



基于Rydberg原子天线的太赫兹测量

陈志文 余圳跃 廖开宇 黄巍 颜辉 朱诗亮

Terahertz measurement based on Rydberg atomic antenna

Chen Zhi-Wen She Zhen-Yue Liao Kai-Yu Huang Wei Yan Hui Zhu Shi-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 060702 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201870

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201870>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

连续太赫兹波双物距叠层定量相衬成像

Continuous-wave terahertz quantitative dual-plane ptychography

物理学报. 2020, 69(2): 028701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191310>

太赫兹辅助测量铷原子超快量子相干过程的理论研究

The theoretical study of terahertz-streaking photoionization for ultrafast imaging of density matrix in rubidium atom

物理学报. 2020, 69(17): 173401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200218>

应用太赫兹焦平面成像方法研究氧化镁晶体在太赫兹波段的双折射特性

Birefringence characteristics of magnesium oxide crystal in terahertz frequency region by using terahertz focal plane imaging

物理学报. 2020, 69(20): 208702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200766>

太赫兹表面极化激元

Terahertz surface polaritons

物理学报. 2017, 66(14): 148705 <https://doi.org/10.7498/aps.66.148705>

太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量

Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section

物理学报. 2019, 68(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190552>

基于二氧化钒的太赫兹编码超表面

Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide

物理学报. 2020, 69(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200891>

专题—原子制造: 基础研究与前沿探索

基于 Rydberg 原子天线的太赫兹测量*

陈志文 余圳跃 廖开宇 黄巍[†] 颜辉[‡] 朱诗亮^{††}

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广州 510006)

(2020 年 11 月 6 日收到; 2020 年 11 月 13 日收到修改稿)

Rydberg 原子在微波和太赫兹频段具有极大的电偶极矩, 利用量子干涉效应可实现对该频段电磁波场强的高灵敏探测, 理论上灵敏度可达到远高于现有探测技术的水平. 基于 Rydberg 原子量子效应的电磁场探测及精密测量技术在太赫兹的场强和功率计量、太赫兹通信和太赫兹成像等方面有着巨大的应用前景. 本文回顾了基于 Rydberg 原子量子干涉效应实现电磁波电场自校准和可溯源测量的基本理论和实验技术, 详细介绍了基于 Rydberg 原子的高灵敏太赫兹场强测量、太赫兹近场高速成像和太赫兹数字通信的基本原理和技术方案. 最后简单介绍了本研究团队正在开展的基于 Rydberg 原子的太赫兹探测工作.

关键词: Rydberg 原子, 电磁场精密测量, 太赫兹成像, 太赫兹通信

PACS: 07.50.Ls, 32.80.Rm, 42.62.Fi

DOI: 10.7498/aps.70.20201870

1 引言

1.1 电磁场的量子精密测量技术

Rydberg 原子是指主量子数 $n > 10$ 的高激发态原子, Rydberg 原子的电偶极矩相对低激发态大 2—3 个数量级 ($\propto n^2$)^[1], 因此对微波和太赫兹波的电场具有极高的灵敏度, 能够实现对微弱电场信号的探测. 典型的铯原子 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ 跃迁, 对应跃迁频率为 351.73 THz, 径向电偶极矩只有 $5.477a_0e$ (其中 a_0 为玻尔半径, e 为基本电荷), 但是铷和铯原子在对应跃迁频率 0.3—1.5 THz 范围内都具有较大的电偶极矩, 如表 1 所列. Rydberg 原子与电磁波电场的较强耦合, 会使得 Rydberg 能级参与的电磁诱导透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 效应的透明峰产生 Autler-Townes (AT) 分裂, 分裂后的双峰间距与

表 1 铷和铯的 Rydberg 原子在 THz 频段的径向电偶极矩

Table 1. Radial part of electric dipole element between Rydberg states in the THz band for Rubidium and caesium.

铷原子		铯原子	
径向电偶极矩/ a_0e	对应跃迁频率/THz	径向电偶极矩/ a_0e	对应跃迁频率/THz
509.687	0.342	513.125	0.339
424.780	0.449	421.685	0.456
376.294	0.542	379.324	0.535
336.314	0.642	339.203	0.634
302.964	0.750	301.320	0.759
266.916	0.909	275.101	0.861
263.079	0.933	265.677	0.919
233.146	1.116	232.273	1.127
229.824	1.145	208.101	1.315
201.655	1.392	201.108	1.404

* 国家自然科学基金 (批准号: 91636218, 11804104)、广东省重点研发领域计划 (批准号: 2019B030330001) 和广州市科技计划 (批准号: 201804020055, 201902020002) 资助课题.

[†] 通信作者. E-mail: WeiHuang@m.scnu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: yanhui@scnu.edu.cn

^{††} 通信作者. E-mail: slzhunju@163.com

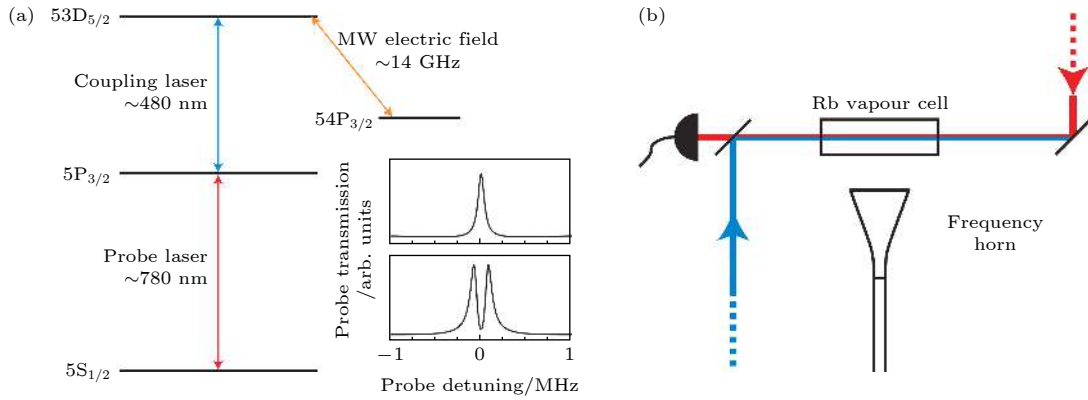


图 1 (a) Rydberg 原子量子干涉法测量微波电场强度能级示意图, 以及微波场作用前后探测光透射峰 (中下); (b) 实验测量装置图^[2]

Fig. 1. (a) Energy level diagram for the four-level system. The top part of the inset shows an example EIT feature without a microwave electric field. The bottom part of the inset shows an example EIT-AT with a microwave electric field. (b) Experimental set-up used for the experiments^[2].

耦合的拉比频率成正比, 由于拉比频率反映了电场强度的大小, 从而将强度测量利用量子干涉效应转化为频率测量, 实现可溯源高灵敏的电磁波电场强度测量.

2012 年俄克拉荷马州立大学的 Shaffer 小组^[2]通过微波场耦合两个 Rydberg 能级, 利用 Rydberg 原子的 EIT 效应和微波作用下的 AT 分裂, 实现对微波电场强度的精密测量. 所能探测的最小场强约为 $8 \mu\text{V}/\text{cm}$, 测量灵敏度达 $30 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 相关实验能级图与装置图如图 1 所示. 探测光与耦合光对向传播, 在铷原子蒸气室中与原子相互作用. 没有微波场作用时, 观测到标准的级联三能级 EIT 透射峰. 有微波场作用时, 观测到 EIT 透射峰劈裂为两个峰, 劈裂的两个峰间距为 Δf , 在一定条件下与微波耦合 Rydberg 能级的拉比频率 Ω_{MW} 满足以下关系:

$$\Omega_{\text{MW}} = 2\pi\Delta f. \quad (1)$$

考虑扫描探测光失谐时引入多普勒修正因子, 微波电场强度大小 $|E|$ 可表示为

$$|E| = \frac{\hbar}{\mu} \Omega_{\text{MW}} = 2\pi \frac{\hbar}{\mu} \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \Delta f, \quad (2)$$

其中, \hbar 是普朗克常数, μ 是 Rydberg 能级电偶极矩, Ω_{MW} 是微波拉比频率, λ_p 和 λ_c 分别是探测光和耦合光波长, Δf 是两个透射峰间距. 从 (1) 式可知, 该方法把电场强度测量转化为频率测量. 在所有的物理量中, 频率的测量精确度是最高的^[3]. 因此, 基于 Rydberg 量子干涉法测量电场强度, 能够有效溯源到国际计量标准 SI. 2007 年, 英国杜伦大

学 Mohapatra 等^[4]利用 EIT 效应实现了高激发 Rydberg 态的相干光探测. 2013 年, Shaffer 小组^[5]使用铷原子泡测量矢量电场, 微波极化方向分辨率达到 0.5° . 2014 年, Shaffer 小组^[6]利用 Rydberg 原子实现微波电场亚波长成像, 同年美国国家标准与技术研究院 (NIST) Holloway 小组^[7]利用宽带 Rydberg 原子电场探头实现自校准测量及亚波长成像, 进而实现毫米波探测^[8], 以及利用 Rydberg 原子的 EIT 效应和 AT 分裂进行亚波长分辨率的场强测绘, 对 17.04 和 104.77 GHz 的射频电场成像, 空间分辨率达到 $100 \mu\text{m}$ ^[9]. 2015 年, Shaffer 小组^[10]研究原子泡几何形状的变化对测量场强大小的影响. 2016 年他们使用菱形原子泡测量射频场时发现气室的折射率变化会导致探测光的偏转^[11]. 2017 年他们又使用频率调制技术在 5 GHz 时获得了 $3 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 噪声等效功率 (NEP), 提高了测量灵敏度^[12], 以及利用 Mach-Zehnder 干涉仪作为外差探头实现场强精密测量, 测量灵敏度可以达到 $5 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[13]. 2019 年, Holloway 小组^[14]将两个射频电场作用于原子泡, 使用外差检测实现了对弱电场的测量, 频率分辨率优于 1 Hz. 同年, 中国计量研究院宋振飞等^[15]使用连续可调谐射频载波信号实现了基于 Rydberg 原子的数字通信, 证实原子天线的载波频率可以连续调谐至 200 MHz. 2020 年, 山西大学贾锁堂研究组^[16]采用量子超外差的方法将微波场强测量的灵敏度提高到了 $55 \text{nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[16]. 同年, 华南师范大学廖开宇等^[17]利用冷 Rydberg 原子电磁诱导吸收

实现微波电场测量等.

1.2 太赫兹技术及应用前景

太赫兹 (THz) 波一般是指频率在 0.1—10 THz 范围内的电磁波, 频率介于微波和红外波段之间, 兼有微波和光波的特性, 具有低量子能量、大带宽、良好的穿透性等特点. 如图 2 所示, 太赫兹辐射位于微波与红外光之间的频率间隙中, 即所谓的“太赫兹空隙 (THz gap)”. 随着电磁空间竞争日趋白热化, 电磁频谱已成为一种极重要的战略资源, 而太赫兹波是电磁空间惟一亟待开发利用的频谱资源, 因此世界各国高度重视. 最近, 太赫兹技术已经在很多领域得到了发展和应用 [18]. 例如, 利用太赫兹对非金属和非极性物质的高透过性, 可用于安检、遥感、火场救护、战场寻敌等; 利用太赫兹波能量低、不电离特性, 可用于医学影像; 大分子的振转跃迁频率处于太赫兹范围内, 利用其光谱特性可以实现对炸药、毒品等物质的识别分类; 太赫兹频段的通信载波能够携带更多的信息, 其在空间窄束传播的性质能够有效地防止干扰和窃听, 具有很高的安全性, 是下一代无线通信和卫星通信的指定频段.

随着量子物理的广泛应用与原子光谱技术的成熟, 国际上有研究组利用 Rydberg 原子对电磁场具有的极高灵敏度, 采用量子干涉效应实现了对太赫兹场强的测量. 与传统技术相比, 基于 Rydberg

原子的太赫兹技术具有测量准确度高、自校准、可溯源、空间分辨率高以及可实时成像等优势, 非常有希望突破已有太赫兹技术在太赫兹探测计量、太赫兹通信、太赫兹高速成像等应用方向面临的瓶颈, 发展出新一代的太赫兹量子器件和新型太赫兹设备.

2 基于 Rydberg 原子的太赫兹测量技术

2.1 太赫兹场强测量

近年发展起来的基于 Rydberg 原子的量子干涉效应测量电磁波电场强度的技术已经取得了一系列重要成果 [19–21]. 如上文提到的 2012 年 Shaffer 小组 [2] 利用原子泡的量子干涉实现对微波场强精密测量. 该技术在太赫兹频段同样适用, 理论上能覆盖 0.1—10 THz 全频段, 测量灵敏度远高于现有的太赫兹探测技术. 杜伦大学 Weatheril 小组使用三光子 Rydberg 态 EIT 测量了频率为 0.634 THz 的太赫兹场强 [22], 能级示意图如图 3(a) 所示. 扫描 Rydberg 激光的失谐, 记录探测光的透射信号. 当探测光和耦合光失谐均为零时, 四能级哈密顿量为

$$\hat{H}^{4\text{-level}} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_p & 0 & 0 \\ \Omega_p & 2\Delta_{1ph} & \Omega_c & 0 \\ 0 & \Omega_c & 2\Delta_{2ph} & \Omega_R \\ 0 & 0 & \Omega_R & 2(\Delta_R + \Delta_{3ph}) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

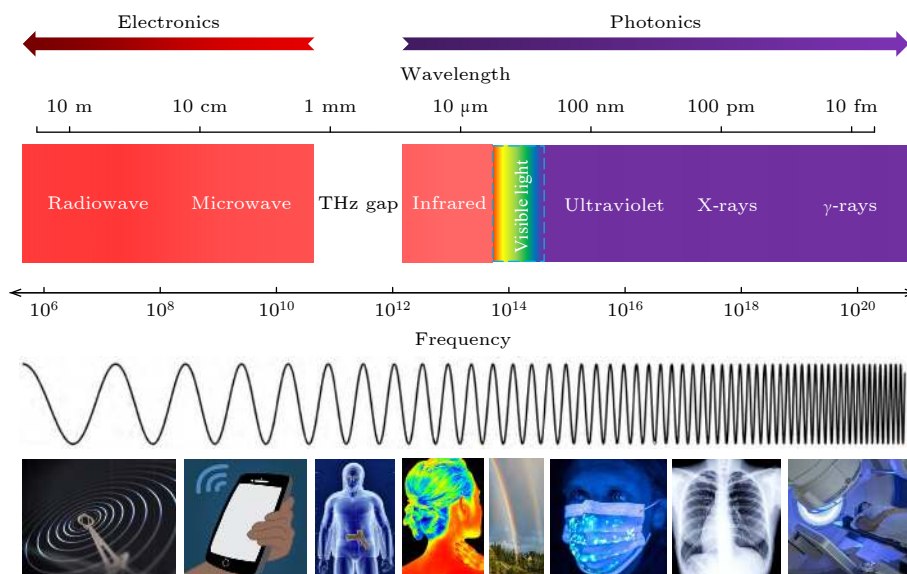


图 2 电磁波光谱 (太赫兹区域介于微波与红外之间)

Fig. 2. Electromagnetic spectrum (terahertz region between microwave and infrared).

其中 $\Delta_{1ph} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{k}_p$, $\Delta_{2ph} = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{k}_p + \mathbf{k}_c)$, $\Delta_{3ph} = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{k}_p + \mathbf{k}_c + \mathbf{k}_R)$, \mathbf{v} 是原子速度, 探测光、耦合光和 Rydberg 光波数分别为 $k_p = 2\pi/(852 \text{ nm})$, $k_c = 2\pi/(1470 \text{ nm})$, $k_R = 2\pi/(799 \text{ nm})$. 对应的拉比频率分别为 Ω_p , Ω_c 和 Ω_R , Rydberg 光失谐为 Δ_R . 为了进一步研究 EIT-AT 分裂, 引入 0.634 THz 的太赫兹场耦合 $21P_{3/2} \rightarrow 21S_{1/2}$, 使得 EIT 窗口劈裂为两个峰. 当 $\Omega_p = \Omega_c = 2\pi \times 5 \text{ MHz}$, $\Omega_R = 2\pi \times 8.4 \text{ MHz}$,

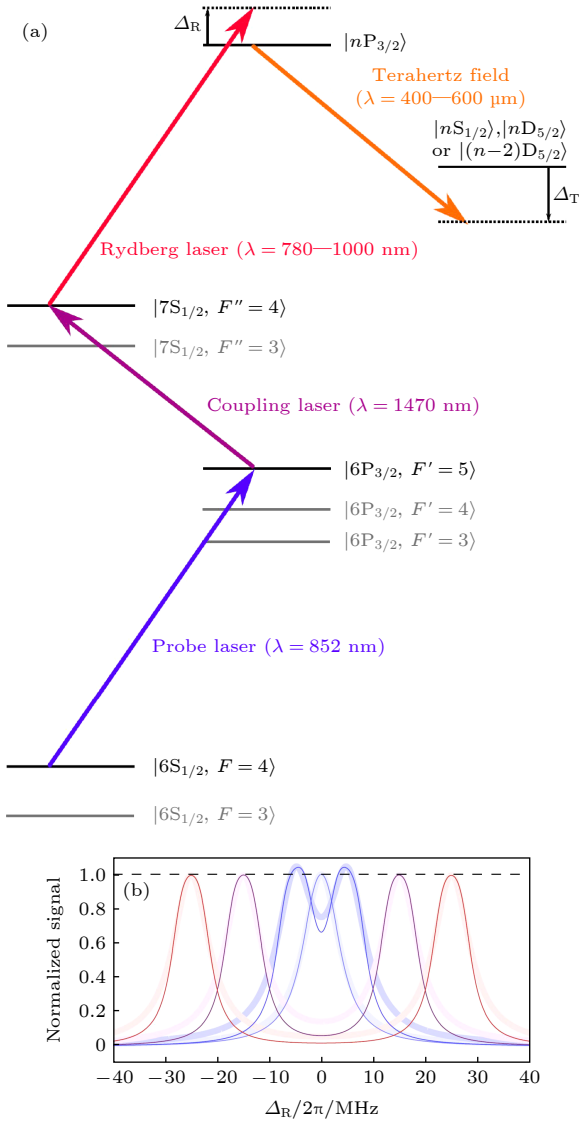


图 3 (a) Cs Rydberg 态三步激发能级图; (b) 当 $\Omega_p = \Omega_c = 2\pi \times 5 \text{ MHz}$, $\Omega_R = 2\pi \times 8.4 \text{ MHz}$, $\Omega_T = 2\pi \times [0, 10, 30, 50] \text{ MHz}$ 时, 利用 5 能级光学布洛赫模型拟合 Rydberg EIT-AT 分裂 (彩实线) 及对应的洛伦兹线性拟合 (阴影线)^[22]

太赫兹拉比频率 $\Omega_T = 2\pi \times [0, 10, 30, 50] \text{ MHz}$ 时, EIT-AT 分裂如图 3(b) 所示.

打开太赫兹场之前, 实验探测到的三光子 EIT 谱线如图 4(a) 所示. 使用 $\text{FWHM} = (8.4 \pm 1.6) \text{ MHz}$ 的洛伦兹线形进行拟合, 拟合误差很小, 说明该模

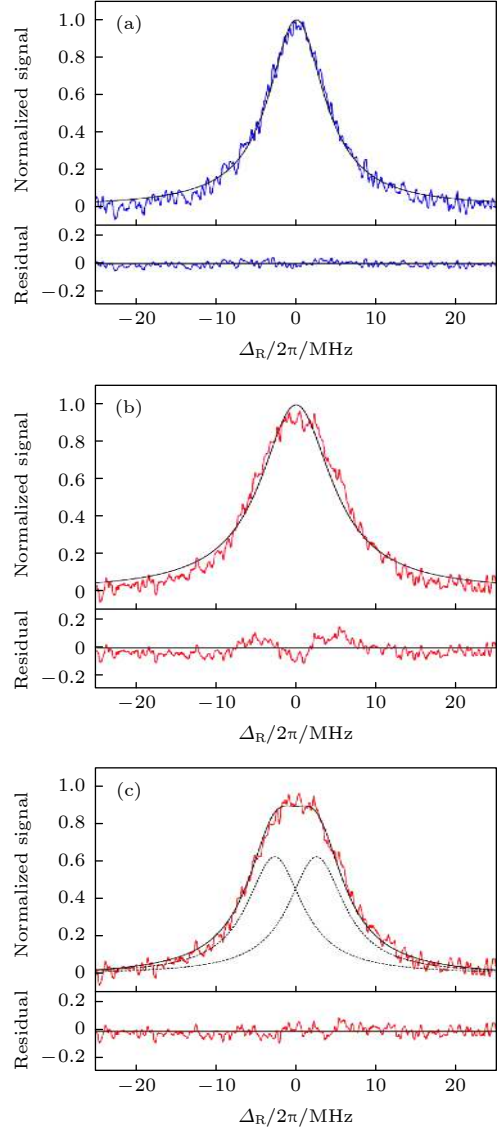


图 4 基于 Rydberg EIT 的 THz 场强测量 (a) 当 $\Omega_T = 0$ 时, 使用单洛伦兹线性拟合 EIT 透射峰; (b) 当 $\Omega_T/2\pi = (5.2 \pm 1.4) \text{ MHz}$ 时, 使用单洛伦兹线性拟合 EIT-AT 分裂峰; (c) 当 $\Omega_T/2\pi = (5.2 \pm 1.4) \text{ MHz}$ 时, 使用双洛伦兹线性拟合 EIT-AT 分裂峰; 下方数据为各自对应的拟合残差^[22]

Fig. 4. THz electric field amplitude measurement: (a) Probe transmission line shape for $\Omega_T = 0$ and best fit line (dashed) is a single Lorentzian; (b) probe transmission line shape for $\Omega_T/2\pi = (5.2 \pm 1.4) \text{ MHz}$ and best fit line (dashed) is a single Lorentzian; (c) probe transmission line shape for $\Omega_T/2\pi = (5.2 \pm 1.4) \text{ MHz}$ and a summed pair of Lorentzian peaks. Below datas are residuals for different models^[22].

型与实验数据符合得很好^[23]. 打开太赫兹场后, 以 FWHM 作为自由参数的单个洛伦兹线型进行拟合 (图 4(b)), 虽然透射峰线型变化不大, 但是从拟合误差可以看出, 这时理论模型和实验数据具有较大偏差. 随后使用双洛伦兹线型拟合数据 (图 4(c)). 限制每个洛伦兹峰的宽度以匹配 EIT 劈裂峰, 并将峰的高度和双峰的间距设置为自由参数, 拟合误差结果表明, 该模型与实验数据匹配得较好. 提取 EIT 峰劈裂对应的太赫兹场拉比频率 $\Omega_T/2\pi = (5.2 \pm 1.4)$ MHz, 可以计算得到太赫兹场的场强为 (25 ± 5) mV·cm⁻¹.

特定的 Rydberg 态只能耦合到少数几个接近共振的太赫兹频率, 但可以选择不同的 Rydberg 态来耦合不同的频率, 实现很宽的太赫兹频域的探测. 如图 5(c) 所示^[24], 从低频到 3 THz, Rydberg 原子都具有较大的电偶极矩, 可作为太赫兹频域场强和功率计量标准的理想候选者^[25].

2.2 太赫兹近场高速成像

将难以探测的太赫兹信号转换为其他容易探

测的信号, 例如电信号等, 是目前实现太赫兹探测的基本技术路线, 利用 Rydberg 原子同样可以实现这样的太赫兹转化探测过程, 并能够实现高空间分辨率的太赫兹成像. 早期用具有空间分布的太赫兹场电离 Rydberg 原子, 将生成的离子聚焦到空间分辨的微通道板上实现了对太赫兹场强的空间可分辨探测和成像^[26,27]. 但是这一技术对 Rydberg 原子是破坏性的, 只能进行单次成像, 离子成像的分辨率也不高.

2016 年, 杜伦大学 Weatherill 小组^[28] 采用太赫兹抽运 Rydberg 原子, 通过对自发辐射产生的可见光波段荧光进行成像的方法, 实现了太赫兹驻波场强空间分布的近场实时成像. 实验装置示意图如图 5(a) 所示, 红外激光束与 THz 波束同轴对准, 穿过 2 mm 长的石英铯蒸汽泡. 在太赫兹场和激光束的空间交叠位置处原子被激发到 21S_{1/2} 的 Rydberg 态, 并在可见光波段发出荧光, 如图 5(d) 所示. 激光束和太赫兹波水平穿过成像区, 部分太赫兹波被反射从而产生驻波干涉结构, 图 5(b) 为形成的干涉图样. 图像获取时间由荧光强度、相机

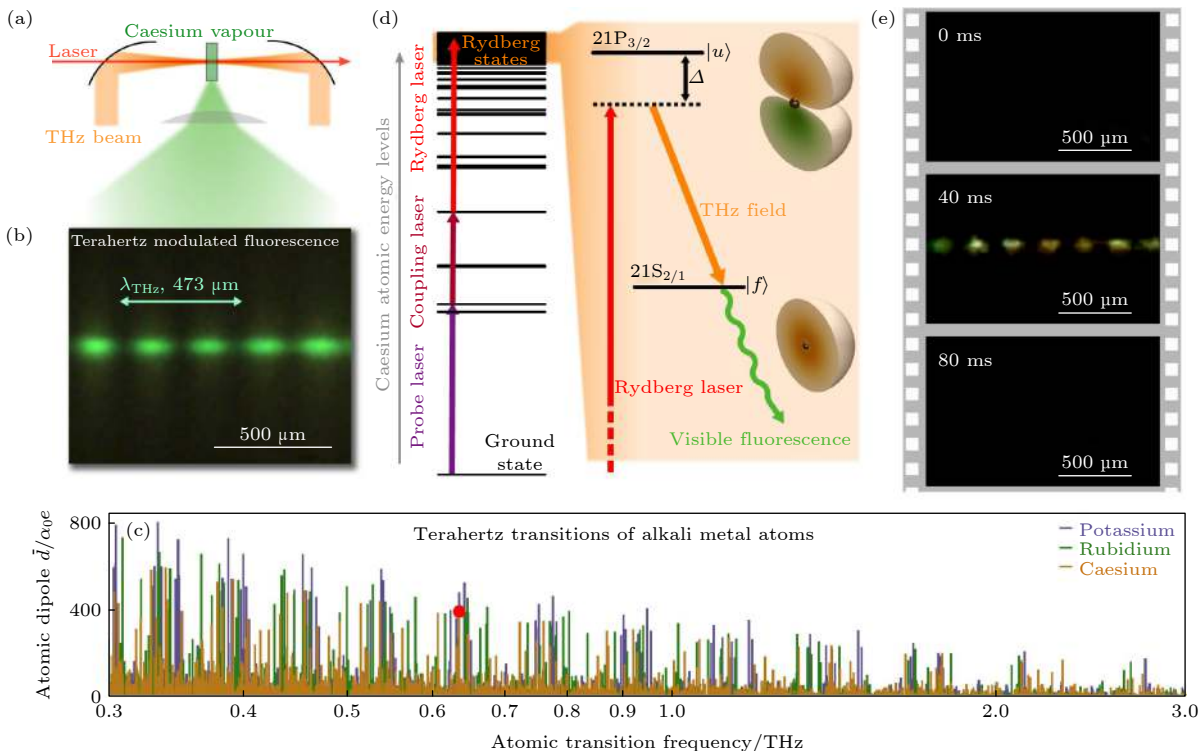


图 5 基于 Rydberg 原子太赫兹近场成像 (a) 实验系统装置; (b) 太赫兹荧光成像; (c) Rydberg 原子在 THz 波段下共振跃迁频率对应的跃迁偶极矩; (d) 铯原子能级激发图; (e) 录制的视频^[28]

Fig. 5. Real-time near-field THz imaging based on Rydberg atom: (a) Experimental layout; (b) spatially resolved THz intensity; (c) resonant transitions between Rydberg states in the THz band; (d) caesium atomic energy levels and laser excitation scheme; (e) real time video^[28].

灵敏度和信噪比决定. 使用商用 CCD 相机, 录制了 25 帧的视频 (40 ms/帧). 在图 5(e) 中显示了前三帧. 由于在录制视频时, THz 源与摄像机的快门同步门控, 因此帧数会交替显示该驻波场存在或消失. 这种成像技术无需多次重复采集数据或者扫描探测器位置, 因此成像是实时的. 成像的带宽极限由 Rydberg 能级寿命决定, 一般约为微秒量级.

使用 Autler-Townes 校准技术, 对一小部分像素求平均值以找到归一化的相机信号, 其中红、黄、蓝代表相机不同通道采集的数据. 在太赫兹源处使用衰减器来控制太赫兹强度. 当太赫兹场的强度为零时, 非共振激光激发到 $21P_{3/2}$ 态会产生弱的背景荧光, 在图像中扣除背景荧光. 一旦测量得到灵敏度, 记录太赫兹场图像时就无需再次重复校准和做背景荧光测量. CCD 相机获得的图像像素亮度与 THz 电场强度成正比, 如图 6(b) 所示. 基于 Rydberg 原子太赫兹近场成像不仅拥有在二维平面中快速采集图像的潜力, 而且与传统扫描探针测绘太赫兹场强空间分布时花费数十小时获取图像的技术相比具有显著优势^[29–31].

2020 年, Weatherill 小组^[32]在太赫兹成像领域进一步推进了相关工作, 用 Rydberg 原子实现了 THz 场到光场的非相干转换, 从而可使用商用相机通过收集 Rydberg 原子的自发辐射荧光信号实现超高速图像采集. 三步激发将原子制备到 $14P_{3/2}$ 态, 过程如图 7(a) 所示. 共振 THz 场将原子从 $14P_{3/2}$ 态抽运到邻近的 $13D_{5/2}$ 态. $13D_{5/2}$ 态 Rydberg 原子自发辐射出绿色荧光 (535 nm) 下落回中间态 $6P_{3/2}$, 自发辐射出的荧光可通过光学传感器进行检测并获取图像信息. 在 0.55 THz 场的

作用下, 利用 1 cm^2 大小, 具有 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 像素阵列的 CCD, 可获取 0.55 THz 场的视频信号. 其空间分辨率接近衍射极限, 最小探测功率为 $(190 \pm 30)\text{ fW} \cdot \text{s}^{-1/2}$, 每秒可获取 3000 帧.

成像系统设置如图 7(c) 所示. 铯蒸气石英池, 使用同轴红外激光束将原子制备到 Rydberg 态, 光束经过扁平整形, 在 xy 平面上形成 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚的激发原子面. 低功率连续 THz 波 (在 0.55 THz 时功率达 $17\text{ }\mu\text{W}$) 沿 z 方向传播, 垂直于铯泡平面. 在 z 轴方向, 非球面透镜组成的 1:1 成像系统将 THz 图像投影到激发原子面上. 在激光与太赫兹场重叠区域内, 原子发出的荧光被 CCD 相机收集. 同时使用窄带滤光片进行滤波, 以最大程度减少到达相机的背景荧光. 如图 7(d) 中的示意图所示, 通过在成像目标平面上放置一个金属掩模改变太赫兹场强的空间分布图像, 利用 Rydberg 原子自发辐射的绿色荧光来获取高分辨率的“ Ψ ”形图像.

为了验证成像系统的高速性能, 演示了在高帧速率下的 THz 动态成像. 图 8(a) 为光学斩波片旋转速率为 700 r/min 时的运动, 成像帧数在 3 kHz. 图 8(b) 为帧数在 500 Hz 时的水滴下落情况. 与其他太赫兹成像系统相比, 它的速度和灵敏度 (最小探测功率可以达到 $(0.12 \pm 0.02)\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$) 都有了显著提高, 通过相对简单的调整有望进一步提高成像性能. 例如, 通过减小铯泡腔室的厚度 ($<200\text{ }\mu\text{m}$) 并增加抗反射涂层, 可以减少太赫兹场反射引起的干涉效应, 从而提高图像质量; 通过使用更先进的太赫兹透镜系统来提高图像分辨率; 通过使用更大的铯泡腔室来扩展 THz 传感器的面积, 以形成更大的原子激发面, 提升成像区域. 这

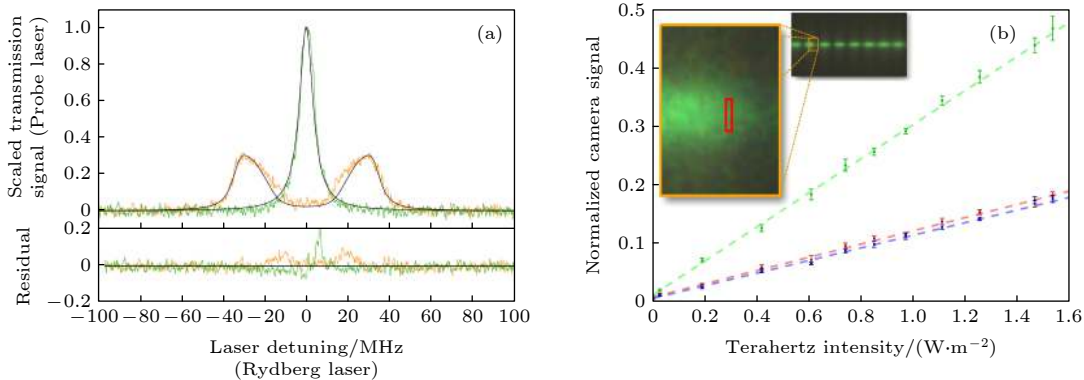


图 6 太赫兹场强校准 (a) 利用 EIT 效应测量 THz 场强; (b) 相机校准, 相机获得的图像像素亮度与 THz 电场大小成正比^[28]

Fig. 6. (a) THz electric field measurement using electromagnetically induced transparency (EIT); (b) camera calibration. The camera signal as a function of THz intensity^[28].

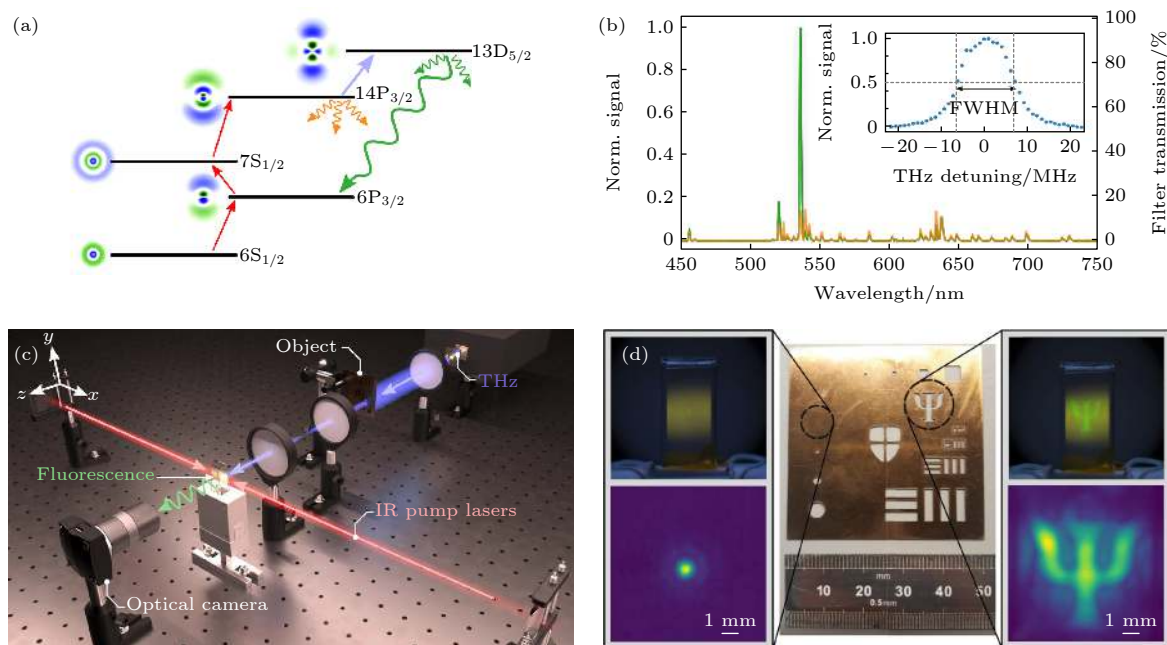


图 7 基于 Rydberg 原子太赫兹超高速成像 (a) 铯原子能级示意图; (b) THz 场开启 (绿色) 和关闭 (橙色) 时的荧光光谱信号; (c) 实验装置图; (d) 放置在成像目标位置处的金属掩模^[32]

Fig. 7. THz imaging at ultrahigh speed based on Rydberg atom: (a) Internal energy structure of caesium; (b) spectral characteristics of the fluorescence from the vapor, both with and without the THz field (green and orange lines, respectively); (c) diagram of the imaging setup described in this work; (d) metal mask (center) placed in the object plane of the system^[32].

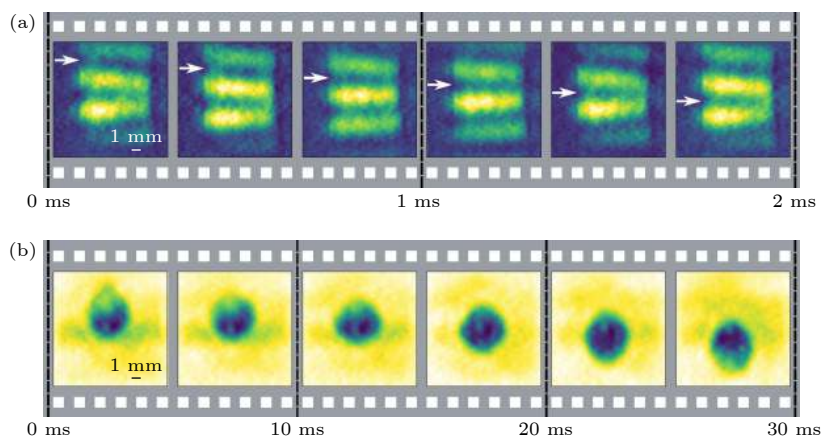


图 8 超高速太赫兹成像视频 (a) 700 r/min 转速下的光学斩波片运动; (b) 捕捉到自由下落的水^[32]

Fig. 8. Ultrahigh-speed THz video: (a) THz video of an optical chopper wheel rotating at 700 r/min; (b) capture the dynamics of a water droplet in free fall^[32].

种基于 Rydberg 原子太赫兹成像技术的多功能性和高灵敏度, 在生物成像和生产线质量控制等领域拥有重大的应用价值^[33-35].

2.3 基于 Rydberg 原子的太赫兹通信

太赫兹通信技术是当今世界各科技强国争先抢占的科学技术制高点. 太赫兹通信与微波通信相比, 具有带宽大、信息传输容量高等优势. 与激光通信相比, 太赫兹通信对平台稳定性和跟瞄要求较

低. 国际联盟指定的下一代无线通信和卫星通信频段中就包括了太赫兹频段. 太赫兹通信技术虽然具有远大的应用前景, 但是现有技术仍存在着若干问题. 基于 Rydberg 原子的太赫兹数字通信, 有望实现多路转换、多路复用、多路并行的快速通信, 可以避免传统天线中的热噪声^[36], 大幅度提高太赫兹通信距离. 2018 年, 美国陆军研究实验室 Meyer 等^[37] 演示了幅度调制微波通信, 该技术可以推广到太赫兹频段的数字通信.

Rydberg 原子数字通信的实验装置和能级系统示意图如图 9(a) 和图 9(b) 所示. 在发送端, 将通信的基带数字信号混合到与 Rydberg 原子共振的微波中. 原子蒸气室作为载波信号接收端, 吸收混频的微波信号发生 EIT-AT 分裂, 将接收到的频带信号转化为探测光的振幅相位 φ_μ . 外部利用外差探头, 经过锁相放大器进行相位解调: $\varphi_\mu = \arctan(V_Q/V_I)$, 把相位信息转化为正交电压信号. 图 9(e) 所示为典型的电场作用下的 EIT 和 AT 分裂; 图 9(f) 给出了在解调后的同向电压信号 V_I 与 5 种不同编码相位的实例. 在此基础上, 他们通过改变调制相位, 演示了八相移键控 (8PSK) 通信方案. 图 9(g) 和图 9(h) 给出了信号接收端接收到的相位信号和相应的相位轨迹.

Rydberg 原子天线也可以用作太赫兹通信, 本文提出了一个基于四能级铯原子系统的太赫兹通信方案. 如图 10(a) 所示, $6S_{1/2} (F=4)$ 的 Cs 原子为 $|1\rangle$ 态, $6P_{3/2} (F'=5)$ 为 $|2\rangle$ 态, $25S_{1/2}$ 与 $25P_{3/2}$ 为 Rydberg 的 $|3\rangle$ 态和 $|4\rangle$ 态. 探测光波长为 852 nm, 耦合 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 态跃迁, 对应的拉比频率为 Ω_p . 耦合光波长为 515 nm, 对应的拉比频率为 Ω_c , 耦合 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 态跃迁. 选取 338.75 GHz 大小的 THz 场用于耦合两个 Rydberg 态 $|3\rangle \leftrightarrow |4\rangle$, 对应的跃迁拉比频率为 Ω_T .

四能级哈密顿量 $H^{4\text{-level}}$ 表述如下:

$$H = \hbar[\Omega_p|1\rangle\langle 2| + \Omega_c|2\rangle\langle 3| + \Omega_T|3\rangle\langle 4| - \Delta_p|2\rangle\langle 2| - (\Delta_p + \Delta_c)|3\rangle\langle 3| - (\Delta_p + \Delta_c - \Delta_T)|4\rangle\langle 4| + \text{h.c.}], \quad (4)$$

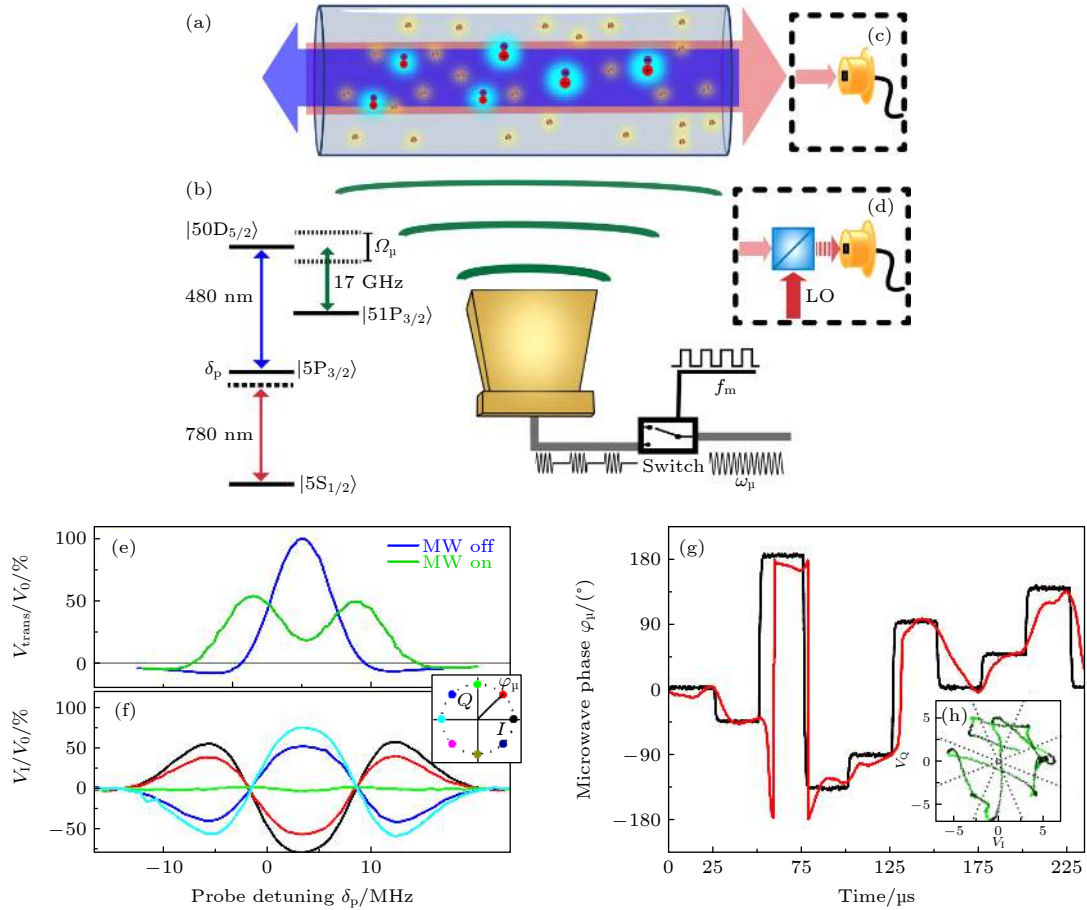


图 9 基于 Rydberg 原子天线的数字通信 (a) 实验装置图; (b) 能级示意图; (c) 使用光电探测器测量探测光; (d) 使用外差探头测量探测光; (e) Rydberg EIT (蓝色) 和 AT 分裂 (绿色); (f) 5 种不同编码实例; (g) 接收到的 8PSK 相位信息; (h) 8PSK 相位信息对应的相位轨迹^[37]

Fig. 9. Digital communication based on Rydberg atom: (a) Experimental set-up used for the experiments; (b) energy level diagram for a ladder-EIT system used for the experiments; (c) probe intensity modulation measured with a fast photodetector; (d) probe intensity modulation measured with an optical heterodyne; (e) Rydberg EIT (blue) and AT splitting (green) obtained by measuring probe transmission; (f) example demodulated transmission signals; (g) 8PSK sent and received phases; (h) phase constellation of the received phase in panel (g)^[37].

其中拉比频率 $\Omega_p = \mu_{12}E_p/\hbar$, $\Omega_c = \mu_{23}E_c/\hbar$, $\Omega_T = \mu_{34}E_T/\hbar$ 以及对应的失谐 $\Delta_p = \omega_p - \omega_{12}$, $\Delta_c = \omega_c - \omega_{23}$, $\Delta_T = \omega_T - \omega_{34}$. 探测光为弱场, 当 $\Omega_c = 2\pi \times 5.72$ MHz, 太赫兹拉比频率分别为 $\Omega_T = 2\pi \times [0, 1, 2.5, 5]$ MHz 时, EIT-AT 劈裂的数值计算结果如图 10(b) 所示. 对太赫兹载波进行幅度调制, 所获得的 EIT 信号也会带有调制信息. 由 EIT 信号的幅度变化可得到幅度调制信息. 通过锁相放大器调制解调, 可得到相位信息. 由此可实现数字通信中的移相键控、正交振幅调制等常用编码方法的信息接收和读取.

2.4 华南师范大学 Rydberg 太赫兹测量进展

Rydberg 太赫兹实验装置如图 11(a) 所示, 探

测光(耦合光)光斑束腰半径为 $120 \mu\text{m}$ ($70 \mu\text{m}$), 功率为 $82.12 \mu\text{W}$ (12.24mW). 探测光和耦合光在 y 方向共轴相向传播, 太赫兹源沿 x 方向传播, 作用于铯原子泡. 实验所用的能级图如图 10(a) 所示. 实验中利用饱和吸收稳频锁定探测光的激光频率, 以满足 $6S_{1/2} (F=4) \rightarrow 6P_{3/2} (F'=5)$ 能级跃迁, 耦合光频率在 $6P_{3/2} (F'=5) \rightarrow 25S_{1/2}$ 能级跃迁附近扫描. 图 11 (b) 中的黑色实线为探测到的 EIT 信号. 调节太赫兹频率至 338.75GHz , 耦合 Rydberg 能级为 $25S_{1/2} \rightarrow 25P_{3/2}$. 当太赫兹场作用时, 原 Rydberg 三能级系统的 EIT 透明窗口发生 AT 分裂, 且随着信号源功率的增大, AT 分裂间距增大, 如图 11(b) 中黄、粉、绿色实线所示.

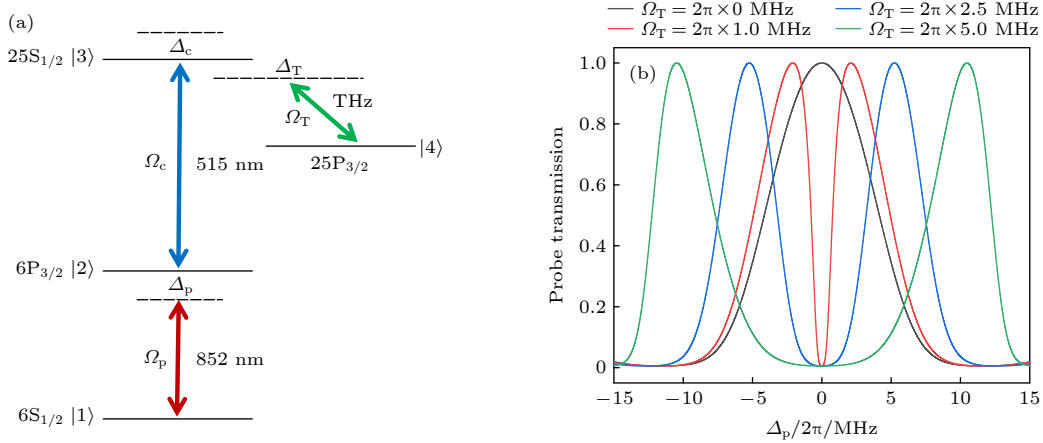


图 10 (a) Rydberg 四能级系统; (b) 当电磁场拉比频率为 $\Omega_T = 2\pi \times [0, 1, 2.5, 5]$ MHz 时, 分别对应的 EIT-AT 分裂模拟 (黑色、红色、蓝色、绿色)

Fig. 10. (a) Rydberg four-level system; (b) Autler-Townes splitting simulation for $\Omega_T = 2\pi \times [0, 1, 2.5, 5]$ MHz (black, red, blue and green solid line, respectively).

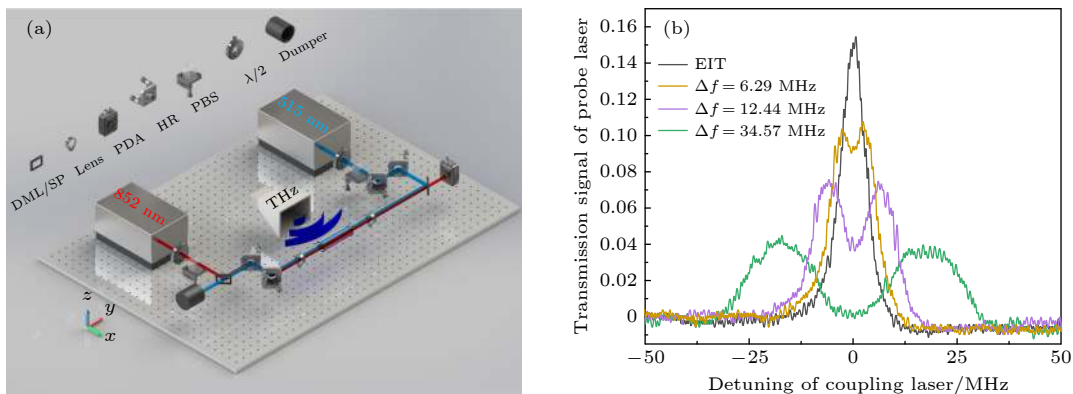


图 11 (a) Rydberg 太赫兹实验装置示意图; (b) 实验中测到的不同太赫兹电场强度下的 EIT 信号 (黑色实线, 太赫兹场关闭; 黄、粉、绿色实线, 增大信号源功率分别对应的 AT 分裂 $\Delta f = 6.29, 12.44, 34.57$ MHz)

Fig. 11. (a) Schematic diagram of Rydberg terahertz experimental device; (b) transmission signal of probe laser (black solid line, without THz; yellow, pink and green solid line, with THz for $\Delta f = 6.29, 12.44, 34.57$ MHz).

3 总结和展望

Rydberg 原子在微波和太赫兹频段具有极大的电偶极矩, 利用量子干涉效应可实现对该频段电磁场强的高灵敏探测, 理论上灵敏度可达到远高于现有探测技术的水平. 因此在微波尤其是太赫兹频段, 基于 Rydberg 原子量子效应的电磁场探测及精密测量技术在太赫兹的场强和功率计量、太赫兹通信和太赫兹成像等方面有着巨大的应用前景. 太赫兹技术被誉为“改变未来世界的十大技术”之一, 在安检、质检、火场救援、医学成像、无线通信和卫星通信等方面有着广阔的应用前景, 是美欧日等科技强国争夺的重点领域. 太赫兹技术需要综合多个学科, 发展跨领域的技术, 现有的太赫兹技术仍存在着难以突破的瓶颈. 随着量子物理的广泛应用与原子光谱技术的成熟, 国际上有研究组利用 Rydberg 原子对电磁场具有的极高灵敏度, 采用量子干涉效应实现了对太赫兹场强的测量. 与传统技术相比, 基于 Rydberg 原子的太赫兹技术具有测量准确度高、自校准、可溯源、空间分辨率高、可实时成像等优势, 非常有希望突破已有太赫兹技术在太赫兹探测和计量、太赫兹通信、太赫兹高速成像等应用方向面临的瓶颈, 发展出新一代的太赫兹量子器件和新型太赫兹设备.

参考文献

- [1] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge: Cambridge University Press) pp38–49
- [2] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Low R, Pfau T, Shaffer J P 2012 *Nat. Phys.* **8** 819
- [3] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, Peik E, Schmidt P O 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 637
- [4] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [5] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, Shaffer J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 063001
- [6] Fan H Q, Kumar S, Daschner R, Kübler H, Shaffer J P 2014 *Opt. Lett.* **39** 3030
- [7] Holloway C L, Gordon J A, Jeerts S, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S A, Thaicharoen N, Raitchel G 2014 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **62** 6169
- [8] Gordon J A, Holloway C L, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S, Thaicharoen N, Raitchel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 024104
- [9] Holloway C L, Gordon J A, Schwarzkopf A, Anderson D A, Miller S A, Thaicharoen N, Raitchel G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 244102
- [10] Fan H Q, Kumar S, Sheng J T, Shaffer J P 2015 *Phys. Rev. Appl.* **4** 044015
- [11] Fan H Q, Kumar S, Kübler H, Shaffer J P 2016 *J. Phys. B* **49** 104004
- [12] Kumar S, Fan H Q, Kübler H, Jahangiri A J, Shaffer J P 2017 *Opt. Express* **25** 8625
- [13] Kumar S, Fan H Q, Kübler H, Sheng J T, Shaffer J P 2017 *Sci. Rep.* **7** 42981
- [14] Gordon J A, Simons M T, Haddab A H, Holloway C L 2019 *AIP Adv.* **9** 045030
- [15] Song Z F, Liu H P, Liu X C, Zhang W F, Zou H Y, Zhang J, Qu J F 2019 *Opt. Express* **27** 8848
- [16] Jing M Y, Hu Y, Ma J, Zhang H, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2020 *Nat. Phys.* **16** 911
- [17] Liao K Y, Tu H T, Yang S Z, Chen C J, Liu X H, Liang J, Zhang X D, Yan H, Zhu S L 2020 *Phys. Rev. A* **101** 053432
- [18] Hafez H A, Chai X, Ibrahim A, Mondal S, Férachou D, Ropagnol X, Ozaki T 2016 *J. Opt.* **18** 093004
- [19] Holloway C L, Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, Anderson D A, Raitchel G, Voran S D 2020 *IEEE Antennas Propag. Mag.*
- [20] Huang W, Liang Z T, Du Y X, Yan H, Zhu S L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 160702 (in Chinese) [黄巍, 梁振涛, 杜炎雄, 颜辉, 朱诗亮 2015 物理学报 **64** 160702]
- [21] Jiao Y C, Zhao J M, Jia S T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 073201 (in Chinese) [焦月春, 赵建明, 贾锁堂 2018 物理学报 **67** 073201]
- [22] Wade C G 2018 *Terahertz Wave Detection and Imaging with a Hot Rydberg Vapour* (Switzerland: Springer Theses) pp55–63
- [23] Hughes I, Hase T 2010 *Measurements and Their Uncertainties* (Oxford: Oxford University Press) pp74–83
- [24] Šibalić N, Pritchard J D, Adams C S, Weatherill K J 2017 *Comput. Phys. Commun.* **220** 319
- [25] Raimond J M, Goy P, Vitrant G, Haroche S 1981 *J. Phys. Colloques* **42** C8-37
- [26] Drabbels M, Noordam L D 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1797
- [27] Gurtler A, Meijer A S, Van der Zande W J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 222
- [28] Wade C G, Šibalić N, De Melo N R, Kondo J M, Adams C S, Weatherill K J 2016 *Nat. Photonics* **11** 40
- [29] Mitrofanov O, Tan T, Mark P R, Bowden B, Harrington J A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 171104
- [30] Bitzer A, Walther M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 231101
- [31] Seo M A, Adam A J L, Kang J H, Lee J W, Jeoung S C, Park Q H, Planken P C M, Kim D S 2007 *Opt. Express* **15** 11781
- [32] Downes L A, MacKellar A T, Whiting D J, Bourgenot C, Adams C S, Weatherill K J 2020 *Phys. Rev. X* **10** 011027
- [33] Jansen C, Wietzke S, Peters O, Scheller M, Vieweg N, Salhi M, Krumbholz N, Jrdens C, Hochrein T, Koch M 2010 *Appl. Opt.* **49** E48
- [34] Jepsen P, Cooke D, Koch M 2011 *Laser Photonics Rev.* **5** 124
- [35] Mittleman D M 2018 *Opt. Express* **26** 9417
- [36] Hanzo L, Webb W T, Keller T 2000 *Single- and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation: Principles and Applications for Personal Communications, WATM and Broadcasting* (2nd Ed.) (Southampton: Wiley-IEEE Press) pp23–56
- [37] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K, Kunz P D 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 211108

SPECIAL TOPIC—Toward making functional devices at an atomic scale:
Fundamentals and frontiers

Terahertz measurement based on Rydberg atomic antenna^{*}

Chen Zhi-Wen She Zhen-Yue Liao Kai-Yu Huang Wei[†]
Yan Hui[‡] Zhu Shi-Liang^{††}

(*Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

(Received 6 November 2020; revised manuscript received 13 November 2020)

Abstract

Rydberg atoms have large electric dipole moments in the microwave and terahertz frequency band. The detection of electromagnetic field intensity in this frequency band can be achieved by using quantum interference effects. Theoretically, this detection method can have a sensitivity much higher than the traditional detection methods. Therefore, electromagnetic field detection and precision measurement technology based on Rydberg atomic quantum effects has great application prospects in terahertz field strength and power measurement, terahertz communication and imaging. In this paper, we review the basic theory and experimental methods to realize the self-calibration and traceability measurement of electromagnetic field based on Rydberg atomic quantum effects. The principle and technical scheme of high-sensitivity terahertz field strength measurement, terahertz near-field high-speed imaging and terahertz digital communication based on Rydberg atom are introduced in detail. Finally, the processing terahertz detection work based on Rydberg atom by our research team is also mentioned briefly.

Keywords: Rydberg atom, precise measurement of electromagnetic field, terahertz imaging, terahertz communication

PACS: 07.50.Ls, 32.80.Rm, 42.62.Fi

DOI: [10.7498/aps.70.20201870](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201870)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91636218, 11804104), the Key Area Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2019B030330001), and the Key Project of Science and Technology of Guangzhou, China (Grant Nos. 201804020055, 201902020002).

[†] Corresponding author. E-mail: WeiHuang@m.scnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yanhui@scnu.edu.cn

^{††} Corresponding author. E-mail: slzhunju@163.com