

PACS numbers: 72.25.Mk, 73.40.Gk, 74.50.+r, 74.78.Fk, 74.81.Fa, 85.25.Oj, 85.75.Mm

Особенности вольт-амперных характеристик гетероструктур $F/I/S$ $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$

Э. М. Руденко, И. В. Коротащ, А. А. Краковный, Ю. В. Кудрявцев, В. Н. Реут

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур ферромагнетик–изолятор–сверхпроводник $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$ в широком диапазоне удельного электросопротивления гетероструктур $R_{NN}A$ от 10^{-3} до 10^{-6} Ом·см² (R_{NN} — сопротивление гетероструктуры в нормальном состоянии, A — площадь контакта гетероструктуры). Обнаружено, что вид ВАХ зависит от величины $R_{NN}A$. Изучено влияние спин-поляризованной токовой инжекции $J_{\text{инж}}$ на критический ток сверхпроводящих плёнок свинца J_c и получены зависимости $J_c(J_{\text{инж}})$, которые состоят из двух участков — горизонтального и наклонного. Обсуждается физическая природа наблюдаемых эффектов.

Досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) гетероструктур ферромагнетик–ізолятор–надпровідник $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$ в широкому діапазоні питомого електроопору гетероструктур $R_{NN}A$ від 10^{-3} до 10^{-6} Ом·см² (R_{NN} — опір гетероструктури в нормальному стані, A — площа контакту гетероструктури). Виявлено, що вид ВАХ залежить від величини $R_{NN}A$. Вивчено вплив спин-поляризованої струмової інжекції $J_{\text{інж}}$ на критичний струм надпровідних плівок олова J_c і одержано залежності $J_c(J_{\text{інж}})$, які складаються з двох ділянок — горизонтальної і похилої. Обговорюється фізична природа спостережуваних ефектів.

The current–voltage characteristics (CVC) of the $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$ ferromagnet–insulator–superconductor heterostructures in a wide range of their resistivity $R_{NN}A$ (from 10^{-3} to 10^{-6} Ohm·cm²) are investigated (R_{NN} is the electrical resistivity of heterostructure in a normal state; A is its contact area). As shown, the type of CVC depends on the $R_{NN}A$ value. The influence of spin-polarized current injection, J_{in} , on the critical current of the superconducting Pb films is investigated. As revealed, the $J_c(J_{\text{inj}})$ dependences consist of two parts—horizontal and inclined ones. The physical origin of the observed effects is discussed.

Ключевые слова: сверхпроводимость, ферромагнетизм, спиновая инжек-

ция, эффект близости, неравновесное состояние.

(Получено 26 ноября 2010 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Гетероструктуры ферромагнетик–изолятор–сверхпроводник ($F/I/S$) в настоящее время являются объектом, интенсивно исследуемым с целью применения в области спиновой электроники [1–3]. Одним из наиболее распространенных методов их исследования является измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ), как самих гетероструктур, так и сверхпроводящих пленок в составе гетероструктур [4, 5]. Результаты анализа особенностей, наблюдаемых на ВАХ гетероструктур $F/I/S$, представлены в данной статье.

2. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР

В качестве ферромагнетика нами использовались пленки ферромагнитного полуметалла (сплав Гейслера) Co_2CrAl . Пленки наносили методом «вспышки» в вакууме через маску на сапфировые подложки с последующим отжигом в вакууме. В качестве сверхпроводника использовали пленки свинца. Его наносили термическим напылением в вакууме через маску, таким образом, чтобы образовался крестоподобный контакт с F -слоем размером 140×200 мкм. Свинец использовали как известный модельный материал с довольно высокой $T_c = 7,2$ К. Изоляционный слой $10\text{--}20$ Å образовывался за счет окисления в естественных условиях слоя ферромагнетика. При этом время между нанесением пленок Co_2CrAl и Pb для одной части образцов было 1 ч, а для другой — 24 ч. Таким образом, создавали туннельный барьер разной толщины на F -слоях одного приготовления.

Условия формирования пленок Co_2CrAl для разных образцов также были разными, в частности, в части температуры подложки при осаждении слоя и при отжиге, что необходимо было для создания разной зернистости слоев. Предполагается, что крупные зерна, получаемые при азотной температуре подложки, обеспечивают более сильную спиновую поляризацию тока, инжектируемого через туннельный барьер. Таким образом, были подготовлены образцы с высокой поляризацией слоя Co_2CrAl , порядка 95–97% (температура подложки при осаждении 77 К, при отжиге — 750 К), промежуточной поляризацией 80–85% (температура подложки при осаждении 750 К, при отжиге — 750 К), низкой поляризацией (температура подложки при осаждении 77 К, без отжига). Степень поляризации определяли по методике, предложенной в [6].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение ВАХ выполняли четырехзондовым методом на специальном стенде, используя источник стабилизированного тока. Измерение образцов выполняли при гелиевой температуре 4,2 К.

На рисунках 1–5 нами представлены результаты измерений ВАХ структур с тремя видами пленок Co_2CrAl : высокой поляризации, промежуточной поляризации и низкой поляризации. Толщина пленок Co_2CrAl примерно 100 нм, свинца — 80–160 нм.

Первоначально для каждого туннельного контакта определяли вид ВАХ. Затем, фиксируя ток через контакт, измеряли ВАХ сверхпроводящей пленки (мостика), задавая ток через него от независимого источника стабилизированного тока. Фиксировали ток пленки I_R , при котором возникает резистивное состояние в плёнке, по отклонению ВАХ пленки от вертикального участка на 2,5 нВ. После определения I_R для разных токов инжекции ($I_{\text{инж}}$) строили зависимость $I_R(I_{\text{инж}})$. После нескольких суток измерение ВАХ туннельных контактов и пленок повторяли. Виды полученных зависимостей $I_R(I_{\text{инж}})$ даны на вставках рис. 1–5.

Анализ показал, что ВАХ структур может иметь как S -образный вид, так и J -образный вид. С большой статистической достоверностью было определено, что S -образный вид ВАХ получается для образцов с большой прозрачностью туннельного барьера соответствует сопротивлению барьера менее 0,015 Ом, что при площади контакта $A = 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ дает удельное сопротивление $R_{NN}A$ менее $0,45 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. При этом, наблюдаемый диапазон изменения $R_{NN}A$ от $0,01 \cdot 10^{-5}$ до $15 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Частично особенности подобных ВАХ нами объяснено в [6]. Было

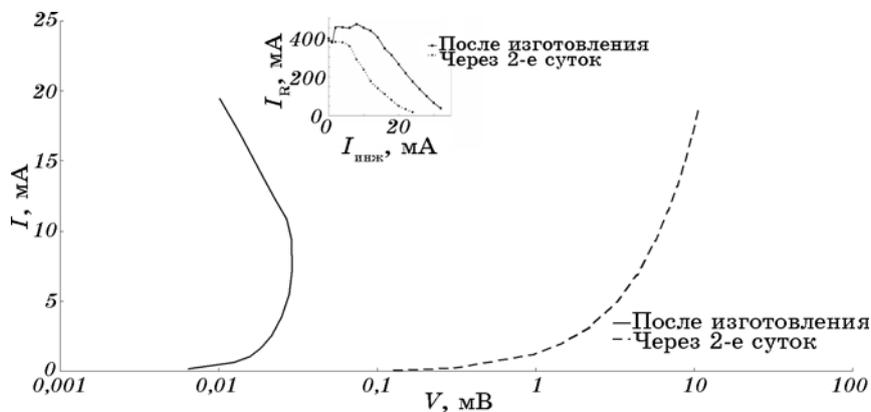


Рис. 1. ВАХ туннельного контакта образца 765a1 (промежуточная поляризация, $R_{NN1} = 0,00032 \text{ Ом}$, $R_{NS1}/R_{NN1} = 140$, $R_{NN2} = 0,56 \text{ Ом}$, $R_{NS2}/R_{NN2} = 11,6$). На вставке: зависимость тока I_R сверхпроводящей пленки Pb от тока инжекции.

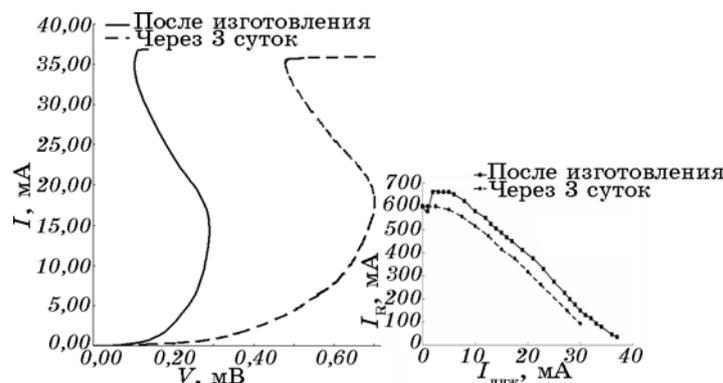


Рис. 2. ВАХ туннельного контакта образца 759a1 (высокая поляризация, $R_{NN1} = 0,003$ Ом, $R_{NS1}/R_{NN1} = 111$, $R_{NN2} = 0,0136$ Ом, $R_{NS2}/R_{NN2} = 44,1$). На вставке: зависимость тока I_R сверхпроводящей пленки Pb от тока инжекции.

теоретически и экспериментально показано, что в низкоомных туннельных $F/I/S$ гетероструктурах отношение сопротивлений R_{NS}/R_{NN} значительно больше величины, предсказываемой стандартной теорией БКШ для туннельного $N-I-S$ контакта, в силу гигантской блокировки спин-поляризованного туннельного тока (R_{NS} — дифференциальное сопротивление гетероструктуры при нулевом напряжении смещения в сверхпроводящем состоянии, R_{NN} — сопротивление контакта в нормальном состоянии).

Из полученных графиков на рисунках 1–5 видно, что вид ВАХ и зависимостей $I_R(I_{\text{инж}})$ зависит от значений R_{NN} . Для гетероструктур с большим R_{NN} характерный J -образный вид ВАХ. Зависимость $I_R(I_{\text{инж}})$ имеет два участка: первоначальное «плато» и последующее подавление тока I_R . Нами замечено, что крутизна второго участка

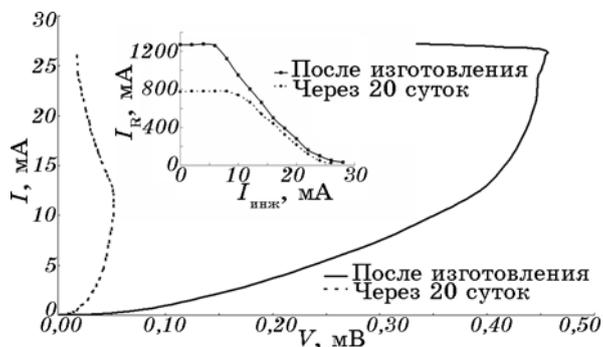


Рис. 3. ВАХ туннельного контакта образца 761a1 (низкая поляризация, $R_{NN1} = 0,017$ Ом, $R_{NS1}/R_{NN1} = 10$, $R_{NN2} = 0,001$ Ом, $R_{NS2}/R_{NN2} = 62$). На вставке: зависимость тока I_R сверхпроводящей пленки Pb от тока инжекции.

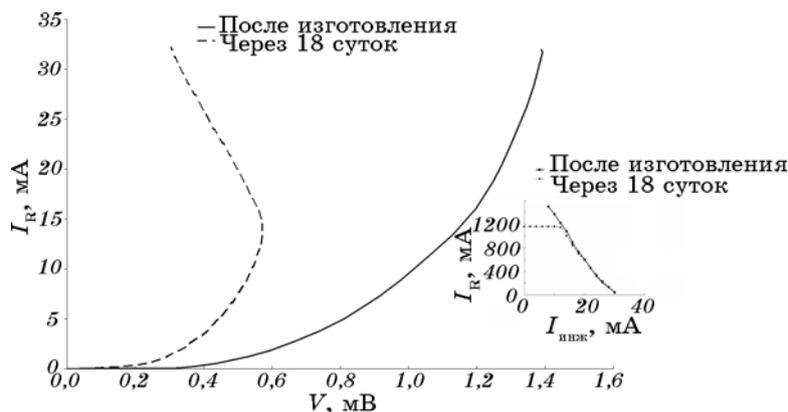


Рис. 4. ВАХ туннельного контакта образца 763b1 (промежуточная поляризация, $R_{NN1} = 0,041$ Ом, $R_{NS1}/R_{NN1} = 39$, $R_{NN2} = 0,009$ Ом, $R_{NS2}/R_{NN2} = 92$). На вставке: зависимость тока I_R сверхпроводящей пленки Pb от тока инжекции.

определяется свойствами слоя, лежащего под сверхпроводящей пленкой. Для ферромагнитного слоя она существенно круче, чем для слоя нормального металла.

На рисунке 6 представлена зависимость $I_c/I_{c0}(I_{инж})$, где I_{c0} — критический ток сверхпроводящей пленки при нулевом токе инжекции. Величину критического тока мостика I_c определяли как $I_c = I_R + I_{инж}$. Видно, что крутизна второго участка получается примерно одинаковая для всех свежеизготовленных образцов, если величину критического тока сверхпроводящей пленки нормировать на ее значение при нулевом токе инжекции. Примечательно, что такая же

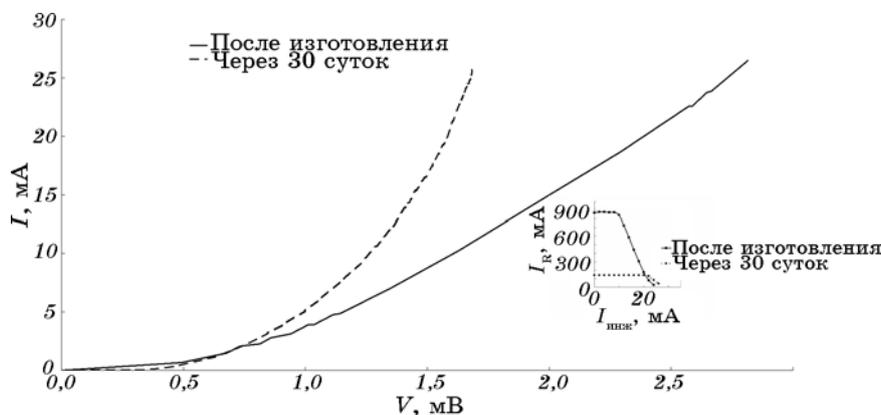


Рис. 5. ВАХ туннельного контакта образца 761b2 (промежуточная поляризация, $R_{NN1} = 0,103$ Ом, $R_{NS1}/R_{NN1} = 29$, $R_{NN2} = 0,065$ Ом, $R_{NS2}/R_{NN2} = 38,4$). На вставке: зависимость тока I_R сверхпроводящей пленки Pb от тока инжекции.

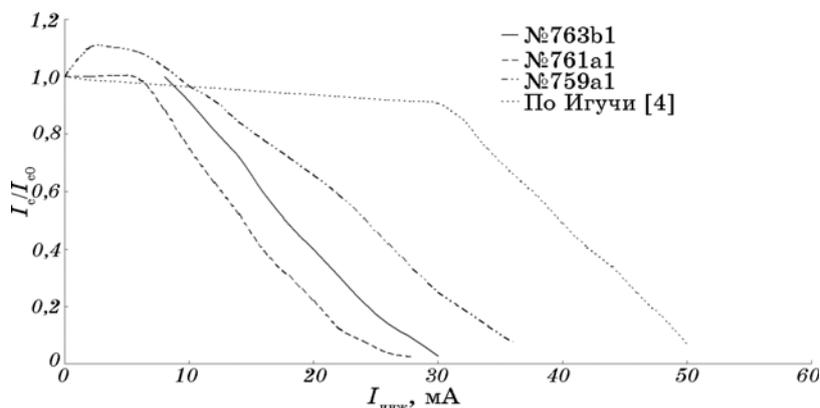


Рис. 6. Приведенные зависимости критического тока сверхпроводящей пленки Pb в структурах CoCrAl-I-Pb разной степени поляризации F-слоя от тока инжекции (кривая 4 — структура NiCrCu-I-Pb).

крутизна зависимости $I_c/I_{c0}(I_{инж})$ наблюдается по данным работы [4], в которой исследованы структуры NiCrCu-I-Pb.

Заметим также, что в процессе старения гетероструктур прозрачность барьера, выражаемая через его сопротивление в нормальном состоянии R_{NN} , в основном падала. Изменение вида зависимости $I_R(I_{инж})$ — более определено: со временем «плато» в основном располагалось ниже. Изменение положения «плато» обусловлено облегчением условий для вхождения вихрей из-за усиления влияния обменного эффекта близости при повышении прозрачно-

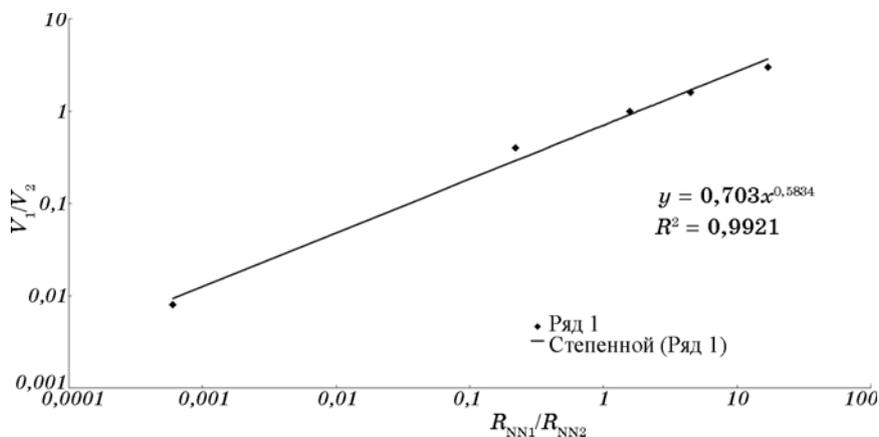


Рис. 7. Зависимость отношения напряжений V_1/V_2 на туннельном контакте, при которых появляется подавление тока I_R сверхпроводящей пленки в структурах CoCrAl-I-Pb, от отношения R_{NN1}/R_{NN2} .

сти барьера. Наклонная часть зависимости $I_R(I_{\text{инж}})$, как мы предполагаем, определяется достижением токов распаривания в части плёнки свинца на границе с ферромагнетиком, где энергетическая щель подавлена из-за эффекта близости.

Мы обнаружили, что при изменении прозрачности барьера гетероструктуры, например, при её старении, существует взаимосвязь между напряжением на гетероконтакте V , при котором начинается подавление тока I_R пленки свинца на зависимости $I_R(I_{\text{инж}})$, и величиной сопротивления гетероконтакта в нормальном состоянии R_{NN} . А именно, выполняется соотношение:

$$V_1/V_2 = 0,7(R_{NN1}/R_{NN2})^{0,58}, \quad (1)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют разной прозрачности барьера гетероструктуры. Полученное соотношение выполняется с высокой достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,99$. Природа выявленной закономерности нами в настоящее время изучается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что вид ВАХ гетероструктур ферромагнетик–изолятор–сверхпроводник $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$ зависит от величины удельного сопротивления $R_{NN}A$ туннельного контакта. При этом вид ВАХ изменяется от S -образного к J -образному при изменении $R_{NN}A$ от $0,01 \cdot 10^{-5}$ до $15 \cdot 10^{-5}$ Ом·см². Кроме того, существуют характерные напряжения смещения, которые связаны с сопротивлением контакта степенной зависимостью.

Выявлено, что зависимость критического тока сверхпроводящей плёнки в гетероструктуре $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$ от величины тока спинполяризованной инжекции имеет два участка: горизонтальный, обусловленный вхождением вихрей в плёнку, и наклонный, связанный с достижением токов распаривания.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Rudenko, I. V. Korotash, M. V. Dyakin et al., *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 4: 429 (2009).
2. И. А. Гарифуллин, Н. Н. Гарифьянов, Р. И. Салихов и др., *ЖЭТФ*, **132**, вып. 1: 255 (2007).
3. Ю. А. Изюмов, Ю. Н. Прошин, М. Г. Хусаинов, *УФН*, **172**, № 2: 113 (2002).
4. I. Iguchi, *Phys. Rev. B*, **16**: 1954 (1977); I. Iguchi, *J. Low Temp. Phys.*, **33**: 439 (1978).
5. Э. М. Руденко, Ю. В. Шлапак, М. В. Дякин и др., *Металлофиз. новейшие технол.*, **30**, № 7: 905 (2008).
6. Э. М. Руденко, И. В. Короташ, Ю. В. Кудрявцев и др., *ФНТ*, **36**, № 2: 234 (2010).