

铥原子 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{7/2}$ 和 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{5/2}$ 激发态近阈限光电离截面测量

张振美, 袁紫灵, 王郅诚, 华泽丰, 姚关心, 杨新艳, 孙中发, 秦正波, 郑贤锋

(安徽师范大学 物理与电子信息学院, 芜湖 241000)

摘要: 本文利用了激光烧蚀技术、激光泵浦-探测技术、共振增强多光子电离技术(REMPI)和飞行时间质谱技术(TOF-MS)相结合的实验方法研究了镧系金属铥原子激发态近阈限光电离截面. 实验研究了 Tm 原子在 291.00 ~ 293.50 nm 波长范围内的 REMPI 光谱, 在电离富余能 0.2 ~ 1.0 eV 内, 测量了 Tm 原子 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{7/2}$ 和 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{5/2}$ 激发态的光电离截面, 测量值在 (3.3 ± 0.2) Mb ~ (13.9 ± 1.3) Mb 范围内.

关键词: 铥原子; 光电离截面; 泵浦-探测; 镧系金属

中图分类号: O56 文献标志码: A DOI: 10.19855/j.1000-0364.2025.043001

Photoionization cross sections measurements of the $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{7/2}$ and $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{5/2}$ excited states of thulium in the near threshold region

ZHANG Zhen-Mei, YUAN Zi-Ling, WANG Zhi-Cheng, HUA Ze-Feng, YAO Guan-Xin,
YANG Xin-Yan, SUN Zhong-Fa, QIN Zheng-Bo, ZHENG Xian-Feng

(School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: In this work, We present the photoionization cross sections of excited states of lanthanidel metal atom thulium in the near threshold region by using the technique of the laser ablation, laser pump-probe, resonance enhanced multiphoton ionization (REMPI) combined with time of flight mass spectrometer (TOF-MS). The REMPI spectra of Tm in the range of 291.00 ~ 293.50 nm were reported and the photoionization cross-sections of the $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{7/2}$ and $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2,1)_{5/2}$ states in the threshold regions (0.2 ~ 1.0 eV) were measured. The measured values range from (3.3 ± 0.2) Mb to (13.9 ± 1.3) Mb.

Key words: Thulium; Photoionization cross sections; Pump-probe; Lanthanidel atom

1 引言

镧系金属广泛应用于催化、磁学、激光材料、生物医药和新能源技术等高新领域, 这些领域的相关研究离不开镧系金属的能级和光电离截面信

息^[1-6]. 原子与光子相互作用时, 原子从某个能级发射出一个电子的几率大小称为原子激发态光电离截面. 目前, 许多实验小组对研究碱原子、碱土原子和稀有气体激发态光电离截面开展了相关工作. Gobert 等人通过实验确定了铁, 钴, 钛,

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(12074004, 21873003, 22103003); 安徽省高校研究计划(2022AH010013)

作者简介: 张振美, 女, 广西钦州人, 硕士研究生, 主要从事原子、分子光谱研究.

通信作者: 秦正波. E-mail: wave0403@163.com; 郑贤锋. E-mail: xfzheng@mail.ahnu.edu.cn

镍和铬原子的几种激发态的光电离截面在 10^{-17} cm^{-2} 左右^[7]. Saini 和 Baig 等人在研究碱金属和碱土金属原子激发态光电离截面做了大量出色的工作, 他们使用热管炉加热金属样品以产生原子, 通过单光子吸收制备激发态原子, 使用激光束电离激发态, 离子产物由热离子二极管检测, 获得了激发态阈限光电离截面^[8-13]. 本研究小组使用单色双光子电离技术对 3d 过渡金属 Ti, V, Cr, Fe 和 Co 原子激发态的光电离截面进行了研究^[14-16], 通过对实验装置进一步改进, 我们采用双色双光子电离技术, 即激光泵浦-探测技术, 研究钴原子 $3p^6 3d^8 4p [y^4 G_{11/2}^0]$ 激发态得到阈限光电离截面值为 $27.83 \text{ Mb}^{[17]}$. Wu 等人报道了 Ar、Kr 和 Xe 中 $4p^5 (^2P_{1/2}) ns'$ 和 nd' 自电离共振光电离截面和光电子角分布参数^[18]. 氢原子是最简单的原子体系, 对氢原子的光电离截面的研究也非常多^[19-23]. 同少电子体系碱金属和碱土金属和稀有气体相比, 镧系金属原子激发态光电离动力学研究方面却鲜有报道, Gomonai 等人采用电子溅射制备 Yb 原子束, 实验测量了 Yb 原子在 $16814.4 \sim 18100.01 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的三光子电离光谱并发现了两个能量位于 51866.1 cm^{-1} 和 51914.11 cm^{-1} 新奇宇称自电离能级^[24]. Seema 等人利用原子炉扩散方法制备 Sm 自由原子, 研究了激发激光的不同偏振状态以及其之间的偏振角度对同位素选择性的影响^[25]. Kutluka 等人利用热管炉分别产生自由 Ce、Nd、Gd、Dy、Er 等镧系金属原子, 并利用单色同步辐射光源和光电子谱技术, 得到这些原子在 4d 巨共振区域的光电离截面^[26]. 戴长建研究小组对 Eu、Sm 等镧系金属原子激发态能级和光谱进行了较深入的研究^[27-28], 研究了 Eu 原子 $4f^7 6p 6d$ 自电离态的光谱和动力学特性, 得到了自电离态的能级能量和线型等数据^[29]. 张典承等人利用相对论多通道理论, 计算了铕原子收敛于 $4f^{13} (^2F_{7/2}^0) 6s (7/2, 1/2)_4^0$ 和 $4f^{13} (^2F_{7/2}^0) 6s (7/2, 1/2)_3^0$ 的三个偶宇称里德伯系列^[30]. Shafique 等人利用热管-线性热离子二极管离子探测器, 对铕的 $6s 5d ^1D_2$ 激发态的光离截面进行了新的实验测量^[31]. 目前, 对镧系金属原子的相关研究工作主要集中在测定激发态光电离光谱和能级结构测定分析上, 这可能是由于镧系金属原子基电子态的电子组态构型为 $[Xe] 4f^n 6s^2$ 或 $[Xe] 4f^n 5d 6s^2$, 电子只在内层 4f 轨道填充, 导致其光谱变得非常复杂. 且镧系金属的熔点较高,

采用加热蒸发和高能电子碰撞等办法产生高数密度自由冷原子束相对比较困难, 限制了气相原子光电离动力学的研究.

因此, 我们在实验中采用了激光烧蚀靶金属和超声分子束相结合的实验技术来制备冷的自由 Tm 原子束, 由可调谐染料激光激发基态原子制备激发态, 另一束染料激光

电离激发态原子或激发至自电离态, 高灵敏 TOF 质谱检测离子产物, 由离子产额和电离光子通量的关系获得激发态光电离截面及光电离截面对电离富余能的依赖关系, 研究结果为改进的镧系原子理论研究方法提供检验, 丰富 4f 原子激发态的光电离截面数据库.

2 实验条件

图 1 为实验装置简图, 由激光系统、真空系统、信号探测和采集系统组成. 实验仪器背景真空保持在 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 脉冲阀工作时束源室的真空为 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 电离室的真空控制在 $6 \times 10^{-5} \text{ Pa}$. 实验需三套激光系统, 即烧蚀激光光源为二倍频 Nd: YAG 激光器 (532 nm) (ND6000, Continuum); 泵浦光源为 Nd: YAG 激光器 (Spectra - Physics) 泵浦染料激光器 (Sirah) 提供, 使用的激光染料为 Pyrromethene597 (中心波长为 585 nm), 使用 KDP 晶体对染料激光倍频后, 得到实验所需波长 $291.00 \sim 293.50 \text{ nm}$ 的激光输出. 探测光源是由另外一台 Nd: YAG 激光器 (Spectra - Physics) 泵浦的 OPO (GWU primoScan) 激光器提供, 通过输入波长, 可获得实验所需的电离激光波长. 烧蚀激光、泵浦激光以及探测激光光源的激光脉宽分别为 8 ns、10 ns、10 ns, 激光的线宽不超过 0.1 cm^{-1} . 由两台 DG535 和一台 ZKG027 来控制脉冲阀开启、烧蚀激光、泵浦光和探测光之间的相对延时, 工作频率皆为 10 Hz.

实验中, 烧蚀激光依次经过可变光阑和聚焦透镜聚焦后, 直接烧蚀固定在电机上面的镧系金属 Tm 棒 (圆柱体, 长约为 50 mm, 直径 6 mm, 纯度 99.99%) 产生等离子体, 再由脉冲阀喷射出的氦气载带, 经直径为 1 mm 的 skimmer 准直后进入电离区. 在电离区, 两束激光首先经过可变光阑, 再经过半波片, 格兰棱镜, 可变光阑进入电离区与原子束相交 (进入电离区的泵浦光束和探测光束的直径近似调整到 1.2 mm 和 0.7 mm), 离子在引出电场和加速电场的作用下加速飞行,

再自由飞行 30 cm 后由飞行时间质谱仪接收, 并由数字存储示波器记录离子流信号. 推斥极、加速极以及 MCP 探测器的电压最优值分别为 1250 V、1050 V、-1850 V. 由于烧蚀激光的能量决定初始原子数, 如果烧蚀激光的能量过高则需要更高能量的电离激光才能满足共振跃迁饱和, 故在实验中尽可能降低烧蚀激光的能量. 由于离子信号强度由探测光的能量决定, 可通过改变激光光束的极化方向来调整激光能量, 即通过调节探测光路中半波片与格兰泰勒棱镜之间的角度来实现激光能量连续改变. 为了避免实验过程中发生单色双光子电离过程, 而不使用聚焦透镜聚焦, 且两束激光束电场矢量方向平行于飞行时间探测器表面.

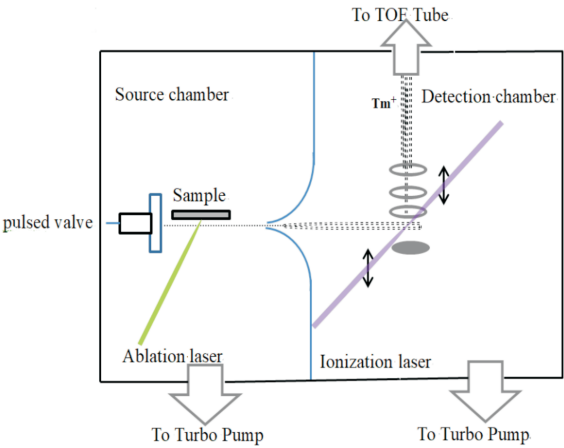


图 1 实验装置简图
Fig. 1 Schematic of the experimental setup

3 实验结果与讨论

在 Tm 原子的双色双光子共振电离中, 假定在探测激光强度均匀、共振跃迁发生饱和的情况下, 每次激光脉冲中产生的离子数量可以由以下方程给出:

$$N = N_0 [1 - \exp^{-\frac{\sigma E}{2h\nu A}}]$$
 (1)

其中 N 为产生的总的离子数密度, $A(\text{cm}^2)$ 为探测激光束横截面积, E 为探测光束能量, $\sigma(\text{cm}^2)$ 为光电离截面. 在实验测量中, 飞行时间质谱仪在线性工作区内收集 Tm^+ 离子, 离子流信号强度 S 与总离子数 N 成正比:

$$S = kN = k N_0 [1 - \exp^{-\frac{\sigma E}{2h\nu A}}]$$
 (2)

根据实验测量的 S 和 E/A 数据, 可以通过最小二乘法拟合得到 Tm 原子激发态的近阈限光电离截面 σ . 实验主要误差来源为探测激光光束横

截面积的测量. 利用激光在柯达相纸上灼烧圆斑来测量光束直径获得 $A(\text{cm}^2)$, 即得到了泵浦激光和探测激光在相互作用区光斑的有效直径分别为 1.2 mm、0.7 mm, 测量误差低于 15%. 探测光的能量测量误差小于 5%. 因此, 在近阈限光电离截面的测量中, 总的均方根误差上限为 17%.

图 2 为 Tm 原子在 291.00 ~ 293.50 nm 范围内的 $(1 + 1)$ REMPI 光谱. 最初由激光烧蚀产生的激发态铥原子在飞行至电离区的过程中慢慢弛豫到低电子态 $4f^{13}(^2F_0^0)6s^2(^2F_{7/2}^0)$. 扫描光谱时, 遮挡探测光, 只扫描泵浦激光波长, 保持烧蚀激光能量为 5 mJ, 将泵浦光能量提高到 0.6 mJ 以诱发单色双光子电离过程. 实验室使用的激光均为线偏振光, 故结合线偏振光偶极跃迁的选择定则 ($\Delta M = 0, \Delta J = 0, \pm 1$) 可准确测定高能级态. 扫描光谱时, 离子流信号被送入 Boxcar 平均器进行取样和平均, 再由计算机数据采集系统对数据记录和处理, 基频染料激光扫描速率为 0.001 nm/s, 对应倍频光扫描速率为 0.0005 nm/s. 对获得的铥原子共振电离光谱通过 NIST 数据库进行归属, 原子的初态、激发态以及电子组态如表 1 所示.

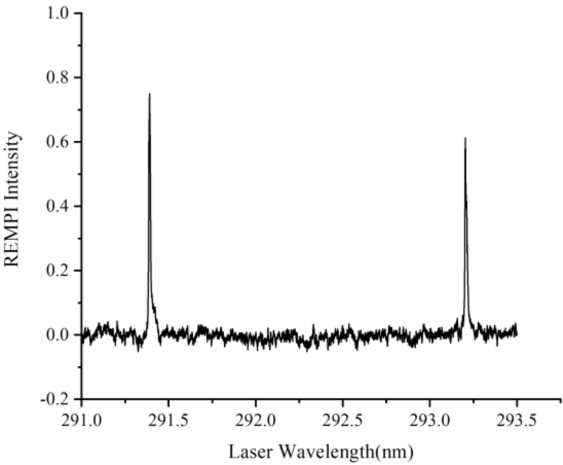


图 2 在波长 291.00 ~ 293.50 nm 范围内铥原子共振增强多光子电离光谱
Fig. 2 The $(1 + 1)$ REMPI spectrum of free Tm atoms in the 291.00 ~ 293.50 nm wavelength range

图 3 所示的质谱图中, 黑色曲线表示只有泵浦激光且波长固定在 Tm 原子共振波长处, Tm 原子发生了 $(1 + 1)$ REMPI 过程, 当降低泵浦激光能量到 4 μJ 时, Tm 原子的共振电离信号强度只有 1 mV. 红色曲线为只有探测激光且能量为 900 μJ 时, 由于激光波长处于 Tm 原子的非共振波长处, 故未观察到 Tm 原子电离信号. 蓝色曲线为泵浦光和探测光同时作用在原子束上时, 可以明显

表 1 铥原子共振增强多光子电离光谱归属

Table 1 Assignments of the REMPI spectra of Tm shown in Fig. 2

Observed Wavelength (nm)	Aki (s ⁻¹)	Ei (cm ⁻¹)	Ek (cm ⁻¹)	Lower Level			Upper Level		
				Conf	Term	J	Conf	Term	J
291.48	9.4e+06	0.00 ~ 34297.17		4f ¹³ (² F ⁰)6s ²	² F ⁰	7/2	4f ¹³ (² F ⁰ _{5/2})6s6p(¹ P ⁰ ₁)	(5/2, 1)	7/2
293.29	1.13e+07	0.00 ~ 34085.20		4f ¹³ (² F ⁰)6s ²	² F ⁰	7/2	4f ¹³ (² F ⁰ _{5/2})6s6p(¹ P ⁰ ₁)	(5/2, 1)	5/2

发现信号强度大幅度增强，这是因为 Tm 原子发生(1 + 1') REMPI 过程. 因此，可以忽略不计泵浦激光引起铥原子直接发生单色双光子共振电离过程，以及探测光引起的单色双光子非共振电离过程的影响.

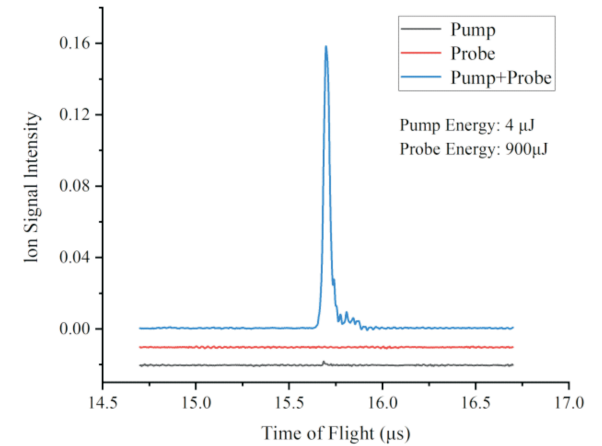


图 3 黑色：仅有泵浦光时 Tm 原子(1 + 1) REMPI 质谱; 红色：仅有探测光时 Tm 原子电离质谱; 蓝色：泵浦光和探测光共同作用时，Tm 原子(1 + 1') REMPI 质谱

Fig. 3 Black: Tm atom (1 + 1) REMPI mass spectrometry with only the laser pump; Red: Tm atom ionization mass spectrometry with only the laser probe; Blue: Tm atom (1 + 1') REMPI mass spectrometry with the laser pump – probe

图 4 为测量 Tm 原子激发态 $4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p({}^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ 、 $4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p({}^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ 光电离截面能级简图. 实验时，泵浦光固定在 Tm 原子共振波长处，通过改变探测光波长(都为 Tm 原子非共振波长)，从而可研究富余能与激发态光电离截面的依赖关系. 其中激发态 $4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p({}^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ 对应探测光波长为 582、525、472、425 nm 时，电离富余能分别为 0.2、0.5、0.7 和 1.0 eV；激发态 $4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p({}^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ 对应探测光波长为 564、525、472、425 nm 时，电离富余能分别为 0.2、0.4、0.6 和 0.9 eV.

图 5 和图 6 为 Tm 原子激发态 $4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p$

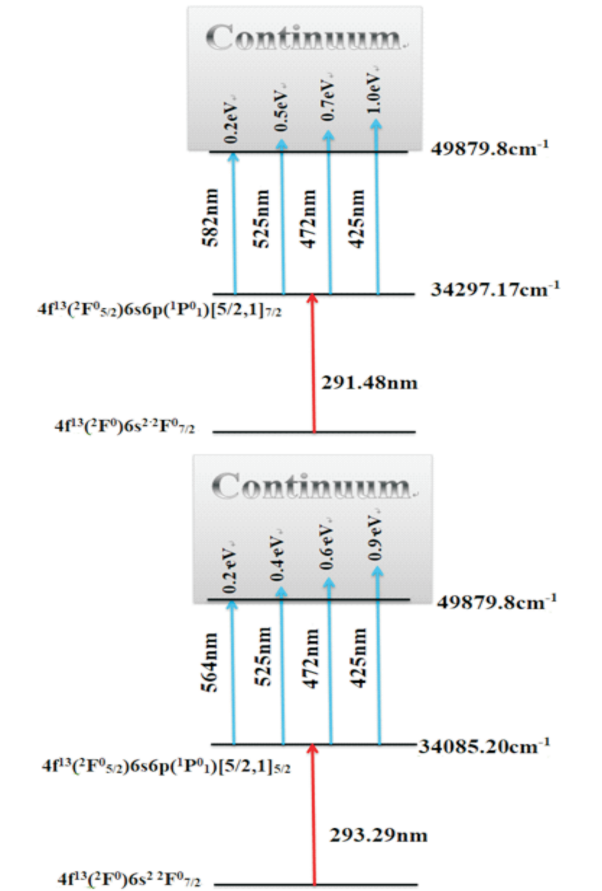


图 4 铥原子激发态光电离截面的能级图

Fig. 4 Energy level diagram for the measurement of photoionization cross section from the excited states of thulium.

$4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p({}^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ 、 $4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p({}^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ 的光电离截面实验数据以及拟合曲线. 离子信号强度随探测激光器能量密度的增加而增加，达到一定值后不再增加，最终达到饱和，且饱和能量随着探测波长的减少而增加. 其中方框代表实验测量数据，实线由式(2)采用最小二乘法拟合数据得到. 保持泵浦光波长不变，改变探测光波长，得到 Tm 原子激发态 $4f^{13}({}^2F_{5/2}^0)6s6p({}^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ 34297.17 cm⁻¹ 在电离阈值以上 0.2、0.5、0.7、1.0 eV 光电离截面分别为 13.9 ± 1.3 Mb、6.2 ± 0.5 Mb、4.9 ± 0.5 Mb 和 3.3 ± 0.2 Mb，对应图 5(a)、(b)、(c)、(d)；得到 Tm 原子激发态

$4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ 34085.20 cm^{-1} 在电离阈值以上 0.2、0.4、0.6、0.9 eV 光电离截面分别为 $4.6 \pm 0.4 \text{ Mb}$ 、 $3.7 \pm 0.3 \text{ Mb}$ 、 $3.7 \pm$

0.5 Mb 和 $3.4 \pm 0.2 \text{ Mb}$, 对应图 6(a)、(b)、(c)、(d). 实验测量的光电离截面值、原子的初态和激发态以及激光波长总结在表 2 中.

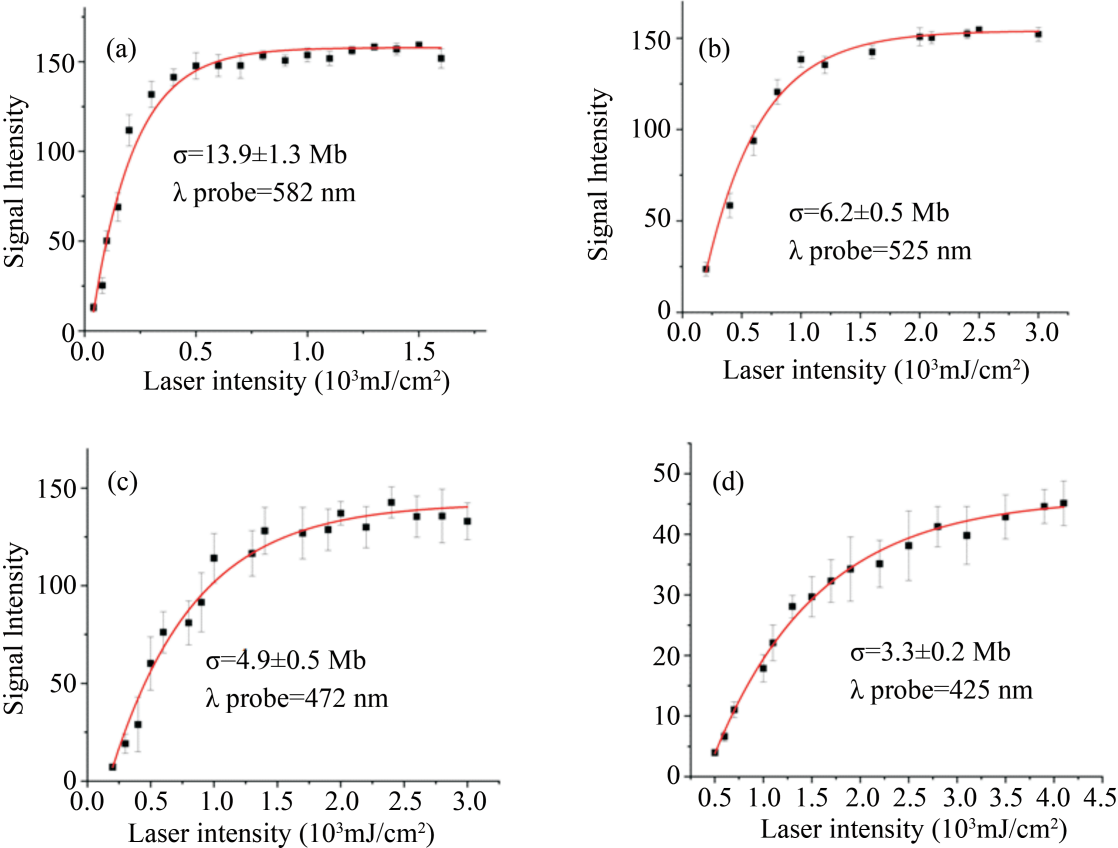


图 5 泵浦光波长固定在 291.48 nm 时, 不同探测光波长下的铥原子激发态 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ 光电离截面

Fig. 5 When the laser pump wavelength is fixed at 291.48 nm, the photoionization data for the $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ excited states of thulium under different laser probe wavelengths

图 7 为 Tm 原子 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ 和 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ 激发态光电离截面与电离富余能 (0.2 ~ 1.0 eV) 的依赖关系, 分别对应于图 7(a) 和图 7(b). 从图中可以发现, Tm 原子激发态在电离近阈值处最大, 随着电离能量的增加, 截面呈减小趋势. 与 Baig 和 Amin 等人在对碱金属以及碱土金属原子光电离截面与电离富余能依赖关系的研究中, 得到相同的变化趋势^[32-36], 且也与最近 Shafique 等人对镧系原子镱 $6s5d^1D_2$ 激发态发现光电离截面随着电离激光波长的减少而减少的结果非常一致^[31].

本实验获得了 Tm 原子在 291.00 ~ 293.50 nm 波长范围内的 (1 + 1) REMPI 光谱, 测量了 Tm 原子 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$ 和 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ 激发态在电离富余能为 0.2 ~ 1.0 eV 的激发态光电离截面, 测量

表 2 不同探测光波长下铥原子激发态的光电离截面
Table 2 Photoionization cross sections of thulium excited states at different probe light wavelengths

Upper Level Conf Term J	Levels (cm^{-1})	Ionization laser Wavelengths (nm)	Photoionization cross - sections (Mb)
$4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{7/2}$	34297.17	582.00	13.9 ± 1.3
		525.00	6.2 ± 0.5
		472.00	4.9 ± 0.5
		425.00	3.3 ± 0.2
$4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$	34085.20	564.00	4.6 ± 0.4
		525.00	3.7 ± 0.3
		472.00	3.7 ± 0.5
		425.00	3.4 ± 0.2

在 $3.3 \pm 0.2 \text{ Mb} \sim 13.9 \pm 1.3 \text{ Mb}$. Tm 原子激发态在电离阈值附近的光电离截面值较大, 随着电离能量的增加, 光电离截面呈减小趋势.

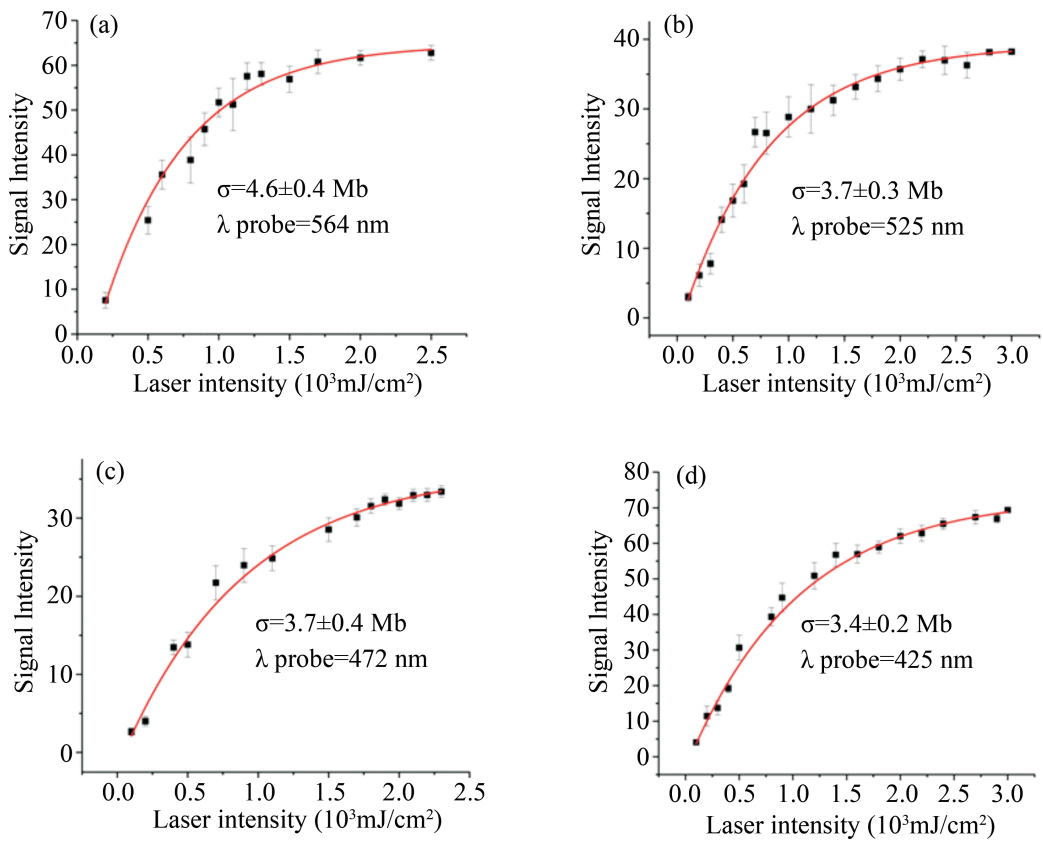


图6 泵浦光波长固定在 293.29 nm 时,不同探测光波长下的铥原子激发态 $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ 光电离截面

Fig. 6 When the laser pump wavelength is fixed at 293.29 nm, the photoionization data for the $4f^{13}(^2F_{5/2}^0)6s6p(^1P_1^0)(5/2, 1)_{5/2}$ excited states of thulium under different laser probe wavelengths

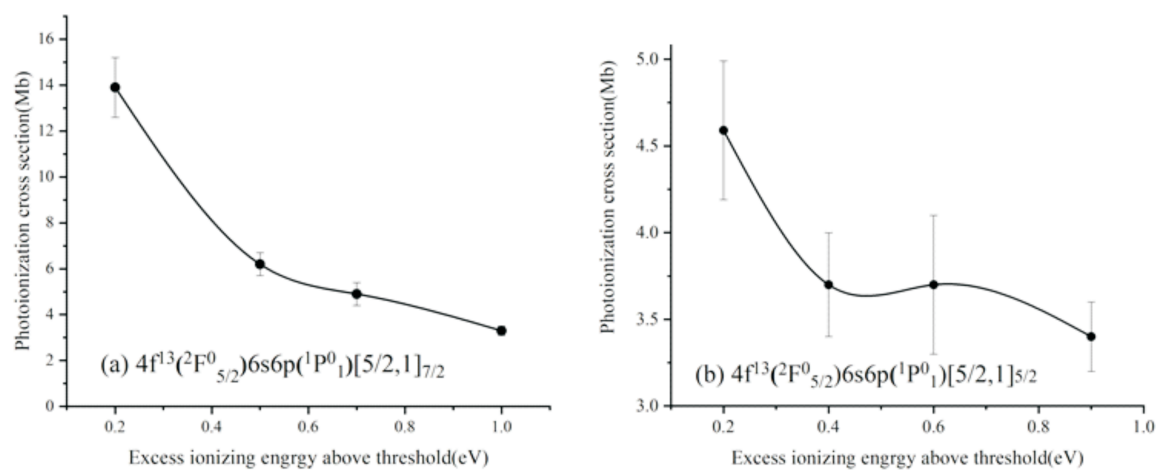


图7 Tm 原子光电离截面与电离富余能的依赖关系

Fig. 7 Dependence of Tm atom photoionization cross section on ionization surplus energy

参考文献:

[1] Li H, Wang X, Huang D X, *et al.* Recent advances of lanthanide – doped upconversion nanoparticles for biological applications [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31: 072001.

[2] Abbasi – Moayed S, Bigdeli A, Hormozi – Nezhad M R. Application of $\text{NaYF}_4\text{:Yb/Er/Tm}$ UCNPs in array – based sensing of neurotransmitters: from a single particle to a multichannel sensor array [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 2020, 12: 52976.

[3] Makrides C, Li M, Tiesinga E, *et al.* Fractal universality in near – threshold magnetic lanthanide dimers [J]. *Sci. Adv.*, 2018, 4: eaap8308.

- [4] Yusen Q E J S. Lanthanide photocatalysis[J]. *Acc. Chem. Res.*, 2018, 51: 2926.
- [5] Toyoda I R, Sakamoto R, Fukui N, *et al.* A single-stranded coordination copolymer affords heterostructure observation and photoluminescence intensification[J]. *Sci. Adv.*, 2019, 5: eaau0637.
- [6] Hiscox A, Ribeiro K, Batey R A. Lanthanide(III) - catalyzed synthesis of trans - diaminocyclopentenones from substituted furfurals and secondary amines via a domino ring - opening/4 pi - electrocyclization pathway[J]. *Org. Lett.*, 2018, 20: 6668.
- [7] Gobert O, Gibert T, Dubreuil B, *et al.* Photoionization cross sections in resonance ionization mass spectrometry of sputtered metal atoms: applications to material analysis[J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, 70: 7602.
- [8] Saini V K, Kumar P, Subrahmanyam V, *et al.* Measurement of photoionization cross - section of Li (2p, 3d) excited states using thermionic diode detector[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 2019, 224: 361.
- [9] Yar A, Iqbal J, Ali R, *et al.* Two - step laser excitation and ionization from the $7p^2P_{3/2}$ state of potassium[J]. *Laser Phys.*, 2015, 25: 025702.
- [10] Kalyar M A, Yar A, Iqbal J, *et al.* Measurements of photoionization cross section of the 4p levels and oscillator strength of the $4p \rightarrow nd^2D_{3/2,5/2}$ transitions of potassium[J]. *Opt. Laser. Technol.*, 2016, 77: 72.
- [11] Nadeem A, Haq S U, Nawaz M, *et al.* Measurements of the oscillator strengths for the $6p7s(1/2, 1/2)_1 \rightarrow 6pnp(1/2, 3/2)_2$ Rydberg transitions of lead[J]. *Spectrochim. Acta: Part B*, 2011, 66: 841.
- [12] Haq S U, Nadeem A, Nawaz M, *et al.* Oscillator strength measurements of the highly excited $4s4p^3P_1^0 \rightarrow 4snd^3D_2$ transitions of zinc[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, 27: 402.
- [13] Baig M A. Photoexcitation and photoionization from the $2p^53p[5/2]_{2,3}$ levels in neon[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, 84: 1943.
- [14] Zheng X, Chen X, Chen Y, *et al.* State - dependent photoionization cross - sections of 3d transition metal atoms[J]. *J. Chem. Phys.*, 2012, 136: 355.
- [15] Cong R, Yi C, Yang J, *et al.* Measurement of photoionization cross sections of the excited states of titanium, cobalt, and nickel[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 106: 6363.
- [16] Hu X Y, Wu H X, Chen X H, *et al.* Measurement of photoionization the excited states of cobalt and titanium[J]. *J. At. Mol. Phys.*, 2011, 28: 989 (in Chinese) [胡行勇, 吴宏霞, 陈晓虎, 等. 钴, 钛原子激发态光电离研究[J]. 原子与分子物理学报, 2011, 28: 989]
- [17] Zheng X F, Zhou X Y, Cheng Z Q, *et al.* Photoionization cross section measurements of the excited states of cobalt in the near - threshold region[J]. *AIP Adv.*, 2014, 4: 107120.
- [18] Wu J Z, Whitfield S B, Caldwell C D, *et al.* High - resolution photoelectron spectrometry of selected ns' and nd' autoionization resonances in Ar, Kr, and Xe[J]. *Phys. Rev. A*, 1990, 42: 1350.
- [19] Stebbings R F, Dunning F B. Autoionization from high - lying $3p^5(^2P_{1/2})5np'$ levels in argon[J]. *Phys. Rev. A*, 1973, 8: 665.
- [20] Dunning F B, Stebbings R F. Role of autoionization in the near - threshold photoionization of argon and krypton metastable atoms[J]. *Phys. Rev. A*, 1974, 9: 2378.
- [21] Marr G V. The absolute photoionisation cross section curve for atomic helium[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, 1978, 11: L121.
- [22] Chan W F, Cooper G, Guo X, *et al.* Absolute optical oscillator strengths for the electronic excitation of atoms at high resolution. II. The absorption spectrum of neon[J]. *Phys. Rev. A*, 1992, 45: 1420.
- [23] Gisselbrecht M, Lynga C, L'Huillier A, *et al.* Absolute photoionization cross sections of excited He states in the near - threshold region[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82: 4607.
- [24] Gomonai A I. Autoionizing resonances in three - photon ionization spectrum of the ytterbium atom[J]. *UKR J. Phys.* 2015, 60: 225.
- [25] Seema A U, Rath Asawari D, Mandal P K, *et al.* Polarization - based isotope - selective two - color photoionization of atomic samarium using broadband lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 2015, 118: 505.
- [26] Kutluk G, Ishijima H, Kanno M, *et al.* A systematic study of photoionization of free lanthanide atoms in the 4d giant resonance region[J]. *J. Electron Spectrosc.*, 2009, 169: 67.
- [27] Xu Y W, Shen L, Dai C J. Study of odd - parity states of Eu atom with two - photon ionization detection technique[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40: 52 (in Chinese) [徐亚伟, 沈礼, 戴长建. 用双光子电离探测技术研究奇宇称的 Eu 原子光谱[J]. 发光学报, 2019, 40: 52]
- [28] Xie J, Dai C J, Li M. Investigation of europium atom by two - color three - photon resonant ionization spec-

- troscopy[J]. *Acta Opt. Sin.*, 2010, 30: 2142 (in Chinese) [谢军, 戴长建, 李鸣. 铯原子双色三光子共振电离光谱的研究[J]. 光学学报, 2010, 30: 2142]
- [29] Xu Y W, Shen L, Dai C J. The study of Eu $4f^7 6p 6d$ autoionizing states with RIS and VMI techniques[J]. *Mod. Phys. Lett. B*, 2018, 32: 1850190.
- [30] Zhang D C, Zhang Y, Li X K, *et al.* Electron correlation effects in even Rydberg series converging to $4f^{13} (^2F_{7/2}^0) 6s(7/2, 1/2)_4^0$ and $4f^{13} (^2F_{7/2}^0) 6s(7/2, 1/2)_3^0$ of thulium atom[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2018, 67: 74 (in Chinese) [张典承, 张颖, 李晓康, 等. 铥原子收敛于 $4f^{13} (^2F_{7/2}^0) 6s(7/2, 1/2)_4^0$ 和 $4f^{13} (^2F_{7/2}^0) 6s(7/2, 1/2)_3^0$ 偶宇称里德伯系列能级的电子关联效应[J]. 物理学报, 2018, 67: 74]
- [31] Shafique B, Ali R, Haq S U, *et al.* Photoionization cross – section measurements from the $6s5d^1 D_2$ excited state of atomic ytterbium[J]. *Spectrochimica. Acta: Part B*, 2022, 193: 106434.
- [32] Amin N, Mahmood S, Saleem M, *et al.* Photoionization cross – section measurements from the $2p$, $3d$ and $3s$ excited states of lithium[J]. *Eur. Phys. J. D*, 2006, 40: 331.
- [33] Amin N, Mahmood S, Haq S U, *et al.* Measurements of photoionization cross sections from the $4p$, $5d$ and $7s$ excited states of potassium[J]. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer.*, 2007, 109: 863.
- [34] Rafiq M, Kalyar M A, Baig M A. Photoexcitation study of the $4s^2 S_{1/2}$ state of atomic sodium[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2008, 41: 115701.
- [35] Saleem M, Hussain S, Baig M A. Angular momentum dependence of photoionization cross section from the excited states of lithium isotopes[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, 77: 062506.
- [36] Rafiq M, Hussain S, Saleem M, *et al.* Measurement of photoionization cross section from the $3s3p^1 P_1$ excited state of magnesium[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2007, 40: 2291.