

Rydberg 原子的电磁诱导透明光谱的噪声转移特性

贾玥 陈肖含 张好 张临杰 肖连团 贾锁堂

Noise transfer characteristics of Rydberg electromagnetically induced transparency

Jia Yue Chen Xiao-Han Zhang Hao Zhang Lin-Jie Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 213201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181168

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181168>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Rydberg 原子的微波电磁感应透明 -Autler-Townes 光谱](#)

Microwave electromagnetically induced transparency and Autler-Townes spectrum of cesium Rydberg atom

物理学报.2018, 67(9): 093201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172645>

[基于 Rydberg 原子的超宽频带射频传感器](#)

Broadband Rydberg atom-based radio-frequency field sensor

物理学报.2018, 67(7): 073201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172636>

[基于量子相干效应的无芯射频识别标签的空间散射场测量](#)

Measurement of backscattered electric field of chipless radio frequency identification tag based on Rydberg atoms

物理学报.2017, 66(24): 243201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.243201>

[超冷铯 Rydberg 原子的 Autler-Townes 分裂](#)

Autler-Townes splitting of ultracold cesium Rydberg atoms

物理学报.2017, 66(21): 213201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.213201>

[不同原子在飞秒强激光场中的里德堡态激发和双电离](#)

Rydberg state excitations and double ionizations of different atoms in strong femtosecond laser field

物理学报.2016, 65(22): 223201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.223201>

Rydberg原子的电磁诱导透明光谱的噪声转移特性*

贾玥¹⁾²⁾ 陈肖含¹⁾²⁾ 张好¹⁾²⁾ 张临杰^{1)2)†} 肖连团¹⁾²⁾ 贾锁堂¹⁾²⁾

1)(山西大学激光光谱研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

2)(山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2018年6月14日收到; 2018年8月27日收到修改稿)

基于马赫-曾德尔干涉仪和平衡零拍探测技术研究了Cs原子 $6S_{1/2} \leftrightarrow 6P_{3/2} \leftrightarrow 62D_{5/2}$ Rydberg态阶梯型三能级系统电磁诱导透明效应中耦合光场的噪声向探测光场相位噪声的转移特性. 实验中探测光频率锁定在Cs原子 $6S_{1/2} \leftrightarrow 6P_{3/2}$ 态共振跃迁线上, 通过扫描 $6P_{3/2}$ 到 $62D_{5/2}$ 态跃迁的耦合光频率, 测量了Rydberg态电磁诱导透明光谱. 利用探测光经过声光调制器后的一级衍射光实现了马赫-曾德尔干涉仪的相位锁定, 测量了不同锁定相位情况下的电磁诱导透明光谱, 实验结果与阶梯型三能级系统的理论计算结果符合得很好. 在此基础上详细研究了耦合光频率共振在 $6P_{3/2}$ 到 $62D_{5/2}$ 态跃迁线上时, 耦合光频率噪声向探测光相位噪声的转移特性, 发现耦合光频率噪声转移效率在高频处显示出较明显的抑制. 同时观察到耦合光在不同失谐情况时, 随着耦合光功率的改变, 探测光相位噪声的变化特征表现出明显差异.

关键词: Rydberg态, 电磁诱导透明, 马赫-曾德尔干涉仪, 噪声转移

PACS: 32.80.Ee, 42.50.Gy, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.67.20181168

1 引言

电磁诱导透明 (electromagnetic-induced transparency, EIT) 效应是典型的非线性相干光学现象. 当光与原子发生共振相互作用后, 探测光会被原子吸收; 当加入额外的耦合光使原子发生双光子共振时, 对探测光的吸收则会减弱, 从而产生透明的现象. 从1991年Harris研究组首次在实验上观察到EIT现象^[1]至今, EIT效应不仅在原子蒸汽池中得以实现, 在冷原子^[2,3]和固体材料^[4,5]等量子系统中也均得到了广泛的研究. 2014年, Tan和Huang^[6]提出了一个通用的理论方案, 研究了具有多普勒展宽的开放梯型原子和分子系统中的EIT到Autler-Townes分裂的转变. EIT效应表现出的典型量子相干特性使其在量子信息以及量子

传感等领域均有十分广泛的应用. 在量子信息领域, EIT效应已被应用于实现光量子存储^[7-13]. 而在量子传感方面, 基于Rydberg原子EIT效应的微波电场传感获得了迅速的发展, 并在精确度和稳定度等方面体现出了相对于传统手段的优势^[14,15]. 其中, Shaffer研究组^[16]基于马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 和平衡零拍探测 (balanced homodyne detection, BHD) 技术测量探测光通过EIT介质后的相位改变, 实现了目前最为灵敏的 $5 \mu\text{V}/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2})$ 的电场传感灵敏度.

在实际系统中, 基于EIT效应的光量子存储的时间以及量子传感的灵敏度极大地受限于EIT信号中的噪声, 因此, EIT信号中的噪声特性引起了研究者的广泛关注. 2006年, Hsu等^[17]通过相干光实验来量化三能级 Λ 型EIT系统中探测光的

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0344200, 2016YFF0200104)、国家自然科学基金 (批准号: 91536110, 61505099)、山西省“1331工程”重点学科建设计划和山西省“百人计划”资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zlj@sxu.edu.cn

正交振幅和正交相位噪声, 并证明 EIT 系统会向探测光中引入额外噪声. 2007 年, Zhang 等^[18]对 Λ 型 EIT 体系中读出光的噪声特性进行研究, 通过理论模型的计算发现探测频率为零且双光子共振时, 穿过 EIT 介质的探测光中相位噪声向振幅噪声的转化被抑制; 在非零探测频率 EIT 系统中, 调整双光子失谐可以使探测光中原子噪声减弱为零. 2009 年, Xiao 等^[19]通过调节激光中相位噪声来操控 Λ 型 EIT 系统内单光子噪声和双光子失谐噪声的比重, 在实验上证实了当噪声的主导从单光子噪声变成双光子失谐噪声时, 相位-强度噪声的转换从抑制变成了增强. 2012 年, Li 等^[20]在实验和理论上证实 Λ 型 EIT 系统中的相位噪声到振幅噪声的转换与介质的色散成比例. 同年, Li 等^[21]从理论研究中发现, 在弱耦合场的 Λ 型 EIT 体系中, 输出的振幅噪声主要来源于由自发衰减导致的原子噪声; 在强耦合场的 Λ 型 EIT 体系中, 输出的振幅噪声主要来自相位噪声向振幅噪声的转换. 以上关于 EIT 系统中的噪声转移特性的研究主要集中在 Λ 型 EIT 系统中. 考虑到 Rydberg EIT 光谱在精密测量中的重要应用, 有关 Rydberg 阶梯型 EIT 系统中的噪声转移特性研究的重要性逐渐显现, 然而相关工作还未系统地开展.

本文利用 MZI 和 BHD 技术, 研究了 Rydberg EIT 中的耦合光与探测光之间的噪声转移特性. 实验中, 使用阶梯型三能级体系中的探测光经过声

光调制器产生的一级衍射光对 MZI 进行相位锁定, 通过扫描耦合光频率, 观察了 MZI 不同相对相位情况下的探测光透射光谱, 并利用阶梯型三能级 Rydberg EIT 理论模型对实验观察的光谱进行了模拟, 所得结果与实验现象符合得很好. 详细观察了耦合光频率噪声向探测光相位噪声的转移情况, 在 Rydberg EIT 系统中发现耦合光中的低频噪声向探测光相位噪声的转移效率较高, 高频噪声被明显抑制. 此外, 我们测量了耦合光失谐条件下, 耦合光强度的增加导致的探测光相位噪声变化, 特别值得注意的是在耦合光红失谐情况下, 耦合光强度的增加将会导致噪声转移效率明显下降.

2 实验装置

图 1 (a) 是实验中所用 Cs 原子 Rydberg EIT 涉及到的能级图. 这里采用两束激光实现 $6S_{1/2} (F = 4) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F' = 5) \leftrightarrow 62D_{5/2}$ 的阶梯型三能级体系. 图 1 (b) 是 MZI 部分实验系统示意图. 其中 852 nm 探测光的频率采用饱和吸收光谱技术锁定, 然后通过声光调制移频到 Cs 原子 $6S_{1/2} (F = 4) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F' = 5)$ 的共振跃迁线. 510 nm 耦合光的频率通过 EIT 光谱技术锁定到 $6P_{3/2} (F' = 5) \leftrightarrow 62D_{5/2}$ 共振跃迁线. 此外两束激光均可以通过声光调制器实现功率稳定.

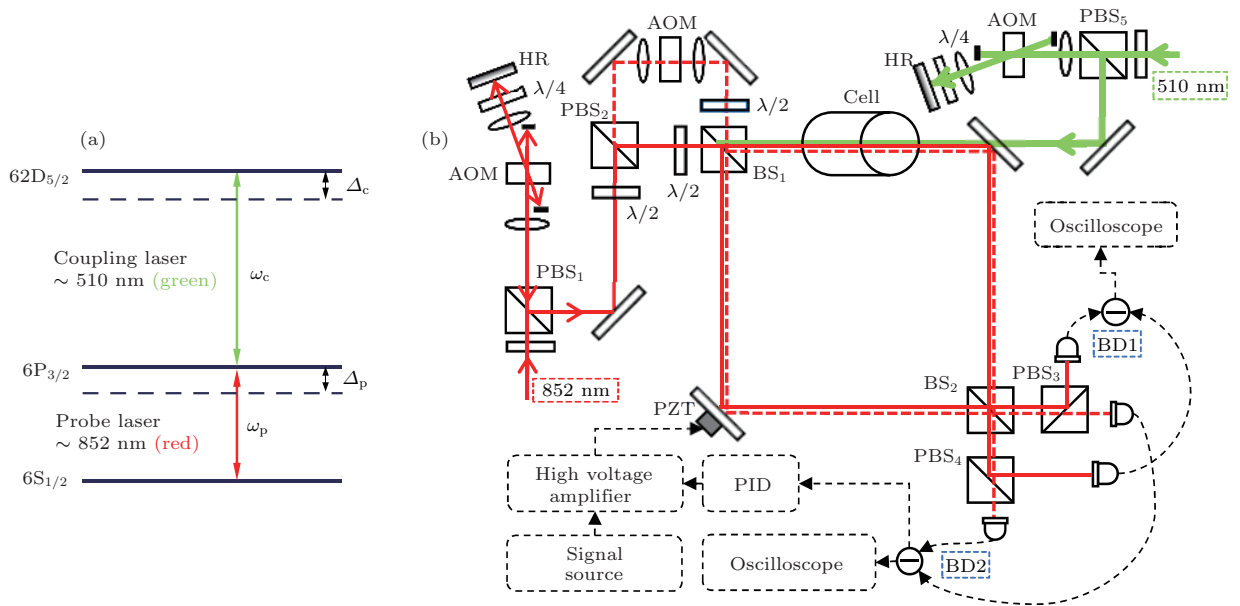


图 1 (a) Rydberg EIT 的能级图; (b) 实验装置图

Fig. 1. (a) Energy levels scheme of Rydberg EIT; (b) schematic of MZI experimental setup.

852 nm 探测光经过偏振分光棱镜分为两束, 在实验中分别被用于测量和相位锁定. 测量光 (图 1 (b) 中实线) 进入干涉仪经过 BS1 被分为两束, 其中一束作为信号光穿过 Cs 泡, 与反向传输的 510 nm 的光共线构成阶梯型三能级体系; 另一束作为干涉仪的本振光与经过 Cs 泡后的信号光在 BS2 处合束后进入平衡探测器 1, 实现平衡零拍测量. 用于相位锁定的 852 nm 激光 (图 1 (b) 中虚线) 经过声光调制器后, 一级衍射光进入干涉仪, 通过平衡探测器 2 上的误差信号进入 PID 模块 (Sim 960, SRS), 输出信号经过高压放大器控制 MZI 参考臂光路上的压电陶瓷, 实现 MZI 的探测光和本振光的相对相位锁定. 通过声光调制器移频, 用于相位锁定的光束的频率远失谐于 Cs 原子共振跃迁线, 可以避免原子自发辐射噪声的引入. 实验中通过设定 PID 参考电压可以将 MZI 两臂上的本振光和探测光的相对相位 $\Delta\varphi$ 锁定到任意值. 利用声光调制器可以对 510 nm 激光进行频率调制.

3 实验结果与分析

实验中通过改变 MZI 参考臂的压电陶瓷工作电压, 将 MZI 中的信号光和本振光的相对相位分

别锁定到 $0, \pi/3, \pi/2$. 扫描 510 nm 激光频率, 得到的 EIT 光谱如图 2 (a) 所示. 可以看到随着相对相位的变化, 探测光透射强度特征由单峰透射增强转换为色散型谱线. 图 2 (b) 是通过阶梯型三能级体系的理论模型进行模拟的结果. 用于信号测量的 852 nm 激光在 MZI 的 BS1 前的入射光场可以表示为 $E_0 = A_0 e^{i(\omega t + \varphi_0)}$, φ_0 是初始相位. 考虑到 MZI 两臂的光程调整不均衡带来的相位差为常量, 在干涉端对光强的影响为常量, 理论模拟时仅考虑参考臂中 PZT 导致的激光相移 $\Delta\varphi$ 以及信号臂由 Cs 蒸汽池中 EIT 导致的 852 nm 激光的相移 $\Delta\varphi'$. 因此, 差分探测器测量到的光强可以表示为 $\Delta I = aA_0^2 \cos(\Delta\Phi)$, 其中 $\Delta\Phi = \Delta\varphi + \Delta\varphi'$, a 是考虑到 Cs 原子蒸汽对探测光吸收的透射系数. 接下来讨论由 Rydberg EIT 导致的 852 nm 激光的相移 $\Delta\varphi'$. 探测光经过原子蒸汽池, 透射光的功率 P 与原子 EIT 介质复极化率 $\chi(v)$ 的关系为

$$P \propto a = \exp \left[-2\pi l \cdot \text{Im} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \chi(v) dv \right) \frac{1}{\lambda} \right], \quad (1)$$

其中, l 是光在 Cs 原子蒸汽池中经过的路径, λ 是探测光的波长. 三能级阶梯型 EIT 介质的复极化率可以表示为

$$\chi(v) = \frac{4i\hbar g_{12}^2 / \varepsilon_0}{\gamma_{21} - i\Delta_1 - i\frac{\omega_p}{c}v + \frac{\Omega_c^2/4}{\gamma_{31} - i(\Delta_1 + \Delta_2) - i(\omega_p - \omega_c)v/c}} N(v), \quad (2)$$

式中, v 是原子的运动速度, \hbar 是普朗克常数, g_{12} 是偶极矩阵元, ε_0 是介电常数, γ_{21} 和 γ_{31} 是激发态和 Rydberg 态原子的衰减率, Δ_1 和 Δ_2 是探测光和耦合光频率的失谐量, ω_p 和 ω_c 是探测光和耦合光的角频率, Ω_c 是耦合光的拉比频率, c 是光速. 不同运动速率的原子数 $N(v)$ 满足麦克斯韦-玻尔兹曼速率分布:

$$N(v) = \frac{N_0}{u\sqrt{\pi}} e^{-v^2/u^2}, \quad u = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}, \quad (3)$$

这里, N_0 是蒸汽池中 Cs 原子的数量, u 是最概然速率, k_B 是玻尔兹曼常数, T 是原子蒸汽的温度, m 是原子质量. (2) 式中复极化率积分结果的实部对应介质的色散, 其导致探测光的相移可以表示为

$$\Delta\varphi' = \frac{1}{\lambda} \pi l \text{Re} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \chi(v) dv \right). \quad (4)$$

因此差分探测器的光强 I 与探测光的相位的关系为

$$I = P \cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi'), \quad P = aA_0^2. \quad (5)$$

将实验中相关参数代入 (5) 式进行理论模拟, 得到相对相位 $\Delta\varphi = 0, \pi/2, \pi/3$ 时, 探测光的光强随耦合光频率失谐量的变化图, 如图 2 (b) 所示, 理论拟合结果与实验测量结果符合得很好.

由 (5) 式可以看出, 光强变化既包含 EIT 透射光的强度信息, 又包含 EIT 透射光相位信息. 当 $\Delta\varphi = 0$ 时, 由耦合光失谐引起的相位变化而导致的探测光光强的改变, 在耦合光共振位置附近不明显, 此时 BHD 信号的光强抖动反映的是探测光的振幅噪声. 当 $\Delta\varphi = \pi/2$ 时, 在耦合光频率共振位置 ± 4 MHz 范围内, 探测光强度与耦合光失谐具有近似线性关系, 其斜率最大, 相位扰动造成的光强变化最明显, 探测光的 BHD 结果表现出典型的色散特征, 此时探测光的光强抖动是相位噪声.

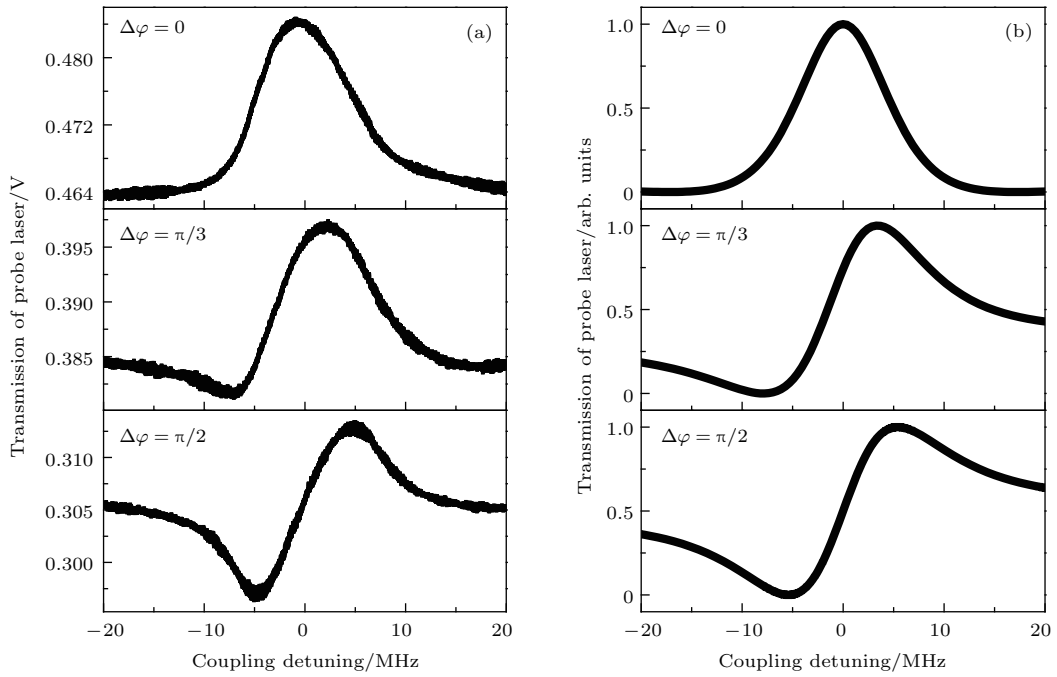


图2 MZI 两臂相对相位 $\Delta\varphi = 0, \pi/2, \pi/3$ 时的 EIT 透射谱 (a) 实验结果; (b) 理论结果

Fig. 2. EIT transmission spectra with relative phase $\Delta\varphi = 0, \pi/2, \pi/3$ of MZI: (a) Experimental results; (b) theoretical results.

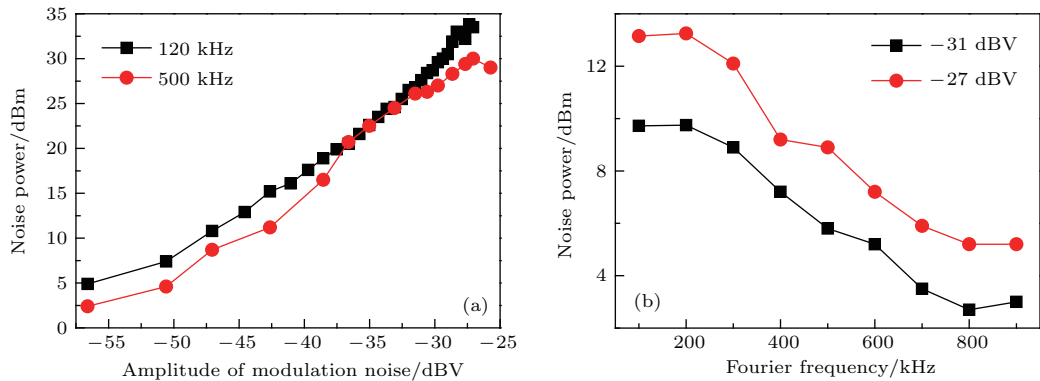


图3 耦合光频率噪声转移特性 (a) 耦合光频率噪声幅度与探测光相位噪声强度的关系 (红色圆点线对应的噪声频率为 500 kHz, 黑色方块线对应的噪声频率为 120 kHz); (b) 耦合光噪声频率与探测光相位噪声强度的关系 (红色圆点线对应的耦合光频率噪声幅度为 -27 dBV, 黑色方块线对应的耦合光频率噪声幅度为 -31 dBV)

Fig. 3. Transfer of frequency noise of coupling light: (a) The relative phase noise power of the probe light versus the noise amplitude of coupling light (corresponding noise frequency of red circle line is 500 kHz, and corresponding noise frequency of black square line is 120 kHz); (b) the relative phase noise power of the probe light versus the noise frequency of coupling light (corresponding noise frequency of red circle line is -31 dBV), and corresponding noise frequency of black square line is -27 dBV).

锁定 MZI 相对相位到 $\Delta\varphi = \pi/2$, 得到色散型 EIT 透射谱, 并研究了耦合光频率共振时, 耦合光的频率噪声向探测光的相位噪声转移的特性. 在声光调制器的频率调制端口加入低频噪声, 把 852 nm 探测光的 BHD 信号接入频谱分析仪对探测光的相应频率的噪声功率谱进行观察. 为了消除实验系统误差, 图 3 中曲线表示的探测光功率谱强度减去了 852 nm 激光和探测器自身的本底噪声基底. 首

先观察了不同调制强度下的频率噪声导致的探测光相位噪声变化情况, 如图 3(a) 所示. 对于频率 120 和 500 kHz 的耦合光频率噪声, 随着噪声强度增加, 探测光相位噪声随之近似于线性增加, 并且两种频率的噪声转移增加的趋势相似, 这与耦合光共振位置处, 探测光 EIT 光谱的色散型曲线特征一致. 图 3(b) 是不同频率的耦合光噪声转移的特征, 对于 1 MHz 以下的低频噪声, 耦合光噪声向探测光

相位噪声转移的效率随着噪声频率升高迅速降低. 对于相同幅度的耦合光频率噪声, 在高频处的探测光的噪声功率谱比低频处低 7 dBm 左右. 分析认为这与 Rydberg EIT 系统的建立时间有关, 即系统对耦合光频率的低速变化具有更好的响应, 对耦合光高频的频率噪声的响应速率有限.

相对于耦合光共振的情况, 进一步观察了在 510 nm 耦合光频率失谐时, 耦合光的频率噪声向 852 nm 探测光相位噪声转移的情况. 这里引入了 250 kHz 的耦合光频率噪声. 图 4 中显示的 3 条曲线 a, b, c 分别对应耦合光频率共振、蓝失谐(约为 +5 MHz) 和红失谐(约为 -5 MHz) 时, 随着耦合光功率的增加, 探测光相位噪声的变化情况. 图 4 显示 510 nm 耦合光的频率共振时, 探测光中的相位噪声信号转移效率最大, 蓝失谐时次之, 红失谐时最低. 随着耦合光光强的增加, 在红失谐的情况下, 噪声转移效率呈现出被抑制的趋势. 我们认为随着耦合光强度的增加, 被激发产生的 Rydberg 原子数将增加, 此时考虑到在热原子中 Rydberg 原子的碰撞加剧以及黑体辐射等过程都有可能产生 Rydberg 原子电离的产生, 此时离子产生的电场在局域内将导致 Rydberg 态的能级发生蓝移 [22]. 这可能导致耦合光在蓝失谐的情况下噪声转移增强, 而在红失谐情况下, 耦合光光强增加导致噪声转移受抑制.

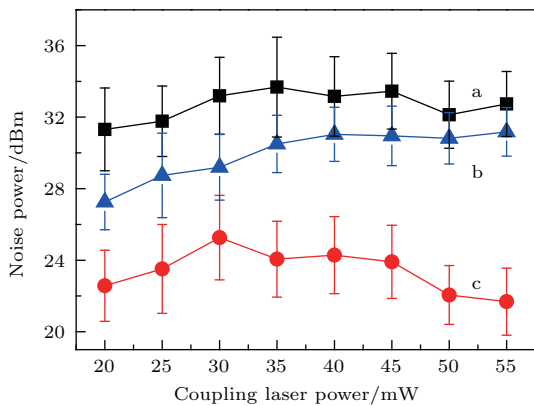


图 4 不同失谐频率下耦合光功率与探测光相位噪声功率的关系 (黑色方块线 a, 耦合光频率共振; 蓝色三角线 b, 耦合光频率蓝失谐(约为 +5 MHz); 红色圆点线 c, 耦合光频率红失谐(约为 -5 MHz))

Fig. 4. Relationship between the intensity of phase noise of probe laser and the power of coupling laser at different frequency detuning. Black square line a represents resonance; blue triangle line b represents blue detuning of about +5 MHz; red circle line c represents red detuning of about -5 MHz.

在通常的 Λ 型 EIT 系统中, 探测光和耦合光的失谐方向是一致的, 在相同的探测频率处出现振幅噪声被抑制的现象 [16]. 在非零探测频率条件下, 探测场中的原子噪声在双光子失谐较大时被压缩 [15]. 在本文研究的 Rydberg EIT 体系中, 在不同的探测光失谐情况下, 相位噪声向振幅噪声的转移特性表现出明显不同的特征. 考虑到本文阶梯型 EIT 系统中探测场(约为 852 nm)和耦合场(约为 510 nm)的波长相差较大, 二者的相位匹配导致噪声转移特性变得非常复杂. 我们即将在后续研究中对相位匹配过程对噪声转移特性的影响进行详细的研究.

4 结 论

本文利用 MZI 和 BHD 技术研究了 Rydberg EIT 的耦合光与探测光的噪声转移特性. 通过将 MZI 的相对相位锁定在 $\pi/2$, 观察了耦合光频率共振时的频率噪声向探测光相位噪声转移的特性, 注意到在 Rydberg 阶梯型三能级体系中, 相对于耦合光的低频噪声, 高频噪声的转移效率明显被抑制. 此外, 实验观察了在耦合光的不同失谐条件下, 探测光相位噪声转移与耦合光光强的关系. 在红失谐的情况下, 噪声转移随着耦合光光强的增加而减小, 这种现象被认为是由于耦合光功率增强导致 Rydberg 原子电离增加, 离子在原子蒸汽中产生的局域电场引起了 Rydberg 态的能级蓝移.

参考文献

- [1] Boller K J, Imamolu A, Harris S E 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2593
- [2] Hopkins S A, Usadi E, Chen H X, Durrant A V 1997 *Opt. Commun.* **138** 185
- [3] Jiao Y C, Han X X, Yang Z W, Zhao J M, Jia S T 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 123201
- [4] Zhao Y, Wu C K, Ham B S, Kim M K, Awad E 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 641
- [5] Schmidy H, Imamoglu A 1996 *Opt. Commun.* **131** 333
- [6] Tan C H, Huang G X 2014 *J. Opt. Soc. Am.* **31** 704
- [7] Fleischhauer M, Lukin M D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5094
- [8] Fleischhauer M, Lukin M D 2002 *Phys. Rev. A* **65** 022314
- [9] Lukin M D, Yelin S F, Fleischhauer M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4232
- [10] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H, Hau L V 2001 *Nature* **409** 490

- [11] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A, Walsworth R L, Lukin M D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 783
- [12] Jurgen A, Eden F, Korystov D, Lobino M, Lvovsky A I 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 093602
- [13] Honda K, Akamatsu D, Arikawa M, Yokoi Y, Akiba K, Nagatsuka S, Tanimura T, Furusawa A, Kozuma M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 093601
- [14] Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 035002
- [15] Yan L Y, Liu J S, Zhang H, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 243201 (in Chinese) [闫丽云, 刘家晟, 张好, 张临杰, 肖连团, 贾锁堂 2017 物理学报 **66** 243201]
- [16] Kumar S, Fan H, Kübler H, Sheng J, Shaffer J P 2017 *Sci. Rep.* **7** 42981
- [17] Hsu M T L, Hetet G, Glockl O, Longdell J J, Buchler B C, Bachor H A, Lam P K 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 183601
- [18] Zhang J X, Cai J, Bai Y F, Gao J R, Zhu S Y 2007 *Phys. Rev. A* **76** 033814
- [19] Xiao Y H, Wang T, Baryakhtar M, Camp M, Cresci-manno M, Hohensee M, Jiang L, Phillips D F, Lukin M D, Yelin S F, Walsworth R L 2009 *Phys. Rev. A* **80** 041805
- [20] Li Y, Cai D H, Ma R, Dan W, Gao J R, Zhang J X 2012 *Appl. Phys. B* **109** 189
- [21] Li Z H, Li Y, Dou Y F, Zhang J X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034204
- [22] Weller D, Urvoy A, Rico A, Löw R, Kübler H 2016 *Phys. Rev. A* **94** 063820

Noise transfer characteristics of Rydberg electromagnetically induced transparency*

Jia Yue¹⁾²⁾ Chen Xiao-Han¹⁾²⁾ Zhang Hao¹⁾²⁾ Zhang Lin-Jie^{1)2)†}
Xiao Lian-Tuan¹⁾²⁾ Jia Suo-Tang¹⁾²⁾

1) (*Institute of Laser Spectroscopy, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 14 June 2018; revised manuscript received 27 August 2018)

Abstract

The transfer mechanism from the amplitude noise of the coupling light to the phase noise of the probe light in a Rydberg electromagnetic induced transparency effect derived from a ladder-type system including $6S_{1/2} \leftrightarrow 6P_{3/2} \leftrightarrow 6D_{5/2}$ of Cs atoms is demonstrated by using Mach-Zehnder interferometer and balanced homodyne detection technology. In our experiments, the transmission signal of 852 nm probe light is measured by scanning the coupling light frequency nearby the transition from $6P_{3/2}$ to $6D_{5/2}$ Rydberg state, while the frequency of the probe light is locked at the resonance transition of the $6S_{1/2} \leftrightarrow 6P_{3/2}$. The relative phase stability of two arms of Mach-Zehnder interferometer, which is constructed with the first order diffraction light of probe light through an acoustic-optic modulator, is accomplished by the controlled piezoelectric ceramic with the PID feedback loop. The interferences between the probe light and the reference light of Mach-Zehnder interferometer under the different relative phases are observed. The interference spectrum of probe light is in good agreement with the theoretical simulation result of the ladder-type three-level system. Therefore, we study the transfer characteristics from the frequency noise of coupling light to the phase noise of probe light when coupling light frequency resonance happens at the transition $6P_{3/2} \leftrightarrow 6D_{5/2}$. We find the significant suppression of the phase noise of probe light at the higher frequency noise. Moreover, we observe the characteristics of the phase noise of the probe light varying with the power of the coupling light under the different detuning degrees of coupling light. In the red detuning side, the transferred phase noise of probe light decreases with the increase of coupling light power, which is different significantly from the scenario under the blue detuning condition. The ions produced in the ionization process of Rydberg atoms will form the local electric field that would cause the energy level of Rydberg states to shift. The investigation of the noise transfer between the coupling light and probe light in the Rydberg electromagnetically induced transparency effect is important for understanding the coherence mechanism of ladder-type system and the some potential applications, such as in Rydberg-atom-based electric field metrology.

Keywords: Rydberg states, electromagnetic-induced transparency, Mach-Zehnder interferometer, noise transfer

PACS: 32.80.Ee, 42.50.Gy, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.67.20181168

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2017YFA0344200, 2016YFF0200104), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91536110, 61505099), the Fund for Shanxi "1331 Project" Key Subjects Construction, China, and the BAIREN Plan of Shanxi Province, China.

† Corresponding author. E-mail: zlj@sxu.edu.cn