

07

## Генерация СВЧ-колебаний в сверхпроводниковой туннельной меза-структуре с прослойкой из ферромагнитного изолятора

© К.И. Константибян, Г.А. Овсянников, Ю.В. Кислинский,  
А.М. Петржик, А.В. Шадрин

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва  
E-mail: karen@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2017 г.

Экспериментально исследован спин-поляризованный ток в тонкопленочных туннельных меза-структурах, состоящих из эпитаксиальных пленок купратного сверхпроводника  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , манганита  $\text{LaMnO}_3$  и верхнего сверхпроводящего бислоя  $\text{Au-Nb}$ . Обнаружена собственная узкополосная генерация СВЧ-диапазона, частота которой перестраивается напряжением смещения и внешним магнитным полем.

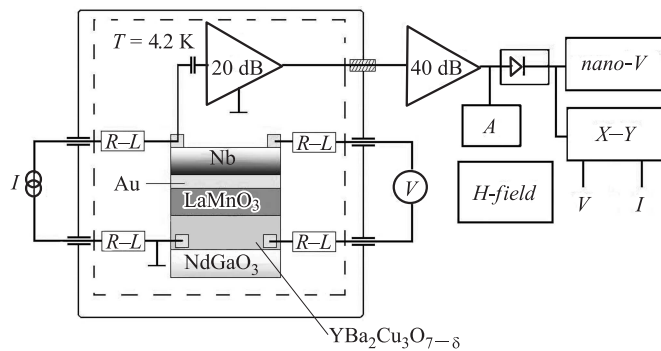
DOI: 10.21883/PJTF.2017.20.45146.16904

В последнее время сверхпроводниковые структуры со спин-поляризованным током вызывают повышенный интерес ввиду перспектив их использования в устройствах спинтроники и новых элементов СВЧ-микронэлектроники. Проблема взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма изучалась в гибридных структурах, содержащих сверхпроводники и ферромагнитные материалы, туннельных переходах из сверхпроводников с прослойкой из ферромагнитного изолятора (см., например, [1,2]). Туннельный ток, протекающий через ферромагнитную прослойку между двумя немагнитными электродами, оказывается спин-поляризованным вследствие расщепления энергетической зоны на состояния со спином вверх и спином вниз [3,4]. Возбуждение постоянным инжектированным спин-поляризованным током прецессии намагниченности ферромагнетика теоретически рассмотрено в работах [5–7]. Экспериментально возбуждение прецессии намагниченности при протекании достаточно высокой плотности тока (выше

$10^6$  А/см<sup>2</sup>) наблюдалось в многослойных структурах из ферромагнетиков и металлов [8–10] и туннельной структуре из-за спинового эффекта Холла [11]. В то же время динамика спин-поляризованного тока в сверхпроводниковых структурах с ферромагнитной прослойкой остается пока малоизученной. Задачей настоящей работы является экспериментальное исследование сверхпроводниковой меза-структуры с ферромагнитной туннельной прослойкой, обладающей свойствами спинового фильтра.

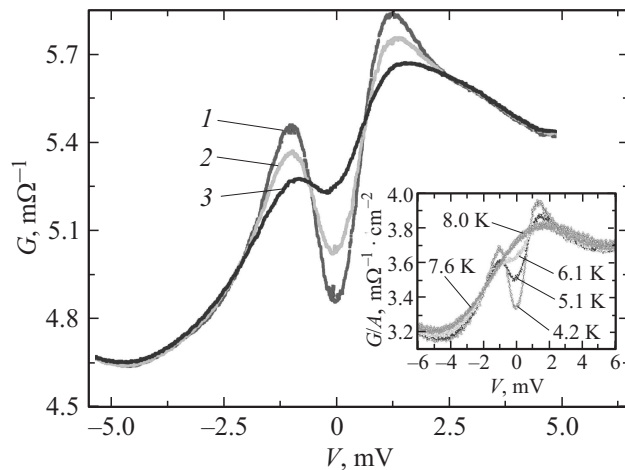
Исследовались гибридные меза-структуры из эпитаксиальных пленок сверхпроводящего купрата  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) и манганита  $\text{LaMnO}_3$  (LMO) — материалов, имеющих хорошую химическую и кристаллическую совместимость [12]. Другим сверхпроводником был бислой, состоящий из Nb и тонкой пленки Au, обеспечивающей контакт с манганитом. Сверхпроводящая пленка YBCO изготавливалась методом лазерной абляции при температуре 700–800°С на подложке (110)NdGaO<sub>3</sub>. Тонкая пленка из манганита LMO толщиной  $d_M = 5\text{--}20$  нм эпитаксиально выращивалась в той же вакуумной камере (*in situ*) при высокой температуре и после охлаждения до комнатной температуры покрывалась слоем Au толщиной 20–30 нм. Критическая температура пленки YBCO составляла  $T_C = 88\text{--}89$  К. Последующий слой Nb наносился методом магнетронного распыления. Пленка Au использовалась для уменьшения диффузии кислорода из манганита в Nb. Эффект близости между пленками Nb и Au обеспечивал сверхпроводящую критическую температуру бислоя  $T_{C'} = 8.5\text{--}9$  К, близкую к критической температуре пленки Nb (9.2 К). Меза-структуры с размерами в плане от  $10 \times 10$  до  $50 \times 50$  мкм с прослойкой из LMO (рис. 1) формировались с помощью фотолитографии, а также плазмохимического и ионно-лучевого травления. Согласно [13,14], манганит LMO стехиометрического состава при низких температурах обладает свойствами изолятора и антиферромагнетика, однако небольшое изменение содержания кислорода приводит к возникновению ферромагнетизма с температурой Кюри 140–150 К. О ферромагнетизме в пленках LMO сообщалось в работе [15], что было подтверждено измерениями ферромагнитного резонанса [16].

Исследование СВЧ-свойств меза-структур проводилось на установке, схематично показанной на рис. 1. Использовался холодный усилитель на транзисторах с высокой подвижностью носителей (HEMT), работающий в интервале частот 1–2 GHz. Усилитель имел собствен-



**Рис. 1.** Схема измерений вольт-амперных характеристик и СВЧ-генерации мезо-структуры Nb–Au/LaMnO<sub>3</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  на подложке NdGaO<sub>3</sub>. Мезо-структура (сечение показано в середине рисунка) и холодный усилитель размещались внутри соленоида задания магнитного поля (штриховой контур) и экрана (сплошной контур) при  $T = 4.2$  К. Напряжение смещения  $I$ – $V$  на мезо-структуру, а также питание холодного усилителя задавались через  $R$ – $L$ -фильтры и проходные конденсаторы. Усиленный СВЧ-сигнал от мезо-структуры подавался либо на анализатор спектра ( $A$ ), либо на квадратичный детектор. Уровень выходного сигнала контролировался нановольтметром ( $\text{nano-V}$ ) и регистрировался графопостроителем ( $X$ – $Y$ ).

ную шумовую температуру  $T_{N1} = 8 \pm 2$  К и коэффициент усиления  $K_1 = 20$  dB при охлаждении до температуры  $T = 4.2$  К. Балансная схема входного каскада обеспечивала устойчивую работу усилителя в широком диапазоне сопротивлений нагрузки  $10$ – $100$   $\Omega$  и понижала температуру фонового излучения, попадающего на мезо-структуру по коаксиальному кабелю. Шумовая температура „комнатного“ усилителя была  $T_{N2} = 130$  К, коэффициент усиления  $K_2 = 40$  dB. Напряжение выходного сигнала, пропорциональное мощности  $P$ , снималось с выхода квадратичного детектора. Одновременно анализатором спектра контролировалась амплитудно-частотная характеристика на выходе „комнатного“ усилителя. Магнитное поле задавалось перпендикулярно плоскости подложки и, согласно расчетам [17], его воздействие для туннельного перехода квадратной формы было аналогичным воздействию параллельно заданного поля.



**Рис. 2.** Семейство зависимостей дифференциальной проводимости  $G$  от напряжения мезо-структуры с  $d_M = 5.6$  nm и площадью  $A = 140 \mu\text{m}^2$  при  $T = 4.2$  K и значениях внешнего магнитного поля  $H$ , направленного параллельно плоскости подложки, равных 0 (1), 263 (2) и 526 Oe (3). На вставке показана зависимость характерной проводимости  $G/A$  от напряжения  $V$  в диапазоне температур 4.2–8 K для  $H = 0$ .

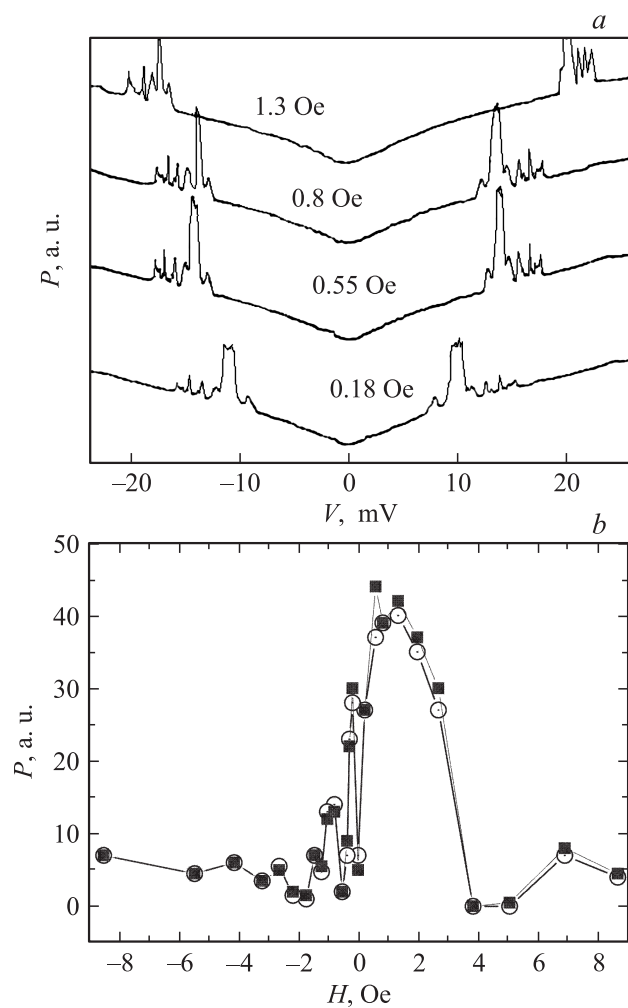
Измерение дифференциального сопротивления  $R_d = dV/dI$  проводилось с помощью синхронного детектора и встроенного генератора модулирующего сигнала, задаваемого через цепь подачи постоянного тока, при этом магнитное поле задавалось параллельно плоскости подложки.

На рис. 2 представлены зависимости дифференциальной проводимости  $G = 1/R_d$  при воздействии магнитного поля. Видна асимметрия  $G(V)$  для положительных и отрицательных  $V$ , которая может быть вызвана формой туннельного барьера и разницей значений работ выхода YBCO и Au. Наблюдается изменение  $G(V)$  под влиянием магнитного поля в интервале напряжений до щели ниобия, которое трудно связать с зеемановским расщеплением плотности состояний электродов [13], поскольку напряженность магнитного поля  $H$  существенно меньше поля зеемановского расщепления. После перехода в ферромагнитное состояние прослойки LMO при  $T < 140$  K в мезо-структуре возникает

спин-поляризованный ток [3]. Из рис. 2 видно, что магнитное поле влияет на компоненту туннельной проводимости, обусловленную спиновой поляризацией [14]. При увеличении напряжения постоянного смещения свыше 3 мВ (выше щели ниобия) проводимость меза-структуры уже не зависела от величины магнитного поля [16], а магнитосопротивление составляло величину, типичную для структур с манганитами [12]. Отметим, что магнитосопротивление обнаруживалось только при температурах ниже критической температуры ниобия.

На рис. 3, *a* приведено семейство зависимостей мощности излучения от напряжения  $P(V)$ , полученных при нескольких значениях внешнего магнитного поля при  $T = 4.2$  К. При повышении температуры выше критической  $T_C$ , бислоя Nb–Au СВЧ-генерация исчезала.

Плавный рост  $P$  с увеличением  $V$ , скорее всего, вызван дробовым шумом меза-структуры. Наблюдаются симметрично расположенные относительно  $V = 0$  выбросы  $P(V)$ , заметно превышающие уровень шума. На СВЧ-анализаторе спектра возникновение выбросов сигнала  $P$  проявлялось в виде острого пика генерации с мощностью порядка долей рW и шириной  $\sim 50$  МГц. Центральная частота пика перестраивалась во всей полосе обзора  $f = 1\text{--}2$  GHz и росла с увеличением тока смещения  $I$  (или напряжения  $V$ , как на рис. 3, *a*). Заметим, что в структурах [8,9], напротив, частота генерации уменьшалась с увеличением тока  $I$ . Зависимость высоты мощности генерации  $P$  от магнитного поля  $H$  (при фиксированном  $V$ ) имела осцилляционную форму со средним значением периода осцилляции порядка 0.5 Ое. Из рис. 3, *a* также видно, что интервал напряжений смещения  $\Delta V$ , при которых наблюдалась СВЧ-генерация, составлял в среднем  $\Delta V \sim 8$  мВ. Оценка коэффициента перестройки частоты с изменением тока  $\Delta f / \Delta I$  дает величину  $7.5 \cdot 10^{12}$  Hz/A, где  $\Delta I = \Delta V / R_d$ , а величина  $R_d$  составляет  $60 \Omega$  и слабо зависит от  $V$ . Заметим, что отношение частоты генерации  $f$  и соответствующего напряжения смещения  $V$  на три порядка отличается от отношения  $hf / 2eV \cong 483.6$  GHz/mV ( $h$  — постоянная Планка,  $e$  — заряд электрона) для джозефсоновской генерации, которая наблюдается в контактах двух сверхпроводников. С учетом отсутствия сверхпроводящего тока и наблюдаемой в эксперименте связи частоты генерации и напряжения смещения на структуре объяснить такую СВЧ-генерацию нестационарным эффектом Джозефсона нельзя.



**Рис. 3.** *a* — семейство зависимостей сигнала  $P$  от напряжения смещения  $V$  (сдвинуты по оси ординат), полученных с выхода квадратичного детектора при магнитных полях в диапазоне 0.18–1.3 Oe. Меза-структура имела размер  $A = 1000 \mu\text{m}^2$  и толщину прослойки LMO  $d_M = 5.6 \text{ nm}$ , сопротивление  $R = 60 \Omega$ . *b* — зависимость максимума СВЧ-генерации  $P$  от магнитного поля. Кружками обозначены пики, полученные при отрицательном смещении по  $V$ , квадратами — при положительном.

На рис. 3, *b* показана магнитно-полевая зависимость максимальных значений амплитуд генерации  $P$ . Несмотря на то что зависимость амплитуды генерации от магнитного поля изрезана и имеет нерегулярную форму, значения максимумов, соответствующих обем полярностям напряжения смещения, хорошо совпадают (рис. 3, *b*).

Возникновение СВЧ-генерации можно было бы объяснить механизмом когерентного движения магнитных вихрей. Однако регулярное движение вихрей в сверхпроводящих пленках невоспроизводимо из-за влияния центров пиннинга, а кроме того, нарушается внешним СВЧ-воздействием [18]. Дополнительное воздействие на меза-структуру монохроматическим сигналом мощностью до 0.5 mW на частоте  $f = 70$  GHz незначительно (примерно на 20%) подавляло амплитуду генерации, не изменяя ее форму. Более того, повторно прописанные зависимости  $P(V)$  при фиксированном  $H$  как с внешним СВЧ-сигналом 70 GHz, так и без него полностью совпадали, повторяя изрезанность  $P(V)$ .

Теоретически было показано [19], что управляемое вращение спиновых завихрений (скирмионов [20]) под действием постоянного спин-поляризованного тока может возбудить устойчивую узкополосную СВЧ-генерацию, и, что важно, без необходимого условия превышения порогового значения электрического тока. Согласно модели [19], в эксперименте наблюдается рост частоты генерации с увеличением тока через меза-структуру. Необходимое для образования спиновых завихрений сильное спин-орбитальное взаимодействие [20], относительно слабое в автономном манганите LMO [21], может быть усилено за счет ян-теллеровского искажения в меза-структуре из-за влияния нижней пленки YBCO [22], а также наличием прослойки из золота, спин-орбитальное взаимодействие в котором анализировалось в работе [23].

Таким образом, при изменении внешнего слабого магнитного поля  $|H| < 10$  Oe и тока смещения через меза-структуру YBCO/LMO/Au-Nb, обладающую свойствами спинового фильтра, обнаружена СВЧ-генерация с шириной линии порядка 50 MHz. При этом частота генерации перестраивается током смещения с соотношением порядка  $10^{13}$  Hz/A, а ее амплитуда управляется слабым магнитным полем  $H \sim 0.5$  Oe.

Работа поддержана РАН, РФФИ (проект № 16-29-14022) и грантом Научной школы НШ-8168.2016.2. Авторы благодарны В.В. Демидову и И.В. Борисенко за обсуждение результатов.

**Список литературы**

- [1] *Bergeret F.S., Volkov A.F., Efetov K.B.* // *Rev. Mod. Phys.* 2005. V. 77. P. 1321.
- [2] *Kawabata S., Tanaka Y., Golubov A.A.* et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2012. V. 324. P. 3467.
- [3] *Meservey R., Tedrow P.M.* // *Phys. Rep.* 1994. V. 238. P. 173.
- [4] *Santos T.S.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. P. 147201.
- [5] *Zhao E., Löfwander T., Sauls J.A.* // *Phys. Rev. B.* 2004. V. 70. P. 134510.
- [6] *Slonczewski J.C.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 1996. V. 159. P. L1.
- [7] *Manchon A., Zhang S.* // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 79. P. 094422.
- [8] *Kiselev S.I., Sankey J.C., Krivorotov I.N.* et al. // *Nature (London).* 2003. V. 425. P. 380.
- [9] *Rippard W.H., Pufall M.R.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 92. P. 027201.
- [10] *Pribiag V.S., Krivorotov I.N., Fuchs G.D.* et al. // *Nature Phys.* 2007. V. 3. P. 498.
- [11] *Liu Luqiao, Pai Chi-Feng* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 109. P. 186602.
- [12] *Петржик А.М., Овсянников Г.А., Шадрин А.В.* и др. // *ЖЭТФ.* 2011. Т. 139. С. 1190.
- [13] *Moodera J.S., Santos T.S., Nagahama T.* // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2007. V. 19. P. 165202.
- [14] *Hao X., Moodera J.S., Meservey R.* // *Phys. Rev. B.* 1990. V. 42. P. 8235.
- [15] *Renshaw X., Wang C.J., Li W., Lü M.* et al. // *Science* 2015. V. 349. P. 717.
- [16] *Овсянников Г.А., Кислинский Ю.В.* и др. // *ЖЭТФ.* 2017. Т. 151. С. 736.
- [17] *Monaco R., Aaroe M., Mygind J., Koshelets V.P.* // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 79. P. 144521.
- [18] *Константиян К.И., Овсянников Г.А.* и др. // *ЖЭТФ.* 1991. Т. 72. С. 675.
- [19] *García-Sánchez F., Sampaio J.* et al. // *New J. Phys.* 2016. V. 18. P. 075011.
- [20] *Fert A., Cros V., Sampaio J.* // *Nature Nanotechnol.* 2013. V. 8. P. 152.
- [21] *Snatina M., Oleś A.M.* // *Phys. Rev. B.* 2016. V. 94. P. 214426.
- [22] *Борисенко И.В., Карпов М.А., Овсянников Г.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2013. Т. 39. В. 23. С. 1.
- [23] *Dal Corso A., Conte A.M.* // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. P. 115106.