

高温超导材料 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 在可见光区的电场调制光反射光谱

汪 辉 王若楨

(北京师范大学物理系)

1988 年 5 月 16 日收到

本文报道了用调制光谱手段对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 化合物所进行的光学测量和研究。从对可见光区调制光谱结构的分析和讨论表明调制光谱可以用于研究超导体化合物的电子态结构。从而提出了又一种研究高温超导材料光学特性的新的测试手段。

一、引 言

从 1986 年 La-Ba-Cu-O 化合物的高温超导性发现^[1]以来,许多研究工作转向了对超导机制的理论探讨和实验研究。其中对超导体材料光学特性的研究也是一个重要领域。从光学性质的研究中人们可以得到许多有关电子态的信息。

高温超导化合物的光学特性在红外光区已有大量的实验报道^[2-5]。通过研究超导材料在红外光区的光学特性,人们了解到了许多有关的电子态结构。目前红外光谱测量已经成了研究超导材料必不可少的工具。然而由于大部分的超导体化合物在可见光区的反射性能很差等原因,很少有文献报道在可见光区对高温超导材料的光学研究。只有 Orenstein 和 Sulewski 等人报道了在可见光区对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 和 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 超导化合物的反射光谱研究^[6,7]。

电场调制光反射光谱的方法是探测样品在外加调制电场的影响下,对光的反射性能的变化量,即 $\frac{\Delta R(\omega)}{R(\omega)}$ 。因而具有对光反射光谱取微商的特性^[8]。即使在样品表面反射光很微弱的情况下仍有可能得到结构清晰的光谱结构。从而可以得到比反射光谱更多的有关材料物质结构的信息。

自从电场调制光反射光谱效应发现以来,已经发展了多种不同形式的调制光谱,对固体材料的光谱特性进行了大量的研究^[9],得到了各种不同固体材料的许多有关能带结构及临界点光谱的信息。调制光谱由于其谱线尖锐,灵敏度高,信息量大等优点,特别是自 1984 年以来,人们已将调制光谱用于超晶格量子阱等微结构中电子态的研究中,获得了大量信息,成为一个活跃的研究领域。在对金属的研究中,自 1966 年 Feinleib^[10]的工作之后又有人用调制光谱对金属中的电子态及表面特性进行了大量的研究^[11-15]。充分显示了调制光谱在研究物质结构及表面态中的优越性。

半导体材料的电场调制光反射光谱由于低频调制电场可以深入到体材料中几千埃的数量级,因而可以探测到体材料的能带结构。对于金属而言,由于其电导率很大,故调制电场只能深入到金属表面的几个原子层中^[16],因而金属的电场调制光反射光谱对于表面态更敏感。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导材料虽然属于金属类化合物,但是其载流子密度比起一般

的金属要低 (约 10^{21} electrons/cm³)¹⁾。因而在我们的测试条件下调制电场可以较深入地穿透到材料内部,从而能够得到有关待测材料电子态的信息。

二、实验方法

实验采用电解液电场调制光反射测试系统,如图 1 所示。探测光源采用 250W 钨钨灯,强度为 I_0 的光通过单色仪后经聚光镜入射到样品的表面上。由调制源(提供正弦电压信号 V_{ac} 和直流偏压 V_{dc})对样品施加频率为 f 的周期性调制电场,从而反射光中包含直流成份 $I_0 R$ 和与调制电场同频率变化的交流成份 $I_0 \Delta R$ 。探测器的输出由直流放大器和锁相放大器测量。前者的输出正比于 $I_0 R$ 而后者正比于 $I_0 \Delta R$ 。将两者进行除法处理得到反射率的相对变化量 $\Delta R/R$ 。最后按波长由记录仪记下 $\Delta R(\lambda)/R(\lambda)$, 即电场调制光反射光谱。为避免直流放大和除法器制作上的困难,实验中采用了伺服电源系统,而不用除法器。探测器使用光电倍增管,由伺服电源提供并控制倍增管阴极电压,以保持其直流输出部分为不随入射光强和波长而变化的常数。这样经锁相放大器输出的量就正比于 $\Delta R/R$ 。

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 样品通过用氧化物的固态反应方法烧结而成。经过简单的机械抛光后放入样品室,与 0.2M 浓度的 KCl 电解液接触,加上频率为 333Hz 按正弦波变化的周期性调制电场,选择合适的光反射角度以避开电解液表面的反射光,使得光电倍增管探测器接收到的只是被测试样品的反射光。测试范围选择在 4000—8000 Å 之间。

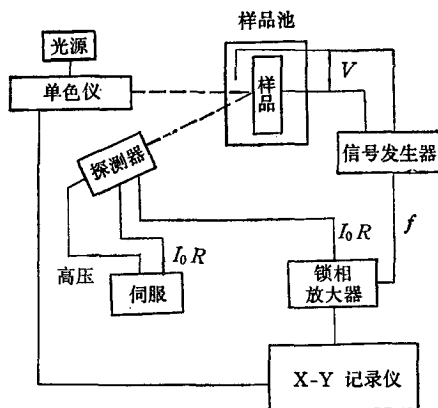


图 1 电场调制光反射光谱实验装置示意图

三、实验结果

图 2 给出室温下 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 化合物在可见光区的电场调制光反射光谱及光反射光谱。可以看到电场调制光反射光谱虽然由于反射光弱而信噪比下降,但却获得了非常明显清晰的谱结构。在 1.78 和 2.43eV 的位置出现了两个电场调制光反射谱峰。我们分别称其为 A, B 峰。多次实验表明其重复性很好。从图 2 可以看到我们所得到的电场调制光反射光谱确实具有对光反射光谱取微商的特性。为了验证说明我们所得到的电场调制

1) 甘子钊等主编,氧化物超导材料物性专题报告文集,北京大学出版社, (1987)。

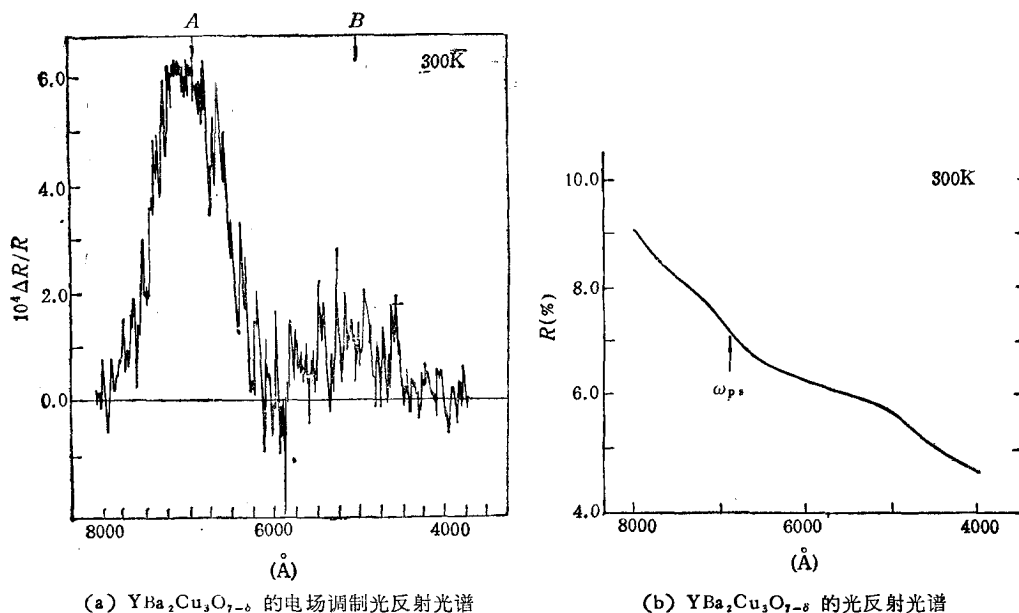


图 2

光反射光谱确实反映了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导材料本身的电子态结构,而不是由于电解液所致,我们作了样品与不同的电解液甚至与自来水相接触情况下的各电场调制光反射光谱,发现改变电解液并不影响谱的结构和位置。

四、讨论与分析

有关 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 结构的电子态及光学性质,已经作了许多理论上的工作^[17-19],对其能带结构及光学常数作了详细的计算和讨论。

根据调制谱理论^[8,9],电场调制光反射光谱会在能带结构的诸临界点处出现明显的光学常数的微商谱结构。我们认为图 2 的电场调制光反射光谱结构中的 B 峰正是对应于 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 能带结构中 F 点的带间光跃迁^[18]。

从图 2 中我们还可以看到谱结构中的 A 峰正好处在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 结构的等离子体本征振荡频率 ω_p 区域。这一点并不奇怪,我们可以用电场调制自由电子浓度模型^[11,12]来加以解释。这就是说,由于固体的光学常数与其能带结构密切相关,从能带结构可以得到固体的光学常数 $\varepsilon(\omega)$ 。因而得到固体的光反射率 $R(\omega)$ 。文献[6]曾给出了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 结构的复介电函数

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \omega_p^2 \left[\frac{f_G}{\omega_G^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_G} - \frac{1 - f_G}{\omega(\omega + i\gamma_D)} \right]$$

其中 ω_p 为间隙频率, γ_G 为跃迁线宽, ε_∞ 为与带间跃迁有关的背景介电函数, 以及 $\omega_{pi} = \omega_p / \sqrt{\varepsilon_\infty}$, 其中 $\omega_p = 3.0\text{eV}$; $\varepsilon_\infty = 4.5$; $\omega_G = 0.65\text{eV}$; $\gamma_G = 1.3\text{eV}$; $\gamma_D = 0.04\text{eV}$; $f_G = 0.92$ 。外加调制电场使得自由电子的密度受到了调制,因而使 ω_p 有一个微小的变化量,这样在光子能量轴上 $\varepsilon(\omega)$ 将有一个微小的移动,从而使得光反射率 $R(\omega)$ 发生变化。电场调制光反射光谱所测量到的信号正是施加调制电场前后反射率 $R(\omega)$ 的变化量

$$\frac{\Delta R}{R} = a(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \Delta \varepsilon_1 + b(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \Delta \varepsilon_2$$

其中 a, b 为 Seraphin 系数^[9].

这样我们就得到了等离子体本征振荡频率区域内的电场调制光反射光谱结构。

五、结 论

通过上述实验结果的分析和讨论表明:

1. 在室温下我们可以方便地测得材料的 ω_p , 自然也可对各种不同材料不同制备条件下的 ω_p 作相应的测量和分析。
2. B 峰的出现说明用调制光谱研究高温超导材料带结构的可能性, 并将能与各种理论模型作有益的比较和分析, 从而加深人们对超导材料电子态的认识。
3. 实验表明电场调制光反射光谱的方法的确可以得到比反射光谱更多的有关超导体化合物光学性质及电子态结构信息, 尤其在可见光区可以成为比光反射光谱优越得多的研究手段。

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Müller, *Z. Phys. B*, **64**(1986), 189.
- [2] G. A. Thomas, A. J. Millis *et al.*, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 736.
- [3] D. A. Bonn *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 2249.
- [4] B. Batlogg *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 2333.
- [5] Keigo Nagasaka *et al.*, *Jap. J. Appl. Phys.*, **26**(1987), L479.
- [6] J. Orenstein *et al.*, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 729.
- [7] P. E. Sulewski *et al.*, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 2357.
- [8] D. E. Aspnes, *Surface Science*, **37**(1973), 418.
- [9] Semiconductors and Semimetals Vol. 9, ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer (Academic press, N. Y., 1972).
- [10] J. Feinleib, *Phys. Rev. Lett.*, **16**(1966), 1200.
- [11] A. Proszak and W. N. Hansen, *Phys. Rev.*, **160**(1967), 500.
- [12] W. N. Hansen and A. Proszak, *Phys. Rev.*, **174**(1968), 500.
- [13] C. Carotenuto, *Phys. Rev.*, **B14**(1976), 5327.
- [14] U. Gerhardt, *Phys. Rev.*, **172**(1968), 651.
- [15] D. M. Kolb, *J. de Physique*, **C10**(1983), 137.
- [16] N. D. Lang and W. Kohn, *Phys. Rev.*, **B37**(1973), 3541.
- [17] Guang-Lin Zhao *et al.*, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 7203.
- [18] L. F. Mattheiss and D. R. Hamann, *Solid State Commun.*, **63**(1987), 395.
- [19] E. Orti, Ph. Lambin, J. -L. Brédas *et al.*, *Solid State Commun.*, **64**(1987), 313.

ELECTROREFLECTANCE IN THE VISIBLE RANGE OF SPERCONDUCTING SYSTEM $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

WANG HUI WANG RUO-ZHENG

(Department of Physics, Beijing Normal University)

ABSTRACT

The optical properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ are studied by electroreflectance spectra. In the visible range, two peaks at 1.78 eV and 2.43 eV are obtained. Analysis of the features show the utility of the modulated reflectance techniques for studying the band structure of superconducting system. Hence a new means to study the optical properties of superconducting system is suggested.