

真空电子偶素原子的产生*

韩荣典 郭学哲 翁惠民 石星军 谢 力

中国科学技术大学近代物理系, 合肥, 230026

1990年4月9日收到; 1990年6月8日收到修改稿

用慢正电子束入射固体靶表面, 通过测量湮没光子能谱随靶温度和入射慢正电子能量的变化, 用“峰法”确定慢正电子产生电子偶素原子的转换率. 转换率依赖于靶材料、靶温度和入射慢正电子能量. 对材料锗转换率可达 80%.

PACC: 3580; 3690

一、引 言

电子偶素 (positronium) 是电子-正电子组成的纯轻子束缚态, 是研究量子电动力学的理想系统. 最初产生电子偶素的方法是用放射源正电子入射气凝硅胶、氧化镁等微孔或粉末材料, 正电子在材料内部空洞中形成电子偶素, 这些方法产生的电子偶素源由于不能直接观测激发态到基态的跃迁辐射, 限制了对电子偶素激发态能级结构的研究. 用慢正电子入射固体表面可以产生真空电子偶素原子^[1], 从而极大地推进了电子偶素原子的实验研究^[2,3].

本文介绍在中国科学技术大学的慢正电子束装置上产生真空电子偶素原子的实验. 本工作的目的是为深入研究电子偶素能级结构和实验探索电子偶素系统中 CP 守恒问题提供一个高产额的真空电子偶素源.

二、实验装置与实验方法

实验装置由一个置于高真空靶室的样品台和一个垂直于慢正电子束线放置的 NaI (TI) 探测器组成(见图 1). 慢正电子由一钨片慢化体将 ^{22}Na 放射源衰变发射的快正电子慢化产生^[4]. 产生的慢正电子由一长 1.5 m 的弯曲长螺线管传输到靶室, 入射到靶室的慢正电子强度为 $1 \times 10^3 \text{ e}^+/\text{s}$, 轴向能散小于 2.0 eV. 靶室的样品台由内部绕有加热灯丝, 样品温度可由室温加热至 1000 K. 温度测量使用的是镍铝-镍铬热电偶, 参考点为冰点, 温差电动势由一台四位半数字电压表测定(图 1 中未标出热电偶引出线), 加热丝和样品台之间由陶瓷绝缘, 耐压实验表明, 加热至 1000 K, 样品台可浮在 1000 V 高压上, 无

* 国家自然科学基金资助的课题.

加热时可浮在 6000 V.

为了获得最大传输效率,慢化体加速电压置在 $V_a = 24$ V,样品台电位 V_t 可以在

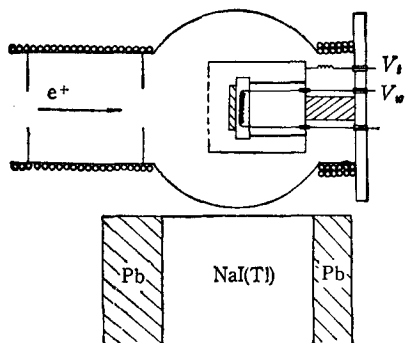


图1 真空电子偶素的产生和测量装置 V_t 为样品电压, V_a 为样品加热器的灯丝电压, NaI(Tl) 探测器用来测量正电子湮没光子能谱

相对地电位正负极性调节,入射到靶上的正电子能量 $E_+ = (V_a - V_t)eV$. 这样使入射到靶上的正电子能量可在较大范围(1 电子伏至几百电子伏)调节,同时保持基本相同的人射正电子强度.

系统真空用一台 FBJ-450 型涡轮分子泵机组维持. 在样品温度达到 1000 K 时,靶室真空度可保持在 1×10^{-6} Torr.

慢正电子的湮没光子能谱用一 40 mm $\times$ 40 mm 的 NaI(Tl) 探测器测量,探测器对 ^{137}Cs 放射源的 662 keV γ 的能量分辨率为 8.5%,所测能谱用一

台 4096 道多道分析器记录.

我们知道基态电子偶素原子有 1/4 的几率处在 1S_0 态, 3/4 的几率处在 3S_1 态,单态 1S_0 经短寿命 ($\tau_s = 0.125$ ns) 湮没为两个能量为 511 keV 的光子,三态 3S_1 具有长寿命 ($\tau_t = 142.074$ ns), 湮没为三个共面的 γ 光子,湮没光子具有连续能谱. 由于电子对正电子的 Coulomb 屏蔽作用,正电子在金属或半导体中没有电子偶素形成,并且无论是直接的还是间接的实验测量,都没有在无缺陷金属或半导体材料中观察到电子偶素形成^[5]. 在非铁磁性固体中正电子直接湮没时约有 1/372 的份额通过 3γ 湮没. 由以上所述,可以通过 γ 能谱测量确定电子偶素的形成.

在 γ 能谱测量中,没有电子偶素形成时所测能谱为单能 511 keV 能谱,有电子偶素形成时,由于 3S_1 态的 3γ 湮没为 0—511 keV 的连续能谱,在相同入射正电子强度下,所测能谱的全能峰下降 (2γ 湮没减少),同时低于全能峰的计数增加,根据所测能谱的变化就可以计算出 P_s 产额. 本文就是基于能谱测量的“峰法”^[6]来计算 P_s 转换率的.

设 P_0 , P_t 分别为在相同慢正电子入射数目下无电子偶素形成和有电子偶素形成的全能峰区计数,峰区计数的减少归于电子偶素形成,则慢正电子入射固体表面产生电子偶素的转换率 F 为

$$F = \frac{4}{3} \left[a - \left(\frac{1}{372} + \frac{371}{372} a \right) \frac{P_t}{P_0} \right], \quad (1)$$

式中 $a = [E/(E - \Delta\Gamma)]^2$ 为考虑到 3γ 连续能谱对所取峰区贡献的修正因子, $\Delta\Gamma$ 为全能峰区全宽度的一半, $E = 511$ keV. 测量时全能峰区取为 450—588 keV, 全谱区为 70—588 keV, 峰法公式的标准误差为

$$\sigma_t = \pm \frac{4}{3} a \sqrt{a[2\Delta\Gamma(1 - P_t/P_0)\eta/E]^2 + (1 + P_t/P_0)P_t/P_0^2}, \quad (2)$$

η 为 γ 探测器能量分辨率.

三、实验测量与结果

进行电子偶素产额计算首先要测量无电子偶素形成时的正电子湮没光子能谱。由于电子对正电子的 Coulomb 屏蔽作用,正电子在金属或半导体中没有电子偶素形成,用样品铝将约微居强度的 ^{22}Na 放射源夹放在靶位置,测量湮没光子能谱,所测谱即为无电子偶素形成的能谱,记录下该谱的全谱总计数 T_0 和全能峰总计数 P_0 。用慢正电子束入射固体样品时,入射正电子总数目用湮没光子能谱的全谱总计数监测,即在全谱总计数相等的条件下比较不同入射能量和不同样品温度下的全能峰总计数 P_f 。有电子偶素形成时, $^3\text{S}_1$ 态湮没具有 0—511 keV 的连续能谱,相对于 511 keV 单色能谱, NaI(Tl) 探测器对这一连续谱的探测效率增大,在相同全谱总计数下实际入射正电子数减少。用此种方法监测入射正电子数目产生约 5% 的偏差。

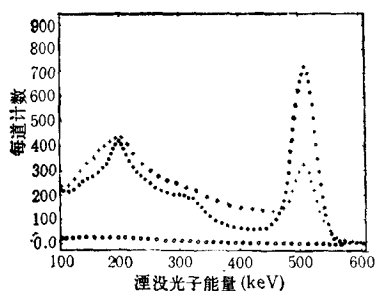


图2 用 NaI(Tl) 探测器测量的正电子湮没能谱镍样品; ●代表无电子偶素形成时的能谱; +为入射正电子能量 $E_+ = 25 \text{ eV}$, 样品温度在 870 K 时的能谱, 两种条件下能谱的变化归于电子偶素的形成; ○为无慢正电子入射时的本底谱

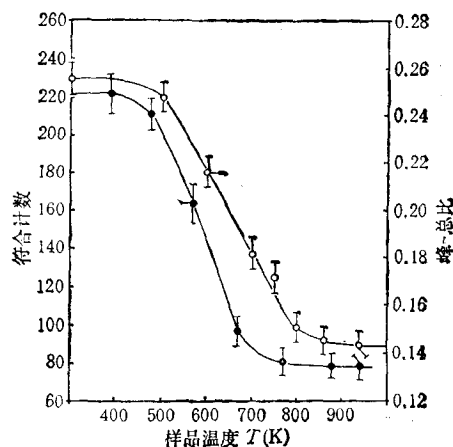


图3 湮没两光子符合计数和湮没光子能谱峰-总比随样品温度的变化 镍样品; 入射正电子能量 $E_+ = 25 \text{ eV}$

图2为两种条件下用 NaI(Tl) 探测器测量的慢正电子入射镍样品的湮没光子能谱。全能峰高的一条是在室温下测得的无电子偶素形成时的能谱。样品温度升至 870 K, 入射能量为 25 eV 时, 所得能谱和前者比较有了显著的变化, 全能峰降低, 低于全能峰的部分升高。

为了进一步验证能谱的这一变化来自正电子 2γ 和 3γ 湮没比的变化, 又做了 2γ 符合测量。以正电子束线为对称轴, 相对于能谱测量的探测器又装置了一只 NaI(Tl) 探测器 (图1中未画出)。固定入射能量 $E_+ = 25 \text{ eV}$, 改变样品温度从室温到 950 K, 对每一温度点在测量能谱的同时进行 2γ 符合测量。图3为测量结果, 其中峰-总比是指全能峰计数和全谱计数之比, 峰-总比减小表明 3γ 份额增加, 或者说, 2γ 份额减少, 这与 2γ 符合测

量的结果比较,清楚地表明两者变化趋势一样。另一方面,入射正电子能量仅有 25 eV,入射深度小于 5 Å,所以电子偶素是在表面形成的。

本工作的目的是获得高产额的电子偶素源。通过对几种样品(铝、镍、铜、硅、锗)的测量,观测到在本装置的真空条件下锗材料具有较高的电子偶素产额。在室温条件下,电子偶素转换率随入射正电子能量增加而减小,入射能量为 20 eV 时,锗样品的电子偶素转换率为 43%,入射能量增加到 2000 eV 时,转换率减小到 19%。在低能入射时,随着样品温度的增高,电子偶素转换率增大,对锗材料,样品温度为 1000 K 时,3 eV 能量入射正电子的电子偶素转换率达到 80%。考虑到用全谱计数监测入射正电子数目产生的偏差,由“峰法”公式计算转换率的误差约为 10%。

此外,对电子偶素转换率和入射正电子能量关系的初步测量表明,在入射能量大于 500 eV 时,转换率和入射能量按 $1/[1 + (E_+/E_0)]$ 关系变化,式中 E_0 为与材料有关的、表征正电子扩散性质的常数。转换率随样品温度的增高而增加,这表明入射正电子扩散到表面除一部分再发射出来及一部分俘获一个电子直接形成电子偶素外,还有一部分被束缚在样品表面,样品温度的增高将束缚在表面的正电子热激活,从而使电子偶素增多。电子偶素转换率随入射正电子能量的变化,反映了正电子在固体近表面层的扩散行为,而转换率随样品温度的变化,则给出正电子表面态的动力学信息。所以,电子偶素转换率和入射能量以及样品温度的关系的测量,实际上可以应用来分析固体近表面结构和正电子表面态。

四、结 束 语

用慢正电子束入射固体靶,在 1×10^{-6} Torr 的真空条件下,对锗材料,慢正电子的真空电子偶素原子转换率达到 $(80 \pm 10)\%$,为进行电子偶素原子能级结构研究,提供了一个高产额的真空电子偶素源。

值得指出的是,本工作产生真空电子偶素原子的实验方法,将能形成一种新的研究材料表面和近表面层结构的手段。

- [1] K. F. Canter, A. P. Mills, Jr. and S. Berko, *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974), 7.
- [2] S. Chu and A. P. Mills, Jr., *Phys. Rev. Lett.*, **52** (1984), 1689.
- [3] S. Hatamian, R. S. Conti and A. Rich, *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987), 1833.
- [4] 韩荣典、郭学哲、翁惠民、谢力、张少强,物理学报, **37** (1988), 1517.
- [5] P. J. Schultz and K. G. Lynn, *Rev. Mod. Phys.*, **60** (1988), 704.
- [6] 吴关洪、王蕴玉、唐孝威,物理学报, **32** (1983), 417.

PRODUCTION OF VACUUM POSITRONIUM ATOMS

HAN RONG-DIAN GUO XUE-ZHE WENG HUI-MIN SHI XING-JUN XIE LI

Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026

(Received 9 April 1990; revised manuscript received 8 June 1990)

ABSTRACT

Positronium atoms are formed efficiently by slow positron beam hitting a solid target surface in vacuum. The fraction of positrons which formed positroniums is determined by applying the "peak method" to the energy spectra of the positron annihilation radiation measured at different target temperatures and incident positron energies. The fraction is dependent on the target material, temperature and incident positron energy. For germanium, the fraction is as high as 80%.

PACC: 3580; 3690