

# Gd 原子的共振多光子电离研究

瞿佳男 周志尧 朱利洲 罗才雁 林福成

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

本文首次报道了用共振多光子电离(RMPI)技术探测到四条在可见光范围内的Gd原子强双光子跃迁线。观察到双色三光子Gd原子激光同位素分离。研究了高分辨率Gd原子电离谱,并解释了电离谱的线型。

关键词: 共振多光子电离, 光电离谱线型。

## 一、引 言

原子受到一个能量大于或等于其电离能的光子辐照而被电离,这一过程即是熟知的光电离。而原子被多个能量小于其电离能的光子电离称为多光子电离(MPI)。这种现象通常只有用光子通过足够强的激光作为光源时才能观察到。可调谐激光器的发展,使人们可以获得几乎是所有的原子的单光子或多光子跃迁的共振波长激光输出。原子与其共振光场相互作用导致的共振多光子电离(RMPI)过程,其电离速率和选择性将大大提高。因此,RMPI作为一种技术已广泛应用于原子和分子物理学、同位素分离和痕量元素分析等领域<sup>[1,2]</sup>。本文首次报道了利用RMPI在可见光范围内探测到四条Gd原子的强双光子跃迁谱线。通过双色三光子电离过程实现了Gd原子同位素分离并记录下高分辨电离谱。从理论上定性解释了所观察到的高分辨电离谱线型。

## 二、实验与结果

### 1. 实验

实验装置见图1。Gd原子蒸气由电子枪加热石墨坩埚里的块状金属Gd获得。坩埚上方的狭缝和金属管及一对电极是用于准直原子束和消除电子枪加热产生的带电粒子<sup>[3]</sup>。在距离坩埚14cm处激光与原子束相互作用。实验中用一台Nd:YAG二倍频激光器泵浦的脉冲可调谐染料激光器和一台由Ar<sup>+</sup>激光器泵浦的环形连续染料激光器作为激发光源。脉冲染料激光器所用染料为若丹明6G及若丹明6G与若丹明640混合染料。其调谐范围为5700 Å~6100 Å。激光线宽约为0.1 Å。若在腔内加标准具则线宽下降到0.02 Å。激光脉冲宽度约10 ns(FWHM)。连续环形染料激光器所用染料为若丹明6G,输出功率为150 mW~200 mW。线宽约1 MHz,稳频扫描范围30 GHz。

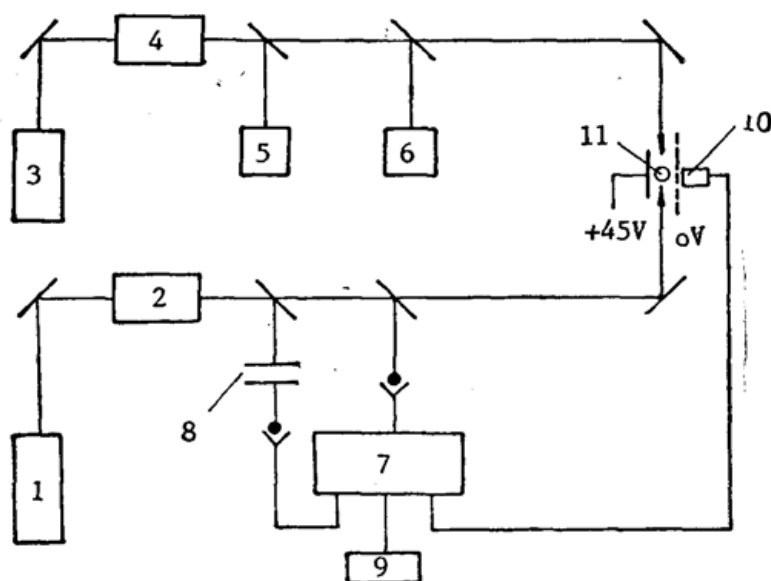


Fig. 1 Experimental set up

1. Nd: YAG laser, 2. Dye laser, 3. Ar ion laser 4. Ring dye laser (Spectra-Physics 380D), 5. Wavelength meter, 6. F-P interferometer, 7. Boxcar processor, 8. F-P etalon, 9. Printer, 10. Electronic multiplier, 11. Atomic beam

探测 Gd 原子强双光子跃迁谱线实验只需要一台脉冲染料激光器即可。进行大范围波长扫描时, 我们用一 Ne 空心阴极灯产生的光电流信号定标激光波长。RMPI 信号是用电子倍增器探测光电离离子获得的。信号经过 Box Car 处理后送入打印机输出。

用窄线宽的连续环形染料激光器和脉冲染料激光器进行的双色三光子电离实验首先要选择有效的电离通道。这对测量 Gd 原子高分辨电离谱和实现 Gd 原子双色三光子同位素分离都是非常重要的。实验证明, 以  $999\text{ cm}^{-1}$  亚稳态为初始能级,  $18084\text{ cm}^{-1}$  和  $34719\text{ cm}^{-1}$  作为中间能级的激发路径电离速率最大<sup>[3]</sup>。实验中, 连续激光束与脉冲激光束在空间上完全重叠且反向传输。连续激光直径约为脉冲激光的 1/10, 从而基本保证脉冲光与连续光重叠部分光强是均匀分布的。将脉冲光波长调至  $18084\text{ cm}^{-1}\sim 34719\text{ cm}^{-1}$  跃迁的共振波长, 再将连续光波长调到  $999\text{ cm}^{-1}\sim 18084\text{ cm}^{-1}$  跃迁共振波长附近, 稳频扫描, 从而获得 Gd 原子  $999\text{ cm}^{-1}\sim 18084\text{ cm}^{-1}$  跃迁的高分辨电离谱和实现 Gd 原子激光同位素分离。双色三光子电离实验信号探测及处理与探测强双光子跃迁实验相同。

## 2. 实验结果

图 2 给出了部分 Gd 原子双光子共振电离谱的测量结果。测量过程中, 脉冲染料激光器光强用中性滤光片衰减, 由其产生的单色三光子电离信号都不能出现。表 1 给出测量到的四条强双光子跃迁谱线的位置和相应的跃迁能级。图 3 是测量到的 Gd 原子  $999\text{ cm}^{-1}\sim 18084\text{ cm}^{-1}$  跃迁的部分高分辨电离谱。Gd 元素有五个主要的同位素 ( $21.90\%^{160}\text{Gd}$ ,  $24.87\%^{138}\text{Gd}$ ,  $15.68\%^{157}\text{Gd}$ ,  $20.47\%^{156}\text{Gd}$ ,  $14.73\%^{155}\text{Gd}$ ) 与用激光感生荧光法在原子束装置中测量的结果相比较, 可以很容易地辨认出  $^{160}\text{Gd}$  和  $^{158}\text{Gd}$  两个偶同位素电离峰<sup>[4,5]</sup>。很明显, 我们已经有效地实现了 Gd 元素的同位素分离。进一步研究需要利用质量滤波器来分析各种条件对分离过程的影响。

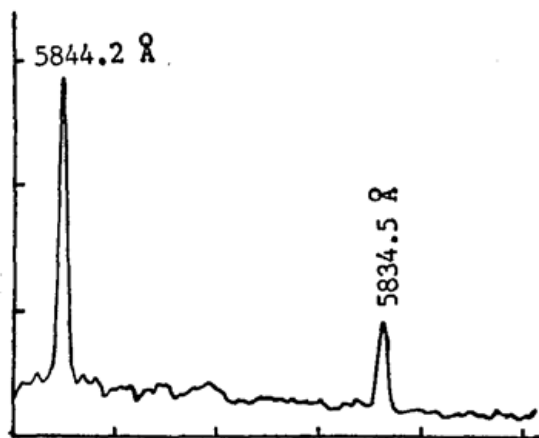


Fig. 2 Typical two-photon resonance ionization signal

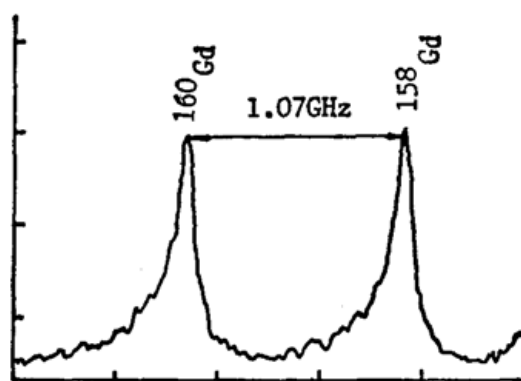


Fig. 3 High resolution two-color three-photon ionization spectra of Gd atoms

Table 1 Table of Two-photon transitions\*

Wavelength	Transitions
5794.96 Å	533 cm <sup>-1</sup> --- 35046 cm <sup>-1</sup>
5834.51 Å	533 cm <sup>-1</sup> --- 34812 cm <sup>-1</sup>
5844.19 Å	533 cm <sup>-1</sup> --- 34755 cm <sup>-1</sup>
6069.36 Å	999 cm <sup>-1</sup> --- 33952 cm <sup>-1</sup>

\* Transition energy levels are derived from Ref. 12

### 三、电离谱线型分析

在微波波段, 强 R-F 场与分子吸收线耦合可以观察到分子线产生分裂现象, 这就是 Autler-Townes 效应<sup>[6]</sup>。由于“缀饰原子”概念的引入<sup>[7]</sup>, 人们对这一现象有了更进一步认识。在可见光频域内, 已有许多工作从理论到实验都证实了这一现象, 并详细分析了各种条件对实验结果产生的影响<sup>[8~11]</sup>。这些实验都是考虑用两台窄带连续染料激光器在三能级系统光-光双共振实验中研究 Autler-Townes 效应的。激发图见图 4(a)、(b)。在这种情况下各能级寿命, 对应于泵浦光场的频率都不改变。整个系统处于稳态。我们实验的激发路径与图 4(b) 相似, 但条件不同。泵浦场是一多模的强脉冲场。观察信号不再是荧光而是电离信号。因此, 探测光扫描获得的谱线线型是随扫描频率和泵浦场强变化的。但是在一定近似条件下, 用稳态情形的理论结果仍可以定性说明电离谱线型。

求解一强泵浦场和一弱探测场作用于三能级系统情况的光学 Block 方程可知, 与强泵浦场耦合的能级将发生分裂:

$$E_{\pm} = -\frac{\delta_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\delta_2}{2}\right)^2 + \Omega_2^2} \quad (1)$$

式中  $E_+$  和  $E_-$  分别为分裂后的能级对未分裂时能级的位移。  $\delta_2$ 、  $\Omega_2$  分别为强泵浦场的失谐量和 Rabi 频率。若泵浦场强为  $I(t)$ :

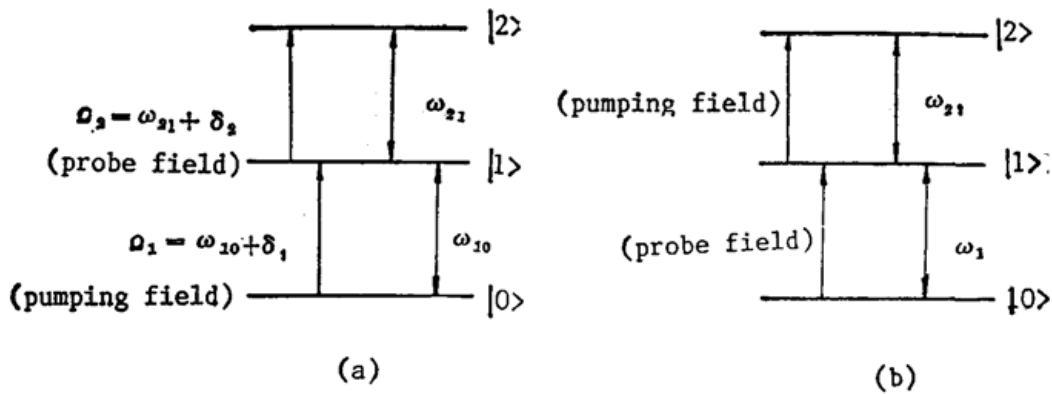


Fig. 4 Energy level diagrams and characteristics of two driving fields

$$E_{\pm} = -\frac{\delta_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\delta_2}{2}\right)^2 + \frac{\mu_{21}}{2\hbar^2} I(t)}. \quad (2)$$

式中  $\mu_{21}$  为  $|2\rangle \sim |1\rangle$  的跃迁偶极矩。为处理方便，脉冲光强通常可以用高斯函数近似。从  $E_{\pm}$  对时间的导数和， $E_{\pm}$  在光强最大值附近的  $\tau/2$  范围内变化很小 ( $\tau$  为泵浦场脉宽)，在此范围以外变化很大。因此，在光强最大值附近  $\tau/2$  范围内电离速率要大得多。对于脉冲泵浦场， $\Omega_2 \gg \gamma_1, \gamma_2, \Omega_1$ 。 ( $\gamma_1, \gamma_2$  为  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  的弛豫速率， $\Omega_1$  是探测光的 Rabi 频率) 当  $\delta_2 \sim \Omega_2$  时，对一确定的  $\delta_2$ ，探测光失谐正好等于 (1) 式的  $E_+$  或  $E_-$  时， $|2\rangle$  上的集居数  $N_{22}$  与  $\Omega_2, \delta_2$  有如下关系<sup>[8]</sup>：

$$N_{22} \pm \alpha \frac{1}{(\delta_2 \pm \sqrt{\delta_2^2 + 4\Omega_2^2})^2 + 8\Omega_2^2}. \quad (3)$$

式中  $N_{22+}$  和  $N_{22-}$  分别为分裂能级上的集居数。显然当  $\delta_2$  很大时， $N_{22-} \gg N_{22+}$ ，即靠近共振频率的 Rabi 分量集居数要比远离共振频率的分量大得多。因此，电离谱只能观察到一个分量。由于  $E_{\pm}$  在光强最大值附近  $\tau/2$  范围变化很小，而在这范围以外变化很大，对于均匀扫描的探测场，电离速率与探测场和泵浦场作用时间成正比。在光强最大值附近作用时间显然要长得多。因此电离谱在  $E_-$  达到最大值时电离信号也最大，随着  $E_-$  的减小，信号也迅速衰减。在多模场泵浦的情况下，电离谱线型不会改变。但各模对应的 Rabi 频率不同，线型将会变得比单模情况平缓。在以后的工作中，将对电离谱线型进行更加严格的理论分析和求解。

#### 四、小 结

本文首次报道了用 RMPI 技术探测到可见光范围内四条 Gd 原子的强双光子跃迁谱线：5794.96 Å ( $533 \text{ cm}^{-1} \sim 35046 \text{ cm}^{-1}$ )；5834.51 Å ( $533 \text{ cm}^{-1} \sim 34812 \text{ cm}^{-1}$ )；5844.19 Å ( $533 \text{ cm}^{-1} \sim 34755 \text{ cm}^{-1}$ )；6069.36 Å ( $999 \text{ cm}^{-1} \sim 33952 \text{ cm}^{-1}$ )。观察到了双色三光子 Gd 原子同位素分离。测量了 Gd 原子高分辨电离谱，并定性解释了电离谱的线型。

#### 参 考 文 献

- [1] V. S. Letokhov; *«Laser analytical spectrochemistry»*, (Adam Hilger, London, 1988).
- [2] G. S. Hurst; *«Resonance ionization spectroscopy»*, Institute of Physics Conf. Series 94 (London, 1988).
- [3] 瞿佳男等; *«中国激光»*, 待发表。

- [4] 瞿佳男; 博士论文(中国科学院上海光学精密机械研究所, 1989)。  
[5] H. Niki *et al.*; *Opt. Commun.*, 1989, **70**, No. 1 (Feb), 16~20.  
[6] S. H. Autler, G. H. Townes; *Phys. Rev.*, 1955, **100**, No. 3 (Aug), 703~714.  
[7] C. Cohen-Tannoudji, S. Haroche; *J. Physique*, 1969, **30**, No. 2 (Feb), 153~164.  
[8] S. Feneuille *et al.*; *J. Physique*, 1975, **36**, No. 9 (Sep), 781~786.  
[9] J. L. Picque *et al.*; *J. Phys. B.*, 1976, **9**, No. 5 (Apr), 677~681.  
[10] P. T. H. Fisk *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1986, **33**, No. 4 (Apr), 2418~2435.  
[11] P. T. H. Fisk *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1986, **34**, No. 6 (Dec), 4762~4769.

## Study of the resonance multiphoton ionization of Gd atoms\*

QU JIANAN, ZHOU ZHIYAO, ZHU LIZHOU, LUO CAIYAN AND LIN FUOHENG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Academia Sinica)

(Received 1 September 1990; revised 9 July 1990)

### Abstract

Four strong two-photon transitions by resonance ionization technique are reported for the first time. Two color three-photon laser isotope separation and high resolution spectroscopy of Gd atoms are also studied. The lineshape of the ionization spectra is explained qualitatively.

**Key words:** resonance multiphoton ionization, photon-ionization lineshape.