

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 87-2112-M-009-025

執行期限：86年8月1日至87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

本文主要探討如何利用微波量測鈮銀銅氧高溫超導微波微帶線之品質因數，而瞭解其表面電阻損耗隨溫度變化的情形。實驗方面，包括雷射蒸鍍薄膜的技術、製作微帶線元件的技術、元件的補氧技術和微波量測等。理論方面，以二流體理論說明微波損耗隨溫度變化的關係。最重要的，由實驗分析，吾人得知在不同膜厚溫度高於0.85 T_c時，薄膜厚度愈小的元件，其表面電阻較大。換言之，其有效穿透深度 λ_{eff} 值隨薄膜愈小而愈大，這個推論與我們計算之 $\lambda_{eff}(0)$ 的趨勢是一致的。這對將來分析超導體的穿透深度之研究提供一個重要的有效參數。在溫度小於0.85 T_c時，表面電阻趨近常數，與膜厚無關。除此之外，我們也利用此量測技術得知製作最佳品質薄膜的雷射蒸鍍條件。

關鍵詞：微波、超導體、鈮銀銅氧

Abstract

The YBCO high-T_c superconducting microstrip lines have been fabricated and its quality factor (Q) is measured by Microwave Network Analyzer. It allows us to find out how their surface resistance changes with temperatures. There are two aspects in our work. On the one hand, detailed descriptions of the pulse laser deposition (PLD) technology, fabrication of microstrip lines, oxygen supplement system, microwave measurements... etc have been presented,

respectively. On the other hand, the mechanism of microwave surface losses change with temperatures in accord with the assumption of two-fluid model has been demonstrated theoretically. In particular, according to our data, we conclude that the thinner the films, the larger the surface resistance when the temperature is higher than 0.85 T_c. It also gives a justification of the thickness dependence of the effective penetration depth λ_{eff} , which increases with decreasing thickness of thin films. The result is consistent with the other's calculation and prediction of $\lambda_{eff}(0)$. When the temperature is lower than 0.85 T_c, the surface resistance will approach to a constant and is independent of the thickness of thin films. As a result, it provides an important clue to uncover the nature of the penetration depth in high T_c superconductors directly.

Keywords : microwave, superconductor, YBCO

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，這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。舉例言之，最近微波被動元件已經在人造衛星通訊技術上被採用。

就如同一般所知，超導體擁有在零電壓下具有超導電流(零電阻)的特性。但是，在溫度不等於絕對零度時，在超導體內部仍然有許多非超導態的正常電子。在此情形下，如有任何電場皆會引起這些正常電子與周遭環境的碰撞，而產生焦耳損耗。因此我們可利用瞭解超導薄膜微波表面電阻(surface resistance; R_s)用以決定超導薄膜的品質。事實上，雷射蒸鍍的高溫超導薄膜，其品質的良否可由蒸鍍溫度、壓力、厚度、基板等條件予以決定。另一方面，如果能夠使這些表面損耗明顯地小於一般金屬導體的損耗，必能明顯改善微波被動元件的輸送性能^{1,2}。故本論文主要目的乃在找尋在同一蒸鍍的最佳條件下(超導電流密度值為最高)，具有最低表面損耗功率的厚度與操作時的溫度。

當注入的電磁波強度維持不變，則由於表面電阻與其正常態電流密度的平方之乘積(表面損耗)與微波元件共振品質因數(quality factor; Q)成反比(見後文討論)，所以在本研究裡將以直接量測 Q 值來決定表面損耗功率的物理量。

三、結果與討論

(一) 電阻量測

量測電阻與溫度的特性關係，如圖 1。由圖中可看出在不同厚度(1495 Å、1900 Å、2831 Å、3580 Å 和 7600 Å)的 YBCO 薄膜，由高溫趨近臨界溫度時，其電阻與溫度皆呈現良好的線性關係，可稱為處於金屬態。當溫度降到 100 K 附近時，因受熱干擾的影響，電阻開始偏離線性關係線並急遽下降，而到 92K 附近時，會急遽下降至電阻為零的狀態。這種現象是因為熱干擾與超導結構維度隨溫度改變所造成。由此得知這些樣品都具有極高且幾乎相同的臨界溫度($T_c \sim 90$ K)。

除了電性分析外，更進一步利用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy; SEM)來觀察薄膜表面的顯微結構。由不同厚度的鈮鉕銅氧超導薄膜所拍攝的表面影像，我們可以發現這五個不

同厚度的薄膜表面相當的平整。雖然，在表面上仍有一些顆粒的現象，這是因為使用準分子雷射蒸鍍薄膜時很難避免的。但是，由於我們採用高密度的靶材(密度為 95% 以上)，已使得這種情形大大的改善。

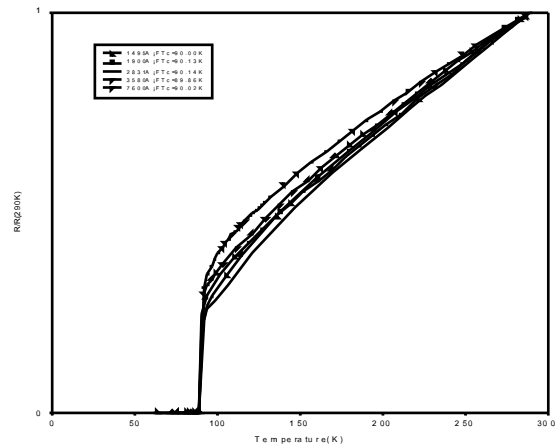


圖 1 在 LAO 基板上製備不同厚度 YBCO 薄膜之電阻與溫度關係圖

在製作 YBCO 超導微波元件的過程時，例如在蝕刻過程中，會使薄膜的氧含量降低，這樣會改變原來薄膜元件的性質，進而會影響我們之後由 Q 值判定表面電阻的正確性。為恢復原來薄膜的品質，我們均小心地作補氧的處理，以致所有不同薄膜元件除厚度差異外均保有相同的條件。

(二) 微波量測

由式子

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (1)$$

(其中 Δf 為共振頻率 f_0 的半高頻寬)及所量得的微帶線共振器穿透系數 S_{21} 對頻率的關係，吾人可以很快地求得在某個溫度下的品質因數 Q 。在高頻交流電磁場中，高溫超導薄膜的微波元件會產生焦耳熱損耗。而 $1/Q$ 可反應出損耗之大小。圖 2 表示在雷射蒸鍍的條件下，在 LAO 基板上成長五種不同厚度 YBCO 超導薄膜的微波品質因數之倒數($1/Q_0$)對溫度(T/T_c)的關係圖。因為這些薄膜為結構均勻、臨界溫度相同，由此推論，當電磁波注入到薄膜表

面時應該具有相同的物理性質。在等強度的電磁波下，品質因數的倒數與表面電阻成正比。下面我們將依溫度 $T/T_c \sim 0.85$ 為指標劃分為二個上下溫度區間來討論表面電阻隨溫度變化的關係。

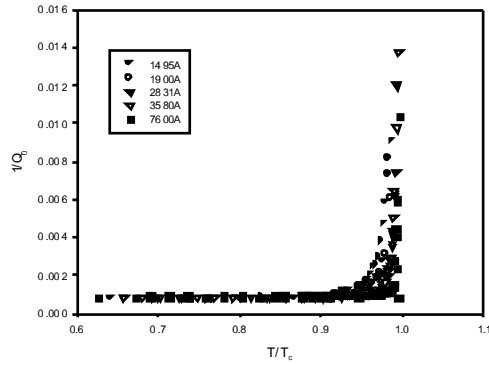


圖 2 不同厚度之 YBCO 超導薄膜元件的微波損耗對溫度

(A) $T > 0.85 T_c$

由圖 2 中可以看出在低溫 ($T/T_c \sim 0.85$) 時，微波表面損耗 $1/Q_0$ 為一很小的定值 (< 0.001)。然而在愈接近臨界溫度 T_c 時，微波表面損耗 $1/Q_0$ 會突然地增加很快。這種現象我們的解釋如下：

依據二流體理論，可以很快地得知，當溫度升高時，超導體內的正常電子的數目因超導配對逐漸被破壞而增多。它們的關係為

$$\frac{n_n}{n} = \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \quad (2)$$

而穿透深度 λ

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4}} \quad (3)$$

也隨著溫度的升高而增大。

由式子

$$\begin{aligned} Z_s &= \frac{\omega^2 \mu_0^2 \lambda^3 n_n \sigma_n}{2n} + i\omega\mu_0\lambda \\ &= R_s + i\omega L_s \end{aligned} \quad (4)$$

表面電阻與正常電子數成正比，與穿透深

度的三次方成正比。因此，這也就是在 T_c 附近的 $1/Q$ (相當於表面電阻) 隨溫度升高會急遽增大的原由。

而當低溫時，在相同的測量條件 (同溫、等微波功率) 下，由 (4) 式可得知，影響 R_s 的主要因素為 σ_n ，由圖 2 可得知所有的樣品，其 σ_n 值幾乎是一致的。根據這樣的推論，我們可說在 T 接近 T_c 時， R_s 的行為主要是受到 λ_{eff} 的影響。由圖 2 我們可觀察到薄膜愈薄，其損耗愈大，換言之，其 λ_{eff} 值隨薄膜愈小而愈大。這個推論與我們計算之 $\lambda_{eff}(0)$ 的趨勢是一致的。

根據二流體模型分析³，不同厚度的 YBCO 超導薄膜在絕對零度時的有效穿透深度 $\lambda_{eff}(0)$ ，其結果如圖 3 所示， $\lambda_{eff}(0)$ 值隨著薄膜減少而逐漸增加。

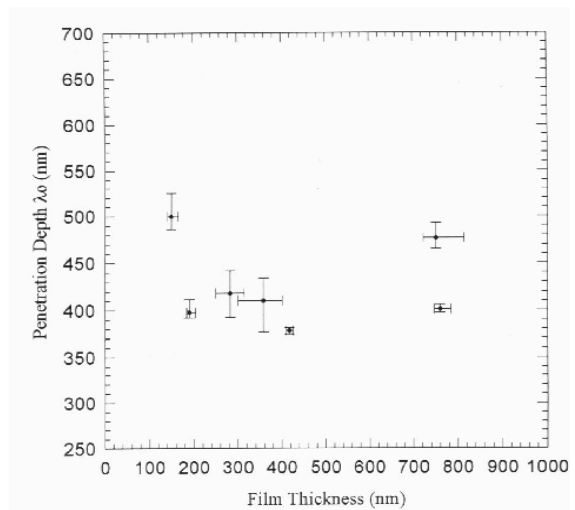


圖 3 不同厚度 YBCO 超導薄膜的有效穿透深度

(B) $T < 0.85 T_c$

表 1 列出了在圖 2 及圖 3 中各種不同厚度微波元件的膜厚 (d) 與有效穿透深度 (λ_{eff}) 的比率，由二流體理論 ((2) 式) 可以算出在 77 K 時的有效穿透深度。表中同時列出了在 77 K 時，不同厚度間的微波表面損耗值 ($1/Q_0$)。由表中可以看出，不同厚度間的微波表面損耗值 ($1/Q_0$) 並沒有隨著元件膜厚與有效穿透深度的比率 ($d/\lambda_{eff}(77\text{ K})$) 增加而作規則的變化。在溫度為 77 K 時，可以清楚地看出當薄膜厚度為 1495 Å 時，微波元件有最小品質因數的倒數值

$1/Q_0 = 7.44 \times 10^{-4}$ 。雖然這意謂著在此膜厚的微波元件，其微波表面損耗為最小。但是，由於相差無幾，所以我們認為表面損耗在低溫時是與膜厚沒有明顯的關係。在這個溫度範圍下，不同樣品的表面損耗幾乎是一致的，而看不出厚度的效應。這與 T. Kuhlemann 和 J. H. Hinken 直接量取表面電阻的工作所得的結論⁴是一樣的。同時，這更進一步證明了我們所製作的元件樣品具有很高的品質均勻性。這個條件更有力地強調任何性質的差異是由厚度效應所產生的。

四、成果自評

本計畫承蒙國科會的支持，得以建立一套可以在液態氮溫度下工作的低溫微波量測系統。緊接著我們將在下一年度的計畫中，利用本儀器繼續研究銅氧化物超導體之薄膜共振器在更低溫度的下的微波物理性質研究。

本年度我們先量測在液態氮溫度下工作的相關實驗。我們利用微帶線型共振器量測共振頻率與溫度的關係，獲得磁場穿透深度 λ_0 約為 4900 Å，這結果與利用 Anderson 的層間偶合理論所計算之 c 軸方

向的 $\lambda_{0,c}$ 結果~4200 Å 非常接近⁵。因此，我們將更進一步量測更低溫度的共振頻率與溫度的關係，冀能求得更精確之實驗結果。

五、參考文獻

1. T. P. Orlando and K. A. Deiin, "Foundations of Applied Superconductivity", Addison-Wesley (1991).
2. T. Van Duzer and T. W. Turner, "Principles of Superconductive Devices and Circuits", Elsevier, NY (1981).
3. M. C. Hsieh, T. Y. Tseng, S. M. Wei, C. M. Fu, K. H. Wu, J. Y. Juang, T. M. Uen, and Y. S. Gou, Chinese J. Phys. 34, 2-II, 606(1996).
4. T. Kuhlemann, J. H. Hinken, IEEE Trans. Magn. 27, 2, 872(1991).
5. 謝明志博士論文，交大電子研究所 (1998)

thickness(d)	1495 Å	1900 Å	2831 Å	3580 Å	7600 Å
T_c	90.00 K	90.13 K	90.14 K	89.86 K	90.02 K
$\lambda_{eff}(0K)$	4996 Å	3976 Å	4285 Å	4103 Å	4043 Å
$\frac{d}{\lambda_{eff}(0K)}$	0.299	0.478	0.661	0.873	1.880
$\lambda_{eff}(77K)$	7331 Å	5815 Å	6280 Å	6062 Å	5949 Å
$\frac{d}{\lambda_{eff}(77K)}$	0.204	0.327	0.451	0.591	1.278
$\frac{1}{Q_0}(77K)$	7.44×10^{-4}	8.28×10^{-4}	9.00×10^{-4}	8.81×10^{-4}	8.37×10^{-4}

表 1 不同厚度高溫超導薄膜微波元件的表面損耗關係