

汞原子较高激发能级测量的研究

刘 复 汉

(复旦大学物理系)

注意：发表的期刊分两栏，
但是实验报告只要一栏

摘 要

利用自行设计与制作的充汞四极管成功地测得了汞原子的较高激发能级，其中包括用光谱方法不能直接观察到的亚稳能级 6^3P_2 。最佳的实验结果是在汞蒸汽压为 1—2mmHg 和收集极电流为 $10^{-9}A$ 条件下获得。本实验方法可以充实近代物理实验教程中现有的夫兰克—赫兹实验。

一、夫兰克—赫兹实验和汞原子 引言 较高激发能级的测量^[1]

夫兰克—赫兹实验是物理学中的一个著名实验，以电子与原子间的碰撞揭示了原子内部能量量子化效应，获得了诺贝尔奖，现在已成为国内外大学中基本物理教学实验。虽然人们不断地对它进行研究和改进^{[2]、[3]}，但迄今传统的实验所开设的内容仍局限在汞原子第一激发能级的测量上。若干年来，不少人对汞原子较高激发能级的测量一直抱有浓厚的兴趣，许多课本^[4]、实验专著^{[5]、[6]}以及百科词典^[7]都论述了有关实验的装置和原理。有些人曾尝试把它引入到传统的教学实验中来，但都没有获得成功。三十年代，G.P. Harnwell和J.J. Livingood在著名的《Experimental Atomic Physics》一书中描述了他们的试验，但结论是：“利用一种通常的商用管子不能复现夫兰克和赫兹曲线的细节^[5]”。较新的《Experiments in Modern Physics》书中虽然详尽分析了测量较高激发能级的原理，管子结构和应选用的电位模式，然而在结果讨论中仅使用了“可能”这个词^[6]，并没有给出实验的结果。我们专门设计与制作了一种双栅结构的

充汞四极管，选择了一种“合适的”工作模式，成功地测得了汞原子的 6^3P_1 第一激发能级， 6^3P_2 和 6^1P_1 等较高激发能级以及电离能级，展示了原子能级从低到高有序排列的阶梯图象，使这一传统的教学实验深化了一步。二年多的经验表明：新增设的内容不仅使学生能获得更丰富的关于原子结构的信息，而且能学会更多的实验技能。

实验原理 二、汞原子能级结构

汞原子是由原子核和核外80个电子组

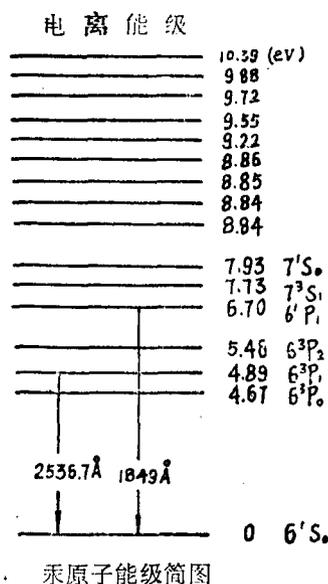
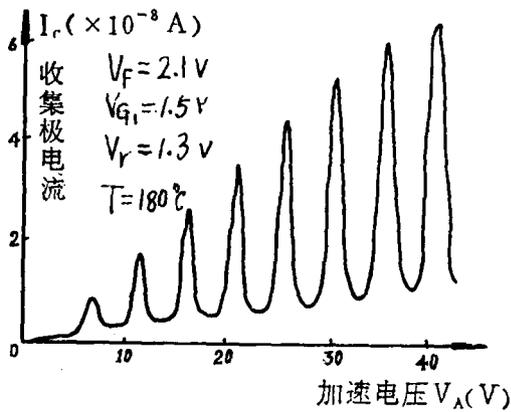


图 1

成。最外层的 2 个价电子的状态决定了原子的能量状态，即光谱项 2^s+1L_J 。能量最低的状态 6^1S_0 称为基态， $6^3P_0, 1, 2$ 是三重态中能量最低的一组激发态， 6^1P_1 是单重态中最低激发能级，最高者为电离能级。图 1 是简化了的汞原子能级图^[8]，图中标出了部分能级符号。由光谱测量知道， 6^3P_1 和 6^1P_1 具有较强的吸收特性。

实验装置 三、实验装置和测量原理及过程

实验用的电子碰撞管是一个具有双栅结构的柱面型充汞四极管。它由阴极 K、栅极 G_1 、栅极 G_2 和收集极 C 组成。 G_1 、 G_2 由钼丝绕制， G_1 表面镀金，它距离阴极 K 0.3mm， G_2 距离收集极 1mm， G_1 、 G_2 相距 5mm。管内所有零件经过严格清洁处理，排气时彻底除气。管内充入汞液采用特殊工艺完成，保证了汞液的纯净。管内安装了非蒸散型消气剂，实验过程中用吸收管内残余气体。这些措施保证了管子具有良好的特性和较长的使用寿命。测量第一激发能时，峰数超过 20 个，第一峰清晰，图 2 示出了曲线的一部分。



以 6^3P_1 能级为特征的弗兰克—赫兹曲线。曲线的周期为 4.9eV

图 2

图 3 是测量汞原子较高激发能的电原理图。 E_f 为灯丝电源 (0—6V)； E_a (0—30V，锯齿波，周期 40—80S) 接于 G_1 和 K 之间作加

速电子用； E_c (0—2V) 为补偿电源； E_r (0—5V) 为阻滞场电源，用来鉴别经过弹性或非弹性碰撞后的电子；A 为微电流测量器 (10^{-1} — 10^{-2} A)；M 为恒温加热电炉。

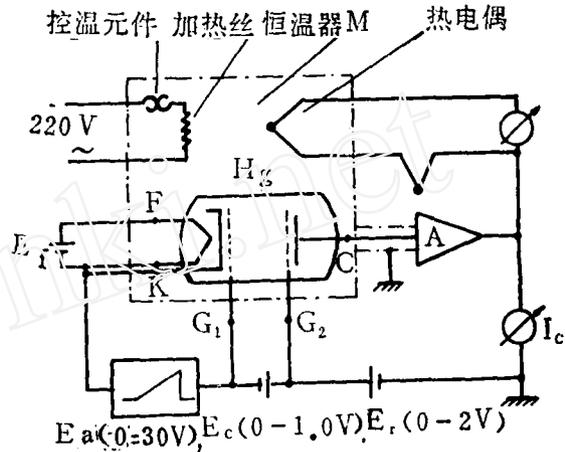


图 3 测量装置

实验中，将 G_1 、 G_2 短接，使其间形成等势空间，为此，弗兰克—赫兹管被划分为：加速区 (K— G_1)，碰撞区 (G_1 — G_2) 和收集区 (G_2 —C) 三个部分。

控制恒温加热炉温度可以选择汞原子蒸汽密度。我们的选择是：使电子运动的平均自由程 $\bar{\lambda}_e$ 与 K— G_1 间的距离 d_{K-G_1} 大致相当，即 $\bar{\lambda}_e \approx d_{K-G_1}$ 。由电子自由程分布函数 $F(x) = \frac{N(x)}{N_0} = e^{-x/\bar{\lambda}_e}$ 可知，电

子在由阴极飞往第一栅的路径上，还会有相当多的电子 (~60%) 会和汞原子发生碰撞，这样的选择具有以下几个特点：

(1) 在通常的第一激发能测量中，往往选用高的原子密度 (汞蒸汽压约 10—20 mmHg)，碰撞区与加速区公用，电子加速路径远大于其平均自由程，电子几乎只能引起 6^3P_1 能级的激发。在现在的实验中，加速路径很短，汞原子密度低，在加速区内，电子与原子碰撞几率已大为减少，电子容易积聚起比较高的能量。随着加速电位的增高，具

有较高能量的电子数也会相应增多。

(2) G_1-G_2 空间是一个足够长的等势碰撞区, 电子和原子在这里以较大的几率和相同的能量碰撞, 这就提高了实验的分辨能力。

(3) 原子密度适中。这种适中的原子密度与要求加速区“小于电子在汞汽中的平均自由程”^[4]的建议相比要高得多, 原子密度的提高保证了足够的碰撞几率, 提高了实验的灵敏度, 为获得较鲜明的谱峰提供了条件。

经过非弹性碰撞损失了动能的慢电子, 它们不能越过收集区的阻滞电场, 随着加速电压的增大, 检流表上就会出现一系列的上升和下降。补偿电位 V_c 在 0—1 伏间选择, 其作用是减少空间电荷(慢电子和离子), 维持碰撞区电子定向运动, 可望增加收集电流和改善分辨率。

实验结果 及分析

四、实验与结果

将管子置于加热炉内, 注意电磁屏蔽。

待炉温升高至 130°C 左右, 开启灯丝电源, 稳定后再开启阻滞场电源和加速极电源。较好的工作温区在 $130-140^{\circ}\text{C}$, 汞蒸汽压约为 $1-2\text{ mmHg}$ 。选择阴极工作温度(调节 V_f 或 I_f) 也很重要, 过高的电子密度易使较多汞原子电离, 引起峰位移动, 数据偏差。过低的电子密度给检测带来困难。一般取 I_c 为几个毫微安为宜。每个管子最佳工作条件应由实验仔细确定。

由实验测得的收集极电流 I_c 与加速电位 V_a 之间的关系由图 4 中的曲线给出, 炉温 $T = 135^{\circ}\text{C}$, 最大收集极电流 $I_c = 5\text{ mA}$ 。在加速电位 V_a 为 $0-27\text{ V}$ 范围内共观测到 18 个谱峰, 它们分属于 4 个组群, 随着组次增高, 谱

峰数也增多。第一峰与第二峰间距为 4.9 V , 显然它们是 6^3P_1 能级对电子吸收所致。第 2 峰后 1.8 V 处出现一尖锐峰, 表明一个新的能级被探明, 其能量应为 $4.9 + 1.8 = 6.7\text{ eV}$ 。这二者随后又在相隔 4.9 和 6.7 伏及其倍数处 ($16.4^5, 22.9^5, 18.2, 24.7^5$) 重复出现, 容易判断它们是二个能级共同吸收的结果。参考图 1 汞原子能级图, 可辨识出后者为 6^1P_1 能级。类似于汞原子的吸收光谱, 在电子碰撞中, 6^3P_1 和 6^1P_1 能级也产生了较尖锐的峰, 这是因为它们都具有较大的激发截面的缘故。在对应于 6^3P_1 峰之后 0.6 V ($19.4, 17.0^5, 23.5^5$) 处, 都出现一个小峰, 它的能量大小为 $4.9 + 0.6 = 5.5\text{ eV}$, 与能级图中的 6^3P_2 相符, 这是汞原子的一个亚稳能级。曲线上其它一些奇异点, 大多都与 $6^3\text{P}_1, 6^3\text{P}_2, 6^1\text{P}_1$ 这三个能级相关。它们的关系由下表给出。此外, 还有其它一些峰, 如 $15.3^5, 21.8, 22.4^5$, 尚待进一步考查。考虑到接触电位差、热初速及激发函数等因素的影响, 曲线的能量坐标可用下式表示 eV

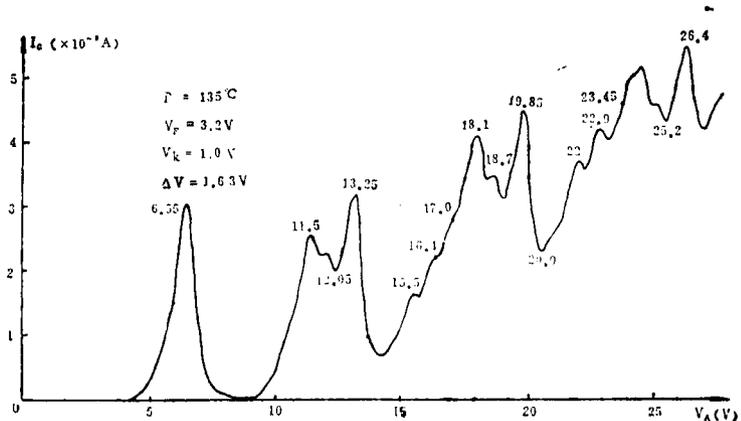


图 4 以 $6^3\text{P}_1, 6^3\text{P}_2, 6^1\text{P}_1$ 为特征的弗兰克-赫兹曲线

$= e(V_a - \Delta V)$, 式中 ΔV 称为净接触电位差, 等于第一峰所在电位与 4.9 V 之差, 图中 $\Delta V = 1.6^5\text{ V}$ 。上表列出了实验测得的拐点与汞原子能级之间的关系, 第 2 列测量值中的数值已扣除 ΔV 的影响, 第 3 列中的 abc 分别代表汞原子的 $6^3\text{P}_1, 6^3\text{P}_2, 6^1\text{P}_1$ 的能值, $a = 4.9, b = 5.46, c = 6.7$ 。

测量值与理论值之间的关系

No.	测量值	组合方式	理论值	误差
1	4.9	a	4.9	/
2	9.8 ⁵	2a	9.8	+0.0 ⁵
3	10.4	a+b	10.3 ⁹	+0.0 ⁴
4	11.6	a+c	11.6	0
5	13.8 ⁵	2c	13.4	+0.4 ⁵
6	14.7 ⁵	3a	14.7	+0.0 ⁵
7	15.3 ⁵	?	?	?
8	16.4 ⁵	2a+c	16.5	-0.0 ⁵
9	17.0 ⁵	a+b+c	17.0 ⁸	-0.0 ¹
10	18.2	a+2c	18.3	-0.1
11	19.2 ⁵	4a	19.6	-0.3 ⁵
12	20.3 ⁵	3c	20.1	+0.2 ⁵
13	21.2 ⁵	3a+c	21.4	-0.1 ⁵
14	21.8	?	?	?
15	22.4 ⁵	?	?	?
16	22.9 ⁵	2a+2c	23.2	-0.2 ⁵
17	23.5 ⁵	a+b+2c	23.7 ⁸	-0.2 ¹
18	24.7 ⁵	a+3c	25.0	-0.2 ⁵

实验结论 **五、结 论**

实验用简单的电学测量方法直接测得了汞原子三重态中的 6^3P_1 和 6^3P_2 以及单重态中的 6^1P_1 能级。其中 6^3P_2 是亚稳能级，用光谱方法是不能够直接观察到的，该能级在 E. Einsporn 和 Franck^[1] 的实验中也没有被测到。另一亚稳能级 6^3P_0 。它的激发截面很小，与 6^3P_2 相比小得多，测量比较困难，若降低汞蒸汽压，有可能观察到。在 4.9 和 6.7 eV 之间只能测到一个能级，而 J. Franck

(上接第215页) 学厚度。当 $d \leq D$ 时， n_2 随 d 有较大变化，与冶炼的整块金属折射率 n_2 有很大差别；当 $d > D$ 时， n_2 随 d 变化很小，基本上为一常数，与整块金属的 n_2 基本相等。上述例子中， $D \approx 92 \text{ \AA}$ ，说明硅片上蒸发银膜的过渡层约为三四十个银原子层厚度。

如果经验公式(1)是正确的话，就可用椭圆偏仪不但能测出金属膜的几何厚度，而且也可测出金属膜与衬底接触的过渡层的光学厚度，这对于了解过渡层的结构可能很有帮助。

和 E. Einsporn 在 1920 年的实验结果和《原子物理学》^[1] 中所引用的资料中的 5.29 和 5.78 eV 是与现在的实验结果不一致，看来需要进一步讨论。能量坐标可用实验曲线自身标定，勿须借鉴其它实验来修正。本实验除了选用性能良好的管子，稳定的电源，恒定的炉温外，仔细选择汞蒸汽密度和入射电子密度是很重要的。用记录仪采集数据时必须十分平缓。

参考文献 **参 考 文 献**

1. E. Einsporn, «Zeit. für physik» p 213. 56 Band 1921.
2. K.H. Carpenter, «Am. J. Phys.» 43, 190(1975)
3. W. Buhr and W. Klein, «Am. J. Phys.» 50, 310(1983)
4. 褚圣麟, 《原子物理学》P 42, 人民教育出版社, 1979.
5. G. P. Harwell and J. J. Livingood, «Experimental Atomic Physics» pp 317—318, 1933.
6. A. C. Melissinos, «Experiments in Modern Physics» pp 8—17.
7. J. Thewlis, «Encyclopaedic Dictionary of Physics» p 314, 1961
8. E.H. 威切曼, 《量子物理学》P 119. 复旦大学物理系译, 科学出版社, 1978

(收稿日期: 1985年7月5日)

我们的实验条件较差，理论水平不高，上述经验规律可能有错。本文的目的仅在于引起大家对这个问题的兴趣和注意，并去研究和解决这个问题。

附 注

硅片上镀膜的全部样片是和杨毓林老师一起在电子衍射仪附设蒸发装置上完成的，玻璃上镀膜是研究生吕还红同志在专用镀膜机上完成的。

(收稿日期: 1985年5月12日)