

文章编号: 0258-7025(2002)08-0735-04

激光诱导荧光法测量原子束速度分布

王德武, 孔羽飞, 扬 移, 靳文峰
(清华大学工程物理系, 北京 100084)

提要 采用双束激光诱导荧光法测量钷原子蒸气束的径向速度及其多普勒宽度分布。采用同位素位移特性进行速度定标, 使测速装置简单, 方法简便易行。给出原子束径向速度及其多普勒宽度分布。径向速度随 $|\beta|$ 角增加而近似线性减小。多普勒宽度随 $|\beta|$ 角增加而近似线性增大。

关键词 原子蒸气束, 激光诱导荧光, 速度分布, 多普勒宽度

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Measurement of Velocity Distribution of Belted Vapor by Laser Induced Florescence

WANG De-wu, KONG Yu-fei, YANG Yi, JIN Wen-feng

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The radial velocity distribution and Doppler width distribution of Gd metal atomic vapor heated by the liner electronic gun is measured by the dye double laser induced florescence. With demarcating the velocity by isotope displacement characteristic, the measuring device is simplified. The radial velocity and Doppler width distribution of belted atomic vapor are given. The radial velocity approximately linearly decreases with $|\beta|$ angle increasing. The Doppler width approximately linearly increases with $|\beta|$ angle increasing.

Key words belted atomic vapor, laser induced fluorescence, velocity distribution, Doppler width

1 引 言

金属高温蒸发在许多领域里得到广泛应用。原子蒸气激光同位素分离就是其中最重要的应用领域。描述原子束的物理特性有原子束的速度、密度和温度分布。对这些特性的分析, 除了理论研究外, 很重要的一种方法就是实验测量。测量原子束速度分布的方法较多^[1~4], 其中激光诱导荧光法具有实时无损的特点, 因此在流体和稀薄气体动力学研究方面得到广泛应用。本文介绍一种简单的双束激光诱导荧光测量原子束速度的方法。利用钷原子同位素位移的特性来标定原子束的速度, 因而可以使测速装置简化。

2 实验原理及装置

2.1 测速装置

实验测量原子束速度的系统(如图 1 所示)有: 360 氩离子激光器抽运 801-D 型稳频环形染料激光器, E 型电子枪加热原子束发生器(原子炉)和 CCD 荧光信号探测器。在原子炉内, 由电子枪(功率为 600W)加热坩埚内的钷金属, 使其熔化蒸发形成原子蒸气束。蒸气束经准直狭缝形成具有 8 mm 宽的扇形原子束。激光功率为 80 mW, 被分成两束引入原子炉。第一束激光(激光 1)横向进入原子炉, 并与扇形原子束相作用。第二束激光(激光 2)由原子炉上方中心窗口引入与扇形原子束相作用, 并与激光 1 相交于一点 X_c 。激光作用区的原子束密度为 10^{12} 原子/cm³。荧光信号的探测方向与两束激光同时垂直。为消除背景光和激光散射光对 CCD 探测信号的影响, 横向激光 1 与原子束作用区置于暗盒

收稿日期 2001-07-09; 收到修改稿日期 2001-11-01

作者简介: 王德武(1933—), 男, 清华大学工程物理系教授, 主要从事激光应用研究。E-mail: wangdw@mail.tsinghua.edu.cn

前,并用一维 2048 个像元的 CCD 固体成像器件从暗盒侧面狭缝前探测横向激光 1 产生的荧光信号,同时将激光 2 在与激光 1 作用点处产生的荧光信号一并进行测量。

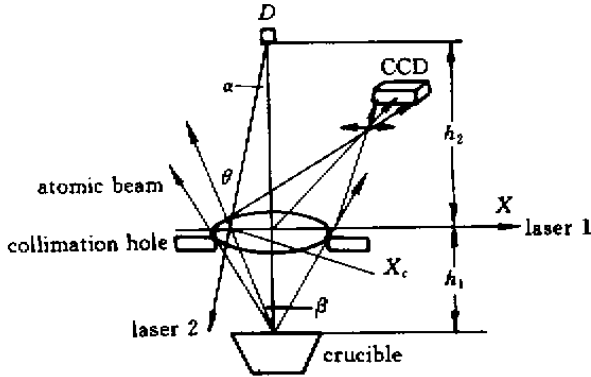


图 1 原子束测速原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of belted atomic vapor measure velocity theory

将钐金属放入 $2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 坩埚内,由功率为 600 W 的电子枪加热,使其熔化蒸发。激光 1 与坩埚蒸发面的距离 $h_1 = 95\text{ mm}$ 。激光 2 引入原子炉的位置被固定在坩埚中心延长线上(即扇形束对称轴上)的 D 点,它与激光 1 的距离 $h_2 = 220\text{ mm}$ 。激光 1 与扇形束的作用长度 $d = 140\text{ mm}$,原点位于中心。改变激光 2 的入射角 α ,即改变激光 2 与激光 1 的作用点位置 X_c ,就可分别测出横向(X 方向)不同点处原子束沿着 θ 角方向的径向速度。

2.2 测速原理

测量原子束速度的原理如图 1 所示。当激光与原子束相互作用时,其径向速度为

$$v = \frac{c(\nu_L - \nu_0)}{\cos\theta\nu_0} = \frac{\lambda_0\Delta\nu}{\cos\theta} \quad (1)$$

其中 $\Delta\nu = \nu_L - \nu_0$ 为多普勒频移, ν_L 为激光频率, ν_0 为原子静止时能级跃迁的共振频率, λ_0 为共振波长。与 CCD 的 2048 个像元所对应可测量长度为 140 mm 。调整 CCD 的位置和聚焦透镜的前后距离,可使 CCD 起始像元采集点为准直原子束与激光 1 作用的起始点,而 CCD 中心位于原子束对称中心与激光 1 的交点,即 1024 像元对应 $x = 70\text{ mm}$ 处。由于激光 1 与原子束对称中心相垂直,根据图 1 可给出 α, β 的关系式为

$$\beta = \arctan \frac{x}{h_1} = \arctan \frac{(|1024 - B|) \times 70}{h_1 \times 1024} \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan \frac{x}{h_2} = \arctan \frac{(|1024 - B|) \times 70}{h_2 \times 1024} \quad (3)$$

$$\theta = \alpha + \beta$$

其中, B 为激光 2 与激光 1 共同作用点处对应的 CCD 像元数。其值由 CCD 像元采集电荷数的峰值确定。

当钐原子从能级 532.977 cm^{-1} 跃迁到 17795.267 cm^{-1} 时,其相应激光共振波长 $\lambda_0 = 579.299\text{ nm}$ 。同位素 ^{160}Gd 与 ^{158}Gd 的位移量 $\Delta\nu_i = 1.12\text{ GHz}$ 。在激光扫描过程中, ^{160}Gd 与 ^{158}Gd 两个吸收峰先后出现的采样间隔次数为 N 。相邻两次采样的频差为 $\Delta\nu_i/N$ 。由 CCD 探测的荧光信号得知 $N = 23$,因此, CCD 相邻两次扫描间的频率间隔为

$$\Delta\nu_0 = \frac{\Delta\nu_i}{N} = 4.87 \times 10^7\text{ Hz}$$

待测处 ^{160}Gd 吸收峰与激光 1 测得横向速度为零($x = 0$)处 ^{160}Gd 吸收峰间的采样间隔数 ΔN ,由此可知频移量 $\Delta\nu = \Delta N \times \Delta\nu_0$,故式(1)可写成

$$v = \frac{\lambda_0\Delta\nu}{\cos\theta} = \frac{\lambda_0\Delta N\Delta\nu_0}{\cos\theta} \quad (5)$$

相应多普勒宽度为

$$\Delta\nu_d = \frac{\Delta N_B\Delta\nu_0}{\cos\theta} \quad (6)$$

其中 ΔN_B 为多普勒宽度的 CCD 采样间隔数。

3 实验结果与分析

3.1 钐原子束横向速度分布

如果将激光 2 挡住,仅有激光 1 与扇形原子束相作用,这时由 CCD 测得的荧光信号如图 2 所示。其中每一条曲线均表示具有相同的横向速度 v_x 的空间分布情况。在中间 $x = 0$ 处(对应的 CCD 像元数为 1024),其峰值最高。荧光信号的峰值为原子最可几速度,近似于原子的平均速度。如果所测得第 K 个峰与最高峰之间的采样间隔次数为 ΔN ,那第 K 个峰所对应的横向速度为

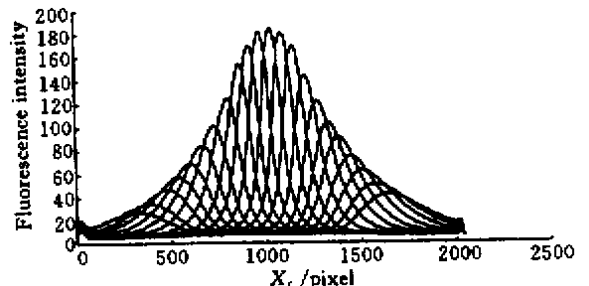


图 2 CCD 探测横向荧光信号分布

Fig.2 CCD detect crosswise fluorescent light signal distribution

$$v_{xk} = \lambda_0 \Delta \nu_k = \lambda_0 \Delta N \Delta \nu_0 \quad (7)$$

测速的激光波长选为 579.299 nm,由此可得相邻两个峰之间的横向速度差为

$$\Delta v_x = \lambda_0 \Delta \nu_0 = 28.21 \text{ ms}^{-1}$$

由图 2 所测得的横向速度分布如图 3 所示。由图 3 看出,横向速度在中心对称轴处 ($x = 0$) 为零,速度 v_x 随 $|X|$ 值增大呈线性增加,并呈对称分布。

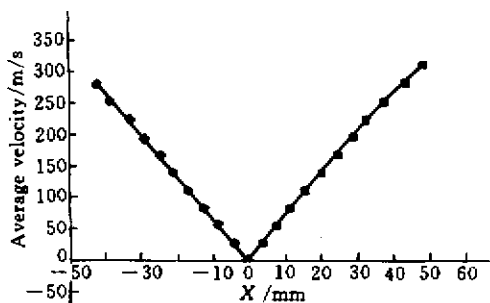


图 3 横向速度 v_x 分布

Fig.3 Transverse velocity v_x distribution

3.2 钷原子束径向速度及多普勒宽度分布

激光 1 与激光 2 同时与扇形束相作用。当激光 2 入射方向在对称轴左侧时,激光扫描所测得的荧光信号分布如图 4 所示。其中对称分布的荧光信号曲线仍为激光 1 扫描所得。图 4 与图 2 不同,出现一个很窄的尖峰。这是由激光 2 扫描所得。为测定径向速度,先找出激光 1 测得的中心最高峰位置(即 $x = 0$ 处),因为它所对应的激光频率为原子的共振频率 ν_0 。图 5 给出激光 2 扫描时,在同一个位置先后出现两个峰。其中第一个峰是对应于 ^{160}Gd 同位

素的峰,而另一峰是与 ^{158}Gd 相对应的。两个峰之间的频差为 $\Delta \nu_i$ 。根据式(5)和(6),可以分别求出原子束的径向速度及其多普勒宽度。改变激光 2 的入射方向可以分别测得不同 β 角的径向速度和多普勒宽度。

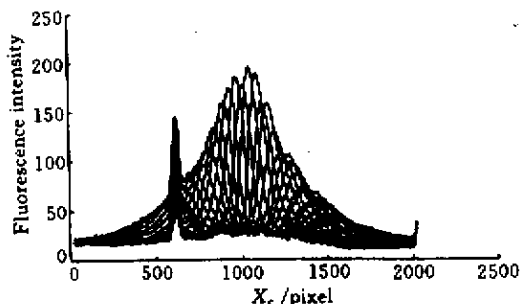


图 4 激光 2 左侧入射时 CCD 探测空间信号分布

Fig.4 CCD signal distribution when laser 2 left side incidence

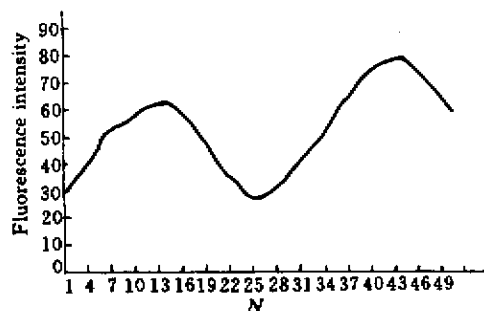


图 5 激光 2 扫描时 X_c 处荧光信号分布

Fig.5 X_c fluorescent light signal distribution when laser 2 scanning

表 1 激光 2 扫描时左侧横向各点 X_c 的测量参数

Table 1 Measurement parameter of left side crosswise dots X_c when laser 2 scanning

X_c /mm	ΔN	Doppler interval	β /degree	Radial velocity/ ms^{-1}	Doppler width/ ms^{-1}
11.14	34.5	11.5	6.69	987.04	329.01
15.52	33.4	12.5	9.28	968.24	362.37
19.89	32.0	13.0	11.83	943.95	383.48
27.55	29.6	13.0	16.17	909.21	399.32
36.30	24.8	13.5	20.91	810.13	441.00
45.05	22.2	14.0	25.39	783.57	494.15
54.35	19.3	14.0	29.77	752.41	545.79

表 1 和图 6 给出中心线左侧所测得径向速度和多普勒宽度随 β 角的分布。表 1 中的 ΔN 为激光 2 扫描时出现第一个峰与激光 1 最高峰间的采样间隔数。 X_c 为激光 2 入射位置。 ΔN_B 为激光 2 扫描时出现第一个峰的半高宽采样间隔数。

将激光 2 的入射方向移至中心线右侧,同样可测得不同 β 角的径向速度及其多普勒宽度分布,右侧径向速度及其多普勒宽度分布曲线如图 7 所示。

实验误差主要来源于:原子蒸发系统中电子枪蒸发的稳定性、染料激光扫描的均匀性和 CCD 扫描

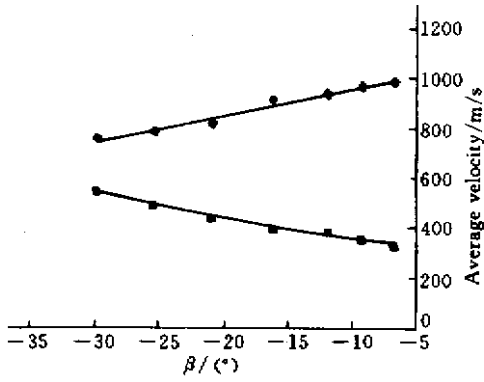


图 6 左侧径向速度及多普勒宽度分布

Fig.6 Left side radial velocity and Doppler width distribution

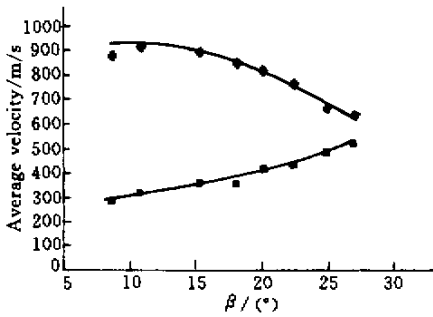


图 7 右侧径向速度及多普勒宽度分布

Fig.7 Right side radial velocity and Doppler width distribution

谱标定速度的大小等因素。在测试(2 min)中,电子枪功率不稳定性小于 2%;染料激光扫描的稳定度,在 2 GHz 的扫描范围内不大于 10 MHz;CCD 积分时间的频率稳定度相当高,其误差可以忽略不计,峰值标定的像元误差为 8/2048。综合考虑,测速误差约为 30 m/s。

4 结 论

双束激光诱导荧光法测速的特点是,利用同位素位移特性进行速度定标,测速原理简单,实验方法简便可行,对实验装置没有特殊要求,并可以进行实时测量。

1) 横向速度 v_x 在荧光曲线最高峰处($x = 0$)为零,以此为中心左右对称分布, v_x 随 X_c 增大呈线性增大。

2) 径向速度分布也呈对称分布,径向速度随着 $|\beta|$ 角增加而减小,在中心处最大。

3) 径向速度的多普勒宽度与径向速度的趋势相反,多普勒宽度 Δv_d 随着 $|\beta|$ 角增加而增大。

参 考 文 献

- 1 W. Husinsky, G. Betz, I. Girgis *et al.*. Velocity distribution and sputtering yields of chromium atoms under argon, oxygen and carbon ion bombardment [J]. *J. Nuclear Materials*, 1984, **128&129** 577 ~ 582
- 2 W. Berres, H. L. Bay. The velocity distribution of sputtered Zr atoms for irradiation at normal and oblique angle of incidence [J]. *Appl. Phys. A*, 1984, **33** 235 ~ 241
- 3 Akihiko Nishimura, Hironori Ohba, Takemasa Shibata. Velocity distribution in high density Gadolinium atomic beam produced with axial electron beam gun [J]. *J. Nuclear Science and Technology*, 1992, **29**(11):1054 ~ 1060
- 4 Kong Yudei, Wang Dewu, Chi Wanli *et al.*. Measurement of 2-D velocity [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23** (5) 445 ~ 448 (in Chinese)
- 5 D. W. Wang, J. H. Wang, L. J. Wang. Laser induced fluorescence measure Ga atomic spectrum [J]. *Journal of Tsinghua University* (清华大学学报 · 自然科学版), awaiting publish (in Chinese)