引用格式：ZHANG Chungang, LI Wei, ZHANG Hao, et al. Power Frequency Electric Field Measurement Based on Electromagnetic Induced Transparent Spectrum under Radio Frequency Field[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0602001
张淳刚,李伟,张好,等.基于调制射频场电磁诱导透明光谱的工频电场测量[J].光子学报,2021,50(6):0602001

基于调制射频场电磁诱导透明光谱的工频电场测量

张淳刚,李伟,张好,景明勇,张临杰
(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,太原 030006)

摘　要:利用双光子(852 nm和509 nm)激发方式实现了铯原子$53S_{1/2}$里德堡态制备,并研究了射频电场导致的交流斯塔克效应作用下$53S_{1/2}$里德堡原子的电磁诱导透明光谱。通过改变射频电场幅度,得到了电磁诱导透明光谱斯塔克频移与电场幅度的关系。实验中将工频电场幅度调制到射频电场,实现了工频电场场强的可溯源测量,场强灵敏度达到0.37 V/cm,测量动态范围为37.2 dB。同时获得了工频电场频率的精确测量,频率测量的不确定度优于0.1%。

关键词:里德堡原子;电磁诱导透明光谱;斯塔克频移;射频电场;工频电场
中图分类号:O433.1　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/gzxb20215006.0602001

Power Frequency Electric Field Measurement Based on Electromagnetic Induced Transparent Spectrum under Radio Frequency Field

ZHANG Chungang, LI Wei, ZHANG Hao, JING Mingyong, ZHANG Linjie
(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices*, *Institute of Laser Spectroscopy*, *Shanxi University*, *Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: The two-photon (852 nm and 509 nm) excitation was used to achieve the preparation of the $53S_{1/2}$ Rydberg state of cesium atoms. The electromagnetically induced transparency spectrum of Rydberg atoms in which the radio frequency electric fields in the AC Stark effect was studied. By changing the amplitude of the radio frequency electric fields, the dependance of the Stark frequency shift of Rydberg atoms on the amplitude of the electric field was investigated. In the experiments, the power frequency electric fields were modulated to the radio frequency electric fields. The traceable measurement of the field strength of the power frequency electric field was realized. The field strength sensitivity can reach 0.37 V/cm, and the amplitude measurement dynamic range can reaches 37.2 dB. Moreover, the frequency measurement of power frequency electric fields is demonstrated, and the uncertainty of frequency measurement is smaller than 0.1%.

Key words: Rydberg atomic; Electromagnetic induced transparency spectrum; Stark frequency shift; Radio frequency electric field; Power frequency electric field
OCIS Codes: 020.1335; 020.5780; 020.6580; 300.6360

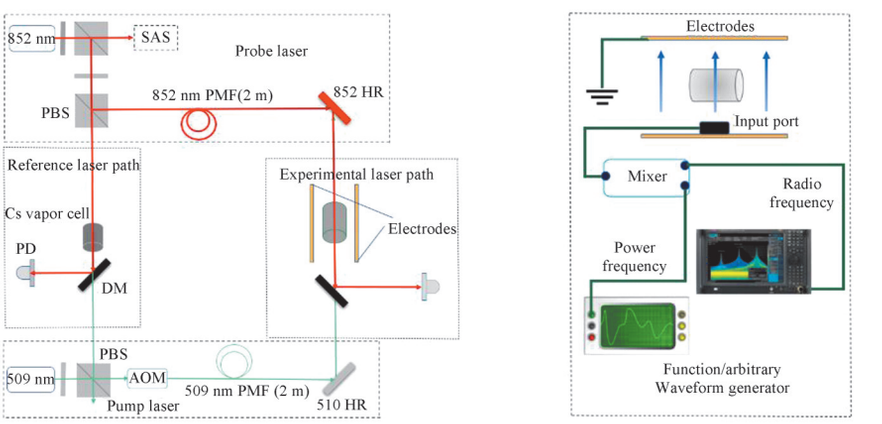
基金项目:国家重点研发计划(No.2017YFA0304203),国家自然科学基金(Nos.61827824,61475090),电子信息控制重点实验室开放基金
第一作者:张淳刚(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为基于里德堡原子的工频电场测量。Email: 1163081774@qq.com
通讯作者:张临杰(1975—),男,教授,博士,主要研究方向为基于里德堡原子的电磁场精密测量。Email: zlj@sxu.edu.cn
收稿日期:2020-12-21;**录用日期**:2021-01-29

0 引言

工频电场是指50 Hz或60 Hz随时间正弦变化的电荷产生的电场。在高压、特高压输电线路和电力设施附近环境中存在工频电场分布，离线测量工频电场对于高压、特高压的电力安全检测具有重要的意义。在目前广泛使用的工频电场的测量方式中，主要方法还是传统的感应电荷式电场测量法和基于电光效应的光学式电场测量法[1]。基于感应电荷式电学原理的主要是各类型的电荷感应式电场仪[2]，但是这种原理制成的仪器难以应用到现场的带电测量，精确测量强电场较为困难。特别是在非均匀电场和窄空间测量情况下[3]，无法实现对电场空间分布的详尽刻画；基于电光效应的工频电场光学测量，是通过激光在穿过置于电场中的晶体时发生双折射的效应，反映被测电场的参数。由于电光效应本身具有温度相关性，因此基于电光效应的电场传感器一般存在温度漂移的问题[4-5]。此外在利用电光晶体感应静态或极低频电场时，晶体内将产生电荷漂移和电场分布的改变，会导致输出传感信号不稳定情况出现[6-7]。近年来，利用里德堡原子实现外加电场的精确测量引起了广泛关注，如1999年OSTERWALDER A、MERKT F等首次实现了基于里德堡原子的静电场测量[8]；2012年SEDLACEK J A所在SHAFFER小组[9]利用微波相干耦合相邻的两个里德堡能级，实现了基于里德堡原子的微波电场测量，实现最小可测微波电场强度为8 μV/cm；2017年，该小组利用马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）和平衡零拍探测技术测量探测光的正交振幅分量，将最小可探测微波电场强度降低到1 μV/cm，并在理论上预测该方案可实现的极限电场强度可达100 nV/cm[10]。然而基于里德堡原子的工频电场测量研究还没有开展，本文演示了一种基于里德堡原子的工频电场量子测量方法，利用里德堡原子具有很大的电偶极矩并对电场特别敏感的特性[11-12]，以里德堡原子电磁诱导透明（Electromagnetically Induced Transparency，EIT）效应[13]为基础，研究了射频电场作用下的EIT光谱斯塔克效应导致的频率移动，通过工频电场幅度调制的射频电场技术，实现了工频电场幅度的可溯源测量，场强灵敏度为0.37 V/cm，幅度测量动态范围可达37.2 dB。并通过里德堡原子透明光谱信号的幅度测量，获得了工频电场频率的精确测量，测量不确定度优于0.1%。

1 实验装置

铯里德堡原子的电磁诱导透明光谱实验装置如图1。整个系统包括主光路和参考光路两大部分，其中主光路部分包括双通声光调制器（Acousto-optic Modulator，AOM）移频光路和铯原子蒸汽池及电场添加装置。为了防止实验中主光路铯原子蒸汽池两侧添加的电场对参考光路产生影响，将两部分系统分别放置在不同实验平台上，以减小对实验准确性的影响。图1为主光路的铯原子蒸汽池及电场添加装置，这里平行电极由覆铜板所制，大小为8 cm×8 cm，板间相距5 cm。数字信号发生器输出的射频信号被施加在电极板上，原子蒸汽池被放置在电极板中间。工频电场通过幅度调制方式叠加在射频电场上。



(a) Experimental laser path　　(b) Signal adding device for electrodes

图1 实验装置及光路

Fig. 1 Experimental scheme

实验中，852 nm激光分为三束，一束用于搭建饱和吸收光谱，以实现852 nm激光频率锁定在铯原子$6S_{1/2}(F=4)\rightarrow 6P_{3/2}(F=5)$的跃迁线上。另外两束如图1所示，分别作为探测光进入铯原子蒸汽池（主光路及参考光路），使铯原子能够从基态$6S_{1/2}$跃迁至$6P_{3/2}$激发态；509 nm激光同样被分为两束，一束用于直接进入参考光路铯原子蒸汽池与852 nm激光重合，另一束在双通AOM之后进入主光路铯原子蒸汽池中与852 nm激光重合，509 nm激光可使铯原子从$6P_{3/2}$跃迁至$53S_{1/2}$里德堡态，通过扫描509 nm激光即可观察到EIT光谱（在室温25 ℃情况下，铯原子数密度约为$4.89\times10^{10}/cm^3$），如图2所示。

由于主光路中509 nm激光两次通过声光移频器，声光移频器的工作频率为200 MHz，两次通过声光移频器使得509 nm激光频率失谐400 MHz，因此图2中，主光路和参考光路的EIT信号频率相差400 MHz。此配置用于进行光谱相对频率的标定。为了主光路有更好的信噪比，主光路中探测光功率比参考光路中探测光功率大2倍，因此图2中可以看到主光路的EIT光谱具有更高的幅度。

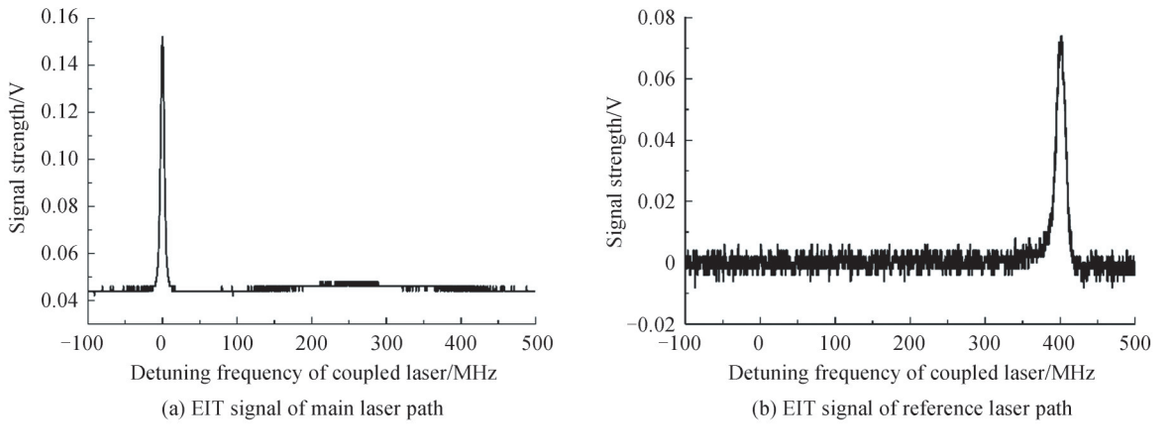


图2　主光路及参考光路EIT信号

Fig. 2　EIT signal of main optical path and reference experimental systems

实验中，首先通过改变射频电场的电压幅值、频率等参数，观察不同电场情况下EIT信号的变化情况，研究射频场幅度和频率对里德堡原子EIT信号的影响；利用工频电场对射频电场进行幅度调制，测量工频电场幅度和频率导致的EIT信号频移和幅度随时间演化的规律。

2　实验结果与分析

2.1　射频场作用下EIT信号的变化情况

首先利用COMSOL Multiphysics仿真软件，对平行电极板上施加射频场后的电场分布进行了模拟。模拟场的设置输入值为实际射频电场幅度，其它仿真参数如电极板尺寸、材料等与实验装置一样。图3为输入

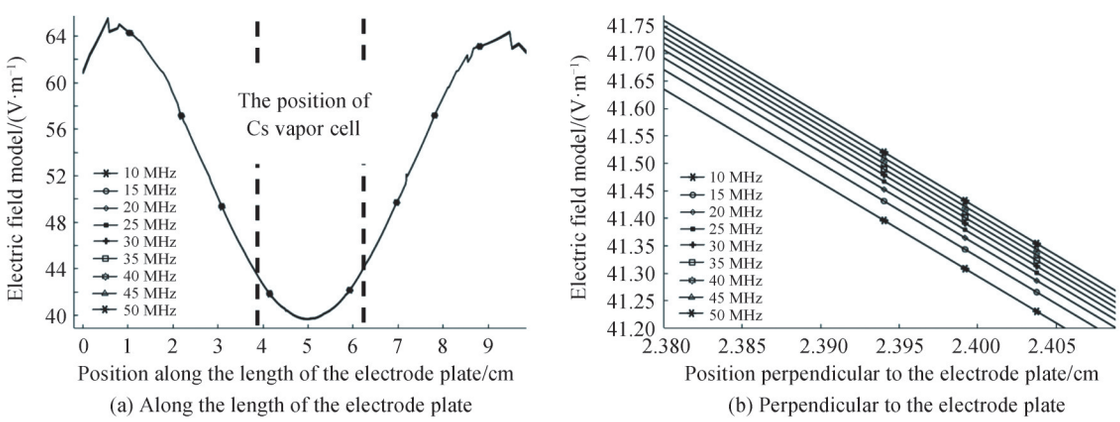


图3　利用COMSOL Multiphysics模拟电极板间电场分布的仿真结果

Fig. 3　Simulation results of electric field distribution between electrode plates using COMSOL Multiphysics software

射频电场幅值为5 V时，电极板间的电场分布的仿真结果。图3(a)为平行于电极板方向电极板中心的电场分布，图中虚线标记位置即为实验中铯原子蒸汽池位置，铯原子蒸汽池长度为2.5 cm。

如图3(b)，蒸汽池范围内的场强变化为施加不同频率射频电场情况下，平行电极板间垂直方向上的电场分布。可以看到相同输入电场情况下，射频场为50 MHz时平行电极板间得到的电场强度最大，理论模拟得到平行电极板间平均电场大小为0.57 V/cm。

实验中使用数字信号发生器产生射频电场，改变平行电极板所加射频信号的频率和幅度，通过测量数字信号发生器输出射频电场频率10～50 MHz、电场幅度1～5 V变化情况下的EIT信号，发现射频场频率50 MHz时，EIT信号高度及线宽随电场幅度变化最为明显。对比图3中的数值仿真结果，实验测量结果证实了50 MHz射频电场与平行电极板的阻抗匹配效果最好，因此选取50 MHz射频电场进行后续的工频电场测量实验。

为了研究弱射频电场作用下里德堡EIT光谱的频移效应，测量射频场频率50 MHz，电场强度分别为0、0.4 V/cm、0.6 V/cm、0.8 V/cm、1.0 V/cm时的EIT光谱信号，如图4所示。随着电场强度的增加，EIT谱线呈现出显著的红移现象，同时EIT信号出现了明显的展宽。该实验现象是射频电场引起的AC Stark效应所导致[14]。

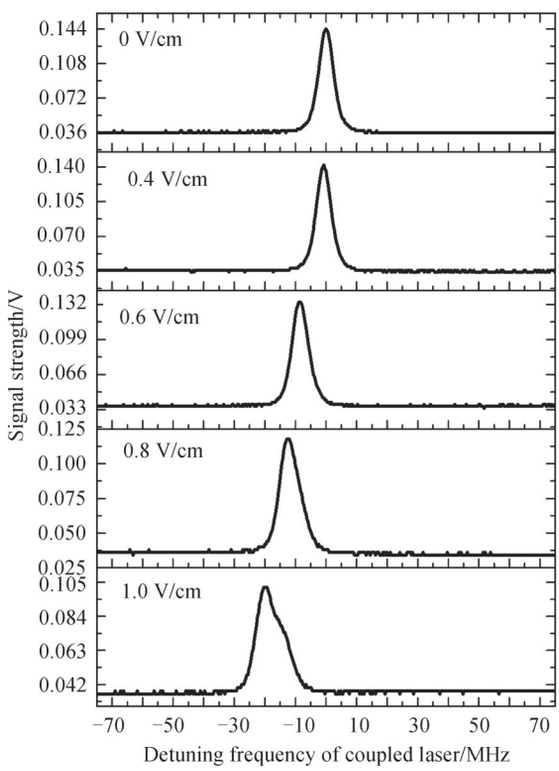


图4 不同射频电场强度下的EIT光谱

Fig. 4 EIT spectral under the different intensities of radio frequency electric fields

图5为不同射频电场强度情况下，EIT信号频率移动测量结果。由文献[15]、[16]可知，对比DC电场和RF电场的Stark能级移动结果，$E_{DC}=E_{RF}/\sqrt{2}$时，RF电场作用下的Stark频移大小等于均方值下DC Stark频移大小。由于射频场的频率远小于原子的特征频率，此时射频场作用下的里德堡原子的极化率可以认为与DC电场下的极化率相等[17-18]，因此RF场引起的频移可以表示为

$$\Delta=\alpha_{DC}E_{RF}{}^{2}/4 \tag{1}$$

式中，α_{DC}为实验所用$53S_{1/2}$里德堡态原子的DC极化率，这里$\alpha_{DC}=71.1\ \mathrm{MHz/(V\cdot cm^{-1})^2}$[19]。图5中实线是利用式(1)得到的理论拟合结果，拟合得到的DC极化率为$\alpha_{DC}=72.0\ \mathrm{MHz/(V\cdot cm^{-1})^2}$，与理论计算结果基本吻合。

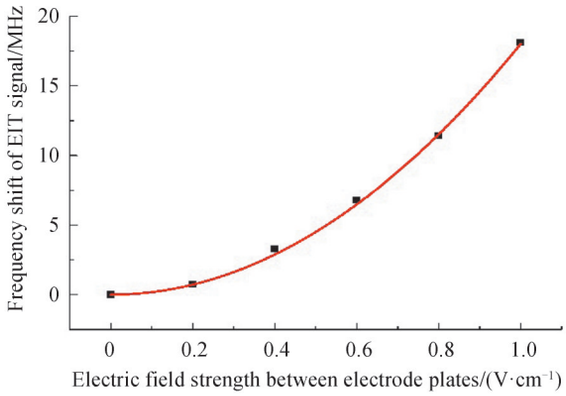


图5 EIT信号频移与电极板间电场强度大小的关系

Fig. 5 The relationship between the frequency shift of EIT signal and the electric field strength between the electrode plates

由图4可知,实验中无电场时EIT信号线宽为4.98 MHz。在进行频移测量时,频移最小分辨率决定于光谱信号的半高全宽,即2.49 MHz,代入式(1)计算可知,通过频率移动测量实现的场强测量灵敏度约为0.37 V/cm。

2.2 工频场作用下EIT信号的变化情况

射频场作用下,随着数字信号发生器输出信号幅度的改变,EIT信号的峰高也有变化。实验中将509 nm激光频率稳定在主光路EIT峰的共振位置处,便于进一步对峰高的变化进行观察和分析。

利用工频电场对50 MHz射频信号进行幅度调制,调制深度为100%。通过改变工频电场的幅度和频率对EIT信号进行观察。图6所示为幅度5V、频率分别为50 Hz、60 Hz的工频电场作用下的EIT信号。可以看到EIT信号峰高随工频电场频率变化,利用正弦函数对EIT信号进行拟合,可以得到EIT信号的幅度和频率数据。这里EIT信号幅度的变化表征了工频电场幅度的变化。因此通过对EIT信号进行正弦函数拟合得到的波形幅度可反演出被测工频电场的幅度,该方法实现的工频电场幅度测量动态范围可达37.2 dB。

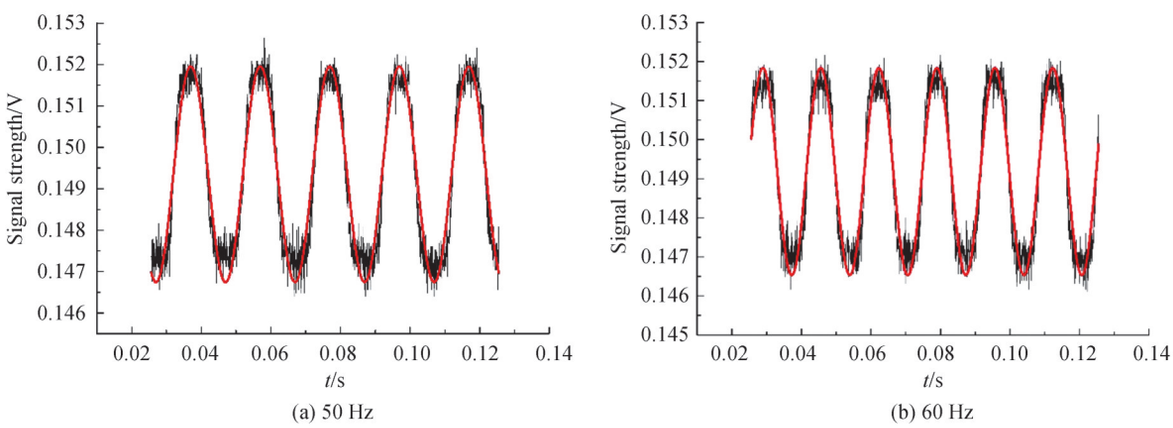


图6 不同工频电场频率情况下的EIT信号以及正弦函数拟合结果

Fig. 6 EIT signal for different frequency of power frequency fields and fitting results of sine function

图7数据为采用正弦函数拟合得到的工频电场频率测量结果。通过对输入工频电场频率和测量结果进行线性拟合,得到的拟合度高于0.999,因此工频电场频率测量不确定度优于0.1%。

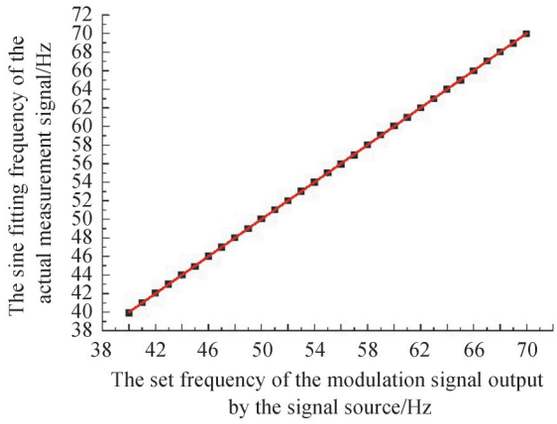


图7 工频电场的频率测量结果

Fig.7 Frequency measurement of power frequency electric fields

3 结论

本文利用铯原子的$53S_{1/2}$里德堡态，观察了射频场作用下斯塔克频移效应现象。利用工频电场对射频电场进行幅度调制，实现了对于工频场信号幅度和频率的测量，幅度测量动态范围可达37.2 dB，频率不确定度优于0.1%，为工频电场的测量提供了一种新型测量手段，可实现可溯源至原子参数的工频电场精密测量。通过优化电极板设计，提高电极板所加电场强度，提高数字信号发生器与电极板之间的阻抗匹配程度，可实现更高灵敏度的工频电场测量，并有望实现远离输电线路的空间工频场测量。

参考文献

[1] CHEN Liang, WANG Wenrui, LU Fanglin, et al. Portable wireless power frequency electric field sensor network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018, 424(5): 8-14+18.
陈亮，王文瑞，鲁方林，等. 便携式无线工频电场传感器网络[J]. 仪表技术与传感器, 2018, 424(5): 8-14+18.

[2] WANG Jingang, LIN Wei, LI Jian, et al. Study on capacitive alternating electric field sensor detecting test on power frequency electric field[J]. Transducer Microsystem Technologies, 2010, 29(9): 21-23.
汪金刚，林伟，李健，等. 电容式交变电场传感器与工频电场检测试验研究[J]. 传感器与微系统，2010, 29(9): 21-23.

[3] JIANG Guoxiong, YANG Jianzhong. Power frequency electric field measurement and the study of a new type measuring probe[J]. High Voltage Engineering, 1985, 11(4): 1-5.
蒋国雄，杨建中. 工频电场测量和一种新型测量探头的研究[J]. 高电压技术，1985, 11(4): 1-5.

[4] LFERNESS R CA. Waveguide electronic modulators[J]. Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(8): 1121-1137.

[5] HIDAKA K, KOUNO T, HAYASHI I. Simultaneous measurement of two orthogonal components of electric field using a Pockels device[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(7): 1252-1257.

[6] BULMER C H, BURNS W K, HISER S C. Pyroelectric effects in LiNbO3 channel-waveguide devices[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(16): 1036-1038.

[7] MAENO T, NONAKA Y, TAKADA T. 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.

[8] OSTERWALDER A, MERKT F. Using high rydberg states as electric field sensors[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(9): 1831-1834.

[9] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN, KUBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapor cell using bright atomic resonances[J]. Nature Physics, 2012, 8(11): 819-824.

[10] FAN Haoquan, KUMAR S, SEDLACEK J, et al. Atom based RF electric field sensing[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2015, 48(20): 1-13.

[11] GALLAGHER T F. Rydberg atoms[M]. 7rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 70-102.

[12] FABER C, HAROCHE S. Observation of giant polarizabilities in atomic sodium Rydberg states[J]. Optics Communications, 1975, 15(2): 254-257.

[13] MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency[J]. Journal of Modem Optics, 1998, 45(3): 471-503.

[14] BENDKOWSKY V, BUTSCHER B, NIPPER J, et al. Observation of ultralong-range Rydberg molecules[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1005-1008.

[15] JIAO Yuechun, ZHAO Jianming, JIA Suotang. Broadband Rydberg atom-based radio-frequency field sensor[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(7): 073201.
焦月春,赵建明,贾锁堂. 基于Rydberg原子的超宽频带射频传感器[J]. 物理学报,2018, 67(7): 073201.
[16] YANG Zhiwei, JIAO Yuechun, HAN Xiaoxuan, et al. Electromagnetically induced transparency of a cesium Rydberg atom in weak radio-frequency field[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 093202.
杨智伟,焦月春,韩小萱,等. 弱射频场中Rydberg原子的电磁感应透明[J]. 物理学报,2017, 66(9): 093202.
[17] AUTLER S H, TOWENS C H. Stark effect in rapidly varying fields[J]. Physical Review, 1955, 100(2): 703-722.
[18] ZHANG Y, CIOCCA M, HE L W, et al. Measurement of atomic polarizabilities using Floquet spectroscopy[J]. Physical Review A, 1994, 50(2): 1101-1106.
[19] HE Xinghong, LI Baiwen, ZHANG Chengxiu. Polarizabilities of high Rydberg alkali atoms[J]. Acta Physica Sinica, 1989, 38(10): 1717-1721.
何兴虹,李白文,张承修. 碱原子高里德堡态的极化率[J]. 物理学报,1989, 38(10): 1717-1721.

Foundation item: National Key Research and Development Program (No.2017YFA0304203), National Natural Science Foundation of China (Nos.61827824, 61475090), the Open Fund of the Key Laboratory of Electronic Information Control