

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

高溫超導體系統中超導性與絕緣性的研究（二）

Studies of the metal-insulator transition in cuprates (II)

計劃編號：NSC88-2112-M009-025

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：林俊源 助理教授 交通大學物理所

一、 中文摘要

本成果報告內容主要為過去一年我們執行研究銅氧化物中絕緣態的進展。我們已系統性的將 YBCO 薄膜由滿氧的狀態($T_c = 90$ K) 轉變成絕緣狀態。在這過程中，我們小心的只是將氧從銅氧鍵慢慢抽離。X 光繞射結果顯示在樣品從 $T_c = 90$ K 到 0 K 的過程中，結構仍保持完好，絕緣樣品的電阻率已在 1.5 K 到 300 K 的溫區測量，0 到 8 T 的樣品低溫磁阻也測量完成。我們也製成摻鋅 YBCO 薄膜並進行相同實驗。我們從實驗數據驗證絕緣的銅氧化物是一個近乎理想的二維系統。此系統在低溫呈現出奇特的正磁阻現象，值得進一步探討。本計劃執行期間其他的研究成果也將在文中提及。

關鍵詞：超導體絕緣轉變，侷限性，銅氧化物，二維系統

Abstract

The contents of this report contain the continuing results of our studies on the insulating state of oxygen deficient YBCO. We have succeeded in preparing insulating YBCO from 90 K superconducting thin films and 10% Zn-doped YBCO thin films by changing the oxygen content in either YBCO Zn-doped YBCO. X-ray diffraction data showed that the orientation of the films remained the same during the oxygen removal process. The resistivity of the insulating YBCO was measured from 1.5 to 300 K. Analyses of data clearly indicate the two dimensional Mott variable range hopping. The positive magnetoresistivity in these samples is novel and deserves more work. Other results of our research during the project period and further prospect will also be mentioned.

Keywords: metal-insulator transition, localization, cuprates, two-dimensional system

二、緣由與目的

近數年來，二維(2D)或近似二維(quasi-2D)系統的電子傳輸現象已引起廣泛的研究興趣。對一原本就具有超導的物質系統中，當其具有 2D or quasi-2D 性時會展現出超導到絕緣的轉變(SIT)。一般相信此 SIT 發生於當此二維系統的電阻數量級為 $h/4e^2$ (6.5 K Ω)時。此議題的有趣性乃其牽涉到超導性與局限性(localization)的相互關係。同時此類現象發生在載子有強烈交互作用(strongly correlated)或具有 disorder 的系統。此類系統乃是凝態物理中亟待探究的課題。瞭解在 SIT 兩邊中的現象將有助於我們對此種系統的瞭解與掌握。從前數年對傳統超導薄膜如 Bi/Cu、Pb/Ge、Al/Ge 的研究，似乎驗證了超導性與局限性在某個範圍可以同時存在。然而無論在超導或絕緣兩邊都還有許多不清楚的問題，如從超導面來看，當 localization 越來越強時，超導性為何消失的機制仍不清楚；在絕緣方面，更是有許多待爭議的問題。本研究在近期內主要重點將放在利用高溫導系統的非超導絕緣相來探究 2D 系統中 localization 的現象。相關議題將詳述於後。以往這些研究成果主要從極薄的傳統超導超薄膜而來，這些材料原本為三維的超導體，為了近似二維的系統，乃用其極薄的膜(~nm)作為研究對象。然而當膜極薄時，其結構(morphology)可能極不均勻。所量得結果，究竟有

多少是 2D 系統的本質，那些是因結構不均所造成，並不容易區分。相對於傳統超導體，高溫超導體本質上被認為是 2D 或 quasi-2D 的系統，且其為 strongly correlated 系統。當其超導性被各種人為方法抑制後，此系統經常表現出 SIT 的現象。更重要的是，在此時其結構仍保持其完整性。近年來，高溫超導樣品不管是晶體或薄膜，在製程上均有極大的改善，高品質的樣品已相對上容易取得，因此應該是研究 2D 系統中 SIT 極理想的材料。因此，我們想要有系統的將銅氧化物有系統的從超導體變成絕緣體，同時保持其晶格結構與銅氧平面的完整，來研究其絕緣態的電子傳輸現象。

三、結果與討論

為了研究銅氧化物絕緣態的行為，我們先備製高品質的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 與 $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{O}_7$ 薄膜在 SrTiO_3 基板上，膜厚 2000 Å。YBCO 樣品 $T_c = 90$ K 且 X 光繞射結果顯示樣品極佳的方向性。接下來我們很小心地控制樣品的氧含量 x ，使其從 $x \approx 6.9$ 逐漸減少。最後終於得到 T_c 消失，且樣品的電阻由金屬性變成絕緣性。X 光繞射（圖一、二）顯示當樣品從 $x \approx 6.9$ 變到缺氧時，結構仍保持相當好的方向性。圖二、三、四顯示了不同氧含量 YBCO 與摻鋅 YBCO 樣品 ρ - T 圖。因此，在缺氧的樣品中，電子的傳輸行為仍主要發生在銅氧面。從 300K 到 2 K 的 ρ (T) 測量結果顯示 ρ 隨著溫度下降而變大，出現侷限性行為。我們嘗試以

$$\ln \frac{\rho}{\rho_0} = A e^{\left(\frac{T}{T_0}\right)^\nu}$$

(一) 分析數據，其中 ρ_0 對應一個特徵 sheet resistance $R_0 = \pi h/e^2 = 81 \text{ k}\Omega$ ，在 R_0 以上強侷限性的現象可能發生。〔1〕分析的結果得到 $\nu = 0.33 \pm 0.00$ ，清楚顯示此缺氧 YBCO 的導電行為是二維 Mott variable range hopping (VRH)。此結果的確定性可由圖六看出。就我們所知，以前文獻中從來沒有觀察到絕緣態的銅氧化物如此清楚顯示二維 Mott VRH 的行為。我們因此確定其電阻呈現二維的強侷限性行為。我們也測量 0 到 8 T 的樣品低溫磁阻，結果成限於圖七、八。一般的強侷限理論認為在此區間，磁阻應為負值。因此，我們觀察到的負磁阻是很特別的。我們推測此不尋常的磁阻可能與樣品中的 anti-ferromagnetism 或 stripe phase 有關 [2,3]，值得進一步研究。某些樣品在高溫仍呈現些金屬性 (ρ 隨著 T 下降而減少)，這仍是銅氧化物中未解的謎題之一，我們將一併研究。

四、計劃成果與自評

上述的結果，對絕緣態銅氧化物的了解可能有重大貢獻。最近以類似方法探討此物質中 anti-ferromagnetism 或 stripe phase 議題的研究正方興未艾 [2,3]。本計劃探討的樣品種類與溫度區間都比文獻以發表的研究更多、更廣，當有助於釐清這些議題。除上述的研究外，在過去的一年我們也進行了其他的研究工作，並投稿到國際性

的期刊，部份已接受發表 [4-11]。茲簡述如下：

(二) 我們持續的對 Pr1248 及相關的化合物做了各方面的探討。其中磁性、比熱、電阻與 thermal electric power、與上述物理量的壓力效應已發表在多篇的 Physical Review B 與 Physica C 上。中子繞射與同步輻射的研究亦已完成，即將發表在國際著名期刊。這些對 Pr1248 的完全詳細研究，提供了學界對 Pr 相關的銅氧化物進一步瞭解的寶貴知識。

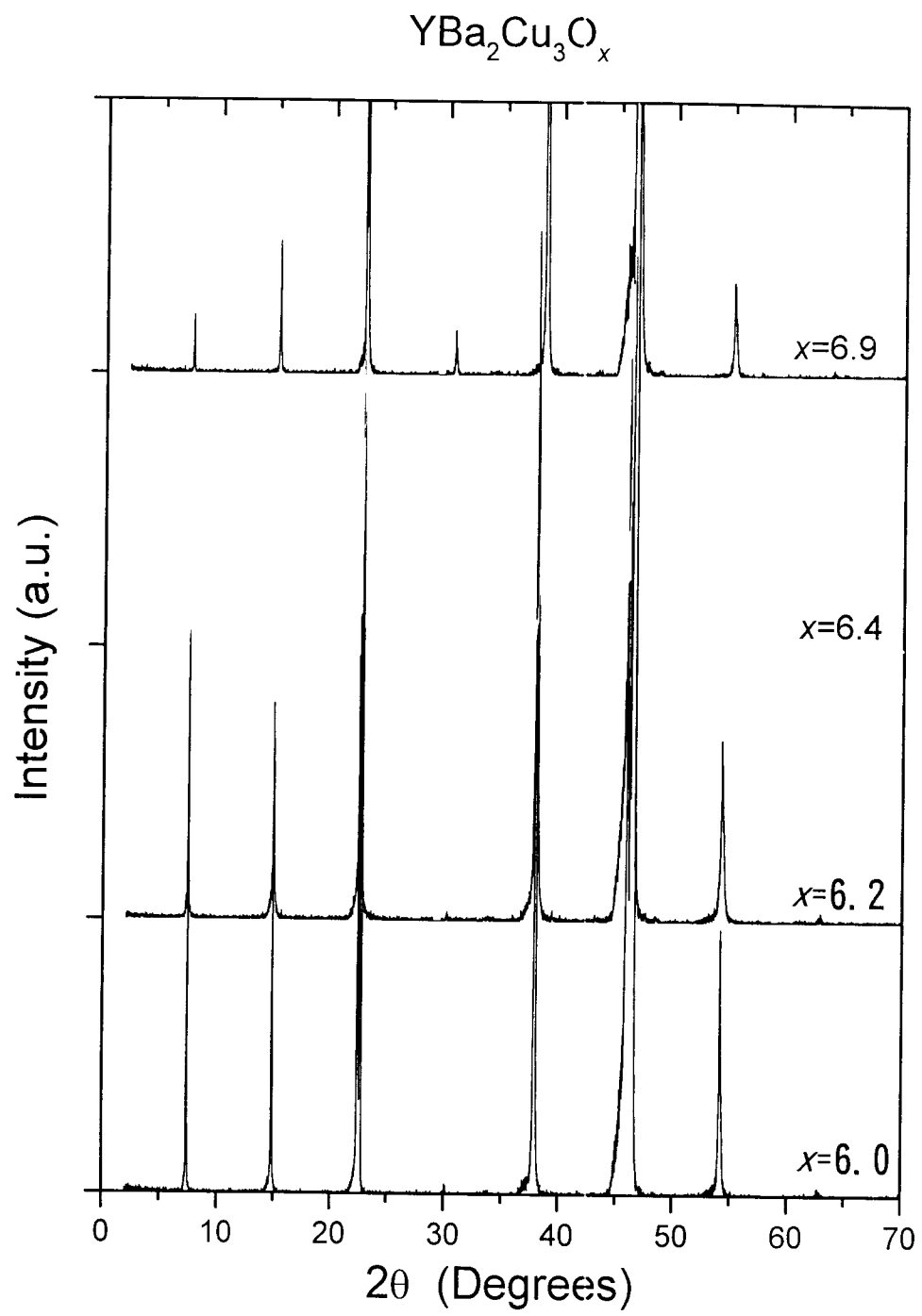
(二) 對於 La214 系統，我們以低溫比熱為工具，探討 Quasiparticles 的行為，獲致三項重大成果：〔一〕確定在 La214 系統中不同 doping levels 的低溫電子比熱皆可以 d -wave 的配對對稱來解釋。〔二〕現在的理論對有雜質時的混和態中 Quasiparticles 的探討是正確的。〔三〕比熱數據顯示在 underdoped 的樣品中，雜質會導致 Density of states 在費米面附近有不尋常的變小現象，在定性上符合最新理論的預測。這些結果已即將陸續發表在著名期刊，並將對此領域的實驗與研究工作都有重大影

響。

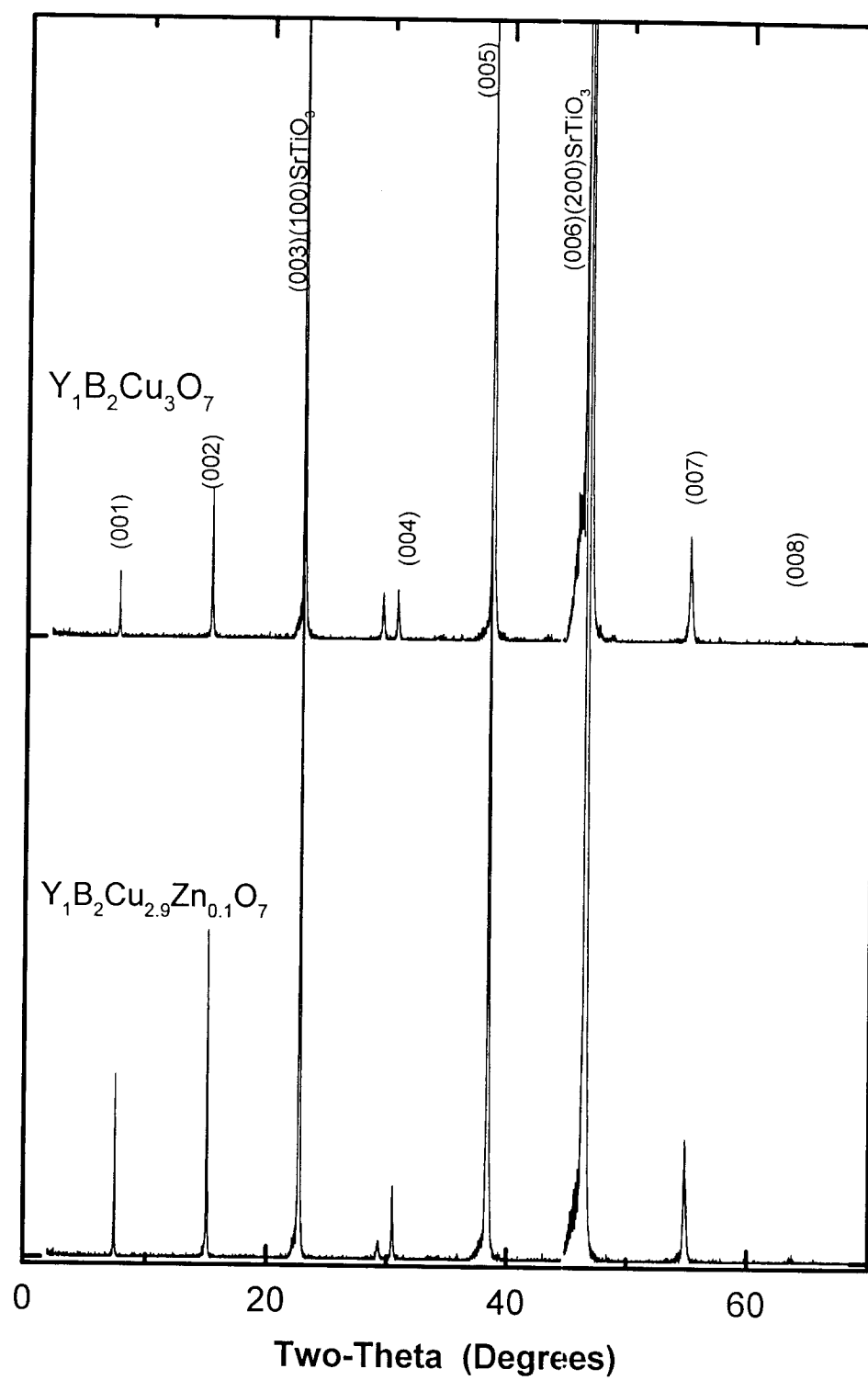
(三) 我們從電阻率與 H_{c2} 的測量推論在 YBCO 中，銅氧面上不同雜質或缺陷會造成不同 T_c 下降的速率的原因是因為載子散射的非均向性。

五、參考文獻

- [1] S.-Y. Hsu and J. M. Valles, Jr., Phys. Rev. Lett. 74, 2331 (1995).
- [2] A. N. Larov, Y. Ando, S. Segawa, and J. Takeya, Phys. Rev. Lett. **83**, 1419 (1999).
- [3] Y. Ando, A. N. Lavrov, and K. Segawa, Phys. Rev. Lett. **83**, 2813 (1999).
- [4] S. J. Chen, C. F. Chang, H. L. Tsay, H. D. Yang, and J.-Y. Lin, Phys. Rev. B **58**, R14 753 (1998).
- [5] J.-Y. Lin, S. J. Chen, S. Y. Chen, C. F. Chang, H. D. Yang, S. K. Tolpygo, M. Gurvitch, Y. Y. Hsu, and H. C. Ku, Phys. Rev. B **59**, 6047 (1999).
- [6] S. S. Weng, I. P. Hong, C. F. Chang, H. L. Tsay, S. Chatterjee, H. D. Yang, and J.-Y. Lin, Phys. Rev. B **59**, 11 205 (1999).
- [7] S. Chatterjee, S. S. Weng, I. P. Hong, C. F. Chang, H. D. Yang, and J.-Y. Lin, Physica C **312**, 55 (1999).
- [8] W.-H. Li, S. Y. Wu, Y.-C. Lin, K. C. Lee, S. S. Weng, I. P. Hong, J.-Y. Lin, and H. D. Yang, Phys. Rev. B, in press.
- [9] J.-Y. Lin, C. F. Chang, and H. D. Yang, Physica B, in press.
- [10] C. F. Chang, and H. D. Yang, submitted to Phys. Rev. Lett..
- [11] C. F. Chang, and H. D. Yang, submitted to Phys. Rev. Lett..



圖一、Oxygen-defficient YBCO X光繞射圖



圖二、X光繞射圖

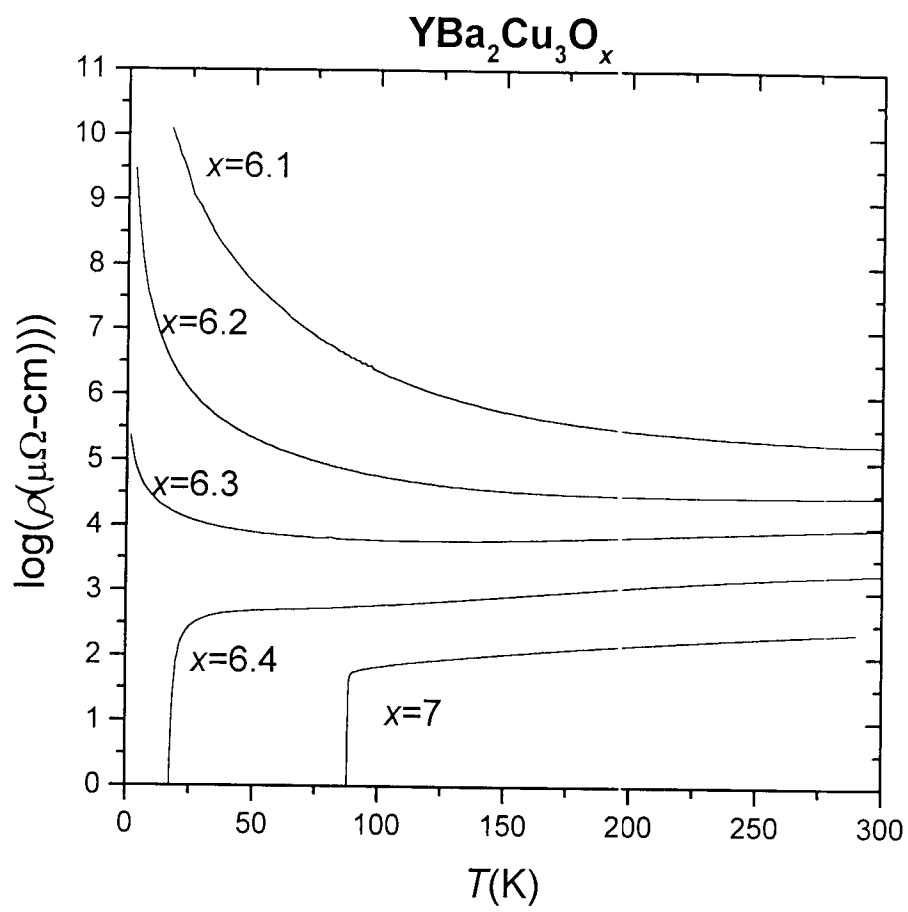
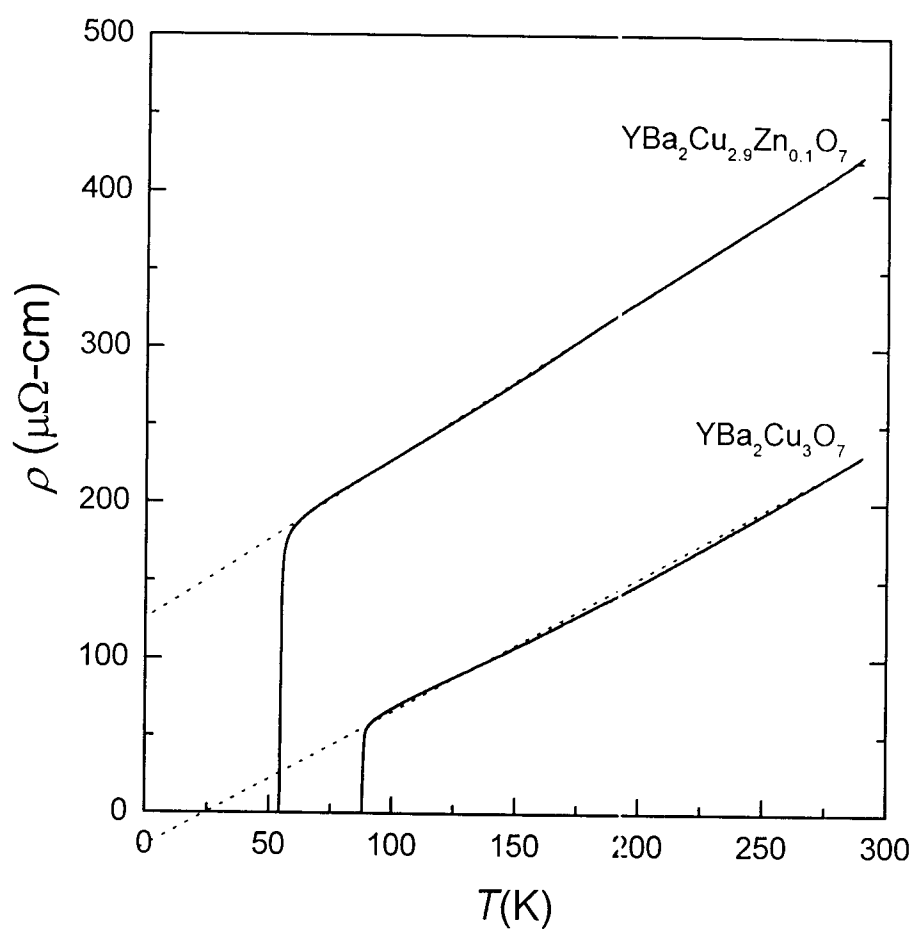
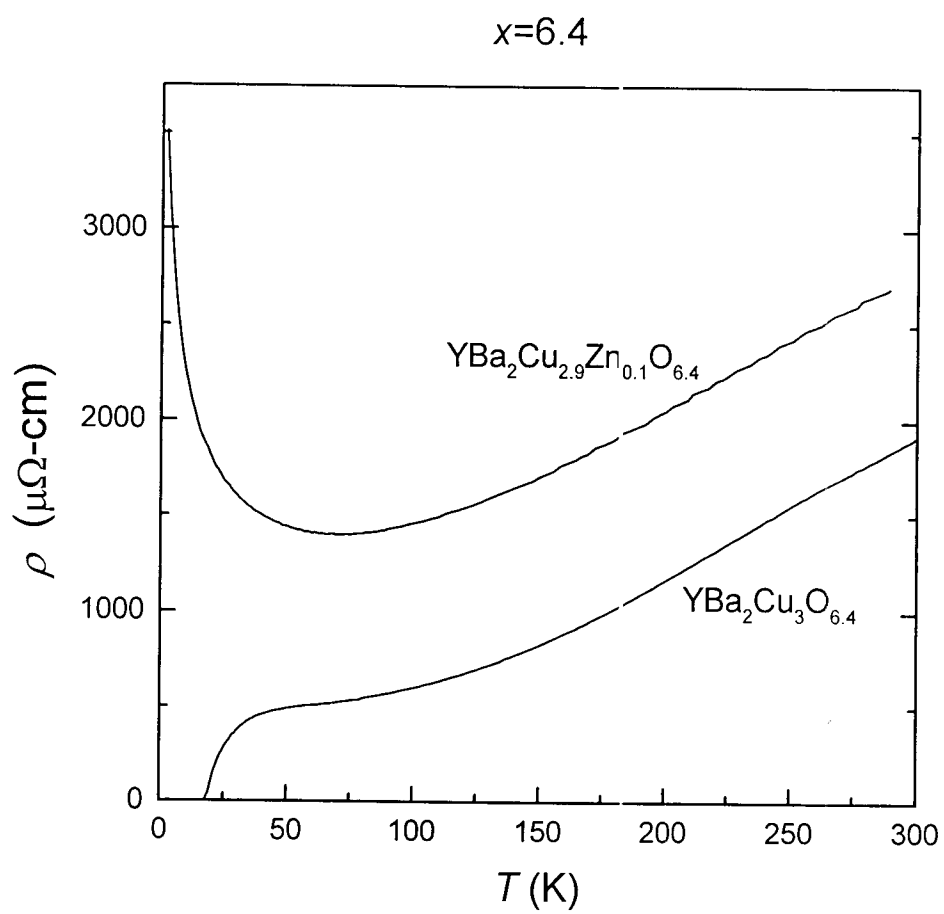


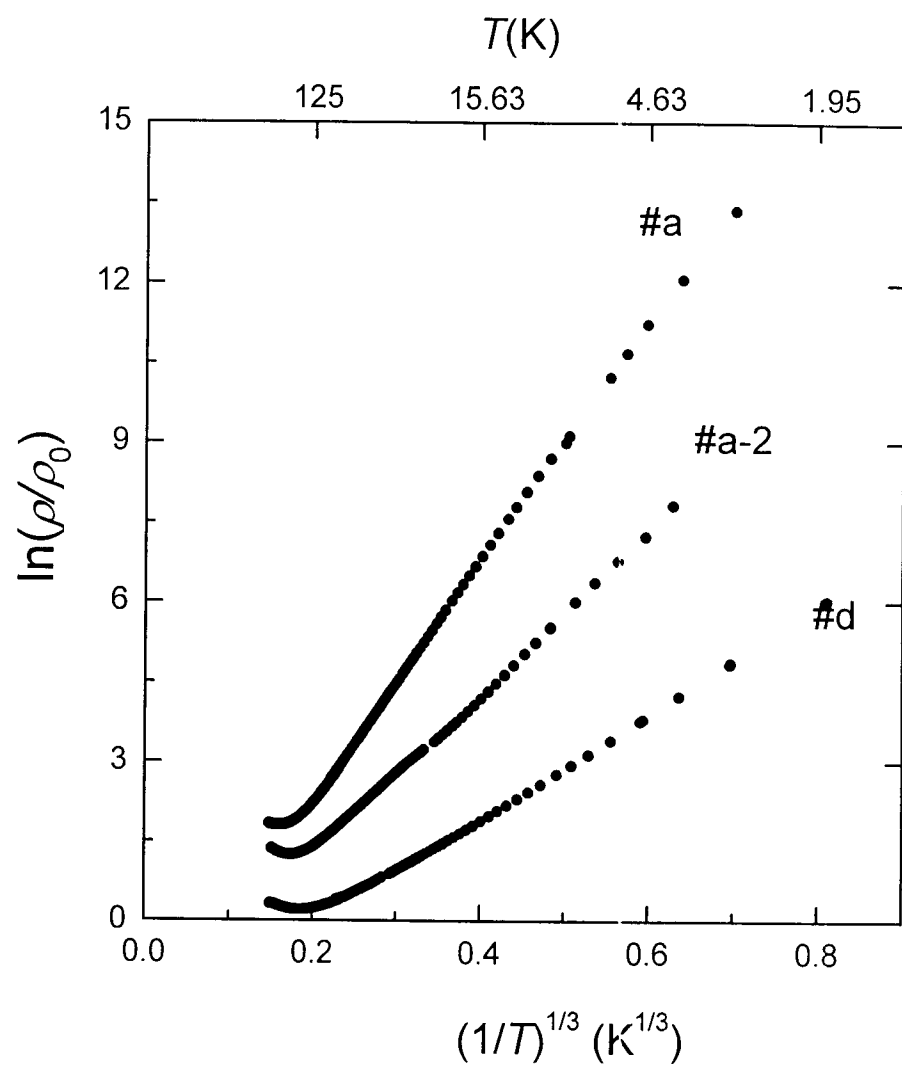
圖 三、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ $x=7, 6.4, 6.3, 6.2, 6.1$ 電阻率圖



圖四、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.9}\text{Zn}_{0.1}\text{O}_7$ 和 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 電阻率圖



圖五、氧含量同為6.4的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ 及 $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.9}\text{Zn}_{0.1}\text{O}_{6.4}$ 電阻率圖



圖六、YBCO氧含量=6.2(#a,#a-2)及摻Zn氧含量=6.3(#d)
電阻率分析圖

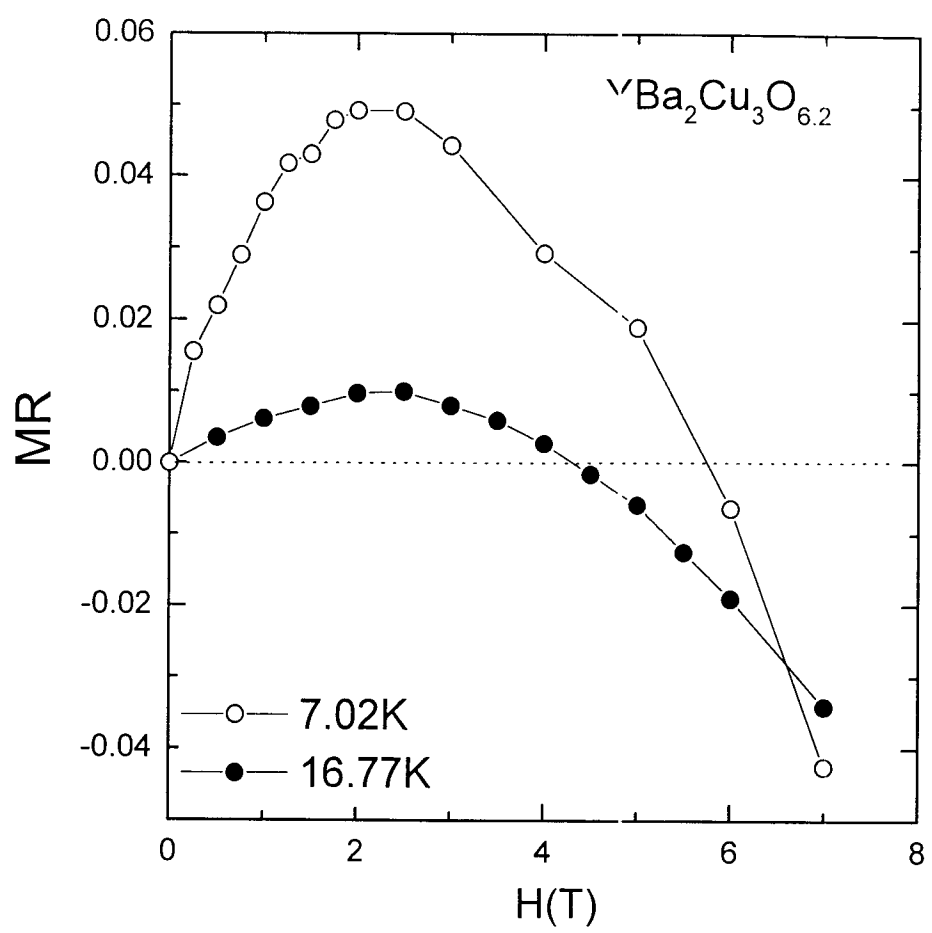


圖 七、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.2}$ (#8)的磁阻

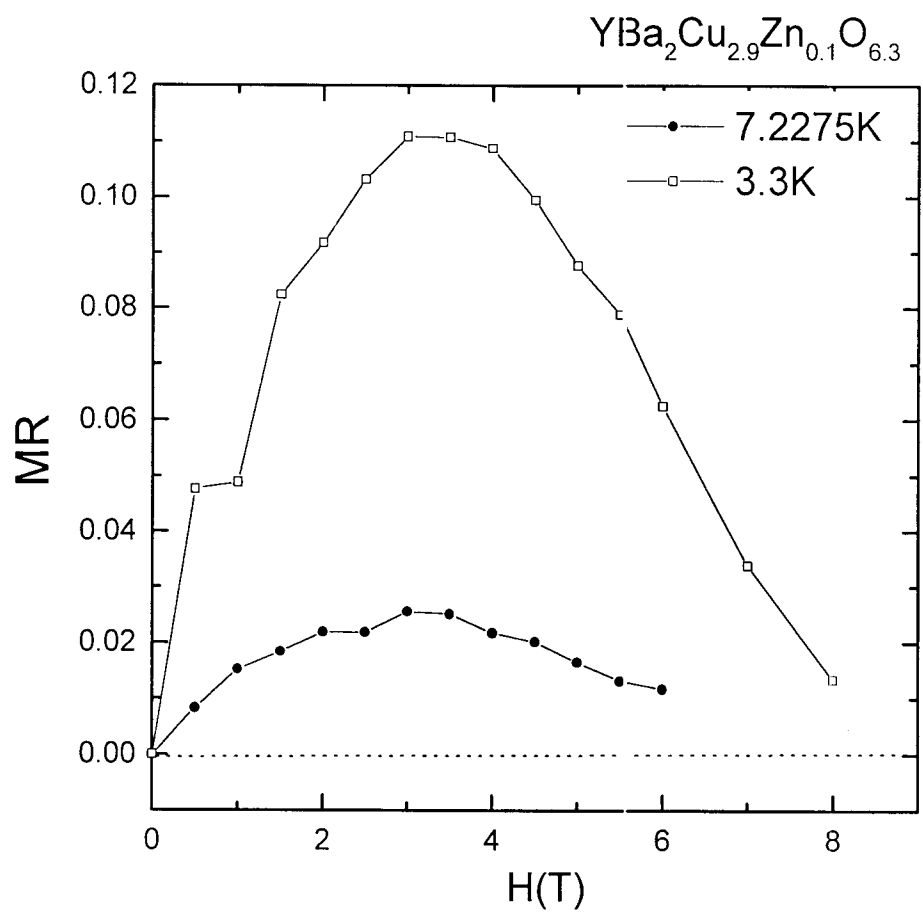


圖 八、4.21 $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.9}\text{Zn}_{0.1}\text{O}_{6.3}$ 的磁阻