

# 高溫超導環型微條微波元件之應用

郭義雄 鄭慧愷

國立交通大學電子物理所

E-mail: [ysgou@cc.nctu.edu.tw](mailto:ysgou@cc.nctu.edu.tw)

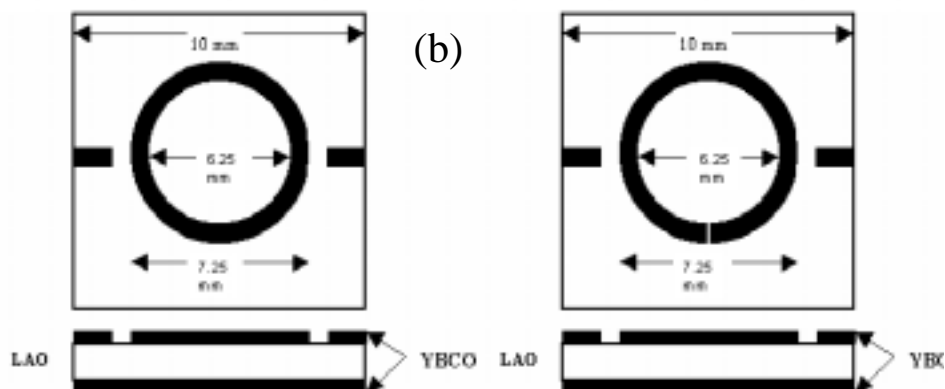
在應用電子學裡，超導微波元件乃是為科學家所欲追求可用以替代現今金屬或半導體材料為主之器件。主要乃根據超導體本身在微波區間裡所具有之低損耗之功能。藉此功能，因而導致形體為更小者。換言之，在現今普遍適用的積體電路製作考量過程裡，一個形體愈小而擁有更低噪音之器件，且尚具價廉者，這是商業上，也是科學家與工程學家共同追求的目標。如今，高溫超導其  $T_c$  已可高達 100 多度 K 時，在價格上因液氮之昂貴與稀有性已被液氮所取代。在控溫技術所耗損之價錢，據估計必可降至一般可大型應用之水準。事實上，由於現今傳統一般微波系統已具相當完善之水平，縱使高溫超導微波器件具有更高形體與功率操作之優越性。在基於成本考量上，整套昂貴通訊系統(高達數億元)之更新，仍尚有很大困難。故依本人看法，除非高溫超導能擁有百分之百在價格上超越現今之系統或器件，則超導在微波方面之運用仍舊會侷限在某些特定(如太空通訊或軍事上等)的功能上而已。除上述經濟效益考量外，高溫超導元件在通訊方面應用仍有待科學家繼續努力於下述兩個重要問題：(1)發掘更高臨界溫度超導體(甚至達到室溫)；(2)此材料必需具有極高穩定性與複製性。

超導微波元件除了有商業應用性之考量外。事實上，在學術之研究上它扮演提供高溫超導基本物理性質一個最重要角色之一。因為，一般超導微波元件傳輸線或是共振腔，皆可由其溫度變化中量取精確的共振頻率之偏移，而得知感應阻抗之變化，進而取得超導穿隧深度隨溫度變化關係。進而可得知超導載子態密度隨溫度改變之性質。這些數據可用以鑑證理論預言超導古柏對之能隙態準確性。另外一方面，也可由共振信號之品質因子  $Q$  值，得知超導態中準粒子之物理行為。例如由  $Q$  值，直接經由校正二流體模型估算出實數部分傳導係數，而由此傳導係數得知該準粒子之「生命時間」。這些重要物理量皆可作為建立高溫超導理論正確性，提供最佳之證據。基於此，下面我們將簡述本研究群最近三年所做的環型微條共振器實驗，用以說明吾人對於高溫超導在微波應用與機制研究之看法<sup>[1]</sup>。

經由雷射濺鍍法，我們成功地研發在鋁酸鐳(LAO)基板的上、下二面蒸鍍鉕銀銅氧( $YB_2Cu_3O_{7-\delta}$ )之高溫超導薄膜技術。並將薄膜研製成有隙縫或沒有隙縫之超導環形共振器(圖一)。如圖一(a)，係為沒有隙縫之元件，本身具有兩個簡併模。其中一個模為整個環為一全波長，還

有另外一個模，相

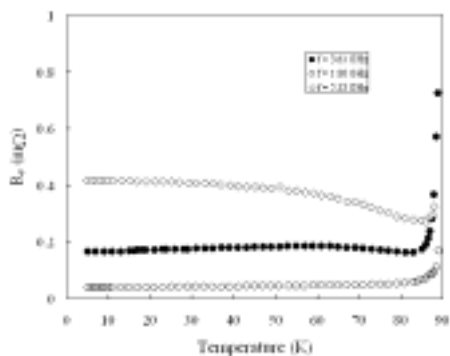
全一樣得證<sup>[2]</sup>。



圖一.(a)無隙縫和(b)有隙縫之 YBCO 超導環型共振器。

對稱於兩個偶合線，其半邊各分裂為一半波長，對整環而言也是一個波長。因此，上述兩模即成為兩個簡併模。所以，此微波共振環如在環沿上加以場的微擾（如圖一(b)，掘一小隙縫對稱於兩偶合線上時），立即分裂成兩個不同模。所以，可經微擾製作成一雙模(dual-mode)的共振元件。其分裂成雙模的原因可由雙擺模型加以解釋。事實上，其如同於兩個單擺經偶合後，其穩定態分別為同相位與異相位之兩態。因此，分裂後之兩頻率乃分別對應於此兩態。此外，分裂之兩頻率與原來簡併模頻率之關係乃與隙縫之位置有關。由於微條環狀共振器有此基本特性。因此，極易取得變頻，故如能掌控邊緣上場的有效干擾，則在通訊電子元件必能得一可調微波共振器。事實上，高溫超導微波元件，在臨界溫度下，其場皆侷限在表面邊緣之穿透深度裡，故若薄膜在離邊緣大於穿透深度時之區間有些雜質或孔洞，這對於微波元件之基本性質不會造成傷害。換言之，在薄膜製造之過程，其具有極大之忍受度，這可由環中蝕刻一空穴，而其共振頻譜仍完

在基礎物理研究上，由於所製作一個完整和一個有隙縫的環狀共振器可以量得比一般微波共振器（利用單晶）所無法得到的實驗數據；也就是我們在單一樣品上，得取物理量與頻率之關係。再者，我們的樣品為磊晶之薄膜，並且可在同一樣品取得不同氧含量。這兩者之數據可提供瞭解高溫超導物理行為之更多訊息。事實上，對一般人而言，單晶能提供簡化和乾淨的實驗數據。但磊晶薄膜之研製成功，不僅代表的是前述應用之前瞻性，而且提供正確的實際高溫超導性能。後者，例如點雜質對超導態與準粒子的影響，這些確實提供超導配對對稱態與準粒子之獨一無二的信息。在實驗的過程裡，我們經由量取樣品之穿透係數  $S_{21}$ 、共振頻率  $f$  及其半高寬  $\Delta f$  可計算其品質因子， $Q = f/[\Delta f(1-S_{21})]$ 。再由共振頻率隨溫度之飄移  $\delta f$ ，可得知電感係數之變化，藉由電感與穿透深度之關係，即可求取穿透深度。利用微波表面阻抗， $Z_s(T) = R_s(T) + jX_s(T)$  與 Drude 模式，可獲知在  $ab$  平面上的複數導電率  $\sigma(T)$ 。利用上述之結果，輔以改良式二流體模



圖二. YBCO 環形共振器之表面損耗與 $\omega^2$ 成正比。

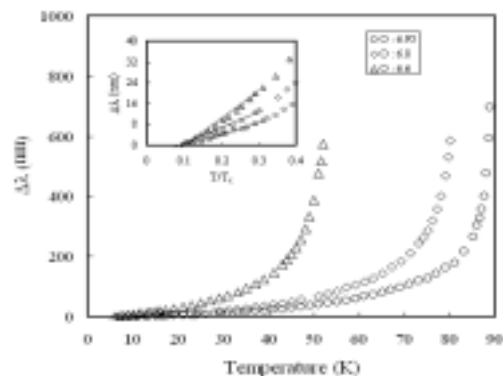
型，我們可獲知倫敦穿透深度及準粒子 (quasiparticle) 散射之鬆弛時間對溫度和頻率的關係。由此進一步瞭解不同氧含量下 underdoped  $\text{CuO}_2$  平面對於同一樣品之物理特性的影響。有關本實驗中之一些重要結果，簡述如下：

I. 從量測環形共振器之共振頻率的變化，可估算基板之介電常數。在 5K 時，我們獲得 LAO 基板之介電常數為 25.7，這實驗提供取得基板正確之介電常數的方法之一<sup>[6]</sup>。

II. 我們在環形共振器耦合線的對稱位置，蝕刻一個窄的隙縫，發現原有之共振頻率將因此而分裂，此分裂的共振頻率分別位於  $1/2$  和  $3/2$  倍原來共振頻率(環型共振器)的位置。分析以上共振頻率的變化，可輕易的驗證在同一微結構下，其物理特性隨頻率之變化。此外，我們可採用等效互感模型來說明此一共振頻率分裂結果。而此模型準確性與否，可直接經由表面損耗與 $\omega^2$ 成正比做為佐證(圖二)。而這種利用空隙之性質而改變頻率，在應用上可作為變頻微波之震盪器。例如，利用雷

射加熱製造一人工空隙。

(a) YBCO 薄膜環形共振器在滿氧( $\delta = 0.05$ )的狀態下，其品質因子在 15 K 時達到一萬單位以上。同時其穿透深度 $\Delta\lambda(T) = \lambda(T) - \lambda(5\text{K})$ 對溫度( $T < T_c/3$ )的變化維持線性增加之關係( $\Delta\lambda/T = 4.8 \text{ \AA/K}$ )；當 YBCO 樣品之氧含量逐漸的減少時(例如 $\delta = 0.2, 0.4$ )，此線性關係依舊不變，但隨著氧缺陷的增加其 $\Delta\lambda/T$ 之斜率因而變大(圖三)。依據 Scalapiano 之模型 $\Delta(0) = [\lambda_0 \ln 2 / \Delta\lambda(T)] T$ ，可獲致能隙對臨界溫度的關係<sup>[7]</sup>。在微波量測上，我們獲得此比例常數為  $2\Delta(0)/k_B T_c = 6.0 \pm 1.4$ ，而且此結果與樣品之氧原子缺陷無關(表一)。

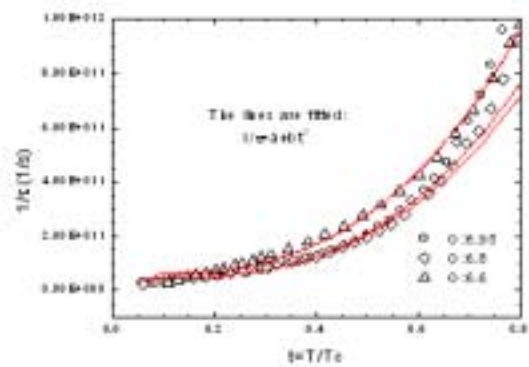


圖三. YBCO 環形共振器在不同氧含量 $\delta = 0.05, 0.2$  和  $0.4$  時之 $\Delta\lambda(T)$ 與溫度之關係。

(b) 在不同之氧含量下，樣品的穿透深度 $\lambda(T)$ 對歸一化溫度  $T/T_c$  展示一致化結果，這顯示 YBCO 樣品之高溫超導的機制主要由氧化銅平面所操控。此外，我們也獲得樣品在不同氧含量下之 $\lambda(5\text{K})$ 的大小，分別

為： $\lambda(5K) = 150 \pm 14$  ( $\delta = 0.05$ )  $216 \pm 16$  ( $\delta = 0.2$ )  
和  $282 \pm 20$  nm ( $\delta = 0.4$ )；並發現共振頻率改變不至對其造成影響（表一），故此超導並無色散關係。

III. 在我們的研究裡，準粒子的散射速率與溫度  $T$  存在著  $1/\tau(T) \propto a_0 + bT^3$  的關係。此外，在低溫(5K)時其鬆弛時間 $\tau$ 大約是  $3.76 \times 10^{-11}$  秒，此數值較臨界溫度時高了 500 倍（如



圖四. YBCO 環形共振器在不同氧含量 $\delta = 0.05$ 、 $0.2$  和  $0.4$  時之  $1/\tau$ 與  $T/T_c$ 之關係。

表一. YBCO 環形共振器在不同氧含量 $\delta = 0.05$ 、 $0.2$  和  $0.4$  時量得之物理參數。

$\delta$	$T_c$ (K)	$\lambda(5K)$ (nm)	$2\Delta(0)/k_B T_c$ $\pm 1.4$	$d[\lambda(5K)^2/\lambda^2(T)]/dT$ (1/K)	$\alpha^2$
0.05	90	150	6.1	- 0.0051	0.55
0.2	83	216	6.5	- 0.0058	0.30
0.4	55	282	5.4	- 0.0121	0.37

應之能量大約為  $1.75 \times 10^{-2}$  meV。此發現可證實自旋擾動(spin-fluctuations)宰控了低能激態粒子之散射動力行為<sup>[7-9]</sup>。

IV. 導電率 $\sigma_1(T)$ 在低溫時不再明顯隨溫度變化而漸近趨平,此雖與 YBCO 單晶所獲得之結果迥異，這乃是因為我們所製作的樣品薄膜在  $ab$  平面上有許多的雜質分佈。我們發現，殘留導電率會隨著氧含量的摻雜濃度(underdoped)變化。而這些現象皆可由李氏理論予以證實<sup>[10-12]</sup>：因準粒子之態密度隨溫度降低而減少，並且準粒子與雜質之多重非彈性散射卻隨溫度降低而增加其生命期(lifetime)，這兩因數互相競爭下導致導電率在低溫時趨近常數。

V. 文及李氏理論<sup>[11,12]</sup>估算高溫超導體之不正常的(abnormal)費米液體修正常數 $\alpha^2$ 約為  $0.5$  附近，這相當於有效質量約為  $1.5$ ，這表示準粒子係為一不正常費米液體。此外，在 underdoped 氧含量摻雜濃度改變下，高溫超導

圖四) 利用測不準原理估計此散射時間所對

的能隙與  $T/T_c$  的關係，具有相同函數形式  $f(T/T_c)$ 。

總之，微波量測其精準度 ( $\delta f/f$ ) 可達  $10^{-6}$  級之變化，係在所有量取形體穿隧深度隨溫度變化最精確者。由於高溫超導對其能隙若為 d-波時，則受晶格缺陷之影響極大，在吾人研究中可確切予以證實 P. A. Lee 之 d-波雜質散射影響之電導理論。並且 Scalapino 等人之 d-波自旋擾動導致之準粒子生命期在非彈性散射在 Unitary limit 下呈  $T^{-3}$  比<sup>[7-9]</sup>，吾人也可以正確予以印證。換言之，**本人認為 d-波之能隙理論在微波量測應無可置疑予以確認**。至於自旋擾動必會影響準粒子之局部運動行為，甚至 pseudogap 也必與其有密切關係。基於吾人對 Mott insulator 之認識，我們也提出超導機制的可能關係如下：或許如同一般統計 ABC(Activation Barrier Crossing)理論似的，當電洞被周圍晶格裡之反鐵磁之原子(Cu)之自旋磁子所造成如碗狀勢壁壘所困住。而此電洞早已被週遭離子震盪所形成聲子極化，致使其有效質量增加約 1.5 倍似的。若當此小極子在此碗底間左右跳躍時，因熱激動與化學勢差異之緣故可沿某特定方向有機會躍至鄰近”碗”裡，與另外一極子形成”bipolaron”而造成更低能量階 d-波基態之古柏對。設若跳躍方向無機會形成配對，則表現出與磁子之非彈性散射行為。這是吾人從實驗與綜合許多其他實驗至今所得一些想法。

#### 參考文獻：

1. 鄭慧愷博士論文，交通大學電子物理所 (2001)。
2. 賴良星碩士論文，交通大學電子物理所 (2001)。

3. W. H. Chang, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **MTT-24**, (1976) 608.
4. W. H. Chang, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **MTT-25**, (1977) 712.
5. W. H. Chang, J. Appl. Phys. **50**, (1979) 8129.
6. H. K. Zeng, J. Y. Juang, J. Y. Lin. K. H. Wu, T. M. Uen, and Y. S. Gou, Physica C **351**, 97 (2001).
7. P. J. Hirschfeld, W. O. Putikka and D. J. Scalapino, Phys. Rev. B **50**, 10250 (1994).
8. P. J. Hirschfeld, W. O. Putikka and D. J. Scalapino, Phys. Rev. Lett. **71**, 3705 (1993).
9. S. M. Quinlan, D. J. Scalapino and N. Bulut, Phys. Rev. B **49**, 1470 (1994)
10. P. A. Lee, Phys. Rev. Lett. **71**, 1887 (1993).
11. X. G. Wen and P. A. Lee, Phys. Rev. Lett. **80**, 2193 (1998).
12. A. C. Durst and P. A. Lee, Phys. Rev. B **62**, 1270 (2000).