

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫六：超巨磁阻材料的開發與基礎物性研究

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2112-M-032-021-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：淡江大學物理系

計畫主持人：林大欽

計畫參與人員：朱翊璋 陳俊亨 潘俊傑 盧弘海

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 12 月 24 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

(計畫名稱)

新穎過渡金屬氧化物之研究(3/3)

子計畫六：超巨磁阻材料的開發與基礎物性研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92- 2112 -M - 032 -021 -

執行期間： 92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

計畫主持人：林大欽

共同主持人：

計畫參與人員：朱翊璋、陳俊亨、潘俊傑、盧弘海

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學物理系

中 華 民 國 93 年 12 月 20 日

中文摘要

利用固態反應法合成化合物 $(\text{La}_{1-x}\text{Y}/\text{Ho}_x)_{1.4}\text{Sr}_{1.6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ ，其中 Y/Ho 摻雜量 x 的取值有 0, 0.05, 0.1, 0.15。在固定 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 比值的狀況下，用半徑比較小且無磁性的 Y^{3+} 與離子半徑相若具磁性的 Ho^{3+} 部分取代 $\text{La}_{1.4}\text{Sr}_{1.6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ 系統中的 La^{3+} 。藉由 A-site 晶格不匹配所產生的化學壓力造成 MnO_6 八面體產生局部扭曲，得到尺寸效應對物性的影響，亦將稀土元素的磁性對物性的影響分離出來。

有系統地研究了一新穎超巨磁阻材料-- $(\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x)_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LPZMO)—鉛參雜過度金屬錳氧化化合物的晶體結構、磁電傳輸性質、與錳 $L_{3,2-}$ 、 K -、氧 K -、鐳 $M_{5,4-}$ 邊緣之 X 光吸收譜。錳 $L_{3,2-}$ 、 K - 吸收譜的實驗數據明確地給出此系統中錳的價電態為 II 與 III，證明了 LPZMO 是一個電子參雜的系統。鐳的摻雜不僅增加了錳的平均價數，亦改變了自旋向上能帶的填充情形。同時，改變了系統 A-位置平均離子半徑，造成錳 $3d$ 與氧 $2p$ 軌道雜化程度的減弱，對雙交換機制與超交互作用有相當實質上的影響。

利用射頻磁控濺鍍法，我們成功地在 SrTiO_3 、 MgO 與 LaAlO_3 三種基板上沉積沿著 c -軸方向成長 $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LZMO) 薄膜。經由適當的退火補氧過程，所有的 LZMO_{STO} 、 LZMO_{LAO} 與厚度大於 500 nm 的 LZMO_{MgO} 皆呈現金屬-絕緣體的相轉變。垂直基板的晶格常數會隨著不同的基板所給予的應力效應伸長或縮短，也會伴隨著退火補氧導致 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ 比值增加而縮短。由電性結果可知，LAO 基板所造成的壓縮應力效應造成 a - b 平面的 Mn-O 鍵長縮短，使得 LZMO_{LAO} 的 T_C 與 T_{MI} 提昇到了 280 K 左右。

關鍵詞：磁電傳輸、X 光吸收譜、電子參雜、軌道雜化、雙交換機制、金屬-絕緣體轉變。

英文摘要

Mn $L_{3,2-}$, K -, O K - and Pr $M_{5,4-}$ edges x-ray absorption near-edge structure (XANES) spectra of $(\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x)_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LPZMO) with $x=0, 0.05, 0.1, 0.15$ and 0.2 were obtained to study the electronic structure and the effect of Pr substitution. An analysis of Mn $L_{3,2-}$ and K -edge spectra indicates that LPZMO is an electron-doped system. Pr substitution is found to increase the average effective charge of Mn ions and to induce additional unoccupied majority spin (\uparrow spin) e_g subband in the Mn $L_{3,2-}$ -edge XANES spectrum. The Mn $L_{3,2-}$, O K - and Pr $M_{5,4-}$ -edge XANES results demonstrate that the substitution of smaller Pr for La changes O $2p$ -Mn $3d$ and O $2p$ -Pr $4f$ hybridized states.

C -axis oriented thin films of electron-doped manganites $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LZMO) were successfully grown on SrTiO_3 (001), MgO (001) and LaAlO_3 (001) substrates with thickness between 30 and 1000 nm by an off-axis rf sputtering system. Oxygen post-annealed LZMO_{STO} , LZMO_{LAO} , and LZMO_{MgO} with thickness thicker than 600 nm films exhibit a ferromagnetic transition at T_C , which is remarkably close to metal

insulator transition temperature T_{MI} observed in resistivity measurements. The fact that T_{MI} and T_C are remarkably close strongly suggests that double exchange mechanism still governs charge transport of the electron-doped $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ manganites. In addition, it was found that lattice-mismatch-induced strain has a significant influence on structural and physical properties of LZMO films. The Mn-O bond length is shortened by in-plane compressive strain. As a result, it enhances hybridization between Mn e_g and O $2p$ orbitals and raises T_{MI} (T_C) of LZMO_{LAO} films up to about 280 K. In contrast, due to longer Mn-O bond length caused by in-plane tensile strain, thinner LZMO_{MgO} films with thickness less than 500 nm become ferromagnetic insulators at low temperatures. The spin-glass state was observed in the LZMO films below 50 K. The magnetic inhomogeneity and the strain in the films might be responsible for this spin-glass behavior in the films.

Keywords: magneto-transport, XANES, electron-doped, hybridization, double exchange mechanism, metal-insulator transition.

前言

隨著資訊工業與半導體科技的蓬勃發展，體積小、記憶容量大、操作速度快的元件將成為市場的新寵兒。傳統以矽晶片為主的半導體由於基本電子數目的要求，以及無法有效地解決本質的熱傳問題，發展已到了瓶頸的階段。取而代之的是磁性記錄工業，在良性的刺激之下使得與磁阻效應相關之基礎及應用研究有顯著的進展。例如：巨磁阻磁性多層膜材料製成的讀寫頭，自旋閥結構作成的磁隨機存取記憶體，磁電晶體。這些元件的共同特質是利用外加磁場的驅動，使系統的自旋狀態發生改變，產生開關讀寫的記憶功能。它與傳統依賴電壓驅動的被動元件最大的不同點在於它是一個非揮發性的元件，因為即使電源關閉自旋狀態的改變將繼續保持著。它的操作速度與記憶容量可以取代隨機存取記憶體與硬碟，這種改變電腦記憶模式與處理器工作方法的自旋轉換電子元件將成為廿一世紀應用元件的主流。

最近的研究中發現一種具鈣鈦礦結構 $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (A=Ca, Sr, Ba 等) 的過渡金屬氧化物，其磁阻效應比巨磁阻材料多出了一到兩個數量級，此系列的材料因而被稱為"超巨磁阻材料(CMR material)"。若將此材料用來取代前述的巨磁阻材料，必然可以增加元件的靈敏度或增加數位資料儲存的密度。隨著奈米技術的日漸成熟，結合半導體製程技術與磁電子學的嶄新自旋電子元件將逐漸成為主流。因此，從應用的觀點來看，具有鈣鈦礦結構的超巨磁阻系統是一個極具前瞻性、創新性，且值得深入探討的尖端智慧型材料。

超巨磁阻材料是一種極為靈敏的材料，只要稍微改變製作樣品的條件，就能改變樣品的物理特性。超巨磁阻現象產生的最主要物理機制是所謂的"雙交換機制(double exchange)"，電子藉由 $\text{Mn}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Mn}^{4+}$ 跳躍的難易程度可決定磁阻效應的大

小。因此，錳氧八面體中錳氧平面上的 Mn-O 間的鍵長與 Mn-O-Mn 間的鍵角影響電子的傳輸。換言之，錳氧八面體的結構扭曲是影響龐磁阻材料的重要因素之一。舉例來說：摻雜不同大小的原子進入 A site(La 原先在結構內所占的位置)的位置，或是樣品中氧含量的變化，又或者是薄膜樣品由於所選擇的基板所造成的不匹配效應，都足以讓超巨磁阻材料的物理性質產生極大的變化。

研究目的

(I) 尋找具有高磁阻比值、低飽和磁場的新超巨磁阻材料。(II) 探討尺寸效應、價電效應、Mn 位置摻雜對磁電傳輸性質的影響。(III) 研究反常霍爾係數與電阻率的關係，藉以探討自旋軌道交互作用所引起的非對稱散射與巨磁阻現象的關聯。

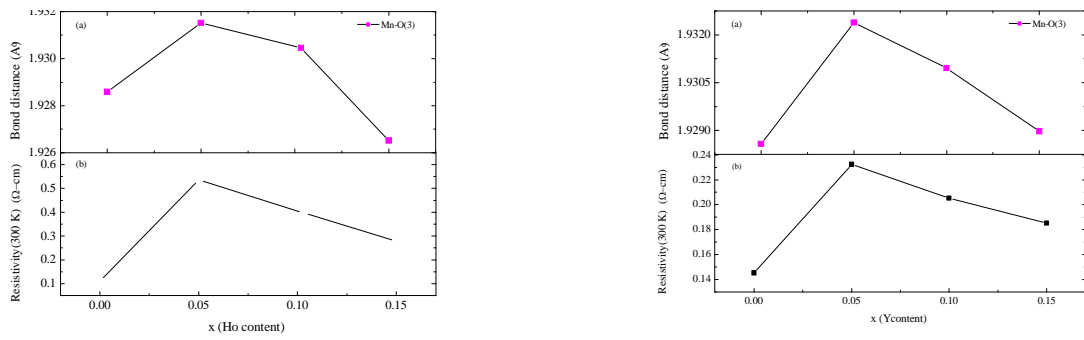
研究方法

以檸檬酸鹽先驅物法與固態反應燒結法合成 $n=2, 3$ 的 $(R,D)_{n+1}Mn_nO_{3n+1}$ 系列化合物 (其中 $R=La, Pr, Nd$ 等； $D=Ca, Sr$ 等)。經由預燒、多次研磨、調整燒結溫度、氣氛、壓力等條件獲得均勻度高、顆粒小的粉末。以 X-光粉末繞射儀鑑定樣品的純度，以 Rietveld 分析法獲得晶胞參數、原子的位置、相關原子間的鍵長和鍵角。對於一系列具有單相且均勻度高的樣品，我們將測量它們的磁電傳輸性質，以獲得這些化合物的組成、氧含量、製程條件、結晶構造與磁電傳輸性質的關係，尋找外加飽和磁場小/磁阻比值大的材料的最佳組成。測量樣品的 XAS、EXAFS、XANES，以了解 R(La)位置部份取代所誘發的局部陽離子缺陷、價電態的擾動與基本物性的關連性、費米能階附近的價電子結構。

結果與討論

(a) A-位置陽離子尺寸不匹配對層狀錳系化合物 $(La_{1-x}R_x)_{1.4}Sr_{1.6}Mn_2O_7$ ($R=Y, Ho$) 傳輸與磁學性質的影響

經由結構精算法得知，晶格常數 a, b, c 的改變和伴隨著錳氧鍵長的變化，與系統的電性和磁性有密切的關係，(圖 1 與 2)。當 $40\text{ K} < T < 150\text{ K}$ 時，隨著摻雜量的增加，支配 LYSMO 和 LHSMO 電子傳輸機制由雙交換交互作用轉變到滲透效應。除此之外，磁學性質也因摻雜量的增加，3D FM 行為受到抑制而轉為以短程 2D FM 有序為主，(圖 3)。當 $T = 5\text{ K}$ 時，我們觀察到 LYSMO 和 LHSMO 發生亞穩磁轉變 (圖 4)，這意味著系統在低溫下可能存在數個自由能差異很小的磁亞穩態。另外，ZFC 與 FC 磁化曲線在 $T = 30\text{ K}$ 附近是不重合的；而 FC 與 FW 曲線幾乎重合，代表 LYSMO 和 LHSMO 在 $T < 30\text{ K}$ 時，有磁矩凍結的現象。同時，當 $T = 5\text{ K}$ 時，磁阻隨磁場的變化發生明顯的迴滯現象，其中以 LYSMO $x=0.05$ 的樣品最為顯著(圖 5)。上述的實驗結果似乎顯示，LYSMO 和 LHSMO 在低溫下有類自旋玻璃態的磁結構。最後，我們發現 LYSMO 與 LHSMO 摻雜量 $x = 0.05$ 的樣品，其磁阻比值最大(~90%)，這可能與此摻雜量的樣品在低溫下的磁序受挫程度最嚴



重有關。

(a)

(b)

圖 1. (a) (La_{1-x}Ho_x)_{1.4}Sr_{1.6}Mn₂O₇ 系列樣品之 Mn-O(3) 鍵長和室溫電阻率與 Ho 含量之關係圖。(b) (La_{1-x}Y_x)_{1.4}Sr_{1.6}Mn₂O₇ 系列樣品之 Mn-O(3) 鍵長和室溫電阻率與 Y 含量之關係圖。

綜觀實驗數據，我們得到了兩個具體的結論：(a) 摻雜所造成的尺寸效應，對 LYSMO 和 LHSMO 系統傳輸性質有決定性的影響。(b) Ho³⁺ 的磁性對系統在低溫下的磁結構有相當程度的影響，合理的推測為穩定系統的反鐵磁序，因而降低了在低溫下類似自旋玻璃磁結構的形成。

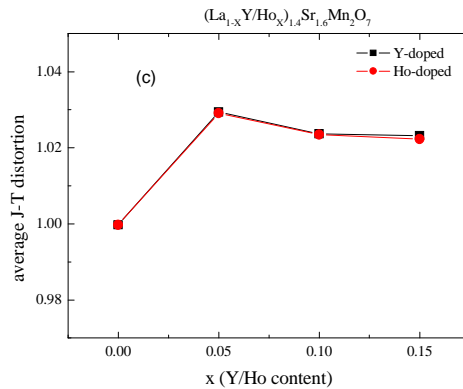


圖 2. 平均 JT-distortion 與 Y/Ho 含量之關係圖。平均 JT-distortion 定義為
$$\left[\frac{\text{Mn} - \text{O}(1) + \text{Mn} - \text{O}(2)}{2} \right] / [\text{Mn} - \text{O}(3)]$$
。

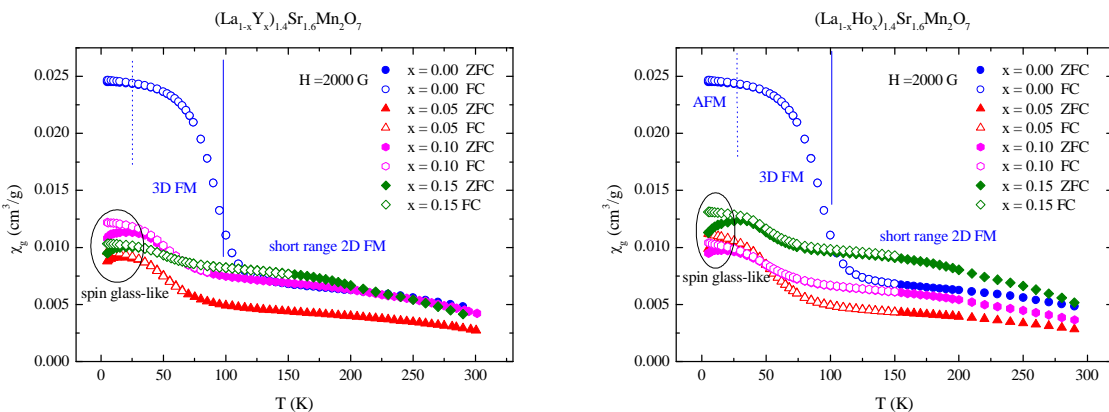


圖 3. (La_{1-x}Y/Ho_x)_{1.4}Sr_{1.6}Mn₂O₇ 系列樣品在 2000 G 之磁化率與溫度之關係圖

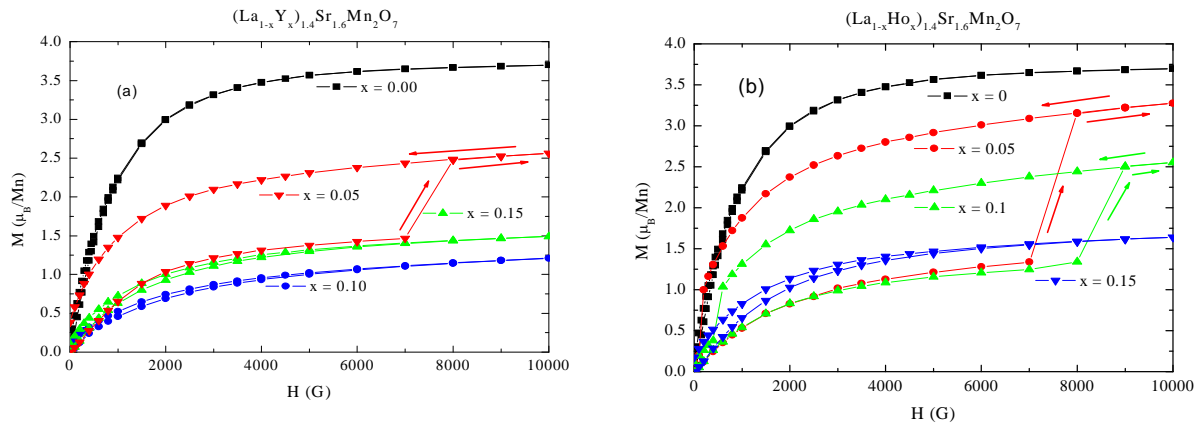


圖 4. $(La_{1-x}Y/ Ho_x)_{1.4}Sr_{1.6}Mn_2O_7$ 系列樣品在 5 K 之磁化強度與磁場關係圖

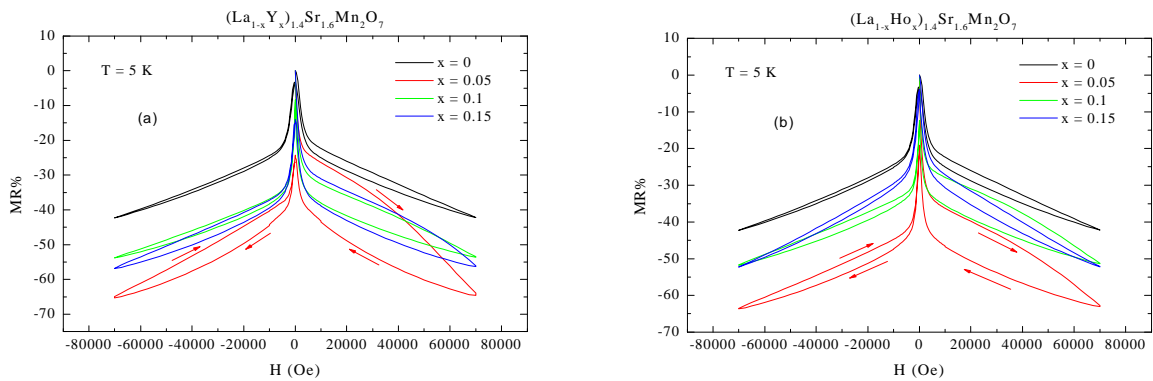


圖 5. $(La_{1-x}Y/ Ho_x)_{1.4}Sr_{1.6}Mn_2O_7$ 系列樣品在 5 K 下磁阻變化與磁場之關係圖，迴滯現象以 $x=0.05$ 的樣品最明顯。

(b) 鏷銦錳氧化物 $(La_{1-x}Pr_x)_{0.85}Zr_{0.15}MnO_3$ 的結構及磁傳輸性質的研究

我們有系統地研究了一新穎超巨磁阻材料-- $(La_{1-x}Pr_x)_{0.85}Zr_{0.15}MnO_3$ (LPZMO)—鈹參雜過度金屬錳氧化化合物的晶體結構、磁電傳輸性質、與錳 $L_{3,2}$ -、 K -、氧 K -、鐳 $M_{5,4}$ -邊緣之 X 光吸收譜。X 光繞射實驗與精算分析顯示此系統的晶體結構是空間群為 $R\bar{3}C$ 的 rhombohedral 晶格 (圖 6)。錳 $L_{3,2}$ -、 K -、氧 K -吸收譜的實驗數據明確地給出此系統中錳的價電態為 II 與 III，證明了 LPZMO 是一個電子參雜的系統 (圖 7)。錳 $L_{3,2}$ -、氧 K -吸收譜說明了 MnO_6 八面體有些微的扭曲。此系統錳-氧-錳之鍵角約為 160 度比電洞參雜的系統 $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ 小很多，造成錳 $3d$ 與氧 $2p$ 軌道雜化程度的減弱，對雙交換機制與超交互作用有相當實質上的影響。在外加磁場為 7 Tesla 時，LPZMO 的最大磁阻比值(約為 50%~70%)發生在金屬-絕緣體轉變的溫度(圖 8)。同時，磁阻的比值大小隨著 A-位置平均離子半徑的減少而遞增；鐵磁轉變溫度隨著 A-位置平均離子半徑的減少而遞減，這代表了在此電子參雜的系統中，雙交換機制(巡迴電子由 Mn^{2+} 跳躍到 Mn^{3+})依然存在，對電荷的傳輸行為扮演很重要的角色 (圖 9)。另外，有趣的是此系統的金屬-絕緣體轉變溫度比鐵磁轉變溫度低了約 30 度，這意味著此系統中巡迴電子的有效跳躍矩陣元受到本質性局部晶格小扭曲、晶界面的局部磁性結構擾動的影響，使得電子的動能遠小於電-聲子交互作用能；只有在較低的溫度下，當錳 t_{2g} 能帶電子間自旋的關聯

性增強時，巡迴電子的傳輸機制才會從跳躍轉為傳導。然而，在更低的溫度時， Mn^{2+} 與 Mn^{3+} 可能有分離的現象，導致 LPZMO 在低溫時轉變為絕緣體。最後，此系統的金屬-絕緣體轉變溫度、低溫下的電阻率、錳-氧-錳之鍵角、錳- L_3 邊緣吸收峰的面積與錳含量的關係有極強的關聯性，顯示了錳的摻雜不僅改變了系統 A-位置平均離子半徑，同時也對 Mn^{3+}/Mn^{2+} 比值、錳 $3d$ 與氧 $2p$ 軌道雜化程度有相當程度的改變，導致了異常而有趣的電荷傳輸性質。

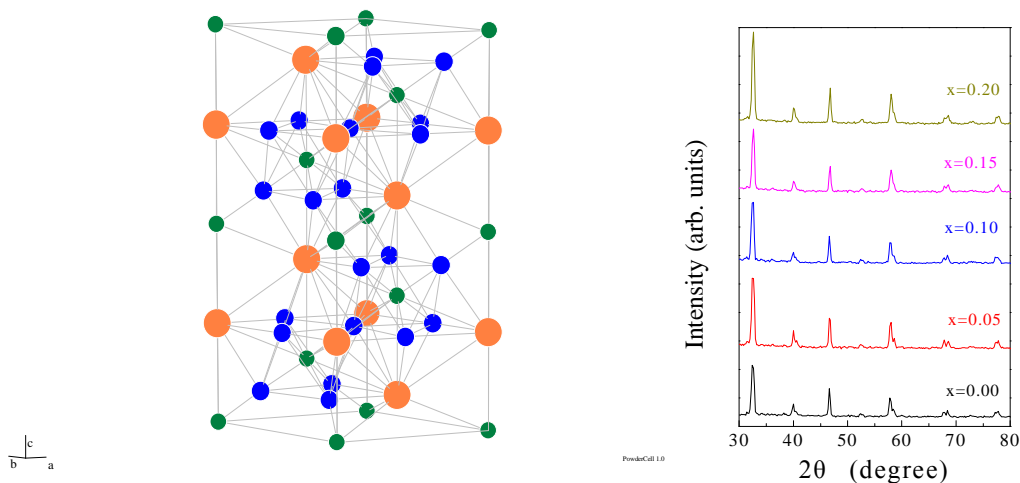


圖 6. $(La_{1-x}Pr_x)_{0.85}Zr_{0.15}MnO_3$ 的晶體結構與 X-光繞射圖

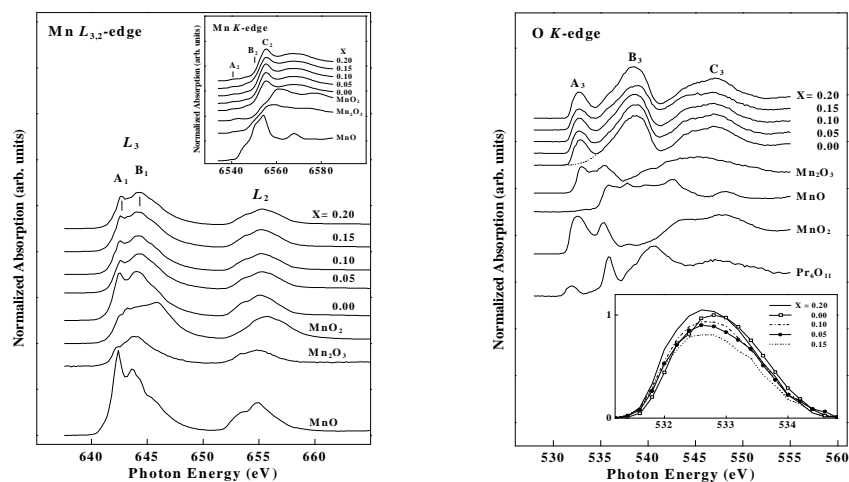


圖 7. $(La_{1-x}Pr_x)_{0.85}Zr_{0.15}MnO_3$ 的 Mn $L_{3,2}$ -、Mn K-、O K-edge 的 X-光吸收譜圖

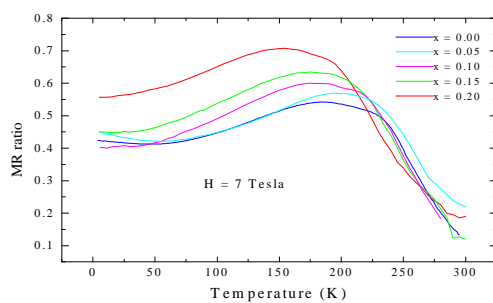


圖 8. LPZMO 在外磁場為 7 T 時，磁阻隨溫度變化的關係圖

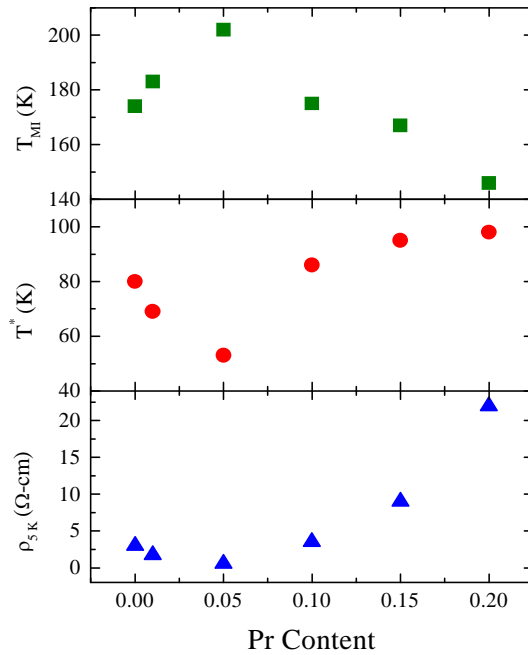
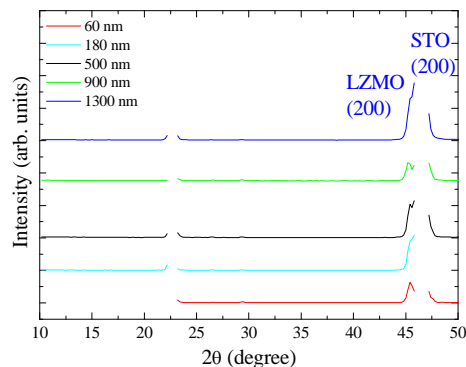


圖 9. LZMO 之 T_{MI} (K), T^* (K) 與 ρ_{5K} 與鐳含量的關係圖

(c) 應力效應對 $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ 薄膜結構及磁傳輸特性的影響

利用射頻磁控濺鍍法，我們成功地在 SrTiO_3 、 MgO 與 LaAlO_3 三種基板上成長 $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ (LZMO) 薄膜。經由適當的退火補氧過程，所有的 LZMO_{STO} 、 LZMO_{LAO} 與厚度大於 500 nm 的 LZMO_{MgO} 皆呈現金屬-絕緣體的相轉變。由 X-ray 數據得知所有的 LZMO 薄膜都是沿著 c -軸方向成長，其垂直基板的晶格常數會隨著不同的基板所給予的應力效應伸長或縮短，也會伴隨著退火補氧導致 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ 比值增加而縮短。隨著薄膜的厚度增加，應力效應會被慢慢的釋放掉，垂直基板的晶格常數則會慢慢接近趨近於飽和值 (圖 10)。由電性結果可知，LAO 基板所造成的壓縮應力效應使得 a - b 平面的 Mn-O 鍵長縮短，使得 LZMO_{LAO} 的 T_C 與 T_{MI} 提昇到了 280 K 左右 (圖 11)。而 MgO 基板由於與樣品的晶格長度差異性過大，加上擴張應力效應使得樣品 a - b 平面的 Mn-O 鍵長增長，因此厚度小於 500 nm 的 LZMO_{MgO} 在低溫時為一鐵磁態的絕緣體。綜觀上述實驗結果可知，對於 A-site 平均離子半徑較小的錳氧化合物，只要選擇適當的基板，可以成長出在室溫下為鐵磁態金屬的薄膜。由磁性結果得知，自旋玻璃態的發生溫度 (T_g) 會因所鍍的基板不同而改變。外加磁場的增強會使得 T_g 降低。另外，較大的壓縮應力效應似乎會使得 LZMO 薄膜樣品的易磁化方向較偏向 a - b 平面。



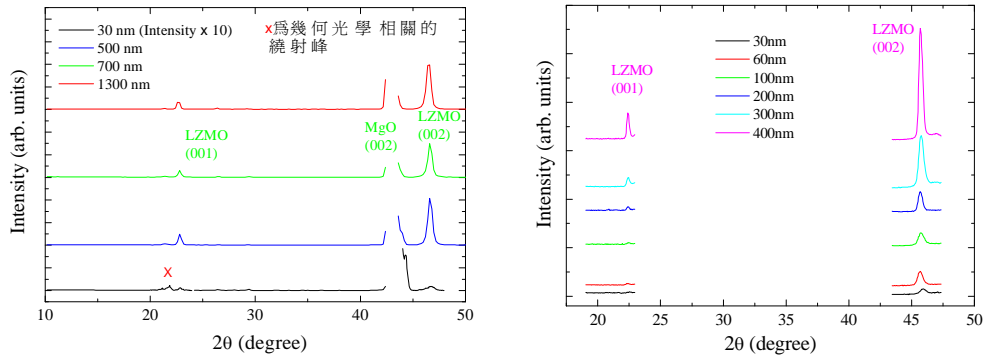


圖 10. LZMO_{STO} , LZMO_{MgO} , LZMO_{LAO} 薄膜樣品不同厚度之 X-ray 繞射圖

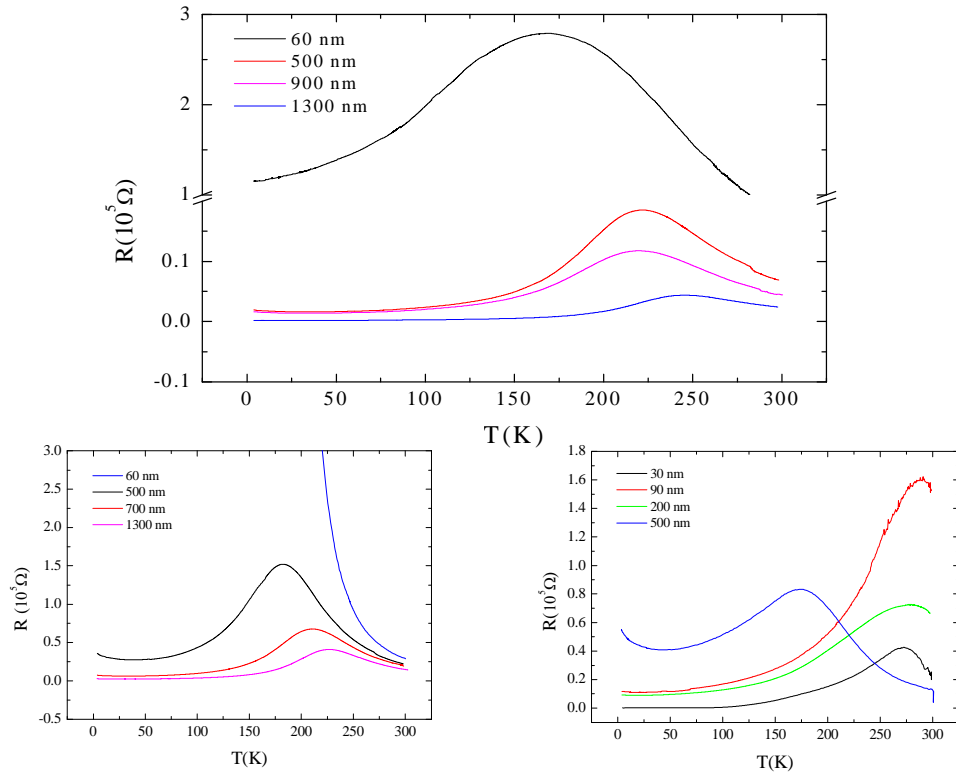


圖 11. LZMO_{STO} , LZMO_{MgO} , LZMO_{LAO} 隨膜厚不同之電阻與溫度之關係圖

參考文獻

1. 盧弘海, 淡江大學碩士論文(92) “A-位置陽離子尺寸不匹配對層狀錳氧化合物 ($\text{La}_{1-x}\text{R}_x$) $_{1.4}\text{Sr}_{1.6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ ($\text{R}=\text{Y}, \text{Ho}$) 傳輸與磁學性質的影響”。
2. 朱翊璋, 淡江大學碩士論文(93) “應力效應對 $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ 薄膜結構及磁傳輸性質的影響”。
3. 張道宜, 長庚大學碩士論文(93) “鏷錯錳氧化物 ($\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x$) $_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ 的結構及光譜性質研究”。
4. S. Jin *et al.*, Science **264**, 413 (1994).
5. J.M. D Coey *et al.*, Adv. Phys. I. **48**, 167 (1999).
6. P. Shiffer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 3336 (1995).
7. A. J. Millis, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 5144 (1995).

8. G. Jakob, *et al.*, Phys. Rev. B **58**, 14966 (1998).
9. J.B. Goodenough, J. Appl. Phys. **81**, 5330 (1997).
10. R.S. Liu, *et al.*, Solid State Commun. **105**, 605 (1998).
11. J. Kawai, *et al.*, Spectrochim. Acta B **55**, 1385 (2000).
12. G. Kaindl *et al.*, J. Alloys. Comp. **246**, 177 (1997).
13. N.D. Mathur, *et al.*, Nature **387**, 266 (1997).
14. K.Chanara, T. Ohno, M. Kasai and T. Kozono, Appl. Phys. Lett. **63**, 1990 (1993).
15. P. Schiffer, A. P. Ramirez, W.Bao and S. -W. Cheong, Phys. Rev. Lett. **75**, 3336 (1995).
16. R. Mahesh, R. Mahendiran, A. K. Raychaudhuri and C. N. R. Rao, J. Solid State Chem. **114**, 297 (1995).
17. R. Mahesh, R. Mahendiran, A. K. Raychaudhuri and C. N. R. Rao, J. Solid State Chem. **120**, 204 (1995).
18. R. Mahendiran, S. K. Tiwary, A. K. Raychaudhuri, T. V. Ramakrishnan, R. Mahesh and C. N. R. Rao, Phys. Rev. B **53**, 3348 (1996).
19. R. Mahesh, R. Mahendiran, A. K. Raychaudhuri and C. N. R. Rao, J. Solid State Chem. **122**, 448 (1996).
20. Y. Moritomo, A. Asamitsu, H. Kuwahara, and Y. Tokura, Nature (London) **380**, 141 (1996).
21. T. Kimura, A. Asamitsu, Y. Tomioka, and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. **79**, 3720 (1997).
22. J. F. Mitchell, J. E. Millburn, M. Medarde, D. N. Argyriou, and J. D. Jorgensen, J. Appl. Phys **85**, 4352 (1999).
23. Eun-OK Chi, Young-Uk Kwon, and Nam Hwi Hur, Bull. Korean Chem.Soc. **21**, 59 (2000).
24. J. Dho, W. S. Kim, and N. H. Hur, Phys. Rev. B **65**, 024404 (2002).

附錄

1. Effect of A-site cation size mismatch on transport and magnetic properties in layered manganites $(\text{La}_{1-x}\text{R}_x)_{1.4}\text{Sr}_{1.6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ (R=Y, Ho), submitted to J. Mag. Magn. Mat.
2. Structural and physical properties of electron-doped manganites $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$, submitted to J Appl. Phys.
3. Strain effect on structural and magnetotransport properties of $\text{La}_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ thin films, submitted to J. Appl. Phys.
4. Electronic and local atomic structure of $(\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x)_{0.85}\text{Zr}_{0.15}\text{MnO}_3$ studied using x-ray absorption spectroscopy, submitted to J. Appl. Phys.

計畫成果自評

首先，感謝國科會的支持，使得此三年計畫的執行能一切順利。三年來，我們有三位碩士班學生陸續畢業(學生姓名、論文名稱與年份列於參考文獻)，亦有數篇學術論文送審中(論文名稱列於附錄)。主要的研究成果有兩點:(I)發現一種新的結構簡單且極容易製作的電子摻雜超巨磁阻材料，將其成長於適當的基板上，透過晶格不匹配所產生的壓縮應力，可調制錳氧平面內錳氧軌道的耦合程度，進而提昇鐵磁轉變溫度接近室溫，增加了超巨磁阻材料的應用潛力。(II)證實了 A-site 平均離子半徑的大小比稀土離子有效磁距的大小對磁傳輸性質的影響深遠。這些成果對於自旋電子學相關應用元件的製作，提供了有利的參考資訊。然而，在有限的資源與人力下，我們並未能全數完成當初想要探討的工作，如：研究超巨磁阻材料反常霍爾係數與電阻率的關係。這是一個非常值得研究的課題，我們將會持續此項研究工作，希望能夠找到此超巨磁阻材料反常霍爾效應的來源，進而瞭解由載子與局域化磁距之間的自旋軌道交互作用所引起的非對稱散射與巨磁阻現象的關聯性，並對散射機制與系統的維度、摻雜量的關係有一完整的認知。除此之外，為了進一步比較 電子摻雜 LZMO 與電洞摻雜 LCMO 或 LSMO 的差異性，我們已將 LZMO 薄膜樣品給齊正中教授，利用超快光學時間分解的實驗技術測量載子自旋的動力學行為，希望在不久的將來能有令人振奮的結果。

