

## Гистерезис тока в магнитных туннельных переходах

© А.М. Баранов, Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, А.И. Крикунов, В.В. Кудрявцев, Ю.Ф. Огрин, В.П. Склизкова, Н.Д. Степина, Л.А. Фейгин, К. Хайде, А.И. Чмиль, Р. Эллиотт

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

E-mail: pez253@ire216.msk.su

(Поступила в Редакцию 26 октября 2000 г.)

В магнитных туннельных переходах типа ферромагнитный металл–немагнитный диэлектрик–ферромагнитный металл обнаружен гистерезис тока, который проявляется в возникновении петель на зависимостях тока через переход от приложенного напряжения, а также в невоспроизводимости самих указанных зависимостей. Гистерезис вызван влиянием поляризованного по спину тока на магнитное состояние металлических слоев: ток приводит к перестройке доменной структуры в этих условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-02-16384) и НАТО (грант № PST, CLG 975312).

Известны два механизма влияния поляризованного по спину тока на магнитное состояние металлических пленок магнитных переходов. Первый из них связан с рассеянием спина электронов проводимости на граничных поверхностях переходов. Сохранение углового момента приводит при таком рассеянии к повороту векторов намагниченности в слоях [1,2]. Второй механизм отличается тем, что носит объемный характер и связан с нарушением спинового равновесия в слоях (с инъекцией спинов) и обменным взаимодействием инжектированных и собственных спинов слоев [3].

Экспериментально наблюдались: 1) эффект "переключения", т. е. инверсия знака намагниченности в одном из металлических слоев, при плотностях тока  $\sim 10^9$  А/см<sup>2</sup> и при определенном знаке тока [4,5]; 2) петли на зависимостях тока от напряжения [5–7]. Кроме того, в ряде экспериментов отмечалось существование в переходах магнитной доменной структуры (ДС), которая менялась во внешнем магнитном поле [8–11].

Настоящая работа является развитием работы [7], в которой впервые сообщалось о наблюдении петель гистерезиса тока, связанных с влиянием тока на магнитное состояние перехода. Представлен дополнительный экспериментальный материал, подтверждающий магнитную природу петель: они существуют независимо от типа диэлектрика, используемого в структуре для разделения ферромагнитных металлических слоев, но всегда исчезают при замене ферромагнитной металлической пленки на пленку нормального металла. Кроме того, показано, что петли зависят от истории изменения во времени приложенного к переходу напряжения и исчезают в достаточно сильных магнитных полях. Сделано предположение, что ток перестраивает магнитную ДС, а петли гистерезиса возникают вследствие пиннинга доменных границ, приводящего к эффекту коэрцитивности.

Были изготовлены трехслойные магнитные туннельные переходы (МТП). На подложки термически окисленного кремния методом магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере Ar наносились пленки

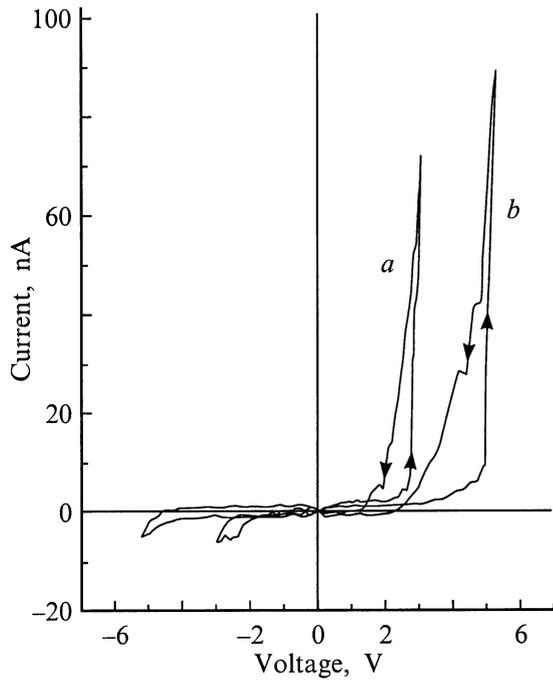
Ni толщиной около  $0.05 \mu\text{m}$ . Пленки диэлектриков наносились затем на поверхность Ni и имели толщины порядка 3–30 nm, что обеспечивало возможность туннельного просачивания электронов. Изготавливались, в основном, два типа диэлектрических пленок.

1) Пленки алмазоподобного углерода (DLC). Они получились в плазме, возбуждаемой высокочастотным разрядом. В качестве рабочего газа использовались пары C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>. Контроль толщины, скорости роста, плотности и шероховатости поверхности алмазоподобных углеродных слоев осуществлялся непосредственно в процессе их выращивания с помощью in-situ рентгеновского мониторинга [12].

2) Органические пленки на основе жесткоцепного полиимида. Они получались в две стадии [13]. На первой стадии методом Лэнгмюра–Блоджетт формировалась пленка амфифильного производного полиимдокислоты. На второй в процессе термической обработки получался конечный продукт — полиимид (LBP).

На поверхность пленки диэлектрика напылялась вторая металлическая пленка, а именно пленка Fe или пленка Fe<sub>91</sub>Zr<sub>9</sub>, для уменьшения магнитной анизотропии. В контрольных образцах вместо пленки Fe напылялась немагнитная пленка Al. Толщина второй металлической пленки была того же порядка ( $0.05 \mu\text{m}$ ). Сплошность диэлектрической пленки проверялась по сопротивлению перехода, которое составляло единицы GΩ при токах  $\sim 1$  nA, и по форме зависимости  $I(V)$ . Толщина диэлектрика определялась технологией и дополнительно контролировалась по емкости перехода. Рабочая поверхность перехода составляла  $\sim 60 \times 120 \mu\text{m}$ .

Исследовались зависимости  $I(V)$  для тока, текущего перпендикулярно границам раздела слоев в переходе. На рис. 1 показаны типичные кривые, полученные для переходов (Ni/Fe) с различными диэлектрическими слоями. Можно видеть, что показанные кривые имеют некоторые общие особенности, которые сохраняются при любом применяемом диэлектрике. Первая особенность состоит в том, что кривые  $I(V)$  необратимы, поскольку



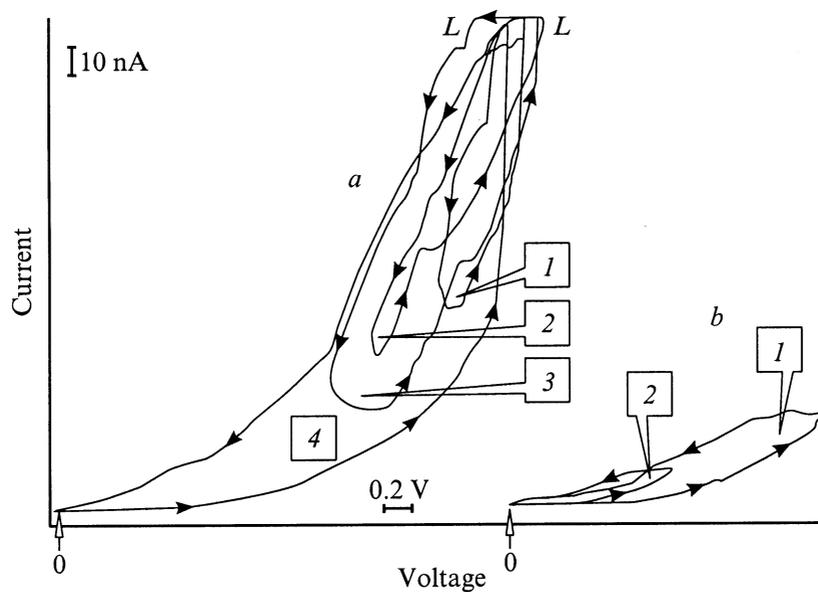
**Рис. 1.** Петли на кривых  $I(V)$  для структур типа Ni/LBP/Fe (a) и Ni/DLC/Fe (b). Стрелки указывают направления изменения тока и напряжения. Толщины пленок LBP и DLC порядка 10 nm.

ток зависит от направления изменения напряжения. В результате при изменении напряжения по замкнутому пути на плоскости ( $I, V$ ) образуется петля. Петля возникает всякий раз, когда мы меняем направление изменения  $V$  на обратное, каково бы ни было значение максимального достигнутого напряжения  $V_m$ . Этим дан-

ные петли принципиально отличаются от описанных в работе [6], где они были вызваны пробоем в диэлектрике и потому возникали только при  $V_m > V_{th}$ , где  $V_{th}$  — некоторое пороговое для пробоя напряжение. Данные петли по своей природе отличаются и от полученных при исследовании эффекта переключения в работе [5]: в отличие от [5] петли наблюдались при любом знаке тока (см. рис. 1). Данные петли нельзя связать также и с процессами в диэлектрическом разделяющем нанослое, поскольку они наблюдались при любых использованных диэлектриках. Однако петли всегда исчезали при замене пленок Fe→Al.

Вторую особенность кривых  $I(V)$  лучше всего иллюстрирует рис. 2. На этом рисунке представлены результаты измерений с помощью самописца. На рис. 2, a показаны четыре последовательные петли. Максимальное напряжение  $V_m$  выбрано настолько большим, что наблюдается значительный рост тока: на рисунке ток показан только ниже линии  $L-L$ . На рис. 2, b показаны две последовательные петли при другом, значительно меньшем, значении  $V_m$ . Видно, что петли возникают при любых  $V_m$ , они невоспроизводимы и располагаются беспорядочно. При этом площадь петель имеет тенденцию увеличиваться с ростом  $V_m$ .

Мы считаем, что сам факт возникновения петель в описанных экспериментах и их невоспроизводимость объясняются влиянием тока на магнитное состояние перехода. Возможны как поверхностный, так и объемный механизм такого влияния. Вместе с тем следует отметить, что петли на зависимостях  $I(V)$  наблюдаются нами при плотностях тока, значительно меньших, чем то пороговое значение плотности тока, которое необходимо для наблюдения эффекта переключения [1,2,4,5]. Даже



**Рис. 2.** Зависимости петель на кривых  $I(V)$  от истории изменения во времени приложенного к переходу напряжения. Стрелки указывают направления изменения тока и напряжения во времени. Цифрами пронумерованы последовательно регистрируемые петли. Горизонтальная линия  $L-L$  соответствует  $\sim 100$  nA и отмечает уровень максимального регистрируемого тока.

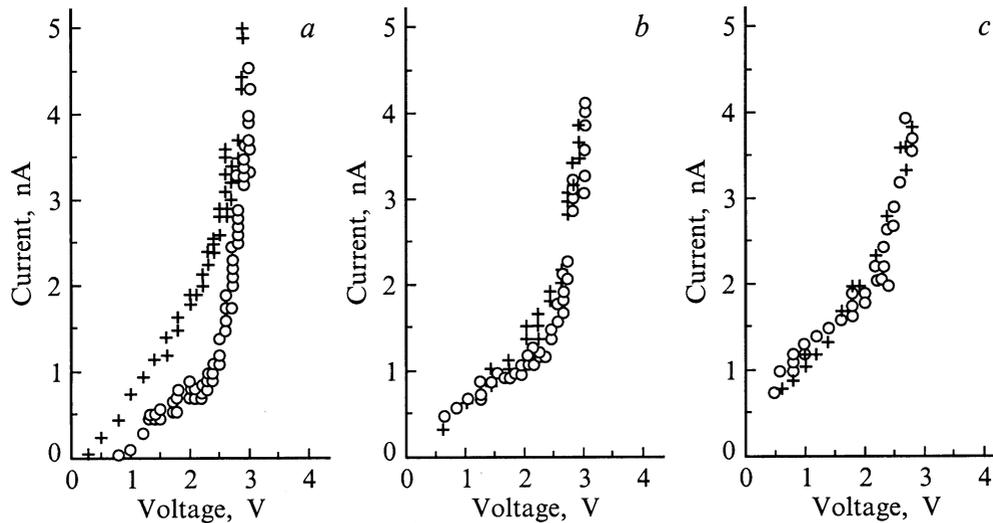


Рис. 3. Влияние смещающего магнитного поля  $H$ , ориентированного в плоскости перехода, на вид зависимости  $I(V)$  для образца Ni/LBP/Fe.  $H, \text{Oe}$ :  $a$  — 0,  $b$  — 40,  $c$  — 150.

если предположить, что весь ток течет через один-единственный канал с минимальными возможными линейными размерами порядка  $1 \text{ nm}$ , то и в этом случае при полном токе  $\leq 100 \text{ nA}$  (рис. 1) плотность тока получится на один–два порядка меньше упомянутого порогового значения.

Беспорядочное расположение петель на плоскости  $(I, V)$  может указывать на влияние нерегулярной ДС в металлических ферромагнитных пленках и на ее взаимодействие с поляризованным по спину током. Эксперименты [14] показывают, что каждый электрон может проникать из домена одной пленки в домен другой пленки через разделяющий их немагнитный слой. Можно предположить, что при таком проникновении остаются справедливыми, хотя бы качественно, известные выводы [15] о зависимости тока от взаимной ориентации намагниченностей. Теперь, однако, речь должна идти об ориентации намагниченностей в указанных доменах: при параллельной ориентации ток, видимо, будет максимальным, а при антипараллельной — минимальным. В результате ток не может оставаться однородным по сечению перехода и должны формироваться пути легкого и затрудненного протекания тока. При этом полный ток через переход будет складываться из парциальных токов между доменами.

Аналогично можно предположить, что останутся качественно справедливыми и выводы о влиянии поляризованного тока на магнитное состояние металлических пленок, полученные в [1–3] без учета разбиения на домены. При наличии ДС речь, очевидно, должна идти об обменном взаимодействии инжектированных в домен спинов с собственными спинами. Результатами такого взаимодействия должны стать вращение намагниченностей в доменах, движение доменных границ и, наконец, изменение топологии ДС в целом.

Коэрцитивность магнитных пленок должна приводить к необратимости и невоспроизводимости описанной перестройки ДС. Вследствие этого ДС не будет определяться только напряжением  $V$  в данный момент времени  $t$ , но должна существенно зависеть от значений  $V$  в предшествующие моменты, т.е. от истории возникновения данной конфигурации доменов. Поскольку полный ток через переход, как уже отмечалось, определяется ДС, понятно, что петли тока, их необратимость и невоспроизводимость могут быть интерпретированы как отражение аналогичных свойств ДС.

Изложенная точка зрения подтверждается двумя дополнительными экспериментами. В первом из них исследовался эффект памяти, т.е. зависимость тока  $I$  от истории изменения напряжения  $V$  во времени  $t$ . Чтобы понять, как это делалось, отметим следующее. В экспериментах, которые до сих пор здесь обсуждались, применялись импульсы напряжения с достаточно малой частотой повторения. В этих импульсах напряжение вначале увеличивалось от нуля до  $V_m$ , а затем убывало от  $V_m$  до нуля с постоянной скоростью, равной  $\sim 40 \text{ mV/s}$ . Например, кривые на рис. 1, 2 были получены именно для таких импульсов напряжения. При этом на рис. 1, 2 четко рисовались петли тока, т.е., согласно нашим представлениям, ДС успевала изменяться под влиянием тока и при обратном ходе напряжения проявлял себя эффект коэрцитивности. В отличие от этого при проведении дополнительного эксперимента напряжение  $V$  менялось во времени с существенно различными по величине скоростями.

Применялись две серии импульсов. В импульсах первой серии напряжение вначале плавно (с обычной скоростью  $\sim 40 \text{ mV/s}$ ) увеличивалось от нуля до максимального значения  $V_m$ , а затем скачком (за миллисекунды) уменьшалось до нуля. В импульсах второй серии

напряжение вначале скачком увеличивалось от нуля до значения  $V_m$ , а затем плавно с обычной скоростью уменьшалось до нуля. Особенность опыта заключалась в том, что перестройка ДС, которая могла происходить при плавном увеличении напряжения, не влияла на вид зависимости  $I(V)$  при плавном уменьшении напряжения. Тогда оказалось, что названные зависимости почти накладываются друг на друга — петли не возникают.

Во втором дополнительном эксперименте исследовалось влияние внешнего магнитного поля  $H$ . Достаточно сильное поле  $H$  должно приводить к насыщению ферромагнитных металлических слоев и к подавлению ДС. Если петли тока возникают вследствие перестройки ДС, то они так же должны быть существенно подавлены. Образцы переходов помещались в поле  $H$ , параллельное плоскости перехода. После установки определенного значения поля  $H$  напряжение постепенно увеличивалось и измерялся ток. Напряжение менялось достаточно медленно, чтобы реализовался установившийся стационарный режим протекания тока. При  $H = 0$  наблюдалась петля, подобная показанной на рис. 1, 2. При  $H = 40$  Ое петля становилась значительно меньше и полностью исчезала при  $H = 150$  Ое в интервале напряжений  $V = 0-3$  В (рис. 3). При этом точность измерения тока составляла  $\sim 10\%$  от величины тока.

Заметим, что если поле  $H$  включалось при  $V \neq 0$  и  $I \neq 0$ , то влияние его на вид зависимости  $I(V)$  оказывалось значительно более слабым. Для того чтобы убрать петлю на зависимости  $I(V)$ , могло потребоваться поле  $H \geq 2-4$  КОе. По-видимому, указанный факт свидетельствует о том, что ДС при протекании тока способна жестко фиксироваться вследствие обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями через электроны проводимости.

Таким образом, в МТП наблюдались петли на кривых  $I(V)$ , которые зависели от истории изменения напряжения  $V$  во времени. Эти наблюдения можно объяснить гистерезисом, который вызван влиянием тока на магнитное состояние ферромагнитных слоев и на ДС в них.

В заключение сделаем два замечания. Прежде всего отметим, что петли получаются довольно широкими. При фиксированном напряжении  $V$  токи на различных ветвях петли, согласно рис. 2, могут отличаться в несколько раз. Это может показаться удивительным с точки зрения оценок магнетосопротивления в структурах типа (Ni/Fe), которые делались ранее при относительно слабых туннельных токах [15]. Следует подчеркнуть, однако, что в данном случае ток не является слабым в том смысле, что он сам производит намагничивание и перестройку ДС в ферромагнитных слоях. Поэтому хотя ток и зависит от ориентации моментов, но характер этой зависимости может оказаться иным, чем в известных опытах по магнетосопротивлению. В частности, не исключено, что туннельная прозрачность сама по указанной причине становится зависящей от тока. Этот вопрос требует специального рассмотрения.

Второе замечание связано с тем, что механизм проводимости через переход может оказаться не столь важным для образования петель, если только этот механизм не приводит к сильной деполяризации тока и не препятствует обменному взаимодействию между слоями. Поэтому следует ожидать, что аналогичный эффект гистерезиса тока мог бы существовать и в некоторых магнитных переходах с металлическим разделяющим слоем.

Авторы благодарны А. Ведяеву и А. Грановскому за обсуждение работы и ценные замечания.

## Список литературы

- [1] J.C. Slonczewski. *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).
- [2] L. Berger. *Phys. Rev.* **B54**, 13, 9353 (1996).
- [3] C. Heide, R.J. Elliott, N.S. Wingreen. *Phys. Rev.* **B59**, 4287 (1999).
- [4] M. Tsoi, A.G.M. Jansen, J. Bass, W.C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi, P. Wyder. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 19, 4281 (1998).
- [5] E.B. Myers, D.C. Ralph, J.A. Katine, R.N. Louie, R.A. Buhrman. *Science* **285**, 867 (1999).
- [6] C.L. Pratt, B. Dieny, A.E. Berkowitz. *J. Appl. Phys.* **81**, 8, 5523 (1997).
- [7] C. Heide, A.I. Krikunov, Yu.F. Ogrin, P.E. Zilberman, R. Elliott. *J. Appl. Phys.* **87**, 9, 5221 (2000).
- [8] T. Miyazaki, N. Tezuka. *J. Magn. Magn. Mater.* **139**, L231 (1995).
- [9] V.S. Gornakov, V.I. Nikitenko, L.H. Bennett, H.J. Brown, M.J. Donahue, W.F. Egelhoff, R.D. McMichael, A.J. Shapiro. *J. Appl. Phys.* **81**, 8, 5215 (1997).
- [10] X. Portier, A.K. Petford-Long. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, 1 (1999).
- [11] Yu. Lu, P.L. Trouilloud, D.W. Abraham, R. Koch, J. Slonczewski, S. Brown, J. Bucchigiano, E. O'Sullivan, R.A. Wanner, W.J. Gallagher, S.S.P. Parkin. *J. Appl. Phys.* **85**, 8, 5267 (1999).
- [12] A.M. Baranov, I.F. Mikhailov. *Thin Solid Films* **324**, 1-2, 63 (1998).
- [13] V.P. Sklizkova, V.V. Kudryavtsev, Yu.G. Baklagina, N.D. Stepina, L.A. Feigin, L.A. Yanusova, V.V. Klechkovskaya. *Proc. 5th Int. Conf. on Polyimides*. Ellenville, N.Y. (1994). N 2-4. P. 61.
- [14] S.J.C.H. Theeuwens, J. Caro, K.P. Wellock, S. Radelaar, C.H. Marrows, B.J. Hickey, V.I. Kozub. *Appl. Phys. Lett.* **75**, 23, 3677 (1999).
- [15] M. Julliere. *Phys. Rev. Lett.* **A54**, 225 (1975).