

铅原子非共振多光子电离过程的研究

金明星 丁大军 刘航 潘守甫
(吉林大学原子与分子物理研究所)

提 要

在激光波长为 1064 nm、532 nm 和 355 nm 下,研究了铅原子的非共振多光子过程。通过改变激光脉冲的线宽研究了铅原子非共振 7-光子电离速率和激光统计性的依赖关系。

关键词: 多光子电离, 铅原子, 相干性。

一、引 言

近年来,在原子的多光子电离理论和实验研究方面有大量的文献报道^[1~6]。但这些研究一般都集中在对碱金属元素和惰性气体等特殊对象进行的,系统地研究对象铅原子这样复杂的重元素的多光子电离过程尚未有过报道,本文报道在 1064 nm、532 nm 和 355 nm 脉冲激光场中,铅原子的非共振多光子电离过程。

原子在激光场中非共振 K -光子电离的速率 W 可以表示为

$$W = \sigma_K I^K, \quad (1)$$

其中 I 为激光场强度 ($\text{photon}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), σ_K 为一般的 K 光子电离截面 ($\text{cm}^{2k} \cdot \text{s}^{k-1}$), 当光强不是很高时, σ_K 和原子结构与激光的偏振性质有关。一般可以认为在非共振情况下,原子的多光子电离过程是通过激光场诱导的虚态发生的,虚态不是原子的能量本征态,它的寿命 τ 很短,大致等于一个光学周期,即 $\tau \sim 10^{-15} \text{sec}$ 。这就是说非共振多光子过程必须在小于 10^{-15}sec 的时间内完成,所以为了实现多光子电离过程,必须有足够高的激光强度。因为 K 光子电离的速率与光强的 k 次幂成正比,所以多光子过程对光场特性,例如光场强度涨落等,反映特别灵敏,多光子过程对光场的特性将表现出越来越强的依赖关系,光的相干性(或统计性)对多光子电离产生非常有趣的效应^[3,7,8]。

二、实验和结果

1. 实验装置

研究铅原子非共振多光子电离的实验装置如图 1 所示。为了避免表面效应的影响和消多普勒效应,实验是在(热扩散型)原子束装置中进行的,原子束炉内温度为 1000K。在激光作用区,原子束的数密度为 10^{10}atoms ,反应室内的真空度优于 10^{-5}Torr 。激光器为美国 Quanta-Ray 公司的 DCR-2A(10)型 $\text{Na}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器。配有 HG-2 谐波发生器,产生脉

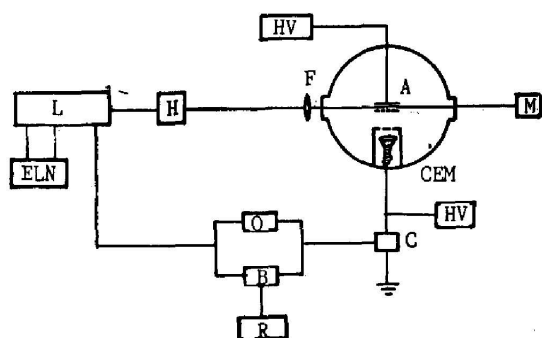


Fig. 1 Experimental set-up of nonresonant multiphoton ionization of Pb atom by Nd:YAG laser

L: Nd:YAG laser; ELN: electronic line narrowing; H: harmonic generator; F: focussing lens; HV: high voltage power; A: atomic beam; M: power meter; O: coupled circuit; B: BOXCAR; CEM: channel electron multiplier; O: oscillograph; R: recorder

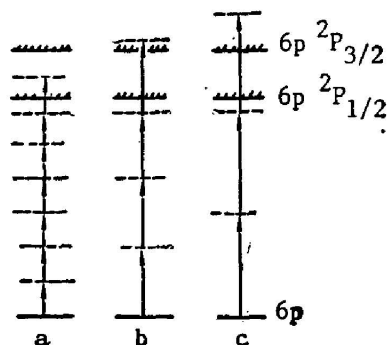


Fig. 2 Nonresonant multiphoton ionization processes

a. 1064 nm 7-photon ionization of Pb
b. 532 nm 4-photon ionization of Pb
c. 355 nm 3-photon ionization of Pb

宽约为 8 ns 的 1064 nm 及其谐波 532 nm, 355 nm 和 266 nm 的激光脉冲, 重复频率 10 Hz。激光的线宽可以通过插入腔内标准具和使用电子学线宽压窄装置 ELN-2 改变。上述激光

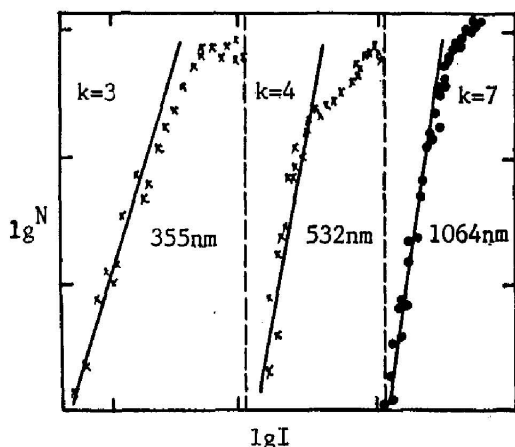


Fig. 3 Photoelectron yield curves of nonresonant multiphoton ionization. K represents the slope of the straight line obtained by using the least-squares fit to the experimental data (rel. unit)

均为线偏振, 其中 1064 nm 线偏振度好于 98%。利用 25 cm 会聚透镜, 焦点处功率密度可达 10^{10} W/cm²。光电离信号利用通道式电子倍增器*, 在工作电压为 3000 V 时, 器件的电子增益为 10^8 , 阻抗 $10^9 \Omega$ 。接收的信号由一个电容 (1000 pF) 耦合输出, 送入示波器 (TRIO CS-2100, 100 MHz) 和配有 2 个 165 型门积分器的 PAR162 型 BOXCAR (EG & G PAR) 经 BOXCAR 处理后的信号可以在记录仪 (YEW 3066 型多笔记录仪) 上记录。激光器输出的脉冲能量测量使用了 LPE-1A 型宽带激光能量/功率测量仪**。

2. 铅的非共振多光子电离

对非共振的 K 光子电离过程, 原子需要同时吸收 K 个光子才能电离。铅的第一电离能

为 $I_1 = 7.415$ eV, 由此可以算出, 波长为 1064 nm、532 nm 和 355 nm 的激光, 使铅电离所需吸收的最少光子数分别为 7、4、3。图 2 给出了相应的非共振多光子电离过程。按照已有的铅原子能级数据^[9], 1064 nm 及其谐波与允许跃迁能级之间的失谐最小约为 135 cm⁻¹, 所以图 2 所示的这些多光子电离过程本质上是非共振的。

* 中国科学院电子所研制。

** 中国科学院物理所研制。

图 3 给出了在 355 nm、532 nm 和 1064 nm 波长的激光, 改变激光强度, 测量电离信号强度(正比于产生的光离子数目)与光强的关系, 即产额曲线, 其中直线是对没有出现饱和部分的实验点做最小二乘法拟合得到的。因为产生的离子数正比于 I^K , 所以曲线的斜率将给出非线性阶数 K 。对应上述三种波长激光的非线性作用阶数分别为 3.08 ± 0.1 , 4.04 ± 0.16 , 6.95 ± 0.6 。这与 355 nm、532 nm 和 1064 nm 的激光使铅电离所需吸收的最少光子数近似相等。测量了焦点的光强度分布是类高斯型的, 对数据按高斯分布线型做最小二乘法拟合, 得到 $1/e$ 振幅直径为 0.4 nm。由此可以计算出, 激光在相互作用区的功率密度。随着非线性阶数的增高, 在同一探测灵敏度下, 测量到光电离信号的阈值功率密度也随之增大。这就说明只需简单地加大功率密度就可以得到非线性阶数很高的非共振电离信号^[9]。在激光能量输出稳定性相同的情况下, 非线性作用阶数越高, 其电离信号的起伏越大, 则由最小二乘法确定的非线性阶数 K 的误差变大。表 1 给出了我们的实验结果, 从图 3 可以看到在光强较大时非共振多光子电离信号都出现了饱和现象^[10], 一般来说在光强大于饱和点的光强以后, σ_K 将与光强有关^[13], 从(1)式可以看出

$$\sigma_K = \frac{W}{I^K}$$

Table 1 The order of the non-linearity of the interaction and threshold for the nonresonant multiphoton ionization of Pb

wavelength(nm)	multiphoton processes	order	threshold(W/cm ²)
1064	7	6.95 ± 0.60	3×10^8
532	4	4.04 ± 0.16	4.5×10^7
355	3	3.08 ± 0.10	1.5×10^7

Table 2 The effect of laser coherence on the nonresonant multiphoton ionization of Pb

linewidths $\Delta\nu$	order K	intercept	f_K
30GHz	6.95 ± 0.6	-4.12	$10^{3.48}$
6GHz	7.06 ± 0.8	-5.3	$10^{2.3}$
60 MHz	7.62 ± 1.3	-7.6	1

3. 非共振多光子电离的多模增强效应

对高阶多光子电离过程, 在早期研究中理论和实验差别很大^[1]。理论上研究了激光相干性对非共振多光子电离过程的影响, 其基本结论是: 对 K 光子非共振电离, 混沌(chaos)光的电离截面比纯的相干光的电离截面大 $K!$ 倍^[8, 7, 8], 这就是多模增强效应。

假设 M 模激光的每个模之间的位相独立, 振幅服从高斯分布, 则理论计算给出, 由于激光的多模特性, 非共振 K 光子电离产生的离子数和相同光强的单模激光产生的离子数相比, 有一个增强因子 f_K 为

$$f_K = K! \frac{M^K (M-1)!}{(K+M-1)!} \quad (3)$$

f_K 通常称为 K 阶自相关函数, 或 K 阶峰值强度矩, 对单模激光脉冲, $f_K = 1$, 即脉冲不存在强度调制, 对无限多的统计无关的模组成的激光脉冲 $f_K = K!$ 。人们从实验上已经观察到

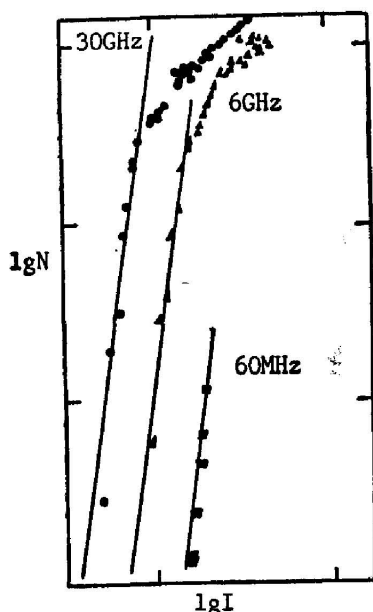


Fig. 4 The effect of laser coherence on the photoelectron yield for the non-resonant 7-photon ionization of Pb. Laser wavelength; 1064nm (rel. unit)

—30 GHz 时, $M = (30 \text{ GHz}/150 \text{ MHz}) = 200$ 。按(2)式 $f_7 = 4543$, 而实验值为 $f_7 = 10^{3.48} = 3020$, 这说明当模数为 200 时模之间也不是完全统计独立的, 因为(2)式是从假定 M 模统计独立, 振幅从高斯分布, 而实际的激光并非如此, 所以二者有差别是可以理解的。

了这种效应^[3, 5, 11]。值得一提的是对单模激光并非完全是 Glauber 意义下的纯的相干态^[12], 对多模激光也并不是完全不相干的高斯混沌光^[12], 对多模激光也并不是完全不相干的高斯混沌光^[12], 所以对实际的激光的描述要复杂得多。上面给出的离子数增强因子 f_K 是在非共振多光子电离对激光的统计性质。

按激光器结构估计, 纵模间隔为 $(C/2L) = 150 \text{ MHz}$, 1064 nm 激光的线宽为 30 GHz, 利用腔内标准具可使线宽压窄到小于 6 GHz, 如果使用电子学线宽压窄装置(ELN-2)可以把激光线宽压窄到 60 GHz。这时, 可以认为是单模激光。我们在激光线宽为 30 GHz, 6 GHz 和 60 GHz(仪器标称)时, 获得了离子产额曲线(图 4), 再用最小二乘法对实验数据进行拟合, 图中实线为拟合直线, 对应这些线宽的激光, 相互作用非线性阶数为 6.95、7.06、7.62, 大致等于 7。比较在同一光强下的不同线宽的多光子电离信号强度, 在 $\Delta\nu$ 为 30 GHz 时给出了比 $\Delta\nu$ 为 60 MHz 时大到约为 3 个数量级的光电离信号, 与相应的理论值基本一致。从拟合直线的截距差可以算出自相关函数 f_K , 其结果列在表 2 中, 如果激光的模式数目按线宽除以纵模间隔计算, 当 $\Delta\nu$

三、结 论

利用 Nd:YAG 激光的基波 1064 nm 及二次谐波和三次谐波研究了铅的非共振多光子电离过程, 得到了相互作用的非线性阶数。因为相互作用阶数比较高, 铅原子结构复杂, 对重元素电子相关效应显著, 所以理论上不能得到非共振电离截面; 在实验上给出绝对电离截面, 由于技术上的原因, 还比较困难。作为结论, 非共振的多光子电离速率可以写为

$$W = \sigma_K f_K I^K. \quad (4)$$

自相关函数 f_K 依赖于激光相干性和相互作用非线性阶数 K 。理论计算和实验研究表明: 当光强 I 足够大以后, σ_K 还和光强有关^[13]。可以解释在理论上用相干光模型计算的 σ_K 和实验上用非相干激光脉冲测得的 σ_K 之间的偏差。利用已知的原子结构作为探针, 从原子的多光子电离过程出发来探测激光脉冲的统计性质, 确定激光峰值强度的自相关函数, 这对充分刻画激光场与原子的相互作用的特性具有特殊的意义。

参 考 文 献

- [1] M. Lu. Van, G. Mainfray *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1973, **7A**, No. 1 (Jan), 91.
- [2] P. Lambropoulos; *Phys. Rev. (A)*, 1974, **9A**, No. 5 (May), 1992.
- [3] C. Lecompte, G. Mainfray *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1975, **11A**, No. 3 (Mar), 1009.
- [4] D. Normand, J. Morellec; *J. Phys. (B)*, 1980, **13B**, No. 8 (Apr), 1551.
- [5] L. A. Lompre, G. Mainfray *et al.*; *J. Phys. (B)*, 1981, **14B**, No. 22 (Nov), 4307.
- [6] L. A. Lompre, G. Mainfray *et al.*; *J. Phys. (B)*, 1980, **13B**, No. 1 (Jan), 85.
- [7] J. Ducuing, N. Bloembergen; *Phys. Rev. (A)*, 1964, **133A**, No. 6 (Mar), 1493.
- [8] G. S. Agrawal; *Phys. Rev. (A)*, 1970, **1A**, No. 5 (May), 1445.
- [9] C. E. Moore; *Atomic Energy Levels*, 1971, Vol. 3 (NRSDS-NBS 35), 203.
- [10] J. C. Boulassier; *Nouv. Rev. Optique*, 1976, **7**, No. 5 (Sep-Oct), 329.
- [11] T. Arslanbekov; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1976, **6**, No. 2 (Feb), 117.
- [12] R. J. Glauber; *Phys. Rev.*, 1963, **131**, No. 6 (Sep), 2766.
- [13] X. Tang, P. Lambropoulos; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**, No. 2 (Jan), 108.

Investigation of nonresonant multiphoton ionization process of lead atoms

JIN MINGXING, DING DAJUN, LIU HANG AND PAN SHOUFU
(*Institute of Atomic and Molecular Physics, Jilin University*)

(Received 24 February 1988; revised 14 October 1988)

Abstract

The nonresonant multiphoton ionization process of lead atoms are investigated at the laser wavelengths of 1064 nm, 532 nm, 355 nm. The dependence of the 7-photon ionization probability of lead atoms on the statistical properties of laser pulse has been analysed by varying the spectral bandwidth of the laser pulse.

Key words: multiphoton ionization; lead atoms; coherence.