

# 一种高分辨里德堡原子外场 光谱实验方法\*

龚顺生 王嘉珉 刘炳模 顾思洪 戴作跃

(中国科学院武汉物理研究所, 武汉 430071)

**摘 要** 介绍一种用于里德堡原子外场效应研究的实验方法。用该方法获得了铯原子里德堡态各种外场效应研究的初步结果, 显示了此方法用于外场效应研究的有效性。

**关键词** 里德堡原子, 外场效应, 高分辨。

## 1 引 言

近 30 年来, 里德堡原子外场效应的研究一直是原子物理研究中的前沿课题。对于里德堡原子外场效应的实验研究, 一方面由于跃迁振子强度很低的里德堡态的激发和外场分裂所导致的跃迁振子强度进一步降低, 使多数实验工作需要采用大功率脉冲激光的强激发; 另一方面, 由于脉冲激光的低分辨率导致被激发的里德堡态不能很高, 实验中必须使用能产生强外场的设备, 如超导磁体<sup>[1]</sup>。随着研究工作的发展, 要求用更高分辨率的外场实验技术来获得高精度的外场效应光谱, 以便能发现一些更精细的原子外场特性和在更高的精度下检验理论对原子外场行为描述的准确性。近年来的实验研究进展表明, 可以用连续波激光激发高准直原子束技术获得高分辨率的原子外场效应光谱, 而不必使用强场和超导磁体, 但需采用粒子计数技术和高准直原子束, 从而使实验技术和实验装置变得很复杂<sup>[2, 3]</sup>。

本文报道了一种新的高分辨里德堡原子外场效应研究实验方法。该方法具有光谱分辨率高、探测灵敏度高、实验装置比较简单、施加外场(尤其是磁场)比较方便等优点。在本方法中, 不需要使用原子束、超导磁体, 也不需要使用复杂的粒子计数技术。类似方法曾用于原子在零场下的光谱实验<sup>[4, 5]</sup>, 作者将这种方法用于铯原子里德堡态强外场效应的实验研究, 并取得了满意的结果, 为在比较简单的实验条件下进行高分辨率里德堡原子外场效应研究开辟了一条新的途径<sup>[6]</sup>。

## 2 实验方法

实验装置如图 1 所示。热离子二极管做成具有分立的激光作用区和离子探测区, 二者之间

\* 国家自然科学基金重点资助项目

收稿日期: 1996 年 6 月 3 日; 收到修改稿日期: 1996 年 9 月 27 日

用不锈钢栅网分隔。在作用区加有一对斯塔克(Stark)板,用于施加外电场。热离子二极管连同其加热炉一起被置于电磁体的极靴间,以便于施加外磁场。来自两台单模连续染料激光器的两束激光反向同轴地射入热离子二极管的作用区(必要时也可同向射入)。其中一台单模连续激光(Coherent, 899-21)工作于 DCM 染料波段,用于激发铯原子  $6^2S_{1/2} \rightarrow 5^2D_{5/2}$  的电四极跃迁;另一台单模连续激光(Coherent, 899-29)工作于 R6G 染料波段,用于把铯原子从  $5^2D_{5/2}$  态进一步激发到其各个里德堡态。

在本方法中,通过第一级单模激光器对  $6^2S_{1/2} \rightarrow 5^2D_{5/2}$  激发过程中的速度选择(激光线宽~1 MHz,多普勒展宽~1 GHz)使第二级激光的激发过程等效于对一高准直原子束的激发。通过这种速度选择作用,不仅实现了光谱的高分辨,而且也使得在实验中挑选出速度与外场有特殊取向关系的原子来研究成为可能。例如,可以采用使第一级激光束方向与磁场方向垂直、并将其波长稳定在第一级跃迁多普勒轮廓中心的方法,把被研究原子的速度集中于垂直于磁场的平面内,从而减少里德堡原子外磁场实验研究中的运动斯塔克效应。如果能采用三级激发方案,则再通过第二级激发的选择,可以达到完全消除运动斯塔克效应的目的。

本方法的高灵敏度是通过高增益的热离子二极管技术和两步共振增强激发技术实现的。在热离子二极管中,被激光激发到里德堡态的原子因碰撞而电离,所产生的离子对二极管空间电荷的中和作用造成电流信号约增强  $10^6$  倍。而共振两步激发和普通非共振双光子技术相比,信号还将进一步增强。从作者对这两种情况所作的实验比较来看,尽管共振两步激发方案的第一级采用了跃迁几率很小的电四极跃迁,所得到的光谱信号和非共振双光子技术相比,还有几百倍的增强效果。

和其它采用两步激发的高分辨外场实验方法一样,在本方法中,很重要的一点是要实现第一级激光波长对原子第一级跃迁在外场中演化的准确跟踪。为此,必须事先对原子第一级跃迁随各种外场变化的行为进行相应的理论计算和实验测量,以此作为进行原子里德堡态实验时准确调整第一级激发波长和处理原子里德堡态外场光谱数据的依据。本方法在这方面的优点是,可以在不改变其它实验条件的情况下,仅通过扫描第一级激光波长就能获得上面所述的外场跟踪实验数据。

### 3 结果与讨论

图 2、图 3、图 4 分别是采用上述方法研究铯原子里德堡态的外电场、外磁场、外电磁交叉场效应所获得的典型实验结果。所研究的原子态、激光的偏振方向(交叉场中相对于磁场而言)、外场的数值均已标在图中。这是首批利用泡样品获得的原子里德堡态高分辨外场效应实验研究结果。从这些图谱的分辨率、信噪比和所用外电磁场数值之低,可以看出该方法用于原

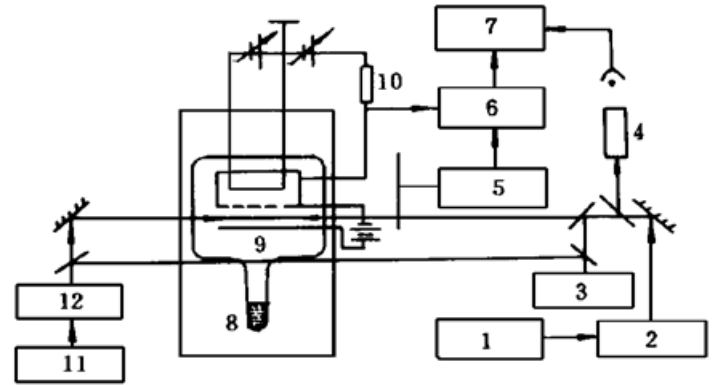


Fig. 1 Schematic of the experimental set-up

- 1: Ar<sup>+</sup> laser; 2: dye laser (899-29); 3: wavemeter; 4: F-P etalon; 5: chopper; 6: lock-in amplifier; 7: recorder; 8: oven; 9: detector; 10: resistor; 11: Ar<sup>+</sup> laser; 12: dye laser (899-21)

子里德堡态外场效应高分辨光谱研究的有效性。

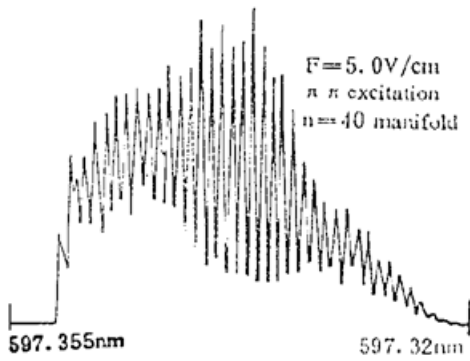


Fig. 2 Stark spectrum of Cs

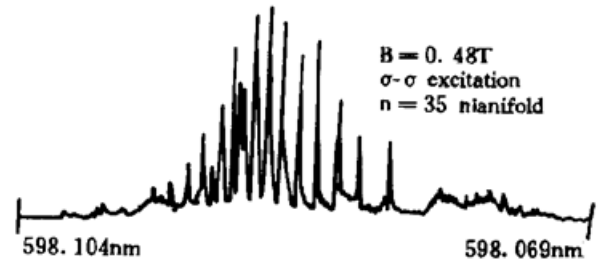


Fig. 3 Diamagnetic spectrum of Cs

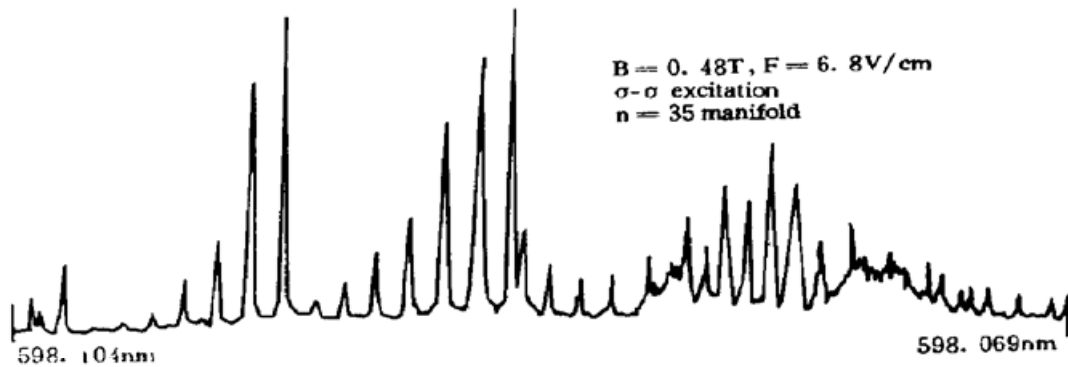


Fig. 4 Crossed electric and magnetic field spectrum of Cs

目前,用此方法得到的光谱线宽(HWFM)约为 50 MHz,主要来自  $5 \text{ } \tilde{D}_{5/2}$  态超精细结构、一级激光的抖动、激光激发的饱和增宽、外场的不均匀增宽等因素。在对  $5 \text{ } \tilde{D}_{5/2}$  态的超精细结构进行适当的选择和对实验条件作些相应的改善后,光谱线的宽度可望压缩到近  $10 \text{ MHz}^{[4]}$ 。图中,由于实验所用波长计(Burleigh, WA-20 型)精度的限制,光谱线波长的绝对定标精度约为  $0.03 \text{ cm}^{-1}$ 。在改进激光波长测量精度和采用双向波长定标方法的情况下,光谱线波长的绝对定标精度可以大大提高<sup>[5]</sup>。在获取图 2 至图 4 所示光谱时,采用了自由光谱范围(FSR)为 150 MHz 的法布里-珀罗干涉仪(Burleigh, FP-500)对第二级激光器的波长扫描进行定标,使图中光谱线的相对定标精度达到约  $0.005 \text{ cm}^{-1}$ 。在适当压缩光谱线线宽、采用自由谱范围更小的定标干涉仪和增加第一级激光器稳定性的条件下,光谱线波长的相对定标精度还可以进一步提高。

因此,本方法所具有的分辨率高、灵敏度高、简单、有效等特点,将在现代原子外场效应光谱的研究中发挥重要作用。该方法的唯一不足之处是需要同时使用两台单模可调激光器。但随着半导体单模可调激光技术的发展,该方法的应用将更加广泛。

### 参 考 文 献

- [1] C. A. Nicolaidis, C. W. Clark, M. H. Nayfeh, Ed., *Atoms in Strong Fields*, New York, Plenum Press, 1990
- [2] H. Rinneberg, I. Neukammer, G. Jonsson *et al.*, High- $n$  Rydberg atoms and external field. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(4): 382~ 385
- [3] T. Van der Veldt, W. Vassen, W. Hogervorst, Low-field diamagnetism in helium Rydberg states. *J. Phys. (B)*, 1992, **25**(15): 3295~ 3305
- [4] C. J. Sansonetti, C. J. Lorenzen, Doppler-free resonantly enhanced two-photon spectroscopy of  $np$  and

*nf* Rydberg states in atomic cesium. *Phys. Rev. (A)*, 1984, **30**(4) : 1805~ 1811

- [ 5] K. H. Weber, C. J. Sansonetti, Accurate energies of *nS, nP, nD, nF* and *nG* levels of neutral cesium. *Phys. Rev. (A)*, 1987, **35**(11) : 4650~ 4660
- [ 6] S. S. Gong, J. M. Wang, B. M. Liu *et al.*, A high resolution method for the investigation of Rydberg atoms in strong fields, The 15th. *International Conference on Atomic Physics, Th. 14*, Univ. of Amsterdam, Netherlands, 1996

## An Experimental Method for the High Resolution Investigation of External Field Effects of Rydberg Atoms

Gong Shunsheng      Wang Jiamin      Liu Bingmo  
Gu Sihong      Dai Zoyie

(*Wuhan Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071*)

(Received 3 June 1996; revised 27 September 1996)

**Abstract** An experimental method for the high-resolution investigation of external field effects of Rydberg atoms is proposed. From the preliminary results of Rydberg Cs atoms in various external fields obtained by this method, the potential of the method for the external field effect studies of Rydberg atoms has been demonstrated.

**Key words** Rydberg atoms, external field effect, high-resolution.