

05;06;12

Магнитосопротивление наномостиков из лантан-стронциевого манганита

© В.А. Березин, В.И. Николайчик, В.Т. Волков,
Ю.Б. Горбатов, В.И. Левашов, Г.Л. Клименко,
В.А. Тулин, В.Н. Матвеев, И.И. Ходос

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка

Поступило в Редакцию 22 декабря 1998 г.

Изготовлены наномостики из лантан-стронциевого манганита, осажденного на мембраны Si_3N_4 со сквозными отверстиями, сформированными сфокусированным ионным пучком. Величина магнитосопротивления составляет $\approx 9\%$ в полях ~ 1 кОе. Обнаружена нелинейность вольт-амперной характеристики мостиков и сдвиг максимума сопротивления в сторону более низких температур относительно максимума сопротивления контрольного пленочного образца состава $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$.

В настоящее время активно изучаются свойства манганитов редкоземельных элементов $\text{A}_{1-x}\text{B}_x\text{MnO}_3$, где А — редкоземельный элемент (La, Pr, Nd), В — щелочно-земельный (Ca, Ba, Sr). Эти материалы привлекают внимание из-за наблюдаемого в них эффекта колоссального магнитосопротивления [1]. Известные в литературе данные о проводимости манганитных материалов были получены на объемных и пленочных проводниках макроскопических размеров. Для понимания механизмов электронного транспорта в манганитах и изготовления на их основе различных наносенсоров и приборов для магнитной записи необходимы сведения о свойствах проводников малых размеров. В данной работе впервые сообщается об изготовлении и исследовании магнитосопротивления мостиков нанометровых размеров из лантан-стронциевого манганита.

В качестве исходных компонентов для синтеза мишеней $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ использовали оксиды La и Mn (La_2O_3 и MnO_2) и углекислый стронций (SrCO_3). Термообработку смеси исходных компонентов проводили при постепенном повышении температуры с выдержкой в течение 2 часов при 300, 400, 650 и 900°С. Затем порошок

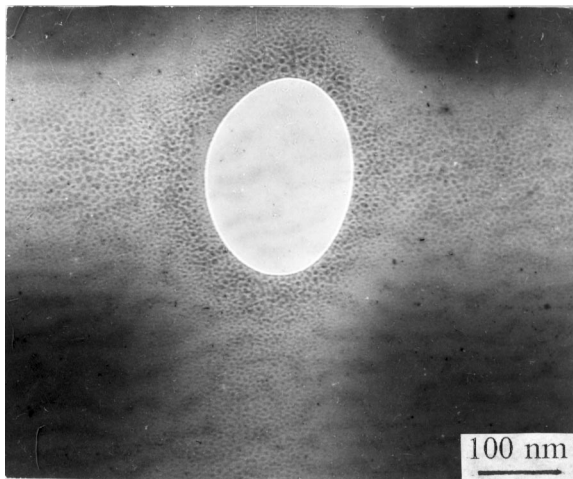


Рис. 1. Отверстие в мембране Si_3N_4 , сформированное сфокусированным ионным пучком.

перетирали и прессовали в таблетки, которые спекали при $T = 1385^\circ\text{C}$ на воздухе в течение одного часа.

В качестве объектов для формирования наномостиков использовались мембраны из Si_3N_4 [2] толщиной около 100 nm. В мембранах с помощью сфокусированного ионного пучка формировали отверстия размером < 500 nm (рис. 1). Затем на мембрану ВЧ-диодным распылением сапфировой мишени наносили с двух сторон слой Al_2O_3 определенной толщины, что позволяло уменьшать отверстия до необходимого размера и предотвращало взаимодействие манганита с материалом мембраны. Таким образом формировались каналы с характерным размером сечения < 100 nm и длиной до 200 nm. Каналы заполняли манганитом методом лазерного напыления пленки $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ толщиной 250 nm на обе стороны мембраны. Перед напылением манганита мембраны прогревались непосредственно в вакуумной камере при 800°C с давлением остаточных газов 10^{-5} Pa. Напыление проводилось при температуре образца 700°C и давлении кислорода 10 Pa.

Для напыления использовался импульсный лазер с длиной волны $1.06 \mu\text{m}$. Пучок фокусировался на мишени с помощью длиннофокусной линзы, находящейся вне пределов вакуумной камеры. Плотность мощно-

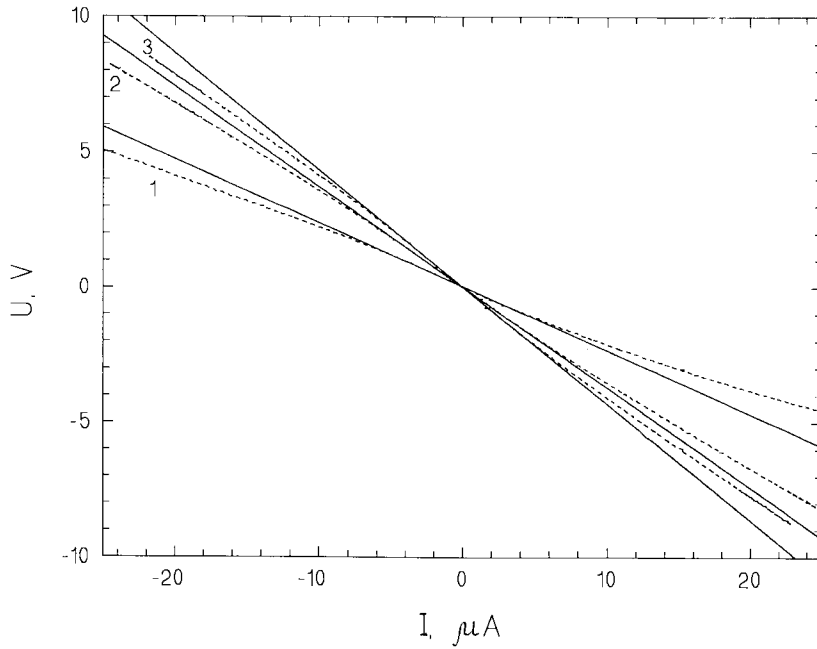


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики образца № 2 манганитным наномостиком. Пунктирные линии — эксперимент, сплошные линии — аппроксимации линейных участков экспериментальных кривых. 1 — $T = 300$ К, $H = 0$ Ое; 2 — $T = 77$ К, $H = 6$ Ое; 3 — $T = 77$ К, $H = 0$ Ое.

сти на вращающейся мишени составляла $\sim 10^9$ W/cm² при длительности импульса 10 ns. При частоте импульсов 15 Hz и расстоянии от мишени до образца 60 mm скорость напыления составляла ≈ 0.4 nm/s. После напыления пленки манганита образцы отжигались на воздухе при температуре 850°C в течение 1 h и затем охлаждались со скоростью 0.1 grad/s.

Исследование материала мишени в просвечивающем электронном микроскопе JEM-2000FX, оборудованном системой элементного анализа AN10/95S, показало его однофазность и химическую однородность с соотношением металлических элементов, соответствующим их пропорции в смеси исходных компонентов. Наблюдения структуры напыленных

№ образца	Размер канала до напыления манганита	R (300 К), к Ω	R (77 К), к Ω	$\frac{R(0 \text{ Oe}) - R(6 \text{ kOe})}{R(0 \text{ Oe})}$ при 77 К
1	$50 \times 85 \text{ nm}$	1890	2577	0.085
2	$25 \times 75 \text{ nm}$	257.4	465	0.159
3	$5 \times 2 \text{ mm}$	73.7	50.9	0.189
(контрольный образец)	$h = 250 \text{ nm}$			

пленок манганита выявили, что они являются поликристаллическими со средним размером зерна $\approx 50 \text{ nm}$. Кроме того, в сравнении с однородным материалом мишени, в структуре пленок присутствует неоднородность в виде небольшого количества включений (капель), имеющих отличный от основной массы зерен элементный состав. Присутствие таких включений характерно для лазерного метода осаждения пленок и других металлооксидных материалов, включая ВТСП, что вызывает необходимость подбора условий осаждения для минимального образования капель.

Для изучения электрических и магнитных свойств наномостиков нами были проведены измерения температурных и полевых зависимостей сопротивления. Параметры измерявшихся образцов № 1, 2 с наномостиками и контрольного образца (в качестве которого выступала полоска манганита длиной 5 mm и шириной 2 mm , напыленная и отожженная одновременно с мостиками) представлены в таблице. Ожидаемые значения сопротивления мостиков лежали в диапазоне от сотен к Ω до нескольких М Ω . При таком большом сопротивлении вероятность перегрева образцов измерительным током была значительна. Чтобы избежать этой опасности, предварительно измерялась вольт-амперная характеристика (ВАХ). Пример ВАХ для образца № 2 приведен на рис. 2 (аналогичное поведение демонстрирует и образец № 1). Видно, что начиная с некоторого значения тока (здесь около $5 \mu\text{A}$) закон Ома нарушается и сопротивление образца с мостиком начинает уменьшаться. Причины возникновения нелинейности ВАХ образцов с мостиками обсуждаются ниже. Магнитные измерения проводились в линейной по току области.

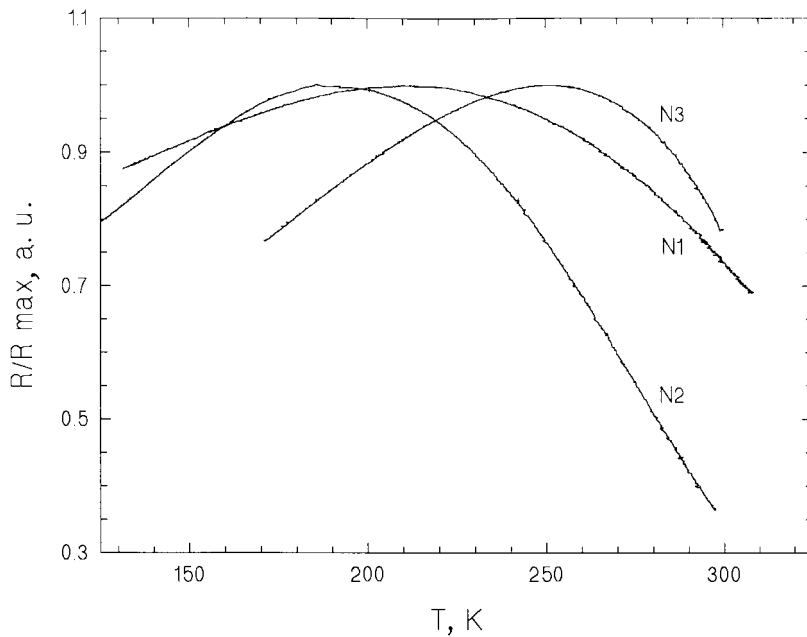


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления образцов № 1, № 2 с наномостиками и контрольного образца № 3, нормированные на соответствующие максимальные значения сопротивлений.

На рис. 3 приведены температурные зависимости сопротивления образцов с мостиками и контрольного образца. Так как сопротивления образцов значительно различались, на рис. 3 показаны величины, поделенные на максимальное значение сопротивления для каждого образца. Данный рисунок демонстрирует сдвиг положения максимума сопротивления в сторону более низких температур при уменьшении поперечного размера мостика. Известно, что максимум сопротивления манганитных проводников макроскопических размеров находится вблизи точки Кюри, которая определяется составом манганитного материала: отношением редкоземельного и щелочно-земельного элементов [3], содержанием кислорода [4].

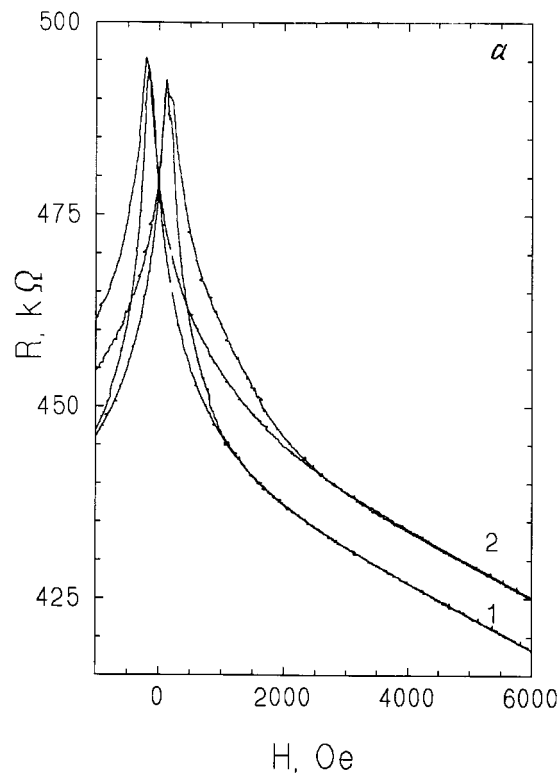


Рис. 4. Полевые зависимости сопротивления при $T = 77$ К: *a* — контрольного образца; *b* — образца № 2 с наномостиком. Магнитное поле было направлено параллельно (1) и перпендикулярно (2) плоскости пленки манганита.

Обращает на себя внимание, что сопротивление образца № 1, размер канала которого до напыления пленки манганита был 50×85 nm, больше сопротивления образца № 2 с меньшим размером (25×75 nm) исходного канала. Более того, литературные данные [3,4] указывают, что большее значение температуры максимума сопротивления соответствует меньшему удельному сопротивлению. Т.е. образец № 1 должен иметь меньшее удельное сопротивление. Противоречие этих данных может быть объяснено тем, что в канале образца № 1 наряду с материалом высокой проводимости, температурная зависимость которой определяет

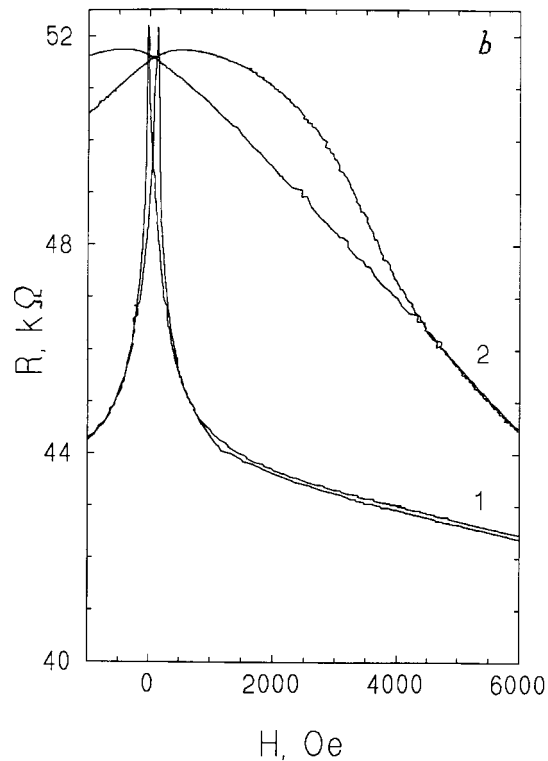


Рис. 4 (продолжение).

вид кривой на рис. 3, присутствует главным образом материал с низкой проводимостью. Сосуществование двух типов материалов может быть обусловлено предполагаемой кластерной структурой манганитного материала, образованного перемешанными областями (размерами в несколько nm) высокой и низкой проводимости [5] различного состава [6]. Проводимость объемного манганитного материала (контрольный образец) является усредненной величиной, определяемой прохождением носителей тока через разнородные области. Для образцов малых размеров существенно повышается вероятность превалирующего присутствия либо высокопроводящих областей, либо изолирующих. Последние могли заполнить канал образца № 1 в большом количестве.

На рис. 4, *a, b* приведено магнитосопротивление контрольного образца и образца № 1 с мостиком для различной ориентации магнитного поля относительно образца. Видно, что контрольный образец обладает четко выраженной анизотропией, связанной с пленочной формой образца. Подобная анизотропия не наблюдается на образце с мостиком, что говорит о более равноосной форме мостика. Оба образца обладают приблизительно одинаковой коэрцитивной силой (≈ 150 Oe) и величиной изменения сопротивления в магнитном поле ($> 10\%$ в поле 6 kOe). Важным обстоятельством, позволяющим их использовать в качестве датчика магнитного поля, является тот факт, что значительное изменение сопротивления ($\approx 9\%$) происходит уже в полях ~ 1 kOe.

Наблюдаемая нелинейность ВАХ мостиков не может быть вызвана простым тепловым перегревом образца. Для этого оценим возможное повышение температуры мостика при рассеиваемой на нем мощности от 10 до $200 \mu\text{W}$, размеры которого для простоты будем считать равными $100 \times 100 \times 100$ nm. Если принять характерный для оксидных материалов [7] коэффициент теплопроводности манганита при 300°C по порядку величины $\lambda \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, то температура середины наномостика будет максимум на 20–40 градусов выше, чем его края. Таким образом, выделяемая мощность будет эффективно отводиться в контакты и боковые стенки и наномостик не должен перегреваться. В подтверждение этой оценки говорит тот факт, что нелинейная зависимость наблюдается при температурах как до максимума сопротивления (область металлической проводимости), так и после максимума (область полупроводниковой проводимости). Нелинейность не может быть вызвана и магнитным полем тока. Оценки показывают, что величина магнитного поля тока достаточно мала (~ 1 Oe). Причиной нелинейной зависимости может быть открытие дополнительных каналов проводимости с увеличением энергии электронов.

В заключение можно выделить следующее. Нами впервые изготовлены нанометровые объекты (мостики) из лантан-стронциевого манганита, обладающие эффектом гигантского магнитосопротивления. Величина эффекта сравнима со значениями для манганитных пленок, значительное изменение сопротивления ($\approx 9\%$) происходит в полях ~ 1 kOe. Обнаружена нелинейность вольт-амперной характеристики образцов с наномостиками и сдвиг максимума их сопротивления в сторону более низких температур относительно максимума сопротивления контрольного пленочного образца состава $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 96–02–17123) и Госпрограммы ”Физика твердотельных наноструктур” (грант 97–1063).

Список литературы

- [1] *Jin S., Tiefel T.H., McCormack M.* et al. // *Science*. 1994. V. 264. P. 413–415.
- [2] *Касумов А.Ю., Левашов В.И., Матвеев В.Н., Березин В.А., Тулин В.А.* // *Микроэлектроника*. 1997. Т. 26. С. 49–51.
- [3] *Urushibara A., Morito Y., Akima T.* et al. // *Phys. Rev. B*. 1995. V. 51. P. 14 103–14 109.
- [4] *Ju H.L., Kwon C., Qi Li* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. P. 2108-2110.
- [5] *Нагаев Э.Л.* // *УФН*. 1996. Т. 166. С. 833–858.
- [6] *Nikolaichik V.I., Klinkova L.A.* // *Abstracts of 5th International Workshop MSU-HTSC V*. 1998. P. F-14.
- [7] *Uher C., Kaiser A.B.* // *Phys. Rev. B*. 1987. V. 36. P. 5680–5683.