

05

## Магнитосопротивление туннельного типа в структуре $\text{EuO}_{0.7}\text{PbO}_{0.3}\text{MnO}_3$ (монокристалл) / Fe (пленка)

© Н.В. Волков, Г.С. Патрин, Г.А. Петраковский,  
К.А. Саблина, С.Г. Овчинников, С.Н. Варнаков

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск  
Красноярский государственный университет  
E-mail: volk@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 3 октября 2002 г.

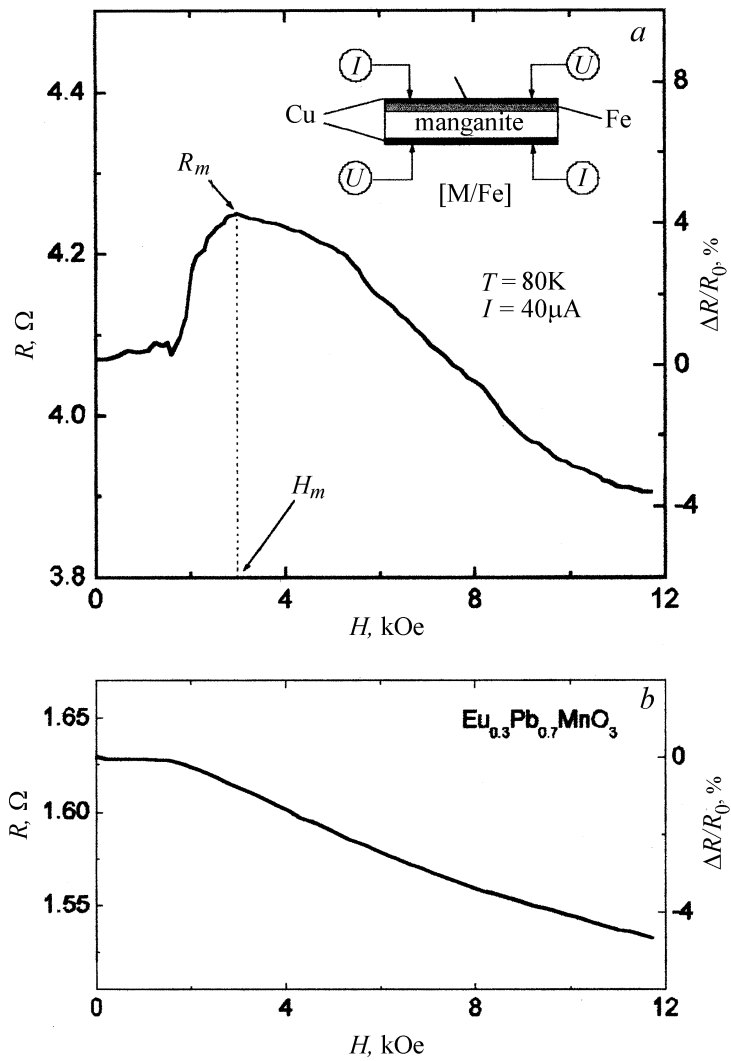
Исследованы магниторезистивные свойства структуры, представляющей собой монокристалл манганита  $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$  с нанесенной на него эпитаксиальной пленкой Fe. При температурах ниже  $T_C$  кристалла манганита для структуры наблюдается эффект положительного магнитосопротивления. Поведение сопротивления структуры от магнитного поля имеет вид, характерный для туннельных переходов с электродами из ферромагнитных материалов, разделенных тонким слоем диэлектрика. Эффект связывается с формированием в приконтактной области манганит-Fe переходного слоя, обедненного кислородом, обладающего диэлектрическими свойствами. Чувствительность сопротивления исследуемой структуры к магнитному полю определяется как отрицательным магнитосопротивлением кристалла манганита, так и туннельным вкладом в механизм проводимости, при котором величина туннельного тока зависит от взаимной ориентации магнитных моментов электродов (кристалл  $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$  и пленка Fe).

Изучение спин-зависимого транспорта через гетероструктуры, содержащие магнитоактивные слои, — одна из самых актуальных и перспективных областей физики магнитных явлений сегодня. Это связано с огромным прикладным потенциалом таких структур [1], поскольку в этом случае, при сохранении всех преимуществ традиционных полупроводниковых (немагнитных) низкоразмерных структур, появляется еще один дополнительный канал управления — магнитное поле [2]. Это позволяет значительно расширить функциональные возможности устройств микроэлектроники. Одна из задач, которая требует своего решения — это поиск материалов, предназначенных

обеспечить высокую спиновую поляризацию электронов, эмитируемых в магнитную структуру. И здесь весьма перспективными считаются ферромагнитные полупроводники на основе марганцевых оксидов со структурой перовскита, хорошо известные как манганиты, которые имеют высокую степень спиновой поляризации собственных носителей тока, достигающую почти 100% [3].

В настоящей работе мы приводим результаты исследования магниторезистивных свойств структуры, представляющей собой кристалл манганита с нанесенной на него тонкой пленкой железа ([M/Fe]). Монокристаллы манганита состава  $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$  выращивались методом спонтанной кристаллизации из раствора–расплава. Полученные образцы имели температуру перехода в ферромагнитное состояние с проводимостью металлического типа  $T_C = 210$  К. Из монокристаллов изготавливались подложки в виде пластинок с размерами  $3 \times 2 \times 0.1$  мм, плоскость пластинок совпадала с одной из главных плоскостей кристалла. Пленка железа наносилась методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием установки „Ангара“, толщина пленки Fe составляла 250 Å. В том же технологическом цикле на поверхность пленки Fe и на свободную поверхность подложки наносились покрытия из меди толщинами до  $\sim 500$  Å, которые использовались как электроды при исследовании электрических свойств структуры [M/Fe]. Геометрия эксперимента показана на вставке рис. 1.

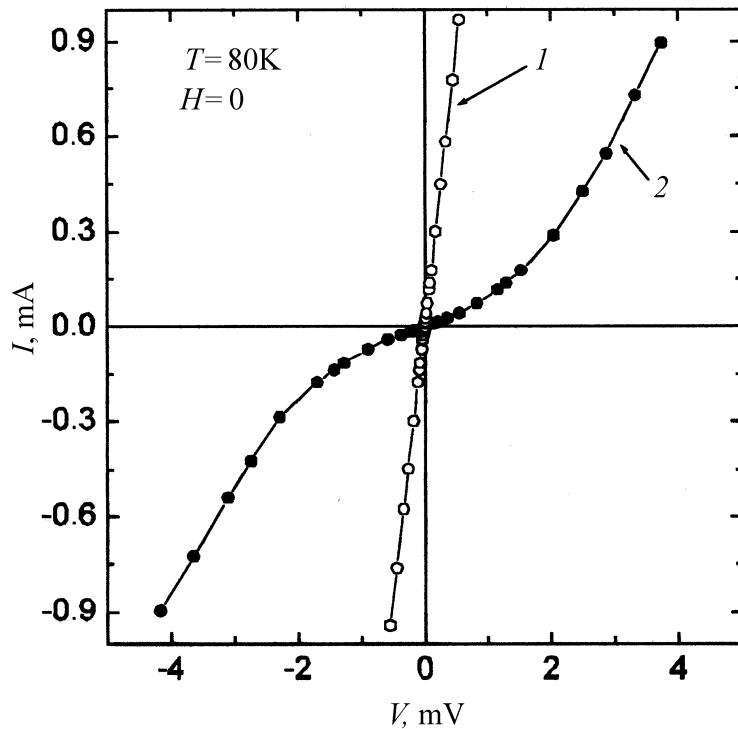
На рис. 1, *a* представлена зависимость сопротивления  $R(H)$  и магнитосопротивления  $(MR)\Delta R/R_0 = (R(H) - R(0))/R(0)$  от внешнего магнитного поля для полученной структуры [M/Fe] при  $T = 80$  К, здесь же на рис. 1, *b* для сравнения приведена зависимость для подложки (монокристалл манганита). Зависимость  $R(H)$  для [M/Fe] имеет характерный максимум, соответствующий области положительного MR. В то же время хорошо известно, что материалы манганитов обладают отрицательным MR эффектом, это и наблюдается в нашем случае для монокристалла  $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ . Сравнительный анализ показывает, что в магнитных полях выше  $H \sim 11$  кОе изменение сопротивления структуры при увеличении магнитного поля определяется только MR подложки. Поскольку сопротивление структуры примерно в 3 раза больше сопротивления подложки, то разумно предположить, что особенность поведения  $R(H)$  для структуры связана с образованием переходного контактного слоя между подложкой и нанесенной на него пленкой Fe. Пик, соответствующий области положительного MR,



**Рис. 1.** Зависимость сопротивления  $R(H)$  и магнитосопротивления  $\Delta R/R_0 = (R(H) - R(0))/R(0)$  от внешнего магнитного поля  $H$  при  $T = 80\text{ K}$ :  $a$  — для структуры [M/Fe];  $b$  — для подложки (монокристалл  $\text{Eu}_{0.3}\text{Pb}_{0.7}\text{MnO}_3$ ). Вставка — геометрия эксперимента.

на зависимости  $R(H)$  начинает проявляться при  $T < T_C$  в слабых магнитных полях. При понижении температуры максимум сопротивления  $R_m = R(H_m)$  сдвигается в более высокие магнитные поля, здесь  $H_m$  — магнитное поле, при котором наблюдается максимум  $R(H)$ , при этом величина эффекта  $\Delta R_m = R_m - R_0$  растет. В целом характер поведения  $\Delta R_m$  и  $H_m$  при изменении температуры коррелирует с поведением намагниченности кристалла манганита. Принципиально, что область, соответствующая положительным величинам MR, появляется только при температурах, где кристалл манганита обладает спонтанным магнитным моментом. Кроме того, величина магниторезистивного эффекта зависит от величины напряжения смещения  $V$ , при котором происходит измерение сопротивления. Такое поведение характерно для туннельных переходов с электродами из ферромагнитных материалов, разделенных тонким слоем диэлектрика (структуры типа [FM<sub>I</sub>/IFM<sub>II</sub>]). Наличие максимума сопротивления в этом случае объясняется эффектом спинового вентиля [3], величина туннельного тока зависит от взаимной ориентации магнитных моментов электродов  $\mathbf{M}_I$  и  $\mathbf{M}_{II}$ . Сопротивление контакта минимально, когда магнитные моменты электродов  $\mathbf{M}_I$  и  $\mathbf{M}_{II}$  параллельны друг другу, и максимально, если они антипараллельны. В нашем случае роль магнитоактивных электродов выполняют пленки Fe и кристалл манганита (при  $T < T_C$ ). Дополнительным аргументом в пользу механизма туннельного MR для полученной нами структуры является ее вольт-амперная характеристика (рис. 2), которая имеет вид, типичный для туннельных переходов [4]. При этом вольт-амперная характеристика подложки (монокристалл манганита) является линейной.

Остановимся на возможном механизме формирования переходного контактного слоя между кристаллом манганита и нанесенной на него пленкой железа. Хорошо известно, что для материалов манганитов характерна слабая связь кислорода с решеткой и относительная легкость его диффузии. С другой стороны, манганиты весьма чувствительны к изменению стехиометрии по кислороду [5]. Так, для некоторых исследованных составов пониженное содержание кислорода приводит к тому, что образец, имеющий ферромагнитное/проводящее состояние при стехиометричном составе, становится диэлектриком с антиферромагнитным типом упорядочения [6]. Таким образом, по-видимому, именно стехиометрия по кислороду играет определяющую роль в формировании приповерхностных слоев в манганитах, в том числе и при образовании переходного слоя между кристаллом и пленкой.



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики: 1 — кристалл  $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ ; 2 — структура  $[\text{M}/\text{Fe}]$ ,  $T = 80 \text{ K}$ .

В нашем случае возможна следующая ситуация. На границе кристалла с пленкой за счет диффузии образуется обедненный по кислороду относительно стехиометрического состава кристалла тонкий слой, который обладает диэлектрическими свойствами. Этот контактный слой и является потенциальным барьером для электронов. Используя классическое выражение Симмона [4] для туннельного тока через потенциальный барьер, мы аппроксимировали экспериментальные вольт-амперные характеристики для  $[\text{M}/\text{Fe}]$  структуры. Это позволило нам сделать оценки для высоты  $U_0$ , и ширины  $d$  потенциального барьера:  $U_0 \approx 29.5 \text{ meV}$ ,  $d \approx 20 \text{ \AA}$ . Очевидно, что приведенные оценки весьма грубые, и их можно рассматривать как нижнюю границу для величин  $U_0$

и  $d$ , поскольку туннельный механизм проводимости при высоких температурах ( $T > 80$  К), возможно, не является определяющим и необходимо учитывать надбарьерный перенос носителей заряда (термоэлектронная эмиссия). Кроме того, приконтактная область, вероятнее всего, не является однородной [7], и существуют микровключения с высокой проводимостью, пронизывающие барьер.

Традиционно для наблюдения и исследования эффектов типа спинного вентиля используются структуры, в которых ферромагнитные проводящие пленки разделены немагнитной диэлектрической прослойкой и в магнитном отношении электроды практически не связаны между собой. Различное поведение намагниченностей электродов  $\mathbf{M}_I$  и  $\mathbf{M}_{II}$  от  $H$  и, следовательно, изменение туннельного тока через переход реализуется за счет использования материалов для FM<sub>I</sub> и FM<sub>II</sub> с различными коэрцитивными полями  $H_{CI}$  и  $H_{CII}$ . При этом на зависимостях  $R(H)$  наблюдается значительный гистерезис. В случае структуры [M/Fe] гистерезис практически отсутствует. Другой отличительный момент — величина магнитного поля  $H_m$ , при которой наблюдается максимум сопротивления  $R_m$ , имеет большую величину,  $H_m = 3.3$  кОе, которая значительно превышает величины  $H_C$  для кристалла  $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$  и пленки Fe. Такое поведение можно понять, предположив, что диэлектрический переходный слой является магнитным и приводит к обменному взаимодействию между кристаллом и пленкой Fe, причем взаимодействие носит антиферромагнитный характер (на возможность чего указывалось выше). Равновесный угол  $\theta$  между намагниченностями электродов  $\mathbf{M}_I$  и  $\mathbf{M}_{II}$  будет определяться минимумом плотности свободной энергии

$$F(\theta) = F_{EX} + E_Z + E_D + E_A,$$

состоящей из энергии обменного взаимодействия между электродами  $E_{EX}$ , зеемановской энергии во внешнем поле  $E_Z$ , энергии полей размагничивания  $E_D$  и энергии магнитной анизотропии  $E_A$ . Тогда реализуется следующий сценарий поведения туннельного вклада в зависимость  $R(H)$ . При  $H = 0$  манганит и пленка Fe находятся в многодоменном состоянии, и все относительные ориентации  $\mathbf{M}_I$  и  $\mathbf{M}_{II}$  в плоскости равновероятны. При увеличении  $H$  идет процесс намагничивания и при  $H \approx H_m$  достигается намагниченность насыщения кристалла и пленки. При этом за счет антиферромагнитного обмена через приповерхностный слой реализуется примерно антипараллельная

ориентация  $\mathbf{M}_I$  и  $\mathbf{M}_{II}$ , и структура имеет максимальную величину  $R(H)$ . При дальнейшем увеличении  $H$  за счет конкуренции, главным образом,  $E_{EX}$  и  $E_Z$  вкладов в  $F(\theta)$  равновесный угол  $\theta$  уменьшается, что приводит к уменьшению  $R(H)$  структуры. При  $H \sim 11$  кОе  $\mathbf{M}_I$  и  $\mathbf{M}_{II}$  становятся параллельными, и в более высоких полях наблюдается вклад в MR структуры только от подложки, который не связан с туннельным механизмом.

Предлагаемый сценарий качественно объясняет поведение MR структуры [M/Fe], в большей степени прояснить ситуацию позволит исследование поведения намагниченностей кристалла манганита и нанесенной на него пленки Fe.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-02-172224) и ККФН-РФФИ „Енисей 2002“ (грант 02-02-97702).

## Список литературы

- [1] *Grunberg P.* // *Physics Today*. 2001. V. 54. P. 31.
- [2] *Борухович А.С., Виглин Н.А., Осипов В.В.* // *ФТТ*. 2002. Т. 44. В. 5. С. 898.
- [3] *Meservey R., Tedrow P.M.* // *Phys. Rep.* 1994. V. 239. P. 174.
- [4] *Simmons J.G.* // *J. Appl. Phys.* 1963. V. 34. P. 1793.
- [5] *Ju H.L., Sohn H.* // *JMMM*. 1997. V. 167. P. 200.
- [6] *Tamura S.* // *Phys. Lett.* 1980. A 73. P. 401.
- [7] *Свиштунов В.М., Медведев Ю.В., Таренков В.Ю.* и др. // *ЖЭТФ*. 2000. Т. 118. С. 629.