

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

高溫超導體之微波性質研究及其元件應用之分析（三）

計畫類別： 個別型計畫 V 整合型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2112 - M - 009 - 028 -

執行期間：88 年 08 月 01 日至 89 年 07 月 31 日

計畫主持人：溫增明 教授

共同主持人：郭義雄 教授

 莊振益 教授

 吳光雄 教授

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

執行單位：國立交通大學電子物理學系

中 華 民 國 89 年 10 月 25 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高溫超導體之微波性質研究及其元件應用之分析 (三)

Study of the microwave properties and applications of High-Tc
superconductors (III)

計畫編號：NSC 89-2112-M-009-028

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：溫增明 國立交通大學電子物理學系

共同主持人：郭義雄 國立交通大學電子物理學系

莊振益 國立交通大學電子物理學系

吳光雄 國立交通大學電子物理學系

計畫參與人員：鄭慧愷 國立交通大學電子物理學系

賴良星 國立交通大學電子物理學系

一、摘要

近來，我們成功地研發在鑷鋁氧(LAO)基板正、反二面蒸鍍上鈮鉕銅氧($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)薄膜的技術，並將其製作成微波超導元件。利用此元件優越的微波特性，成功的開發出高品質的高溫超導之環狀共振器(microstrip ring resonator)，並量測其物理特性。發現在滿氧($\delta = 0.05$)的狀況下，溫度在 77 K 時，樣品的無荷(unloaded)Q 值已達 7500，展現極佳之應用可行性。溫度對倫敦穿透深度之變化 $\Delta\lambda = \lambda(T) - \lambda(5\text{K})$ (London penetration depth)，在 $\delta = 0.05$ 和 0.2 時，隨著溫度升高而呈現線性增加之性質(低溫時)；當缺氧狀態升高時，其 $\Delta\lambda(T)$ 之斜率卻因而升高，此結果可能為超導電荷載子在 underdoped 區域時的非彈性碰撞增加所致。另一方面，從樣品之共振頻率可獲得元件之等效介電常數，並利用此等效介電常數估算出：在 5K 時其 LAO 基板之介電常數為 25.5。

關鍵詞：微波、超導體、鈮鉕銅氧、環形共振器

Abstract

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) superconducting ring resonators with a YBCO ground plane

were successfully fabricated using double-side YBCO films deposited on LaAlO_3 (LAO) substrates. The temperature dependent London penetration depth, $\Delta\lambda = \lambda(T) - \lambda(5\text{K})$, was systematically studied by varying the oxygen content of the same resonator structure. For fully oxygenated case ($\delta = 0.05$), the resonator exhibits a quality factor $Q > 10^4$ at 16 K, and $\Delta\lambda(T)$ displays a linear behavior at lower temperatures. With increasing δ , although $\Delta\lambda$ is still linear in temperature, the slope changes with increasing oxygen deficiency. The results suggest that, in the underdoped regime, the inelastic scattering of charged carriers may become increasingly prominent. From the effective dielectric constant of obtained from the ring resonator the dielectric constant of the LAO substrate was estimated to be $\epsilon_r \approx 25.5$ at 5 K and a frequency of about 3.6 GHz.

Keywords : microwave, superconductor, YBCO, ring resonator

二、緣由與目的

近年來，科學家對於高溫超導體的理論與應用研究方興未艾，主要是高溫超導在材料科學、凝態物理及電子學的領域上

皆具有極大而新穎的挑戰性[1,2]。對基礎研究而言，它可能帶來新物理的衝擊；對應用而言，它可能帶來室溫超導之巨觀的應用。本研究群基於此，乃希望尋一穩定和幾何簡單的電子元件樣品，用來量取精確物理參數外，並且探討此高溫超導元件之可行性應用。依吾人經驗，在高溫超導最重要之三個物理參數為能隙、穿透深度與相干長度。此三個參數提供該系統之超導機制之內涵，一個正確之超導理論必能解釋此參數與能態密度(density of state)之關係以及能隙與後兩者長度之關係，進而提供它們與溫度之關係。

微條線型(Microstrip line)是微波元件中最常被應用的一種形式，我們使用環形共振器研究高溫超導體之微波物理特性，它較傳統的線形共振器在幾何上擁有最佳的效應，並且減少由邊際效應所造成的損耗，以致能獲得最精準的實驗結果[3]。

在過去的研究中，我們成功的研製出在鑷鋁氧(LaAlO₃)基板雙面蒸鍍 YBCO 薄膜，並將其刻畫成為具有簡單幾何圖形之環形微波元件。倘若樣品之材質具有理想之磊晶狀，依吾人經驗(由 Q 質量測裡)在此結構則所有注入外場皆在沒有外溢下能圍限於樣品內。所以，能測量分析其在低溫下之正確微波物理性質。吾人發現，當溫度在 77 K 時，其無荷之 Q 值可高至 7500 單位以上，較傳統的 YBCO – LAO – Au 共振器之 Q 值提升了一個數量級[3-6]。進一步，由於改善了元件雙面性能的差異性，更加深了微波研究量測穿透深度之準確度。因而，在最佳氧條件下，發現其 $\Delta\lambda(T) = \lambda(T) - \lambda(5K)$ 可隨著溫度升高而作線性的增加[3-6]，此隨溫度作線性增加的性質乃與理論 d-wave pairing 機制所預言者相符[7,8]。若利用此理論則知在低溫時 $\Delta\lambda$ 對溫度的關係，可知

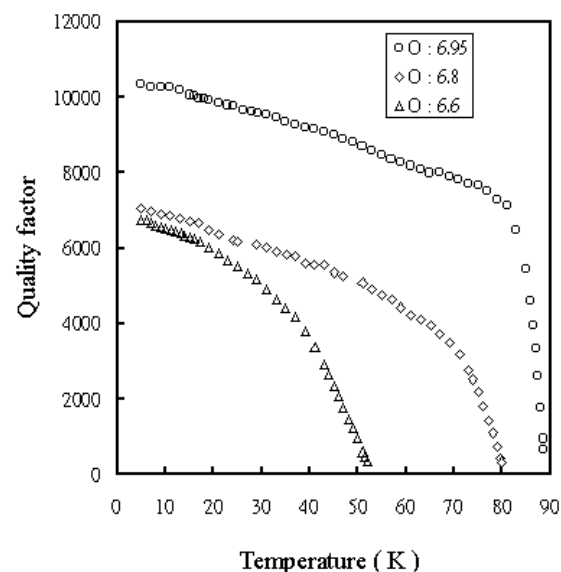
$$\Delta\lambda(T) = \lambda(0) [\ln 2 / \Delta] T \quad (1)$$

此時，即可計算出 YBCO 樣品在滿氧情形下之 d-wave 能隙。此能隙可與在 STM 工作所獲得之結果兩相比較。因此，藉由 STM 技術與

磁場穿透深度對溫度的相依性所獲得之能隙，用以驗證理論之高溫超導機制或作為理論研究者參考。為達此目的，吾人將對 YBCO 樣品中的氧含量(從 overdoping 到 underdoping) 做一系列 λ 之微波量測。

三、結果與討論

圖一、為 $\delta = 0.05$ 、0.2 和 0.4 時之無荷(unloaded)品質因子對溫度之關係圖。在滿氧($\delta = 0.05$)狀況下，溫度在 77 K 時，樣品的無荷(unloaded)Q 值已達 7500，展現極佳之應用可行性。當我們將樣品缺氧時，其無荷品質因子馬上下降 30 %。



圖一、 $\delta = 0.05$ 、0.2 和 0.4 之 YBCO 樣品無荷品質因子 Q 對溫度之關係

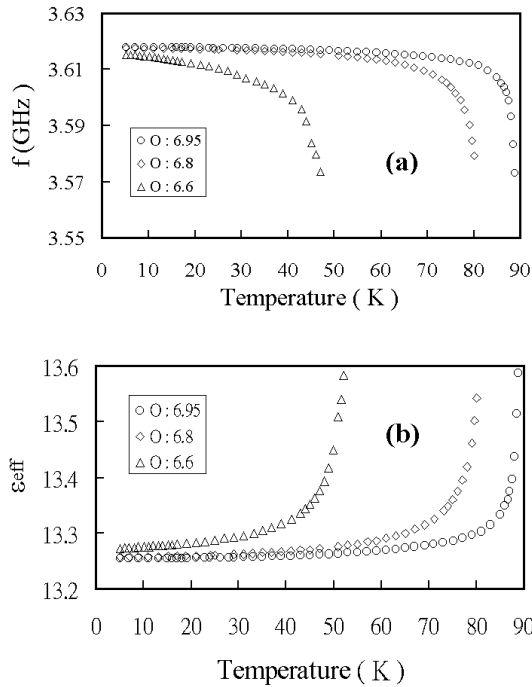
圖二(a)、為 $\delta = 0.05$ 、0.2 和 0.4 時之共振頻率與溫度之關係圖。YBCO 樣品之共振頻率隨溫度的變化，主要因為溫度的升高造成樣品的等效電感下降所致；當溫度接近臨界溫度時，超導電子對受到溫度的破壞變的更加劇烈，造成其共振頻率在臨界溫度附近迅速地下降。另外利用元件的共振頻率對溫度的關係，可以用來探討其等效介電常數對溫度的關係。因為在共振模式時，高溫超導之環狀共振器之場分布趨近於 quasi-TEM 模式[9,10]。假設此共

振器存在 Z 方向之電場，則其 Maxwell's 方程式可表示為：

$$\begin{aligned} E_z &= [AJ_n(kr) + BN_n(kr)]\cos(nw), \\ H_r &= \left(\frac{n}{jS_{-0}r}\right)[AJ_n(kr) + BN_n(kr)]\sin(nw), \\ H_w &= \left(\frac{k}{jS_{-0}}\right)[AJ_n(kr) + BN_n(kr)]\cos(nw), \end{aligned} \quad (2)$$

$k = \sqrt{V_0 V_{eff}} \sim 0$ 為波數， J_n 、 N_n 、 J'_n 和 N'_n 分別為 Bessel 方程式第一類、第二類及其微分之形式。將邊界條件帶入(2)式中，可獲得其解為

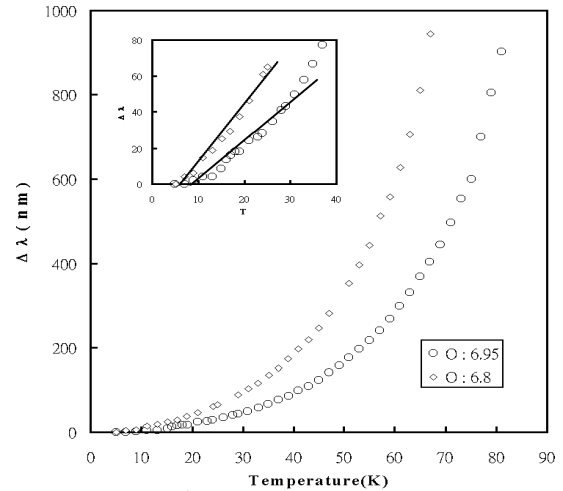
$$\frac{J'_n(kr_i)}{J'_n(kr_o)} - \frac{N'_n(kr_i)}{N'_n(kr_o)} = 0, \quad (3)$$



圖二、(a)為 $\delta = 0.05$ 、0.2 和 0.4 時之共振頻率與溫度之關係圖。(b)為 $\delta = 0.05$ 、0.2 和 0.4 時之等效介電常數與溫度之關係圖。

r_i 和 r_o 分別為圓之內、外半徑。考慮 Meissner 效應可知在超導態時，其電流分佈僅止於圓之外半徑，所以可忽略圓之寬度而獲得(3)式中的解 $2\pi r_o \cong n\lambda_g$ 。這裡 λ_g 和 n 分別為超導環狀共振器內之共振波長

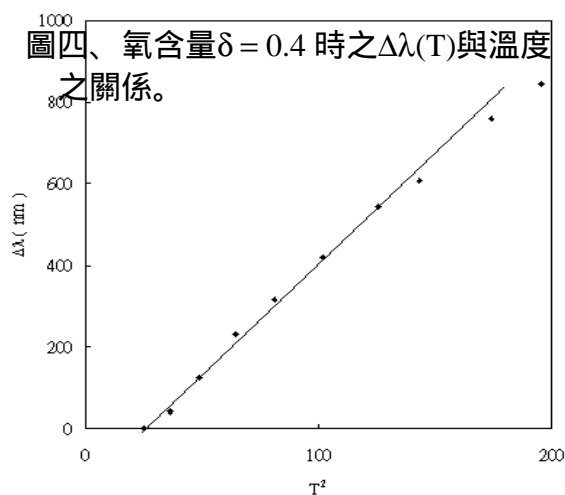
及任意正整數。因此可利用此環狀共振器簡單獲得元件之等效介電常數： $\epsilon_{eff}(T) \cong [c/2\pi r_o f(T)]^2$ ，利用此關係估算出在 5K 時其等效介電常數為大約 13.25。圖二(b) 為 $\delta = 0.05$ 、0.2 和 0.4 時之等效介電常數與溫度之關係圖。有了等效介電常數與溫度之關係我們可利用 $\epsilon_r(T) \cong 2\epsilon_{eff}(T)-1$ 進一步獲得 5K 時其 LAO 基板之介電常數為 25.5 [11]。由圖三中發現在低溫時，缺氧的 YBCO 樣品之共振頻率和等效介電常數隨溫度變化很小。



圖三、不同氧含量 $\delta = 0.05$ 和 0.2 時之 $\Delta\lambda(T)$ 與溫度之關係。

樣品的表面阻抗可表示為 $Z_s = R_s + iX_s$ ，在超導態時， $X_s \gg R_s$ ，樣品之穿透深度可由 $\Delta\lambda(T) = \Delta X_s(T)/\mu_0\omega = 2\Gamma\Delta f/f$ 之關係所決定。圖三 為不同氧含量 $\delta = 0.05$ 和 0.2 時之 $\Delta\lambda(T) = \lambda(T) - \lambda(5K)$ 與溫度之關係。在低溫且 $\delta = 0.05$ 時， $\Delta\lambda(T)$ 隨著溫度升高而作線性的增加（低溫時），此結果暗示 d-wave pairing 機制的能隙參數之 line node 可以作線性的增加。進一步將樣品缺氧，瞭解在缺氧狀況下的物理性質。在 $\delta = 0.2$ 時，其 $\Delta\lambda(T)$ 斜率會增加且低溫時仍是維持著溫度升高而呈現線性增加的性質。另一方面在 $\delta = 0.4$ 時（圖四），其 $\Delta\lambda(T)$ 隨溫度變化不再維持著線性增加，而呈現與溫度的二次方成正比之現象，此可能是因為缺氧增強載子(carriers)的非彈性碰撞(inelastic scattering)，造成超導電子對的減少所致

[14]。



四、成果自評

承蒙國科會的支持，本實驗室利用低溫微波量測系統，量測超導體之環形共振器之微波物理性質。由於我們改善了元件雙面性能的差異性，降低元件損耗，提升了微波研究之準確度。因而發現在 $\delta = 0.05$ 和 0.2 時， $\Delta\lambda(T)$ 可隨著溫度升高而作線性的增加，此隨溫度作線性增加的性質乃與理論d-wave pairing機制所預言。提供給理論研究者，驗證高溫超導機制理論。

總之，我們希望能由實驗中瞭解高溫超導系統之超導機制。就應用而言，吾人發現當於環上刻有完全秩序之隙縫時，可調變共振頻率，但仍可維持同樣Q值。此效應與缺氧之微小隨機缺陷又有何差異，這是一個非常有趣而待解釋之問題。

五、參考文獻

1. J. Gallop, "Microwave application of high-temperature Superconductors", Supercond. Sci. Technol. **10**, A120 (1997).
2. M. J. Lancaster, "Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors", Cambridge University Press, Cambridge, (1997), Chap. 5.
3. H. K. Zeng, K. H. Wu, J. Y. Juang, T. M. Uen, and Y. S. Gou, Physica B, **284-288**, (2000) 2079.
4. H. K. Zeng, J. Y. Juang, K. H. Wu, T. M. Uen, and Y. S. Gou, "Temperature Dependence of the Penetration Depth in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Measured by Microwave Ring Resonators", (accepted by Physica C).
5. H. K. Zeng, J. Y. Juang, J. Y. Lin, K. H. Wu, T. M. Uen, and Y. S. Gou, accepted by Physica C, September, 2000.
6. H. K. Zeng, Y. S. Gou, J. Y. Juang, K. H. Wu, and T. M. Uen, Physica B, "Effects of Split Gap on the Microwave Properties of YBCO Microstrip Ring Resonator", (accepted by Physica C).
7. J. Annett, N. Goldenfeld, and S. R. Renn, Phys. Rev. B **43**, 2778 (1991).
8. W. N. Hardy, D. A. Bonn, D. C. Morgan, R. Liang, and K. Zhang, Phys. Rev. Lett. **70**, 3999 (1993).
9. I. Wolfe, and E. Andersen, Electron. Lett. **7** (1971) 779.
10. I. Wolfe, Electron. Lett. **8** (1972) 302.
11. David M. Pozar, "Microwave Engineering", edited by John Wiley & Sons, USA, (1998) 162.
12. E. Farber, J. P. Contour, and G. Deutscher, Physica C **317-318** (1999) 550.
13. J. T. Hall, L. B. Holdeman, and R. J. Soulen, Phys. Rev. Lett. **45** (1980) 1011.
14. W. Y. Liang, J. Phys. Condensed Matt. **10** (1998) 11365.