

Магнетосопротивление пленок $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$, когерентный рост которых нарушен частичной релаксацией механических напряжений

© Ю.А. Бойков,¹ М.П. Волков,^{1,2} В.А. Данилов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures,
53-421 Wrocław, Poland
e-mail: yu.boikov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 28 сентября 2010 г.)

Вследствие значительного положительного рассогласования ($m = 1.8\%$) в параметрах кристаллических решеток $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ и LaAlO_3 , манганитные пленки, сформированные на подложках из алюмината лантана, находятся под действием двухосных сжимающих механических напряжений. Жесткая связь с подложкой обуславливает существенное тетрагональное искажение ($\gamma \approx 1.04$) элементарной ячейки в прослойке манганитной пленки толщиной порядка 20 нм, выращенной когерентно на (001) LaAlO_3 , а в остальной части ($\sim 75\%$) объема манганитного слоя напряжения частично релаксировали. Релаксация напряжений сопровождается уменьшением γ , а эффективный объем элементарной ячейки пленки $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ при этом возрастает. Релаксированный слой в пленке $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ состоит из кристаллических зерен с латеральными размерами 50–200 нм, относительная азимутальная разориентация которых составляет приблизительно 0.3 deg. Максимум на температурных зависимостях электросопротивления ρ и отрицательного магнетосопротивления MR выращенных манганитных пленок наблюдается при температуре 240 и 215 К соответственно. При температуре ниже 50 К зависимости ρ от магнитной индукции, измеренные при сканировании последней в последовательности $0 \rightarrow 14 \text{ T} \rightarrow 0$, становились гистерезисными.

Введение

Тонкие слои перовскитоподобных манганитов $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ перспективны для применения в магнеторезистивных сенсорах и ячейках магнитной памяти [1,2]. Для использования в реальных устройствах эпитаксиальные манганитные пленки заданного состава должны быть интегрированы с диэлектрическими прослойками и проводящими электродами в многослойной гетероструктуре, выращенной на подложках из материалов, используемых в микроэлектронике (прежде всего, на кремнии). Различия в параметрах кристаллических решеток и температурных коэффициентов линейного расширения подложки и манганитной пленки способствуют возникновению в ней механических напряжений. Напряжения, действующие в процессе зародышеобразования и роста, могут оказывать существенное влияние на структуру [3], стехиометрию [4] манганитной пленки и на расслоение фаз в ее объеме (речь идет о фазах с различным зарядовым и/или магнитным упорядочением [5]). Присутствие в пленках $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.33$) при температуре меньше T_{Curie} (T_{Curie} — температура Кюри) включений неферромагнитной фазы (антиферромагнитной, парамагнитной) было установлено с использованием сканирующей туннельной микроскопии [6] и ядерного магнитного резонанса [7]. Влияние расслоения фаз на магнетотранспортные параметры манганитных пленок к настоящему времени исследовано лишь фрагментарно.

В данной работе исследованы структура, электро- и магнетосопротивление пленок $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$

(LCMO), двухосные напряжения в которых частично релаксировали.

Эксперимент

Метод лазерного испарения (KrF , $\lambda = 248 \text{ nm}$, $\tau = 30 \text{ ns}$) был использован для формирования пленок LCMO толщиной $d = 80 \text{ nm}$ на поверхности подложек (001) LaAlO_3 (LAO). Плотность лазерного излучения на поверхности керамической мишени LCMO равнялась 1.5 J/cm^2 , температура подложки при осаждении пленки манганита поддерживалась на уровне 790°C , а давление кислорода в ростовой камере составляло 30 Па.

Структура выращенных пленок исследовалась с использованием рентгеновской дифракции (Philips X'pert MRD, $\text{CuK}_{\alpha 1}$, $\omega/2\theta$ и ϕ -сканы, двумерные изображения рефлексов). Для определения параметров элементарной ячейки выращенных манганитных пленок в плоскости подложки и вдоль нормали к ее поверхности были использованы $\omega/2\theta$ -сканы, измеренные в симметричной брэгговской конфигурации в условиях, когда падающий и отраженный рентгеновские пучки находились в плоскости, перпендикулярной (001) или (101)LAO. Морфология свободной поверхности манганитных пленок исследовалась с использованием микроскопа атомных сил (AFM) Nanoscope IIIa.

Сопротивление R выращенных пленок LAO измерялось в конфигурации van der Pauw в магнитном поле (магнитная индукция B до 14 Т) и без него. Магнитное поле было направлено параллельно плоскости подлож-

ки, но перпендикулярно направлению измерительного тока. Электросопротивление ρ пленок рассчитывалось с использованием соотношения $\rho = \pi dR / \ln 2$ [8]. Четыре серебряных контакта, расположенные на углах квадрата, формировались на свободной поверхности манганитного слоя методом термического испарения.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рассогласование m в параметрах кристаллических решеток LCMO (псевдокубическая элементарная ячейка, $a_{\text{LCMO}} = 3.858 \text{ \AA}$ [9]) и LAO (псевдокубическая ячейка, $a_{\text{LAO}} = 3.789 \text{ \AA}$ [10]) положительное и составляет порядка 1.8% [$m = (a_f - a_s) / a_s$, где a_f и a_s — параметры кристаллических решеток пленки и подложки соответственно]. Положительное m способствует возникновению двухосных латеральных сжимающих напряжений в манганитной пленке, формируемой на поверхности подложки из алюмината лантана. Температурные коэффициенты линейного расширения LCMO и LAO имеют близкие значения [11,12].

Структура пленок LCMO, выращенных на LAO

На рентгеновских дифрактограммах, полученных для пленок LCMO/LAO, присутствовали пики только от манганитной пленки и подложки (рис. 1). Это свидетельствует об отсутствии в их объеме макровключений кристаллических вторичных фаз. Сдвоенность пиков

(00n)LCMO на измеренных $\omega/2\theta$ -сканах (см. рис. 1) обусловлена частичной релаксацией напряжений в манганитном слое. Визуализированное двумерное изображение рентгеновского рефлекса (101)LCMO (см. вставку *a* на рис. 1) позволяет говорить о том, что релаксация напряжений в пленках LCMO/LAO произошла неоднородно. Напряжения частично релаксировали в основной части объема пленки LCMO/LAO, однако в ней присутствовала также прослойка, латеральный параметр элементарной ячейки в которой совпал с соответствующим параметром подложки (см. ту же вставку). Согласно данным, приведенным в [13,14], пленка LCMO формируется когерентно на поверхности LAO, если ее толщина меньше критической L_k (значение L_k зависит от условий роста и может достигать нескольких десятков нанометров). Снижению энергии упругой деформации в манганитной пленке, выращенной когерентно на поверхности LAO, способствует нарушение ее стехиометрии [4]. Имеющиеся в литературе данные [13] по микроструктуре пленок LCMO/LAO толщиной больше l указывают на то, что частичная релаксация напряжений в их объеме происходит в слое, прилегающем к свободной поверхности, а прослойка пленки, находящаяся в контакте с подложкой, формируется когерентно на поверхности последней. На границе между когерентно выращенной прослойкой и частично релаксированным слоем в манганитной пленке имеется область с высокой плотностью дефектов структуры [14].

Для определения параметров элементарной ячейки в когерентно выращенной прослойке манганитной пленки и в слое, где произошла частичная релаксация напряжений, были использованы значения 2θ для (303) и (004)LCMO пиков на измеренных рентгеновских сканах. Латеральный параметр элементарной ячейки ($a_1 = 3.785 \pm 0.005 \text{ \AA}$) в когерентно выращенной прослойке манганитной пленки был существенно меньше параметра ($a_2 = 3.946 \pm 0.005 \text{ \AA}$) той же ячейки, измеренного вдоль нормали к плоскости подложки. Значение a_1 практически совпадало с параметром псевдокубической ячейки подложки LAO ($a_{\text{LAO}} = 3.786 \pm 0.005$), который был рассчитан с использованием полученных рентгеновских данных. Значения параметров элементарной ячейки релаксированного слоя манганитной пленки в плоскости подложки ($a_3 = 3.834 \pm 0.005 \text{ \AA}$) и вдоль нормали к ее поверхности ($a_4 = 3.874 \pm 0.005 \text{ \AA}$) различались не столь значительно, как в случае когерентно выращенной прослойки. Эффективный объем элементарной ячейки $V_{\text{eff}} = a_1^2 a_2 \approx 56.53 \text{ \AA}^3$ когерентно выращенной прослойки в пленке LCMO/LAO был заметно меньше объема элементарной ячейки слоя, в котором произошла частичная релаксация напряжений ($V_{\text{eff}} \approx 56.96 \text{ \AA}^3$), и соответствующего объема в монокристаллах LCMO ($V_{\text{eff}} = 57.42 \text{ \AA}^3$ [9]). Уменьшение объема элементарной ячейки пленки LCMO/LAO свидетельствует об ее обогащении кальцием и/или кислородом (механизмы, ответственные за нарушение стехиометрии манганитных пленок, сформированных на подложках с положитель-

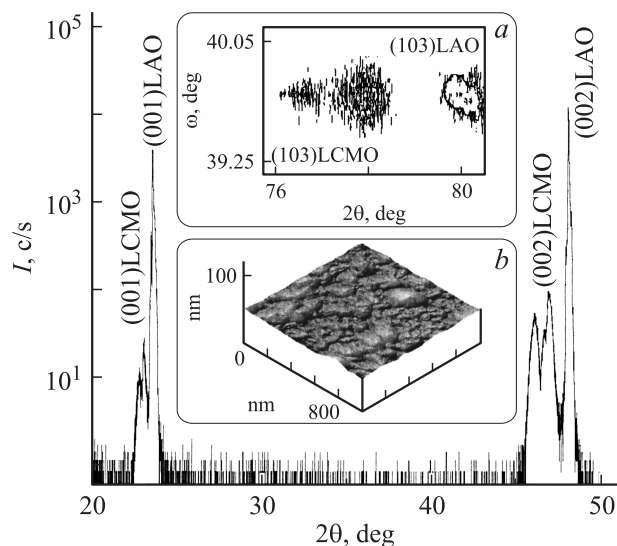


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма ($\text{CuK}\alpha_1, \omega/2\theta$) для пленки LCMO/LAO, полученная в условиях, когда падающий и отраженный рентгеновские пучки находились в плоскости, нормальной к плоскости подложки. Двумерное изображение рефлекса (103) для той же пленки показано на вставке *a*. На вставке *b* приведено изображение свободной поверхности пленки LCMO/LAO, полученное с использованием микроскопа атомных сил (режим высоты, угол обзора -45°).

ным m , детализированы в [4]). Используя данные [15] по зависимости $V_{\text{эф}}$ объемных поликристаллов LCMO от концентрации щелочноземельного элемента, авторы грубо оценили величину x для прослойки манганитной пленки, выращенной когерентно (≈ 0.44) на поверхности LAO, и для слоя, в котором произошла релаксация напряжений (≈ 0.38).

Полученные с использованием микроскопа атомных сил изображения свободной поверхности выращенных пленок (см. вставку b на рис. 1) указывают на то, что слой пленки LCMO/LAO, прилегающий к свободной поверхности, состоял из кристаллитов размером 50–200 nm. Межкристаллитные границы в манганитной пленке были отмечены характерными углублениями на ее свободной поверхности. Эффективная азимутальная разориентация кристаллических зерен в слое манганитной пленки, в котором произошла частичная релаксация напряжений, составляет порядка 0.3 deg (оценка получена с учетом полуширины пика на рентгеновском ϕ -скане для рефлекса (111)LCMO). Исследование микроструктуры манганитных пленок, выращенных на подложках из лантана алюмината, полученные с использованием электронной микроскопии высокого разрешения в [13], не выявило присутствия межкристаллитных границ в прослойках LCMO, выращенных когерентно на поверхности подложки LAO.

Чтобы определить эффективное искажение элементарной ячейки $\delta a/a$ в слое пленки LCMO/LAO, в котором произошла частичная релаксация напряжений, и оценить толщину прослойки, выращенной когерентно на поверхности подложки, авторы использовали зависимость полуширины Δ пиков на измеренных $(00n)\omega/2\theta$ -сканах от θ . Согласно [16], Δ и θ связаны соотношением

$$\Delta = 0.9\lambda_1/d_1 \cos \theta + 2(\delta a/a) \tan \theta,$$

где $\lambda_1 = 1.54056 \text{ \AA}$ — длина волны рентгеновского излучения, d_1 — средний размер кристаллических зерен в пленке или ее толщина, если последняя свободна от межзеренных границ.

Зависимости произведения $\Delta \cos \theta$ от $\sin \theta$ для прослойки манганитной пленки, выращенной когерентно (1) на поверхности подложки LAO и для слоя той же пленки, в котором произошла частичная релаксация напряжений (2), показаны на рис. 2. Используя приведенное соотношение и значение $\Delta_1(\sin \theta = 0) \approx 7.2 \cdot 10^{-3}$, определенное по отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой 1 на рис. 2, авторы получили грубую оценку толщины ($\approx 20 \text{ nm}$) прослойки, выращенной когерентно на поверхности подложки LAO. Используя то же соотношение и значение $\Delta_2(\sin \theta = 0) \approx 1.2 \cdot 10^{-3}$, определенное по отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой 2 на рис. 2, авторы получили оценку среднего размера ($\approx 115 \text{ nm}$) кристаллических зерен в слое манганитной пленки, в котором произошла частичная релаксация напряжений.

Оценки среднего размера кристаллических зерен в слое манганитной пленки, прилегающей к ее свобод-

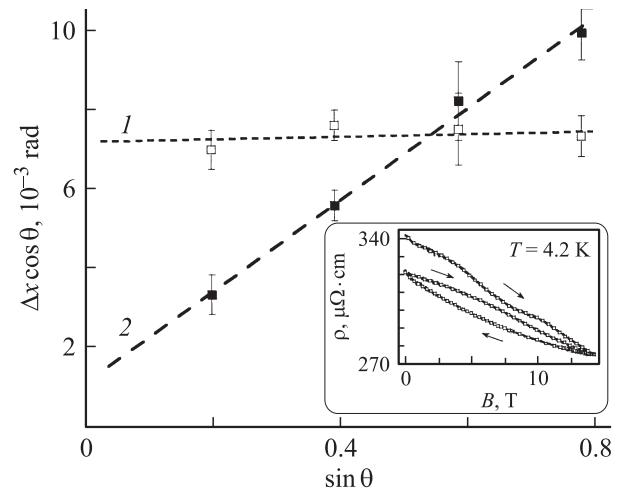


Рис. 2. Произведение $\Delta \cos \theta$ для пиков (00n)LCMO от квазикогерентно выращенной прослойки 1 манганитной пленки и от слоя в ее объеме, в котором произошла частичная релаксация напряжений 2, возрастало практически линейно с увеличением $\sin \theta$. На вставке показана зависимость $\rho(B, T = 4.2 \text{ K})$ пленки LCMO/LAO, измеренная при сканировании B в последовательности $0 \rightarrow 14 \rightarrow 0 \rightarrow 14 \text{ T}$, манганитная пленка была охлаждена до 4.2 K при $B = 0$.

ной поверхности, полученные с использованием рентгеновских данных, хорошо согласуются с соответствующими оценками, полученными из данных по морфологии поверхности выращенных пленок. Из наклона прямой 2 на рис. 2 возможно определить эффективное искажение элементарной ячейки $\delta a/a \approx 5 \cdot 10^{-3}$ в слое пленки LCMO/LAO, в котором произошла частичная релаксация напряжений. Значительная величина $\delta a/a$ указывает на наличие в приповерхностном слое пленки LCMO/LAO кристаллических зерен с существенной разницей в параметрах элементарных ячеек вдоль нормали к плоскости подложки. Из наклона прямой 1 на том же рисунке следует, что эффективное искажение элементарной ячейки в прослойке пленки LCMO, выращенной когерентно на подложке LAO, существенно меньше, чем в частично релаксированном слое.

Электро- и магнетосопротивление пленок LCMO/LAO

Температурные зависимости электросопротивления пленок LCMO/LAO, измеренные в магнитном поле различной напряженности, показаны на рис. 3. Максимум на кривой $\rho(T, B = 0)$ пленки LCMO/LAO наблюдался при температуре $T_M \approx 240 \text{ K}$, которая на 25 K ниже соответствующей температуры для объемных стехиометрических кристаллов LCMO [17] (T_M , как правило, близка к T_{Curie}). Понижение T_M для пленок LCMO/LAO обусловлено увеличенной, по сравнению с исходной, мишенью ($\sim 33\%$) относительной концентрацией ионов Mn^{4+} в их объеме (об этом свидетельствуют получен-

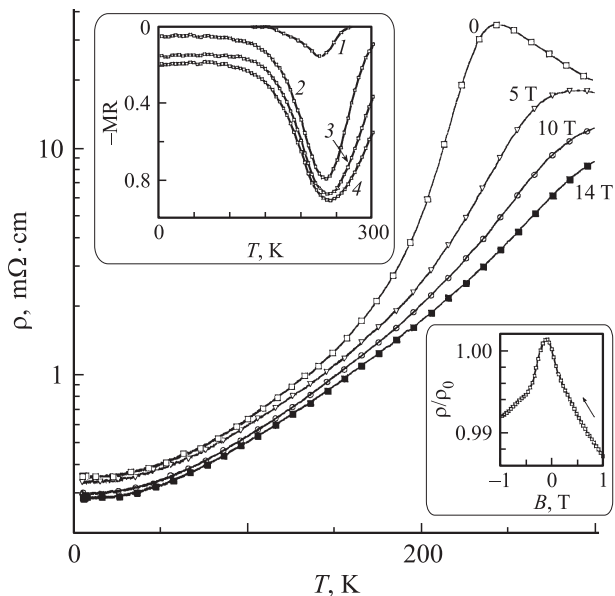


Рис. 3. Температурные зависимости электропроводности ρ пленки LCMO/LAO, измеренные в магнитном поле различной напряженности, значения B показаны на рисунке. На вставке *a* приведены температурные зависимости магнетосопротивления $MR = [\rho(B) - \rho(B = 0)]/\rho(B = 0)$, полученные при различных значениях B . 1, 2, 3, 4 — соответствуют значениям B — 0.4, 5, 10, 14 Т. На вставке *b* приведена зависимость $\rho(B, T = 4.2 \text{ К})$, измеренная при изменении B от 1 до -1 Т.

ные данные по величине V_{eff}). Механизмы, ответственные за нарушение стехиометрии манганитных пленок, сформированных на подложках со значительным положительным m , детализированы в [4]. Резкое падение электропроводности пленок LCMO с уменьшением температуры ($T < T_M$) обусловлено:

а) разрастанием ферромагнитных доменов за счет включений неферромагнитных (парамагнитной, антиферромагнитной) фаз, что приводит к формированию в магнитном слое высоко проводящих ферромагнитных каналов протекания;

б) уменьшением пространственной резориентации электронных спинов в объеме ферромагнитных доменов.

Магнитное поле способствовало ферромагнитному упорядочению спинов в манганитных пленках, что проявилось в сдвиге максимума на температурных зависимостях их электропроводности в сторону высоких температур с увеличением B (рис. 3).

Двухосные напряжения в манганитных пленках могут многократно усилить [3] их магнитную анизотропию. Согласно [18], ось легкого намагничивания в двухосно латерально сжатых пленках LCMO совпадает с направлением, вдоль которого эффективная длина связей Mn—O максимальна. Элементарная ячейка выращенных пленок LCMO/LAO, как следует из полученных рентгеновских данных, была сжата в плоскости подложки, что способствовало ориентации вектора спонтанной намагниченности вдоль $[001]_{\text{LAO}}$. Это

наглядно проявилось на зависимости $\rho(B, T = 4.2 \text{ К})$, полученной при сканировании B в последовательности $+1 \text{ Т} \rightarrow 0 \rightarrow -1$ (см. вставку *b* на рис. 3). При $T < T_M$ и значении $B = 1 \text{ Т}$ вектор намагниченности в пленке LCMO был параллелен направлению магнитного поля. С уменьшением B возрастала объемная доля доменов, в которых вектор намагниченности был перпендикулярен плоскости подложки, что сопровождалось усилением рассеяния носителей заряда на междоменных границах и как следствие — возрастанием электропроводности. Максимум на зависимости $\rho(B, T = 4.2 \text{ К})$ наблюдался при $B \approx -0.15 \text{ Т}$, когда достигалась наибольшая степень „беспорядка“ в ориентации намагниченности в ферромагнитных доменах. При дальнейшем возрастании напряженности магнитного поля увеличивалась объемная доля доменов, в которых вектор намагниченности был ориентирован параллельно магнитному полю и плоскости подложки, что сопровождалось падением электропроводности манганитных пленок.

Максимальные значения отрицательного магнетосопротивления $MR = [\rho(B = 0.4 \text{ Т}) - \rho(B = 0)]/\rho(B = 0)$ пленок LCMO/LAO наблюдались при температуре $T_{MR} \approx 215 \text{ К}$ и не превышали -0.15 , а полуширина (Δ_{MR}) пика на кривой $MR(T)$ составляла 50 К (см. вставку *a* на рис. 3). Величина $MR(T_{MR})$ для пленок LCMO/LAO была в два раза меньше, а значение Δ_{MR} примерно в три раза больше соответствующих величин для эпитаксиальных слоев LCMO, выращенных на подложках с малым m [19]. Относительно низкие значения $MR(T_{MR})$ и существенная величина Δ_{MR} для выращенных пленок LCMO/LAO обусловлены неоднородной релаксацией напряжений в части пленки, прилегающей к свободной поверхности, и присутствием в ее объеме прослойки, когерентно выращенной на поверхности подложки. Неоднородная релаксация напряжений приводит к существенным различиям концентрации носителей заряда в кристаллических зернах, при чем в тех из них, в которых уровень напряжений минимален, концентрация носителей максимальна. Из-за нарушения стехиометрии температура ферромагнитного упорядочения электронных спинов в прослойке пленки LCMO, когерентно выращенной на поверхности подложки LAO, как правило, существенно (на несколько десятков градусов [4]) ниже, чем манганитного слоя, в котором произошла релаксация напряжений. По этой причине пик на температурной зависимости $MR(B = 0.4 \text{ Т})$ пленки LCMO/LAO был искажен со стороны низких температур.

С увеличением B от 0.4 до 5 Т магнетосопротивление выращенных пленок при температуре в окрестности T_{MR} возрастало примерно в пять раз. Но при дальнейшем увеличении B в последовательности $5 \rightarrow 10 \rightarrow 14 \text{ Т}$ изменение $MR(T_{MR})$ было незначительным, поскольку уже при $B = 5 \text{ Т}$ ферромагнитная фаза занимала основной объем пленки (интенсивной трансформации включений неферромагнитной фазы в ферромагнитные способствовала относительно высокая температура), а возмущения в спиновой системе были подавлены магнитным полем.

При низкой температуре ($T < 50$ К), однако, магнетосопротивление пленок LSMO/LAO с повышением B от 0.4 до 14 Т существенно возрастало (см. вставку a на рис. 3). Данный факт обусловлен тем обстоятельством, что при низких температурах значительную долю объема пленок LSMO, обогащенных кальцием, занимают [4] включения антиферромагнитной (СЕ [20]) фазы. Магнитное поле способствует трансформации антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, что приводит к росту отрицательного MR .

Присутствие в выращенных пленках включений неферромагнитной фазы наглядно проявилось на зависимостях их электросопротивления от B , измеренных при температуре ниже 50 К (см. вставку на рис. 2). При изменении B от 0 до 14 Т на зависимости $\rho(T = 4.2$ К, $B)$ для пленки LSMO/LAO имелись два пологих горба, вероятной причиной появления которых является „плавление“ антиферромагнитных включений в объеме когерентно выращенной прослойки и частично релаксированного слоя. При последующем уменьшении B от 14 Т до 0 наблюдался сверхлинейный рост электросопротивления пленки, обусловленный обратной трансформацией ферромагнитной фазы в антиферромагнитную, причем значения $\rho(T = 4.2$ К, $B = 0)$ до и после приложения магнитного поля существенно различались (см. ту же вставку). При повторном увеличении B от 0 до 14 Т наблюдалось плавное изменение ρ , причем горбы на кривой $\rho(T = 4.2$ К, $B)$ отсутствовали, а значения $\rho(T = 4.2$ К, $B = 14$ Т), полученные при повторном сканировании B от 0 до 14 Т, совпадали с соответствующими значениями, полученными в процессе первого измерения. Появление гистерезиса на зависимостях электросопротивления от напряженности магнитного поля связано с тем обстоятельством, что магнитное поле способствует понижению энергетического барьера, определяющего интенсивность трансформации антиферромагнитной фазы в ферромагнитную.

Заключение

Индукцированные рассогласованием в параметрах кристаллических решеток LSMO и LAO механические напряжения в манганитной пленке способствовали ее обогащению кальцием и/или кислородом. Наиболее сильное нарушение стехиометрии обнаружено в упруго напряженной прослойке манганитной пленки толщиной в два десятка нанометров, выращенной на поверхности алюмината лантана когерентно. Релаксация напряжений способствовала формированию манганитного слоя с составом, близким к стехиометрическому. Снижение экстремальных значений магнетосопротивления выращенных пленок, по сравнению с соответствующими данными для эпитаксиальных слоев LSMO, сформированных на подложках с малым m , и значительная полуширина пика на кривой $MR(I)$ обусловлены неоднородной релаксацией напряжений их объема.

Финансовая поддержка данных исследований была частично получена из проекта МНТЦ 3743 и проекта РФФИ № 08–02–01352-а.

Список литературы

- [1] Pannetier M., Fermon C., Goff G., Le, Simola J., Terr T. // Science. 2004. Vol. 204. N 5677. P. 1648.
- [2] Tokura Y. // Colossal Magnetoresistive Oxides. Amsterdam: Gordon And Breach, 2000. P. 3.
- [3] Wu X.W., Rzechowski M.S., Wang H.S., Li Qi // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 61. N 12. P. 501.
- [4] Boikov Yu.A., Gunnarsson R., Claesson T. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 96. N 1. P. 435.
- [5] Nathur N.D., Littlewood P.B. // Physics Today. 2003. Vol. 56. N 1. P. 25.
- [6] Fäth M., Freisem S., Menovsky A.A., Tomioka Y., Aarts J., Mydosh J. // Science. 1999. Vol. 285. P. 1540.
- [7] Bibes M., Baicells L.I., Valencia S., Fontcuberta J., Wojcik M., Jedryka E., Nadolski S. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 067 210–1.
- [8] Kamins T.I. // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. N 9. P. 4357.
- [9] Lu C.J., Wang Z.L., Kwon C., Jia Q.Z. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. P. 4032.
- [10] Wyckoff R.W.J. // Crystal structures. NY: Interscience, 1964. Vol.2. P. 394.
- [11] Zuccaro C., Berlincourt H.L., Klein N., Erban K. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. P. 5695.
- [12] Chakoumakos B.C., Scholm D.G., Urbanik M., Luine J. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. P. 1979.
- [13] Lebedev O.I., Van Tendelo G., Amelinckx S., Leibold B., Habermeier H.-U. // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 58. P. 8065.
- [14] Wiedenborst B., Höfledner C., Lu Y., Klein J., Alff L., Gross R., Freitag B.H., Mader W. // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. P. 3636.
- [15] Wollan E.O., Koehler W.C. // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. P. 545.
- [16] Specht E.D., Clausing R.E., Heathly L. // J. Mater. Res. 1990. Vol. 5. N 11. P. 2351.
- [17] Papavassiliou G., Fardis M., Belesi V., Maris T.G., Kallias G., Pissas M., Niarchos D., Dimitropoulos C., Dolinsek J. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. N 4. P. 761.
- [18] Li Qi, Wang H.S., Hu Y.F., Wertz E. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. N 9. P. 5573.
- [19] Бойков Ю.А., Данилов В.А., Бойков А.Ю. // ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 4. С. 649.
- [20] Goodenough J.B. // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. N 2. P. 564.