

# 原子蒸气束二维空间纵向速度分布的 激光法测量

孔羽飞 王德武 迟万里 应纯同

(清华大学工程物理系, 北京 100084)

**提要** 用激光诱导荧光法测量了真空室内原子蒸气束的二维速度分布, 给出了原子蒸气束的平均速度与空间方位角的关系。

**关键词** 原子蒸气束, 速度分布, 激光诱导荧光

为研究真空中金属蒸发过程的需要, 有必要对距离蒸发表面较远处的分子流特性作进一步更为全面的了解, 如分子流区域蒸气流动速度的空间分布状态就是其中这一。

自从 60 年代中后期激光器的发展为探测原子蒸气束提供了新方法, 原子束速度分布可通过激光 Doppler 频移的感生荧光曲线而获得。利用 Doppler 效应的激光感生荧光法具有实时且无损的特点, 得到广泛的应用。多年来, 这种激光感生荧光法在各领域的应用已经证明了它较机械斩波法测量更为方便, 且分辨率更高, 尤其是对超声速度的束流。本文正是基于 Doppler 原理对原子束的纵向速度及其分布进行了测量。

## 1 测量原理及实验装置

### 1.1 测量原理

激光与原子作用时, 当激光频率与原子的固有跃迁频率相同, 原子从低能态受激跃迁到高能态。在随后进行的由高能态退激发回到低能态时, 原子以发出荧光的方式释放其吸收的能量。当原子以一定速度运动时, 原子吸收光子的频率与原子本身固有的跃迁频率就有一个频移。速度不同, 频移量也随之不同。那么, 当连续调谐激光频率时, 具有不同速度的原子先后被激发而发光。根据所产生的荧光强度变化就可以确定原子蒸气的速度分布了。这就是激光诱导荧光法测量原子速度分布的基本思想。

由 Doppler 频移公式

$$\nu_L = \nu' = \nu_0(1 \pm V/c) \quad (1)$$

其中,  $\nu_L$  为诱导激光频率,  $\nu'$  为原子的吸收频率,  $\nu_0$  为原子跃迁的中心频率,  $V$  代表原子的速度,  $c$  表示真空中的光速。可得

$$\Delta\nu = \nu_L - \nu_0 = \nu_0(V/c)$$

因此

$$V = c\Delta\nu/\nu_0 = \Delta\nu\lambda_0 \quad (2)$$

其中  $\lambda_0 = c/\nu_0$  为原子跃迁的中心波长。

图 1 中,诱导荧光信号中出现了两个峰,其中右边的峰是由与原子束运动方向相垂直的激光束诱导原子发光所产生的,荧光峰与原子跃迁中心频率相对应,该中心频率即为无 Doppler 效应时诱导激光的频率。而左边的峰是由与原子束相向入射的诱导激光所产生,峰值意味着原子群中能被频率为  $\nu$  (包括线宽范围) 激光所诱导的原子数最多,那么具有与此频率相应的速度就叫作平均(或平移)速度(率)。原子荧光信号随频率的变化反映了原子蒸气束中原子速度分布,因此也就有了速度半宽度。图中的频标信号是由标准具产生的,它用来标定荧光信号中两个峰之间的频移量<sup>[1]</sup>。因此只要知道了诱导激光频率(或波长)和频移量,就可算出原子的平均速度。如果测出了荧光曲线上各点到中心频率处(该点的原子速度为零)的频移,那么就得到了速度分布。

## 1.2 实验装置

实验装置如图 2 所示。整个实验装置仍由三个主要子系统构成,即原子蒸发器系统、激光器系统和荧光信号接收系统。其中,前两部分装置的实验条件与文献[2,3]中所报道的相同。

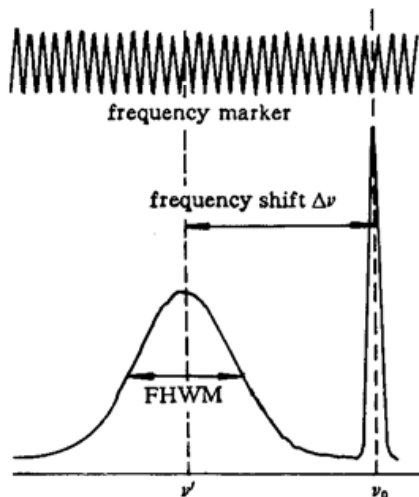


Fig. 1 Schematic diagram of measurement of velocity distribution by Doppler frequency-shift

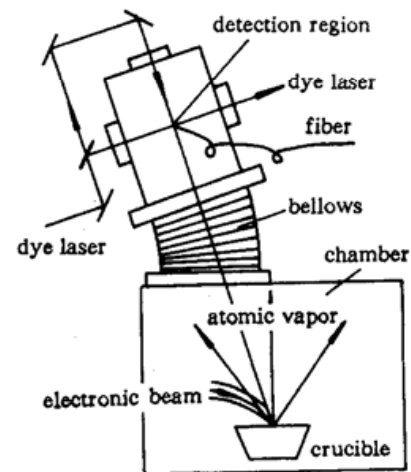


Fig. 2 The diagram of the experiment

与一般的测速实验不同<sup>[1]</sup>,本实验所研究的是二维纵向(即径向角方向)原子蒸气束的速度及其分布。本实验所选用的金属样品为钷,诱导激光的中心波长为 579.299 nm。

## 2 实验结果与讨论

实验中测量了四种不同加热功率情况下的空间速度分布。它们分别是 390 W、420 W、520 W 和 650 W。考虑到实验中得到的荧光信号记录很多(不同角度及不同的电子枪加热功率),为分析问题方便在此只选取有代表性的进行讨论分析。图 3 为一组荧光信号曲线。根据上述实验原理,很容易从该图中得到 Doppler 频移量为 1350 MHz,它对应的平均速度为  $(782 \pm 30)$  m/s。图 4 为所有这些加热功率条件下的平均速度随方位角的分布规律。可以看出,至少在  $25^\circ$  角内,平均速度与方位角基本上成线性关系。表征原子蒸气的速度分布,除了需要知道其平均速度外,还应知道这种速度分布的半宽度 FWHM。从图 3 的荧光曲线不难看出,由于钷的同位素结构的存在<sup>[3]</sup>,从左至右曲线中的几个峰分别为  $^{160}\text{Gd}$  的 Doppler 峰,  $^{158}\text{Gd}$  的

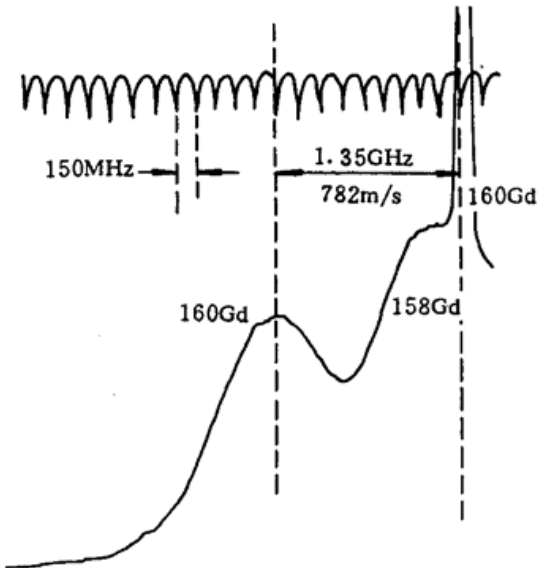


Fig. 3 Induced fluorescence curve with a heating power of 650 W and an azimuth of 19°

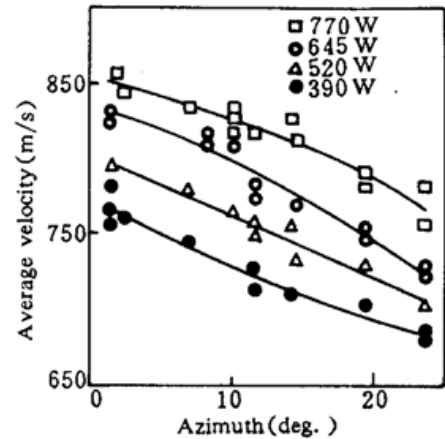


Fig. 4 Relations among average velocity of atomic vapor, azimuth and heating power

Doppler 峰,  $^{160}\text{Gd}$  无 Doppler 频移峰等等。而且它们之间还存在着相互重叠现象, 如  $^{160}\text{Gd}$  的荧光信号中就叠加有  $^{158}\text{Gd}$  的荧光成分, 而我们计算原子平均速度是从图 3 中  $^{160}\text{Gd}$  的 Doppler 峰与  $^{160}\text{Gd}$  的无 Doppler 峰之间的 Doppler 频移量来确定的。如果没有荧光重叠现象的话, 那么曲线  $^{160}\text{Gd}$  的 Doppler 分布就直接反应了原子的速度分布。但由于有上述现象的存在, 就得设法将  $^{158}\text{Gd}$  的荧光成分去掉。已知  $^{160}\text{Gd}$ ,  $^{158}\text{Gd}$ ,  $^{156}\text{Gd}$  的分支比, 然后根据它们都具有相同的分布规律和荧光信号强度不同的特点, 就可获得原子的平均速度和速度分布。依照此办法, 对所有荧光曲线进行处理后得到了图 5 所示的结果。需要说明的是, 图 5 所给出的是在蒸发轴线上原子速度半宽度与原子平均速度之间的关系。因为在实验中始终存在这一现象, 原子的平均速度越大, 其速度分布的半宽度就越小, 也就是说平均速度与原子速度半宽度之间存在着一种关系。而图 5 正是反应了它们之间的这种关系, 它可用二次多项式来表示(即图中虚线)。这个关系曲线只适合于用来描述不同的加热功率条件下同一位置处的原子蒸气束特性, 只要知道了原子蒸气束运动的平均速度, 那么其速度半宽度也就随之确定了。

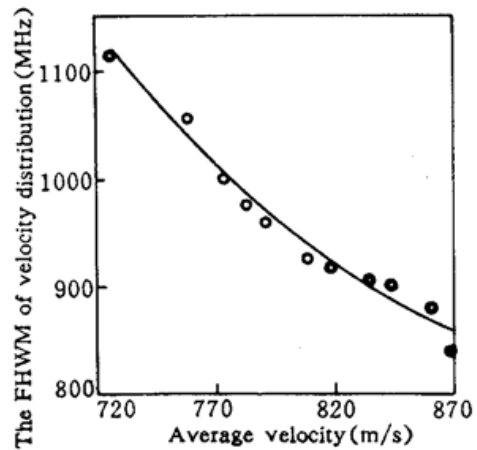


Fig. 5 The relation between FWHM of velocity distribution and average velocity for the atomic vapor

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平均速度大小的标定等因素, 综合考虑, 速度的误差约为 30 m/s。

### 参 考 文 献

- 1 杜 清, 朱利洲, 李世芳 等. 用激光感应荧光法测量钇原子束的原子速度分布. 中国激光, 1990, 17 (12): 726
- 2 孔羽飞, 王德武, 吕江华 等. 金属原子束横向速度及其分布的激光法测量. 中国激光, 1994, A21(1): 16
- 3 孔羽飞, 王德武, 吕江华 等. 激光法实时测量真空室内原子蒸气束的二维密度通量分布. 中国激光, 1994, A21(4): 261

## Measurement of 2-D Velocity Distribution of Atomic Vapor by Laser Induced Fluorescence

Kong Yufei Wang Dewu Chi Wanli Ying Chuntong

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

**Abstract** 2-D velocity distribution of metal atomic vapor was measured by laser induced fluorescence (LIF), and an average velocity distribution vs azimuth was also given.

**Key words** atomic vapor, velocity distribution, laser induced fluorescence (LIF)

### 一种新型的钠原子磁光陷阱(MOT)

磁光陷阱是冷却和捕获超冷原子的主要方法,目前国际上不少实验室中均已获得超冷原子气体。磁光陷阱的工作原理是在超高真空( $10^7$  Pa)钠原子吸收池中,用六束激光(上、下、左、右、前、后)交汇于吸收池中心。同时在吸收池上装有一对反向连接的亥姆霍兹线圈,形成以中心为零磁场的四极矩非均匀磁场。在一定的温度下吸收池中的原子蒸气压力在  $10^{-6}$  Pa 时,处于麦克斯韦速度分布尾部的原子(速度接近于零)在光束偏振梯度力的作用下,原子的热运动被冷却,原子速度降低。由于钠原子具有磁矩,在空间非均匀磁场的作用下被囚禁于零磁场处。这样在磁光陷阱中囚禁了超冷原子(温度可达  $25 \mu\text{K}$  以下)。我们研究的磁光陷阱不同于国际上通常的陷阱。在通常的磁光陷阱中(MOT)用于克服光抽运的光束为红移弱光束,而我们用的为蓝移强光束,其失谐量为  $+10 \sim +100$  MHz。蓝移强光束不仅起到克服光抽运的功能,同时由于原子在光场中交流斯塔克效应所产生的能级移动,提供了极强的冷却力,它非常有效地冷却速度较大的原子。因而,这种磁光陷阱具有捕捉原子速度范围大的特点,这就意味着可以提高超冷原子的密度,这是当前 MOT 研究中的一个核心问题。

初步估算超冷原子的温度低于  $60 \mu\text{K}$ ,原子密度约  $10^8 \text{ cm}^{-3}$  以上,详细参数正在测量中。

超冷原子气体团是一个十分有用和重要的工作物质,利用超冷原子团为光电子技术提供刻制纳米微结构的最先进的方法,是实现微电子器件刻制的重要手段(远优于光刻和电子刻划技术)。超冷原子团还可提供现代应用技术中不可缺少的最精密的原子钟、探矿用的原子干涉仪、导航用的原子陀螺和观察表面结构的原子显微镜。超冷原子团对物理学实验研究十分重要,利用它可进行高分辨光谱研究、非线性光学研究、量子光学研究以及验证物理学基本定律。最近利用超冷原子实现了爱因斯坦-波色子凝聚,为人类提供了一种新物质,它的应用前景是难以估量的。所以对超冷原子气体的研究不仅推动人们在更深层次上认识物理的基本规律,也必将推动科学技术的深远发展。

(王育竹 刘勋铭 林岳明 周善钰 霍芸生 徐信业 蔡惟泉 李佛生  
洪 涛 中国科学院上海光机所 量子光学开放实验室,上海 201800

1996年4月1日收稿)