

## ЭЛЕКТРОННЫЕ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

PACS numbers: 71.30.+h, 73.50.Jt, 75.47.Gk, 75.47.Lx, 76.30.-v

### Вплив індукованих підкладкою напружень на електричні та магнітні властивості ультратонких плівок $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3/\text{LaAlO}_3$

Т. І. Полек, Д. Й. Под'яловський, О. І. Товстолиткін,  
А. М. Погорілий, О. В. Пащенко\*

*Інститут магнетизму НАН України і МОН України,  
бульв. Акад. Вернадського, 36-б,  
03142 Київ, Україна,*

*\*Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна НАН України,  
вул. Р. Люксембург, 72,  
83114 Донецьк, Україна*

Досліджено магніторезистивні та резонансні властивості ультратонких плівок (2–12 нм) лантан-стронцієвих манганітів з надлишком мангану  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3$ , виготовлених методом магнетронного напорошення на монокристалічній підкладці  $\text{LaAlO}_3$ . Вивчено товщинну еволюцію магнітних властивостей плівок. Методом електронного спінового резонансу показано, що плівки є ферромагнітними аж до товщини 4 нм; при цьому зберігається досить висока температура Кюрі  $T_C$ . На основі аналізу магніторезистивних та резонансних даних зроблено висновок про високий ступінь неоднорідності плівок, товщина яких є меншою або дорівнює 4 нм.

Исследованы магниторезистивные и резонансные свойства ультратонких плёнок (2–12 нм) лантан-стронциевых манганитов с избытком марганца  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3$ , изготовленных методом магнетронного напыления на монокристаллическую подложку  $\text{LaAlO}_3$ . Изучена толщинная эволюция магнитных свойств плёнок. Методом электронного спинового резонанса показано, что плёнки ферромагнитны вплоть до толщины 4 нм; при этом сохраняется достаточно высокая температура Кюри  $T_C$ . На основе анализа магниторезистивных и резонансных данных сделан вывод о высокой степени неоднородности плёнок, толщина которых меньше или равна 4 нм.

Magnetoresistive and resonance properties of ultrathin films (2–12 nm) of lanthanum-strontium  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3$  manganites are studied. The films were deposited on  $\text{LaAlO}_3$  single-crystalline substrate by magnetron sputtering. Characteristic features of the evolution of magnetic properties with the decrease of film thickness are specified. The electron-spin resonance studies

show that the films are ferromagnetic down to a film thickness of 4 nm and retain a relatively high Curie temperature,  $T_C$ . Based on the analysis of magnetoresistive and resonance data, it is concluded that the films with the thickness of 4 nm and less display high degree of inhomogeneity.

**Ключові слова:** заміщені манганіти, перехід метал–діелектрик, електронний спіновий резонанс, магнітоопір.

(Отримано 29 листопада 2013 р.)

## 1. ВСТУП

Манганіти з перовськітною структурою, які описуються загальною формулою  $\text{Re}_{1-x}\text{Me}_x\text{MnO}_3$ , де Re — рідкісноземельний метал ( $\text{La}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ), Me — лужний або лужноземельний елемент ( $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ) [1, 2], привертають до себе увагу через унікальні властивості (ефект колосального магнітоопору, високий ступінь спінової поляризації), які є корисними для прикладних задач матеріалознавства, наноелектроніки та спінтроніки [3, 4]. Також дані сполуки є цікавими з точки зору фундаментальної фізики [5].

В останнє двадцятиліття виконано значну кількість досліджень, серед яких найбільшу увагу приділяли дослідженню лантанових манганітів при заміщенні лантану стронцієм та кальцієм. Вибір саме таких сполук не є випадковим. У першому випадку спостерігали найбільше значення температури Кюрі  $T_C$  для даного класу матеріалів, яка становить  $\cong 370$  К. Для випадку лантан-кальцієвого манганіту було відкрито явище сильного впливу магнітного поля на електропровідність [6], яке одержало назву явища колосального магнітоопору (КМО). Нажаль, взаємозв'язок температури Кюрі і магнітоопору такий, що при високих значеннях температури Кюрі  $T_C$  магнітоопір МО є невеликим, тоді як високі значення МО спостерігаються при низьких температурах.

При переході з об'ємного стану до тонкоплівкового змінюються і властивості манганітів [1, 7, 8]. Особливо значні зміни відбуваються в області нанометрових товщин. Так, при досягненні певної товщини плівки стають немагнітними з активаційним характером провідності у всьому інтервалі температур [1, 13, 14], на відміну від об'ємного стану, в якому манганіти є феромагнетиками з металічним типом провідності. Цей шар з деградованими електричними та магнітними властивостями одержав назву «dead layer» [8]. Ми в подальшому будемо використовувати позначення Д-шар. Причиною появи Д-шару є напруження, які виникають через відмінність параметрів ґратниць плівки та підкладки. Кількісною характеристикою цього є величина  $\delta = (a_s - a_b)/a_s$ , де  $a_s$  і  $a_b$  — параметри ґратниць підкладки і самого матеріалу в об'ємному стані відповідно.

Вибираючи тип підкладки, можна задавати не тільки величину напруження, але і його тип: стиснення або розтяг. Вирішальну роль напруження, індукованого підкладкою, на існування D-шару відмічено переважною більшістю авторів (хоча є і альтернативна думка [9]). Але єдиної думки на механізм його реалізації немає. Різні автори по-різному пояснюють деградацію електричних та магнітних властивостей під дією напружень: існуванням тонкого когерентно-напруженого стану, в якому через спотворення  $MnO_6$  октаєдрів спостерігається зміна фізичних властивостей [10]; наявністю високодефектного шару, який виникає при високих значеннях  $\delta$  [11]; неоднорідністю хімічного складу на межі поділу плівка–підкладка [12].

Дослідженню впливу товщини плівок на їх властивості присвячено велику кількість як експериментальних [6, 13–15], так і теоретичних робіт [16, 17]. Так, в теоретичній роботі Мілліса та ін. [16] розроблено модель для опису характеру впливу деформівних напружень на температуру Кюрі. Автори розглядали напруження в плівках як суперпозицію об'ємної (ізостатичної) і двовісної (Яна–Теллера) складових, кожна з яких по-своєму впливає на  $T_C$ . Ізостатичне стиснення збільшує ступінь перекриття електронних орбіталей, що призводить до збільшення імовірності переносу електронів і росту  $T_C$ . З іншого боку, двовісне напруження збільшує різницю енергії  $e_g$  рівнів  $d$ -оболонки мангану і тим самим підсилює тенденцію електронів ставати більш локалізованими, що і викликає зниження  $T_C$  [1].

В роботах [13, 15], автори виконали вимірювання як електричних, так і магнітних параметрів лантан-стронцієвих манганітів. Було встановлено, що при досягненні певної товщини  $t_{c\_R}$  плівка показує активаційний характер провідності, хоча все ще залишається феромагнітною. При подальшому зменшенні товщини до значення  $t_{c\_M}$  плівка втрачає свої магнітні властивості. Тобто існує як електричний, так і магнітний D-шар, причому їх значення можуть суттєво відрізнятися. Так, наприклад, в роботі [15] для лантан-стронцієвого манганіту, напорошеного на монокристалічну підкладку, критичний шар, при якому плівка приймає активаційний характер провідності, становить  $\approx 3,2$  нм, тоді як вона все ще залишається магнітною аж до товщини  $\approx 1,2$  нм.

Хоча електричні та магнітні параметри в заміщених манганітах досить сильно зв'язані, напруження по-різному впливають на ці фізичні величини. Справа в тому, що магнітний стан обумовлений комплексом взаємодій: подвійний обмін у ланцюжку  $Mn^{3+}-O^{2-}-Mn^{4+}$ , непрямий обмін між іонами  $Mn^{3+}-Mn^{3+}$  і  $Mn^{4+}-Mn^{4+}$  та іншими. Електричні властивості визначаються лише подвійним обміном. Тому значення  $t_{c\_R}$  і  $t_{c\_M}$  можуть відрізнятися. Дослідження цих аспектів є важливим, оскільки можуть допомогти в розумінні взаємозалежності параметрів електричної і магнітної підсистем складних оксидів, зокрема манганітів.

Основними методами дослідження при експериментальному вивченні були магнітометричні та електротранспортні вимірювання. Для різних типів підкладок експериментально знайдено значення товщини Д-шару, які знаходяться в межах від 1 до 5 нм [6, 10–12, 18].

Що ж стосується магнітного резонансу, то таких досліджень є вкрай мало. Так, в роботі [19] при дослідженні товщинної залежності інтенсивності сигналу ядерного магнітного резонансу (ЯМР) встановлено, що присутність магнітної фази залежить від текстурованості плівки. Відносно ж досліджень манганітових плівок за допомогою методу електронного спінового резонансу (ЕСР), то вони були в основному присвячені вивченню анізотропії плівок [20, 21] або природі фазового розшарування в них [22, 23].

Цікавою, на наш погляд, є робота [24], в якій досліджували електричні та магнітні властивості лантан-стронцієвих манганітів, напорошених на різні монокристалічні підкладки. Це дозволило авторам задавати різну величину напруження в плівках. Для знаходження температури переходу феромагнетик–парамагнетик (ФМ–ПМ) використовували метод ЕСР. Зміна температури Кюрі, визначена шляхом аналізу спектрів феромагнітного резонансу, якісно описується теорією Мілліса [16]. Нажаль, в цій роботі [24] досліджуються відносно товсті плівки (їхня товщина набагато перевищує товщину Д-шару) в інтервалі товщин 40–100 нм.

Унікальні властивості манганітів, головним чином, визначаються співвідношенням кількості різновалентних іонів мангану, яке, в свою чергу, залежить від ступеня легування двовалентним елементом [1–3]. Як було зазначено раніше, обмінна взаємодія і перенесення заряду відбуваються через ланцюжок  $Mn^{3+}-O^{2-}-Mn^{4+}$ . Традиційним способом зміни співвідношення  $Mn^{3+}/Mn^{4+}$ , і, як наслідок, фізичних властивостей, є заміщення двовалентними лужноземельними елементами в лантановій підґратниці [2, 5]. У роботі [25] автори, як можливий варіант впливу на властивості манганітів, розглядають внесення в сполуку  $LaMnO_3$  надлишкового мангану. Так, в роботі [26] було показано, що для об'ємних зразків  $La_{0,6}Sr_{0,2}Mn_{1,2}O_3$  характерне високе значення температури Кюрі  $T_C \cong 368$  К. З іншого боку, через надлишок мангану цим матеріалам притаманна особлива дефектна структура. Тому їхні властивості можуть значно відрізнятися від традиційно досліджуваних манганітів. Суттєво впливають на властивості манганітів методи виготовлення, а також мікроструктура зразків [27, 28].

У попередній роботі [29] нами було досліджено електричні та магніторезистивні властивості плівок  $La_{0,6}Sr_{0,2}Mn_{1,2}O_3$  у широкому інтервалі товщин. Було встановлено, що товщина електричного критичного шару  $t_{cR}$  становить  $\cong 3$  нм. Як було сказано вище, товщини електричного  $t_{cR}$  і магнітного  $t_{cM}$  Д-шарів в ультратонких плівках можуть відрізнятися. Тому в даній роботі методом ЕСР досліджу-

ються магнітні властивості ультратонких плівок (2–12 нм)  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3$ , напорошених на монокристалічну підкладку  $\text{LaAlO}_3$ . Різниця параметрів ґратниці для об'ємного зразка LSMO і підкладки становить  $\delta \cong -2,2\%$ , що забезпечує деформацію стиснення в площині плівки. Температура Кюрі  $T_C$  в роботі визначалася як з магнітотранспортних вимірювань, так і з резонансних, що дозволило визначити крім загальної температурної еволюції фізичних параметрів, ще й ступінь їх неоднорідності.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТ

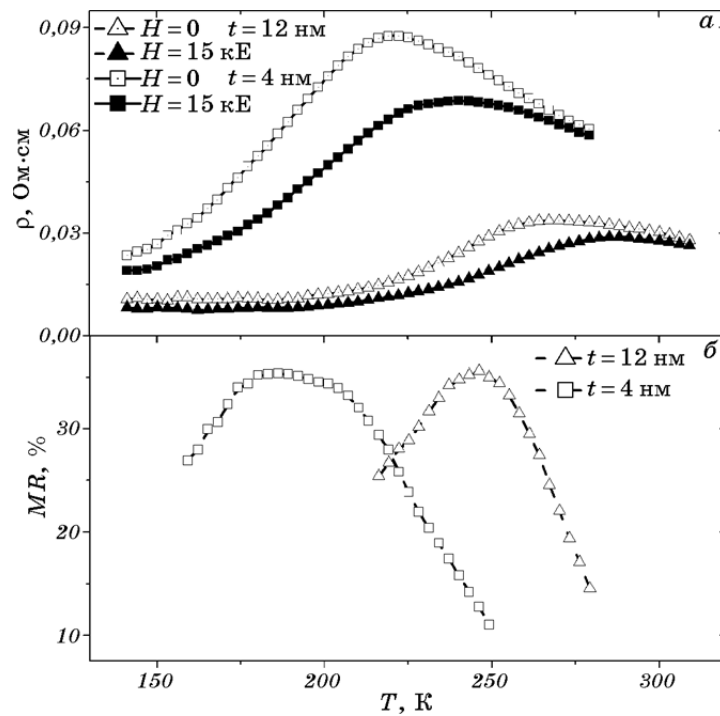
Манганітові плівки були осаджені на монокристалічні підкладки  $\text{LaAlO}_3$  (001) методом магнетронного осадження з використанням мішені  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3$ . Матеріал мішені був виготовлений методом стандартної твердофазної реакції [26]. При напорошенні температура підкладки становила  $670^\circ\text{C}$ , а тиск суміші газу (80%  $\text{O}_2$  і 20%  $\text{Ar}$ ) в камері становив  $8 \cdot 10^{-2}$  торр. Товщина плівок контролювалася за часом напорошення, швидкість якого була постійною і становила  $\cong 2,1 \text{ \AA}/\text{с}$ . Після приготування всі зразки були відпалені при температурі  $900^\circ\text{C}$  протягом 1 години [29]. У даній роботі досліджували чотири плівки з товщинами від 2 до 12 нм.

Вимірювання магнітоопору були виконані в температурному інтервалі 77–330 К з використанням стандартного чотириточкового методу. Магнітоопір вимірювали в полі до 15 кЕ і визначали як  $MR(T) = (R_0(T) - R_H(T))/R_0(T)$ , де  $R_0$  — електричний опір у нульовому магнітному полі, а  $R_H$  — електроопір в присутності зовнішнього поля. Магнітне поле прикладали паралельно до площини плівки і напрямку електричного струму.

Дослідження електронного спінового резонансу виконували в інтервалі температур 100–300 К з використанням спектрометра ELEXSYS E500 EPR (BrukerBioSpin GmbH, Germany) при частоті  $\nu = 9,44$  ГГц. Вимірювання виконували при двох орієнтаціях площини плівки відносно напрямку магнітного поля: паралельному ( $\parallel$ ) і перпендикулярному ( $\perp$ ).

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ

На рисунку 1, а зображено температурні залежності питомого електроопору для плівок LSMO/LAO з товщинами 12 і 4 нм, як в магнітному полі так і без нього. Залежності  $\rho(T)$  мають типовий для манганітів характер: нижче певної температури  $T_{MI}$  спостерігається металічний характер провідності ( $d\rho/dT > 0$ ), вище  $T_{MO}$  тип провідності стає активаційним ( $d\rho/dT < 0$ ) [1, 2]. Залежність магнітоопору  $MR$  від температури показано на рис. 1, б. Значення температури

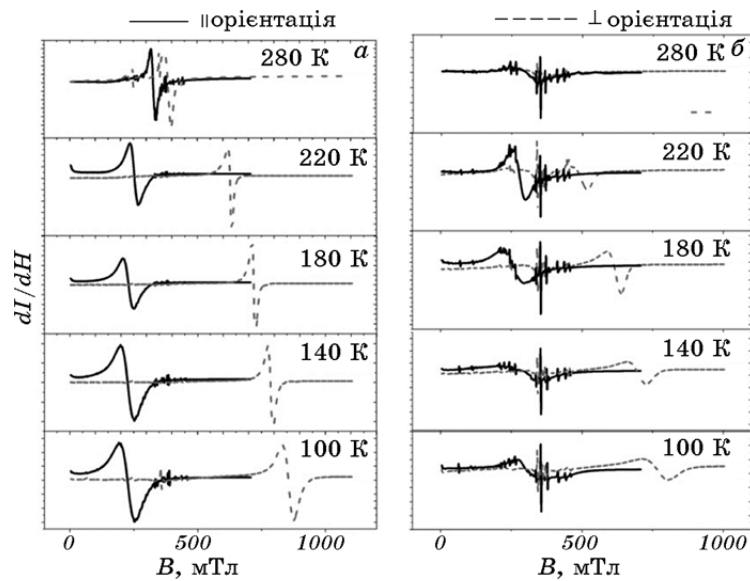


**Рис. 1.** Температурна залежність питомого електроопору, виміряного в магнітному полі (затемнені квадратики) та без нього (світлі трикутники) для плівок LSMO/LAO з товщинами 12 і 4 нм (а); залежність магнітоопору від температури для даних плівок у магнітному полі величиною 15 кЕ (б).

максимуму магнітоопору в даній роботі позначається як  $T_{C_{MO}}$ . Як видно з рисунка, зі зменшенням товщини плівок температура  $T_{C_{MR}}$  зменшується, що характерно для тонких та ультратонких манганітових плівок.  $T_{C_{MO}}$  все ще залишається високою для плівки товщиною 4 нм і становить  $\approx 186$  К. Також варто відмітити збільшення ширини піка магнітоопору для найтоншої плівки.

При електричних вимірюваннях плівка товщиною 2 нм показала активаційний характер провідності у всьому інтервалі температур. При цьому значення питомого електроопору було на  $\approx 3$  порядки вище за значення, одержані для плівок із нашої серії. Магніторезистивні вимірювання також показали відсутність будь-якого впливу магнітного поля на властивості. Таким чином, товщина цієї плівки менша за  $t_{cR}$ , що узгоджується з розрахунками, виконаними в роботі [29].

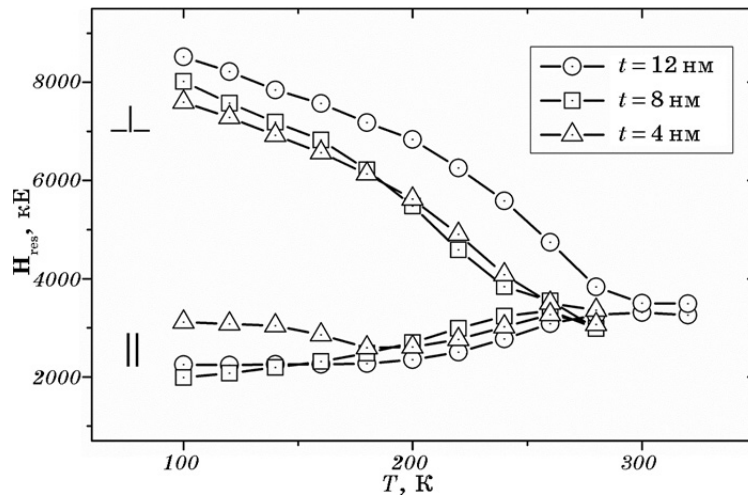
На рисунку 2 показано ЕСР-спектри, одержані для двох товщин плівок  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3$  — 12 нм (а) і 4 нм (б). Наведено дані для різних температур у двох орієнтаціях магнітного поля щодо площини



**Рис. 2.** Спектри ЕСР для плівок LSMO з товщинами 12 нм (а) і 4 нм (б), виміряні при паралельній і перпендикулярній орієнтаціях магнітного поля щодо площини плівки.

плівки. З рисунка 2, а видно, що сигнали, одержані при різних орієнтаціях плівки, зміщені один відносно одного. Це є свідченням феромагнітного впорядкування. Положення ліній становить 2250 і 8520 кЕ при паралельній та перпендикулярній орієнтаціях магнітного поля щодо площини плівки (виміри при температурі 100 К). При підвищенні температури сигнали ЕСР для двох конфігурацій зближуються і при температурі  $\approx 300$  К збігаються. Температурна еволюція ЕСР-спектрів для плівок з товщинами 8 нм (не показано) і 4 нм (рис. 2, б) схожа до вище описаного випадку. Для плівки товщиною 4 нм спостерігається нечіткість спектрального сигналу, що пов'язано з її малою товщиною. Для плівки товщиною 2 нм, нами було одержано слабкий сигнал, який не залежить від орієнтації магнітного поля відносно площини плівки у всьому інтервалі температур. Таким чином, плівка товщиною 2 нм є або повністю немагнітною або слабкомагнітною. Тобто товщина магнітного Д-шару  $t_{cM}$ , як і електричного  $t_{cR}$ , знаходиться в області 2–4 нм.

На рисунку 3 показано залежність резонансних полів від температури для плівок LSMO/LAO різних товщин. З графіків видно, що з ростом температури резонансне поле при перпендикулярній орієнтації магнітного поля зменшується, а при паралельній — слабо зростає. Для плівки товщиною 4 нм при паралельній орієнтації магнітного поля спостерігається аномальна залежність  $H_0$  від температури,



**Рис. 3.** Залежність резонансного поля від температури при перпендикулярній і паралельній орієнтації магнітного поля щодо площини плівки.

що можна пояснити наявністю в плівці внутрішньоплощинної анізотропії [19, 31].

У випадку ізотропної феромагнітної плівки резонансне поле визначається формулами Кіттеля [32]:

$$(\omega / \gamma)^2 = H_0^{\parallel} (H_0^{\parallel} + 4\pi M_{\text{eff}}), \quad (1)$$

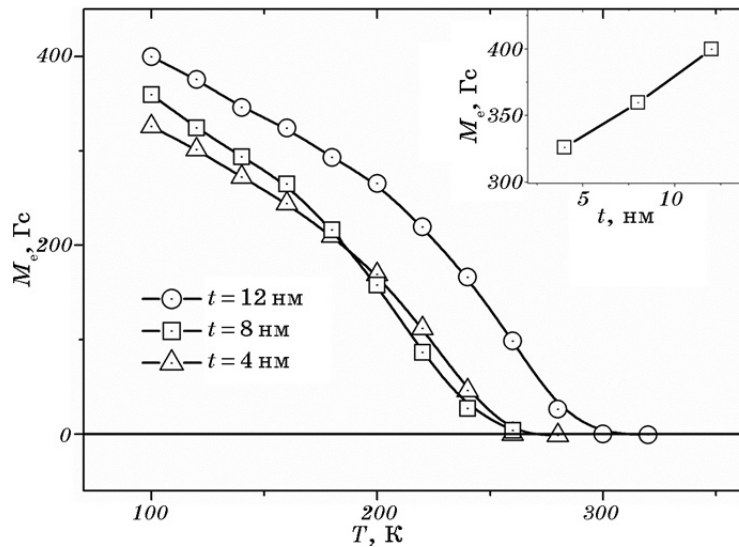
$$\omega / \gamma = H_0^{\perp} - 4\pi M_{\text{eff}}, \quad (2)$$

де  $H_0^{\parallel}$  та  $H_0^{\perp}$  — резонансні поля для випадків, коли магнітне поле  $H$  направлено паралельно і перпендикулярно до площини плівки,  $M_{\text{eff}}$  — ефективна намагніченість.

Користуючись рівняннями Кіттеля з використанням експериментально одержаних резонансних полів, нами були розраховані температурні залежності ефективної намагніченості, які показано на рис. 4. З рисунка видно, що з ростом температури намагніченість спадає. З даних ЕСР значення  $T_c$  знаходили як температуру максимальної зміни намагніченості ( $|dM_{\text{eff}}/dT| = \max$ ) і позначали як  $T_{c \text{ ESR}}$ . На вставці зображено товщинну залежність ефективної намагніченості при температурі 100 К. Зі зменшенням товщини, величина  $M_{\text{eff}}$  монотонно спадає. Ефективна намагніченість для плівки товщиною 12 нм є на  $\cong 22,5\%$  більшою, ніж  $M_{\text{eff}}$  для плівки товщиною 4 нм.

У випадку монокристалічних зразків температура Кюрі  $T_c$  і температура максимуму магнітоопору  $T_{\text{MO}}$  збігаються, чи, принаймні, є близькими. Для неоднорідних або сильно напружених плівок таке



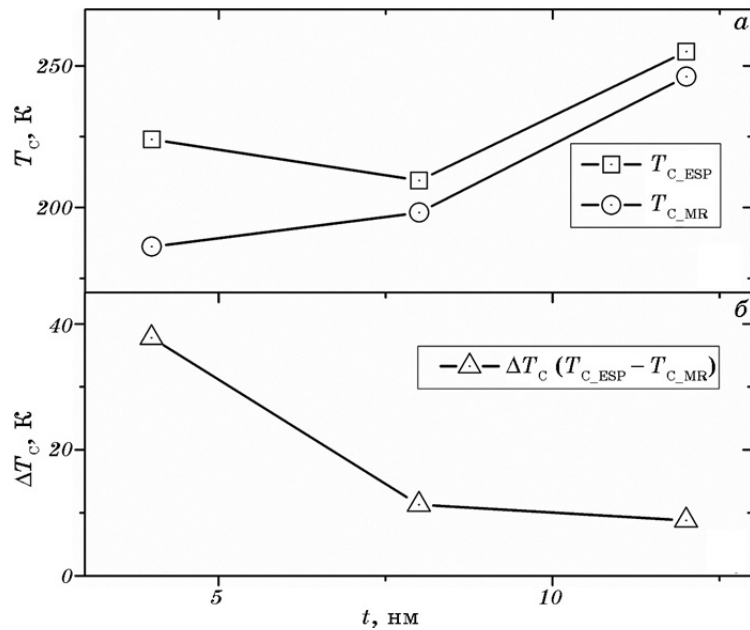


**Рис. 4.** Температурна залежність ефективної намагніченості для LSMO плівок. На вставці показано товщинну залежність намагніченості при температурі 100 К.

співвідношення може не виконуватись. Тому різниця між цими величинами дає певну інформацію про ступінь неоднорідності (напруженості) плівок.

На рисунку 5, а зображено температурну залежність температури максимуму магнітоопору ( $T_{C\_MO}$ ) та температури Кюри, одержану з резонансних даних ( $T_{C\_ESR}$ ). З рисунка видно, що зі зменшенням товщини температура переходу спадає. На рисунку 5, б показано товщинну залежність різниці температур переходу  $\Delta T_C$ , одержаних двома вищезгаданими способами. Із залежності видно, що найбільше значення  $\Delta T_C$  спостерігається для найтоншої плівки і становить  $\cong 38$  К, тоді як при товщині 8 і 12 нм воно практично однакове і складає близько 10 К. Така суттєва відмінність в значеннях температури Кюри свідчить про те, що, залишаючись все ще магнітною і провідною плівкою з досить високою температурою переходу ( $\cong 200$  К), вирішальну роль в ній відіграють уже ефекти на межі поділу плівка-підкладка.

Причиною такої різкої зміни температури Кюри, а також  $\Delta T_C$  при переході плівки від товщини 8 до 4 нм може бути велике значення параметра невідповідності  $\delta$  (у нашому випадку  $|\delta| = 2,2\%$ ), внаслідок якого виникають напруження. Так, наприклад, в нашій роботі [29] досліджувалися електричні властивості плівок  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,2}\text{Mn}_{1,2}\text{O}_3$  на  $\text{LaAlO}_3$  і  $\text{SrTiO}_3$  (STO) підкладках. Встановлено, що для плівок товщиною 4 нм, напорошених на LAO і STO підклад-



**Рис. 5.** Товщинна залежність температури Кюрі, визначеної з даних ЕСР ( $T_{C\_ESP}$ ) та магніторезонансних вимірювань ( $T_{C\_MR}$ ) (а); залежність різниці температур Кюрі, одержаних різними методами, від товщини плівок (б).

ки, значення  $T_{C\_MR}$  різко відрізняється, тоді як вплив підкладки на цю температуру для плівок 8 нм і вище практично відсутній.

У роботі [18] наведено результати дослідження залежності  $T_c$  від товщини плівок лантан-стронцієвого манганіту на *STO* підкладці, взяті з трьох різних джерел. В усіх трьох випадках для товщин  $< 10$  нм спостерігається плавна зміна  $T_c$ . В іншій роботі [33] досліджувалися плівки лантан-кальцієвого манганіту, напорошеного на різні підкладки. Для випадку *STO* і *LAO*  $\delta = 1,1\%$  та  $1,7\%$ , відповідно. Для плівки з більшим напруженням знову ж таки спостерігається різкий перехід від магнітного до повністю немагнітного стану.

Таким чином, внаслідок виконаних досліджень встановлено, що зі зменшенням товщини плівки *LSMO/LAO* температура Кюрі і намагніченість зменшуються, а різниця  $\Delta T$  між  $T_{C\_MR}$  і  $T_{C\_ESP}$  зростає. Плівка товщиною 4 нм ще є феромагнітною з металічним характером провідності і відносно високою  $T_c$ , а плівка товщиною 2 нм — уже немагнітна з активаційним характером провідності. Як результат, товщина електричного і магнітного Д-шару є близькими, і знаходяться в інтервалі товщин 2–4 нм. Одержані результати є важливими для глибшого розуміння природи взаємозалежності параметрів електричної і магнітної підсистем заміщених манганітів.

#### 4. ВИСНОВКИ

У даній роботі досліджено магніторезистивні та резонансні властивості ультратонких плівок лантан-стронцієвих манганітів з надлишком мангану. Плівки були вирошені на монокристалічній підкладці  $\text{LaAlO}_3$  (001) методом магнетронного напорошення, при цьому параметр невідповідності плівки і підкладки становив  $\delta = -2,2\%$ . Встановлено, що температура максимуму магнітоопору  $T_{C\_MR}$  зі зменшенням товщини зменшується. За допомогою ЕСР виявлено, що ефективна намагніченість плівок  $M_{eff}$  монотонно зменшується зі зменшенням товщини, при цьому плівка LSMO товщиною 4 нм має намагніченість на  $\cong 22,5\%$  менше за найтовстішу плівку із серії (12 нм). При порівнянні значень температур  $T_{C\_MO}$  і  $T_{C\_ESR}$  встановлено, що для найтоншої плівки їхня різниця  $\Delta T$  є в  $\cong 4$  рази більшою, ніж у випадку плівок з товщинами 8 та 12 нм і становить  $\cong 38$  К. При виконанні електричних та резонансних досліджень не виявлено різниці у значеннях товщини електричного та магнітного Д-шару, наявність якої спостерігалася рядом авторів у манганітах іншого хімічного складу.

Роботу підтримано Українським науково-технологічним центром (проект № 5714).

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. K. Dörr, *J. Phys. D*, **39**, No. 7: R125 (2006).
2. E. Dagotto, T. Hotta, and A. Moreo, *Phys. Rep.*, **344**, No. 1: 1 (2001).
3. M. K. Khodzitsky, T. V. Kalmykova, S. I. Tarapov, D. P. Belozorov, A. M. Pogorily, A. I. Tovstolytkin, A. G. Belous, and S. A. Solopan, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, No. 8: 082903 (2009).
4. X. Moya, L. E. Hueso, F. Maccherozzi, A. I. Tovstolytkin, D. I. Podyalovskii, C. Ducati, L. Phillips, M. Ghidini, O. Hovorka, A. Berger, M. E. Vickers, E. Defay, S. S. Dhesi, and N. D. Mathur, *Nature Mater.*, **12**, No. 1: 52 (2013).
5. В. М. Локтев, Ю. Г. Погорелов, *Фізика низких температур*, **26**, № 1: 231 (2000).
6. S. Jin, T. H. Tiefel, M. McCormack, R. A. Fastnacht, R. Ramesh, and L. H. Chen, *Science*, **264**, No. 5157: 413 (1994).
7. A. I. Tovstolytkin, A. N. Pogorily, A. I. Matviyenko, A. Ya. Vovk, and Zh. Wang, *J. Appl. Phys.*, **98**, No. 4: 043902 (2005).
8. J. Z. Sun, D. W. Abraham, R. A. Rao, and C. B. Eom, *J. Appl. Phys. Lett.*, **74**, No. 20: 3017 (1999).
9. J. Dvorak, Y. U. Idzerda, S. B. Ogale, S. Shinde, T. Wu, T. Venkatesan, and R. Ramesh, *J. Appl. Phys.*, **97**, No. 10: 10C102 (2005).
10. H. W. Zandbergen, S. Freisem, T. Nojima, and J. Aarts, *Phys. Rev. B*, **60**, No. 14: 10259 (1999).
11. A. Biswas, M. Rajeswari, R. C. Srivastava, T. Venkatesan, R. L. Greene, Q. Lu, and A. J. Millis, *Phys. Rev. B*, **63**, No. 18: 184424 (2001).
12. Yu. A. Boikov, R. Gunnarsson, and T. Claeson, *J. Appl. Phys.*, **96**: 435 (2004).

13. R. P. Borges, W. Guichard, J. G. Lunney, J. M. D. Coey, and F. Ott, *J. Appl. Phys.*, **89**, No. 7: 3868 (2001).
14. M. Angeloni, G. Balestrino, N. G. Boggio, P. G. Medaglia, P. Orgiani, and A. Tebano, *J. Appl. Phys.*, **96**, No. 11: 6387 (2004).
15. M. Huijben, L. W. Martin, Y.-H. Chu, M. B. Holcomb, P. Yu, G. Rijnders, D. H. A. Blank, and R. Ramesh, *Phys. Rev. B*, **78**, No. 9: 094413 (2008).
16. A. J. Millis, T. Darling, and A. Migliori, *J. Appl. Phys.*, **83**, No. 3: 1588 (1998).
17. L. Bray, *Phys. Rev. B*, **75**, No. 10: 104423 (2007).
18. A. de Andres, J. Rubio, G. Casto, S. Taboada, J. L. Martinez, and J. M. Colino, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, No. 4: 713 (2003).
19. I. C. Infante, F. Sánchez, J. Fontcuberta, M. Wojcik, E. Jedryka, S. Estradé, and J. P. Espinós, *Phys. Rev. B*, **76**, No. 22: 224415 (2007).
20. N. M. Nemes, M. Garcia-Hernandez, Z. Szatmari, T. Feher, F. Simon, C. Visani, and J. Santamaria, *IEEE Trans. Magn.*, **44**, No. 11: 2926 (2008).
21. A. I. Tovstolytkin, A. I. Matviyenko, V. M. Tsmots, L. I. Pankiv, and I. S. Pankiv, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **42**, No. 2: 151 (2011).
22. A. I. Tovstolytkin, V. V. Dzyublyuk, D. I. Podyalovskii, X. Moya, C. Israel, D. Sánchez, and N. D. Mathur, *Phys. Rev. B*, **83**, No. 18: 184404 (2011).
23. A. I. Tovstolytkin, A. M. Pogorily, Y. I. Dzhezherya, V. V. Dzyublyuk, and D. J. Mapps, *J. Phys.: Condens. Matter*, **21**, No. 38: 386003 (2009).
24. G. A. Ovsyannikov, A. M. Petrzhik, I. V. Borisenko, A. A. Klimov, Y. A. Ignatov, V. V. Demidov, and S. A. Nikitov, *J. Exp. Theor. Phys.*, **108**, No. 1: 48 (2009).
25. В. Т. Довгий, А. И. Линник, В. П. Пащенко, В. Н. Деркаченко, В. К. Прокопенко, В. А. Турченко, Н. В. Давыдейко, *Физика низких температур*, **29**, № 4: 380 (2003).
26. В. П. Пащенко, А. А. Шемяков, И. В. Жихарев и др., *Металлофиз. новейшие технол.*, **27**, № 12: 1567 (2005).
27. А. Г. Белоус, О. И. Вьюнов, Е. В. Пашкова, О. З. Янчевский, А. И. Товстолыткін, А. Н. Погорельий, *Неорг. матер.*, **39**, № 2: 212 (2003).
28. A. I. Tovstolytkin, A. N. Pogorily, S. V. Cherepov, G. V. Bondarkova, and V. I. Silantiev, *Металлофиз. новейшие технол.*, **22**, № 11: 23 (2000).
29. A. I. Tovstolytkin, T. I. Polek, A. I. Matviyenko, M. I. Zakharenko, M. P. Semen'ko, and A. V. Pashchenko, *Solid State Phenom.*, **200**: 239 (2013).
30. P. Schiffer, A. P. Ramirez, W. Bao, and S.-W. Cheong, *Phys. Rev. Lett.*, **75**, No. 18: 3336 (1995).
31. V. O. Golub, V. V. Dzyublyuk, A. I. Tovstolytkin, S. K. Arora, R. Ramos, R. G. Sofin, and I. V. Shvets, *J. Appl. Phys.*, **107**, No. 9: 09B108 (2010).
32. C. Kittel, *Phys. Rev.*, **73**, No. 2: 155 (1948).
33. M. Ziese, H. C. Semmelhack, K. H. Han, S. P. Sena, and H. J. Blythe, *J. Appl. Phys.*, **91**, No. 12: 9930 (2002).

## REFERENCES

1. K. Dörr, *J. Phys. D*, **39**, No. 7: R125 (2006).
2. E. Dagotto, T. Hotta, and A. Moreo, *Phys. Rep.*, **344**, No. 1: 1 (2001).
3. M. K. Khodzitsky, T. V. Kalmykova, S. I. Tarapov, D. P. Belozorov, A. M. Pogorily, A. I. Tovstolytkin, A. G. Belous, and S. A. Solopan, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, No. 8: 082903 (2009).
4. X. Moya, L. E. Hueso, F. Maccherozzi, A. I. Tovstolytkin, D. I. Podyalovskii,

- C. Ducati, L. Phillips, M. Ghidini, O. Hovorka, A. Berger, M. E. Vickers, E. Defay, S. S. Dhesi, and N. D. Mathur, *Nature Mater.*, **12**, No. 1: 52 (2013).
5. V. V. Loktev and Yu. G. Pogorelov, *Fizika Nizkikh Temperatur*, **26**, No. 1: 231 (2000) (in Russian).
  6. S. Jin, T. H. Tiefel, M. McCormack, R. A. Fastnacht, R. Ramesh, and L. H. Chen, *Science*, **264**, No. 5157: 413 (1994).
  7. A. I. Tovstolytkin, A. N. Pogorily, A. I. Matviyenko, A. Ya. Vovk, and Zh. Wang, *J. Appl. Phys.*, **98**, No. 4: 043902 (2005).
  8. J. Z. Sun, D. W. Abraham, R. A. Rao, and C. B. Eom, *J. Appl. Phys. Lett.*, **74**, No. 20: 3017 (1999).
  9. J. Dvorak, Y. U. Idzerda, S. B. Ogale, S. Shinde, T. Wu, T. Venkatesan, and R. Ramesh, *J. Appl. Phys.*, **97**, No. 10: 10C102 (2005).
  10. H. W. Zandbergen, S. Freisem, T. Nojima, and J. Aarts, *Phys. Rev. B*, **60**, No. 14: 10259 (1999).
  11. A. Biswas, M. Rajeswari, R. C. Srivastava, T. Venkatesan, R. L. Greene, Q. Lu, and A. J. Millis, *Phys. Rev. B*, **63**, No. 18: 184424 (2001).
  12. Yu. A. Boikov, R. Gunnarsson, and T. Claeson, *J. Appl. Phys.*, **96**, 435 (2004).
  13. R. P. Borges, W. Guichard, J. G. Lunney, J. M. D. Coey, and F. Ott, *J. Appl. Phys.*, **89**, No. 7: 3868 (2001).
  14. M. Angeloni, G. Balestrino, N. G. Boggio, P. G. Medaglia, P. Orgiani, and A. Tebano, *J. Appl. Phys.*, **96**, No. 11: 6387 (2004).
  15. M. Huijben, L. W. Martin, Y.-H. Chu, M. B. Holcomb, P. Yu, G. Rijnders, D. H. A. Blank, and R. Ramesh, *Phys. Rev. B*, **78**, No. 9: 094413 (2008).
  16. A. J. Millis, T. Darling, and A. Migliori, *J. Appl. Phys.*, **83**, No. 3: 1588 (1998).
  17. L. Bray, *Phys. Rev. B*, **75**, No. 10: 104423 (2007).
  18. A. de Andres, J. Rubio, G. Casto, S. Taboada, J. L. Martinez, and J. M. Colino, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, No. 4: 713 (2003).
  19. I. C. Infante, F. Sánchez, J. Fontcuberta, M. Wojcik, E. Jedryka, S. Estradé, and J. P. Espinós, *Phys. Rev. B*, **76**, No. 22: 224415 (2007).
  20. N. M. Nemes, M. Garcia-Hernandez, Z. Szatmari, T. Feher, F. Simon, C. Visani, and J. Santamaria, *IEEE Trans. Magn.*, **44**, No. 11: 2926 (2008).
  21. A. I. Tovstolytkin, A. I. Matviyenko, V. M. Tsmots, L. I. Pankiv, and I. S. Pankiv, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **42**, No. 2: 151 (2011).
  22. A. I. Tovstolytkin, V. V. Dzyublyuk, D. I. Podyalovskii, X. Moya, C. Israel, D. Sánchez, and N. D. Mathur, *Phys. Rev. B*, **83**, No. 18: 184404 (2011).
  23. A. I. Tovstolytkin, A. M. Pogorily, Y. I. Dzhezherya, V. V. Dzyublyuk, and D. J. Mapps, *J. Phys.: Condens. Matter*, **21**, No. 38: 386003 (2009).
  24. G. A. Ovsyannikov, A. M. Petrzikh, I. V. Borisenko, A. A. Klimov, Y. A. Ignatov, V. V. Demidov, and S. A. Nikitov, *J. Exp. Theor. Phys.*, **108**, No. 1: 48 (2009).
  25. V. T. Dovhiy, A. I. Linnik, V. P. Pashchenko, V. N. Derkachenko, V. K. Prokopenko, V. A. Turchenko, and N. V. Davydeyko, *Fizika Nizkikh Temperatur*, **29**, No. 4: 380 (2003) (in Russian).
  26. V. P. Pashchenko, A. A. Shemyakov, I. V. Zhikharev et al., *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **27**, No. 12: 1567 (2005) (in Russian).
  27. A. G. Belous, O. I. V'yunov, E. V. Pashkova, O. Z. Yanchevskiy, A. I. Tovstolytkin, and A. N. Pogorelyy, *Neorg. Mater.*, **39**, No. 2: 212 (2003).
  28. A. I. Tovstolytkin, A. N. Pogorily, S. V. Cherepov, G. V. Bondarkova, and V. I. Silantiev, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **22**, No. 11: 23 (2000).
  29. A. I. Tovstolytkin, T. I. Polek, A. I. Matviyenko, M. I. Zakharenko, M. P.

- Semen'ko, and A. V. Pashchenko, *Solid State Phenom.*, **200**: 239 (2013).
30. P. Schiffer, A. P. Ramirez, W. Bao, and S.-W. Cheong, *Phys. Rev. Lett.*, **75**, No. 18: 3336 (1995).
31. V. O. Golub, V. V. Dzyublyuk, A. I. Tovstolytkin, S. K. Arora, R. Ramos, R. G. Sofin, and I. V. Shvets, *J. Appl. Phys.*, **107**, No. 9: 09B108 (2010).
32. C. Kittel, *Phys. Rev.*, **73**, No. 2: 155 (1948).
33. M. Ziese, H. C. Semmelhack, K. H. Han, S. P. Sena, and H. J. Blythe, *J. Appl. Phys.*, **91**, No. 12: 9930 (2002).