

# Cs 39D 态 Rydberg 原子 Stark 光谱的实验研究\*

朱兴波 张 好 冯志刚 张临杰 李昌勇 赵建明<sup>†</sup> 贾锁堂

(山西大学物理电子工程学院, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2009 年 6 月 11 日收到; 2009 年 8 月 28 日收到修改稿)

本文从理论和实验上对 Cs39D 态 Rydberg 原子在弱电场作用下的 Stark 效应做了详细研究. 理论上利用数值方法计算了 Cs 原子 39D 态的 Stark 结构; 实验上, 采用两步激发超冷基态原子获得超冷 Rydberg 原子, 通过场电离的方法获得了 39D 态的 Stark 光谱, 测量获得  $\alpha_2^{5/2}$ ,  $\alpha_0^{5/2}$ ,  $\alpha_2^{3/2}$  和  $\alpha_0^{3/2}$  相应的极化率分别为: 62(7), -146(13), 73(6) 和 -106(20) MHz·V<sup>-2</sup>·cm<sup>2</sup>, 实验结果与理论相符合.

关键词: Rydberg 原子, Stark 结构, 场电离, 极化率

PACC: 3260S, 3280P

## 1. 引 言

Rydberg 原子是指原子中的一个电子被激发到主量子数 ( $n$ ) 很大的高激发态的原子, 具有大电偶极矩, 长寿命, 能级间隔小等特点, 因此 Rydberg 原子之间相互作用很大, 而且很容易受到外场的影响, 如外加电场, 射频场, 黑体辐射, 微波场等<sup>[1]</sup>. 1987 年, Gallagher 小组利用两步激发在原子束中获得 Rydberg 原子, 并对其相互作用做了研究, 实验结果与两体理论符合得很好<sup>[2]</sup>. 随着激光冷却技术的发展, 在超冷 Rydberg 原子中观察到了许多不同于原子束中的现象, 如光谱展宽, 偶极阻塞 (dipole blockade) 效应等, 1998 年, Mourachko 小组<sup>[3]</sup>和 Anderson 小组<sup>[4]</sup>分别对高激发态的多体相互作用引起的展宽进行了研究, 并用三体模型对展宽做了理论分析. 2001 年, Lukin 小组<sup>[5]</sup>提出偶极阻塞效应可以用于量子计算和量子逻辑门的研究. 2004 年, Singer 小组<sup>[6,7]</sup>和 Tong 小组<sup>[8]</sup>分别对 Rydberg 原子中展宽和由长程相互作用引起的激发阻塞效应做了研究. 2006 年, Vogt<sup>[9]</sup>实验组利用电场调节原子的能级, 观察到了 Rydberg 原子的 Förster 共振相互作用, 产生了 30% 的偶极阻塞. 2008 年美国 Reinhard 小组<sup>[10]</sup>利用外加电场来操控了 Rydberg 原

子的偶极阻塞效应.

原子或分子在外电场作用下能级和光谱发生分裂的现象称做 Stark 效应. 在 1979 年, Zimmerman 小组<sup>[11]</sup>对 Cs 原子  $n = 15$  附近的 Stark 效应做了实验和理论上的研究, 并给出了详细的计算方法. 1986 年, 加拿大 O'Sullivan 小组<sup>[12]</sup>对 Rb 原子的 S, D 态的 Stark 效应做了分析, 并计算了极化率. 近年来, Rao 等<sup>[13]</sup>用 B-样条函数研究了 H 原子在平行电场和磁场中的问题, He 等<sup>[14]</sup>又用 B-样条函数研究静电场中 Li 原子 Rydberg 态的性质, 得出了 Li 原子的 Stark 能级图. 本文的实验工作是在超冷 Cs 原子中完成的, 由两步激发超冷基态原子形成超冷 Rydberg 原子, 用脉冲场电离的方法探测离子信号, 研究高 Rydberg 态与直流电场的相互作用, 并对 Cs 原子的 39D 态的 Stark 效应进行了系统研究, 对实验数据进行拟合求得极化率.

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 通过两步激发超冷 Cs 基态原子来制备超冷 Rydberg 原子. 首先用两台型号为 DL100 半导体激光器分别做俘获光和再抽运光, 在磁光阱 (MOT) 中获得大小约为 0.8 mm, 温度约为 100  $\mu$ K, 密度约为  $5 \times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup> 的超冷原子. 冷

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB921603)、国家自然科学基金 (批准号: 60678003, 60778008)、国家教育部留学回国人员科研启动基金、山西省自然科学基金和山西省回国留学人员科研基金资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

却光同时实现第一步激发,对应于  $6S_{1/2} (F=4) \rightarrow 6P_{3/2} (F'=5)$  的跃迁,所用波长为 852 nm. 第二步激发由连续可调谐半导体倍频激光器 TA-SHG110 实现,对应  $6P_{3/2} (F'=5) \rightarrow nD$  的跃迁,所用波长为 508—517 nm. 用波长计 (ANGSTROM 公司生产的型号为 WSU-30) 精确记录半导体激光器波长,精确度达  $0.001 \text{ cm}^{-1}$ . 半导体激光器发出的连续光通过声光调制器 (AOM) 斩成脉冲光,脉宽为  $1 \mu\text{s}$ . 在 MOT 中心有一对间距为 15 mm 的平行栅极,其中一极施加外加直流电场,用以研究超冷 Rydberg 原子的 Stark 效应. 另一极施加脉冲电场,用以电离产生的 Rydberg 原子,位于栅极之后的微通道板 (MCP) 探测电离后的离子或电子信号,再将信号送到示波器直接观察,或者由门积分平均器 (Boxcar) 进行数据处理,并由计算机记录. 数字延迟脉冲发生器 (DG535) 控制整个实验的时序,包括 AOM 脉冲电场,示波器以及 Boxcar 的触发.

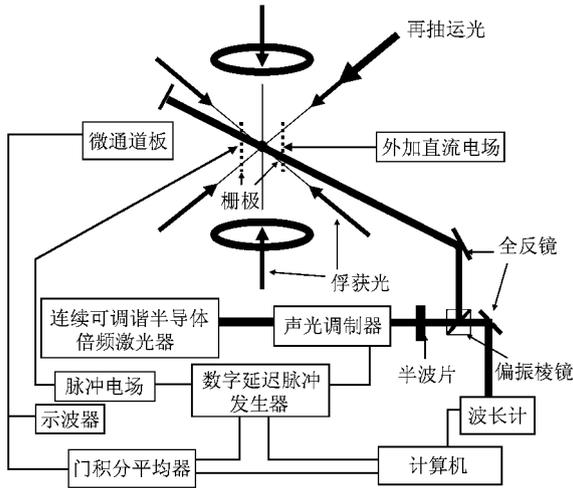


图 1 实验装置图

### 3. 实验结果与分析

首先采用数值方法来计算 Cs 原子的 Stark 能级结构. 单粒子的 Hamilton 量可写为:

$$H = -\frac{1}{2} \nabla^2 - V(r) + Ez. \quad (1)$$

由于 Rydberg 原子中单电子离核比较远,所以其势能可看作是 Coulomb 势,则 Schrödinger 方程可写为

$$\begin{aligned} (H^0 + H') \Psi &= \left( -\frac{1}{2} \nabla^2 - \frac{1}{r} + Ez \right) \Psi \\ &= W \Psi. \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $H^0$  是零场 Hamilton 算符,  $H'$  是外场与原子的

相互作用 Hamilton 量.

球坐标系中, Stark 相互作用的矩阵元表示为,

$$\begin{aligned} \langle W | m \rangle \langle Ez | W' | l' m' \rangle &= \delta_{mm'} \delta_{l'l \pm 1} E \langle l m | \cos \theta | l' m' \rangle \\ &\times \langle W | l | r | W' | l' \rangle. \end{aligned} \quad (3)$$

最后一项依据下列公式计算,

$$\langle l m_l | \cos \theta | l-1 m_l \rangle = \left( \frac{l^2 - m^2}{(2l+1)(2l-1)} \right)^{1/2}, \quad (4a)$$

$$\langle l m_l | \cos \theta | l+1 m_l \rangle = \left( \frac{(l+1)^2 - m^2}{(2l+3)(2l+1)} \right)^{1/2}. \quad (4b)$$

由于 Cs 原子中的精细结构大于 Stark 结构的影响,所以必须考虑其精细结构,则(3)式应转化为

$$\begin{aligned} &\langle W | l j m_j \rangle \langle Ez | W' | l' j' m'_j \rangle \\ &= \delta_{mm'} \delta_{l'l \pm 1} E \langle W | l | r | W' | l' \rangle \\ &\times \sum_{m_l = m_j \pm \frac{1}{2}} \langle l \frac{1}{2} m_l m_j - m_l | j m_j \rangle \\ &\times \langle l' \frac{1}{2} m'_l m'_j - m'_l | j' m'_j \rangle \\ &\times \langle l m | \cos \theta | l' m' \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

径向矩阵元用数值方法来计算,令  $x = \ln r$ , 则  $X = \sqrt{r}R$ , 径向的 Schrödinger 方程可改写为 Numerov 形式

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = g(x) X = \left\{ 2e^{2x} [V(x) - W] + \left( l + \frac{1}{2} \right)^2 \right\} X. \quad (6)$$

令  $r_j = r_s e^{-jh}$   $h$  是步长大小, 则

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= \left[ X_{i-1} \left( g_{i-1} - \frac{12}{h^2} \right) + X_i \left( 10g_i + \frac{24}{h^2} \right) \right] \\ &\quad / \left( \frac{12}{h^2} - g_{i+1} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

算符  $r$  的矩阵元变为

$$\langle W | l | r | W' | l' \rangle = \sum_i X_i X'_i r_i^3 \left( \sum_i X_i^2 r_i^2 \sum_j X_j^2 r_j^2 \right)^{-1/2}. \quad (8)$$

计算中取起点  $r_s = n(n+15)$ , 起点波函数  $X_0 = 0$ . 第二点根据表达式  $(-1)^{(n-l+1)} \times 10^{-10}$  计算获得,步长取 0.01. 当径向波函数变得发散或振荡加快时,停止计算,最后解矩阵方程获得每个电场下的本征能量,进而绘制出 Cs 原子的 Stark 结构,理论计算中未考虑超精细结构.

实验中,固定直流电场调节第二步激发光的频率,使激光波长调谐至  $6P_{3/2} (F'=5) \rightarrow 39D$  跃迁线附近,产生 39D Rydberg 原子;用上升时间为  $3 \mu\text{s}$  的斜坡电场使 Rydberg 原子电离;由 MCP 探测离子信

号. 图 2 是扫描第二步激发光波数时记录的 39D 态的离子谱, 其中图 2(a) 和 (b) 分别表示在场强  $E = 0$  V/cm,  $E = 1.306$  V/cm 时  $39D_{3/2}$  的离子谱. 图 2(c) 和 (d) 分别表示场强  $E = 0$  V/cm,  $E = 0.644$  V/cm 时  $39D_{5/2}$  的离子谱, 其中横坐标为扫描半导体激光器的波数. 零场时, 测得  $39D_{3/2}$ ,  $39D_{5/2}$  态对应的波数为  $19591.8922$   $\text{cm}^{-1}$  和  $19591.9344$   $\text{cm}^{-1}$ , 与理论值相符. 场强  $E = 1.306$  V/cm 时,  $39D_{3/2}$  态分裂成

两条能级, 场强  $E = 0.644$  V/cm 时  $39D_{5/2}$  分裂成为三条能级. 在外加电场时, 电场与原子相互作用会使能级简并消除, 原先角量子数相同, 磁量子数的绝对值不同的简并能级由于不同的能级移动而发生分裂. 其中  $D_{3/2}$  态会分裂成  $|M| = 1/2, 3/2$  的两条能级,  $|M| = 1/2$  发生较大偏移.  $D_{5/2}$  态会分裂成  $|M| = 1/2, 3/2, 5/2$  的三条能级,  $|M| = 1/2$  发生较大偏移.

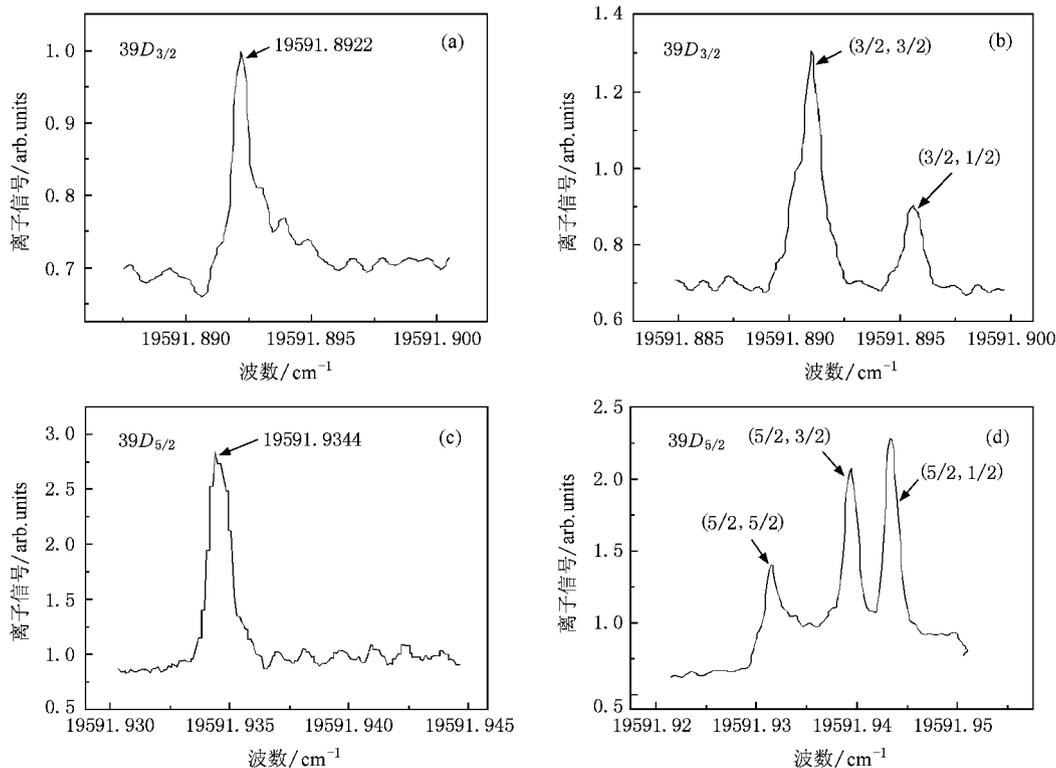


图 2 固定场强下的离子信号图 (a) (b) 分别表示在场强  $E = 0, 1.306$  V/cm 时  $39D_{3/2}$  的离子信号; (c) (d) 分别表示在场强  $E = 0, 0.644$  V/cm 时  $39D_{5/2}$  的离子信号

改变电场, 测量不同电场强度下 39D 态离子谱, 并对离子谱进行分析, 得到 Cs 原子 39D 态的 Stark 能级随场强的变化图. 图 (3) 中  $\blacksquare$ 、 $\blacktriangle$ 、 $\bullet$ 、 $\star$  和  $\blacklozenge$  5 条曲线分别代表实验上观察到的  $(5/2, 1/2)$ ,  $(5/2, 3/2)$ ,  $(5/2, 5/2)$ ,  $(3/2, 1/2)$ ,  $(3/2, 3/2)$  态在弱电场下的能级图, 实线是理论计算的能级图, 其中  $(J, |M|)$  表示角量子数为  $J$ , 磁量子数的绝对值为  $|M|$  的能级, 以下均以此表示能级. 可以看到能级  $39D_{5/2}$  的  $|M| = 5/2$  分量与  $39D_{3/2}$  的  $|M| = 1/2$  分量在电场强度约为 4 V/cm 时相交, 如图中箭头所示, 也就是说在  $E = 4$  V/cm 下, 39D 态的 Stark 分裂与精细结构导致的分裂相当, 实验与理论基本符合.

原子极化率是描述原子能级对电场强度响应的物理量, 碱金属原子极化率一般由标量极化率  $\alpha_0$  和张量极化率  $\alpha_2$  来表示, 文献 [12] 中 (4) 式知, 当精细结构引起的能级移动大于外电场引起的能级时,  $(J, |M|)$  的能量频移可以表示为

$$\Delta W^{J, |M|} = -\frac{E^2}{2} \left[ \alpha_0^J + \alpha_2^J \frac{3M^2 - J(J+1)}{J(2J-1)} \right], \quad (9)$$

可知, 在弱场条件下, 对于确定的  $J$  和  $|M|$ , 能级移动  $\Delta W^{J, |M|}$  与电场强度的二次方成线性关系. 图 4(a) 中  $\blacksquare$  和  $\bullet$  分别代表  $(3/2, 1/2)$ ,  $(3/2, 3/2)$  态的能级变化  $\Delta W$  与电场平方的关系图, 图 4(b) 中  $\blacksquare$ 、 $\bullet$  和  $\blacktriangle$  分别代表  $(5/2, 1/2)$ ,  $(5/2, 3/2)$ ,  $(5/2, 5/2)$  态的能级变化  $\Delta W$  与电场平方的关系图, 图中实线

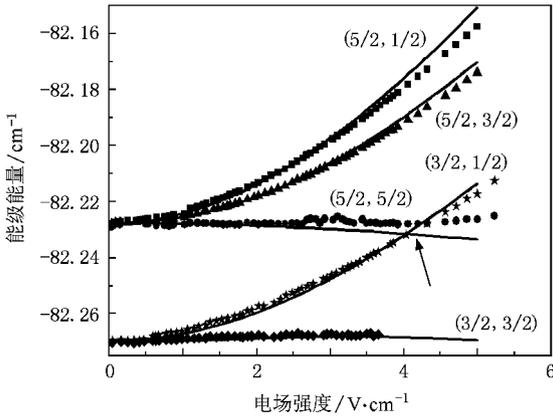
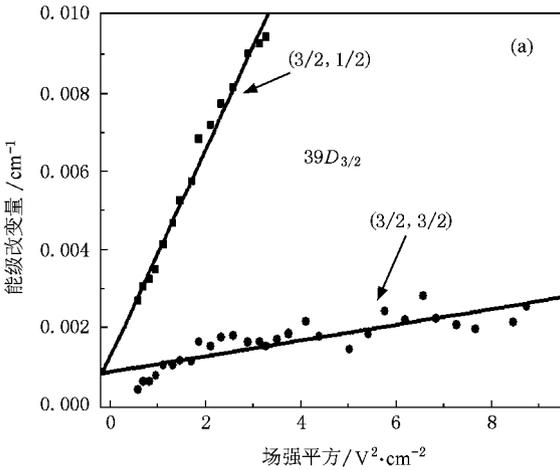


图3 39D 态的 Stark 能级图



是线性拟合 与(9)式相符.

根据实验数据 结合(9)式可得出 39D 态对应的极化率分别为

$$\alpha_2^{5/2} = 62(7) ,$$

$$\alpha_0^{5/2} = -146(13) ;$$

$$\alpha_2^{3/2} = 73(6) ,$$

$$\alpha_0^{3/2} = -106(20) ,$$

单位是 MHz·V<sup>-2</sup>·cm<sup>2</sup>. 与文献[15]中理论计算值相一致.

实验误差主要来源于原子云周围的弥散或杂散电场,垂直于栅极的电压可以补偿,但是平行于栅极的电场并不能补偿,会引起误差.

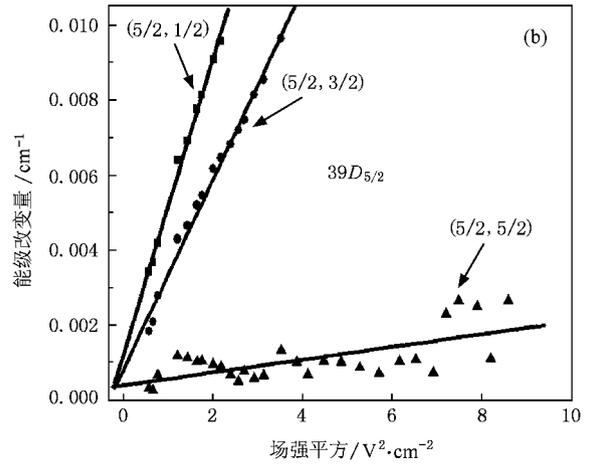


图4 弱场下能级改变量随场强平方的变化关系图

### 4. 结 论

用数值方法计算了 Cs 原子的 Stark 结构,在超冷 Cs 原子中用两步激发的方法得到超冷 Rydberg 原子,采用场电离的方法测量超冷 Rydberg 原子信

号,得到 Cs 原子在弱场下的 Stark 能级图. D 态的小 |M|分量在弱电场中发生较大偏移,而大 |M|分量变化不大,对实验数据进行拟合,计算得到 39D 态的极化率张量和标量值. 这为下一步进行 Rydberg 原子相互作用的研究奠定了基础.

[1] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge University Press) p5  
 [2] Stoneman R C , Adams M D , Gallagher T F 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1324  
 [3] Mourachko I , Comparat D , Tomasi F D , Fioretti A , Nosbaum P , Akulin V M , Pillet P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 253  
 [4] Anderson W R , Veale J R , Gallagher T F 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 249

[5] Lukin M D , Fleischhauer M , Cote R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 037901  
 [6] Singer K , Reetz-Lamour M , Amthor T , Marcassa L G , Weidemuller M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 163001  
 [7] Singer K , Stanojevic J , Weidemuller M , Cote R 2005 *J. Phys.* **B 38** 295  
 [8] Tong D , Farooqi S M , Stanojevic J , Krishnan S , Zhang Y P , Cote R , Eyler E E , Gould P L 2004 *Phys. Rev. Lett.* **3** 063001

- [9] Vogt T, Viteau M, Zhao J M, Chotia A, Comparat D, Pillet P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 083003
- [10] Reinhard A, Younge K C, Liebisch T C, Knuffman B, Berman P R, Raithel G 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 233201
- [11] Zimmerman M L, Littman M G, Kash M M, Kleppner D 1979 *Phys. Rev. A* **20** 2251
- [12] O' Sullivan M S, Stoicheff B P 1986 *Phys. Rev. A* **33** 1640
- [13] Rao J G, Xi J H, Liu H, Liu W Y, Li B W 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1056 (in Chinese) [饶建国、习金华、刘 鸿、刘文渝、李白文 1994 *物理学报* **43** 1056]
- [14] He Y L, Zhou X X, Li X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 116 (in Chinese) [何永林、周效信、李小勇 2008 *物理学报* **57** 116]
- [15] He X H, Li B W, Zhang C X 1989 *Acta Phys. Sin.* **38** 1717 (in Chinese) [何兴虹、李白文、张承修 1989 *物理学报* **38** 1717]

## Experimental investigation of Stark effect of ultra-cold 39D cesium Rydberg atoms\*

Zhu Xing-Bo Zhang Hao Feng Zhi-Gang Zhang Lin-Jie Li Chang-Yong Zhao Jian-Ming<sup>†</sup> Jia Suo-Tang  
(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 11 June 2009; revised manuscript received 28 August 2009)

### Abstract

In this paper, we investigate the Stark effect of ultra-cold 39D cesium Rydberg atoms in low-field. The Stark structure of 39D Rydberg states is calculated numerically. The cold cesium atoms are excited to Rydberg states via two-step process and the Stark spectra are obtained by field-ionization method. The scalar and tensor polarizabilities of 39D cesium Rydberg atoms are measured to be  $\alpha_2^{5/2} = 62(7) \text{ MHz} \cdot \text{V}^{-2} \text{ cm}^2$ ,  $\alpha_0^{5/2} = -146(13) \text{ MHz} \cdot \text{V}^{-2} \text{ cm}^2$ ,  $\alpha_2^{3/2} = 73(6) \text{ MHz} \cdot \text{V}^{-2} \text{ cm}^2$ ,  $\alpha_0^{3/2} = -106(20) \text{ MHz} \cdot \text{V}^{-2} \text{ cm}^2$  respectively. The experimental values are in agreement with the theoretical results.

**Keywords:** Rydberg atom, the Stark structure, field-ionization, polarizabilities

**PACC:** 3260S, 3280P

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB921603), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60678003, 60778008), the Scientific Research Starting Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education of China, the Natural Science Foundation of Shanxi Province and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Shanxi Province, China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn