

由隧道电子谱微分电导极大值确定 超导体能隙的新方法¹⁾

李宏成 王瑞兰 王平书 管惟炎

(中国科学院物理研究所)

1985 年 3 月 18 日收到

提 要

本文给出一种确定超导体能隙的新方法。由隧道理论计算出 V_{\max}/kT 与 Δ/kT 的关系曲线。微分电导极大值电压 V_{\max} 由隧道电子谱测定。由 V_{\max}/kT 值及上述曲线很容易计算出能隙 Δ 值。这种方法很简单,而准确度几乎接近于曲线拟合法。

利用隧道效应测定超导体的能隙是一个很重要的测定能隙的方法。一层容易氧化的正常金属与一层超导薄膜构成的 N-I-S 隧道结制备过程较简单。若采用 Al, Mg, Y 等氧化层性质较好的金属作为 N, 则隧道结的性质也很好。但 N-I-S 结的 I-V 特性曲线不十分陡峻,给确定能隙带来一定的困难。通常采用 N-I-S 结的约化电导 $\sigma(V) = (dI/dV)/(dI/dV)_n = 1$ 的条件来确定能隙 Δ 。这个条件只是近似成立的。以 Al-Al₂O₃-Pb 结为例,在 $T = 1K$ 时,它的误差为 8%,而在 $T = 6K$ 时,误差则高达 40%^[1]。以 Δ 为参数,使理论曲线与实验的 $\sigma(V)$ 曲线拟合,从而确定 Δ 值^[2],可以达到满意的精度。但这需要用计算机进行曲线拟合,不能在测得 $\sigma(V)$ 曲线后很简便地确定 Δ 。

本文提出一种简便的方法。在测得 $\sigma(V)$ 后,经过二步算术运算与一次查表即可求得 Δ 值。其准确度接近于曲线拟合法。

对于 N-I-S 结,隧道电流由下式给出:

$$I = \frac{C}{e} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_s(E) [f(E - eV) - f(E)] dE. \quad (1)$$

其中, E 为能量,由 Fermi 能级算起; V 为电压; $f(E)$ 为 Fermi 分布函数; C 为一常数; $\rho_s(E)$ 为超导体的约化电子态密度,

$$\rho_s(E) = |E| / (E^2 - \Delta^2)^{1/2} \quad E > \Delta. \quad (2)$$

将 (1) 式对电压求微商,可求出约化电导 $\sigma(V)$:

$$\sigma(v, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_s(x) K(x, v, a) dx, \quad (3)$$

$$K(x, v, a) = a \exp[a(x - v)] \{ \exp[a(x - v) + 1] \}^{-2}, \quad (4)$$

1) 物理研究所高捷与清华大学胡瑞中参加了样品制备工作。

$$x = E/\Delta, v = eV/\Delta, a = \Delta/kT. \quad (5)$$

此处 x, v, a 分别为约化能量、约化电压、约化能隙。当 $T \rightarrow 0\text{K}$, $a \rightarrow \infty$ 时, $K(x, v, a)$ 趋近于一个以 $(x - v)$ 为中心的 δ 函数, 此时 $\sigma(v, a)$ 将完全反映 $\rho_s(x)$ 的特点, 而在 $v = 1$ 处发散。当 T 为有限值, 即 a 不十分大时, $K(x, v, a)$ 是一个以 $(x - a)$ 为中心的钟形函数, 宽度为 $1/a$ 的量级。此时 $\sigma(v, a)$ 具有一个极大值。由 (3), (4), (5) 式很容易计算出这个极大值的位置 $v_{\max} = V_{\max}/\Delta$ 。 v_{\max} 与 a 有关, 可以列成一个表或按 $V_{\max}/\Delta - \Delta/kT$ 作图。计算结果如图 1 所示。由 v_{\max} 与 a 值很容易求得 V_{\max}/kT 值, 其结果也画在图 1 上。计算结果表明, 即使 Δ/kT 高达 40, V_{\max} 也不正好等于 Δ 。这说明, 在很低的温度下, 也不能直接取 $\Delta = eV_{\max}$ 。有了图 1 所给的 $V_{\max}/kT - \Delta/kT$ 的关系曲线, 很容易确定 Δ 值。在温度 T 一定时, 记录 N-I-S 结的微分电导曲线 $(dI/dV)_s - V$ 。在 $T > T_c$ 时记录正常态的微分电导, 然后求出 $\sigma(V)$ 极大值所对应的 V_{\max} 。计算出 V_{\max}/kT , 由图 1 曲线求出与之对应的 Δ/kT 值, 立即可得 Δ 。

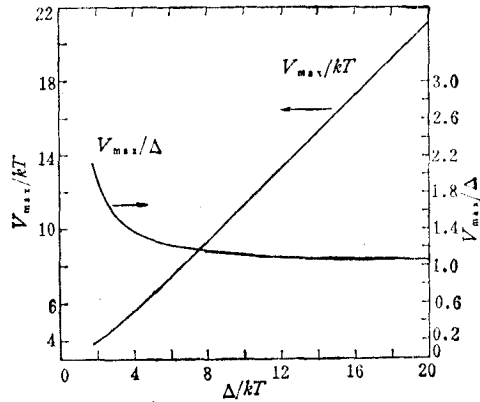
作为例子, 我们对一系列 Al-I-Pb 隧道结测定了能隙, 结果如表 1 所示。

表 1

样品编号	温 度	$V_{\max}(\text{meV})$	$\Delta(\text{meV})$
841120-2J1	1.613	1.565	1.387 ± 0.020
841120-2J2	1.567	1.566	1.386 ± 0.020
841124-6J2	1.584	1.560	1.385 ± 0.020
841127-2J2	1.549	1.555	1.385 ± 0.020
841201-3J1	1.723	1.580	1.387 ± 0.020
841201-3J1	1.341	1.528	1.383 ± 0.020

这几组数据来自四批样品五个结的四次测量。841120-2 J1 与 841120-2 J2 是在同一块底板上的二个结。这里给出的 Δ 值是在测量温度下的能隙。由于温度并不高, 故它们已十分接近 0K 下的能隙 Δ 。 Δ 的误差估计在 $\pm 0.020 \text{ meV}$ 左右, 主要来自温度与 V_{\max} 测量误差。表 1 说明这几组数据所给出的 Pb 的能隙值分散度相当小, 与由 Pb-PbO_x-Pb 结给出的 $2\Delta = 2.793 \text{ meV}^{[1]}$ 是一致的。温度测量精度与 V_{\max} 测量的精度还可显著提高, 因而 Δ 的误差还可大大降低。

总起来说, 本文给出了一个简便的方法, 由 N-I-S 隧道结的微分电导极大值准确地确定 Δ 值。实验结果证实了此方法的可靠性。

图 1 V_{\max}/Δ 与 V_{\max}/kT 的关系曲线

参 考 文 献

- [1] W. L. McMillan, J. M. Rowell, in Superconductivity, ed. R. D. Parks, Dekker, New York, (1969), Vol. 1, p. 561.
[2] D. A. Rudman, G. L. Report, No. 3509, Stanford University, (1982).

**A NEW METHOD FOR DETERMINING THE ENERGY
GAP OF A SUPERCONDUCTOR USING THE MAXIMUM
IN DIFFERENTIAL CONDUCTANCE OF
ELECTRON TUNNELING SPECTRUM**

LI HONG-CHENG WANG RUI-LAN WANG PING-SHU GUAN WEI-YEN
(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A new method for determining the energy gap of a superconductor using the maximum in the differential conductance curve of electron tunneling spectrum is given in this paper. The V_{\max}/kT versus Δ/kT curve was calculated from tunneling theory. V_{\max} , the voltage of the conductance maximum, can be measured from electron tunneling spectrum. Δ/kT can be found from this curve, then the energy gap Δ can be calculated. This method is simple, fast and accurate. The accuracy almost approaches that of the curve fitting method.