

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.02.001

全红外光激发里德堡原子微波电场测量

游书航, 蔡明皓, 张浩安, 刘红平

(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071)

摘要: 基于高激发里德堡原子的微波电场测量技术与传统金属天线相比有诸多优越性, 是未来微波电场高精度测量的重要方案之一。采用全红外光激发里德堡原子的方案不再依赖复杂而昂贵的短波长激光器, 大大减小了激光器系统的体积与能耗。在三红外光级联激发里德堡铷原子的过程中, 发现了中间态对应的双光梯形电磁诱导透明光学参数对三光激发里德堡态电磁诱导吸收峰信噪比具有重要影响, 因此采用光失谐方法能很好地优化三光 EIA 光谱。利用微波场下的 Autler-Townes 分裂效应和标准天线方法对微波喇叭天线发射的微波电场实现精确的校准, 并以此为基础通过超外差接收技术成功探测到本地场与信号场所形成的拍频信号, 得到了拍频光电信号与信号场强度之间的线性关系。最终通过实验噪声基底的噪声功率谱得到三红外光里德堡铷原子微波测量的极限灵敏度为 $37.5(5.5) \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。采用三束红外光激发的方法为研制小型里德堡原子微波电场探测仪器奠定了物理基础。

关键词: 里德堡原子; 电磁诱导透明(吸收); 微波电场强度测量; 超外差接收

中图分类号: V248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2023)02-0001-06

Microwave electric field measurement based on Rydberg atoms excited by all infrared lasers

YOU Shuhang, CAI Minghao, ZHANG Haoan, LIU Hongping

(Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the highly excited Rydberg atoms, the microwave electric field intensity measurement technology is more advantageous to the one measured by conventional metal antenna, which is one of most significant strategies in microwave (MW) electric field intensity measurement. The scheme that Rydberg atoms are excited by all infrared lights minimizes the volume and power dissipation of the system, without the dependence on intricate and expensive short-wavelength lasers. In the course of the cascade excitation of Rydberg Rb atoms by three infrared lasers, the optical parameters of the two-laser ladder electromagnetic induced transparency corresponding to the intermediate state have an enormous influence on the signal-to-noise ratio of the three-laser electromagnetic induced absorption spectrum peak of the Rydberg atoms excited by three lights. Hence the EIA spectroscopy can be optimized by the method of laser detuning. The microwave field transmitted by the microwave horn antenna is calibrated precisely using the Autler-Townes splitting effect and standard antenna method, based on which the beat signals formed by local MW and signal MW are successfully detected via superheterodyne receive technology. The linear relationship between the beat

收稿日期: 2023-01-22; 修订日期: 2023-02-23

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFF0603704); 国家自然科学基金(12074388, 12004393)

作者简介: 游书航(1995-), 男, 博士研究生, 主要从事里德堡原子外场效应方面的研究。

photoelectric signal and the electric field intensity of signal MW also is obtained. Ultimately, with the noise power spectrum of noise base in the experiment, the limit sensitivity of the three infrared lasers Rydberg Rb atoms microwave measurement is $37.5(5.5) \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} / \sqrt{\text{Hz}}$. This method paves the way to realize the miniaturized Rydberg atoms microwave detector.

Key words: Rydberg atoms; Electromagnetic induced transparency (absorption); Microwave electric field intensity measurement; Superheterodyne receiver

0 引言

微波(microwave, MW)特指频率在 300 MHz 至 300 GHz 波段的电磁波,是现代无线通信、科学研究、军事国防等领域极为重要的媒介和工具。微波探测技术是现代无线通信应用的关键基础技术之一,尤其是在国防领域。一方面微波通信是军事通信的核心频段,另一方面利用微波进行探测和定位是军事侦察的主要手段,因此,高精度微波探测技术是面向未来战场电磁感知的重要研究工作之一。而传统的微波探测与接收主要依赖于金属天线,虽然能基本满足现代生活生产的基本需求,但是仍存在校准难、自干扰、体积受限和单位体积灵敏度低等缺陷^[1]。基于量子相干效应的里德堡原子微波探测技术完全可以避开这些缺陷,近年来受到国内外科学家的广泛关注^[2-4]。

里德堡原子(Rydberg atoms)是处于主量子数较大的激发态原子,具有大偶极矩、大原子半径及长寿命等特点^[5-6],因此对外场极为敏感,是当今原子物理学研究的热点和重点之一,也是未来发展量子计算、量子精密测量的重要物理载体。利用里德堡原子进行微波电场的精密测量最早是基于电磁诱导透明(electromagnetically induced transparency, EIT)和 AT 劈裂(Autler-Townes splitting)效应对微波电场功率的测量^[4,7],这种测量方式准确度高、抗干扰能力强且具有自校准特性^[8],但是可测量范围比较局限。后来人们在此基础上发展出调制^[9](modulation)和超外差^[10](superheterodyne)等方法,并且逐步实现了基于里德堡原子对微波电场的强度^[11]、相位^[10]、偏振^[12]及入射角^[13]等参数的精密测量,然后进一步实现了微波通信^[14-15]、亚波长成像^[16-17]和微波稳频^[18]等实用技术。

目前主流的里德堡原子激发方法是两步激发方案——即一个红外光加一个短波长的蓝光——例如激发铷原子的 780 nm 和 480 nm 方案^[19],激发铯原子的 852 nm 和 509 nm 方案^[11],这种激发路径光结

构较为简单、激发效率高且较为成熟。但是,对于目前主流的量产短波长激光器均采用红外光倍频加激光放大的方案,这样就造成短波长激光器的造价昂贵、体积较大且激光模式和频率较不稳定,于是提出了一种全新的激发方案——全红外光三步激发方案^[20-21]。该方案用 2 个红外光代替短波长蓝光,通过三步跃迁将原子激发到里德堡态,如本工作中就采用 776 nm 和 1 260 nm 激光代替 480 nm 激光,从而将铷原子激发到里德堡态,这样可使激光器的体积大为减小,红外激光的功率、模式等更为稳定、更容易掌控,基本可以做到开机即用。因此,利用全红外光激发里德堡原子进行微波电场测量将成为未来新型微波探测的重要方案之一。

本文从研究全红外光激发里德堡原子光学过程入手,然后基于该方案对微波电场的大小进行初步探测,并与双光激发方案的结果进行比较,从而证明全红外光激发方案的可行性与极大潜力。

1 实验装置

本工作是基于激发 Rb^{85} 原子至里德堡态的微波探测。如图 1 所示,780 nm 激光将 Rb^{85} 原子沿着 D2 线从基态 $5S_{1/2}$ 激发到第一激发态 $5P_{3/2}$,776 nm 激光再将原子从 $5P_{3/2}$ 泵浦到中间态 $5D_{5/2}$,随后由

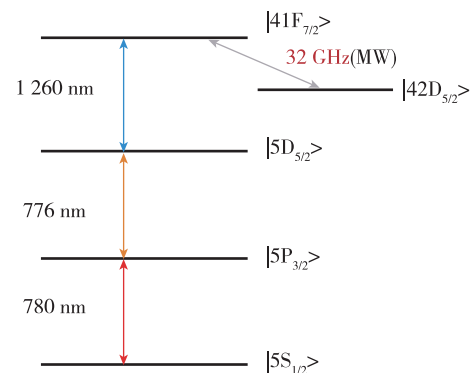


图 1 全红外光激发里德堡 Rb^{85} 原子微波探测能级示意图
Fig. 1 The energy levels diagram of the microwave detection by Rydberg Rb^{85} atoms excited by all infrared lasers

1 260 nm 激光将原子激发到里德堡态 $41F_{7/2}$ 。最后,在本工作中是以与 $41F_{7/2}$ 和 $42D_{5/2}$ 之间 32 GHz 的微波跃迁共振为探测目标,通过超外差机制实现对该目标场的超高精度探测。

图 2 所示为本工作中的全红外光激发里德堡 Rb^{85} 原子实验装置平台示意图。本工作中的全红外激光均由外腔式半导体激光器产生,分为激光头和控制台(controller),并且所有的激光均采用 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术^[22]进行频率稳定——部分激光经过调制通过光纤(fiber)引入 FP 频率标准腔(Fabry-Perot cavity, FPC)后产生误差信号,再将误差信号送入激光器控制台从而实现激光稳频。 Rb 气室(vapor cell)为长 7.5 cm 的圆柱体真空玻璃气室,780 nm 激光由左向右穿过气室,最后被光电探测器(photodetector, PD)接收,776 nm 激光和 1 260 nm 激光由二向色镜合束后与 780 nm 激光对向穿过气室。本工作中的目标场为 31.887 GHz 微波场,由微波信号发生器产生,经过波导线传输至方形微波喇叭天线发射至 Rb 气室所处的自由空间区域,最终与里德堡原子发生耦合并被探测。

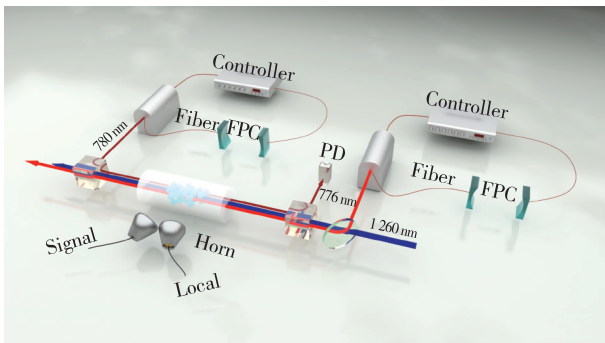


图 2 全红外光激发里德堡 Rb^{85} 原子实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup of Rydberg atoms excited by all infrared lasers

2 实验结果

2.1 双光电磁诱导透明

三光 EIT 是基于双光 EIT 构建的,首先从简单的 780 nm 激光和 776 nm 激光构成的双光梯形 EIT 出发。图 3 所示为实验所得的双光梯形 EIT 光谱,其中 780 nm 激光根据饱和吸收谱(saturation absorption spectrum, SAS)锁定在跃迁 $|5S_{1/2}, F=3\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F=4\rangle$ 上。可以看到,虽然由于多普勒热展宽和激光的功率展宽使得光谱的很多细节都被淹没,

但是依旧能清晰地分辨出 3 个谱峰,根据 780 nm 锁定位置及 776 nm 波长可知 3 个峰分别对应中间态 $5D_{5/2} (F=3, 4, 5)$ 3 个超精细结构。

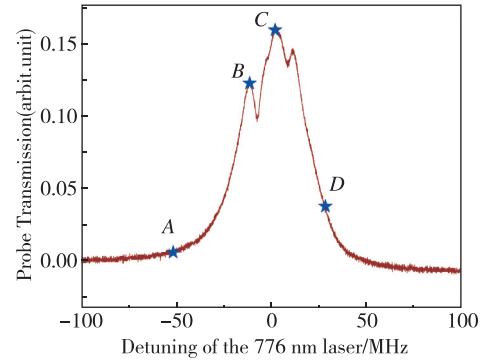


图 3 780 nm 激光和 776 nm 激光形成的双光梯形 EIT 光谱
Fig. 3 Two-laser ladder EIT spectrum formed by the 780 nm laser and the 776 nm laser

2.2 三光电磁诱导吸收

接下来加入第三束红外 1 260 nm 激光,实验中通过将 776 nm 锁定在双光 EIT 光谱的某一个频率点(图 3 中的蓝色星标记点代表不同的频率锁定点),然后在 $41F_{7/2}$ 态附近扫描 1 260 nm 激光的频率,就可以得到一个光谱峰,如图 4(对应的 776 nm 激光锁定为图 3 中的 B 点)所示。很明显与 EIT 不同的是,该谱峰的方向是向下的,因此不再是 EIT 峰,而是电磁诱导吸收(electromagnetically induced absorption, EIA)峰,可以看到, EIA 峰的半高宽约为 18 MHz。

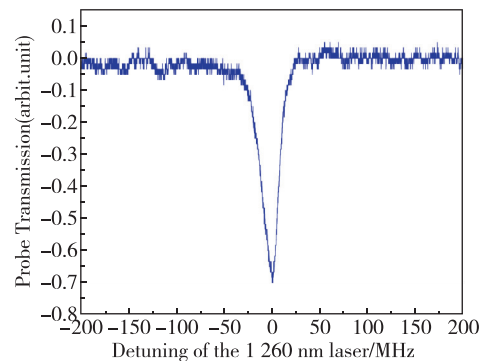


图 4 三红外光形成的三光梯形 EIA 光谱

Fig. 4 Three-laser ladder EIA spectrum formed by the 780 nm laser, the 776 nm laser and the 1 260 nm laser

从实验结果中发现,当 776 nm 激光处于不同频率锁定点时(即 776 nm 处于不同失谐条件下),得到的 EIA 光谱不论是峰值强度还是信噪比都具

有较大差异,正如图5所示。一方面,当776 nm激光处于较远失谐时(A、D两点),EIA光谱信噪比明显较处于近失谐或共振时(B、D两点)要小;另一方面,负失谐锁定时(A、B两点)明显比共振和正失谐时(C、D两点)谱线强度要大得多。我们知道谱线强度越强则说明被激发的原子越多,信噪比越高则接收信号的灵敏度越高,因此综合两方面来看,776 nm激光处于适当负失谐时有利于对微波的探测。

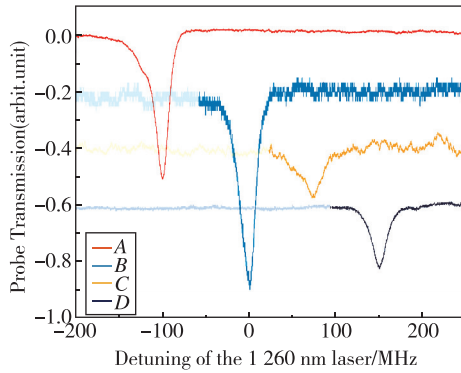


图5 当776 nm分别处于A、B、C、D这4个锁定点上,得到的不同EIA光谱

Fig. 5 Different EIA spectrums under the condition of the 776 nm laser locked in frequency-point A, B, C and D

2.3 超外差机制下的微波探测

2.3.1 利用AT分裂原理和标准天线方法对微波喇叭天线进行标定

微波与里德堡原子相互作用会使原子谱线产生分裂,且分裂的频率间隔 Δf 与微波的强度具有严格的数学关系

$$\Delta f = \frac{\Omega_{MW}}{2\pi} \quad (1)$$

其中, Ω_{MW} 是微波电场的拉比频率(Rabi frequency),这种谱线分裂现象被称为AT分裂效应,正如图6所示。这种数学关系保证了微波强度测量具有标准意义,因为微波强度与基本物理常数关联起来,在未来制定微波电场强度单位标准时该方法具有极大潜力。但是,原子光谱的展宽使得并不是所有的微波强度都能引起谱线可分辨的分裂,因此该方法也具有一定局限性。

在实验中,需要对比微波的发射强度与原子探测区域的实际强度,尤其是在AT分裂的微波强度区间以外,因此首先需要对比微波喇叭天线进行校准。这里采用标准天线方法(standard antenna method, SAM),即

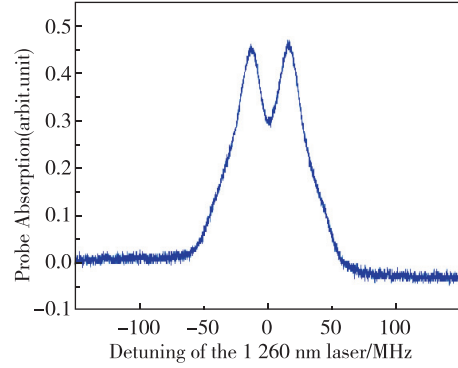


图6 微波与里德堡原子相互作用引起的谱线分裂
Fig. 6 The splitting of spectral line because of the interaction between the Rydberg atoms and microwave

$$|E| = \sqrt{\frac{\eta g \alpha_1 P_{MW}}{4\pi d^2}} \quad (2)$$

其中, E 为实际电场强度; P_{MW} 为微波源的功率; η 为链接损耗; g 为喇叭增益系数; α_1 为内禀阻抗; d 为喇叭天线到原子气室的空间距离。 η 、 g 、 α_1 和 d 在实验中均为常数,因此将式(2)化简为

$$|E| = \alpha \cdot \sqrt{P_{MW}} \quad (3)$$

其中, α 为损耗系数。为了测定 α ,通过在AT分裂现象区域内选定微波电场强度来和原子探测到的实际电场强度进行比较,正如图7所示。本次实验中测定的损耗系数为 $1\ 134(15)\ \text{mV} \cdot \text{cm}^{-1}/\sqrt{\text{W}}$ 。

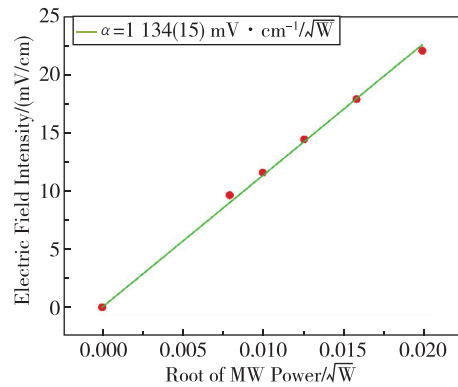


图7 微波与里德堡原子相互作用引起的谱线分裂
Fig. 7 The splitting of spectral line due to the interaction between the Rydberg atoms and microwave

2.3.2 基于超外差方法的微波电场探测

超外差接收的原理是在接收端设置一个本地场(local),让本地场和待接收的信号场(signal)时钟同步形成拍频,拍频的频率要远小于信号场,从而使得后续信息处理更为简单、效率更高。本工作中

使用 2 个微波,一个作为固定的本地微波场,一个作为模拟的信号微波场,2 个微波间有 2 kHz 的频率差,并且 2 个微波利用 10 MHz 的时钟频率信号进行了同步。

图 8 所示为 Signal 微波强度分别在 1.27 mV/cm、637.7 μ V/cm 和 319.6 μ V/cm 情况下里德堡原子接收到的拍频信号。可以看到,里德堡原子对于拍频的感应是最为灵敏的,且分辨率较高,即使在 319.6 μ V/cm 下依然有非常清晰的正弦信号轮廓,并且采集的光电信号强度和 Signal 微波的电场强度之间是成严格的正比关系。

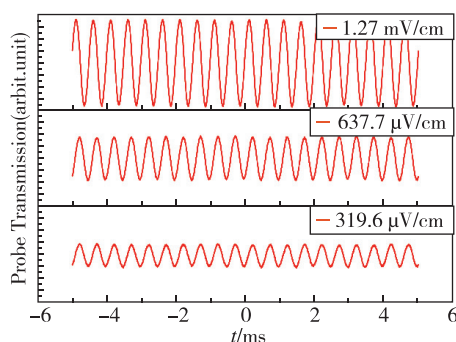


图 8 里德堡原子接收不同强度的 Signal 微波下的光电信号图

Fig. 8 The photoelectric signals when Rydberg atoms receive various intensities of signal microwave

为了得到里德堡原子探测微波电场的极限灵敏度,采集了本实验中的噪声基底。根据灵敏度计算公式

$$S = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\Gamma/N}} \quad (4)$$

其中, P 为噪声功率谱在对应工作频率的功率强度; Γ 为实验数据采样率; N 为采样个数。图 9 所示为本实验中噪声基底的傅里叶变换功率谱,通过计算可得在 2 kHz 频率点处微波探测灵敏度为 37.5(5.5) $\text{nV} \cdot \text{cm}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

3 结论

本工作从实验上演示了基于里德堡铷原子对微波电场的精密探测,主要实验步骤如下:

1) 实现了全红外光下铷原子的里德堡激发,并且研究了双光 EIT 对三光 EIA 的光学影响;

2) 成功实现了微波与里德堡铷原子的耦合相互作用,得到了 AT 分裂光谱,并利用该现象实现了

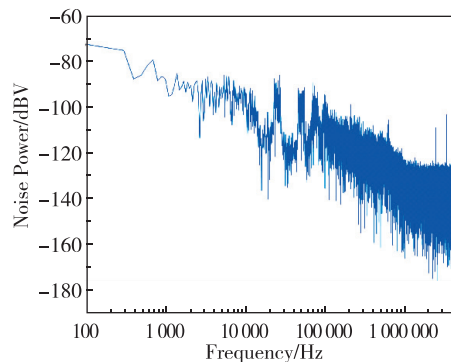


图 9 里德堡原子微波探测的噪声功率谱

Fig. 9 The noise power spectrum in the microwave detection by Rydberg atoms

对微波喇叭天线的损耗标定;

3) 成功基于超外差探测机制实现了对 Signal 微波的精密测量,并且得到了 37.5(5.5) $\text{nV} \cdot \text{cm}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的极限探测灵敏度,该结果已经能够媲美双光激发方案^[11]。

参考文献

- [1] 王保志. 微波技术与工程天线[M]. 北京:人民邮电出版社, 1991.
Wang Baozhi. Microwave technology and antenna[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 1991(in Chinese).
- [2] Autler S H, Townes C H. Stark effect in rapidly varying fields[J]. Physical Review, 1955, 100(2): 703.
- [3] Osterwalder A, Merkt F. Using high Rydberg states as electric field sensors[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(9): 1831-1834.
- [4] 黄巍, 梁振涛, 杜炎雄, 等. 基于里德堡原子的电场测量[J]. 物理学报, 2015, 64(16): 160702.
Huang Wei, Liang Zhentao, Du Yanxiong, et al. Rydberg-atom-based electrometry[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16): 160702(in Chinese).
- [5] Gallagher T. Rydberg atoms[M]. England: Cambridge University Press & Assessment, 1994.
- [6] 曾谨言. 量子力学教程[M]. 北京:科学出版社, 2003.
Zeng Jinyan. Quantum mechanics tutorial[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2003 (in Chinese).
- [7] 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.
- [8] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G. A self-calibra-

- ted SI-traceable Rydberg atom-based radio frequency electric field probe and measurement instrument[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(9): 5931-5941.
- [9] Kumar S, Fan H, Kübler H, et al. Rydberg-atom based radio-frequency electrometry using frequency modulation spectroscopy in room temperature vapor cells[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8625-8637.
- [10] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, et al. A Rydberg atom-based mixer: measuring the phase of a radio frequency wave[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(11): 114101.
- [11] Jing M, Hu Y, Ma J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 911-915.
- [12] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, et al. Atom-based vector microwave electrometry using rubidium Rydberg atoms in a vapor cell[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(6): 063001.
- [13] Robinson A K, Prajapati N, Senic D, et al. Determining the angle-of-arrival of a radio-frequency source with a Rydberg atom-based sensor[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(11): 114001.
- [14] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, et al. Digital communication with Rydberg atoms and amplitude-modulated microwave fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(21): 211108.
- [15] Holloway C L, Simons M T, Haddab A H, et al. A “real-time” guitar recording using Rydberg atoms and electromagnetically induced transparency: quantum physics meets music[J]. *AIP Advances*, 2019, 9(6): 065110.
- [16] Fan H Q, Kumar S, Daschner R, et al. Subwavelength microwave electric-field imaging using Rydberg atoms inside atomic vapor cells[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 3030-3033.
- [17] Holloway C L, Gordon J A, Schwarzkopf A, et al. Subwavelength imaging and field mapping via electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting in Rydberg atoms[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(24): 244102.
- [18] Cai Y, Shi S, Zhou Y, et al. A multi-band atomic candle with microwave-dressed Rydberg atoms[J]. *Frontiers of Physics*, 2023, 18(1): 1-7.
- [19] Cai M, Xu Z, You S, et al. Sensitivity improvement and determination of Rydberg atom-based microwave sensor[C]//*Proceedings of Photonics*. MDPI, 2022, 9(4): 250.
- [20] Carr C, Tanasittikosol M, Sargsyan A, et al. Three-photon electromagnetically induced transparency using Rydberg states[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3858-3860.
- [21] Thaicharoen N, Moore K R, Anderson D A, et al. Electromagnetically induced transparency, absorption, and microwave-field sensing in a Rb vapor cell with a three-color all-infrared laser system[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 063427.
- [22] Black E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *American Journal of Physics*, 2001, 69(1): 79-87.

(编辑:黄利华)