

激光与光电子学进展

基于里德伯原子 AC-Stark 效应的工频电场测量

李伟^{1,2}, 张淳刚^{1,2}, 张好^{1,2}, 景明勇^{1,2}, 张临杰^{1,2*}

¹山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

²极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 在室温铯原子蒸汽中制备 42D 态里德伯原子, 并基于里德伯原子的电磁诱导透明光谱实现了工频电场的测量。实验中利用双光子激发方式制备了 42D 态里德伯原子, 通过改变耦合光频率获得了阶梯型电磁诱导透明光谱。研究了里德伯原子在射频(RF)电场作用下的光谱频移和分裂与 RF 电场幅度和频率的关系。采用将工频电场幅度调制到 RF 电场的方式, 实现了对工频电场强度和频率的测量。研究结果对工频电场的在线可溯源测量具有重要的参考价值 and 意义。

关键词 原子与分子物理学; 里德伯原子; 工频电场; 电磁诱导透明光谱; AC-Stark 效应

中图分类号 O562

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1702002

Power-Frequency Electric Field Measurement Based on AC-Stark Effect of Rydberg Atoms

Li Wei^{1,2}, Zhang Chungang^{1,2}, Zhang Hao^{1,2}, Jing Mingyong^{1,2}, Zhang Linjie^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract The 42D Rydberg atom is prepared in cesium vapor at room temperature, and the power-frequency electric field is measured based on the electromagnetically induced transparency spectrum of Rydberg atom. The 42D Rydberg atom is prepared by two-photon excitation, and the stepped electromagnetically induced transparency spectrum is obtained by changing the coupling frequency. The relationship between the spectral frequency shift and splitting of Rydberg atom under radio frequency(RF) electric field and the amplitude and frequency of RF electric field is studied. By modulating the amplitude of power-frequency electric field to RF electric field, the measurement of power-frequency electric field intensity and frequency is realized. Research results has important reference value and significance for online traceable measurement of power-frequency electric field.

Key words atomic and molecular physics; Rydberg atom; power-frequency electric field; electromagnetically induced transparency spectrum; AC-Stark effect

OCIS codes 020.5780; 020.1335; 020.2649

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2021-01-08; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61827824, 61475090)、电子信息控制重点实验室开放基金(6142105190304)

通信作者: *zlj@sxu.edu.cn

1 引言

在电力工业中,精确地测量电力设备周围空间电场及其变化,对电力设备的设计制造和安全运行有重要的意义,比如高压电力设备的绝缘结构优化,高压设备和电力系统的运行状态监测等^[1-2]。目前测量工频电场的方法主要为电学原理电场测量法和光学式电场测量法。基于电学原理,有传统的小球法、电容充电法等电位平衡方法以及现存的电荷感应式电场仪^[3-5],但是这些方法均有传感器导致的被测电场产生畸变的问题,大多难以应用到现场的带电测量上,精确测量强电场较为困难^[6];基于光学原理的工频电场测量方法主要分为功能型和非功能型光纤电场测量法,但是光纤测量中存在的电光效应^[7]本身具有温度相关性,因此基于电光效应的电场传感器存在温度漂移^[8]的问题。此外利用电光晶体感应静态或极低频电场时^[9-11],晶体内将发生电荷漂移和电场分布的改变,导致输出的传感信号很不稳定^[12-14]。里德伯原子有很大的电极化率^[15-16],对外电场较为敏感。基于里德伯原子的电磁诱导透明(EIT)光谱对里德伯态进行量子测量^[17-18]已经实现了里德伯量子态信息到激光相关参数的转换。里德伯原子作为传感器测量静电场、微波电场、射频(RF)电场时具有可溯源性好、探测灵敏度高、动态范围大等优势^[19-22]。

本文利用室温铯原子蒸汽作为传感器,基于里德伯原子 EIT 光谱实现了 50 Hz 工频电场的幅度和频率测量。实验中首先利用 852 nm 激光器和 510 nm 激光器实现 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 42D_{5/2}$ 的双光子共振跃迁,构建了阶梯型三能级体系。通过扫描 510 nm 耦合光频率并记录 852 nm 探测光的透射光

强,获得 EIT 光谱。观察和研究了作用在铯原子蒸汽池上的射频电场幅度和频率变化与 EIT 光谱频移和分裂的依赖关系。最后利用工频电场对射频电场进行幅度调制,实现了工频电场幅度和频率的测量,频率测量的精度达到 ± 0.03 Hz。

2 实验装置

图 1 为里德伯阶梯型 EIT 系统的实验装置图和能级示意图。实验中首先利用饱和吸收光谱(SAS)技术锁定 852 nm 探测光频率到铯原子 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 的跃迁线上,并通过半波片(HWP)和偏振分光棱镜(PBS)将 852 nm 探测光分成两束。510 nm 耦合光经 PBS 分束后得到的竖直偏振光和一束探测光反向共线作用至一个无电场作用的铯蒸汽池,作为参考光路。另外一束水平偏振的 510 nm 耦合光两次通过声光调制器(AOM),二级衍射光相对零级光移频 200 MHz。耦合光的二级衍射光和另外一束探测光通过单模保偏光纤(长度为 5 m)导入到工频电场测量平台,通过长距离光纤可以实现远程测量。在图 1(a)所示的实验光路中,测量端的原子蒸汽池被放置在厚度为 1.2 mm 覆铜板平行电极板间。平行电极板的尺寸为 70 mm × 100 mm,间距为 50 mm。

图 1(b)为 852 nm 探测光和 510 nm 耦合光与铯原子构成的阶梯型三能级系统,其中 λ_c 和 λ_p 分别为耦合光的频率和探测光的频率。实验中 510 nm 激光器的频率锁定在超稳定腔上^[23],利用电光相位调制器的驱动频率变化调谐 510 nm 激光的频率。在铯原子激发态 $6P_{3/2} \rightarrow 42D_{5/2}$ 里德伯态共振跃迁频率附近扫描耦合光频率,在光电探测器上记录 852 nm 探测光的透射信号,获得了里德伯原子 EIT 光谱。

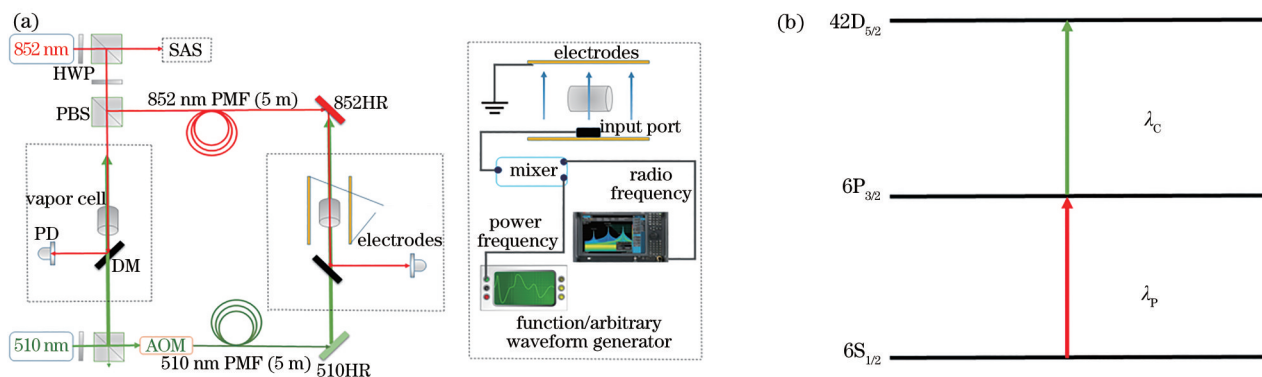


图 1 里德伯阶梯型 EIT 系统的实验装置图和能级示意图。(a)实验装置图;(b)能级示意图

Fig. 1 Experimental setup and energy level diagram of Rydberg ladder EIT system. (a) Schematic of the experimental setup; (b) diagram of energy level

一束 510 nm 耦合光经过 AOM 二级衍射后移频 200 MHz, 进入由磁屏蔽材料包裹并控温的铯原子蒸汽池。利用无外场扰动的参考 EIT 光谱作为参考光谱, 并对其与射频作用下的 EIT 光谱进行对比, 可对 EIT 光谱的共振频率进行精确标校。此外实验中耦合光频率被锁定到可调谐电光调制器的边带上, 边带调制频率由高频信号源提供, 因此获得频率扫描的相对频率精度小于 1 Hz。

在实验光路中的铯泡两侧, 利用平行电极板施加射频电场。由于平行电极板加载射频电场存在阻抗匹配问题, 利用 EIT 光谱信号对射频电场耦合频率进行优化, 本实验中选取频率为 55 MHz。在进行工频电场测量时, 用工频电场对 55 MHz 射频电场进行幅度调制。

3 结果与分析

首先研究不同电场强度的射频电场作用下 $42D_{5/2}$ 态里德伯原子 EIT 光谱, 如图 2 所示。图 2(a) 是电场强度 $E=0$ V/cm 时 $42D_{5/2}$ 态里德伯原子的 EIT 光谱, 利用 Voigt 函数对光谱进行拟合, 得到的半峰全宽为 7.64 MHz。由于里德伯原子 D 态比 S 态具有更丰富的超精细能级, 在射频电场作用下里德伯能级会产生一系列的 Floquet 态, 谱线将呈现出高阶项以及复杂的态混合和态转移现象共同导致的边带峰不对称现象^[24-25]。当电场强度 $E=0.3$ V/cm 时, 在较小射频电场作用下, 原先角量子数 J 相同, 磁量子数 M 的绝对值不同的简并能级出现了简并消除, 如图 2(b) 所示。由于不同量子数的 m_j 能级移动不同, 光谱峰位置出现了频移, 信号中的小峰值

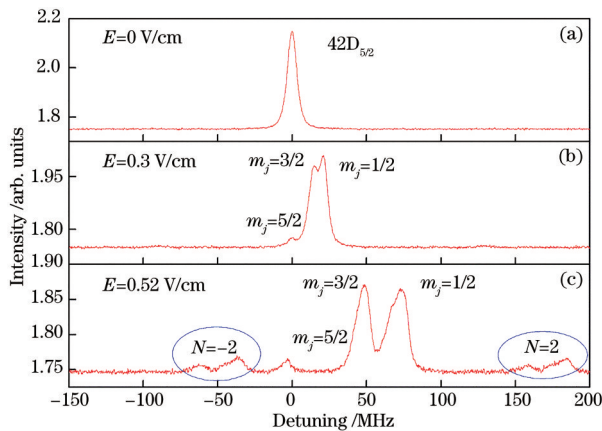


图 2 不同场强下的 EIT 光谱信号。(a) $E=0$ V/cm; (b) $E=0.3$ V/cm; (c) $E=0.52$ V/cm
Fig. 2 EIT spectra under the variation electric strength. (a) $E=0$ V/cm; (b) $E=0.3$ V/cm; (c) $E=0.52$ V/cm

分别对应量子数 $m_j=1/2, 3/2, 5/2$ 光谱。当电场强度 $E=0.52$ V/cm 时, 较大的电场强度带来的 Stark 效应导致了更大的频移和更为明显的能级分裂, 并且出现了 $m_j=1/2, 3/2$ 超精细能级在射频场作用下产生的二阶边带 ($N=\pm 2$), 如图 2(c) 所示。

射频电场作用下的里德伯原子量子态的频移^[26]可表示为

$$\Delta W^{J,|M|} = -\frac{E^2}{4} \left[\alpha_0 + \alpha_2 \frac{3M^2 - J(J+1)}{J(2J-1)} \right], \quad (1)$$

式中: α_0 是里德伯态的标量电极化率; α_2 是张量电极化率。对于 $42D_{5/2}$ 态, $\alpha_0 = -217.069652$ MHz·V⁻²·cm², $\alpha_2 = 237.914181$ MHz·V⁻²·cm²。图 3 为光谱峰的频移随射频电场幅度变化的关系, 实线是 (1) 式的理论拟合结果, 理论结果和实验测量具有很好的一致性。因此通过测量 EIT 信号对应的超精细能级频率移动, 可以实现射频电场场强值的可溯源测量。本实验中 $42D_{5/2}$ 态的 EIT 光谱线宽为 7.64 MHz, 由于最小光谱频率移动分辨率和电极化率最大的超精细能级 $m_j=1/2$ 光谱移动, 可实现的最小探测场强约 136.9 mV/m。

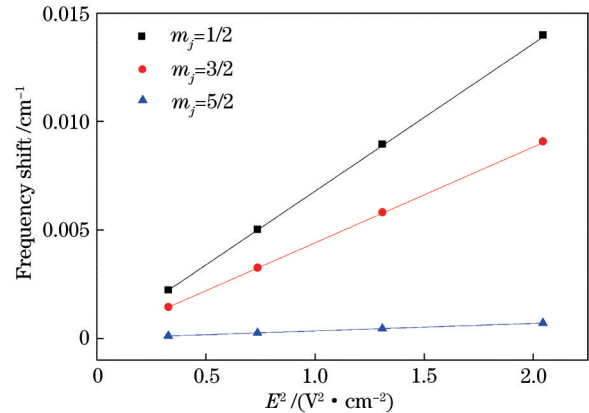


图 3 不同幅度射频电场下, EIT 光谱中超精细能级频率移动

Fig. 3 Frequency shift of hyperfine states in EIT spectra varying with electric field strength of RF fields

为了测量工频电场, 把工频电场幅度调制到射频场上, 因此加到平行电极板上的场为 $E(t) = E_0 \cdot \cos(\omega_1 t) \cdot \cos(\omega_2 t)$, 其中 $\omega_1 = 2\pi \cdot 50$ Hz, $\omega_2 = 2\pi \cdot 55$ MHz。由于工频场的频率相较于射频场非常低, 工频场的幅度调制可以看作射频场幅度随时间的缓变。EIT 光谱中的超精细能级信号峰的频率移动值以 50 Hz 的频率变化。实验中利用参考光路中产生的 EIT 光谱作为频率基准, 将 510 nm 耦合光频率

锁定在 $6P_{3/2} \rightarrow 42D_{5/2}$ 共振位置处,工频电场幅度变化通过射频场幅度调制体现。观察 852 nm 探测光的强度变化,可以得到一个频率为 50 Hz 的正弦函

数信号。图 4 是不同频率工频电场信号的测量结果,实线是正弦函数拟合结果。通过正弦拟合,可以获得被测工频场的频率值。

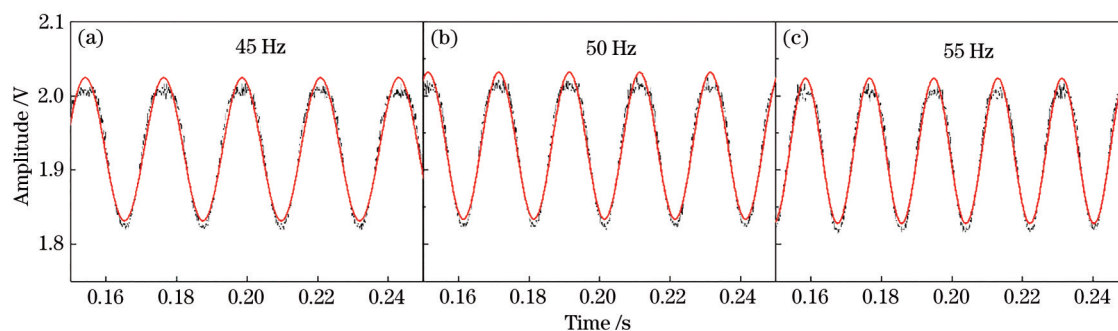


图 4 不同频率的工频电场作用下 EIT 透射信号。(a) 45 Hz; (b) 50 Hz; (c) 55 Hz

Fig. 4 EIT signal under the power-frequency electric field with different frequency. (a) 45 Hz; (b) 50 Hz; (c) 55 Hz

图 5 为工频电场频率为 45~55 Hz 时,得到的测量信号拟合结果与实际施加的信号频率关系。实线为线性拟合结果,拟合度为 0.99875,拟合不确定度为 0.09524,对应的频率测量精度达 ± 0.03 Hz,表明工频电场频率测量具有优异的精确性。

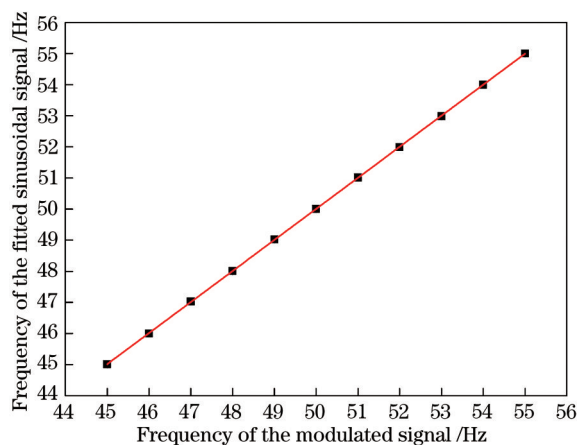


图 5 被测工频场频率与调制工频场频率的关系

Fig. 5 Modulated frequency versus measured frequency of power-frequency field

研究表明:基于里德伯原子的 AC-Stark 效应,通过测量光谱的频率移动可以实现对工频电场幅度和频率的精确测量。对不同超精细能级的频率移动进行同时测量,可以实现多测量结果的互相校准,从而提升被测工频电场幅度测量精度。对确定的超精细态光谱峰值随时间变化情况进行测量,可以利用三角函数拟合得到工频电场频率的精确测量值,测量精度可以达 ± 0.03 Hz。研究结果对实现工频电场的远程在线高灵敏测量具有重要的参考价值。

4 结 论

利用里德伯原子对外场敏感的特点,基于里德伯原子的 AC-Stark 效应,通过测量 EIT 光谱的频率移动和光谱峰值随时间的变化,实现了对工频电场幅度和频率的精确测量。

参 考 文 献

- [1] Zhang X, Bai Q, Xia S H, et al. Miniaturized 3-D electric field sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1433-1436.
张星, 白强, 夏善红, 等. 一种小型三维电场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1433-1436.
- [2] Xiong L, Song D J, Zhang Y L, et al. Electromagnetic field intensity measurement and solution for unsafe environment along transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 97-101.
熊兰, 宋道军, 张义力, 等. 输电走廊功频电磁场的测量和解决方案[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 97-101.
- [3] Li C R, Wang W D, Lin Z S, et al. A study of potential: free spherical sensor for transient electric field measurement[J]. Journal of North China Institute of Electric Power (Nature Science), 1993, 20(S1): 21-28.
李成榕, 王文端, 林章岁, 等. 暂态电场球形测量探头的研究[J]. 华北电力学院学报(自然科学版), 1993, 20(S1): 21-28.
- [4] Wang J G, Lin W, Li J, et al. Study on capacitive alternating electric field sensor and detecting test on power frequency electric field[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(9): 21-23, 26.
汪金刚, 林伟, 李健, 等. 电容式交变电场传感器与

- 功频电场检测试验研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 21-23, 26.
- [5] Li Q Q, Liu J, Li Y M, et al. Spherical sensor for the measuring transient electric fields based on optical fibre[J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(3): 14-16.
李清泉, 刘健, 李彦明, 等. 基于光纤的测量瞬态电场的球形传感器[J]. 传感器技术, 2002, 21(3): 14-16.
- [6] Xiao D P, Ma Q C, Xie Y T, et al. A power-frequency electric field sensor for portable measurement[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1053.
- [7] Hidaka K, Fujita H. A new method of electric field measurements in corona discharge using Pockels device[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(9): 5999-6003.
- [8] Niu B, Zeng R, Li H, et al. Design of non-electrode power frequency electric field sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 101-107.
牛犇, 曾嵘, 李欢, 等. 无电极型功频电场传感器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 101-107.
- [9] Sun B, Chen F S. Integrated optical E-field sensor for measurements of power frequency electric field [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 202-204.
孙豹, 陈福深. 用于测量功频强电场的集成光学电场传感器[J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 202-204.
- [10] Jiang Y Z, Yang D W, Zhang F J, et al. A straight waveguide optical voltage sensor for measurement of power frequency voltage[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022301.
姜一真, 杨德伟, 张芳杰, 等. 用于测量功频高电压的直波导电压传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022301.
- [11] Li Z Y, Yuan H W, Cui Y, et al. Measurement of distorted power-frequency electric field with integrated optical sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 1132-1139.
- [12] Kobayashi R, Tajima K, Kuwabara N, et al. Optical bias angle control method for electric field sensor using Mach-Zehnder interferometer[J]. Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications), 2000, 83(8): 53-61.
- [13] Martínez C G, Aguilar J S, Pérez J M, et al. Novel electric field sensing scheme using integrated optics LiNbO₃ unbalanced Mach-Zehnder interferometers and optical delay-modulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(1): 27-33.
- [14] Maeno T, Nonaka Y, Takada T, et al. Determination of electric field distribution in oil using the Kerr-effect technique after application of DC voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(3): 475-480.
- [15] Gallagher T F, Uzer T. Rydberg atoms[J]. Physics Today, 1995, 48(9): 92.
- [16] He X H, Li B W, Zhang C X, et al. Polarizabilities of high Rydberg alkali atoms[J]. Acta Physica Sinica, 1989, 38(10): 1717-1722.
何兴虹, 李白文, 张承修, 等. 碱原子高里德伯态的极化率[J]. 物理学报, 1989, 38(10): 1717-1722.
- [17] Harris S E. Electromagnetically induced transparency [J]. Physics Today, 1997, 50(7): 36-42.
- [18] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S, et al. Coherent optical detection of highly excited Rydberg states using electromagnetically induced transparency [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(11): 113003.
- [19] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. Nature Physics, 2012, 8(11): 819-824.
- [20] Tanasittikosol M, Pritchard J D, Maxwell D, et al. Microwave dressing of Rydberg dark states[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2011, 44(18): 184020.
- [21] Miller S A, Anderson D A, Raithel G, et al. Radio-frequency-modulated Rydberg states in a vapor cell [J]. New Journal of Physics, 2016, 18(5): 053017.
- [22] Bason M G, Tanasittikosol M, Sargsyan A, et al. Enhanced electric field sensitivity of rf-dressed Rydberg dark states[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(6): 065015.
- [23] Bao S X, Zhang H, Zhou J, et al. Polarization spectra of Zeeman sublevels in Rydberg electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review A, 2016, 94(4): 043822.
- [24] Anderson D A, Miller S A, Raithel G, et al. Optical measurements of strong microwave fields with Rydberg atoms in a vapor cell[J]. Physical Review Applied, 2016, 5(3): 034003.
- [25] Yoshida S, Reinhold C O, Burgdörfer J, et al. Photoexcitation of $n \simeq 305$ Rydberg states in the presence of an rf drive field[J]. Physical Review A, 2012, 86(4): 043415.
- [26] O'Sullivan M S, Stoicheff B P. Scalar and tensor polarizabilities of 2D Rydberg states in Rb[J]. Physical Review A, 1986, 33(3): 1640-1645.