

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.01.01

基于里德堡原子的微波全信息测量

贾凤东¹, 郝建海¹, 崔越¹, 王宇翔¹, 刘宇晴¹,王宇², 尤建琦², 白金海², 钟志萍^{1,3*}

(1.中国科学院大学 物理科学学院, 北京 100049;

2.航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

3.中国科学院大学 中国科学院拓扑量子计算卓越中心, 北京 100190)

摘要: 介绍了里德堡原子微波电场传感器的工作原理, 阐述了基于里德堡原子测量微波电场强度、相位、极化、频率等信息的技术特点, 分析了基于里德堡原子的微波全信息测量的研究现状, 探讨了当前绝对自校准测量和连续宽带高灵敏测量面临的困难, 指出可以通过外场调控实现测量灵敏度提升和宽带连续频率测量; 并可通过各种调制及解调手段简化相位、极化的测量和读取。分析了在热原子系统中利用多光子激发消除多普勒展宽以及采用冷原子消除多普勒展宽对于提升微波测量灵敏度的潜在优势, 提出未来可利用里德堡原子的高轨道角动量态、强关联等特性进一步提升里德堡原子微波电场传感器性能。

关键词: 微波电场传感器; 里德堡原子; 电磁感应透明

中图分类号: TB939; TP212; O56 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2024) 01-0001-22

Microwave full information measurement based on Rydberg atoms

JIA Fengdong¹, HAO Jianhai¹, CUI Yue¹, WANG Yuxiang¹, LIU Yuqing¹,WANG Yu², YOU Jianqi², BAI Jinhai², ZHONG Zhiping^{1,3*}

(1.School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2.Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 3.CAS Center for Excellence in Topological

Quantum Computation, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper introduces the principles of the Rydberg atom microwave electric field sensor, elucidating the technical features of measuring the information of microwave electric field strength, phase, polarization, and frequency based on Rydberg atoms. Then it analyzes the current state of microwave full-information measurement based on Rydberg atoms and discusses the challenges faced by absolute self-calibration measurements and continuous broadband high-sensitivity measurements. It points out that measurement sensitivity enhancement and continuous broadband frequency measurement can be achieved through external field modulation. Various modulation and demodulation techniques are suggested to simplify phase and polarization measurements and data reading. The paper also explores the potential advantages to eliminate Doppler broadening effect by adopting multiphoton excitation in atomic vapor cell systems and adopting cold atomic systems to enhance microwave measurement sensitivity. It proposes the possibility for future exploration of such characteristics of Rydberg atoms as high orbital angular momentum states and strong correlations to further improve

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-01-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0304900, 2017YFA0402300); 北京市自然科学基金项目(1212014); 中国科学院重点研究计划项目(XDPB08-3); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

引用格式: 贾凤东, 郝建海, 崔越, 等. 基于里德堡原子的微波全信息测量[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 1-22.

Citation: JIA F D, HAO J H, CUI Y, et al. Microwave full information measurement based on Rydberg atoms[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 1-22.



the performance of Rydberg atom microwave electric field sensors.

Key words: microwave electric field sensor; Rydberg atom; electromagnetic induction transparency

0 引言

对量子状态的主动调控和操纵引发了第二次量子革命,发展出量子通信、量子计算和量子精密测量等前沿领域。量子精密测量利用量子资源和效应以实现超过经典极限的测量精度,其目标在于发现新的物理规律、检验基本的物理定理、测量和标定基本物理常数、完善SI单位制等。2019年起代表精密测量最高水平的7个基本物理量的计量基准已经全部实现量子化。严格意义上的量子传感是指利用量子纠缠实现高精度、高灵敏度测量,可超越经典测量的极限^[1]。在技术上更容易实现、更切合实际应用的量子传感的定义为:①使用量子体系测量物理量,量子体系的特征是量子化的能级;②利用量子相干性(可用波函数描述的时间或空间叠加态)来测量物理量^[1]。原子为一种经典的量子体系,其束缚态能级是分立的,可以精确地计算和测量;量子力学原理保证了原子能级稳定;相同种类的原子具有相同的能级结构和性质。原子的可复现、精确、稳定等特点使之成为量子传感器的理想体系之一。

近十几年,关于微波的量子传感发展十分迅速^[2]。空间中 P 点的电磁波可以表征为

$$E(P, t) = A(P)\hat{p}(P)\cos[\Phi(P)]f(t) \quad (1)$$

式中: $A(P)$ 、 $\hat{p}(P)$ 、 $\Phi(P)$ 分别为电磁场空间部分信息的振幅、偏振、相位, $f(t)$ 为电磁场的时间特性,即频率信息。可用微波电场强度表征微波电场大小,用极化表征微波的偏振。要获得电磁场的完整信息,需要测量其强度、相位、极化和频率,即进行电磁场的全信息测量。

微波是频率300 MHz~300 GHz的电磁波,在电子信息、航空、航天、生物医药、国防安全等领域具有重要作用。微波传感技术追求高精度、高灵敏度、大带宽等。传统微波传感基于电子学的探测,存在校准困难、热噪声较大、单一尺寸天线带宽小、装置金属材料易被发现等缺点。针对上述问题,研究者们提出利用量子传感器(包括测量微波磁场成分的原子蜡烛^[3]、氮-空位(Nitro-

gen-Vacancy, NV)色心^[4]、里德堡原子微波电场传感器等^[2])实现微波测量。里德堡原子是至少有一个电子处于极高主量子数 $n(n > 20)$ 的高激发态原子,具有高极化率和极强的诱导电偶极矩,相邻里德堡原子的能级差对应于微波带,因此里德堡原子对微波场非常敏感,同时里德堡原子能级密集,在电场测量中具有很大优势。此外,强电偶极矩使得里德堡原子可以实现长程相互作用,为研究多体量子物理提供了重要技术手段。里德堡原子的上述特性,使其成为微波量子传感器的理想候选。基于量子相干效应的里德堡原子微波电场传感器具有可溯源至基本物理常数、超过经典热噪声极限的灵敏度、全光学探测、大带宽、集成化等优势^[2, 5-6]。2012年,研究人员首次在实验中实现了基于里德堡原子微波电场可溯源的全光学探测^[2]。基于里德堡原子实现微波电场强度测量利用了两种量子相干效应——电磁感应透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)和Autler-Townes(AT)分裂。在三能级双光场阶梯型激发构型中,探测光作用于基态和激发态,而耦合光作用于激发态和末态(此处的末态指里德堡态)。由于耦合光的存在,探测光吸收峰中会出现一个非常窄的透明峰,即电磁感应透明^[7]。入射微波共振耦合相应的两个里德堡态,使得里德堡能级产生AT分裂,探测光的透射光谱呈现为2个EIT的透明峰,即EIT-AT分裂。EIT-AT分裂间隔正比于微波电场的强度,可以将微波电场强度转化为光学频率输出进行测量^[2],该测量方案具有可直接溯源至普朗克常数、可实现自校准等独特优势。该研究成果^[2]有力推动了微波量子精密领域的发展,美国国防高等研究计划署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于2021年支持8个工业部门和大学联合研究里德堡原子微波传感。

随着里德堡原子微波电场传感器的快速发展,目前已有多文献报道里德堡原子微波测量技术。国外期刊针对里德堡原子微波测量的报道文献包括:2015年,研究人员提出了基于量子干涉的测量射频(Radio Frequency, RF)电场的新方法^[5],该

方法使用含铷或铯原子的蒸气池，在电磁感应透明窗口内制备明亮共振峰，实现了高灵敏度测量。该方法可用于微波电场高空间分辨成像，以及测量矢量电场幅度。2017年的文献[6]指出里德堡原子可作为一个微波-光学转换器，将微波电场强度转换为光学频率响应。里德堡原子的显著偶极响应使里德堡原子微波电场传感器能够在500 MHz ~ 500 GHz的大频带上进行自校准测量。该文献还讨论了里德堡原子微波电场传感器的关键应用，包括自校准测量、毫米波和亚太赫兹测量、场映射以及亚波长和近场成像等。2022年的文献[8]综述了基于里德堡原子的射频电场接收器及其在射频通信、传感和计量方面的潜力，提出可以在精密计量、通信和各种其他传感应用中取代经典天线。2023年，山西大学的综述[9]总结了基于里德堡原子的微波传感的灵敏度和带宽研究进展、微波缀饰里德堡原子超外差量子传感、微波电场的量子增强传感以及先进量子测量系统和进一步提高微波电场传感性能的方法。2023年，中科大报道[10]了直流至太赫兹波段电场测量的实验进展，以及测量微波电场的不同方法，包括原子超外差、机器学习和临界增强测量。

国内期刊针对里德堡原子微波测量的报道文献包括：2015年，华南师范大学[11]介绍了里德堡原子电场计的原理与实验研究进展，并讨论了其发展方向。2018年，山西大学报道了基于里德堡原子的超宽频带射频传感器研究[12]。2021年，华南师范大学报道了基于里德堡原子的微波传感与通信技术[13]。2021年，航空工业北京长城计量测试技术研究所综述了里德堡原子微波电场测量以及其在建立量子基准方面的优势[14]。2023年，北京无线电测量研究所综述了基于里德堡原子的无线电波测量技术以及提高灵敏度的方案[15]。2023年，山西大学综述了基于原子超外差的里德堡原子微波电场量子传感技术以及提高灵敏度的方法[16]；同年，山西大学的另一篇综述对比了里德堡原子微波电场传感器与电偶极天线的性能，探讨了光外差技术在里德堡原子电场测量中的潜在应用[17]。2023年，北京量子信息科学研究院综述了基于里德堡原子的电场传感技术，展望了相关设备小型化、工程化的前景[18]。

基于里德堡原子的微波电场传感器能够测量微波电场的强度、相位、频率、极化等信息，这些信息在调幅通讯、调频通讯、调相通讯、测角等实际应用中具有非常重要的价值。本文介绍基于里德堡原子的微波全信息测量的原理以及研究现状，分析该领域中提高测量灵敏度和测量精度的方法，并对基于里德堡原子的微波全信息测量未来发展趋势进行展望，为相关领域的科研工作者提供借鉴。

1 微波电场强度测量

微波电场强度测量的可溯源性和极限灵敏度受到研究者的重点关注。利用EIT-AT分裂间隔[2]，将微波电场强度转换为频率间隔进行测量的方式是可溯源和自校准的，基于该方式可实现微波电场测量的量子基准。利用原子超外差方法[19]和相变方法[20]可突破标准量子极限，实现超灵敏探测。

1.1 里德堡原子测量微波电场强度原理

图1为利用里德堡EIT和AT分裂效应测量微波电场的能级图和实验原理图。里德堡原子与微波强相互作用导致里德堡态能级产生AT分裂，探测光的透射光谱产生EIT-AT的分裂谱峰，通过测量EIT-AT的分裂谱峰间隔即可得到微波电场的强度。

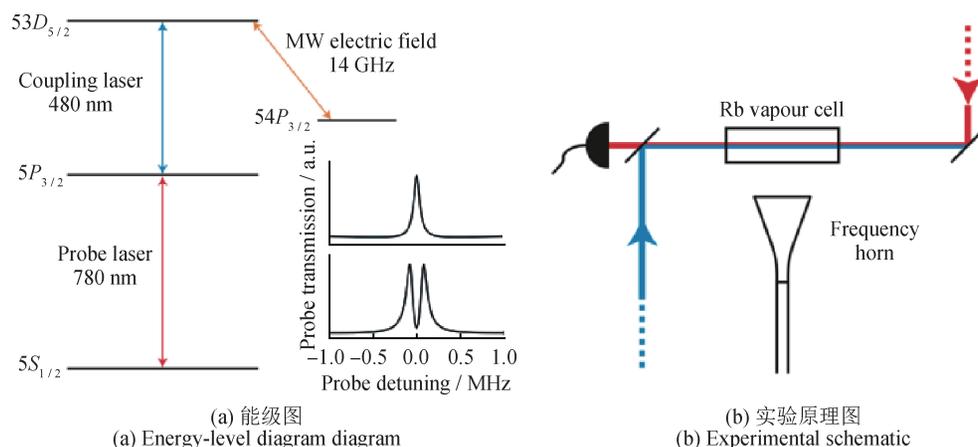
实验中，探测光和耦合光共线相向传播以克服多普勒效应。假设微波频率与里德堡原子的跃迁共振，在弱场近似条件下(探测光强度足够弱，可以忽略激发态和里德堡态的布居)，忽略各种碰撞相互作用，EIT-AT的分裂谱峰间隔 Δf_p 与微波电场强度 E_{RF} 具有线性关系[2]，即

$$\Delta f_p = \begin{cases} \frac{\lambda_c}{\lambda_p} \frac{\Omega_{RF}}{2\pi} = \frac{\lambda_c}{\lambda_p} \frac{\mu}{\hbar} E_{RF}, & \text{如果扫描探测光的频率} \\ \frac{\Omega_{RF}}{2\pi} = \frac{\mu}{\hbar} E_{RF}, & \text{如果扫描耦合光的频率} \end{cases} \quad (2)$$

式中： λ_p 和 λ_c 分别为探测光和耦合光的波长， Ω_{RF} 为射频电场的拉比频率， μ 为微波跃迁偶极矩， \hbar 为普朗克常数， Δ_p 为探测光的失谐量， Δ_c 为耦合光的失谐量。

当微波频率与里德堡原子的跃迁失谐时，EIT-AT的分裂谱峰间隔变为 Δf_δ [21]，即

$$\Delta f_\delta = \sqrt{(\delta_{RF})^2 + (\Delta f_0)^2} \quad (3)$$

图1 利用里德堡 EIT 和 AT 分裂效应测量微波电场^[2]Fig.1 Demonstration of energy levels and experimental principles for measuring microwave electric fields using the Rydberg EIT and AT splitting effects^[2]

式中： δ_{RF} 为RF失谐($\delta_{\text{RF}} = f_0 - f_{\text{RF}}$, f_0 为RF的共振跃迁频率, f_{RF} 为RF源的频率), Δf_0 为无RF失谐(或当 $\delta_{\text{RF}} = 0$)时两个峰的分裂。 Δf_0 与微波电场强度 E_{RF} 成正比, 通过测量光谱分裂间隔即可推导出微波电场强度。该测量方式可直接溯源至普朗克常数, 且具有自校准等优势^[2]。

实际上, EIT-AT分裂测量的下限受到很多因素的限制。文献[22-23]详细研究了EIT线宽与EIT-AT分裂方法测量下限的关系, 研究发现探测光和耦合光引起的功率加宽、温度引起的残余多普勒展宽、有限光束尺寸导致的渡越展宽、里德堡原子的碰撞增宽等都会造成里德堡EIT展宽。当微波拉比频率大于2倍的EIT线宽时, EIT-AT分裂与微波拉比频率呈现很好的线性关系; 当微波拉比频率小于EIT线宽时, EIT-AT分裂不可区分。文献[24]详细研究了传统双光子激发里德堡EIT和三光子激发里德堡EIT对灵敏度极限的改进作用, 指出与传统的双光子EIT相比, 三光子系统具有更窄的线宽。然而, 这些窄线特征并不能直接带来等比例的灵敏度提升。

1.2 提高微波探测灵敏度实验方法

目前, 提高微波电场探测灵敏度的方法主要有两类: 第一类方法为当微波电场强度足够使EIT产生AT分裂时, 利用频率间隔测量微波电场强度, 其优势是可实现绝对测量和自校准; 第二类方法为当微波电场强度不足以使EIT产生AT分裂时, 利用透过率法、色散法以及原子超外差方法测量微波电场强度, 这些方法灵敏度更高, 但是

需要基于探测光透过率的变化进行测量, 不是严格意义上的直接测量, 其表征的电场值需要用EIT-AT分裂区的测量结果进行校准。本文仅对第一类方法进行介绍, 第二类方法的介绍详见文献[9]。

下面重点讨论如何提高EIT-AT分裂测量灵敏度以及扩展测量下限。传统的EIT-AT方法在单一共振微波电场作用下通过扫描探测光或耦合光频率得到EIT-AT分裂光谱, 利用光谱分析得到EIT-AT分裂间距, 微波电场探测下限约为 $3 \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-1}$, 这是因为EIT-AT分裂的识别受到EIT线宽的限制^[2, 22-23]。突破EIT线宽的限制进而拓展EIT-AT方法在弱微波场下的测量极限是该领域的研究热点之一。提升测量灵敏度的主流方法包括增大EIT-AT分裂间隔法^[21, 25-28]和减小EIT线宽法^[29-32]两类。增大EIT-AT分裂间隔法主要包括微波场失谐法^[21]、辅助微波场法^[25-26]、微波幅度调制法^[27]、静磁场调控法等^[28]; 减小EIT线宽法主要包括冷原子法^[29-31]、三光子激发法等^[32]。

1.2.1 增大EIT-AT分裂间隔

EIT-AT分裂区的微波电场强度测量可直接溯源至国际单位制, 并且可通过原子参数进行自校准。拓展AT分裂区的测量下限是里德堡原子微波电场研究领域的关键问题之一。文献[19]将共振微波转换为一定的失谐微波, 将灵敏度提高了2倍。文献[25]通过辅助微波缀饰里德堡能级提高里德堡EIT光谱分辨力, 将可溯源的弱场下限拓展了两个数量级。文献[27]将待测微波的幅度进行周期性调制, 利用色散信号2个过0点的间距实现

最小微波电场 $0.43 \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的测量，灵敏度相较于同样条件下传统 EIT-AT 分裂测量提高了 6 倍。文献 [28] 利用静磁场将原子制备到最大磁子能级，通过磁场效应增大 EIT-AT 分裂，将可溯源的 EIT-AT 分裂下限向弱场区推进了一个数量级。

1) 辅助微波场法

中国科学院大学贾凤东等人提出了一种高效、鲁棒的将微波电场强度测量扩展到弱场区域的新方法，提高了微波电场测量的灵敏度 [25]。该方法利用辅助微波场修饰里德堡原子，突破了 EIT-AT 分裂间距在弱场测量领域的局限，并大大降低了测量的时间和经济成本，可应用于多种微波测量场景并提高测量精度。该方法中辅助场涉及的能级原理图如图 2 所示，能级 1、2、3 和探测光、耦合光构成阶梯型里德堡 EIT。辅助微波场作用于能级 3 和能级 5 产生 AT 分裂效应，之后待测微波场作用于能级 3 和能级 4，能级 3 的分裂进一步增大，最终利用探测光测量能级 3 的 AT 分裂得到待测微波电场参数。

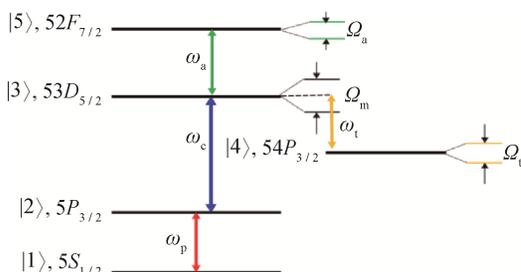


图 2 辅助场涉及的能级原理图 [25]

Fig.2 Schematic diagram of energy levels involved in the auxiliary field [25]

辅助场提高 EIT-AT 分裂分辨力的实验系统示意图如图 3 所示。通过声光调制器 (Acousto-Optic

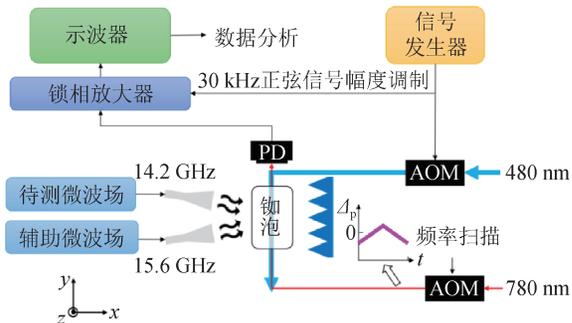


图 3 辅助场提高 EIT-AT 分裂分辨力的实验系统示意图 [25]

Fig.3 Schematic diagram of experimental system for improving EIT-AT splitting resolution with auxiliary field [25]

Modulator, AOM) 在 250 ms 的测量周期内对探测光共振频率 $\pm 25 \text{ MHz}$ 的范围进行扫描，以获得 EIT-AT 分裂光谱。探测光和耦合光都为线偏振且在原子蒸汽池中相向传播。通过 AOM 对耦合光的幅度进行调制，并利用锁相放大器 (型号为 LI5640) 进行解调，以提高 EIT-AT 光谱的读取信噪比。探测光与铷原子蒸汽池中的耦合光和微波相互作用后，由光电探测器 (型号为 PDA36A2) 进行探测，探测结果传输至锁相放大器中并用示波器记录。待测微波场与辅助微波场分别由 2 个微波信号源 (型号分别为 8340B 和 E8257D) 提供，并通过 2 个矩形喇叭天线 (型号为 LB-62-10-C-SF) 辐射到铷泡上。喇叭天线放置在远离铷泡的位置 (直线距离约 40 cm)，以满足微波场传输的远场条件。微波场的传播方向垂直于耦合光束和探测光束，且极化方向平行于探测光和耦合光的偏振。实验中，分别测量待测微波场输出为 14.2 GHz、辅助微波场输出为 15.6 GHz 时的 EIT-AT 分裂，用于校准待测场的幅度 E_t 以及辅助场的幅度 E_a ，然后使用校准后的线性衰减器获得更弱的 E_t 以及 E_a 。

图 4 为辅助微波场作用下里德堡 EIT 和 AT 分裂谱的实验示例，其中，黑色曲线为没有微波场时的里德堡 EIT 光谱；红色曲线为待测微波场单独存在时的 EIT 光谱，此时待测微波场强度很弱，不足以产生里德堡 EIT-AT 分裂；蓝色曲线为辅助微波场单独作用时的光谱，此时辅助微波场强度较

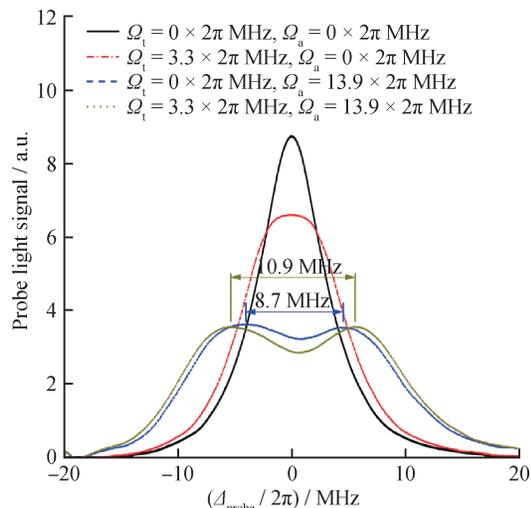


图 4 辅助微波场作用下里德堡 EIT 和 AT 分裂谱的实验示例 [25]

Fig.4 Experimental example of Rydberg EIT and AT splitting spectra under the influence of auxiliary microwave field [25]

强，可以产生明显的EIT-AT分裂；绿色曲线为待测微波场和辅助微波场共同作用时的光谱，可以清晰地看到EIT-AT分裂进一步增大，该结果证实了图2展示的理论。

有/无辅助微波场条件下里德堡EIT-AT分裂与待测微波电场的关系如图5所示，在室温铷原子

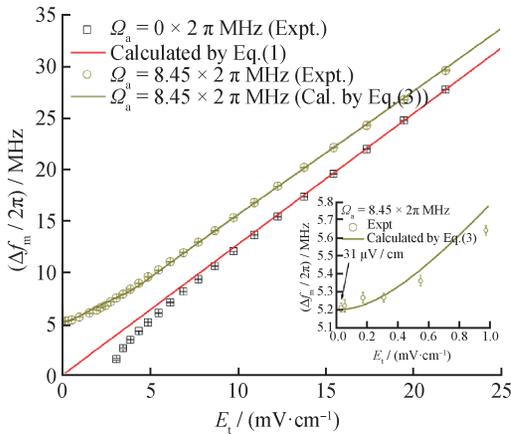
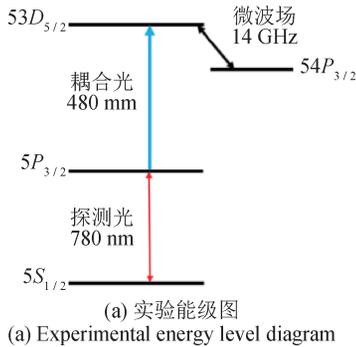
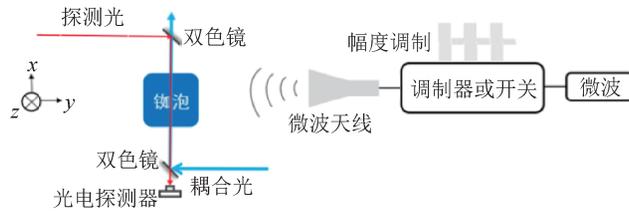


图5 有/无辅助微波场条件下里德堡EIT-AT分裂与待测微波电场的关系^[25]

Fig.5 Relationship between the Rydberg EIT-AT splitting and the measured microwave electric field under the conditions of with / without auxiliary microwave field^[25]



(a) Experimental energy level diagram



(b) Experimental device diagram

图6 微波幅度调制实验方案^[27]

Fig.6 Experimental of microwave amplitude modulation scheme^[27]

3) 静磁场调控法

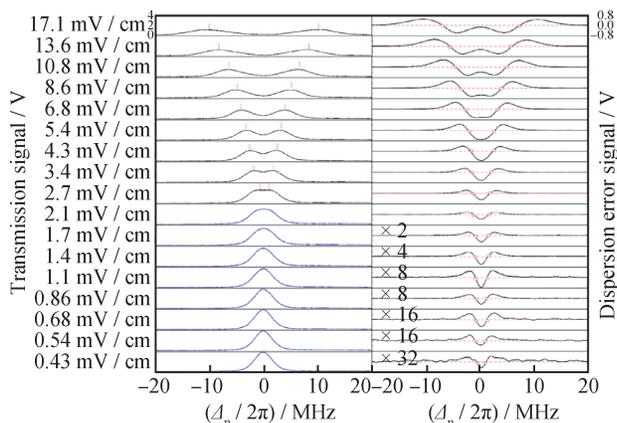
李新珩等人利用静态磁场来调节原子能级并提高光谱分辨力，改善了EIT-AT分裂测量的性能^[28]。静磁场增大EIT-AT分裂间隔的实验原理示意图如图8所示，0 G和10 G静态磁场的EIT-AT分裂间隔与微波场大小之间的关系如图9所示。使用磁场和光场将原子制备到绝对值最大 m_F 态，利用这两个 m_F 态之间的分裂间隔测量微波电场强度。静态磁场对微波电场传感场的贡献来自两个方面：

蒸汽池中，传统EIT-AT方法可测量的最小微波电场强度为 $2.7 \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，采用辅助微波电场缀饰里德堡原子后，可测量的最小微波电场强度为 $33 \text{ } \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。该研究首次通过理论和实验证明，在室温铷原子池实验装置中，利用辅助微波缀饰里德堡原子能够将EIT-AT分裂光谱的可分辨精度从几MHz提高至几十kHz，对应的微波电场强度从 $3 \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 降至 $31 \text{ } \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，其数值是传统测量弱场的极限的1/100。但该方法的缺点是在弱场条件下出现了非线性，损失了部分直接校准的能力。

2) 微波幅度调制

刘修彬等人^[27]提出了采用微波调幅扩展EIT-AT测量微波电场强度下限的方法，微波幅度调制方案如图6所示，微波频率设置为约14.233 GHz，对应 ^{87}Rb , $53D_{5/2}(F=4)$ 至 $54P_{3/2}(F'=3)$ 的里德堡跃迁。利用光电探测器测量微波场幅度调制后的探测光强度，测量结果传输至锁相放大器进行解调，得到色散误差信号2个过零点之间的间距，利用该间距推导出微波电场强度。不同待测微波电场强度条件下的EIT光谱如图7所示。

①最大 m_F 值之间的克莱布施-戈登系数更大；②静态磁场对里德堡能级的移动导致微波(Microwave, MW)频率失谐，这进一步增大了EIT-AT分裂间隔。该研究为弱微波电场下EIT-AT分裂故障问题提供了解决方案，并扩大了直接可追踪测量的范围，将室温下直接可溯源下限拓展了一个数量级，并且通过引入等效失谐来描述磁场效应。文献^[29]推导出了一个简单的解析解，可以准确地解释实验观测结果。



注：左侧为传统的EIT-AT分裂光谱，最小可测微波电场强度为2.7 mV·cm⁻¹；右侧为微波强度调制解析出的光谱，最小可测微波电场强度为0.43 mV·cm⁻¹。

图7 不同待测微波电场强度条件下的EIT光谱^[27]

Fig.7 EIT spectra under different microwave electric field strengths^[27]

1.2.2 减小EIT线宽

1) 冷原子法

周飞等人^[30-31]在2D⁺磁光阱中利用冷原子温度低、多普勒展宽小的优势获得窄线宽的里德堡电磁感应透明谱峰，结合AT分裂效应分别测量了多个频率的微波电场强度。冷原子里德堡EIT的实验装置示意图如图10所示。2D⁺磁光阱由一对方形的梯度磁场线圈、三对磁光阱冷却光/再泵浦光和一个超高真空的玻璃腔组成，从超高真空背景中捕获并形成一个橄榄球形的冷原子云。一对亥姆霍兹线圈提供一个与橄榄球形冷原子云长轴方向平行的均匀弱磁场，作为量子化轴。探测光和耦合光相对传输通过冷原子云，并与冷原子云长轴重合。利用1/4波片将探测光的偏振调节为σ⁻，

将耦合光的偏振调节为σ⁻。微波天线放置在垂直于冷原子云长轴的方向，并与冷原子云高度一致、距离足够远，以保证远场入射的条件。为了防止实验平台上其他元件反射微波对实验造成干扰，在微波入射方向放置了吸收微波的材料。

制备冷原子样品的过程如图11所示，首先，利用磁光阱从真空背景中捕获足够数量的原子，然后利用偏振梯度冷却(Polarization Gradient Cooling, PGC)进一步降低冷原子的温度，再通过光泵过程将原子泵浦到特定的量子态5S_{1/2}, F=2, m_F=2。具体流程如下：首先同时打开磁光阱的梯度磁场，产生冷却光和再泵浦光，此阶段维持6 s，磁光阱可以装载10⁸个冷原子，温度约为150 μK。然后关闭磁光阱的梯度磁场，待磁光阱的梯度磁场完全变为0 G·cm⁻¹后，将冷却光的失谐量由-12 MHz变为-30 MHz，开始PGC过程并持续2 ms，使冷原子样品的温度降低至16 μK。PGC结束后，在1 ms内缓慢开启强度为4 G的量子化轴磁场并一直维持到实验结束。等量子化轴磁场稳定后，利用5S_{1/2}, F=2至5P_{3/2}, F=2的共振光将所有原子泵浦至5S_{1/2}, F=2, m_F=2态，完成冷原子样品制备。通过改变冷原子自由飞行的时间和光泵过程中再泵浦光的强度，控制冷原子云的尺寸和密度。一般情况下，冷原子自由飞行时间为8 ms，此时处在量子态5S_{1/2}, F=2, m_F=2的原子数约为5 × 10⁷，冷原子在轴向上的半径约为3 mm，温度为16 μK，光学厚度(Optical Depth, OD)约为3。

在得到确定量子态的冷原子样品后，同时打开探测光和耦合光，探测光的典型功率和尺寸分

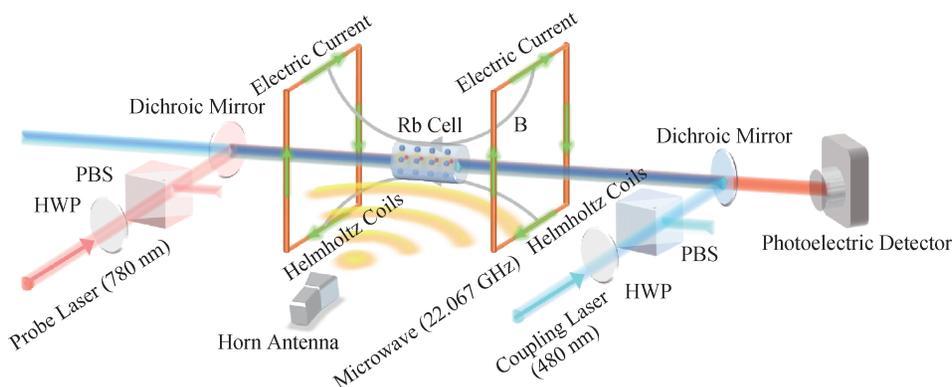


图8 静磁场增大EIT-AT分裂间隔的实验原理示意图^[28]

Fig.8 Schematic diagram of experimental principle of increasing EIT-AT separation interval by static magnetic field^[28]

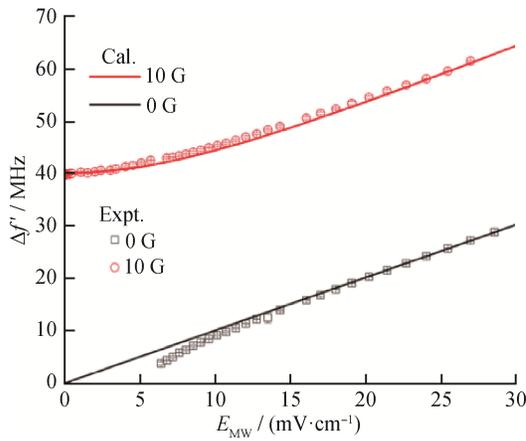


图9 0 G和10 G静态磁场的EIT-AT分裂间隔与微波场大小之间的关系^[28]

Fig.9 Relationship between EIT-AT intervals and microwave field sizes in 0 G and 10 G static magnetic fields^[28]

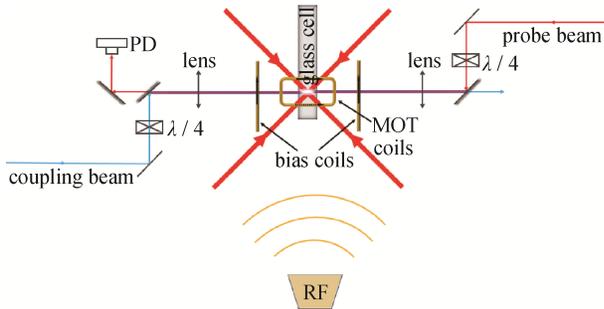


图10 冷原子里德堡EIT的实验装置示意图^[30-31]

Fig.10 Schematic diagram of the experimental setup of cold atom Rydberg EIT^[30-31]

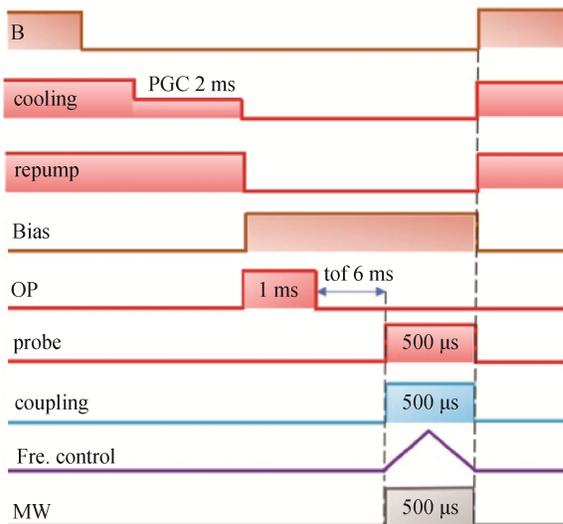


图11 制备冷原子样品的时序图及EIT-AT的实验过程^[30-31]

Fig.11 Time sequence diagram of cold atom sample preparation and experimental process of EIT-AT^[30-31]

别为 500 nW 和 100 μm ，耦合光的典型功率和尺寸分别为 60 mW 和 300 μm 。探测光和耦合光利用塞曼调制锁频在原子能级上^[33]，利用 AOM 进行频率扫描得到冷里德堡 EIT 光谱。微波由信号源(型号为 HP8340B)产生，通过微波天线传输至冷原子云。微波电场的频率被设置为与能级 $46 D_{5/2}$, $F = 3$ 至 $47 P_{3/2}$, $F = 3$ 的跃迁频率共振，且微波电场线偏振。通过施加微波电场，可以得到 EIT-AT 分裂光谱，并通过光谱测量微波电场强度。

实验获得的典型冷原子里德堡 EIT 和 EIT-AT 谱峰如图 12 所示，可直观地看到微波电场强度和 EIT-AT 分裂的间隔正相关。当电磁场强度过小时，分裂极小，无法从 EIT 峰中读出；当电场强度过大时，分裂峰超出了冷原子吸收峰的范围，也无法观察到。

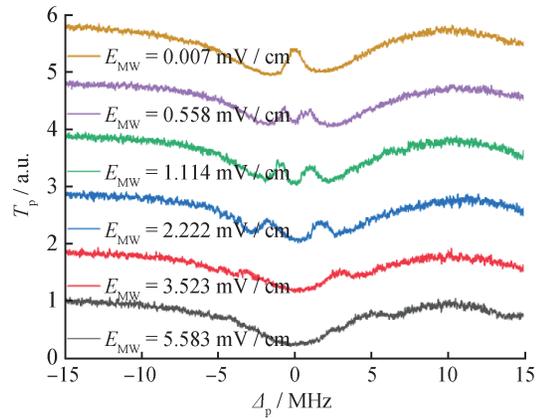


图12 冷原子中典型的EIT-AT分裂光谱^[30]

Fig.12 Typical EIT-AT splitting spectra in cold atoms^[30]

微波频率为 14.2 GHz 时，冷原子和热原子 EIT-AT 分裂测量结果对比如图 13 所示。EIT-AT 分裂方法可测量的微波电场强度线性区的下限为 $222 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，相较传统热原子蒸汽池中 EIT-AT 分裂线性区的下限 $5 \text{mV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 拓展了约 22 倍，这对极弱微波电场的绝对校准具有重要意义。

周飞等人研究发现冷原子实验中可利用扫描耦合光频率微波拓展测量范围^[31]，结果如图 14 所示。利用 EIT 共振处探测光透过率的变化测量微波电场强度，对应的最小测量值可以小于 $1 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，相应的灵敏度可达 $1 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。该结果体现了冷原子样品在微波电场测量及绝对校准方面的优势。

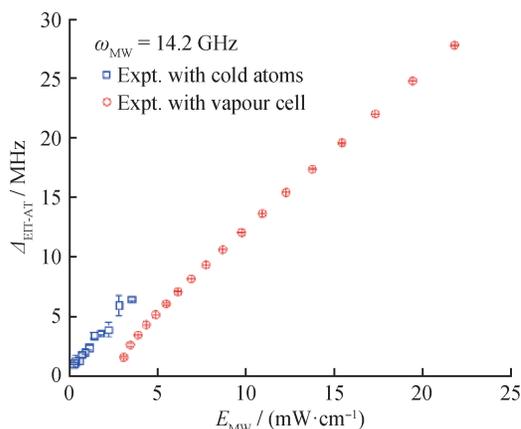
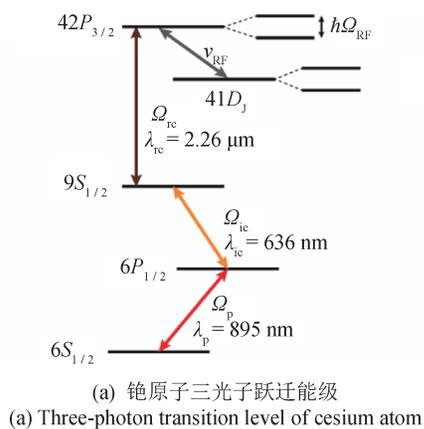


图13 微波频率为14.2 GHz时冷原子和热原子 EIT-AT分裂测量结果对比^[27]

Fig.13 Comparison of cold atom and hot atom EIT-AT splitting measurements at microwave frequency of 14.2 GHz^[27]

2) 三光子激发法

文献[32]提出了一种共线三光子里德堡电场传感方案，该方案可以有效地消除热原子蒸汽池中里德堡EIT的线宽，涉及的铯原子能级和实验装置如图15所示。其中，895 nm和2.26 μm的激光同向传输，与636 nm的光反向交汇于铯原子蒸汽池中，在这个结构下三光子的波矢差为4 THz，相较传统双光子(852 nm + 510 nm)的波矢差240 THz小了两个数量级。室温下铯原子双光子852 nm和509 nm方案中，受残余多普勒效应限制的光谱带



(a) 铯原子三光子跃迁能级
(a) Three-photon transition level of cesium atom

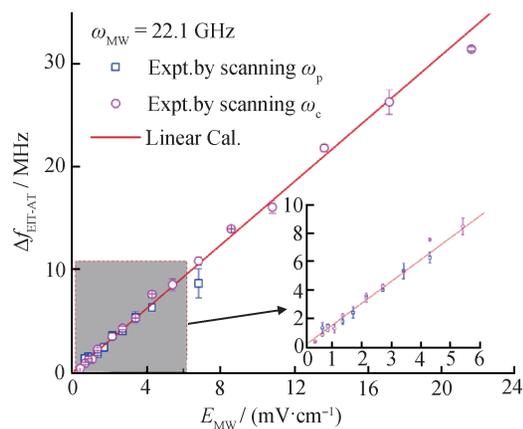
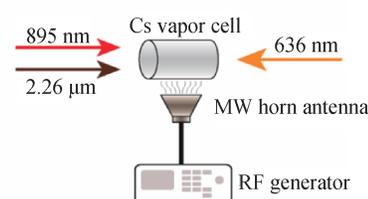


图14 冷原子实验中扫描耦合光频率微波拓展测量范围^[31]

Fig.14 Expansion of microwave measurement range by scanning coupling laser frequency in cold atom experiments^[31]

宽为 $2\pi \times 3.5$ MHz。在共线三光子里德堡电场传感方案中，895 nm和2.26 μm光子补偿了636 nm光子的多普勒效应，在理想条件下，该方案可以将残余多普勒宽度减小至 $2\pi \times 11.8$ kHz。实际测试中，该方案成功将里德堡EIT线宽由几MHz压窄为500 kHz。

在10.7 GHz的RF电场数据中，最小可分辨的Auter-Townes分裂间隔为 $2\pi \times (511 \pm 6)$ kHz，对应的RF电场强度为 $(286 \pm 4) \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。结果显示，三光子激发法的测量灵敏度相较原EIT-AT方法提高7倍以上，这与光谱分辨力提高的比例一致。



(b) 热原子中消除多普勒效应的装置示意图
(b) Schematic diagram of the device for eliminating Doppler effect in hot atom

图15 共线三光子里德堡电场传感方案^[32]

Fig.15 Collinear three-photon Rydberg electric field sensing scheme^[32]

1.2.3 非频率间隔测量

由上述分析可以看出EIT-AT分裂方法存在局限性，其仅适用于测量中等以及较高强度的场。当微波电场的强度弱到EIT-AT分裂不可区分时，

仅会降低EIT峰值，此时EIT-AT分裂方法不适用。当微波电场的强度不足以引起EIT-AT分裂时，可通过EIT共振处探测光透过率的变化来测量微波电场，最小可测量微波电场为 $8.3 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[2]，但这

种方法容易受到激光强度抖动、原子温度变化等因素影响，并且需要利用比较复杂的数值模拟来分析实验数据。

研究者们利用色散^[34]、马赫-增德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferome, MZI)^[35]、调频^[36]等技术手段不断拓展弱场测量极限。2020年，山西大学的研究者提出了原子超外差技术^[19]，该技术利用局域微波电场对信号场进行放大，通过测量拍频信号得到微波电场、相位等信息，极大地提升了微波电场场强的探测灵敏度，微波测量灵敏度可达 $55 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ，此数值是之前国际最好水平的1/1000，最小可探测的微波场强约为 $780 \text{ pV}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，此数值是之前国际最好水平的1/10000。基于可控原子体系的微波超外差测量新技术从根本上避免了经典微波测量方法中自由电子随机热噪声的影响，通过对原子量子状态进行光学非破坏测量，获得微波的强度、频率、相位等信息，可达到原子投影噪声极限灵敏度。

文献[37]详细研究了原子超外差技术的灵敏度极限，基于MZI的外差-里德堡原子接收器基于相位的读出方案相较于外差-里德堡原子接收器基于强度的读出方案灵敏度更高，分析极限灵敏度可达 $-194.1 \text{ dBm}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。文献[38]通过理论分析指出冷原子超外差的极限为 $3.0 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ，并且在冷原子中实现了 $10.0 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的电场灵敏度，最小可检测场为 $540 \text{ pV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

由于相互作用体积大且多体相互作用强，相变点附近的里德堡原子会在很小的扰动下产生雪崩跃迁^[20]，即多体里德堡态中的原子将周围的原子激发成多体里德堡态，从而放大了小扰动对里德堡原子的影响。可利用该特性检测里德堡原子在相变点^[20]附近时吸收谱的陡峭突变来测量微波电场，进一步提高里德堡原子检测微波电场的精度和灵敏度。

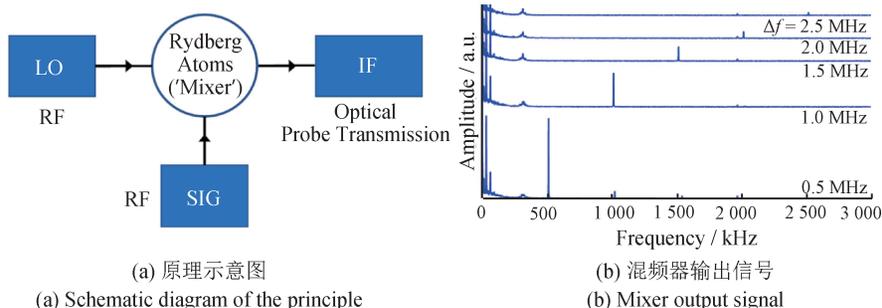
2 微波宽带频率测量

带宽有两个定义：①工作带宽，指传感器工作频率的范围，例如常见的S波段、X波段或者毫米波等。里德堡原子微波电场传感器研究领域的关键问题是实现真正连续的载波宽带测量，即实现工作波段的连续。里德堡原子微波电场传感器

可以摆脱传统天线几何形状对于频率带宽的限制，利用里德堡能级EIT-AT分裂间距与待测微波电场强度的线性正比关系，选择不同主量子数 n 的里德堡态，基于一个装置即可实现MHz至THz波段的测量。尽管测量范围很宽，但里德堡能级是分立的，导致可测量的频率是不连续的^[9]。目前里德堡能级之间的共振跃迁仅能实现单个共振跃迁附近一个大约10 MHz量级的小区间线性可靠测量，当微波频率失谐量变大时，由于非共振耦合，原子能级对失谐微波场的非线性响应不敏感。如何使可用里德堡能级跃迁的线性响应区间扩大到覆盖大部分远离共振的非线性响应区间需要进一步研究。②瞬时带宽，指单个发射脉冲内所能调制的最大信号带宽。目前单一原子气室中单一EIT的瞬时带宽只有几MHz^[39]，通过空间分裂和参差脉冲探针激光可将瞬时带宽提升至100 MHz^[40]。

本文聚焦于拓展工作带宽的研究工作。研究人员提出了多种方法以实现里德堡原子微波电场传感器的连续频率宽带测量，拓展其频率并提升灵敏度，例如通过外场(包括静电场^[41-42]、静磁场等^[43])调控原子能级实现测量频率的拓展。静电场/静磁场调控原子能级的优点是操作简单，缺点是会改变所有原子能级，分析处理比较复杂。辅助微波场调控法利用与里德堡能级近共振的微波场调控原子能级，其优点^[23, 25, 44-47]有：①辅助微波场调控且仅调控里德堡态能级；②测量时维持EIT激光频率不变。

为实现对未知频率微波的测量，研究人员基于里德堡原子微波电场传感器开发了原子混频器^[48]，其原理如图16所示。里德堡原子混频器利用原子天然解码的优势，在局域场作用下，将高频的GHz射频场向下变频为kHz量级的中频，根据原子混频器得到的中频信号频率推导出待测场的频率，根据原子混频器得到的中频信号幅度推导出待测场的强度，根据原子混频器得到的中频信号相位推导出待测场的相位^[48]。文献[39]利用混频器结合微波波导聚焦增大局域场场强，基于非共振区域的二阶效应，实现了0~20 GHz的宽带测量，但是非共振时的灵敏度比共振时低二十几dB。如何提高非共振时的灵敏度是实现真正连续频率测量的关键问题。



(a) 原理示意图
(a) Schematic diagram of the principle

注：局域场频率固定时，信号场与局域场频率相差分别为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 MHz。

图16 里德堡原子混频器^[48]

Fig.16 Rydberg atomic mixer^[48]

崔越等人利用辅助场缀饰调控里德堡原子能级，使失谐场重新与辅助场缀饰后的原子能级共振耦合，进而实现了带宽灵敏度增强微波电测^[46]。此结果展示在一个双激光双微波耦合的五能级里德堡原子系统中，辅助微波场的最优调控可以使微波电测回归到高灵敏度的线性响应，该方案非常适用于提高原子混频器等量子传感器的性能。该方案涉及的能级、光场和微波场如图17所示，其中能级 $|3\rangle$ 、 $|4\rangle$ 、 $|5\rangle$ 为主量子数 n 较大的里德堡能级。传统的利用 EIT-AT 分裂测量待测微波电场强度的方法要求待测场的频率与目标里德堡能级跃迁频率共振，在失谐的情况下，传统方法不适用。文献[46]通过引入与 $|4\rangle$ 到 $|5\rangle$ 的能级跃迁共振的角频率为 ω_a 的辅助微波场，再选择辅助场的电场强度与频率来调控 $62P_{3/2}$ 能级的变化，使失谐的目标微波场频率重新与目标里德堡能级跃迁频率共振。

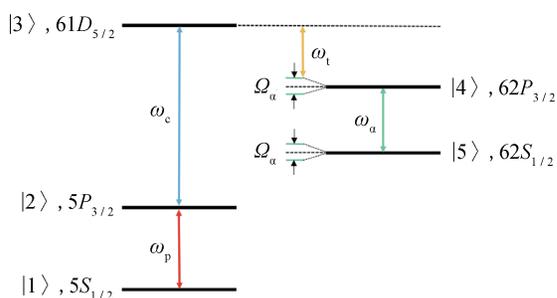


图17 利用辅助微波缀饰里德堡EIT-AT分裂的五能级方案^[46]

Fig.17 Five-level scheme for Rydberg EIT-AT splitting dressed by an auxiliary microwave field^[46]

室温下，在微波暗室内的铷原子蒸汽池中进行上述辅助微波场调控目标里德堡原子能级的实验，理论模型中的 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ 、 $|4\rangle$ 、 $|5\rangle$ 能级在实

验中分别对应 ^{87}Rb 原子能级 $5S_{1/2}(F=2)$ 、 $5P_{3/2}(F=2)$ 、 $61D_{5/2}(F=4)$ 、 $62P_{3/2}(F=3)$ 、 $62S_{1/2}(F=2)$ 。辅助微波场调控目标能级实验装置如图18所示。

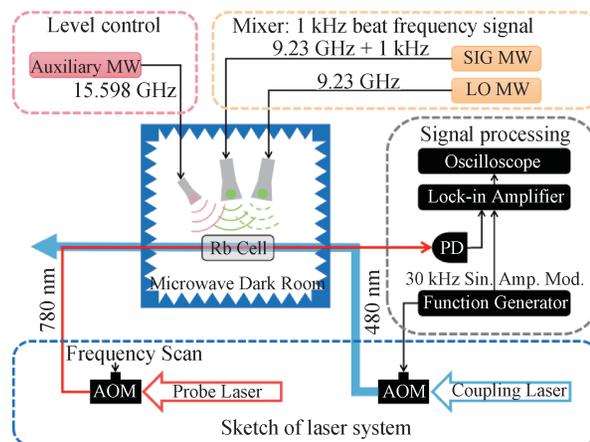


图18 辅助微波场调控目标能级实验装置^[46]

Fig.18 Experimental setup of Rydberg energy level regulation using an auxiliary microwave^[46]

图19为辅助微波电场缀饰前后局域微波场产生的EIT-AT分裂光谱实验图例，其中，黑色曲线为没有微波场作用时系统产生的基础EIT光谱信号。在此基础上，加入频率与目标里德堡能级跃迁(即图17能级模型中 $|3\rangle$ 和 $|4\rangle$)频率共振的局域微波场，当局域微波场频率与跃迁频率共振，即失谐量 $\Delta_{L0} = f_{L0} - f_0 = 0$ MHz，原单个EIT峰发生分裂并形成对称性良好的EIT-AT分裂双峰，如图17中红色曲线所示。此时局域微波场频率约等于目标里德堡能级跃迁共振频率 f_0 ，即 $f_0 \approx f_{L0} = 9.2328$ GHz。将局域微波场的频率增加14.6 MHz，此时局域微波场频率与目标里德堡能级跃迁的共振频率相比，具有失谐量 $\Delta_{L0} = f_{L0} - f_0 = 14.6$

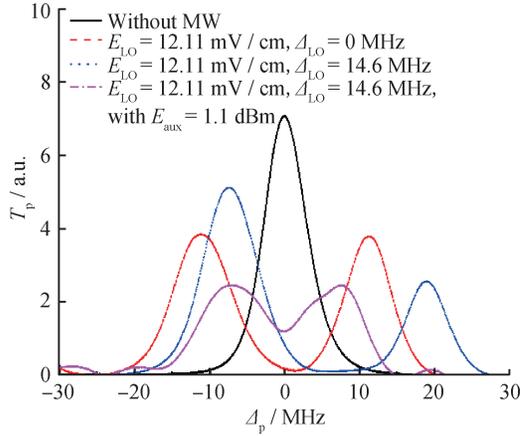


图19 辅助微波电场缀饰前后局域微波场产生的EIT-AT分裂光谱实验图例^[46]

Fig.19 Experimental graph of EIT-AT splitting spectra generated by local microwave field before and after auxiliary microwave electric field dressing^[46]

MHz, 当微波频率非共振, EIT-AT分裂双峰的高度是不对称的, 如图17中蓝色曲线所示。加入经过频率校准的辅助微波场, 校准后的频率与图17的能级模型中 $|4\rangle$ 和 $|5\rangle$ 里德堡能级跃迁频率 f'_0 共振, $f'_0 = 15.59807$ GHz, 辅助场的失谐量为 $\Delta_{aux} = f_{aux} - f'_0$, 共振时 $\Delta_{aux} = 0$ MHz, 分裂双峰的高度重新对称, 如图17紫色曲线所示, 这代表失谐后的局域微波场频率与辅助微波场缀饰后的目标里德堡能级跃迁频率再次共振, 系统对于微波场拉比频率的响应由原本非共振情况的二阶非线性效应变为了一阶线性效应, 等效扩展了目标里德堡能级跃迁的线性响应区间, 其他能级不会受到辅助场的影响。红色曲线与紫色曲线的EIT-AT分裂双峰

间距不同, 这意味着辅助场作用后, 失谐的微波场频率重新与目标里德堡能级跃迁频率共振。

文献[46]具体讨论了某一给定失谐点处, 辅助微波场的介入对最小可测量值的影响。图20为辅助微波场介入前后外差法在 $\Delta_{1,0} = 0$ MHz共振点以及 $\Delta_{1,0} = -22$ MHz失谐点处, 拍频信号振幅与待测微波电场强度 E_{sig} 之间的关系图, 其中, 黑色方块点线为 $\Delta_{1,0} = 0$ MHz共振时, 拍频信号振幅随待测微波电场强度的变化, 在 $0 \sim 4$ $\text{mV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 范围内, 拍频信号的振幅与电场强度呈线性关系, 这和文献[17, 45]的结果一致。在文献[46]的装置上, 共振点处普通原子超外差法可测量的最小电场强度值为 $18 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。蓝色三角点线为 $\Delta_{1,0} = -22$ MHz失谐点处, 拍频信号随待测微波电场强度的变化, 可测最小电场强度值为 $180 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。红色圆圈点线为最佳匹配的辅助场介入下, 拍频信号随待测微波电场强度的变化, 可见此时拍频信号的振幅与电场强度依然呈现很好的线性关系, 并且最小测量值可达 $18 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$, 基本达到了共振时的测量极限值, 相较 $\Delta_{1,0} = -22$ MHz失谐点的普通超外差法的最小测量极限拓展了10倍。上述结果表明辅助微波场介入后, 拍频信号的振幅与电场强度仍然呈线性关系, 且测量灵敏度大幅提升。

文献[46]进一步分析了 $-100 \sim 0$ MHz有/无辅助微波电场对测量灵敏度影响, 结果如图21所示。在 $-100 \sim 0$ MHz失谐区间内, 辅助微波电场增强了测量灵敏度(最大提升20 dB), 在一定程度上解决了非共振区灵敏度降低的问题。

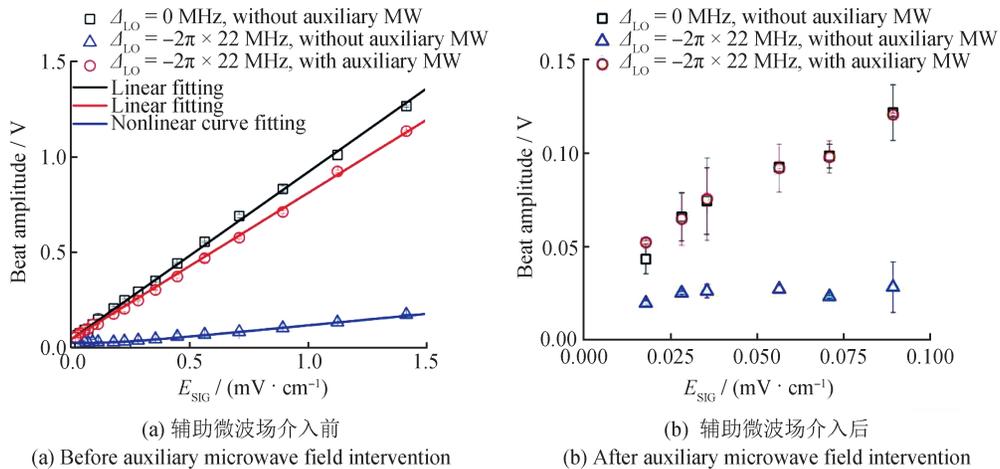


图20 拍频信号振幅与待测微波电场强度 E_{sig} 之间的关系^[46]

Fig.20 Relationship between beat signal amplitude and microwave electric field strength to be measured^[46]

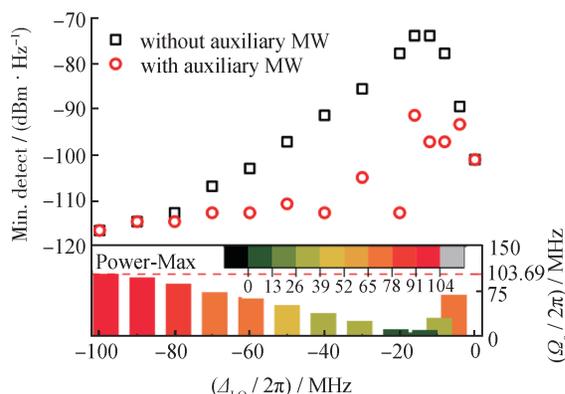


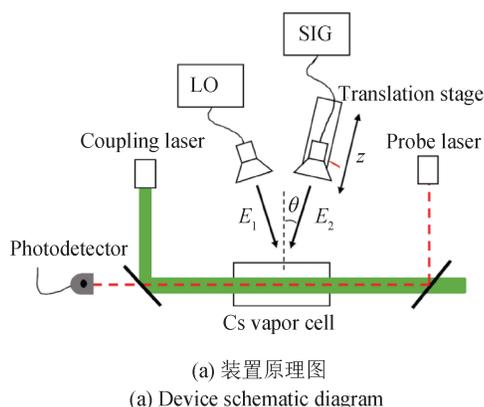
图21 频率-100 ~ 0 MHz时有/无辅助微波电场对测量灵敏度影响的对比图^[46]

Fig.21 Comparison diagram of measurement sensitivity with and without auxiliary microwave electric field from -100 to 0 MHz^[46]

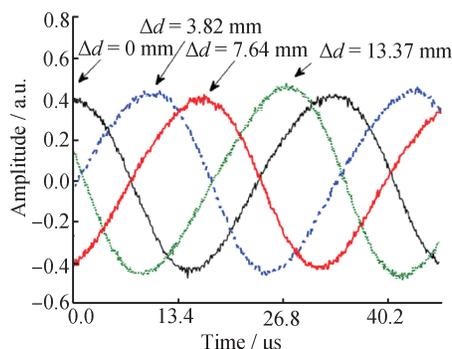
3 微波相位测量

微波相位检测是天线计量、雷达和通信领域中的一项重要技术。提高相位测量的分辨力，实

现对目标速度和角度的高灵敏度测量是科研人员重点关注的问题。目前还没有快速器件直接测量微波(高频)的波形，一般需要先通过混频器的拍频获得中频信号，然后测量中频信号的相位从而得到微波的相位。基于里德堡原子微波电场传感器开发的原子混频器可以实现微波相位的测量，其原理是利用里德堡原子作为混频器实现局域场和信号场的拍频。当局域场的相位不变时，中频信号的相位由信号场的相位决定。利用里德堡原子混频器测量相位的原理图如图22(a)所示，改变信号场相位时中频信号相位的改变如图22(b)所示。文献[45]首次展示了里德堡原子混频器测量微波相位的效果，并实现了 2° 的相位分辨。随后文献[19, 48-56]也报道了原子混频器测量相位的研究工作，文献[19]利用原子超外差技术实现了 0.8° 相位分辨。



(a) 装置原理图
(a) Device schematic diagram



(b) 改变信号场的相位引起中频信号相位的改变
(b) Phase change of intermediate frequency signal caused by changing the phase of signal field

图22 利用里德堡原子混频器测量相位^[45]

Fig.22 Measurement of phase using a Rydberg atomic mixer^[45]

贾风东^[52]、刘修彬^[53]等人在里德堡原子混频器的基础上将相位测量直接转换为拍频振幅测量，实现了原子检相器。贾风东等人利用交流磁场的 Zeeman 调制，将里德堡原子混频器转换为鉴相器，实现了相位信息的简单读取^[52]。他们通过添加交流塞曼调制扩展基于里德堡原子的混频器的功能，利用与拍频信号同频率的交流磁场对原子能级进行周期调制，将相位信息传递到拍频信号的振幅上，可便捷、实时地读取相位信息。实验装置如图23所示，在传统原子混频器的基础上添加了一对亥姆霍兹线圈，通过在圈中通入与混频器拍频信号同频的交流电，实现对原子能级的周期性

塞曼调制。

通过改变塞曼调制相位相对于微波的相位，研究塞曼调制的相位对拍频信号的影响，结果如

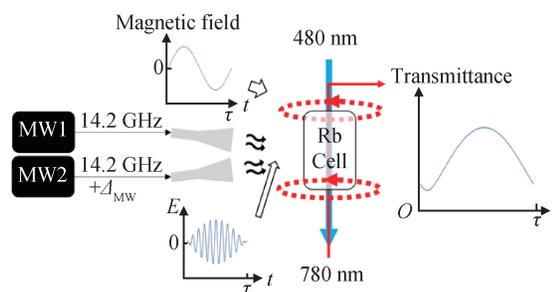


图23 实验装置原理图^[52]

Fig.23 Sketch for the principle of experimental setup^[52]

图 24 所示，当塞曼调制相位与微波拍频信号同相时，拍频信号的峰峰值被放大了 2 倍，当塞曼调制的相位与拍频信号相位相差 180° 时，拍频信号的幅度被降低了 1/2。

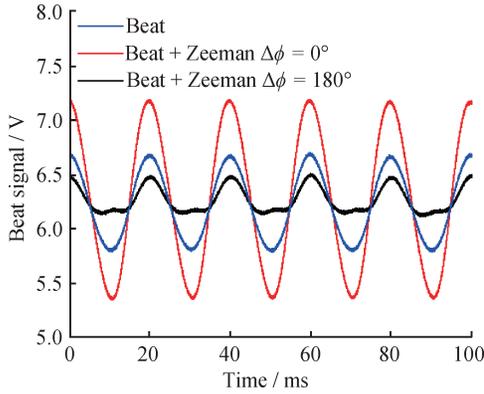


图 24 塞曼调制对拍频信号的影响^[52]

Fig.24 Influence of Zeeman modulation on beat signal^[52]

文献[52]研究了固定塞曼调制的相位下，微波相位的改变与拍频信号振幅的关系。交流磁场 Zeeman 调制下拍频信号振幅与微波相位的关系如图 25 所示。塞曼调制后，微波相位的测量可以直接转换为拍频信号幅度的测量。在添加塞曼调制辅助后，微波相位信息先在原子传感器中与参考波形相位(即塞曼调制的相位)进行比较，然后直接测量拍频的振幅得到相位信息。相较传统的通过将拍频信号的波形与参考波形比较得到相位的方法，文献[52]的方法可以直接在原子传感器中将微波相位与参考波进行比较，读取的拍频信号幅度可以直接反映微波的相位，更加便捷。

文献[52]还展示了实时测量、编码信息实验，将拍频信号传输至第二个锁相放大器，利用塞曼调制信号作为参考信号，解调得到拍频的幅度信息，信号的频率为 1 Hz，塞曼调制的频率为 50 Hz ~ 5 kHz。实验中，将微波相位 180° 和 0° 分别对应 0 和 1 编码，利用“LZ”两个字母的二进制编码作为微波的相位调制，塞曼 + 拍频输出的实时结果与输入的编码一致，可以很好地实现编码信息的输出。塞曼调制频率为 5 kHz 时，微波相位调制编码实验结果如图 26 所示，尽管此时线圈产生的磁场强度已经较弱，但仍能观察到信号，说明该方法实际使用时的频率范围比预期要宽。里德堡原子传感器作为混频器时，可以通过调制原子样品，

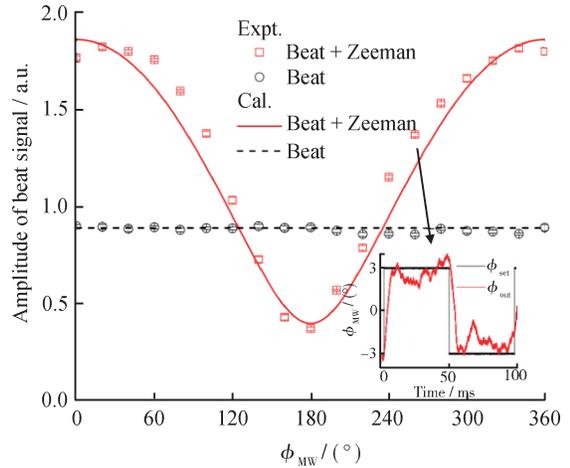


图 25 交流磁场 Zeeman 调制下拍频信号振幅与微波相位的关系^[52]

Fig.25 Relationship between the amplitude of beat frequency signal and microwave phase under Zeeman modulation of AC magnetic field^[52]

将微波相位信息转换为可直接探测的振幅信息，这意味着可以引入另一个操作“维度”，拓展混频器的功能和应用，对于实现微波相位实时传感具有非常重要的应用价值^[52]。目前实验中的调制速度为 5 kHz，此调制速度主要受到塞曼调制线圈的自感和互感的限制，未来使用低阻材料或者超导材料制作塞曼线圈，或者采用别的方式(例如激光调制等)来高速调制原子能级，可提升调制速度。

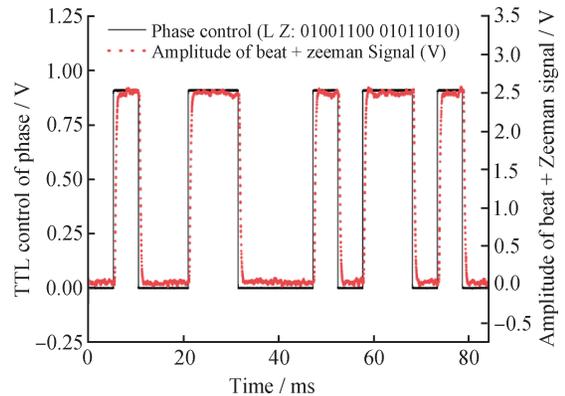


图 26 微波相位调制编码实验结果^[49]

Fig.26 Results of the coding experiments using microwave phase modulation^[49]

刘修彬等人将里德堡原子混频器中的局域场进行幅度调制，将混频器转换为鉴相器，实现了误差不得超过 ± 0.6° 的高精度相位测量^[53]。通过对局域微波电场的幅度进行周期性调制，将信号微波电场的

相位与拍频信号的幅度相关联，从而实现相位的高精度测量和直接读取。基于里德堡原子的相位检测器基本原理如图27所示。将局域微波电场的幅度进行周期性调制，调制周期与拍频周期相同，局域场

的调制信号和拍频信号通过里德堡原子叠加后，探测光强的振幅就与信号射频场的相位相关，再通过PD探测和锁相放大器解调，即可得出信号射频场的相位与系统输出电压的关系，实现鉴相器的功能。

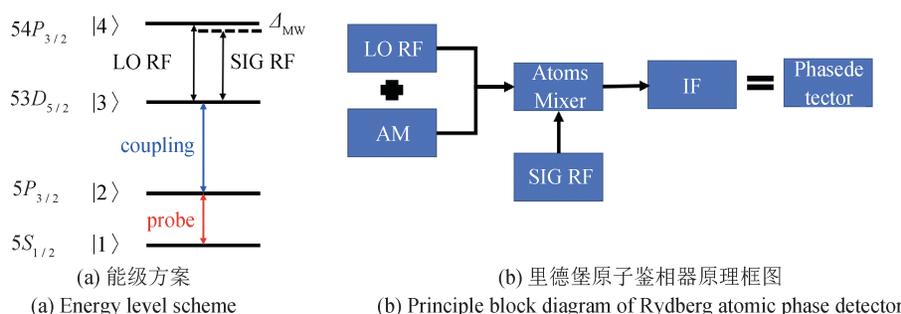


图27 基于里德堡原子的相位检测器基本原理^[53]

Fig.27 Basic principle of phase detector based on Rydberg atom^[53]

局域场幅度调制下，利用拍频信号振幅变化测量微波相位的结果如图28所示。当局域微波电场的幅度调制频率与拍频信号的频率相同时，拍频信号幅度与信号微波电场的相位相关；当幅度

调制的相位被设置为与局域微波电场的相位相差 $\pi/4$ 时，拍频信号的幅度和信号微波电场的振幅在 $0 \sim \pi/2$ 的范围内呈现线性关系，最小相位分辨力为 0.6° 。

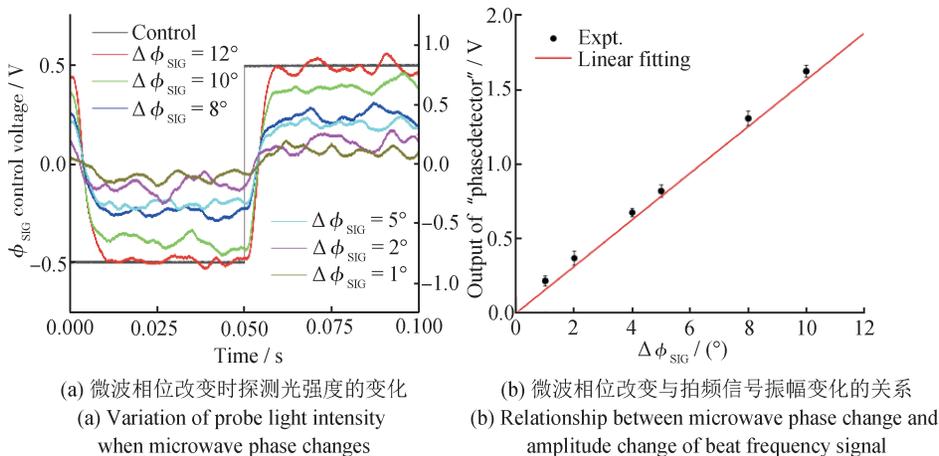


图28 局域场幅度调制下,利用拍频信号振幅变化测量微波相位的结果^[53]

Fig.28 Results of microwave phase measurement obtained by using the amplitude change of beat frequency signal under local field amplitude modulation^[53]

4 微波极化测量

如何提高分辨力是微波极化测量领域的关键问题之一。传统天线(以电偶极探头为例)通过旋转探头，使探头方向与微波极化方向形成夹角，根据探头探测得到的电流或电压推导得出微波电场的极化，存在探头影响微波电场传输等问题。里德堡原子微波电场传感器基于原子塞曼子能级对不同微波极化的响应不同实现微波极化测量^[57]，

原理如图29所示。

近几年，利用里德堡原子测量微波偏振的工作也取得了重要进展。2013年，J. A. Sedlacek 等人在铷原子气中利用里德堡 EIT，通过测量相对于探测光和耦合光的偏振得出微波电场的极化，实现了 0.5° 分辨力^[57]。该实验需要利用待测微波偏振在探测光和耦合光偏振上的投影，非常依赖光场的偏振性，同时需要复杂的建模分析才能得到微波极化。2019年，Matthew T. Simons 等人展示了一

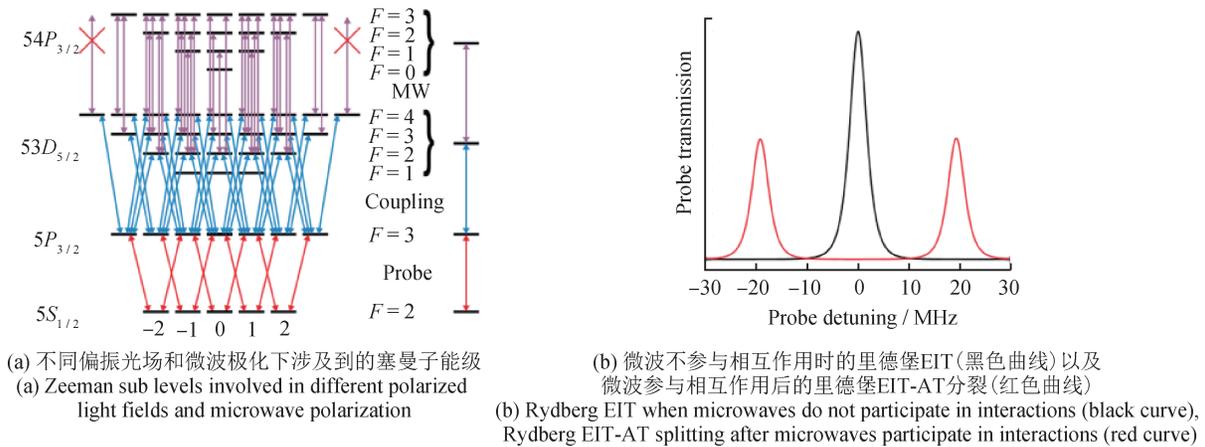


图29 里德堡原子微波电场传感器测量极化^[57]

Fig.29 Measurement of polarization using a Rydberg atomic microwave electric field sensor^[57]

种基于里德堡原子混频器的测量射频场相位的方案，其测量的传播常数在理论值的0.1%范围内^[58]。

刘修彬等人利用冷原子温度低、里德堡EIT谱峰窄、原子量子态明确的优势，在冷铷原子样品中基于里德堡EIT-AT分裂效应，通过测量光谱频率间隔直接得出微波电场的极化^[59]。EIT-AT分裂间隔与微波极化的关系如图30所示，里德堡EIT-AT分裂间隔随微波电场极化方向的改变呈现单调变化，并与微波电场极化在探测光偏振方向上的投影成正比，微波电场极化分辨力为 3.2° 。相较传统的在热原子蒸汽池中利用EIT共振处探测光透过率变化进行微波极化测量方法，基于冷原子的EIT-AT分裂间距测量微波极化的方法具有更为直接、准确和分析简单等优点，对微波极化的绝对测量和电场强度校准具有重要意义。

王昱寒等人在文献[58]的基础上，从理论和

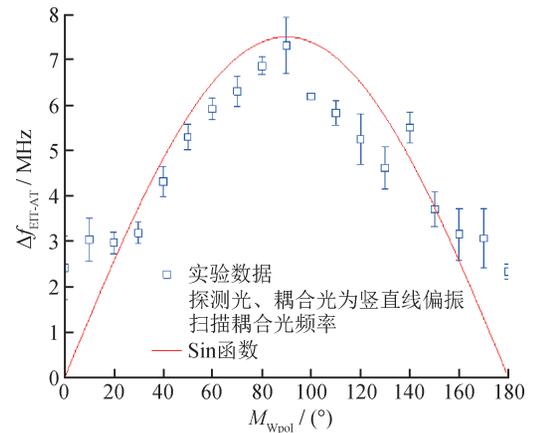


图30 EIT-AT分裂间隔与微波极化的关系图^[59]

Fig.30 Relationship between EIT-AT splitting interval and microwave polarization^[59]

实验上进一步证明了基于里德堡原子混频器可以精确地测量微波电场极化方向^[60]。混频器测量微波极化的实验装置如图31所示，780 nm的激光(探

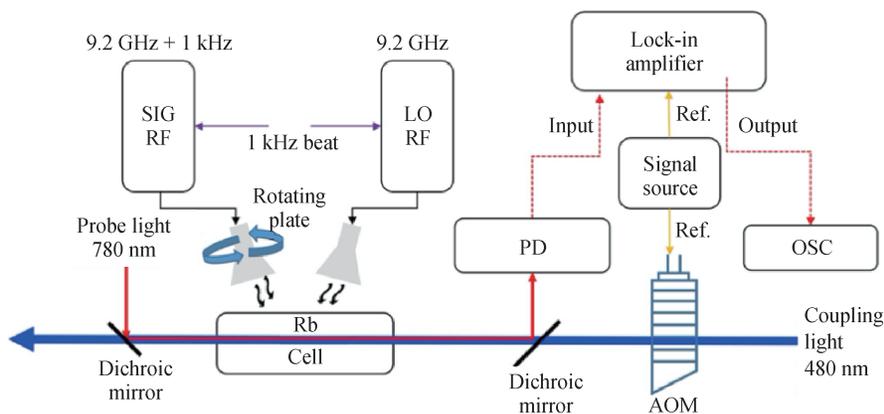


图31 混频器测量微波极化的实验装置^[60]

Fig.31 Experimental setup for measuring microwave polarization using a mixer^[60]

测光)和480 nm的激光(耦合光)在铷原子蒸汽池中相向重合传播,形成里德堡原子的EIT,施加微波电场后会产生EIT-AT分裂,通过测量探测光在EIT共振位置的透过率即可推导得出微波电场强度^[56]。信号微波与另一个频率相近的局域微波分别通过两个微波天线辐射到铷原子蒸汽池上,在铷原子蒸汽池中实现干涉。干涉的拍频信号通过里德堡原子微波电场传感器测量,即通过测量探测光强随时间的周期性正弦变化,得到两个微波干涉的拍频信号。实验中,将局域微波电场的矩形喇叭天线固定,即保证局域微波电场的极化方向不变,然后将信号微波电场的矩形喇叭天线固定在一个电动旋转台上,该电动旋转台可以在360°范围内旋转(步进间隔可达0.01°),连续改变信号微波电场线极化方向。探测光信号由光电探测器接收,经锁相放大器放大,最后展示在示波器上。

首先,利用电动旋转台每隔5°(或10°)改变信号微波电场的极化方向,在示波器上读取相应的拍频信号的振幅,得出拍频信号的振幅与信号微波电场极化方向的关系;然后,在实验结果比较好的线性区域每隔2°改变信号微波电场极化方向,测试微波极化偏振的分辨力;最后,连续旋转信号微波电场的喇叭改变微波极化方向,观察拍频信号随极化角度的变化。利用混频器测量微波极化的结果如图32所示,拍频振幅在180°周期内随微波电场的极化而变化,并且在线性区域中,可以较容易地获得优于0.5°极化分辨力,达到了文

献[54]报道的通过里德堡原子传感器测量微波极化的最佳水平。相较文献[54]的方法,基于里德堡原子混频器测量微波极化的方法不受形成里德堡EIT的光场偏振的影响,极大简化了使用里德堡原子测量微波极化所需的理论分析和实验系统,对于促进微波传感技术发展具有重要意义。

5 冷/热原子的特点和优势

目前里德堡原子微波电场传感器主要基于两种原子样品:①蒸汽池中的热原子;②激光冷却的冷原子。使用蒸汽池中的热原子具有以下优点:①装置尺寸较小;②光路相对简单;③原子系统的稳定性相对容易控制。但也存在以下缺点:①多普勒展宽较大,EIT线宽较宽;②EIT-AT分裂的线性区间下限较大;③测量结果对各光场强度的依赖性较大。使用激光冷却的冷原子具有以下优点:①多普勒展宽较小,EIT线宽较窄;②EIT-AT分裂的线性区间下限较小;③EIT-AT分裂对各光场强度等参数的依赖性相对较小。但也存在以下缺点:①激光冷却原子的光路复杂;②需要使用复杂的真空装置和梯度磁场;③制备冷原子需要消耗一定时间,实验周期受限。

由于多普勒展宽不同,使用冷/热原子时扫描频率选择存在不同。周飞等人从理论和实验两方面详细研究了冷原子系统中利用里德堡原子EIT-AT分裂测量微波电场强度时,扫描探测光频率和扫描耦合光频率两种获取光谱的方式对测量结果的影响^[31]。结果显示:扫描探测光频率时,EIT-AT分裂的间距随着微波电场强度的增大而增大,并且EIT谱峰的高度也会降低,当微波电场强度大到EIT-AT分裂间距超过里德堡中间态的自然线宽时,无法观测到EIT-AT分裂,即能够测量的微波强度上限受到冷原子吸收峰宽度的限制,同时测量微波电场强度的下限受到EIT线宽的限制;扫描耦合光频率时,EIT-AT分裂的间距随着微波电场强度的增大而增大,并且EIT谱峰的高度不会明显下降,一直保持着很高的信噪比,当微波电场强度大到EIT-AT分裂间距超过里德堡中间态的自然线宽时,也能很好地观测到EIT-AT分裂,即测量上限不受冷原子吸收峰宽度的限制,仅受耦合光本身能够扫描的频率范围限制,在实验能够扫描

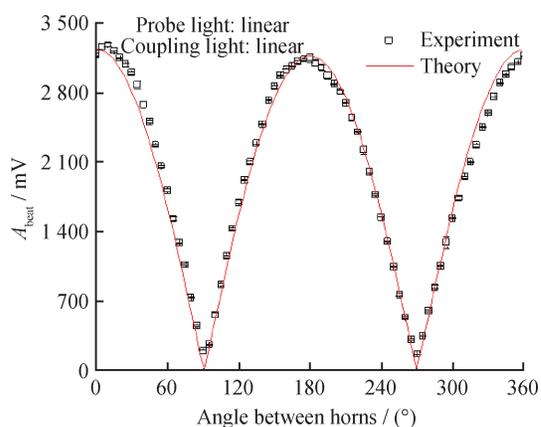


图32 利用混频器测量微波极化的结果^[60]

Fig.32 Results of microwave polarization measured using a mixer^[60]

到的耦合光频率范围内,能够测量的最大微波电场强度为 $21.6 \text{ mV}\cdot\text{cm}^{-1}$, 相较同样条件下扫描探测光频率能测量的上限 $6.8 \text{ mV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 提高了约3倍。当扫描探测光频率时,只有扫描到吸收峰频率范围内时,探测光透过率才会有变化,此时才能够观察到EIT;当扫描耦合光频率时,探测光一直被吸收,因此只要耦合光与微波缀饰后的里德堡能级共振发生EIT,探测光透过率就会发生变化,光谱上就会呈现出EIT-AT分裂现象。利用扫描耦合光频率提高光谱读取信噪比后,利用EIT共振处透过率变化可表征的最小微波电场强度为 $1.4 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。该实验表明,相同微波电场强度造成的EIT-AT分裂在误差范围内基本相同,这证实了冷原子对探测光和耦合光的抖动不敏感。上述研究结果体现了里德堡冷原子作为样品测量微波电场的优势。

热原子实验无原子样品制备这一步骤,因为玻璃气室中的原子密度已符合实验要求。但冷原子实验不同,在超高真空装置中,背景原子密度不足,需要使用激光冷却原子。在传统的冷原子实验中,磁光阱通常需要加载几秒才能达到饱和原子数,这对于提高灵敏度不利。在关闭磁光阱后进行一次EIT光谱测量需要 10 ms , 由于磁光阱温度较低,冷原子云在关闭后的超高真空中逐渐扩散。在文献[31]报道的实验中,冷原子云完全扩散的时间接近 1 s , 基于此现象,该课题组改进了实验过程,首先加载磁光阱几秒,之后关闭磁光阱并在 10 ms 内测量里德堡EIT光谱,然后立即打开磁光阱的冷却光和磁场,可在 200 ms 内使磁光阱再次饱和,并将每个EIT测量时间减少为约 0.2 s 。

6 总结与展望

里德堡原子微波电场传感技术正处于高速发展阶段,其在微波通讯、无损检测等领域具有重要应用价值,实现全信息的同时测量是里德堡原子微波电场传感器领域的重要研究方向。本文介绍了基于里德堡原子的微波电场强度、相位、极化、频率等信息测量的原理和技术特点,论述了基于里德堡原子的微波全信息测量技术的研究进展,并分析了提升测量精度和灵敏度的方法。下面对该领域未来的发展方向进行展望。

1) 热/冷原子两种技术路线展望

热原子具有较大的多普勒展宽,导致光子散粒噪声投影的灵敏度较差,同时热原子高速穿梭EIT光束,引起的渡越噪声会降低灵敏度。但热原子具有样品简单、系统可高度集成化等优势,基于里德堡热原子的微波全信息测量技术在工程应用领域将受到重点关注。基于热原子样品的超外差法已取得重要进展,测量灵敏度方面有新突破^[61-63],同时研究人员提出了腔增强^[64]、主动拉曼增强^[65]、集体拉比分裂^[66]、双EIT方案^[67]、光栅增强^[68]等值得尝试的理论方案。冷原子制备系统复杂,同时原子样品附近的线圈等金属器件容易改变微波传输状态,不易于工程实现。但冷原子具有温度低、退相干时间长、涉及的量子态简单明确等优势,更有利于实现超高灵敏度测量。基于里德堡冷原子的微波全信息测量技术在物理机制等基础研究领域具有较大应用潜力。

2) 拓展测量频率

频率低于 1 GHz 的微波在卫星通讯等领域中具有重要应用价值,基于里德堡原子测量频率低于 1 GHz 的微波将受到科研人员的重点关注。可选择主量子数 n 很高的态实现频率低于 1 GHz 的微波测量,但该方案存在两个问题:①随着主量子数 n 的增大,耦合光的强度也需要增大;②主量子数 n 增大后,里德堡原子尺寸变大,碰撞效应以及偶极阻塞效应对测量的影响增大。解决上述问题的一个有效方案是利用低 n 高轨道角动量 l 的里德堡态能级跃迁对频率低于 1 GHz 的微波进行测量^[69-70]。基于里德堡原子测量频率为太赫兹波段的微波也是未来的重要发展方向之一^[71-73],基于里德堡原子的太赫兹成像技术^[74]在生物成像、安全检测等领域将发挥关键作用。

3) 相位测量技术发展

目前基于里德堡原子混频器测量微波相位时,需要使用外部的局域微波场,如何将这个局域场耦合到原子内部以进一步提高测量精度受到研究者的重点关注。文献[55, 75]针对该问题进行了研究,利用电光调制晶体调制耦合光的频率,通过调制激光束向原子提供相位参考,在没有外部局域场的情况下实现了微波相位高精度测量。未来利用原子天然的调制解调特性,预期可以开

发出更精确的相位测量方案。

4) 开拓里德堡原子其他特性以提高里德堡原子微波电场传感器性能

目前里德堡原子微波电场传感器主要利用单个孤立的里德堡原子对外场敏感的特性。具有强电偶极矩的里德堡原子之间的相互作用范围很大,是研究多体问题的理想平台之一。里德堡原子系综具有以下应用潜力:①可用于模拟研究强关联系统以及相变,强关联系统在临界点附近对外界扰动更加敏感,可以提高德堡原子微波电场传感器性能,文献[20]已经报道了开拓性工作;②可用于探索相干驱动、耗散和长程偶极-偶极相互作用产生的非平衡多体现象,文献[76]通过实验证明了室温里德堡原子系综中的耗散时间晶体对时间噪声扰动具有鲁棒性,能够抵抗噪声,提高精密测量的灵敏度。

5) 结合各种新型光场以提高里德堡原子微波电场传感器性能

光与物质的相互作用依赖于光场内在性质,噪声起伏低于标准量子极限的压缩态光场已应用于引力波测量等领域,并可提高测量精度。具有空间分布结构的光场、具有可任意设计的波前和偏振态分布的矢量光场拓展了光场调节自由度,并已应用于其它领域的精密测量。利用压缩态光场、空间结构光场和矢量光场等新型光场有望进一步提高里德堡原子微波电场传感器的灵敏度。

参考文献

- [1] DEGEN C L, REINHARD F, CAPPELLARO P, et al. Quantum sensing [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(3).
- [2] SEDLACEK J, 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.
- [3] CAI Y F, SHI S, ZHOU Y J, et al. A multi-band atomic candle with microwave-dressed Rydberg atoms [J]. *Frontiers of Physics*, 2023, 18(1).
- [4] WANG G Q, LIU Y X, SCHLOSS J M, et al. Sensing of arbitrary - frequency fields using a quantum mixer [J]. *Physical Review X*, 2022, 12(2).
- [5] FAN H Q, 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).
- [6] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, GORDON J A, et al. Atom-based RF electric field metrology: from self-calibrated measurements to subwavelength and near-field imaging [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(2): 717-728.
- [7] FLEISCHHAUER M, IMAMOGLU A, MARANGOS J P, et al. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 633-673.
- [8] GLIMPSE A A, SIMONS M T, PREJAPATI N, et al. Modern RF measurements with hot atoms: a technology review of Rydberg atom-based radio frequency field sensors [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2022, 23(5): 44-56.
- [9] YUAN J P, YANG W G, JING M Y, et al. Quantum sensing of microwave electric fields based on Rydberg atoms [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2023, 86(10).
- [10] LIU B, ZHANG L H, LIU Z K, et al. Electric field measurement and application based on Rydberg atoms [J]. *Electromagnetic Science*, 2023, 1(2).
- [11] HUANG W, LIANG Z T, DU Y X, et al. Rydberg-atom-based electrometry [J]. *Acta Physica Sinica Chinese Edition*, 2015, 64(16).
- [12] JIAO Y C, ZHAO J M, JIA S T. Broadband Rydberg atom-based radio-frequency field sensor [J]. *Acta Physica Sinica Chinese Edition*, 2018, 67(7).
- [13] 廖开宇, 涂海涛, 张新定, 等. 基于里德堡原子的微波传感与通信 [J]. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 2021, 51(7): 3-16.
- [14] LIAO K Y, TU H T, ZHANG X D, et al. Rydberg atom based microwave sensing and communication [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2021, 51(7): 3-16. (in Chinese)
- [15] 白金海, 胡栋, 贡昊, 等. 里德堡原子微波电场测量 [J]. *计测技术*, 2021, 41(1): 1-9.
- [16] BAI J H, HU D, GONG H, et al. Rydberg-atoms-based microwave electric field sensing [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41(1): 1-9. (in Chinese)
- [17] 郝赫, 寇军, 洪玄森, 等. 基于里德堡原子的无线电波测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(11): 120-126.
- [18] HAO H, KOU J, HONG X M, et al. Radio frequency electric field measurement with Rydberg atoms [J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2023, 60(11): 120-126. (in Chinese)

- [16] 张临杰, 景明勇, 张好. 基于里德堡原子的微波电场量子传感[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2022(3): 712-722.
ZHANG L J, JING M Y, ZHANG H. Quantum sensing of microwave electric fields based on Rydberg atoms [J]. Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.), 2022(3): 712-722. (in Chinese)
- [17] TONG Y J, YAN H M, JING M Y, et al. Precision measurement of electric fields based on Rydberg atoms [J]. Navigation and Control, 2023, 21(5/6): 163.
- [18] 陈雪花, 丛楠, 罗文浩, 等. 基于里德堡原子的电场传感技术[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 83-94.
CHEN X H, CONG N, LUO W H, et al. Electric field sensing technology based on Rydberg atoms [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 83-94. (in Chinese)
- [19] JING M Y, HU Y, MA J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. Nature Physics, 2020, 16(9): 911-915.
- [20] DING D S, LIU Z K, SHI B S, et al. Enhanced metrology at the critical point of a many-body Rydberg atomic system [J]. Nature Physics, 2022, 18(12): 1447-1452.
- [21] SIMONS M T, GORDON J A, HOLLOWAY C L, et al. Using frequency detuning to improve the sensitivity of electric field measurements via electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting in Rydberg atoms [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(17).
- [22] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, GORDON J A, et al. Electric field metrology for SI traceability: systematic measurement uncertainties in electromagnetically induced transparency in atomic vapor[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(23).
- [23] ZHOU F, JIA F D, MEI J, et al. The effect of the Doppler mismatch in microwave electrometry using Rydberg electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2022, 55(7).
- [24] PRAJAPATI N, BHUSAL N, ROTUNNO A P, et al. Sensitivity comparison of two-photon vs three-photon Rydberg electrometry [J]. Journal of Applied Physics, 2023, 134(2).
- [25] JIA F D, LIU X B, MEI J, et al. Span shift and extension of quantum microwave electrometry with Rydberg atoms dressed by an auxiliary microwave field[J]. Physical Review A, 2021, 103(6).
- [26] YUAN J P, JIN T, WANG L R, et al. Improvement of microwave electric field measurement sensitivity via dual-microwave-dressed electromagnetically induced transparency in Rydberg atoms [J]. Laser Physics Letters, 2022, 19(12).
- [27] LIU X B, JIA F D, ZHANG H Y, et al. Using amplitude modulation of the microwave field to improve the sensitivity of Rydberg-atom based microwave electrometry [J]. AIP Advances, 2021, 11(8).
- [28] LI X H, CUI Y, HAO J H, et al. Magnetic-field-induced splitting of Rydberg Electromagnetically induced transparency and Autler-Townes spectra in ^{87}Rb vapor cell[J]. Optics Express, 2023, 31(23): 38165-38178.
- [29] LIAO K Y, TU H T, YANG S Z, et al. Microwave electrometry via electromagnetically induced absorption in cold Rydberg atoms [J]. Physical Review A, 2020, 101(5).
- [30] ZHOU F, JIA F D, LIU X B, et al. Improving the spectral resolution and measurement range of quantum microwave electrometry by cold Rydberg atoms [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2023, 56(2).
- [31] ZHOU F, JIA F D, LIU X B, et al. Measurement of microwave electric field based on electromagnetically induced transparency by using cold Rydberg atoms [J]. Acta Physica Sinica Chinese Edition, 2023, 72(4).
- [32] RIPKA F, LUI C, SCHMIDT M, et al. Rydberg atom-based radio frequency electrometry: hyperfine effects[J]. Proc. SPIE, 2022.
- [33] JIA F D, ZHANG J, ZHANG L, et al. Frequency stabilization method for transition to a Rydberg state using Zeeman modulation [J]. Applied Optics, 2020, 59(7): 2108-2113.
- [34] FAN H Q, KÜBLER H, SHAFFER J P, et al. Dispersive radio frequency electrometry using Rydberg atoms in a prism-shaped atomic vapor cell[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2016, 49(10).
- [35] KUMAR S, FAN H Q, KÜBLER H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout[J]. Scientific Reports, 2017, 7.
- [36] 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.
- [37] WU S C, GONG C, NI R, et al. Atomic superheterodyne

- receiver sensitivity estimation based on homodyne readout [J]. arXiv Preprint arXiv, 2023.
- [38] TU H T, LIAO K Y, HE G D, et al. Approaching the standard quantum limit of a Rydberg-atom microwave electrometer[J]. arXiv Preprint arXiv, 2023.
- [39] MEYER D H, KUNZ P D, COX K C, et al. Waveguide-coupled Rydberg spectrum analyzer from 0 to 20 GHz[J]. Physical Review Applied, 2021, 15(1).
- [40] KNARR S H, BUCKLEW V G, LANGSTON J, et al. Spatiotemporal multiplexed Rydberg receiver [J]. IEEE Transactions on Quantum Engineering, 2023, 4: 1–8.
- [41] HORSLEY A, TREUTLEIN P. Frequency-tunable microwave field detection in an atomic vapor cell[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(21).
- [42] OUYANG K, SHI Y S, LEI M W, et al. Continuous broadband microwave electric field measurement in Rydberg atoms based on the DC Stark effect [J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(26).
- [43] SHI Y S, LI C, OUYANG K, et al. Tunable frequency of a microwave mixed receiver based on Rydberg atoms under the Zeeman effect [J]. Optics Express, 2023, 31(22): 36255–36262.
- [44] SIMONS M T, ARTUSIO-GLIMPSE A B, HOLLOWAY C L, et al. Continuous radio-frequency electric-field detection through adjacent Rydberg resonance tuning [J]. Physical Review A, 2021, 104(3).
- [45] LIU X H, LIAO K Y, ZHANG Z X, et al. Continuous-frequency microwave heterodyne detection in an atomic vapor cell[J]. Physical Review Applied, 2022, 18(5).
- [46] CUI Y, JIA F D, HAO J H, et al. Extending bandwidth sensitivity of Rydberg-atom-based microwave electrometry using an auxiliary microwave field [J]. Physical Review A, 2023, 107(4).
- [47] BERWEGGER S, PRAJAPATI N, ARTUSIO-GLIMPSE A B, et al. Rydberg-state engineering: investigations of tuning schemes for continuous frequency sensing [J]. Physical Review Applied, 2023, 19(4).
- [48] 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).
- [49] CALERO V, FERNÁNDEZ-MATEO H, MORGAN H, et al. Stationary electro-osmotic flow driven by AC fields around insulators [J]. Physical Review Applied, 2021, 15(1).
- [50] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, GORDON J A, et al. Detecting and receiving phase-modulated signals with a Rydberg atom-based receiver [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(9): 1853–1857.
- [51] GORDON J A, SIMONS M T, HADDAB A H, et al. Weak electric-field detection with sub-1 Hz resolution at radio frequencies using a Rydberg atom-based mixer [J]. AIP Advances, 2019, 9(4).
- [52] JIA F D, ZHANG H Y, LIU X B, et al. Transfer phase of microwave to beat amplitude in a Rydberg atom-based mixer by Zeeman modulation [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2021, 54(16).
- [53] LIU X B, JIA F D, ZHANG H Y, et al. An all-optical phase detector by amplitude modulation of the local field in a Rydberg atom-based mixer [J]. Chinese Physics B, 2022, 31(9).
- [54] LIANG Z, GENG X X, YANG G Q, et al. Atomic mixer based on phase control without ac Zeeman shift [J]. Physical Review A, 2023, 107(1).
- [55] ANDERSON D A, SAPIRO R E, GONCALVES L F, et al. Optical radio-frequency phase measurement with an internal-state Rydberg atom interferometer [J]. Physical Review Applied, 2022, 17(4).
- [56] CAI Y F, SHI S, ZHOU Y J, et al. High-sensitivity Rydberg-atom-based phase-modulation receiver for frequency-division-multiplexing communication [J]. Physical Review Applied, 2023, 19(4).
- [57] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KUBLER H, et al. Atom-based vector microwave electrometry using rubidium Rydberg atoms in a vapor cell [J]. Physical Review Letters, 2013, 111(6).
- [58] SIMONS M T, HADDAB A H, GORDON J A, et al. Embedding a Rydberg atom-based sensor into an antenna for phase and amplitude detection of radio-frequency fields and modulated signals [J]. IEEE Access, 2019, 7: 164975–164985.
- [59] 刘修彬, 贾凤东, 周飞, 等. 基于冷里德堡原子电磁感应透明和 Autler-Townes 分裂的原子矢量微波电场计 [J]. 宇航计测技术, 2023, 43(3): 5–10.
- LIU X B, JIA F D, ZHOU F, et al. Atom-based vector microwave electrometry via electromagnetic induction transparency and Autler-Townes splitting in cold Rydberg atoms [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2023, 43(3): 5–10. (in Chinese)
- [60] WANG Y H, JIA F D, HAO J H, et al. Precise measure-

- ment of microwave polarization using a Rydberg atom-based mixer[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 10449–10457.
- [61] CAI M H, XU Z S, YOU S H, et al. Sensitivity improvement and determination of Rydberg atom-based microwave sensor[J]. *Photonics*, 2022, 9(4).
- [62] CAI M H, YOU S H, ZHANG S S, et al. Sensitivity extension of atom-based amplitude-modulation microwave electrometry via high Rydberg states[J]. *Applied Physics Letter*, 2023, 122(16).
- [63] WANG Q X, WANG Z H, LIU Y X, et al. Cavity-enhanced optical bistability of Rydberg atoms[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 2865–2868.
- [64] PENG Y, WANG J L, JIA Z M, et al. Cavity-enhanced microwave electric field measurement using Rydberg atoms[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(9): 2272–2277.
- [65] YANG A H, PENG Y D, ZHOU W P, et al. Microwave electric-field measurement with active Raman gain[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(8): 2134–2139.
- [66] YANG A H, ZHOU W P, ZHAO S C, et al. Enhanced measurement of microwave electric fields with collective Rabi splitting[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(6): 1664–1669.
- [67] HAN M, HAO H, SONG X, et al. Microwave electrometry with bichromatic electromagnetically induced transparency in Rydberg atoms[J]. *EPJ Quantum Technology*, 2023.
- [68] ZHAO S F, YIN Z, SONG X, et al. Enhanced microwave metrology using an optical grating in Rydberg atoms[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(14): 3747–3752.
- [69] ROTUNNO A P, BERWEGER S, PRAJAPATI N, et al. Detection of 3 ~ 300 MHz electric fields using Floquet sideband gaps by "Rabi matching" dressed Rydberg atoms[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134(13).
- [70] NIKUNJKUMAR P, JAKOB W K, ALEXANDRA B A, et al. High angular momentum coupling for enhanced Rydberg-atom sensing in the VHF band[J]. *arXiv Preprint arXiv*, 2023.
- [71] CHEN S Y, REED D J, MACKELLAR A R, et al. Terahertz electrometry via infrared spectroscopy of atomic vapor[J]. *Optica*, 2022, 9(5): 485–491.
- [72] 陈志文, 余圳跃, 廖开宇, 等. 基于 Rydberg 原子天线的太赫兹测量[J]. *物理学报*, 2021, 70(6): 33–43.
CHEN Z W, SHE Z Y, LIAO K Y, et al. Terahertz measurement based on Rydberg atomic antenna[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(6): 33–43. (in Chinese)
- [73] LIN Y Y, SHE Z Y, CHEN Z W, et al. Terahertz receiver based on room-temperature Rydberg-atoms[J]. *Fundamental Research*, 2023.
- [74] LUCY A D, LARA T C, KEVIN J W. A practical guide to terahertz imaging using thermal atomic vapour[J]. *New Journal of Physics*, 2023, 25.
- [75] BERWEGER S, ARTUSIO-GLIMPSE A B, ROTUNNO A P, et al. Closed-loop quantum interferometry for phase-resolved Rydberg-atom field sensing[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 20(5).
- [76] WU X L, WANG Z Q, YANG F, et al. Observation of a dissipative time crystal in a strongly interacting Rydberg gas[J]. *arXiv Preprint arXiv*, 2023.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 贾凤东(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为冷原子物理、超冷等离子体、低能离子-原子碰撞和微波电场量子基准测量。



通讯作者: 钟志萍(1970—), 女, 教授, 博士, 主要从事原子分子和光物理研究, 包括原子分子结构和动力学过程的理论和实验研究, 以及冷原子物理和量子信息中原子分子物理问题的实验研究。