

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.04.06

基于里德堡原子的电场传感技术

陈雪花^{1,2,3}, 丛楠¹, 罗文浩¹, 张笑楠¹, 王彦华¹, 魏小刚¹, 杨仁福^{1*}

(1.北京量子信息科学研究院, 北京 100193;

2.中国科学院物理研究所, 北京 100190; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 概述了基于里德堡原子的电场传感技术的基本原理, 分析了里德堡原子电场测量具有的高灵敏度、宽频、可溯源至国际单位制(International System of Units, SI)、高空间分辨力等优势。讨论了激光参数、探测器噪声、环境电磁场干扰等因素对里德堡原子场强测量灵敏度与测量频率响应带宽的影响, 介绍了频率调制、重泵浦、参数优化等提高场强测量灵敏度的方式, 并阐述了单辅助场原子外差法、双辅助五能级外差法等提升测量频率响应带宽的方法。探讨了里德堡原子电场传感技术在计量、通信、雷达、成像等方面的应用情况, 指出应通过优化原子气室结构、设计高性能光电探测器、提升光学腔性能等方式进一步提高里德堡原子电场测量灵敏度; 应深入研究里德堡原子电场测量的不确定度来源, 并对里德堡原子传感器进行全面的测试和表征; 应开展里德堡原子电场测量相关装置的小型化、工程化设计研究, 从而进一步提升里德堡原子电场测量技术的实际应用性能。

关键词: 里德堡原子; 电场测量; 电磁诱导透明; 量子传感

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)04-0083-12

Electric field sensing technology based on Rydberg atoms

CHEN Xuehua^{1,2,3}, CONG Nan¹, LUO Wenhao¹, ZHANG Xiaonan¹,WANG Yanhua¹, WEI Xiaogang¹, YANG Renfu^{1*}

(1.Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China;

2.Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This article summarizes the basic principles of electric field sensing technology based on Rydberg atoms, and analyzes the advantages of Rydberg atomic electric field measurement, such as high sensitivity, broadband, traceability to the International System of Units (SI), and high spatial resolution. The effects of laser parameters, detector noise, environmental electromagnetic interference, and other factors on the sensitivity and frequency response bandwidth of Rydberg atomic field strength measurement were discussed. Methods to improve the sensitivity of field strength measurement, such as frequency modulation, re pumping, and parameter optimization, were introduced, and methods to enhance the frequency response bandwidth of measurement, such as single auxiliary field atomic heterodyne method and double auxiliary five level heterodyne method, were elaborated. Explored the application of Rydberg atomic electric field sensing technology.

收稿日期: 2023-01-07; **修回日期:** 2023-02-16

基金项目: 国家博新计划支持项目(Y20PJ2022005);北京市博士后基金项目(Y21PJ2122026);博士后面上基金项目(Y21PJ2122047)

引用格式: 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.

Citation: 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.



ogy in metrology, communication, radar, imaging, and other fields, and pointed out that the sensitivity of Rydberg atomic electric field measurement should be further improved by optimizing the atomic gas chamber structure, designing high-performance photodetectors, and improving the performance of optical cavities; We should conduct in-depth research on the sources of uncertainty in the measurement of the Rydberg atomic electric field, and conduct comprehensive testing and characterization of the Rydberg atomic sensor; The miniaturization and engineering design research of the Rydberg atomic electric field measurement related devices should be carried out to further improve the practical application performance of the Rydberg atomic electric field measurement technology.

Key words: Rydberg atom; electric field measurement; electromagnetically induced transparency; quantum sensing

0 引言

自1888年Hertz首次发明经典天线至今^[1], 偶极天线仍是电场测量的主要手段, 虽然天线测量系统在不断优化进步, 但仍存在以下局限性^[2]: ①需要多探测器相互比对校准, 无法实现自校准; ②受天线几何尺寸限制, 难以实现高灵敏度、高分辨力测量; ③被测电场受探测器中的金属干扰, 测量不确定度较大; ④探测器只能探测到最低 $100 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的场强, 测量极弱微电场较困难; ⑤单个探测器带宽有限, 无法直接进行宽频探测; ⑥溯源链比较复杂, 难以实现绝对测量。与传统电场测量方法相比, 基于里德堡原子的电场传感可以在更宽的频率范围内调谐, 而不需要改变硬件系统^[3]; 里德堡原子电场传感探头一般由玻璃制成, 其材料损耗更低^[4]; 可直接溯源至国际单位制, 且具有高灵敏度、高精度、高空间分辨力等优势^[5]。

自2008年A. K. Mohapatra等人^[6]发现基于电磁诱导透明(Electromagnetic Induced Transparency, EIT)效应的里德堡原子可以高灵敏感知外界电磁场后, 鉴于其显而易见的军事与民用领域潜在应用前景, 最近十几年, 众多研究机构和科研团队对里德堡原子的量子传感电磁感知技术进行了大量研究。2010年, Abi-Salloum等人^[7]首次通过耦合里德堡能级的方式, 解释了量子相干效应, 并观测到基于里德堡原子EIT的Autler-Townes(简称A-T)分裂现象。2012年, 美国俄克拉荷马大学研究组^[8]利用里德堡原子EIT-AT分裂光谱技术, 实现了 $30 \text{ } \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 场强测量灵敏度与 $8 \text{ } \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的最小可测量电场强度, 该灵敏度相较传统电场计的灵敏度高了近两个数量级, 这也是第一个真正意义上在热原子蒸汽池中实现的基于里德堡原子

的电场测量实验。自此, 采用里德堡原子蒸汽池作为射频、微波、毫米波和太赫兹电场的量子电场测量与传感得到了极速发展。

本文针对蒸汽池中热里德堡原子电场传感技术进行系统性综述, 详细分析里德堡原子电场测量的基本原理, 重点讨论提升场强测量灵敏度和测量频率响应带宽的方法, 具体介绍基于里德堡原子的电场传感在计量、通信、雷达、成像等领域中的应用, 并对基于里德堡原子的电场传感技术的未来发展前景进行展望。

1 测量原理

基于里德堡原子的电场传感是通过高主量子数($n > 20$)里德堡原子的临近量子态电偶极跃迁实现测量的, 原子极化率正比于 n^7 , 相互作用强度正比于 n^4 , 光谱线宽反比于 n^3 ^[9]。高极化率和近连续的能级间隔允许直流^[10]到太赫兹^[11]频率的电场耦合。基于里德堡原子的电场传感不仅能实现动态范围从 $\text{nV} \cdot \text{m}^{-1}$ 量级至 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 量级的场强测量, 还能检测电场的频率、相位以及极化。

1.1 场强测量

典型的里德堡原子电场测量采用的能级系统和实验装置如图1所示, 以铯原子(Cs)的四能级阶梯型为例, 探测光频率与 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F=5)$ 的能级共振, 调节耦合光 509 nm 在能级 $6P_{3/2}(F=5) \rightarrow 66S_{1/2}$ 共振频率附近扫描, 探测光与耦合光在Cs原子气室中相向传播。

当 852 nm 探测光与 509 nm 耦合光双光子共振时, 可得到里德堡三能级阶梯型EIT光谱。由喇叭产生的微波电场与 $66S_{1/2} \rightarrow 66P_{3/2}$ 的能级共振, 并与气室内的Cs原子相互作用。当电场功率为 -28 dBm 时, 可得到里德堡四能级阶梯型EIT光谱, 如图2

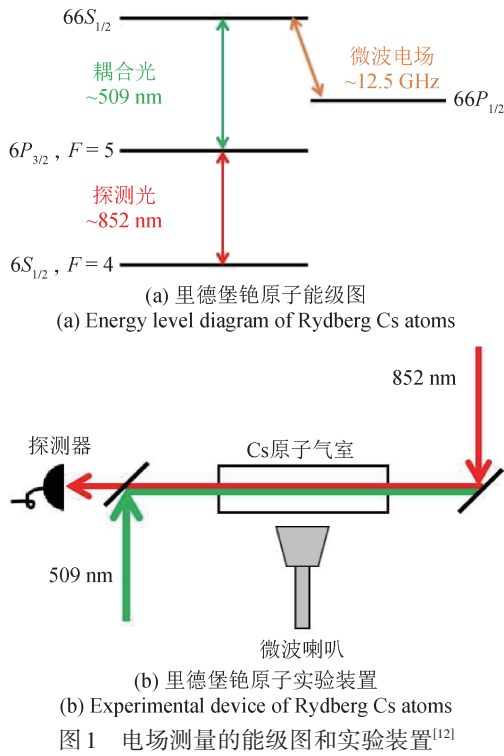


Fig.1 Energy level diagram and experimental device for electric field measurement^[12]

中的黑色曲线所示，其半高全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)约为5 MHz；电场功率增大到10 dBm时，EIT峰值减小，其FWHM因功率展宽而变宽，实验结果如图2红色曲线所示。

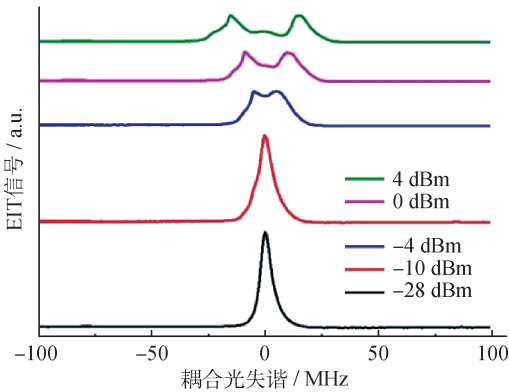


Fig.2 EIT signals under different microwave electric field power^[12]

随着电场功率的增加，主EIT峰分裂为两个峰(EIT-AT)，如图2蓝色、品红、绿色曲线所示。空间电场在原子气室中的不均匀分布和电场的矢量特性，导致在强场作用下，EIT-AT光谱的形状发生畸变。两个EIT峰间距 Δf 与电场强度 $|E|$ 在扫描耦

合光时满足式(1)，扫描探测光时满足式(2)^[13]。

$$|E| = 2\pi \frac{\hbar}{\wp} \Delta f \quad (1)$$

$$|E| = 2\pi \frac{\hbar}{\wp} \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \Delta f \quad (2)$$

式中： $\wp$ 为电场耦合两个里德堡能级的跃迁偶极矩； λ_c 和 λ_p 分别为耦合光和探测光的波长，扫描探测光时，比值 λ_p/λ_c 被称为残余多普勒效应，扫描耦合激光频率时，不存在多普勒失配； $\hbar$ 为普朗克常数。测量EIT-AT分裂的 Δf 即可获得电场的强度^[14]。基于里德堡原子电场测量的不确定度如表1所示。

表1 基于里德堡原子电场测量的不确定度^[15-17]

Tab.1 Measurement uncertainty of electric field

based on Rydberg atoms^[15-17]

测量不确定度来源	测量不确定度 / %
AT分裂频率的测量	0.50
气室内电场扰动	0.50
频率标度的校准	0.06
跃迁偶极矩计算	0.10

1.2 频率与相位测量

外差或超外差法^[18-19]将待测电场信号与已知参考信号进行比较，可用于检测电场的强度、频率以及相位，实验装置如图3所示。

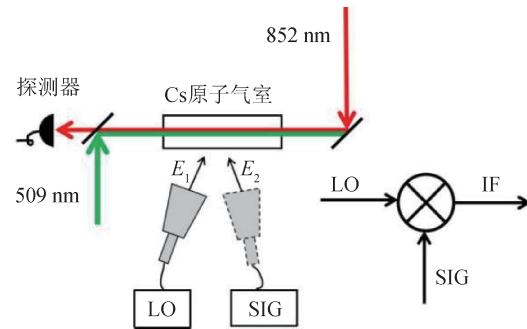


图3 外差法测量电场简化实验装置图^[18]

Fig.3 Simplified experimental setup for measuring electric field by heterodyne method^[18]

外差法测量电场时，铯原子既充当接收器，又充当混频器，输出本振场(Local Field, LO)和待测信号场(Signal Field, SIG)拍频后的中频(Intermediate Frequency, IF)信号正比于探测光透射谱为

$$T \propto |E_{\text{atoms}}| \approx E_{\text{LO}} + E_{\text{SIG}} \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \quad (3)$$

式中： E_{LO} 为本振场的场强， E_{SIG} 为信号场的场强，

$\Delta\omega$ 为信号场和本振场的频率差, $\Delta\phi$ 为信号场和本振场的相位差, E_{atoms} 为本振场和信号场混频后的中频信号场强, T 为探测光透射谱强度。

由式(3)可知, 待测信号场的强度、频率、相位信息可由中频信号反演得出。采用超外差可测量的最小电场强度为 $78 \text{ nV} \cdot \text{m}^{-1}$, 频率分辨力可以达到 mHz 量级, 相位测量结果如图4所示。从图4(a)可知, 实际测量获得的电场相位 ϕ_{out} 和设定的电场相位 ϕ_s 基本一致, 其相位分辨力约为 0.6° 。在图4(b)中, 待测信号场的相位以 1° 为偏差进行了方波调制, 并测量了 $1 \sim 5 \text{ s}$ 和 $6 \sim 10 \text{ s}$ (灰色区间) 的标准方差, 两段时间之前各等待了 1 s 以使得信号达到其最终值的 99% 。测量的标准方差给出的相位分辨力约为 0.8° [19]。

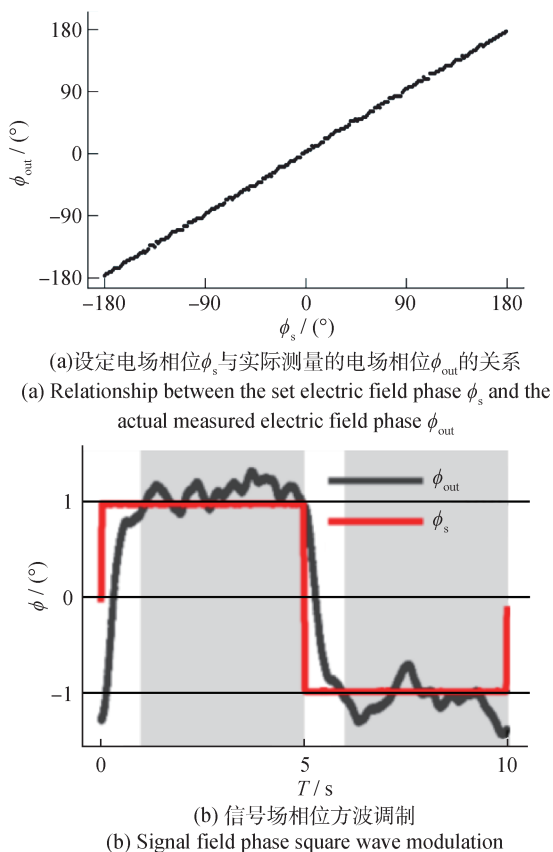


图4 基于原子外差测量系统的电场相位测量结果^[19]
Fig.4 Electric field phase measurement results based on atomic heterodyne measurement system^[19]

与外差或超外差相比, 全光相位法^[20-21]无需参考信号, 在铯里德堡原子 $\{6P_{3/2}, 90S_{1/2}, 91S_{1/2}, 90P_{3/2}\}$ 中构造原子干涉仪, 干涉仪对电场的相位和幅值比较敏感。全光相位法实验装置如图5(a)所

示。在全光电场相位传感方法中, 探测光(852 nm)与电光相位调制器(Electro-optic Modulator, EOM)的一阶边带提供频率间隔为 $2\omega_{\text{MW}}$, 一对耦合光(510 nm)反向传输, 移相器调节光学相位 ϕ_{opt} 或射频场相位 ϕ_{rf} , 以确定射频电场相位和幅值。

采用频率为 5 GHz 的射频场, 并对射频场相位进行调制时, 光学信号输出如图5(b)所示, 通过

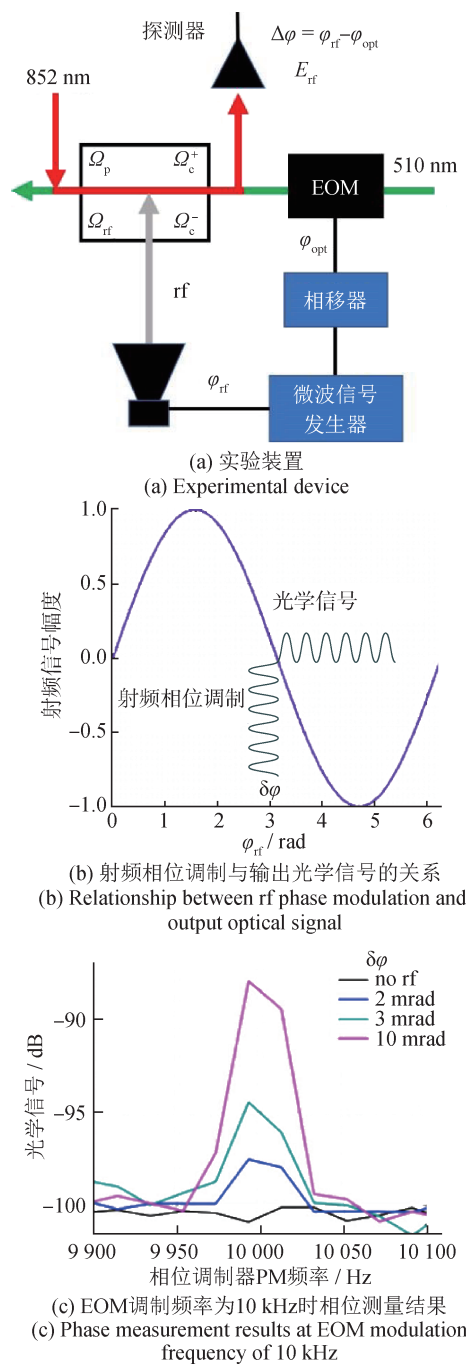


图5 全光相位法实验装置和相位测量结果^[21]
Fig.5 All optical phase method experimental device and phase measurement results^[21]

测量光学信号实现对射频场相位的测量。当光电相位调制器的调制频率为 10 kHz, 调制振幅为 $\delta\varphi$ 时, 相位测量结果如图 5(c) 所示。电场相位在 $0 \sim \pi$ 范围内, 相位分辨力达 2 mrad ($\approx 0.1^\circ$)。

1.3 极化测量

基于里德堡原子的电场传感量子光学读出的 EIT 光谱依赖于探测光、耦合光和电场的点积^[15, 22], 可用于电场极化方向测量。电场极化测量使用的能级结构如图 6(a) 所示, 电场的极化方向与耦合光和探测光偏振方向满足一定角度时, 电场才与对应能级的里德堡原子相互作用。

在相同电场强度下, 当探测光、耦合光偏振方向一致且固定不变时, 调节改变待测电场极化方向会使光谱线型发生变化, 可根据光谱的变化实现对电场极化方向的测量, 极化方向测量结果如图 6(b) 所示。其中, 黑色曲线为探测光和耦合光偏振方向与电场极化方向平行的探测光透射谱; 蓝色曲线为探测光和耦合光偏振方向与电场极化方向垂直的探测光透射谱; 红色曲线为探测光和耦合光偏振方向相对电场极化有 σ^+ 偏振的探测光透射谱。实验中, 将蒸汽池放置在极化选择天线内, 可降低因电场极化不均匀导致的谱线增宽, 采用该方法, 电场极化测量分辨力约为 0.5° 。

2 场强测量灵敏度与测量频率响应带宽

高场强测量灵敏度与测量频率响应带宽是体现里德堡原子电场传感器性能的重要指标。里德堡原子电场强度传感极限灵敏度理论上可以达到 $\text{pV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 量级。实际上, 受到激光参数、光谱展宽、探测器噪声、环境电磁场干扰等诸多因素影响, 目前实验灵敏度仅为 $\text{nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 量级, 如何进一步提升场强测量灵敏度已经成为研究热点之一。虽然单个里德堡原子电场传感装置能够响应非常宽的频率, 但原子跃迁的量子特性, 现有频率响应是不连续的, 特别在高频段, 可测量电场频率间隔在 GHz 量级, 因此研究如何实现连续频率弱电场测量尤为重要。

2.1 场强测量灵敏度

里德堡原子电场强度测量方法本质上是一种原子光谱测量方法, 测量的灵敏度最终受到原子散粒噪声的限制^[23-24], 其最小可测电场 $E_{\min}$ 为

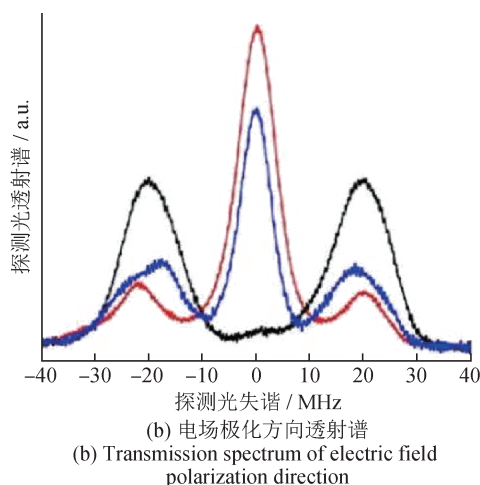
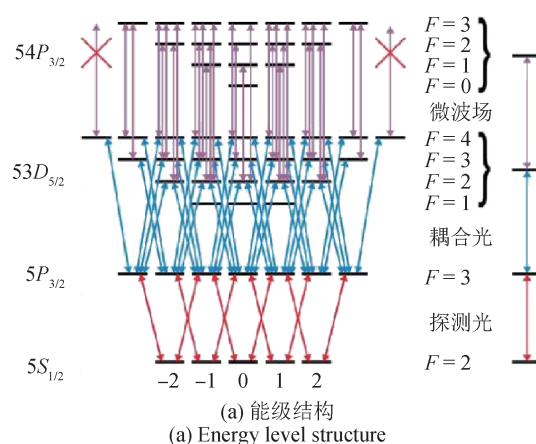


图6 能级结构和电场极化方向透射谱^[22]

Fig.6 Energy level structure and electric field polarization direction transmission spectrum^[22]

$$E_{\min} = 2\pi \frac{\hbar}{\wp \sqrt{N_{\text{at}} T_{\text{int}} T_2}} \quad (4)$$

式中: $\hbar$ 为普朗克常数, $\wp$ 为电偶极矩, N_{at} 为平均里德堡原子数, T_{int} 为总积分时间, T_2 为退相干时间。基于式(4), 选择 $\wp$ 较大的原子量子态耦合电场、选择 T_2 较长的原子量子态、增大 N_{at} 、延长 T_{int} 可实现高灵敏场强测量。

对于热原子, T_2 通常受原子渡越时间的限制。渡越时间是指原子离开光场截面所需的时间, 其值取决于原子蒸汽池的温度、原子蒸汽池气压以及光场截面尺寸^[25]。对于冷原子, 因为原子可以在光场截面内停留很长时间, 渡越时间展宽不再是主要的退相干机制, 退相干时间主要由里德堡原子量子态的寿命决定。原子蒸汽池材料和几何尺寸会影响退相干时间, 通过使用特殊内壁涂层材料的原子蒸汽池, 可以减小原子与蒸汽池内壁的碰撞导致的退相干效应^[26-30]。同时, 光子与

原子有效相互作用时间也会影响退相干时间,腔增强测量技术可有效延长光子与原子相互作用时间,提高场强测量灵敏度^[31]。

里德堡激发过程中,原子相互作用引起的激发阻塞效应决定了最终的 N_{at} ^[32]。通常,主量子数越大,阻塞半径越大,阻塞效应越明显。实际测量时,主要通过增加蒸汽池体积、提高蒸汽池温度的方式增加 N_{at} ,但增加蒸汽池体积不利于电场传感探头的小型化,提高蒸汽池温度会增加多普勒展宽。通过控制探测光和耦合光强度,也可以调控里德堡原子数,然而,高功率激光会导致功率展宽。同时,原子数量的增多会加快退相干,从而影响场强测量灵敏度。重泵浦的方式^[33]可以增加相互作用的原子数,提高EIT振幅,同时避免额外的多普勒或功率展宽。通过这种方法,在不增加峰值宽度的情况下,可将EIT振幅提高一倍。

此外,在达到原子散粒噪声极限之前,测量灵敏度主要受光子的散粒噪声限制。采用压缩光技术有利于降低光子散粒噪声,以提高场强测量灵敏度^[34]。光电探测器的参数也会影响场强测量灵敏度,通常采用高量子转换效率、低暗计数、低噪放的光电探测器或平衡探测器可在一定程度上降低光子读出噪声。在测量方法上,采用马赫-曾德尔干涉仪和平衡零拍测量技术,可降低光子读出噪声;采用外差或超外差、开环谐振器弱场探测技术可提高信号强度。在信号处理上,可采用基于深度学习的低信噪比信号提取算法^[35]。表2介绍了场强测量灵敏度研究的最新进展。

2.2 测量频率响应带宽

涉及里德堡原子的电场传感器带宽主要包括运行带宽、瞬时带宽、调节带宽^[38]。

运行带宽指原子电场传感器能够运行的整个频率范围。通过改变耦合光波长,使原子处于不同的里德堡能级以响应不同的电场频率可拓展原子电场传感器的运行带宽。这种方法简单直接,理论上里德堡原子电场传感器具有超宽运行带宽的特性,可以实现从直流到太赫兹的电场测量,远大于传统偶极天线所能测量的频率范围,但里德堡原子电场传感器的响应频率都是离散的,且响应频率取决于原子能级之间的跃迁频率^[39]。

瞬时带宽指原子电场传感器能够以一定精度

表2 场强测量灵敏度研究进展

Tab.2 Research progress on field intensity measurement sensitivity

年份	方法	频率 / GHz	灵敏度 / ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)
2012年	吸收 ^[8]	14.23	3.00×10^{-5}
2017年	零差法 ^[27]	5.05	5.00×10^{-6}
2017年	频率调制技术 ^[36]	5.05	3.00×10^{-6}
2019年	外差法 ^[18]	19.63	7.90×10^{-7}
2020年	超外差 ^[19]	6.95	5.50×10^{-8}
2021年	重泵浦 ^[33]	17.04	5.00×10^{-8}
2022年	参数优化 ^[36]	10.68	1.25×10^{-8}
2022年	多体临界增强法 ^[37]	16.60	4.90×10^{-10}
2022年	分环谐振器 ^[31]	1.30	5.50×10^{-6}

同时处理两个或多个信号所对应的频率范围。瞬时带宽决定了原子电场传感系统响应待测电场信号的快慢,限制了最小的测量时间。系统建立稳态的时间是由原子能级的寿命决定的,因此每个频点的瞬时带宽一般只有几MHz^[40],可利用频率梳技术拓宽里德堡原子对电场信号的响应范围。

调节带宽指里德堡原子电场传感器在不失去给定性能的情况下,可以通过连续调节覆盖的频率范围。调节带宽可以通过共振或近共振电场引起的EIT-AT分裂效应和远失谐电场引起的交流斯塔克位移进行扩展。一般情况下,共振或近共振相互作用的灵敏度相较交流斯塔克效应更高,但仅限于检测离散频率的电场。远失谐电场引起的交流斯塔克位移可实现连续频率电场测量。

原子在外电场作用下发生交流斯塔克位移,偏移量 ΔD_1 与外加电场场强 E_{SIG} 的二次方成正比,可表示为

$$\Delta D_1 \propto -\frac{E_{\text{SIG}}^2}{2} \alpha_0 (2\pi f) \quad (5)$$

式中: α_0 为频率 f 处的动态标量极化率,是一个随频率变化的量。一般情况下, f 偏离共振频率越远, α_0 的值越小,因此斯塔克不适用于弱场测量。

实现弱场连续频率测量,可以通过本振场 E_{LO} 缀饰里德堡能级,典型单辅助场(E_{LO})原子外差法测量能级如图7(a)所示。基于单辅助场方案,山西大学^[41]实现了对2~5 GHz信号频率的电场的测量,最小可检测电场强度为 $2.31 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$,线性动

态范围大于 65 dB。美国陆军^[42]实现了 0 Hz ~ 20 GHz 的频率测量,并验证了里德堡原子用于宽频电磁频谱监测系统的可行性。华南师范大学提出了基于双辅助场五能级外差方案^[43],双辅助场五能级结果如图 7(b)所示。在本振场 E_{LO} 和辅助场 E_{aux} 作用下,实现了 $1.5 \mu V \cdot cm^{-1} \cdot Hz^{-1/2}$ 电场强度测量灵敏度,线性动态范围为 80 dB,连续频率测量范围超过 1 GHz。

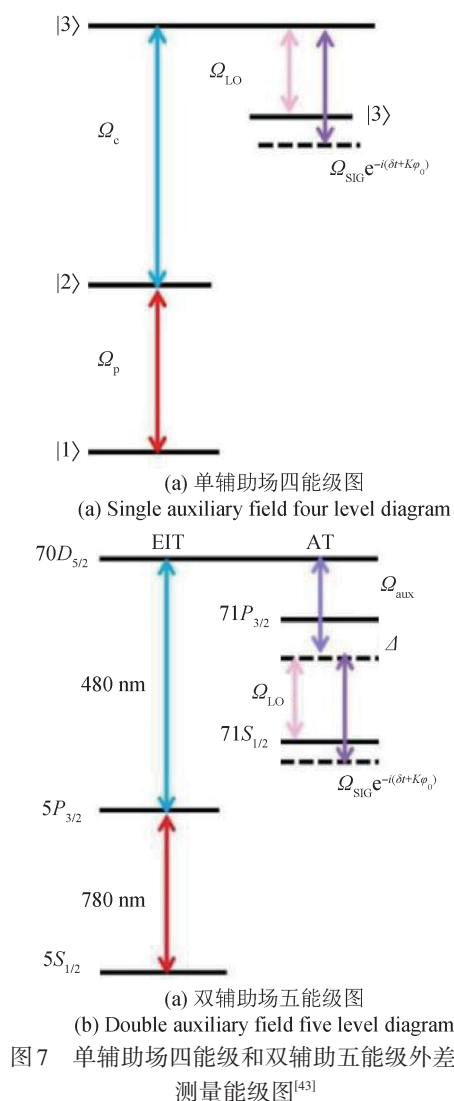


图7 单辅助场四能级和双辅助场五能级外差法测量能级图^[43]

3 里德堡原子电场传感应用

基于里德堡原子的电场传感具有可直接溯源至国际单位制、测量不确定度小、灵敏度高、宽频以及空间分辨力高等特性,在计量、通信、雷达、成像方面具有重大应用潜力。

3.1 计量

计量标准的主要指标包括溯源性、准确度、稳定度、灵敏度、可靠性和响应特性等,其中溯源性最为关键。传统的电场计在传统的功率计溯源的基础上,建立金属天线之前的空间电场和金属天线之后的功率之间的函数关系。一般有两种方法可获得该函数关系:第一种是根据标准天线公式经数值仿真或理论计算获得;第二种是采用一个已校准过的电场作为标准,对传统电场计进行校准。第一种方法在远场条件下具有较小的测量不确定度,但在近场条件下较难实现高精度测量;第二种方法中,传统功率计溯源需要多次校准,每次校准都会引入不确定度,进而限制了测量的精度。此外,被测场易受金属天线的干扰,进一步限制了测量精度的提升。EIT-AT分裂和超外差方法都具有可溯源至国际单位制和原子钟的特性。与传统电场计相比,溯源链短、仅涉及高精度频率测量的原子电场计具有更高的测量精度,因此基于里德堡原子的电场测量技术在电场计量领域具有极大的优势。

应用场约束的思想可从里德堡原子传感器的场强测量扩展到功率和电压计量。功率计量需将里德堡传感器嵌入矩形波导中,测量波导内的场强和矩形波导几何参数可实现功率计量^[44],实验装置如图8所示。

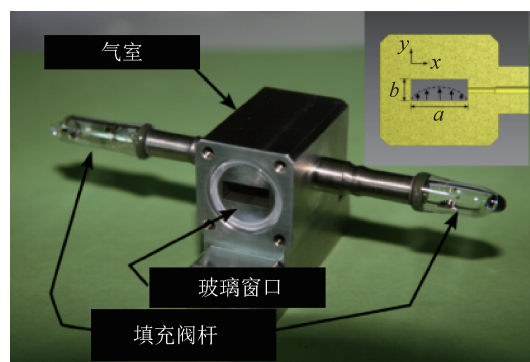
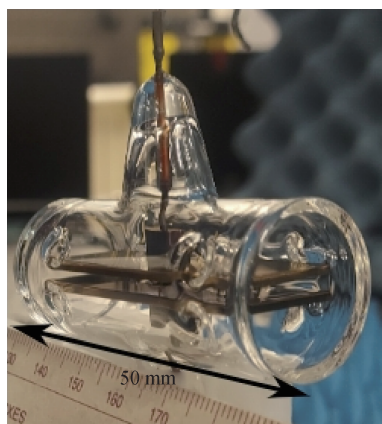


图8 具有波导尺寸的WR-42矩形气室^[44]

电压计量则采用斯塔克频移效应测量嵌入原子气室中的两平行板电极产生的场强,如图9所示。斯塔克频移正比于平板间场强的平方乘以原子的极化率^[45]。

基于里德堡原子的功率计和电场计具有标准里德堡电场传感的所有优点,包括良好的灵敏度

图9 用于电压计量的原子气室结构^[45]Fig.9 Atomic gas chamber structure for voltage measurement^[45]

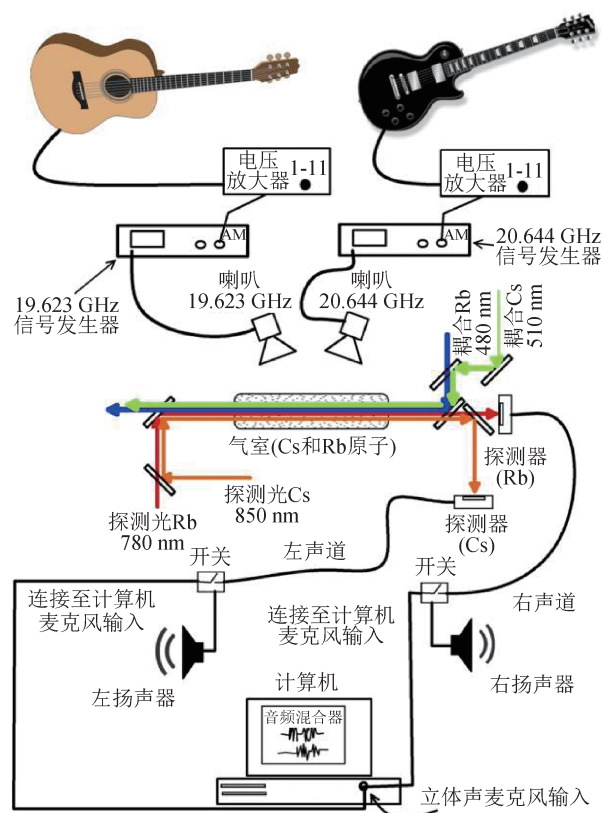
和动态范围、较小的测量不确定度和较大的频率响应带宽。

3.2 通信

经典天线的几何尺寸严格受限于Chu极限^[46],即频率越低,天线尺寸越大,例如:对于频率为1 MHz的经典天线,其几何尺寸已达到米量级。由于单个里德堡原子电场传感可在大带宽下工作,里德堡原子电场传感器在低频以及长波区域相较传统天线具有明显优势。在通信系统中,幅度调制(Amplitude Modulation, AM)和频率调制(Frequency Modulation, FM)作为经典的通信信号调制方式,具有原理简单、易于实现的特点。里德堡原子对AM信号和FM信号进行检测时,具有不同的EIT-AT谱特征。检测AM信号时,EIT-AT谱为对称分布;检测FM信号时,EIT-AT谱为非对称分布。此外,对于调制深度小或调制频率小的弱电场,探测光的频率锁定在基态跃迁的共振频率上。当电场较强和调制频率较大足以诱导EIT-AT分裂时,探测光锁定到一个最佳失谐频率上,以获得最大的调制信号输出。如前文所述,电场的相位可用里德堡原子传感器检测。目前,利用里德堡原子传感器已经实现了二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)、正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)和正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)信号检测。Holloway等人使用矢量信号分析仪演示了BPSK、QPSK、16-QAM、32-QAM、64-QAM信号的接收,符号率为100 kSym/s,误码率低于0.05。此外,在误码率小于0.1时,符号率可高达1 MSym/s^[47]。

2019年,美国国家标准与技术研究院的Holloway首次演示了里德堡原子对AM/FM双频段音频信号检测^[48],实验装置如图10所示。实验采用4个激光器,并且在蒸汽池中填充铯原子和铷原子,每一种原子都以同样的方式工作,唯一的区别是不同种类原子所需的激光波长不同。其中,850 nm探测光和510 nm耦合光用于制备铯原子梯形型EIT系统,780 nm探测光和480 nm耦合光用于制备铷原子梯形型EIT系统。铯原子和铷原子分别响应载波频率为19.626, 20.644 GHz的通信信号,调制方式可任意选用AM/FM,通过两个喇叭天线将已调制好的微波信号照射于原子气室,使用两个光电探测器分别采集穿过铷原子和铯原子的探测光光谱,获得了乐器部分和人声部分的时域波形记录,重现了时长为76.7 s的乐曲立体声播放。

2020年,北京量子信息科学院在室温铯原子蒸汽池中制备了一种梯形型电磁感应透明EIT系统。采用Ku波段12.52 GHz的微波电场和Ka波段39.80 GHz的微波电场作为双通道通信载体,分别进行音频和伪随机二进制序列信号传输,实验装

图10 双原子双通道音频信号检测系统框图^[48]Fig.10 Block diagram of dual atom dual channel audio signal detection system^[48]

置如图 11 所示。

与 NIST 双原子双通道音频信号检测系统相比，单原子双通道音频信号检测系统较为简单，只需

要一种原子，一组激光器，并且该系统的动态范围为 50 dB，通信带宽超过 10 MHz，能够有效满足音频信号传输需求。

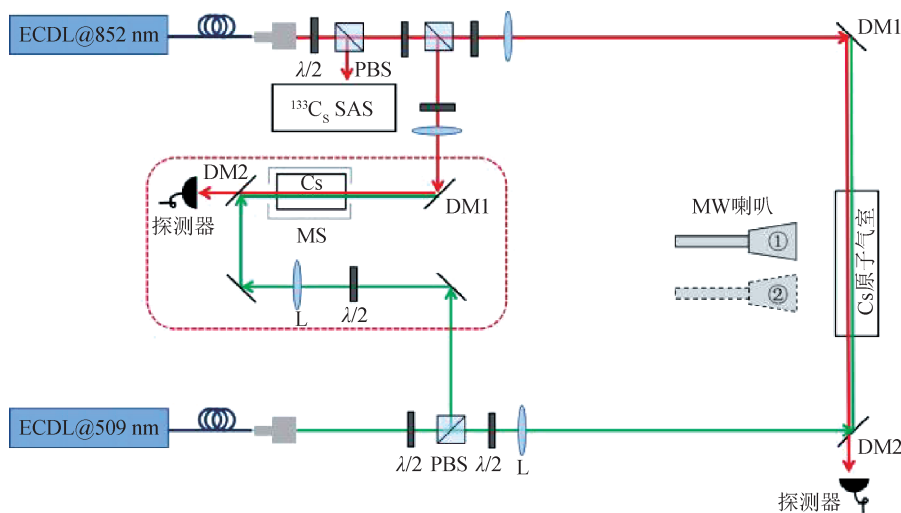


图 11 单原子双通道音频信号检测装置^[12]

Fig.11 Single atom dual channel audio signal detection device^[12]

3.3 雷达

随着雷达技术的不断发展，雷达的种类越来越多，功能和性能也越来越强大，在军事、气象、遥感、航天等领域都有重要应用。雷达通过探测待测目标反射的回波信号实现对于目标定位和跟踪。因此，对回波信号到达角的高精度测量尤为重要。

2021 年，Amy K. Robinson 首次利用里德堡原子实现了电场到达角的测量。为了确定电场到达角，需要测量原子气室里两个位置之间的相位差，实验装置如图 12 所示。两个位置的相位差测量电场的到达方向角为

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{kd} \right) \quad (6)$$

式中： φ_1 和 φ_2 分别为两个光学探头位置的测量相位， d 为两个探头位置的间距， $k = 2\pi/\lambda$ ，其中 λ 为电场的波长。实验结果表明：在测量相位误差低于 1° 时，电场的到达角最大误差为 2.1° 。

作用距离（雷达威力）是雷达重要的性能指标之一^[50]，决定了雷达能在多大的距离上发现目标，雷达威力的大小取决于雷达本身的性能。与传统基于热噪声极限的雷达系统相比，基于量子散粒噪声极限的里德堡原子电场传感器具有高灵敏特性，有望实现长程雷达威力。但目前原子雷达原

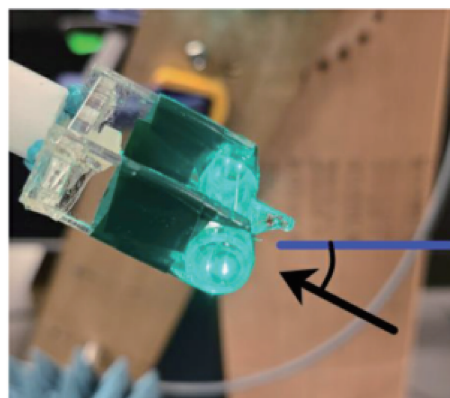


图 12 基于里德堡原子的电场到达角测量^[49]

Fig.12 Measurement of electric field arrival angle based on Rydberg atom^[49]

子正处于初期发展阶段，距离达到替代现有雷达系统的技术水平仍有差距。

3.4 成像

高分辨力空间成像在纳米结构、生物和近场成像及印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 成像和现场测绘等方面具有重要的应用价值。传统天线测量的是平均电场，不仅空间分辨力只有波长的 $1/2 \sim 1/4$ ，还存在精度低等问题。而使用里德堡原子和 EIT 进行电场测量的方法，空间分辨力能够达到 $1/100$ 波长。由于电场的实际感应范围由电场、探测光和耦合光的重叠区域决定，当激光束的直径很小时，能够实现较高的空间分辨力。

2012年, Böhi 等人^[51]首次研究了基于热原子蒸气池的二维场成像技术, 该技术的空间分辨力达到 $350\ \mu\text{m}$ 。2014年, Fan 等人^[52]对场强二维成像进行了研究, 在 $6.9\ \text{GHz}$ 频率下, 其空间测量分辨力达到 $66\ \mu\text{m}$ 左右。同年, Holloway 等人^[53]也进行了电场场强一维亚波长成像实验, 实现了约 $100\ \mu\text{m}$ 的空间测量分辨力。2018年, David A. Anderson 等人^[54]采用 Ku 波段 $13.49\ \text{GHz}$ 的微波实现了 $1/10$ 波长的空间分辨力二维成像, 测量结果如图 13 所示。2020年, Cardman 等人^[55]用里德堡原子电场测量仪对 Yagi-Uda 天线近场进行了成像, 其空间分辨力为 $1/2$ 波长。若使用灵敏度更高的成像器件和更小的原子气室, 可能达到 $10\ \text{nV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的灵敏度和 $10\ \mu\text{m}$ 的分辨力。

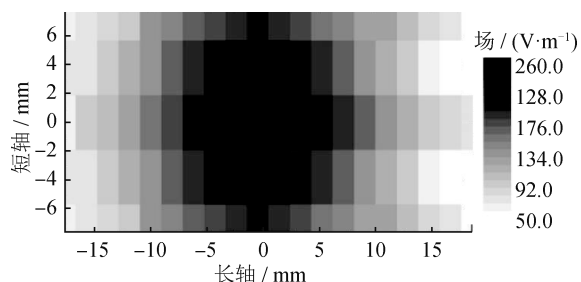


图 13 基于里德堡原子的二维电场成像^[54]

Fig.13 2D electric field imaging based on Rydberg atoms^[54]

4 总结与展望

在室温原子蒸气池中, 基于电磁诱导透明和吸收效应的新型电场测量是一种全光式的测量方法, 测量过程不受待测场干扰, 且具有自校准、覆盖频率范围广、灵敏度高和分辨力高的优点。本文阐述了基于里德堡原子电场传感的基本原理, 重点讨论了影响里德堡原子场强测量灵敏度与测量频率响应带宽的主要因素及技术提升方法, 具体介绍了里德堡原子电场传感在计量、通信、雷达、成像方面的潜在应用。

基于里德堡原子的电场传感器在过去十几年中取得了很大的进展。由于里德堡原子传感器/接收器的潜在应用广泛, 世界各地的科研单位(包括大学、私营公司、政府机构和大多数国家计量研究所)已经开始在里德堡原子传感器/接收器领域开展项目研究, 研究热点方向主要包括:

1) 在标准量子极限条件下, 里德堡原子电场计的理论灵敏度为 $\text{pV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 量级, 远优于当

前实验水平, 说明原子电场计的测量精度还有很大的发展潜力。除了通过表 2 中所述的方法提升测量灵敏度外, 还可以从以下几个方向进行研究, 以提升原子电场计的性能: ①研究缓冲介质对原子气室弛豫机制的影响、优化原子气室结构从而抑制气室对外场反射造成的干涉效应, 降低系统退相干率, 提升测量灵敏度; ②研究六波混频等多光谱测量方法, 研究超稳腔技术压窄激光器线宽, 优化激光功率、光束尺寸、气室温度, 减小谱线线宽以提高光谱信号强度; ③设计高量子效率、低暗计数、低噪声的光电探测器, 降低探测器噪声; ④研究压缩光技术, 降低光子散粒噪声; ⑤研究光学腔技术, 增强光与原子的相互作用。

2) 评定测量不确定度, 研究原子电场测量的不确定度来源, 对原子传感器进行全面的测试和表征, 并溯源至国际单位制和原子钟。

3) 小型化以及工程化设计, 研究微加工原子气室、空心光子晶体光纤里德堡原子、片上激光器、原子芯片等。

参考文献

- [1] KRAUS J D. Heinrich Hertz - theorist and experimenter [C]//Microwave symposium digest, 1988. IEEE MTT-S International. IEEE, 1988.
- [2] HUANG W, LIANG Z T, DU Y X, et al. Rydberg-atom-based electrometry[J]. Acta Physica Sinica Chinese Edition, 2015, 64(16).
- [3] HOLLOWAY C L, GORDON J A, SCHWARZKOPF A, et al. Broadband Rydberg atom based self-calibrating RF E-field probe[C]//2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). IEEE, 2014.
- [4] FAN H, KUMAR S, SEDLACEK J, et al. Atom based RF electric field sensing[J]. Journal of Physics B-Atomic Molecular & Optical Physics, 2015, 48(20).
- [5] GORDON J A, HOLLOWAY C L, JEFFERTS S, et al. Quantum - based SI traceable electric - field probe [C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 2010.
- [6] MOHAPATRA A K, BASON M G, BUTSCHER B, et al. Giant electro-optic effect using polarizable dark states[J]. Nature Physics, 2008, 4(11): 890-894.
- [7] 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 Applied, 2010, 81(5).

- [8] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, HARALD K, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(11): 819–824.
- [9] GALLAGHER T F, UZER T. Rydberg atoms[J]. *Physics Today*, 1995, 48(9).
- [10] JAU Y Y, CARTER T. Vapor-cell-based atomic electrometry for detection frequencies below 1 kHz[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(5).
- [11] DOWNES L A, MACKELLAR A R, WHITING D J, et al. Full-field terahertz imaging at kilohertz frame rates using atomic vapor[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(1).
- [12] DU Y J, CONG N, WEI X G, et al. Realization of multi-band communications using different Rydberg final states[J]. *AIP Advances*, 2022, 6(12).
- [13] CAI M H, XU Z S, YOU S H, et al. Sensitivity improvement and determination of Rydberg atom-based microwave sensor[J]. *Photonics*, 2022, 4(9).
- [14] 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 & Optical Physics*, 2022, 7(55).
- [15] ARTUSIO-GLIMPSE A, SIMOONS M, PRAJAPATI 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.
- [16] SIMONS M T, KAUTZ M D, GORDON J A, et al. Uncertainties in Rydberg atom-based RF E-field measurements [C]//2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe). *IEEE*, 2018: 376–380.
- [17] 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).
- [18] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, HADDAB A H, et al. A Rydberg atom-based mixer: measuring the phase of a radio frequency wave[J]. 2019.
- [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] ANDERSON D A, SAPAPIRO R E, RAITHEL G. Rydberg atoms for radio-frequency communications and sensing: atomic receivers for pulsed RF field and phase detection[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(4): 48–56.
- [21] 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 A*, 2022, 17(4).
- [22] 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).
- [23] FANCHER C T, SCHERER D R, JOHN M C S, et al. Rydberg atom electric field sensors for communications and sensing[J]. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2021, 2: 1–13.
- [24] BUSSEY L W, BURTON F A, BONGS K, et al. Quantum shot noise limit in a Rydberg RF receiver compared to thermal noise limit in a conventional receiver[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2022, 6(9): 1–4.
- [25] THOMAS J E, QUIVERS J R W W. Transit-time effects in optically pumped coupled three-level systems[J]. *Physical Review Applied*, 1980, 22(5).
- [26] BETEROV I I, TRETYAKOV D B, RYABTSEV I I, et al. Ionization of Rydberg atoms by blackbody radiation[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(1).
- [27] KUMAR S, FAN H, KÜBLER H, et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1–10.
- [28] YANG F, LIU Y C, YOU L. Atom-photon spin-exchange collisions mediated by Rydberg dressing[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(14).
- [29] ZHANG L, FENG Z, ZHAO J, et al. Evolution of the pairs of ultracold Rydberg atoms in the repulsive potential[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11599–11606.
- [30] FAN H, KUMAR S, SHENG J, et al. Effect of vapor-cell geometry on Rydberg-atom-based measurements of radio-frequency electric fields[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 4(4).
- [31] HOLLOWAY C L, PRAJAPATI N, ARTUSIO-GLIMPSE A B, et al. Rydberg atom-based field sensing enhancement using a split-ring resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(20).
- [32] BALUKTSIAN T, HUBER B, LÖW R, et al. Evidence for strong van der waals type Rydberg-Rydberg interaction in a thermal vapor[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(12).
- [33] PRAJAPATI N, ROBINSON A K, BERWEGER S, et al. Enhancement of electromagnetically induced transparency based Rydberg - atom electrometry through population repumping[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(21).
- [34] PRAJAPATI N, NIU Z, NOVIKOVA I. Quantum - enhanced two-photon spectroscopy using two-mode squeezed

- light[J]. Optics Letters, 2021, 46(8): 1800–1803.
- [35] LIU Z K, ZHANG L H, LIU B, et al. Deep learning enhanced Rydberg multifrequency microwave recognition [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1–10.
- [36] CAI M, XU Z, YOU S, et al. Sensitivity improvement and determination of Rydberg atom-based microwave sensor[C]//Photonics. MDPI, 2022, 9(4).
- [37] 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.
- [38] STIGLITZ M. Radar Handbook [J]. Microwave Journal, 1990, 33(7): 139–140.
- [39] BERWEGGER S, PRAJAPATI N, ARTUSIO-GLIMPSE A B, et al. Rydberg state engineering: a comparison of tuning schemes for continuous frequency sensing [J]. arXiv Preprint arXiv, 2022.
- [40] HU J, LI H, SONG R, et al. Continuous-frequency weak electric field measurement with Rydberg atoms [J]. arXiv Preprint arXiv, 2022.
- [41] YAO J, AN Q, ZHOU Y, et al. Sensitivity enhancement of far-detuned RF field sensing based on Rydberg atoms dressed by a near-resonant RF field [J]. Optics Letters, 2022, 47(20): 5256–5259.
- [42] MEYER D H, HILL J C, KUNZ P D, et al. Simultaneous multi-band demodulation using a Rydberg atomic sensor [J]. arXiv Preprint arXiv, 2022.
- [43] 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).
- [44] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, KAUTZ M D, et al. A quantum-based power standard: using Rydberg atoms for a SI-traceable radio-frequency power measurement technique in rectangular waveguides [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(9).
- [45] HOLLOWAY C L, PRAJAPATI N, KITCHING J, et al. Electromagnetically induced transparency based Rydberg-atom sensor for quantum voltage measurements [J]. arXiv Preprint arXiv, 2021.
- [46] HOLLOWAY C L, PRAJAPATI N, KITCHING J, et al. Electromagnetically induced transparency based Rydberg-atom sensor for quantum voltage measurements [J]. arXiv Preprint arXiv, 2021.
- [47] 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.
- [48] 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).
- [49] 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).
- [50] MAHAFFZA B R. Introduction to radar analysis [M]. Chapman and Hall/CRC, 2017.
- [51] BÖHI P, TREUTLEIN P. Simple microwave field imaging technique using hot atomic vapor cells [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(18).
- [52] 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.
- [53] HOLLOWAY C L, GORDON J A, SCHWARZKOPF A, et al. Sub-wavelength imaging and field mapping via electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting in Rydberg atoms [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(24).
- [54] ANDERSON D A, PARADIS E, RAITHEL G, et al. High-resolution antenna near-field imaging and sub-THz measurements with a small atomic vapor-cell sensing element [C]//2018 11th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM). IEEE, 2018: 1–3.
- [55] CARDMAN R, GONÇALVES L F, SAPIRO R E, et al. Atomic 2D electric field imaging of a Yagi-Uda antenna near-field using a portable Rydberg-atom probe and measurement instrument [J]. Advanced Optical Technologies, 2020, 9(5): 305–312.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 陈雪花(1994—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为里德堡电场测量技术。



通讯作者: 杨仁福(1976—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为原子钟及量子精密测量技术。