

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 Study of the microwave properties and applications of High-T_c superconductors

計畫編號：NSC 88-2112-M-009-018

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：溫增明 國立交通大學電子物理學系

一、摘要

我們成功地在鋁酸釷 (LAO) 基板的雙面，蒸鍍出高品質的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 薄膜，並將其刻畫成環形共振器。在微波量測上，雙面 YBCO 樣品較傳統單面 YBCO (背面黃金) 之樣品顯現出較高的品質因子 Q。在溫度 77 K 時，雙面 YBCO 樣品的無荷 (unloaded) Q 值已達 7500，展現極佳之應用可行性。此外，從分析表面電阻 $R_s(T)$ 及電抗 $X_s(T)$ 對溫度的關係中，發現其倫敦穿透深度之變化 $\Delta\lambda = \lambda(T) - \lambda(5K)$ (London penetration depth) 對溫度的關係，存在著線性增加的特性。這結果與科學家們針對高溫超導體單晶之穿透深度的研究幾乎是一致的，但我們的 YBCO 樣品，可以在較高的溫度 ($\sim T_c$)，依舊保持著線性增加的性質，一般相信 $\Delta\lambda$ 隨溫度作線性增加乃為 d-wave pairing 超導體的特性 [1, 2]。

關鍵詞：微波、超導體、鈮鋇銅氧、環形共振器

Abstract

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) superconducting ring resonators with YBCO ground plane were fabricated. The resonators exhibits a high quality ($Q > 10^4$) at 16K, indicating high potential for applications. In addition, from the analyses of the surface resistance $R_s(T)$ and reactance $X_s(T)$, it was found that the derived London penetration depth $\Delta\lambda = \lambda(T) - \lambda(5K)$ displays a linear behavior over a

wide range of temperatures. The results suggest that the distinct line nodes feature in the gap function of a d-wave pairing superconductor may extend to temperatures higher than previously reported [1, 2].

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，主要是因為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的挑戰性。事實上，高溫超導體在電子學的應用終將為人類生活帶來革命性的突破。例如，被動微波元件 (passive microwave devices) 已經在人造衛星通訊技術上被採用 [3]。

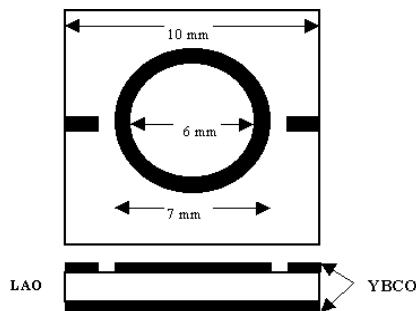
Microstrip line 是高溫超導體之微波元件中最常被應用的一種形式。我們使用環形共振器量測其微波物理特性之主要原因，是它較傳統的線形共振器擁有較好的幾何效應，可以減少元件損耗造成的誤差，獲得較好的實驗結果。在我們的研究中發現鍍有雙面 YBCO 薄膜的環形共振器，擁有較低的插入損耗 (insertion loss) 及較高的品質因子，這結果將有助於提高實驗之精準度，獲得較佳之微波特性及其物理參數，用於組件設計之用。

有了以上的研究，除了可將其應用於製造簡單的微波共振元件之外，也可以更進一步地研製較為複雜的組件。例如：在

環形共振器上增加一個電容器以改變整體的有效長度，因而造成其共振頻率的改變；或在環形共振器配上一放大器，使其成為一可調式的放大器；或與電晶體結合成為一振盪器。我們希望以高溫超導材料在微波特性方面的優越性來提升目前金屬微波元件材料的效能。

三、結果與討論

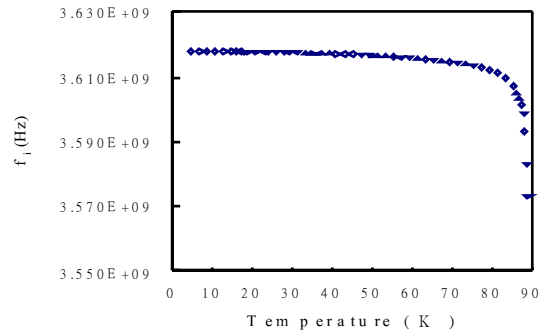
本報告主要針對 YBCO 之環形共振器 (圖一.) 的微波性質作一概要的敘述。在微波量測上，環形共振器的幾何效應較傳統的線形共振器好，其可以減少損耗獲得較準確的實驗結果。本共振器由 YBCO - LaAlO₃ - YBCO 所組成，其中 YBCO 之厚度為 500 nm， $T_c = 90\text{ K}$ ；底層 YBCO 為接地 (ground) 用，其厚度需大於穿透深度 λ 。



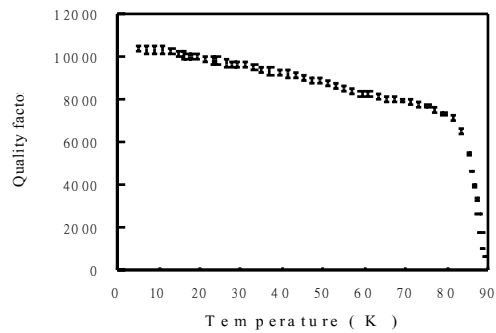
圖一. 微波環形共振器。

圖二. 為共振頻率與溫度之關係圖。在低溫時，YBCO 樣品之共振頻率的改變，主要由於溫度的變化改變了樣品的等效電感，因而造成樣品的共振頻率緩慢的下降；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。圖三. 為樣品之無荷品質因子 Q 對溫度的變化。其中 Q 由 YBCO 樣品之穿透係數 (S_{21})、共振頻率及半高寬所決定，其關係式為 $Q = f_1(T)/\Delta f(1-S_{21})$ 。當溫度低於 16 K 時，其無荷之 Q 值可高達 10^4 單位以上。在溫度低於 80 K 時， Q 值是隨著溫度升高而作線性的減少；當樣品接近於 T_c 時，因為 Δf 迅速變

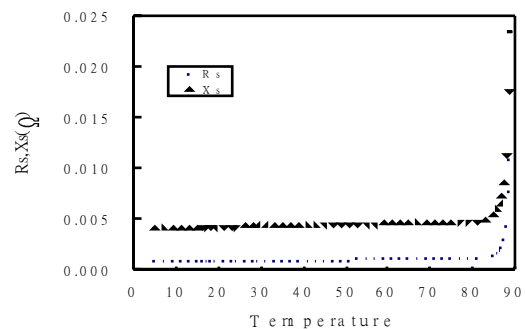
寬、 S_{21} 迅速變小，形成 Q 值急遽地下降，緊接著樣品會由超導態回復到正常態。



圖二. YBCO 樣品之共振頻率與溫度關係。



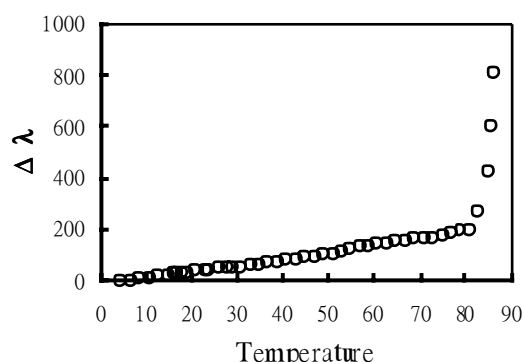
圖三. YBCO 樣品之無荷品質因子 Q 對溫度之關係。



圖四. YBCO 樣品之 R_s 與 X_s 與溫度之關係。

樣品的表面阻抗 $Z_s = R_s + iX_s$ ，其中 $R_s = \Gamma_s Q_T$ 、 $X_s = 2\Gamma_s \Delta f / f_i$ ，而 Γ_s 為樣品的幾何因子，其與樣品的幾何形狀有關，在這裡 $\Gamma_s \approx \pi \mu_0 d f_i$ ， d 為基板之厚度[4]。在圖四中，當溫度低於 80 K 時， R_s 和 X_s 是隨著溫度升高而緩慢的線性增加。在共振頻率為 3.6 GHz 時，其溫度為 5 K 和 77 K 時的 R_s 分別為 0.689 mΩ 和 0.951 mΩ。

在超導態時， $X_s \ll R_s$ ，樣品之穿透深度可由 $\lambda(T) = X_s(T) / \mu_0 \omega$ 之關係所決定。圖五為 $\Delta\lambda = \lambda(T) - \lambda(5K)$ 與溫度之關係。由圖中可發現 $\Delta\lambda(T)$ 隨著溫度升高而作線性的增加，其斜率為 2.1 Å/K 此特性乃是 d-wave pairing 機制所造成，這結果與科學家們針對 YBCO 單晶之穿透深度的研究結果幾乎是一致的；唯一不同地是我們的樣品在較高的溫度 ($\sim T_c$) 仍保持著線性增加的性質。



圖五. $\Delta\lambda = \lambda(T) - \lambda(T_0)$ 與溫度之關係，此時 $T_0 = 5 K$ 。

四、成果自評

承蒙國科會的支持，我們得以建立一套可以在液態氦溫度下工作之低溫微波量測系統，緊接著我們利用此一儀器研究低溫下銅氧化物超導體之環形共振器之微波物理性質。我們應用其在幾何效應上優於傳統的線形共振器的特性，降低元件損耗，獲得較好之實驗結果。

在過去的研究中，我們成功的研製出在 LAO 基板雙面蒸鍍 YBCO 薄膜，並將

其刻畫成為環形微波元件，用以測量分析其在低溫下之微波物理性質。當溫度低於 16 K 時，其無荷之 Q 值可高至 10^4 單位以上，較傳統的 YBCO-LaAlO₃-Au 共振器之 Q 值提升了一個數量級。由於我們改善了元件雙面性能的差異性，提升了微波研究之準確度。因而，更進一步地發現其 $\Delta\lambda(T)$ 可隨著溫度升高而作線性的增加直到溫度接近 T_c [5]，才因為熱擾動 (thermal fluctuations) 而改變原有物理行為，此隨溫度作線性增加的性質乃是 d-wave pairing 機制所造成。

五、參考文獻

1. W. N. Hardy, D. A. Bonn, D. C. Morgan, R. Liang, and K. Zhang, Phys. Rev. Lett. **70**, 3999 (1993).
2. J. Annett, N. Goldenfeld, and S. R. Renn, Phys. Rev. B **43**, 2778 (1991).
3. J. Gallop, "Microwave application of high-temperature Superconductors", Supercond. Sci. Technol. **10**, A120 (1997).
4. M. R. Trunin, Physics-Uspokhi **41**, 843 (1998).
5. H. K. Zeng, K. H. Wu, J. Y. Juang, T. M. Uen and Y. S. Gou, "High-Q YBa₂Cu₃O_{7-δ} microwave ring oscillators", (accepted by Physica B).