

用于里德堡原子高精度微波电场测量的小型化 激光系统设计与实现

成永杰¹ 靳 刚¹ 刘星汛¹ 齐万泉¹ 何 军^{2,3}

(1. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100039; 2. 山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西太原 030006; 3. 山西大学, 教育部山西省省部共建极端光学协同创新中心, 山西太原 030006)

摘 要 基于里德堡原子量子相干效应的微波电场测量灵敏度高、动态范围大、测量不确定度小, 有望成为新一代可直接溯源至国际单位制(SI)的微波电场基准。本文介绍了一种可用于铯原子里德堡态激发的小型化绿光激光系统。该激光系统采用 Littrow 型光栅外腔反馈结构, 实现了输出功率大于 80mW 的单频 509nm 绿光激光。利用该激光系统结合常规 852nm 激光实现了铯原子 50D 和 50S 里德堡态电磁感应透明(EIT)光谱。该激光系统的实现, 为微型化、可扩展的绿光激光系统提供一种可行性方案, 有利于实用化原子介质电场精密测量设备的实现。

关键词 计量学 里德堡原子 微波电场 激光系统

中图分类号: TB973

文献标识码: A

Realization of Laser System for Precision Measurement of Microwave Electric Field Using Rydberg Atoms

CHENG Yong-jie¹ JIN Gang¹ LIU Xing-xun¹ QI Wan-quan¹ HE Jun^{2,3}

(1. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100039, China; 2. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Taiyuan 030006, China; 3. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics of the Ministry of Education and Shanxi Province, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract The new microwave electric field quantum measurement method based on Rydberg atoms has the advantages of high sensitivity, large dynamic range and small measurement uncertainty. It is expected to form a new generation of microwave electric field standard that can lead to a direct SI-traceable approach for microwave electric field metrology. A miniature green laser system for precision measurement of microwave electric field based on Rydberg atoms is proposed. The single-frequency 509nm green laser system was mounted in the littrow configuration with 80mW output power. We investigated the electromagnetic induced transparency(EIT) spectroscopy of 50D and 50S for microwave electric field precision measurement through the application of homemade laser system. The realization of the laser system provides a feasible scheme for the miniaturized and expandable green laser system, which is beneficial to the realization of the practical precise measuring equipment of electric field based on atomic dielectric.

Key words Metrology Rydberg atoms Microwave electric field Laser system

1 引言

场强是无线电计量的七个基本参数之一。目前微波电场测量与校准通常采用偶极天线等传统传感器设备^[1,2]。受测量原理和探头结构限制,此类设备存在一定缺陷,难以实现场强高灵敏度、高分辨率、高准确度测量;更重要的是,由于采用级联校准,这些设备的溯源途径也存在一定局限性。

里德堡原子是指主量子数 n 很大的原子。与基态原子相比,里德堡原子轨道半径很大,具有较大的电偶极距 ($\sim n^2$) 和极化率 ($\sim n^7$)^[3,4],另外里德堡原子之间有较强的长程相互作用,利于实现中性原子的调控。这些特性使里德堡原子作为可实用化的量子物理载体,为量子信息^[5]、量子计算^[6]、量子精密测量^[7]等提供一种物理实现方案。对于碱金属里德堡原子,临近量子态满足 MHz 至 THz 频段电磁场的电偶级跃迁,典型电场强度极限灵敏度可以到百 $\text{pV/cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。利用里德堡原子测量微波电场是量子精密测量领域的一个重要方向^[8,9]。通过特定量子态的原子作为传感单元,利用量子干涉光谱实现环境电磁场或者有源电磁场的高灵敏度识别,为微波电场的测量提供新原理、新方法和新技术,可将微波电场溯源到标准物理量,提升现有微波场强校准能力。

里德堡原子制备方案中,常见的制备方式主要有二种:单光子激发、级联双光子激发。对碱金属铯原子,单光子激发方案通常采用 1560nm 和 1077nm 激光分别放大并和频后得到 638nm 激光,然后由 638nm 激光倍频得到 319nm 紫外激光,利用单步激发实现原子的里德堡态制备,该方案可以获得 kHz 量级的激光线宽,但系统复杂,机械稳定性差^[10]。级联双光子激发方案通常采用 1018nm 半导体激光器作为种子源,激光放大后利用非线性晶体倍频获得 509nm 激光。利用 (509 + 852) nm 双光子激发实现原子里德堡态制备。该方案中 509nm 激光要求种子源-放大-倍频等多个光学模块,技术复杂,系统庞大,价格昂贵,机械稳定性较差^[11]。随着外腔半导体激光技术的快速发展,Avramescu 小组采用 524nm 半导体激光器实现了 50mW 绿光激光功率输出^[12]。该工作的实现,提供了一种直接获得短波长绿光激光系统的技术方案,有希望替代传统频率转换方案的绿光激光系统,应用于泵源、传

感、精密测量、海底通信等领域。

目前,受限于半导体材料技术,绿光半导体激光二极管的工作波长范围在 (510 ~ 515) nm,对于截止波长增益区外的绿光激光系统,国内外还没有公开报道。本文选择特定 510nm 半导体激光管,通过温度控制激光二极管工作环境,实现增益区域的蓝移,获得 509nm 的高增益单频激光。采用 Littrow 型光栅外腔反馈技术,实现 509nm 激光线宽的 MHz 压窄,获得波长连续可调的单频 509nm 激光。输出激光典型功率 $\sim 80\text{mW}$ 。基于该激光系统,结合 852nm 激光,实现了铯原子里德堡态激发,并获得了 50D 和 50S 里德堡态 EIT 光谱,验证了激光系统的性能指标,为开展基于里德堡原子 EIT-AT 效应的微波电场测量提供了一套结构简单,性能可靠的 509nm 绿光激光系统。

2 微波电场测量原理

铯 (^{133}Cs) 原子能级结构如图 1 所示。微波电场测量方案中,功率较弱的 852nm 探测光共振于铯原子 $6S_{1/2}$ 到 $6P_{3/2}$ 跃迁线,实现中间态原子布居;功率较强的 509nm 耦合光泵浦 $6P_{3/2}$ 态原子到里德堡态,通过强耦合实现原子 $6P_{3/2}$ 态和 $nD_{5/2}$ 态缀饰。缀饰态的量子干涉会导致原子跃迁通道干涉相消,进而导致 852nm 探测光吸收减弱,即透射增强的 EIT 光谱。

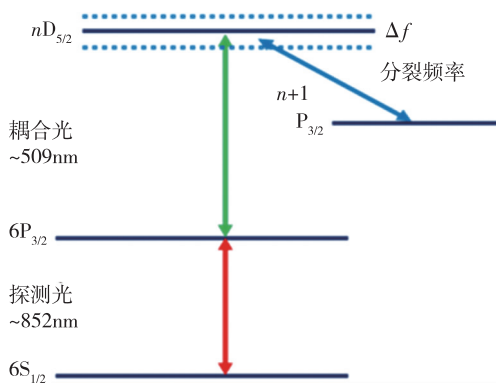


图1 铯原子四能级系统原理图

Fig.1 Principle for four-level system of ^{133}Cs atom

基于里德堡原子量子干涉效应的微波电场测量原理如图 2 所示,852nm 探测光和 509nm 耦合光相向传播作用于铯原子蒸气室中。当探测光与耦

合光共振于铯原子能级时,探测光激光在共振频率附近产生阶梯型三能级 EIT^[13]。

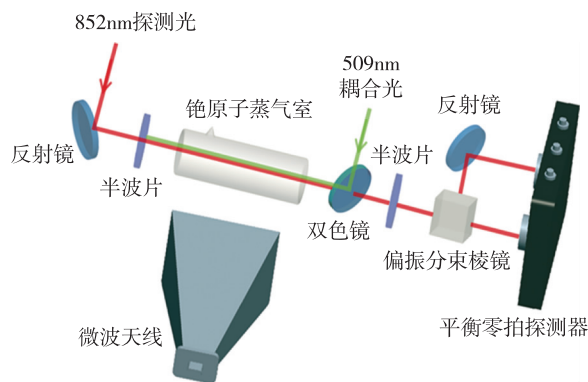


图2 里德堡原子微波电场测量装置原理图

Fig.2 Experimental setup for microwave electric field measurement using Rydberg atom

当没有微波电场作用时,探测光光谱信号为标准的阶梯型能级 EIT 透射谱,如图3所示。当施加微波电场与里德堡原子邻近能级共振时,由于微波场的强耦合导致里德堡原子 Autler-Townes (AT) 分裂,进而在 852nm 探测光的 EIT 透射峰出现 AT 分裂,如图4所示,该分裂大小依赖于施加的微波电场大小。AT 分裂宽度 Δf 与外加微波电场的关系可以表示为

$$|E_{RF}| = \frac{\hbar}{\wp_{RF}} \Omega_{RF} = \frac{\hbar}{\wp_{RF}} 2\pi\Delta f \quad (1)$$

式中: \hbar ——普朗特常数; \wp_{RF} ——耦极跃迁电偶极矩; Ω_{RF} ——描述微波和原子耦合强度的拉比(Rabi)频率。

从式(1)可知, Δf 与微波电场成正比,可以将微波电场测量转化为分裂频率的精确测量。

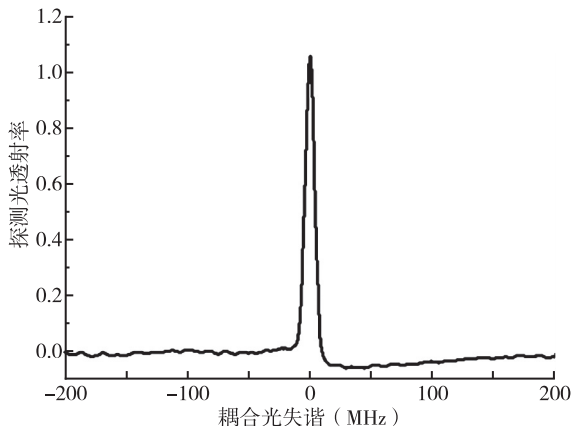


图3 无微波场作用时的 EIT 透射谱波形图

Fig.3 Spectrum of EIT signal (RF off)

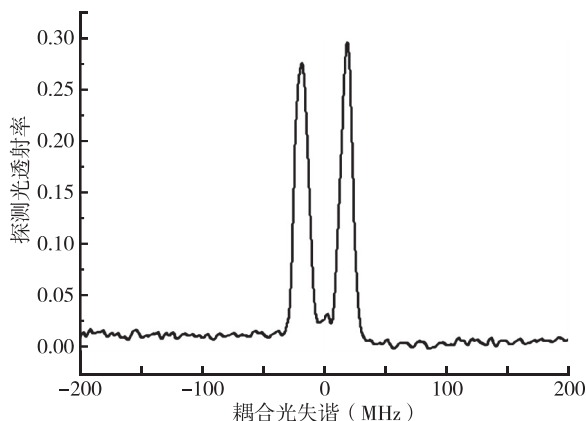


图4 微波场作用时 EIT-AT 分裂信号波形图

Fig.4 Spectrum of EIT-AT signal (RF on)

3 激光系统实现方案及结果

3.1 509nm 绿光激光系统实现方案

对于铯原子级联双光子两步激发方案,需要利用高功率的 509nm 绿光作为耦合光。509nm 绿光通常采用 1018nm 激光通过激光放大和激光倍频来实现,该方案技术复杂,价格高昂,系统体积庞大,不利于实用和集成化。所以急需一种新的光源产生方案,实现结构简单,性能可靠的 509nm 绿光激光系统。

通过激光二极管参数对比优化,选择波长增益区(510~515)nm 激光二极管,利用精密温控技术实现二极管截止波长区域外的有效增益,实现高性能 509nm 绿光激光输出。509nm 绿光激光系统实验装置如图5所示,该激光系统包含 509nm 激光二极管、准直透镜、光栅、全反镜。509nm 绿光激光二极管输出光束经过准直透镜准直,该准直透镜镀有(500~520)nm 波长的增透膜,以减小激光器内腔损耗。准直后的平行光经过光栅衍射,一级衍射光反馈回激光二极管形成选膜外腔,零级衍射光直接输出到全反镜,全反镜表面镀有(500~520)nm 波长的高反射膜,以减小 509nm 输出激光的损耗,509nm 激光最后经全反镜反射后输出。激光的增益区域通过帕尔贴元件温度调谐,输出激光的波长通过驱动电流和光栅后的压电陶瓷实现调谐。

3.2 509nm 绿光激光系统测试结果

3.2.1 509nm 绿光激光输出功率测试结果

优化激光二极管工作温度为 25℃,通过调节激

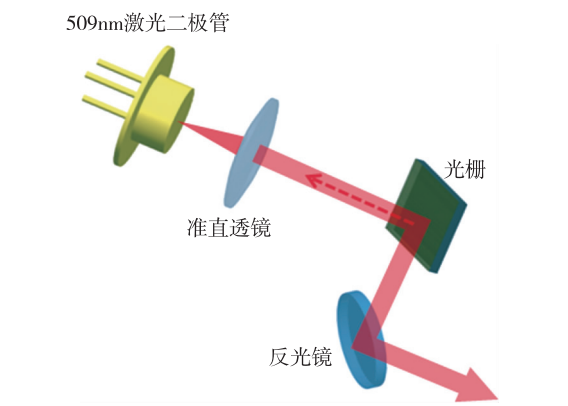


图 5 509nm 绿光激光系统设计图

Fig. 5 Experimental scheme of the 509nm laser system

光二极管注入电流大小,测量了 509nm 绿光激光器输出功率随激光二极管注入电流大小变化曲线,结果如图 6 所示。

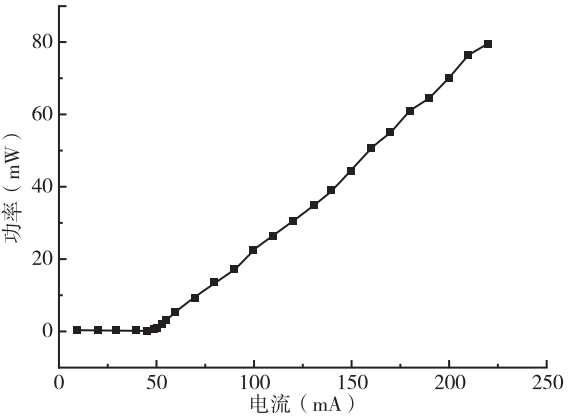


图 6 509nm 绿光激光输出功率随电流变化曲线图

Fig. 6 509nm Output power versus injection current

从图 6 中可知,该 509nm 绿光激光系统阈值电流在 50mA 附近,当电流为 230mA 时输出激光功率为 80mW,其输出功率满足里德堡原子制备功率要求(典型功率为 30mW)。

3.2.2 509nm 绿光激光输出波长测试结果

优化激光二极管工作温度为 25℃,通过调节激光二极管注入电流大小,测量了 509nm 绿光激光器输出波长随激光二极管注入电流大小变化曲线,结果如 7 所示。

从图 7 中可知,该 509nm 绿光激光系统输出典型激光波长(509.52 ~ 509.65)nm,可覆盖多个里德堡原子量子态。

3.3 里德堡原子 EIT 光谱测试结果

我们采用图1 的实验方案,利用 852nm 激光

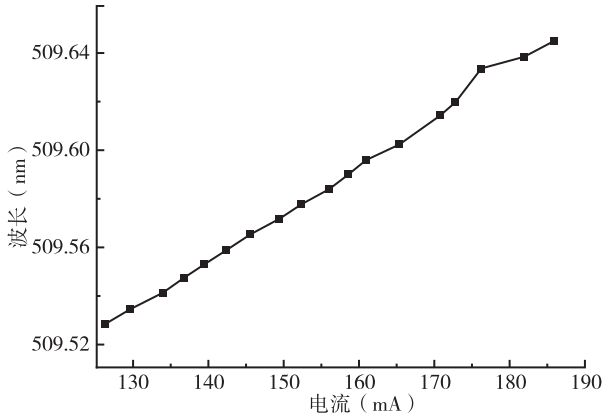


图 7 509nm 绿光激光波长随电流变化曲线图

Fig. 7 509nm wavelength versus injection current

作为探测光,509nm 激光作为耦合光,采用级联双光子两步激发方案,通过扫描 509nm 绿光激光波长,在常温铯原子蒸气室中实现了阶梯型里德堡态 EIT 光谱,结果如图 8 和图 9 所示。图 8 为铯原子 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 50D$ 的 EIT 光谱,图 9 为铯原子 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 50S$ 的 EIT 的光谱,由光谱信号可以看出,利用该绿光激光系统获得的光谱信噪比和光谱分辨率接近固体激光系统的结果,可以满足里德堡原子微波电场精密测量对激光系统的需求。

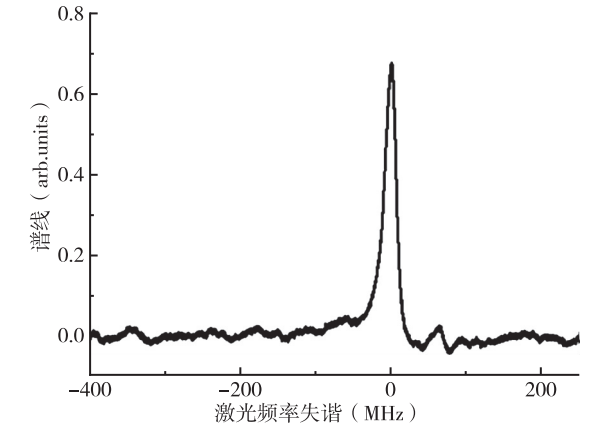


图 8 里德堡原子 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 50D$ 的 EIT 光谱波形图

Fig. 8 EIT spectroscopy of $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 50D$ transition

4 结束语

高激发态里德堡原子的特殊性质使得其在量子精密测量、量子信息和量子计算等领域成为了各国研究的热点。级联双光子激发方案作为一种常

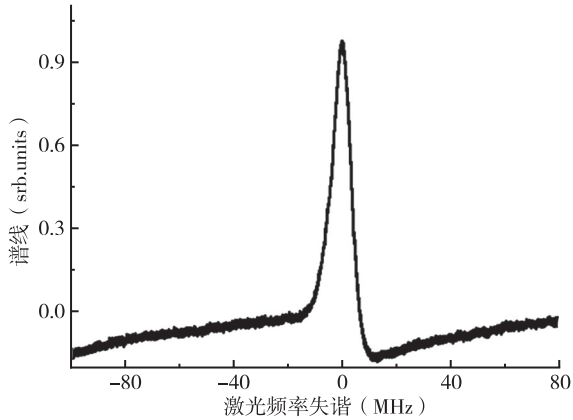


图9 里德堡原子 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 50S$ 的 EIT 光谱波形图

Fig.9 EIT spectroscopy of $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 50S$ transition

用里德堡原子的制备方式,受到了广泛的应用。本文采用 Littrow 型光栅外腔反馈结构方案,实现了波长可连续调谐,输出功率大于 80mW 的 509nm 绿光激光系统。利用该 509nm 绿光激光与常规 852nm 半导体外腔激光器协作,实现了 50D 和 50S 里德堡态 EIT 光谱,为进一步开展里德堡原子微波电场精密测量提供 509nm 绿光激光系统。

参考文献

- [1] 王松宇,齐万泉. 基于混响室的电场探头校准方法研究[J]. 宇航计测技术,2018,38(1):23~26.
- [2] 黄承租,齐万泉,刘星汛,等. 同心锥形 TEM 室结构设计及性能研究[J]. 宇航计测技术,2019,39(3):22~26.
- [3] Gallagher T F. Rydberg Atoms[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1994.
- [4] Ponomarenko D V, Shestakov A F. Polarizabilities of ns and

np Rydberg states of the Li atom[J]. Chemical Physics Letters,1993,210(1-3):269~273.

- [5] Saffman M, Walker T G, M Lmerk. Quantum information with Rydberg atoms[J]. Reviews of Modern Physics,2010,82(3):2313~2363.
- [6] Muller M, Lesanovsky I, Weimer H, et al. Mesoscopic Rydberg gate based on electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review Letters,2009,102(17):170502.
- [7] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kubler 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] Abi-Salloum T Y. Electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting: Two similar but distinct phenomena in two categories of three-level atomic systems[J]. Physical Review A,2010,81:053836.
- [9] Teo B K, Feldbaum D, Cubel T, et al. Autler-Townes Spectroscopy of the $5S_{1/2} - 5P_{3/2} - 44D$ Cascade of Cold ^{85}Rb Atoms[J]. Physical Review A,2003,68:053407.
- [10] 王军民,白建东,王杰英,等. 瓦级 319nm 单频连续紫外激光的实现及铯原子单光子 Rydberg 激发[J]. 中国光学,2019,12(4):701~718.
- [11] Zhang H, Wang L M, Zhang L J, et al. Stark-induced L-mixing interferences in ultracold cesium Rydberg atoms[J]. Physical Review A,2013,87(3):033405.
- [12] A Avramescu, et al. True green laser diodes at 524 nm with 50 mW continuous wave output power on c-Plane GaN[J]. Appl. Phys. Express,2010,3(6):061003.
- [13] M Fleischhauer, A Imamoglu, J P Marangos. Electromagnetically induced transparency: Optics in Coherent Media[J]. Reviews Modern Physics,2005,77(2):633~673.