

多能级里德伯原子中实现 3.4 GHz 微波增强测量*

薛晶晶¹⁾ 李若楠¹⁾ 胡雪松²⁾ 孙培晟²⁾ 周海涛^{1)†} 张俊香²⁾

1) (山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

2) (浙江大学物理学院, 杭州 310058)

(2025 年 1 月 17 日收到; 2025 年 1 月 30 日收到修改稿)

里德伯原子微波测量系统是不同于传统电子微波测量的新型全光学测量技术, 它利用里德伯原子与微波场的强相干耦合效应, 将微波场转化为原子相干光谱的特性测量, 目前已成为高灵敏度高精度微波测量的主要研究领域. 微波场与里德伯原子相干耦合过程中的退相干机理会极大地影响微波场与相干光谱的转换效率, 从而影响微波电场测量灵敏度. 我们实验研究了在多能级里德伯铯原子系统中, 实现中心频率为 3.4 GHz 微波测量的最佳增强条件以及 0.3 GHz 动态范围测量. 利用铯原子 D1 线和 D2 线构成的多能级光学泵浦效应减小里德伯原子的退相干, 从而增强里德伯原子的电磁诱导透明 (EIT) 量子相干特性, 以及增强微波场作用产生的 EIT-AT 分裂谱, 实现微波场的增强测量.

关键词: 量子相干效应, 里德伯, 微波测量, 光泵浦**PACS:** 42.50.-p, 42.50.GY, 42.62.Eh, 42.62.Fi**DOI:** 10.7498/aps.74.20250081**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250081

1 引言

传统的微波探测器采用金属天线, 在校准、自干扰等方面有一定局限性. 近年来, 里德伯原子已成为众多原子-场相互作用体系中备受关注的量子体系, 它具有主量子数高、偶极矩强、原子半径大、极化率高、寿命长等特点, 将其与微波场强耦合, 可实现对微波场的精密测量. 基于里德伯原子的微波测量技术, 不仅利用了里德伯能级之间与微波场的强耦合作用, 还借助原子相干效应将布居于基态的原子激发到里德伯高激发态, 为原子与微波相干耦合与转换提供了重要条件, 从而可借助低能态实现微波到光频场的有效转换, 并利用光场极易探测和操控的特点, 实现由光场对微波场的操控与测量. 基于里德伯原子的光谱探测技术是可涵盖从直

流到太赫兹场灵敏检测的重要光学技术^[1-9]. 研究表明, 利用里德伯原子可实现相比传统金属天线更高精度的测量技术^[10].

最早实现微波测量的里德伯原子结合了四能级原子体系中的电磁诱导透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 量子相干效应和 AT 分裂 (Autler-Townes splitting) 效应, 实现了可溯源至普朗克常数的微波电场功率的精密测量^[11]. 此后一系列方案的提出与实现如基于频率失谐^[12]、塞曼分裂频率调制光谱^[13]、幅度调制光谱^[14]、多载波调制^[15]、冷原子^[16]、原子体系参数^[17,18]以及超外差等, 进一步促进了里德伯原子微波探测的实用化和趋近于散粒噪声极限的高精度探测技术^[19]. 此外, 利用斯塔克位移技术, 可同时提高测量精度和测量带宽^[20].

基于 EIT-AT 方法的无线电微波测量精度和

* 国家自然科学基金 (批准号: 92476114, 61975102, 11704235)、山西省自然科学基金 (批准号: 20210302123437)、山西省青年科技研究基金 (批准号: 201901D211166) 和山西省高等学校科技创新项目 (批准号: 2020L0038) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zht007@sxu.edu.cn

灵敏度主要与 EIT 和 AT 光谱宽度相关, 为了提升里德伯原子微波电场测量精度和灵敏度, 获得较窄 EIT 和 AT 谱至关重要^[21-27]. 通过调节探针强度和更强的耦合场, 控制原子光学厚度 (optical densities, ODs) 等可优化 EIT 谱宽^[28,29]. 此外由于超精细分裂能级间的布居再分配, 光泵浦 (optical pumping, OP) 效应也可以通过优化 EIT 提高光束的频率转换效率, 从而有助于提高测量灵敏度^[30-36]. 利用内腔压窄 EIT 线宽的技术也可用于实现无线电波测量灵敏度的提升^[37-39]. 因此, 实现一个峰高增强、线宽压窄的高对比度 EIT 光谱对里德伯原子微波探测相关技术的应用与研究有直接作用.

我们在铯原子气体中研究了里德伯原子微波探测中多能级体系引入 OP 效应对改善 EIT 线宽的最佳泵浦机理, 及其对提高微波测量精度和灵敏度的重要作用, 并由此实现了可实时微波探测的宽带测量, 阐明了在铯原子中 D1 线 OP 机制、D2 线和里德伯态形成的 EIT 是一个多能级多光束场相互作用过程, 通过改善 EIT 线宽, 提高里德伯原子 EIT-AT 谱, 实现对微波探测的增强效应.

2 里德伯原子能级及微波场增强测量实验

图 1 为在 ^{133}Cs 原子气体中开展里德伯 EIT 和 EIT-AT 谱实现微波场测量的原子能级结构以及实验装置图. 该测量系统由铯原子的 6 个能级组成, 包含 2 个基态 $|g_1\rangle$ 和 $|g_2\rangle$ ($|6S_{1/2}, F=3\rangle$ 和

$|6S_{1/2}, F=4\rangle$), 2 个中间态 $|e\rangle$ (D₂ 线的 $|6P_{3/2}, F'=4\rangle$ 和 D₁ 线的 $|6P_{1/2}, F'=4\rangle$), 以及 2 个里德伯高激发态 $|r\rangle$ 和 $|4\rangle$ ($59D_{5/2}$ 和 $60P_{3/2}$). 一束拉比频率为 Ω_P 的探测光和一束拉比频率为 Ω_C 的耦合光将原子从基态 $|g_2\rangle$ 经中间态 $|e\rangle$ 泵浦到里德伯态 $|r\rangle$, 构成阶梯型 EIT 系统, 在双光子共振条件下 EIT 效应导致原子对探测光吸收减小, 扫描耦合场频率可得到输出探测光的光谱, 呈现出 EIT 透明峰. 当微波电场 (RF) 与里德伯能态 $|r\rangle$ 和 $|4\rangle$ 之间发生近共振跃迁时, 由于高激发里德伯态 ($n=59, 60$) 与微波场的强相干耦合特性, 引起里德伯态 $|r\rangle$ 产生显著 AT 分裂, EIT 谱也随之分裂, 称其为 EIT-AT 分裂^[40], 如图 2(a) 中的黑线探测谱所示, 其分裂间隔为 $\Delta f = (-\Delta_{\text{MW}} \pm \sqrt{\Delta_{\text{MW}}^2 + \Omega_{\text{MW}}^2})/2$, $\Delta_{\text{MW}} = \omega_4 - \omega_{4,r}$ 和 Ω_{MW} 是微波电场的频率失谐和拉比频率, $\Delta_P = \omega_P - \omega_{e,g_2}$ 为探测光失谐. 因此通过对分裂光谱的测量实现对微波场强度 $E_{\text{MW}} = 2\pi\hbar\Delta f/\varphi_{4r}$ 的有效探测.

实验测量装置如图 1(b) 所示. 852 nm 外腔半导体激光器 (Toptica) 作为探测光, 其中心波长设置为 852.36 nm, 经半波片和偏振分光棱镜 (PBS) 分束后, 选择水平偏振光作用于铯原子气体. 509 nm 激光器 (频准) 作为耦合光与探测光反向作用于原子气体, 其偏振经半波片和 PBS 分束后选择水平偏振. 探测光 (852 nm) 功率为 400 μW , 光斑直径大小为 790 μm . 耦合光 (509 nm) 功率为 30 mW, 光斑直径大小为 980 μm . 微波 (RF)

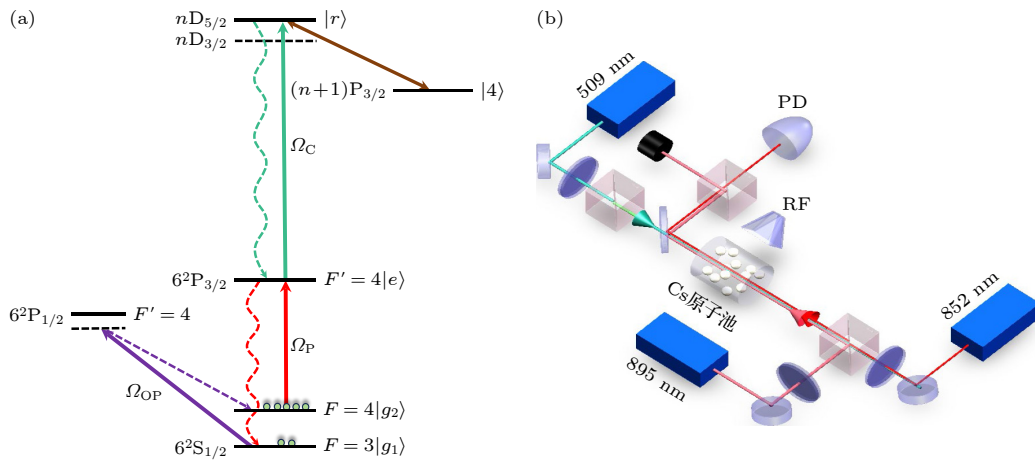


图 1 里德伯原子微波测量实验 (a) 里德伯 ^{133}Cs 原子能级图; (b) 实验装置示意图

Fig. 1. Rydberg atomic microwave measurement experiment: (a) Rydberg ^{133}Cs atomic energy level diagram; (b) schematic diagram of the experimental setup.

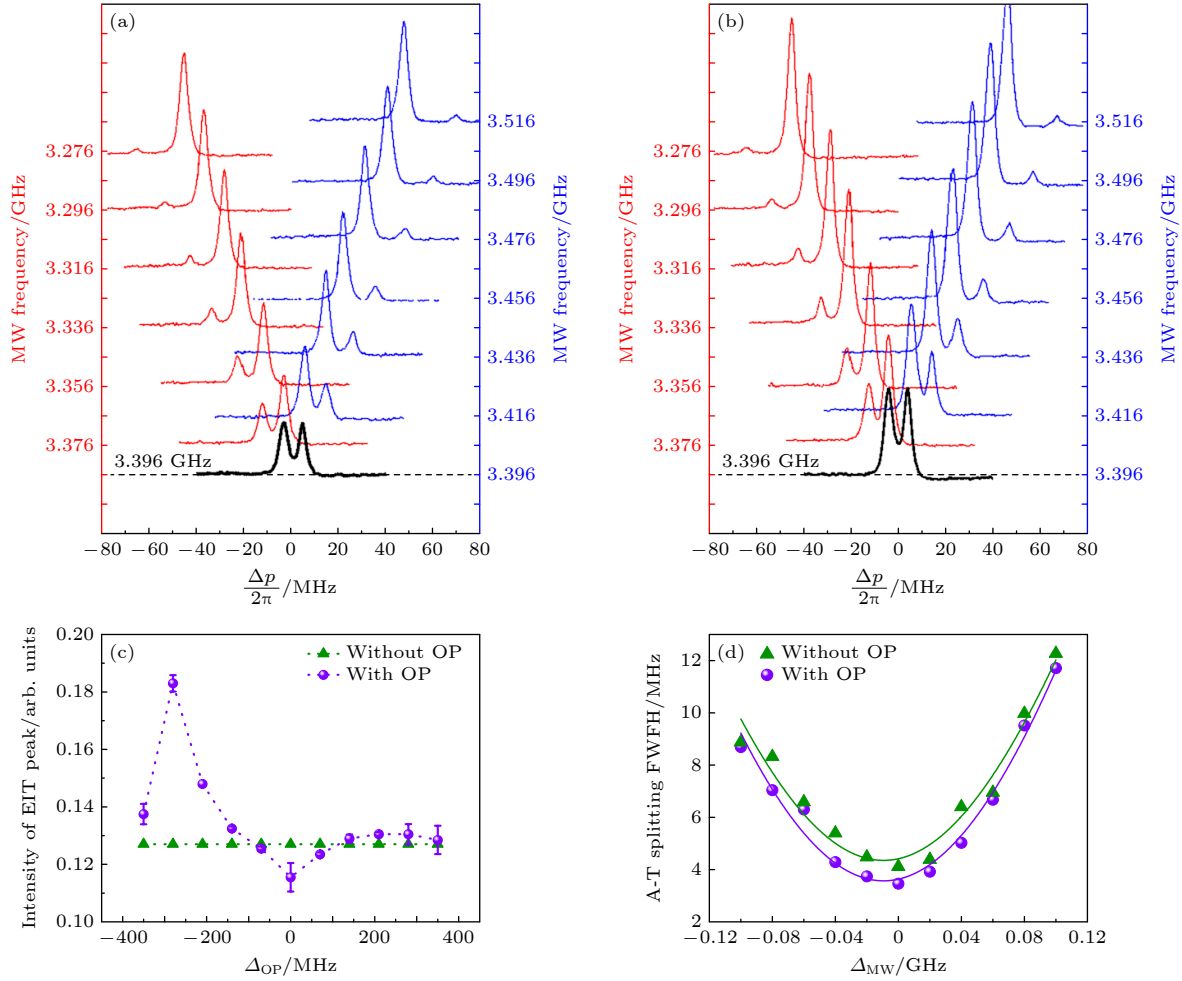


图2 微波探测实验结果 (a) 四能级 EIT-AT 分裂谱, 黑线为微波与里德伯态共振耦合的 EIT-AT 谱 (3.4 GHz), 红线和蓝线分别为微波频率发生红移或蓝移的耦合谱 (3.276—3.516 GHz); (b) OP 效应增强的 EIT 和 EIT-AT 谱; (c) 不同再泵浦光频率失谐对 EIT 峰增强特性; (d) OP 效应和无 OP 效应时 EIT-AT 谱宽的对比

Fig. 2. Experimental results of microwave detection: (a) Four-level EIT-AT fission spectra; the black line is the EIT-AT spectrum (3.4 GHz) of microwave and Rydberg state resonance coupling, the red line and blue line are the coupling spectrum of microwave frequency with red shift or blue shift (3.276–3.516 GHz); (b) EIT and EIT-AT spectra with enhanced OP effect; (c) the enhancement characteristics of EIT peak by different repump optical frequency detuning; (d) the comparison of EIT-AT spectral width between OP effect and no OP effect.

信号场经喇叭天线从铯原子气室正上方输入, 天线距离原子 12 cm, 微波功率为 -10 dBm. 微波场、探针和耦合场均以水平偏振作用于原子. 895 nm 外腔半导体激光器 (toptica) 作为再泵浦光, 选择垂直偏振光作用于原子产生 OP 效应, 将 EIT-AT 谱探测过程中因自发辐射跃迁到基态 $|g_1\rangle$ 的原子再泵浦到循环跃迁中. 895 nm 的 OP 光最佳功率为 316 μ W, 光斑直径大小为 1060 μ m. 在 EIT-AT 分裂谱实验过程中, 耦合光扫描覆盖了从 $|nD_{3/2}\rangle$ 到 $|nD_{5/2}\rangle$ 的两套 EIT-AT 分裂谱, 由探测器 (PD) 探测. 利用两能态之间的固有频率差作为参考, 定标微波测量过程中的频率失谐.

3 EIT-AT 谱的增强效应

微波测量所参与的能级为约化的四能级体系 ($|g_2\rangle \leftrightarrow |e\rangle \leftrightarrow |r\rangle \leftrightarrow |4\rangle$), 如图 1(a) 所示. 实验选择将 852 nm 探测光锁定于 $|g_2\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ ($|6S_{1/2}, F=4\rangle \leftrightarrow |6P_{3/2}, F'=4\rangle$) 跃迁能级, 509 nm 耦合光在中间态和里德伯态跃迁能级间扫描 $|e\rangle \leftrightarrow |r\rangle$ ($|6P_{3/2}, F'=4\rangle \leftrightarrow |59D_{5/2}\rangle$). 同时微波场作用于里德伯跃迁能级 $|r\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ ($|59D_{5/2}\rangle \leftrightarrow |60P_{3/2}\rangle$), 其共振跃迁频率为 3.4 GHz. 在该中心频率附近调节微波场频率, 即可实现微波场与里德伯态之间从共振到失谐耦合的操控与测量. 图 2(a) 所示为扫描探测光

频率时的微波场与里德伯原子共振耦合和可调谐耦合的 EIT-AT 谱. 在加入 3.4 GHz 共振微波电场时, EIT-AT 谱呈现出对称分裂 (黑线). 当加入的微波电场为红失谐或蓝失谐时, EIT-AT 谱呈现出不对称分裂. 与共振谱相比, AT 分裂谱出现明显非对称结构, 如果微波频率为蓝色失谐, 则左峰高于右峰, 否则谱线呈现相反情况. 这一现象与微波场产生的里德伯态 $|r\rangle$ 的 AT 分裂 $\Delta f = (-\Delta_{\text{MW}} \pm \sqrt{\Delta_{\text{MW}}^2 + \Omega_{\text{MW}}^2})/2$ 相关. 当里德伯态与微波场共振耦合时, AT 分裂 $\Delta f = \pm \Omega_{\text{MW}}/2$ 使 $|r\rangle$ 态分裂成正负失谐对称的两个能态, 间隔等于微波场拉比频率, 因此 AT 呈现对称结构. 当微波场为正失谐 (蓝移) 或负失谐 (红移), AT 分裂使 $|r\rangle$ 态出现不对称分裂态 $\Delta f = (-\Delta_{\text{MW}} \pm \sqrt{\Delta_{\text{MW}}^2 + \Omega_{\text{MW}}^2})/2$, 或 $\Delta f = (\Delta_{\text{MW}} \pm \sqrt{\Delta_{\text{MW}}^2 + \Omega_{\text{MW}}^2})/2$, 因此 EIT-AT 谱出现不对称型谱, 左右峰对应于接近和远离 $|r\rangle$ 态的 EIT 峰, 近共振 EIT 效应优于远共振 EIT 效应, 导致 EIT-AT 谱出现左右不等的峰高现象.

在图 2(a) 的 EIT-AT 谱探测过程中, 原子从基态 $|g_2\rangle$ 经探测光和耦合光激发到里德伯态 $|r\rangle$, 原子会因自发辐射返回到基态 $|g_2\rangle$ 和 $|g_1\rangle$ (图 1(a) 虚线). 处于基态 $|g_1\rangle$ 的原子不会继续参与到 EIT 和 AT 循环跃迁过程中, 因此通过引入 OP 效应将退居于 $|g_1\rangle$ 的原子抽运回循环跃迁中. 采用 895 nm 再泵浦 OP 光, 将 $|g_1\rangle$ 态原子泵浦到 D1 线能态 $|6P_{1/2}, F' = 4\rangle$, 经自发跃迁回到 $|g_2\rangle$ 态, 提高参与 EIT 过程的原子数, 在不改变 EIT 相互作用的情况下等效于增加了原子数密度和原子的光学厚度, 从而增强 EIT 效应, 进而提高微波探测灵敏度. 图 2(b) 是引入 OP 时的 EIT-AT 光谱, 与图 2(a) 未引入 OP 光时相同条件的 EIT-AT 光谱相比, 谱线出现明显增强效应.

OP 光的参与使得 EIT-AT 谱线宽得到压窄, 从而提高了微波测量精度. 因此基于里德伯原子的微波电场测量的灵敏度也会随之得到提高. 在优化 EIT 谱的过程中, 我们发现 OP 光频率须在非共振处, 可得到最强的 EIT 效应, 如图 2(c) 实验结果所示. 增强 EIT 的最佳 OP 光频率锁定于失谐 $\Delta_{\text{OP}} = \omega_{\text{OP}} - \omega_{\text{OP}, g_1}$ 约为 -294 MHz, 是由于相比其他原子体系如铷原子, EIT 铯原子能级结构尤其是 D2 线的超精细能级分裂较多而且较密, 因此其复杂能级结构导致在引入 D1 线 OP 光时, 会带来一系列多能级体系引起的电磁诱导吸收, 相对于

-294 MHz 在 OP 光失谐较大, 可以考虑为 Raman 泵浦过程, 不会产生其他能级的电磁诱导吸收相干效应.

从图 2(a) 和图 2(b) 谱线对比可以看出: 无论是近共振微波电场耦合的 EIT-AT 谱, 还是具有一定失谐的微波场 EIT-AT 谱, 在引入 895 nm 再泵浦 OP 光后, 均可获得显著压窄的谱线. 根据电场强度与谱宽 Δf 公式: $E_{\text{MW}} = 2\pi\hbar\Delta f/\varphi_{4r}$, 其中普朗克常量 $\hbar$ 和微波的跃迁偶极矩 φ_{4r} , 谱宽压窄正比于微波场的灵敏度 (即增强测量), 从而提高微波测量精度. 如图 2(d) 所示, 从优化的 EIT-AT 谱半高宽线宽可得到对应的微波电场强度的优化指标. 在微波近共振附近, EIT-AT 谱宽压窄约 1.3 倍, 对应于微波电场测量的灵敏度提高 1.3 倍. 因此通过优化 EIT 振幅以及 EIT-AT 谱, 基于里德伯原子的电测传感的灵敏度也将得到提高.

图 3 为加入再泵浦 OP 光后, EIT-AT 分谱宽与不同微波信号源输出功率的关系. 我们分别测试了共振频率 3.4 GHz、蓝失谐 $\Delta = -0.06$ GHz, $\Delta = -0.04$ GHz, $\Delta = -0.02$ GHz, 红失谐 $\Delta = 0.02$ GHz, $\Delta = 0.04$ GHz, $\Delta = 0.06$ GHz 时的 EIT-AT 谱宽. 横坐标为微波信号源输出功率 $P(\text{mW})$ 从 -10 dBm 增大到 -6 dBm (相应的微波电压 E_{mV} 由功率和电压关系式 $P = -10 \lg(E_{\text{mV}}^2/R)$ 确定, 为 0.071—0.112 V) 的谱宽. 因此在微波信号源电压 mV 量级实现 EIT-AT 分裂探测. 在固定微波失谐的情况下, 图 3 测试结果显示, 随着微波功率的增加, 谱宽不断增大, 符合理论预测即微波功率增加, 对应于微波场拉比频率增加, 谱宽 $\Delta f = (-\Delta_{\text{MW}} \pm \sqrt{\Delta_{\text{MW}}^2 + \Omega_{\text{MW}}^2})/2$ 也会相应增大. 此外, 结果显示

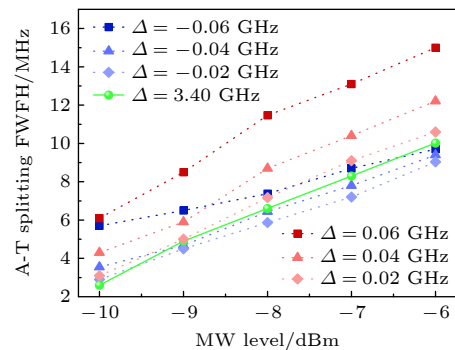


图 3 不同微波频率失谐和微波功率对 EIT-AT 分裂谱的影响

Fig. 3. Effects of different microwave frequencies and microwave power on EIT-AT splitting spectrum.

对于红失谐和蓝失谐, 谱宽变化对于拉比频率的响应有所不同, 红移的变化情况较蓝移更为显著. 这一效应也许说明了铯原子超精细能态谱间隔较密, 会引起 EIT-AT 谱产生一定影响. 实验中我们选取铯原子 D2 线的超精细态 $F' = 4$ 作为 EIT 效应中间态, 其附近超精细态 $F' = 3$ 相比 $F' = 5$ 距离 $F' = 4$ 更近, 因此会引起 EIT-AT 谱中蓝移和红移的不同谱宽.

4 结 论

基于原子系统的微波测量, 取决于微波场与原子的相干耦合, 通过耦合利用原子介质将微波场测量转变为光频段段的测量, 既改善了微波场测量的操控性又提高了其精度和灵敏度. 虽然利用里德伯原子 EIT-AT 分裂效应测量微波电场较传统天线有不可比拟的优势, 但当下限制约束微波场测量精度进一步提升在很大程度上取决于更窄线宽、更高信噪比里德伯原子 EIT-AT 分裂光谱的获得. 本文主要研究了 OP 效应对于改善基于里德伯原子微波电场测量的 EIT-AT 谱的实验实现. 实验结果表明在阶梯型里德伯 EIT 系统中, 通过 OP 可以压窄 EIT 和微波场 EIT-AT 谱宽, 因此提高微波电场测量灵敏度. 在优化 EIT 振幅后加入单频微波, 通过 A-T 分裂间隔观察到微波电场测量的灵敏度得到了 1.3 倍的提升. 不仅对于原子微波探测的应用有实际意义, 同时也可用于研究高激发里德伯态偶极-偶极相互作用、激光频率稳定和环境电磁场作为量子传感器的可追溯检测.

参考文献

- [1] Song Z F, Liu H P, Liu X C, Zhang W F, Zou H Y, Zhang J, Qu J F 2019 *Opt. Express* **27** 8848
- [2] Holloway C, Simons M, Haddab A H, Gordon J A, Anderson D A, Raithel G 2021 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **63** 63
- [3] Holloway C L, Simons M T, Gordon J A, Novotny D 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 1853
- [4] Meyer D H, Kunz P D, Cox K C 2021 *Phys. Rev. A* **15** 014053
- [5] Otto J S, Hunter M K, Kjærgaard N, Deb A B 2021 *Appl. Phys.* **129** 154503
- [6] Anderson D A, Sapiro R E, Raithel G 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 2455
- [7] Robinson A K, Prajapati N, Senic D, Simons M T, Holloway C L 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 114001
- [8] A. Gürtler; A. S. Meijer; W. J. van der Zande 2003 *Appl. Phys. Lett.* 014053
- [9] Holloway C L, Prajapati N, Artusio-Glimpse A B, et al. 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 204001
- [10] Fan H Q, Kumar S, Sedlacek J, Kübler H, Karimkashi S, Shaffer J P 2015 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **48** 202001
- [11] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Löw R, Pfau T, Shaffer J P 2012 *Nat. Phys.* **8** 819
- [12] Simons M T, Gordon J A, Holloway C L, Anderson D A, Miller S A, Raithel G 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 174101
- [13] Jia F D, Yu Y H, Liu X B, Zhang X, Zhang L, Wang F, Mei J, Zhang J, Xie F, Zhong Z P 2020 *Appl. Opt.* **59** 8253
- [14] Liu X B, Jia F D, Zhang H Y, Mei J, Yu Y H, Liang W C, Zhang J, Xie F, Zhong Z P 2021 *Appl. Phys. Lett.* **11** 085127
- [15] Li S H, Yuan J P, Wang L R 2020 *Appl. Sci.* **10** 8110
- [16] Liao K Y, Tu H T, Yang S Z, Chen C J, Liu X H, Liang J, Zhang X D, Yan H, Zhu S L 2020 *Phys. Rev. A* **101** 053432
- [17] Chopinaud A, Pritchard J D 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 024008
- [18] Meyer D H, O'Brien C, Fahey D P, Cox K C, Kunz P D 2021 *Phys. Rev. A* **104** 043103
- [19] Jing M Y, Hu Y, Ma J, Zhang H, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2020 *Nat. Phys.* **16** 911
- [20] Hu J L, Li H Q, Song R, Bai J X, Jiao Y C, Zhao J M, Jia S T 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 011101
- [21] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [22] Zhao J M, Zhu X B, Zhang L J, Feng Z G, Li C Y, Jia S T 2009 *Opt. Express* **17** 15821
- [23] Kumar S, Fan H, Kübler H, Sheng J, Shaffer J P 2017 *Sci. Rep.* **7** 42981
- [24] Simons M T, Gordon J A, Holloway C L 2018 *Appl. Opt.* **57** 6456
- [25] Jia F D, Zhang J, Zhang L, Wang F, Mei J, Yu Y H, Zhong Z P, Xie F 2020 *Appl. Opt.* **59** 2108
- [26] Fancher C T, Scherer D R, St. John M C, Marlow B L S 2021 *IEEE Trans. Quantum Eng.* **2** 1
- [27] Li J K, Yang W G, Song Z F, Zhang H, Zhang L J, Zhao J M, Jia S T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 163201 (in Chinese) [李敬奎, 杨文广, 宋振飞, 张好, 张临杰, 赵建明, 贾锁堂 2015 *物理学报* **64** 163201]
- [28] Wu B H, Chuang Y W, Chen Y H, Yu J C, Chang M S, Yu I A 2017 *Sci. Rep.* **7** 9726
- [29] Su H J, Liou J Y, Lin I C, Chen Y H 2022 *Opt. Express* **30** 1499
- [30] He Z S, Tsai J H, Chang Y Y, Liao C C, Tsai C C 2013 *Phys. Rev. A* **87** 033402
- [31] Moon H S, Lee L, Kim J B 2008 *Opt. Express* **16** 12163
- [32] Yang B D, Liang Q B, He J, Zhang T C, Wang J M 2010 *Phys. Rev. A* **81** 043803
- [33] Zhang L J, Bao S X, Zhang H, Raithel G, Zhao J M, Xiao L T, Jia S T 2018 *Opt. Express* **26** 29931
- [34] Prajapati N, Robinson A K, Berweger S, et al. 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 214001
- [35] Prajapati N, Akulshin A M, Novikova I 2018 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **35** 1133
- [36] Akulshin A M, Orel A A, McLean R J 2012 *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **45** 015401
- [37] Yang A H, Zhou W P, Zhao S C, Xu Y, Fedor J, Li Y X, Peng Y D 2020 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **37** 1664
- [38] Li S H, Yuan J P, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2022 *Front. Phys.* **10** 846687
- [39] Wang Q X, Wang Z H, Liu Y X, Guan S J, He J, Zhang P F, Li G, Zhang T C 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 087801 [王勤霞, 王志辉, 刘岩鑫, 管世军, 何军, 张鹏飞, 李刚, 张天才 2023 *物理学报* **72** 087801]
- [40] Moon H S, Lee W K, Lee L, Kim J B 2004 *IEEE Conf. Publ.* **85** 3965

Enhanced sensing of 3.4 GHz microwave in multi-level Rydberg atomic system^{*}

XUE Jingjing¹⁾ LI Ruonan¹⁾ HU Xuesong²⁾ SUN Peisheng²⁾
 ZHOU Haitao^{1)†} ZHANG Junxiang²⁾

¹⁾ (*School of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

²⁾ (*School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

(Received 17 January 2025; revised manuscript received 30 January 2025)

Abstract

The Rydberg-based microwave detection is an all-optical technology that uses the strong coherent interaction between Rydberg atoms and microwave field. Different from the traditional microwave meter, the Rydberg atomic sensing is a new-type microwave detector that transforms the microwave spectrum into a coherent optical spectrum, and arouses increasingly the interests due to its high sensibility. For this kind of sensor, the coherence effect induced by coupling atoms with microwave plays a key role, and the decoherence may reduce the sensitivity. A multi-level Rydberg atomic scheme with optimized quantum coherence, which enhances both the bandwidth and the sensitivity for 4 GHz microwave sensing, is demonstrated experimentally in this work. The enhanced quantum coherence of Rydberg electromagnetically induced transparency (EIT) and microwave induced Autler-Townes (AT) splitting in EIT windows are shown using optical pumping at D1 line. The enhanced sensitivity at 3.4 GHz with 0.3 GHz bandwidth can be realized, based on the enhanced EIT-AT spectrum. The experimental results show that in the stepped Rydberg EIT system, the spectral width of EIT and microwave field EIT-AT can be narrowed by optical pumping (OP), so the sensitivity of microwave electric field measurement can be improved. After optimizing the EIT amplitude and adding single-frequency microwaves, the sensitivity of the microwave electric field measurement observed by the AT splitting interval is improved by 1.3 times. This work provides a reference for utilizing atomic microwave detection.

Keywords: quantum coherence effect, Rydberg, microwave measurements, optical pumping

PACS: 42.50.-p, 42.50.GY, 42.62.Eh, 42.62.Fi

DOI: [10.7498/aps.74.20250081](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250081)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250081](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250081)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 92476114, 61975102, 11704235), the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 20210302123437), the Natural Science Foundation for Youth Scientists of Shanxi Province, China (Grant No. 201901D211166), and the Shanxi Provincial Science and Technology Innovation Project of Colleges and Universities, China (Grant No. 2020L0038).

[†] Corresponding author. E-mail: zht007@sxu.edu.cn

多能级里德伯原子中实现3.4 GHz微波增强测量

薛晶晶 李若楠 胡雪松 孙培晟 周海涛 张俊香

Enhanced sensing of 3.4 GHz microwave in multi-level Rydberg atomic system

XUE Jingjing LI Ruonan HU Xuesong SUN Peisheng ZHOU Haitao ZHANG Junxiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 084204 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250081

CSTR: 32037.14.aps.74.20250081

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250081>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

里德伯原子的射频脉冲响应特性

Response characteristics of radio frequency pulse of Rydberg atoms

物理学报. 2022, 71(20): 207402 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220972>

基于退磁冷却的镝原子玻色-爱因斯坦凝聚制备

Preparation of Bose-Einstein condensate of dysprosium atoms based on demagnetization cooling

物理学报. 2024, 73(21): 216701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241299>

腔增强热里德伯原子光谱

Cavity-enhanced spectra of hot Rydberg atoms

物理学报. 2023, 72(8): 087801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230039>

基于里德伯原子天线的低频电场波形测量

Measurement of low-frequency electric field waveform by Rydberg atom-based sensor

物理学报. 2024, 73(7): 070201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231778>

基于里德伯原子Stark效应射频电场测量灵敏度研究

Sensitivity of radio-frequency electric field sensor based on Rydberg Stark effect

物理学报. 2024, 73(9): 093202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240162>

里德伯原子幻零波长

Tune-out wavelengths of Rydberg atoms

物理学报. 2024, 73(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240397>