科 学 通 报
第39卷 第15期 CHINESE SCIENCE BULLETIN 1994年8月

金属中传导电子有效质量的正电子湮没 2γ 辐射能谱法测定

郭应焕 王蕴玉

(中国科学院高能物理研究所核分析技术研究与应用开放实验室，北京 100080)

关键词 电子有效质量、e^+湮没、多普勒展宽

传导电子的运动状态决定金属的热学和电学特征. 由于传导电子和原子实之间存在强关联，因而确定运动状态的质量不是电子的惯性质量 m_e 而是它的有效质量 m^*，而且 m^* 是一个二阶张量. m^* 通常用 dHvA(de Has-van Alphen) 效应测量，需要低温(～ 0.5K)和强磁场(～ 10T)等复杂技术. 我们采用正电子(e^+)湮没 2γ 辐射能谱法测定了高纯 Pd 中传导电子的平均有效质量，并与 dHvA 法测量的结果[1—4]进行了对比. 结果表明，我们建立的这套测量金属传导电子有效质量的方法不仅简易可靠，而且有广泛的实用性.

1 方 法 原 理

e^+ 湮没 2γ 辐射能量等于(正)电子静止能 m_eC^2，作为标准已测准到 510998.80±0.74eV[5]. 在通常情况下，e^+ 湮没谱峰位能量受 e^+ 和 e^- 在介质中束缚能的影响，湮没谱的形状由 e^+-e^- 湮没体系质心速度的多普勒效应决定. 实际上，e^+ 在介质中热化湮没[6]，2γ 湮没谱形由介质中电子动量(速度)的多普勒效应决定，因此它包含着介质中电子动量分布的信息. 一般 2γ 湮没实验能谱宽度约为单能 γ 粒子实验能谱(能谱仪分辨函数)宽度的 3 倍. 文献[7] 虽对这种信息作过讨论，但不合理的结果(文献[7] 中公式(7)—(9)) 影响了利用这个信息. 因此人们对 e^+ 湮没 2γ 能谱一般只进行线型参数分析[8]. 我们用费米气体模型给出了 0 K 中金属中传导电子和核心电子与 e^+ 湮没的多普勒展宽本征能谱谱形

$$F(\Delta E)=\begin{cases} n_T P_F^2\left[1-\left(\dfrac{\Delta E}{P_F C}\right)^2\right]+n_N\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_N}\exp\left[-\left(\dfrac{\Delta E}{\sqrt{2}\,\sigma_N}\right)^2\right], & \Delta E\leqslant P_F C, \\ n_N\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_N}\exp\left[-\left(\dfrac{\Delta E}{\sqrt{2}\,\sigma_N}\right)^2\right], & \Delta E> P_F C, \end{cases} \tag{1}$$

式中 n_T 和 n_N 分别为与 e^+ 湮没的传导电子和核心电子的空间密度，P_F 为费米动量，ΔE 为多普勒能移，σ_N 为 F 中高斯分布部分的标准差. 显然本征谱(1)式的二阶导数在 $\Delta E=P_FC$ 点有突变. 研究表明[9]，这种突变在 0K～室温下都存在. 因此由 e^+ 在金属中湮没时室温下测得的 2γ 辐射本征谱可按(1)式分解或求导得到传导电子的费米动量 P_F^{exp} 和费米能量

1993-12-24 收稿，1994-04-12 收修改稿.

$$E_F^{exp}=\frac{1}{2m^*}P_F^{exp2}. \tag{2}$$

因为多普勒能移 ΔE 由粒子速度决定，关联势使 P_F^{exp} 与 m^* 密切相关.

我们曾给出了[10]从谱仪能量分辨函数(单能 γ 能谱)和 e^+ 湮没 2γ 辐射多普勒展宽实验能谱求展宽本征谱的广义最小二乘解法(GLSM). 因此由 e^+ 湮没法可以获得金属中传导电子的 P_F^{exp} 和 E_F^{exp}.

另一方面，根据自由电子的费米气体模型，金属中传导电子的费米能量为

$$E_F^{th}=\frac{\hbar^2}{2m_e}(2\pi^2 n)^{2/3}, \tag{3}$$

式中 n 为 0 K 时 E_F 所决定的态的空间密度. 由不相容原理，这正是金属中传导电子的密度

$$n=\frac{D}{M}A_0F, \tag{4}$$

式中 D 为金属密度，M 为克原子量，A_0 为阿弗伽德罗常数，F 为每个金属原子提供的平均传导电子数. 由于(2)式和(3)式中的 E_F^{exp} 和 E_F^{exp} 都由电子(态)密度决定，因此他们是一致的：$E_F^{exp}=E_F^{exp}$. 所以得出

$$m^*/m_e=P_F^{exp2}/P_F^{th2}. \tag{5}$$

2 实验检验

对上述测定金属中传导电子平均有效质量的 e^+ 湮没法进行了实验检验. 取厚 1mm 德国产高纯金属 Pd 板，表面抛光，制成 $15\times15mm^2$ 样品两块. 在 900°C 退火 1h. 把强度约 6μC 的 ^{22}Na 正电子点源用厚 1μm 的 Mylar 膜封装，夹在两块样品之间压紧. 在 (20±0.5)°C 条件下用微机多道高纯锗(HPG)能谱仪，测定了 e^+ 在 Pd 中湮没 2γ 辐射多普勒展宽能谱(图 1-1). 谱仪对 ^{60}Co 的 1332keV γ 线的 FWHM=2.0keV. 谱仪分辨函数采用 ^{85}Sr 的 514keV γ 线的实验能谱(图 1-2). 为了对照在图 1 中通过平移已把 1 线谱和 2 线谱的峰位重合. 由 1, 2 线两谱的多道数据用 GLSM 解出了 e^+ 在 Pd 中湮没的

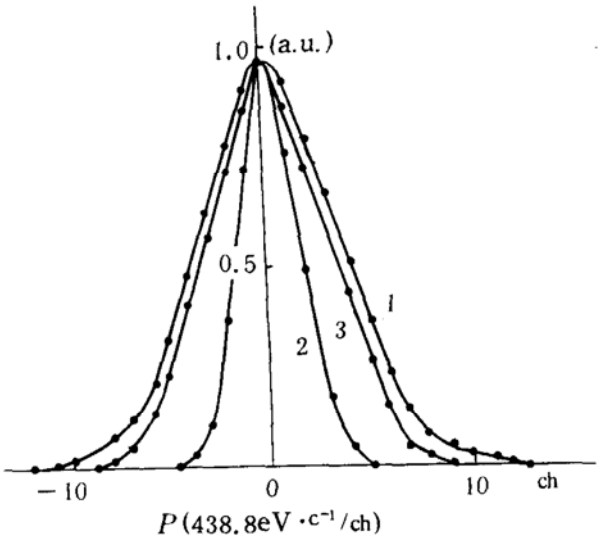

图 1 e^+ 在 Pd 中湮没 2γ 辐射多普勒展宽实验谱和本征谱

1——实验谱，2——能谱仪分辨函数，3——本征谱

表 1 Pd 中传导电子在费米面不同方向上的有效质量

文献	场方向	m^*/m_e
[2]	⟨100⟩	2.02
	⟨111⟩	1.96
	⟨111⟩NC	1.96
	⟨110⟩	2.30
[3]	[011]	2.267±0.023
	[100]Γ (H=3T)	1.936±0.020
	[100]Λ	1.944±0.051
[4]	[100]Γ	2.02
	[110]Γ	2.261±0.017
	[111]Γ	1.96
	[111]Λ	2.01

2γ 辐射多普勒展宽本征谱(图 1-3). 由本征谱求得 $P_F^{exp}=(3037\pm5)eV\cdot c^{-1}$. 文献[11] 给出 $E_F^{th}=4.28eV$, 求得 $P_F^{th}=2091eV\cdot c^{-1}$. 根据(5)式, 金属 Pd 中传导电子的平均有效质量:

$$m^*/m_e=2.11\pm0.02.$$

这个值和文献[2—4] 中用 dHvA 法测得的 Pd 中费米面上电子在不同方向上的有效质量(表 1)几乎是一致的. 因此, e^+ 湮没 2γ 辐射多普勒展宽本征能谱的测定, 对金属中传导电子平均有效质量的测量提供了一个简易而可靠的方法.

参　考　文　献

[1] Vuillemin, J. J., Priestley, M. G., *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1964, (9): 632.

[2] Dye, D. H., Campbell, S. A., Crabtree, G. W., *Phys. Rev.*, 1981, **B23**(2): 462.

[3] Joss, W., Hall, L. N., Crabtree, G. W., *Phys. Rev.*, 1984, **B30**(10): 5637.

[4] Joss, W., Crabtree, G. W., *Phys. Rev.*, 1984, **B30**(10): 5646.

[5] 张天保等, 中国科学, A 辑, 1992, (9): 970.

[6] Perkins, A., Carbotte, J. P., *Phys. Rev.*, 1970, **B1**: 101; Kabica, P., Stewart, A. S., *Phys. Rev.*, 1975, **B11**: 2490.

[7] Shizuma, K., *Nucl. Instru. Meth.*, 1978, **150**: 477.

[8] P. 豪托贾维编, 何元金、郁伟中译, 正电子湮没技术, 科学出版社, 北京, 1983, 124—132.

[9] Migdal, A. B., *Zhur. Ekspitl, i Teoret. Fiz.*, 1957, **32**: 399.

[10] 郭应焕、姚　英, 核电子学与探测技术, 1993, **13**(11 增刊): 257.

[11] Cao, B. S., Wang, V. V., *Positron Annihilation Proc. 6-ICPA*, 1982, 906.