

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.01.01

里德堡原子微波电场测量

白金海, 胡栋, 贡昊, 王宇

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 里德堡原子是处于高激发态的原子, 其主量子数大、寿命高, 具有极化率高、电偶极矩大等特点, 对外电场十分敏感。基于热蒸气室中里德堡原子的量子干涉原理(电磁感应透明和 Autler-Towns 分裂效应)的微波电场精密测量不仅具有远高于传统偶极天线的灵敏度, 且具有自校准、对外电场干扰少、测量频率范围大等优点, 是下一代电场测量标准。本文综述了里德堡原子的微波电场测量研究, 详细介绍了其基本原理和当前研究进展, 并讨论了未来发展方向。

关键词: 量子精密测量; 里德堡原子; 微波电场; 电磁感应透明

中图分类号: TB97

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)01-0001-09

Rydberg Atoms Based Microwave Electric Field Sensing

BAI Jinhai, HU Dong, GONG Hao, WANG Yu

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Rydberg atoms are the atoms in highly excited states with large principal quantum numbers n , and long lifetimes. The large Rydberg atom polarizability and strong dipole transitions between energetically nearby states are highly sensitive to electric fields. The new developed scheme for microwave electric field precision measurement is based on quantum interference effects (electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting) in Rydberg atoms contained in a dielectric vapor cell. The minimum measured strengths of microwave electric fields of the new scheme are far below the standard values obtained by traditional antenna methods. And it has several advantages, such as self-calibration, non-perturbation to the measured field, a broadband measurement frequency range, etc, is the next-generation electric field standard. In this review, we describe work on the new method for measuring microwave electric field based on Rydberg atoms. We introduce the basic theory and experimental techniques of the new method, and discuss the future development direction.

Key words: quantum precision measurement; Rydberg atoms; microwave electric field; electromagnetically induced transparency

0 引言

原子是一种典型的量子体系, 具有可复现、性能稳定、能级精确等优点。基于原子体系的量子精密测量技术是当前的前沿技术研究^[1-2], 可以用于时间频率、磁场、加速度、电场等多个物理量的测量。原子钟(光钟)的测量精度已经达到 10^{-18} 量级^[3-4], 原子磁强计的灵敏度已经达到 $160 \text{ aT/Hz}^{-1/2}$ 水平^[5], 原子干涉重力仪的灵敏度已经达到 μGal 量级^[6], 里德堡原子电场计的灵敏度已经达到 $30 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 水平, 分辨力可达 $8 \mu\text{V/cm}$ ^[7], 甚至已经突破了标准量子极限^[8]。基于原子的电场精确测量不仅可以作为新一代微波电场计量标准, 还可以应用在固体材料的微波光学性质研究、电场强度控制^[9]、高分辨天气雷达以及生物医学成像等, 有着广泛的应用前景。

在微波电场测量和校准方面, 自 Hertz 在 1880 年

首次证实电磁场存在后, 微波电场测量和校准的基本方法变化很小^[10], 一直用标准天线和标准场方法作为射频频微波电场的可溯源标准^[11], 基于电磁场天线转换的光学测量方法的电场强度测量分辨力为 $30 \mu\text{V/cm}$, 灵敏度为 $1 \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 水平^[12]。但此方法有很多不足之处, 主要有^[13]: ①传感器需要校准, 为了校准传感器, 需要将其放置在微波电场中, 而此电场大小又需要一个已校准传感器来测量, 这导致偶极天线传感器校准困难, 使电场强度标准难于复现; ②传感器使用天线感应电压换算电场分布, 但很多结构的天线无法得出电场分布解析解, 尤其是在近场情形^[14]; ③受限于偶极共振效应, 传感器的幅频特性与其长度有关, 也就是说不同频率的微波电场强度测量需要使用不同尺寸的传感器; ④传感器探头使用金属材料制作, 会对电场本身造成干扰, 影响测量结果的准确性; ⑤分辨力灵敏度低, 测量不确定度大。

与传统电场测量方法对比,近些年发展起来的基于量子相消干涉原理的里德堡原子电场测量,使用激光将原子激发到里德堡态,微波电场强度正比于电磁感应透明峰分裂双峰的间距或者透明窗口的吸收率,即将电场强度与原子参数和光谱学特征参数联系起来,是一种量子测量方法,具有自校准、易复现等特性,已经实现了高于传统偶极天线标准的灵敏度和分辨力,且具有进一步提升的潜力,是下一代微波电场测量标准。

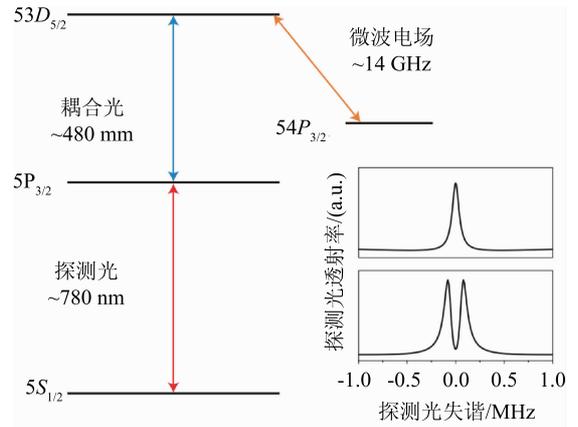
本文针对热蒸气室中的里德堡原子电场测量进行了综述,介绍了里德堡原子电场测量的原理和当前实验进展,讨论了未来可能的发展方向。

1 基本原理

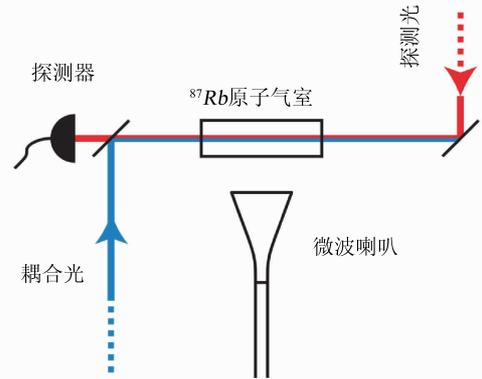
里德堡原子是处于高激发态的原子,其主量子数 n 较高,具有极化率大(正比于 n^7),相互作用强(正比于 n^4),寿命长(正比于 n^3)等特性^[16],在量子图像中,里德堡原子的运动态被强电偶极跃迁耦合并产生大的 Stark 频移效应,可以用激光激发和光谱学技术制备并读取此原子态,使里德堡原子成为一种测量电场的极佳工具。

典型的里德堡原子电场测量装置采用的能级系统和实验装置如图 1 所示^[7],以此为例说明里德堡原子电场测量的基本原理。在⁸⁷Rb 原子四能级系统中,探测光频率在基态 $5S_{1/2}$ 至激发态 $5P_{3/2}$ 间的共振跃迁频率锁定或扫描(图 1(b)中的红线),其功率大小由光电探测器测量;耦合光频率固定于激发态 $5P_{3/2}$ 至 $53D_{5/2}$ 间的共振跃迁峰;原子气室加热到一定温度,探测光与耦合光在热原子气室中相向传播,以减小原子速度分布的影响,二者的偏振方向自由可调,以满足不同的实验情形,且为了减小微波空间振幅变化的影响,通常使耦合光(或者探测光)的光斑尺寸在 0.1 mm 量级;微波电场在里德堡能级 $53D_{5/2}$ 和 $54P_{3/2}$ 的共振频率锁定或扫描,由微波喇叭产生并与气室内原子相互作用,喇叭和微波偏振的方向均垂直于激光传播方向。

当无微波电场时,四能级系统退化为三能级系统,产生典型的阶梯型电磁感应透明效应^[17-18]。当仅有探测光存在时,因二能级原子的受激吸收效应,使探测光穿过原子气室的透过率几乎为零,而当加上耦合光时,因耦合光与探测光的量子干涉效应,使基态原子处于‘暗态’,破坏了探测光的吸收通道,导致探测光几乎无损耗(或者损耗极大降低)的透过原子气室,如图 1(a)插图部分所示,此即为电磁感应透明效应(Electromagnetically induced transparency, EIT)。



(a) 能级图



(b) 试验装置图

图 1 使用电磁感应透明效应测量微波电场的能级图和实验装置^[7]

当微波电场作用时,可以用密度矩阵理论得到探测光场的密度矩阵元,进而得到其吸收率^[19]。在均匀增宽系统中,探测光吸收率为

$$\text{Im}[\rho_{21}^1(\nu)] = \text{Re} \left[\frac{(L_{12} + \Omega_{\text{rf}}^2/L_{123})\Omega_p}{(\Omega_c^2 + L_1L_{12} + \Omega_{\text{rf}}^2L_1/L_{123})} \right] \quad (1)$$

式中: $L_1 = \gamma_{21} - i\Delta_1$; $L_{12} = \gamma_{31} - i(\Delta_1 + \Delta_2)$; $L_{123} = \gamma_{41} - i(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3)$, $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 分别为探测光、耦合光和微波电场频率与对应原子能级跃迁频率的失谐; $\Omega_p, \Omega_c, \Omega_{\text{rf}}$ 分别为探测光、耦合光和微波电场的拉比频率。退相干速率 $\gamma_{ij} = (\Gamma_i + \Gamma_j)/2$ (不考虑碰撞弛豫), Γ_i 为对应能级的弛豫速率。

当 $\Omega_{\text{rf}} = 0$ 时,式(1)的结果等效于三能级 EIT 情形。均匀增宽介质中的四能级探测光吸收曲线的计算结果如图 2 所示,当无微波电场作用时,相当于三能级 EIT 情形,如图 2(a)所示,因耦合光场拉比频率较大, EIT 过渡到 Autler-Townes (AT) 分裂,在探测光零失谐两端间距 Ω_c 处出现两个透过率峰。当有微波电场

作用时,因微波电场与三能级系统的相互作用,在探测光共振处(零失谐)的透过率急剧增加,如图2(b)所示,透明窗口的线宽大小为1.5 MHz,处于亚自然线宽宽度。

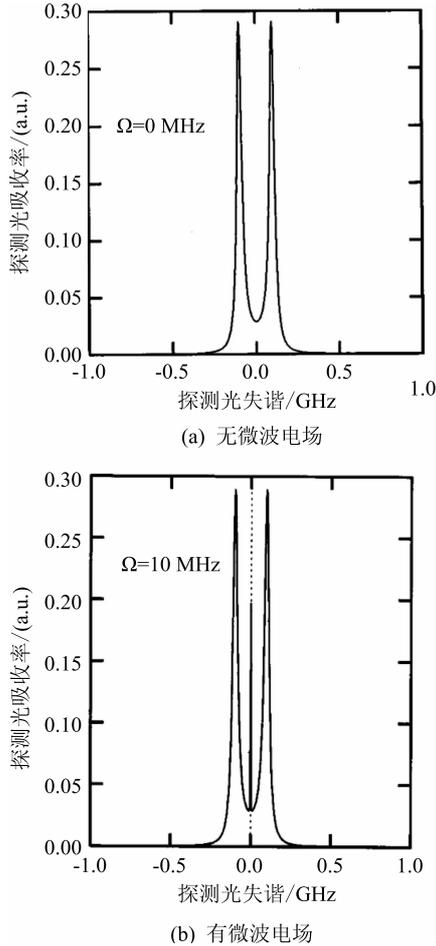


图2 均匀增宽介质的探测光吸收曲线^[19]

图2中,(a)参数: $\Delta_2 = \Delta_3 = 0$, $\gamma_{21} = 3$ MHz, $\gamma_{31} = \gamma_{41} = 3$ MHz, $\gamma_{32} = \gamma_{42} = 3.5$ MHz, $\Omega_p = 10$ MHz, $\Omega_c = 100$ MHz, $\Omega_{rf} = 0$ MHz。(b)参数等同(a),除 $\Omega_{rf} = 10$ MHz。

热原子气室中的原子需要考虑多普勒展宽效应,其原子速度分布符合麦克斯韦-玻尔兹曼分布属于非均匀增宽系统 $N(v) = N_0/u\sqrt{\pi}\exp(-\frac{v^2}{u^2})$, 其中, N_0 为

原子数密度, $\frac{u}{\sqrt{2}}$ 为原子方均根速率。则探测光吸收率

关系式变为

$$Im[\rho_{21}] = \frac{N_0}{u\sqrt{\pi}} \int Im[\rho_{21}(v)\exp(-\frac{v^2}{u^2})] dv \quad (2)$$

在热原子气室中,当微波电场强度较大时,使出

现在探测光共振处的透明窗口发生 AT 分裂,成为分布在共振频率两端对称的透明窗口,如图3所示。图中从上到下的微波电场强度逐渐增加,当电场强度为零时,为三能级 EIT 情形,当电场强度增加时,出现逐渐明显的 AT 分裂双峰。双峰分裂间距 Δf 与微波电场拉比频率 Ω_{MW} 成正比,满足关系式

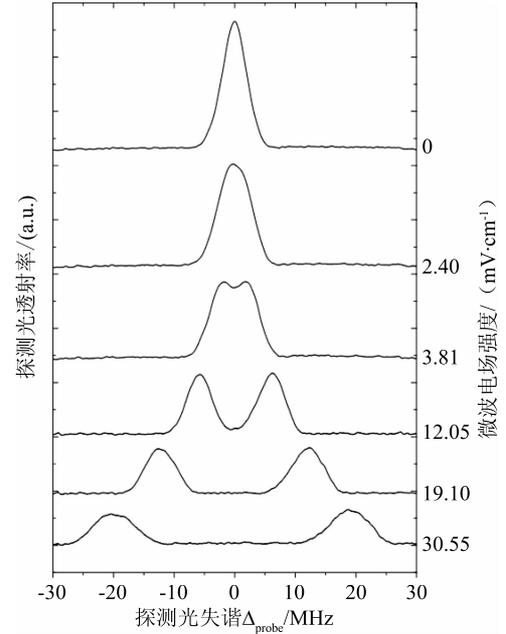


图3 热原子气室中的探测光吸收曲线^[14]

$$\Omega_{MW} = 2\pi \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \Delta f \quad (3)$$

而拉比频率满足关系式

$$\Omega_{MW} = \frac{\mu_{MW} E}{k} \quad (4)$$

即微波电场强度和光谱分裂双峰的间距成正比,或者说可以用双峰分裂间距测量微波电场强度,式(3)、(4)中的比例系数与激光波长,普朗克常数以及偶极矩阵元相关,激光波长测量的不确定度在 10^{-8} 量级(波长计测量),偶极矩阵元不确定度在 10^{-8} 量级^[20],不会影响微波电场测量的精度。受微波拉比输出微波强度稳定性、探测耦合光强度频率稳定性等因素的影响,基于 AT 分裂峰方法测量微波电场强度的不确定度约为 0.5%^[7]。

在多普勒展宽系统中,为激发原子到里德堡能级,系统选用阶梯型三能级系统,受限于较大的原子驰豫速率,电场感应透明窗口的线宽一般较大,如图3所示。当微波电场强度大于 3 mW/cm 时,有较为明显的 AT 分裂现象;当微波电场强度较小,使 AT 分裂双峰远小于 EIT 透明窗口线宽时,双峰重合在一起,表现

出如图 3 所示的单峰现象, 这极大限制了通过 AT 分裂双峰间距来测量微波电场强度的分辨力。但是在多普勒速度分布的影响下, 存在较弱的微波电场时的探测光透明窗口透过率大于无微波电场时的情形, 此现象可以用来测量弱微波电场, 如图 4 所示^[7]。图 4 中由下到上的微波电场强度逐渐增加, 对应的探测光透过率也逐渐增加, 可以根据此关系来测量微波电场强度, 最小可测量的微波电场强度约为 $8 \mu\text{V}/\text{cm}$ ^[7], 透过率最大处对应的微波电场失谐不为零是地磁场引起的频率迁移导致的, 不影响电场强度测量结果。

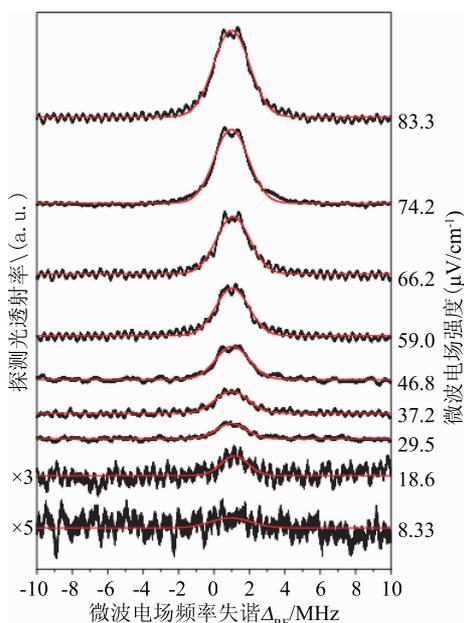


图 4 四能级系统中的探测光透过率曲线^[7]

综上, 首先使用激光场与原子相互作用, 将原子制备到里德堡态, 然后利用电场感应透明效应测量微波电场: 若微波电场强度较大可以产生明显的 AT 分裂现象时, 通过测量 AT 分裂双峰间距得到微波电场大小; 若微波电场强度较小时, 通过 EIT 透明窗口透过率随电场强度增加而增大的现象测量微波电场。

2 研究现状分析

国际上, 最早进行里德堡(热)原子微波电场测量研究的单位是美国 Oklahoma 大学的 Shaffer 小组, 其首次将微波电场测量分辨力提高到 $1 \mu\text{V cm}^{-1}$ 量级^[7], 之后, 美国 NIST、法国 ENS-PSL 大学等单外迅速跟进。2018 年 10 月, 美国陆军研究实验室(ARL)围绕里德堡原子开展了新型量子传感器的研究, 力求为未来的士兵配备更精确的电场测量传感器^[15]。2020 年 9

月, 美国国防高级计划局(DARPA)宣布开展“可用于新技术的原子蒸气科学(SAVaNT)项目, 以应用于里德堡电场测量等技术的研究。这说明原子电场计不仅有较为重要科研价值, 并已经获得了美国军方的关注, 有着重要的军用前景。

国内开展里德堡原子微波电场测量研究的单位主要有山西大学激光光谱研究所^[34]、华南师范大学^[13]、中国科学院大学^[35]等, 但主要聚焦在物理原理上, 对里德堡原子电场测量的工程化研究很少。近期, 一批国内的研究也开始布局里德堡原子电场测量的研究, 以迎合测量量子化趋势和国际热点, 主要聚焦于工程化和军事应用领域。

2.1 微波电场的亚波长成像

使用传统方法测量微波电场的空间分布仅有 $1/4$ 至 $1/2$ 波长左右的分辨力, 测量的是传感器长度内的平均电场, 不仅具有空间分辨力差、结果精度低的问题, 对待测结构存在远小于波长的缺陷和缝隙时也无能为力。基于里德堡原子的微波电场成像技术具有极高的空间位置分辨力和强度分辨力, 可以应用在诸如印刷电路板或介质表面电场成像, 以及超材料和弱微波环路上, 具有重要的应用价值。

图 5 为利用里德堡原子系统对 6.9 GHz 微波电场进行 CCD 成像的实验结果^[21], 可知微波电场空间分布实验测量结果和理论计算结果相吻合。Shaffer 小组第一次使用 CCD 测量了微波电场的空间分布, 具有 $120 \mu\text{V}/\text{cm}$ 的强度测量误差和 $66 \mu\text{m}$ 的空间分辨力, 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 $10 \text{ nV}/\text{cm}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的分辨力。

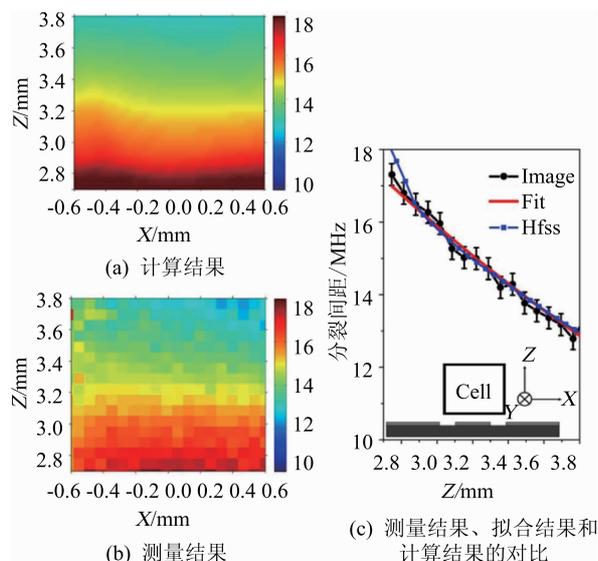


图 5 微波电场成像结果^[21]

2.2 微波电场的偏振测量

电磁感应透明效应应用于里德堡原子，可以测量微波电场的偏振方向电场强度，设计实用的覆盖 100 MHz ~ 1 THz 频率范围^[22-23]的小型便携的微波电场测量装置。

只有偏振方向满足一定角度的微波电场才与对应能级的里德堡原子相互作用。当微波电场强度固定，偏振方向变化时，对应的探测光吸收光谱也会随之变化，通常探测光与耦合光的偏振方向已知，则可以根据吸收光谱测量结果推出微波电场的偏振方向或者电矢量方向。第一个使用里德堡原子测量微波电场矢量方向的实验装置如图 6 所示，耦合光与探测光在原子气室内相向传播，实验结果如图 7 所示^[23]。当微波电场引起的 AT 分裂双峰与无电场时的单透射峰完全分开时的偏振测量灵敏度最高，当前实现的偏振方向测量分辨力为 0.5°，主要受激光频率、强度稳定性、电子噪音、激光偏振纯度等因素限制。

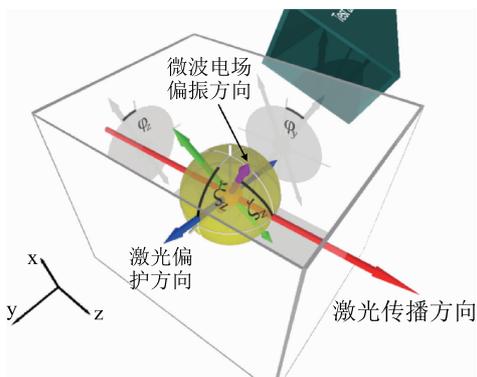


图 6 微波电场偏振测量装置

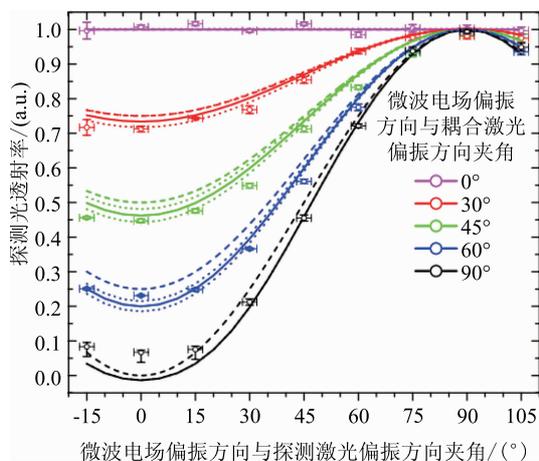


图 7 微波电场偏振测量结果^[23]

2.3 宽带微波电场测量

传统偶极天线微波电场测量受限于偶极共振效应，针对不同的微波频率需要更换不同尺寸的天线，在实际应用中不方便。与之对比，得益于激光技术，尤其是半导体激光技术的发展，大频率范围的可调谐激光易于获得，这使里德堡原子电场测量系统不需更换测量设备，仅需调节耦合光的波长就可以实现大频率范围的微波电场强度测量。

图 8 为⁸⁵Rb 原子里德堡能级 $n D_{5/2} - (n + 1) P_{3/2}$ 共振微波频率 ($n = 20 \sim 130$) 和对应 $5 P_{3/2} - n D_{5/2}$ 共振激光频率的变化曲线^[24]。由图 8 中可知，微波频率覆盖 1 ~ 300 GHz，对应的耦合光波长为 479 ~ 487 nm，频率调谐为 8 nm，这在实验上很容易实现。更换其他的原子能级或者碱金属原子，有可能覆盖至 100 MHz ~ 1 THz 的微波频率范围^[22]。

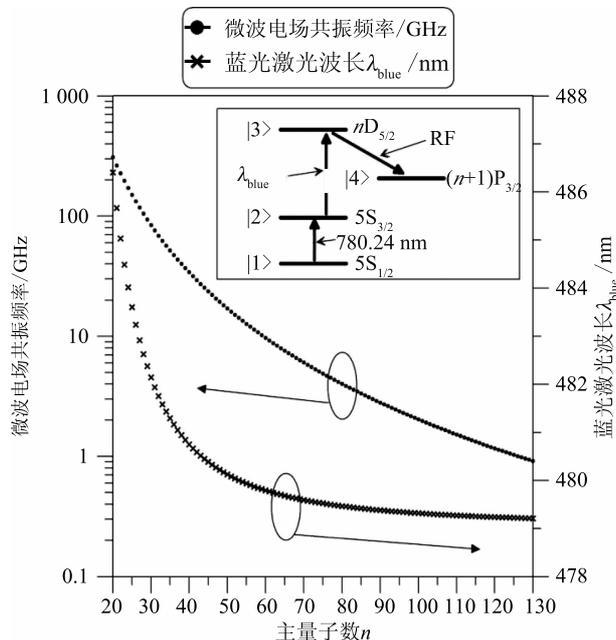


图 8 ⁸⁵Rb 原子不同里德堡能级的微波共振频率

2.4 微波电场零差测量

使用零差测量方法消除探测光强读出噪音，以提高里德堡原子电场测量的灵敏度^[25]，系统方案如图 9 所示。使用马赫曾德尔干涉仪构成零差测量方案：将探测光分为两部分，一部分经过原子气室与耦合光和微波电场相互作用，透过探测光为本振光，另一部分经过带压电陶瓷的反射镜反射作为参考光，二者经过分束器分束后，被两个探测器接收并做差形成零差测量。Shaffer 小组使用此方法将微波电场测量灵敏度提

高到 $5 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ，除实验所用的耦合光、探测光外，外加一束参考激光，在 NBS2 处分束，NBS1 处合束，也构成零差测量，目的是用来反馈锁定压电陶瓷的位置，抑制振动、温漂等因素导致的臂长变化，以保证干涉仪相位稳定性。

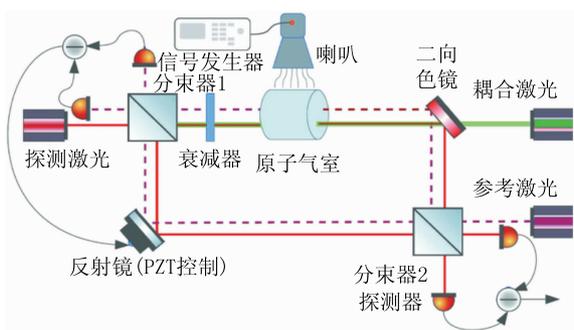


图 9 微波电场零差测量方法

2.5 微波电场频率调谐测量

受限于里德堡原子四能级系统的退相干速率，当微波电场很弱或不加时，探测光透明窗口的线宽较大，一般在兆赫兹量级，极大限制了利用 AT 分裂间距测量微波电场强度的分辨力，可以使用频率调谐方法解决这个问题，提高里德堡原子电场测量的灵敏度^[26]。

基本原理是微波电场存在频率失谐时，AT 分裂峰的间距 Δf_s 变大，满足关系式

$$\Delta f_s = \sqrt{(\delta_f)^2 + (\Delta f_0)^2}$$

式中： δ_f 为频率失谐量； Δf_0 为共振时的 AT 分裂峰间距。如图 10 所示，微波电场较弱时，失谐为 30 MHz 时的 AT 峰频率间距比零失谐时大得多。

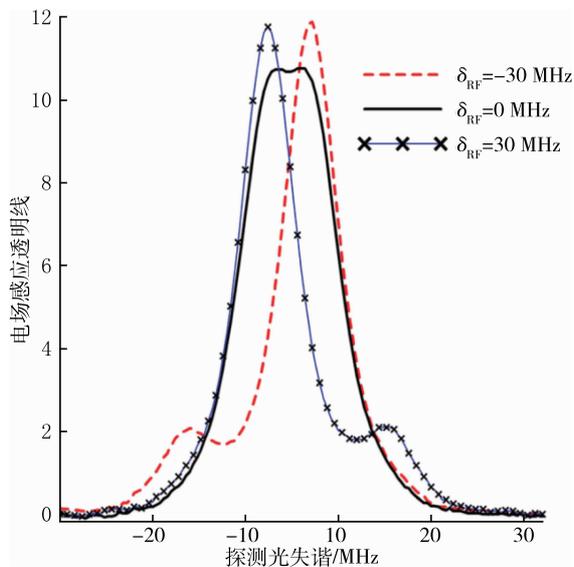


图 10 微波电场的 EIT 信号^[26]

图 11 为改变微波频率失谐对应的 AT 分裂间距变化测量结果，也即微波电场频率调谐测量实验结果。由图 11 可知，测量结果与实验结果吻合的很好。此方法使对频率为 182 GHz 和 208 GHz 的微波电场强度测量灵敏度提高了 2 倍以上，对功率更低的 sub-THz 波段微波电场强度测量很有意义。

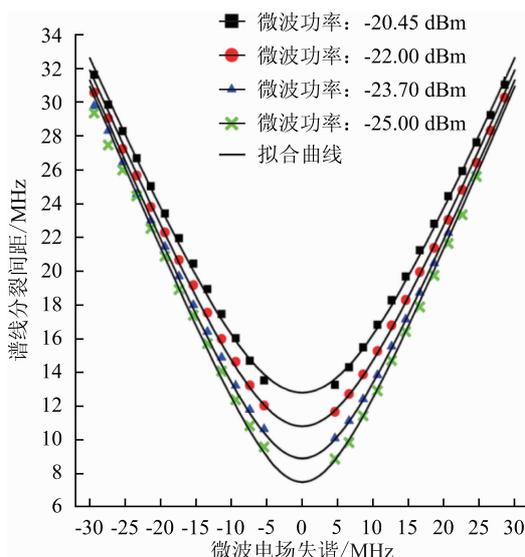


图 11 微波电场频率调谐测量实验^[26]

2.6 里德堡原子天线的数字通信

用室温里德堡原子作为微波频率接收天线，用于数字通信^[22]，通过振幅调制微波信号与里德堡原子系综相互作用，使微波信号经相敏转换至光信号，实现 8 位相移键控数字通信，受限于光子散粒噪声，通信速率最大为 8.2 Mbit/s。微波信号幅度相移调制引起的电磁感应透明信号变化如图 12 所示，由图中可知不同相移的微波幅度调制引起的探测光谱变化非常明显如图 12(b)，当调制频率为 1.98 MHz 时(图 c)，PSK 发送信号和接收信号变化较小。

里德堡原子的数据通信不受微波频率和装置尺寸的限制，而传统天线的带宽会受微波信号频率和天线尺寸影响，例如载波为 5 GHz 时的 802.11 ac Wi-Fi 标准的单通道最大数据传输率为 867 Mbit/s，带宽为 160 MHz，若天线尺寸为 0.5 mm，则带宽减少到 90 kHz，对应的数据传输率也大为降低。使用里德堡量子传感器有望实现远超传统天线能力的小型、高速微波信号接收器。

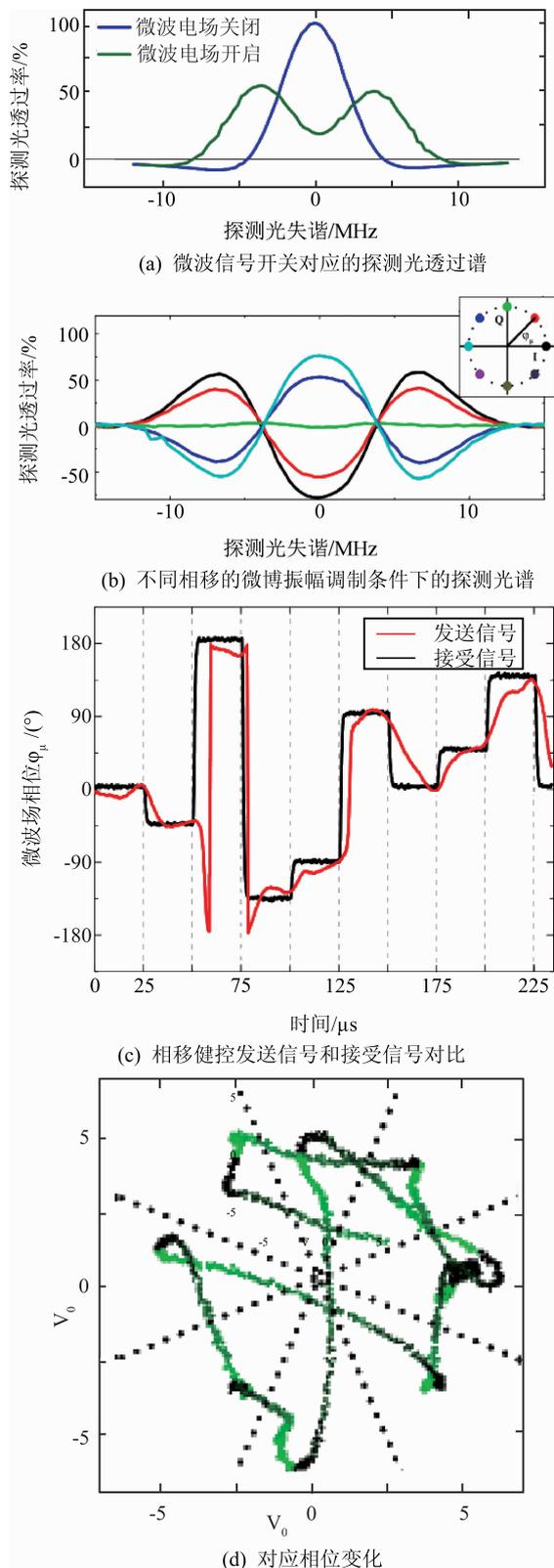


图12 微波信号幅度相移调制引起的EIT探测信号变化^[22]

3 总结和展望

里德堡子可以分为冷原子系综和热原子系综，冷原子系综以微开尔文量级温度的冷原子团作为测量介

质，需要复杂庞大的激光冷却装置且存在测量速度低、死区时间等问题，不满足里德堡原子电场计的工程化应用需求，与之对比，热原子系综以原子蒸汽气室中的原子团作为介质，在室温或接近室温的条件下工作，大为简化了装置的复杂性，同时保留了里德堡原子的优点。本文对里德堡热原子微波电场测量进行了综述。

使用激光在室温原子气室中制备里德堡原子，基于光与原子的量子干涉效应，可以将微波电场转化为电磁感应透明光谱的谱线分裂间距测量或者透明窗口吸收率的变化测量，使微波电场与原子参数联系在一起，实现微波电场的量子精密测量，具有自校准的特点，已经实现了远超传统微波天线的测量精度，是下一代电场测量标准。除了实现 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 水平分辨率， $3 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 水平灵敏度^[14] 和 $100 \text{ MHz} \sim 1 \text{ THz}$ 带宽的精确高宽带微波电场强度测量外，还可以实现微波电场偏振方向测量，亚波长电场成像和电场波前测量^[26]，其对待测电场的干扰少，且测量带宽和测量精度不依赖探头尺寸，有着广泛的应用前景。

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 $1 \text{ pV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ，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。当前已经实现了零差测量方法和微波频率调谐方法来提升测量灵敏度，除了从降低激光频率功率抖动、温漂、磁场干扰、电子噪音等传统技术噪音对测量精度的影响方面，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) 研究缓冲气体和缓冲介质^[26]对原子气室弛豫机制的影响，降低系统退相干速率，提升测量精度；
- 2) 研究六波混频^[27-28]等多光谱测量方法，以减小谱线线宽，提升测量精度；
- 3) 研究微波频率失谐对电场感应透明信号的影响^[26]，解决原子电场计频率测量离散化问题；
- 4) 研究微加工原子气室^[29-30]、空心光子晶体光纤里德堡原子^[31]、片上激光器^[32]、原子芯片等，以实现原子电场计的小型化。

参考文献

- [1] C. L. Degen, F. Reinhard, P. Cappellaro. Quantum sensing[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89(3): 035002.
- [2] 梁志国, 李新良, 王宇, 等. 计量量子化变革对我国工业计量的影响[J]. 计测技术, 2020(3): 1-6.
- [3] Hall, John L. Nobel Lecture: Defining and measuring optical

- frequencies[J]. *Review of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1279–1295.
- [4] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, et al. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level. [J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71–5.
- [5] Dang H B, Maloof A C, Romalis M V. Ultra-high sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(15): 227.
- [6] Hu Z K, Sun B L, Duan X C, et al. Demonstration of an ultrahigh-sensitivity atom-interferometry absolute gravimeter[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 043610.
- [7] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler, Harald, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(11): 819–824.
- [8] Facon A, Dietsche E K, Grosso D, et al. A sensitive electrometer based on a Rydberg atom in a Schrödinger-cat state[J]. *Nature*, 2016, 535(7611): 262.
- [9] Camparo, J. C. Atomic Stabilization of Electromagnetic Field Strength Using Rabi Resonances[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(2): 222–225.
- [10] Tishchenko V A, Tokatly V I, Luk" Yanov V I. The Beginning of the Metrology of Radio-Frequency Electromagnetic Fields and the First Standards of Electric Field Strength[J]. *Measurement Techniques*, 2003, 46(1): 76–84.
- [11] Kanda, M. Standard probes for electromagnetic field measurements[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat*, 2002, 41(10): 1349–1364.
- [12] Kanda M. Standard antennas for electromagnetic interference measurements and methods to calibrate them[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, 36(4): 261–273.
- [13] Huang W, Liang Z T, Du Y X, et al. Rydberg-atom-based electrometry[J]. *Acta Physica Sinica – Chinese Edition –*, 2015, 64(16).
- [14] Haoquan Fan, Santosh Kumar, Jonathon Sedlacek, et al. Atom based RF electric field sensing[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2015, 20(2001).
- [15] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, et al. Digital Communication with Rydberg Atoms & Amplitude-Modulated Microwave Fields[J]. *ApPhL*, 2018, 112.
- [16] Gallagher T F. *Rydberg Atoms*[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1994
- [17] Frederic P M, Agnes F V, John M B. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 633–673.
- [18] Gea-Banacloche J, Li Y, Jin S, et al. Electromagnetically induced transparency in ladder-type inhomogeneously broadened media: Theory and experiment[J]. *Physical Review A*, 1995, 51(1): 576.
- [19] Sandhya S N, Sharma K K. Atomic coherence effects in four-level systems: Doppler-free absorption within an electromagnetically-induced-transparency window[J]. *Physical Review A*. 1997, 55, 3.
- [20] Arora B, Safronova M S, Clark C W. Determination of electric dipole matrix elements in K and Rb from Stark shift measurements[J]. *Physical Review A*. 2007, 76, 052516
- [21] Fan H Q, Kumar S, Dashner R, et al. Subwavelength microwave electric-field imaging using Rydberg atoms inside atomic vapor cells[J]. *OPTICS LETTERS*, 2014, 39, 103030.
- [22] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, et al. Digital Communication with Rydberg Atoms & Amplitude-Modulated Microwave Fields[J]. *ApPhL*, 2018, 112.
- [23] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kuebler H, et al. Atom Based Vector Microwave Electrometry Using Rubidium Rydberg Atoms in a Vapor Cell[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(6): 063001.
- [24] Holloway C L, Gordon J A, Jefferts S, et al. Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe for SI-Traceable, Self-Calibrated Measurements[J]. *IEEE Trans. Antenn. Propag.* 2014, 62 6169.
- [25] Dangka S, Nyakang'o Elijah Ogaro, Kanhaiya P. Highly sensitive atomic based MW interferometry[J]. *entific Reports*, 2018, 8(1): 8692.
- [26] Seltzer S J. *Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry* [J]. Thesis (Ph. D.)-The University of Princeton – Princeton, 2008.
- [27] Jinhai Bai, Jianjun Li, Langan wu, et al. Autler-Townes spectroscopy of high-lying state by phase conjugate six-wave mixing[J]. *Chinese Physics B*, 2017(04): 211–217.
- [28] Zuo Z, Sun J, Liu X, et al. Generalized n-Photon Resonant 2n-Wave Mixing in an (n + 1) – Level System with Phase-Conjugate Geometry [J]. *Physical Review Letter*. 2006, 97, 193904.
- [29] Pellaton M, Affolderbach C, Pétremand, Y, et al. Study of laser-pumped double-resonance clock signals using a microfabricated cell [J]. *Physica Scripta*, 2013, 2012(T149): 014013.
- [30] Horsley A, Du G X, Pellaton M, et al. Imaging of Relaxation Times and Microwave Field Strength in a Microfabricated Vapor Cell[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(6).
- [31] Epple G, Kleinbach K S, Euser T G, et al. Rydberg atoms

- in hollow-core photonic crystal fibres[J]. Nature Communications, 2014.
- [32] Hummon M T, Kang S, Bopp D, et al. Photonic chip for laser stabilization to an atomic vapor with 10⁻¹¹ instability[J]. Optica, 2018, 5(5).
- [33] Gundavarapu S, Behunin R, Brodnik G M, et al. Sub-Hz Linewidth Photonic-Integrated Brillouin Laser[J]. 2018.
- [34] Jing M, Hu Y, Ma J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. Nature Physics, 2020: 1-5.
- [35] Jia F, Zhang J, Zhang L, et al. Frequency Stabilization Method for Transition to Rydberg State using Zeeman Modulation[J]. Applied Optics, 2020, 59(7).

收稿日期: 2020-10-26; 修回日期: 2020-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61727819); 国家“十三五”计量技术基础科研项目(JSJL2019205C002); 航空基金项目(201956044001)

作者简介

白金海(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为量子精密测量。参与并主持多项量子测量相关科研项目, 作为主要参与者研制了冷原子干涉绝对重力仪。



欢迎订阅《化学分析计量》

《化学分析计量》由中国兵器工业集团第五三研究所主办, 是全国性分析测试、化学计量专业技术期刊, 中国科技核心期刊, 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 中国仪器仪表学会分析仪器分会会刊, 中国石油和化工行业优秀期刊, 中国兵器工业优秀期刊, 华东地区优秀期刊, 入选美国 CA 千种表。

中国标准连续出版物号: CN 37-1315/O6, ISSN 1008-6145。月刊, 大 16 开本。每月 20 日出版。

投稿网址: www.cam1992.net; 微信公众号: chem_1992; 作者、读者 QQ 群: 285108594。

我社审稿周期为一个月, 稿件查询: 电话, 电子邮件, 微信, QQ 留言。

电话: 0531-85878224, 85878132, 85878148。

《化学分析计量》2021 年第 1 期目次

标准物质

加替沙星纯度标准物质研制
加湿气体标准物质水含量分析

分析测试

气相色谱法测定电子烟烟液及气溶胶中双乙酰和乙酰丙酮
在线超滤-离子色谱法测定地下水中碘化物
火焰原子吸收光谱法测定锌合金中镁
高通量高效液相色谱法快速检测西红花中 15 种非法添加色素
高效液相色谱-串联质谱内标法测定动物源性食品中玉米赤霉烯酮及其代谢产物
气相色谱法测定溶剂型涂料中环己酮含量
高效液相色谱法测定洗手液中水杨酸和对氯间二甲苯酚
电感耦合等离子体质谱法检测农作物土壤中的镉、锡、锰、锑、钒、钛、锶金属污染物残留
碱熔酸浸试样-碘量法测定铜冶炼白烟尘中的铜

高效液相色谱荧光检测法测定药物中的氯乙酰氯

微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定酱卤肉中铬、砷、镉、铈、铅

计量技术

离子色谱仪检定及整机性能不确定度评定
总磷测定仪校准方法

实验室管理

基于自适应蒙特卡洛法评定测量不确定度程序开发与应用
金测定的方法验证及质量控制图的建立
不确定度评定
气相色谱-质谱法测定食用植物油中短链脂肪酸的测量不确定度评定
紫外可见分光光度法测定壁纸中甲醛的不确定度评定

综述

饲料中激素类药物及其检测技术研究进展