 dB. В некоторых структурах феррит–ВТСП этот процесс, по-видимому, имеет очень слабую интенсивность и практически не наблюдается.

5) Второй из предполагаемых процессов, имеющий место при более высоких плотностях транспортного тока, характеризуется тем, что энергия ПМСВ интенсивно поглощается пленкой ВТСП. Этот процесс наблюдается по возрастанию потерь на АЧХ ПМСВ с увеличением плотности тока J . Однако при некоторой "насыщающей" величине $J = J_{sat}$ реализуется максимально возможная скорость отбора энергии ПМСВ, и дальнейшее увеличение плотности тока к возрастанию потерь уже не приводит, что наблюдалось для структуры ЖИГ–ВТСП № 1. Количество отбираемой у ПМСВ энергии может зависеть от величины волнового числа k ПМСВ и величин ее фазовой v_p или групповой v_g скоростей, поскольку ясно, что при фиксированной скорости отбора энергия, отобранная у быстро бегущей волны, будет меньше энергии, отобранной у медленно бегущей волны. Измерение отношения P_a/P_0 подтверждает, что с увеличением частоты ПМСВ f (уменьшением v_p и v_g) отбираемая у волны энергия возрастает. Однако расчет величин v_p и v_g в структуре феррит–ВТСП (значения приведены в подписи к рис. 4) для тех частот, на которых измерялось отношение P_a/P_0 , показал, что как в "насыщенном", так и в "ненасыщенном" режиме рост отношения P_a/P_0 (при фиксированной плотности тока J) происходит не обратно пропорционально росту v_p (либо v_g), а изменяется более сложным образом. Это означает, что P_a/P_0 зависит также от величины волнового числа k ПМСВ. Если предположить, что энергия ПМСВ отбирается вихрями, то возникает определенное противоречие, поскольку изменение возбуждающихся в структуре феррит–ВТСП значений k в пределах 100 см^{-1} составляет лишь доли процентов относительно величины 10^5 см^{-1} (такие k соответствуют величине вихрей и расстояниям между ними) и не может приводить к столь ощутимому изменению P_a/P_0 . Таким образом, можно предполагать, что энергия ПМСВ передается вихрям не непосредственно, а косвенным путем.

6) Различия в экспериментальных результатах, полученных для разных структур феррит–ВТСП, объясняются, по-видимому, реализацией в некоторых пленках ВТСП таких условий, при которых $J_{cr} > J_{sat}$ (ВТСП № 1), в других пленках оказывается, что $J_{th} < J_{cr} < J_{sat}$ (ВТСП № 4–6), а в третьих $J_{cr} < J_{th}$ (ВТСП № 2, 3). В результате в первом случае не наблюдается "насыщенный" режим, а в третьем наблюдается лишь "флуктуационный" режим энергообмена с МСВ. Причины, определяющие соотношение между величинами J_{cr} , J_{th} и J_{sat} , скорее всего, обусловлены технологией изготовления ВТСП.

7) Какие конкретно механизмы энергообмена соответствуют каждому из описанных процессов удастся, по-видимому, выяснить лишь после создания теории описанных явлений, расчета интенсивности каждого из процессов и сравнения ее с экспериментально измеренной. Сравнивая полученные результаты с существующими теоретическими представлениями, следует отметить, что поглощение энергии ПМСВ вихрями предсказывалось ранее в работе [5], в соответствии с которой при увеличении постоянного тока в сверхпроводнике энергия ПМСВ поглощается вихрями все более интенсивно до тех пор, пока плотность тока J не достигнет некоторого характерного значения J_0 : для $J > J_0$ происходит обратный процесс, т.е. вихри отдают свою энергию МСВ, причем отдают более интенсивно при значениях J , лежащих вблизи J_0 . В условиях нашего эксперимента $J \ll J_0$, имеющего порядок $10^7 - 10^8 \text{ А/см}^2$, т.е. энергия ПМСВ должна поглощаться вихрями.

Авторы выражают признательность В.Д. Харитонову и Ю.И. Беспятым за полезное обсуждение работы, а также В.А. Шахуну и С.В. Яковлеву за предоставленные пленки ВТСП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-17283а).

Список литературы

- [1] А.И. Головашкин. УФН **152**, 4, 553 (1987).
- [2] Л.Н. Демьянец. УФН **161**, 1, 71 (1991).
- [3] А.Б. Зорин, К.К. Лихарев, В.К. Семенов. Зарубеж. радиоэлектрон., **11**, 1 (1989).
- [4] О.Г. Вендик, А.Б. Козырев, Т.Б. Самойлова, А.Ю. Попов. Высокотемпературная сверхпроводимость. Сб. трудов, **1**, 566 (1990).
- [5] А.Ф. Попков. Письма в ЖТФ **15**, 5, 9 (1989).
- [6] Н.И. Ползикова, А.О. Раевский. Письма в ЖТФ **16**, 22, 59 (1990).
- [7] Н.И. Ползикова, А.О. Раевский. Письма в ЖТФ **20**, 19, 24 (1994).
- [8] Н.И. Ползикова, А.О. Раевский. Письма в ЖТФ **16**, 17, 73 (1990).
- [9] Н.И. Ползикова. Письма в ЖТФ **19**, 22, 28 (1993).
- [10] В.С. Бабушкин, Н.А. Морозова. Письма в ЖТФ **17**, 19, 1 (1991).
- [11] Ю.И. Беспятых, В. Василевский, М. Гайдек, А.Д. Симонов, В.Д. Харитонов. ФТТ **33**, 5, 1545 (1991).
- [12] Ю.И. Беспятых, В.Д. Симонов, В.Д. Харитонов. ФММ, **4**, 87 (1992).
- [13] С.Л. Царевский. ЖЭТФ **92**, 5, 1903 (1987).
- [14] С.В. Мериакри. Письма в ЖТФ **15**, 11, 64 (1989).
- [15] А.Ф. Попков. ЖТФ **59**, 9, 111 (1989).
- [16] Ю.И. Беспятых, А.Д. Симонов, В.Д. Харитонов. Письма в ЖТФ **16**, 23, 27 (1990).
- [17] Ю.И. Беспятых, В. Василевский, М. Гайдек, А.Д. Симонов, В.Д. Харитонов. ФТТ **35**, 11, 2983 (1993).
- [18] В.А. Краковский, Е.С. Коваленко. Изв. вузов. Физика **38**, 3, 50 (1995).

- [19] Б.М. Лебедь, А.В. Никифоров, С.В. Яковлев, И.А. Яковлев. ФТТ **34**, 2, 656 (1992).
- [20] А.Б. Альтман, Б.М. Лебедь, А.В. Никифоров, С.В. Яковлев СФХТ **3**, 4, 564 (1990).
- [21] В.В. Афиногенов, Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, И.М. Котелянский, В.Б. Кравченко, Н.И. Ползикова, А.А. Суханов СФХТ **2**, 12, 5 (1989).
- [22] А.В. Вашковский, В.И. Зубков, Б.М. Лебедь, Э.Г. Локк, В.И. Щеглов, С.В. Яковлев. Письма в ЖТФ **17**, 9, 67 (1991).
- [23] О.А. Чивилева, А.Г. Гуревич, А.Н. Анисимов, С.Ф. Карманенко. Письма в ЖТФ **16**, 3, 17 (1990).
- [24] В.И. Зубков, Б.М. Лебедь, Э.Г. Локк, В.Д. Харитонов, В.И. Щеглов, С.В. Яковлев. Письма в ЖТФ **18**, 15, 5 (1992).
- [25] S.W. Tozer, A.W. Kleinsasser, T. Penney, D. Kaiser, F. Holtzberg. Phys. Rev. Lett. **59**, 15, 1768 (1987).
- [26] T.K. Worthington, W.J. Gallagher, T.R. Dinger. Phys. Rev. Lett. **59**, 10, 1160 (1987).
- [27] A. Umezawa, G.W. Crabtree, J.Z. Liu, T.J. Moran, S.K. Malik, L.N. Nunez, W.L. Kwok, C.H. Sowers. Phys. Rev. **B38**, 4, 2843 (1988).
- [28] Ш.М. Бабаджан, С.Г. Зыбцев. Высокотемпературная сверхпроводимость. Сб. трудов, **1**, 45 (1991).
- [29] А.В. Вашковский, В.И. Зубков, Э.Г. Локк, В.И. Щеглов. РЭ **36**, 10, 1959 (1991).
- [30] Ю.И. Беспятых, И.Е. Дикштейн, А.Д. Симонов. ЖТФ **59**, 2, 10 (1989).
- [31] А.В. Вашковский, В.И. Зубков, Э.Г. Локк, В.И. Щеглов. РЭ **36**, 12, 2345 (1991).