

电磁诱导透明介质中探测场量子噪声特性的实验研究

王 芳 于旭东 孟增明 张 靖

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 利用平衡零拍探测测量电磁诱导透明(EIT)介质中探测场的正交振幅和正交相位噪声谱。在平衡零拍探测系统中通过调节压电陶瓷来改变本振光的光程从而改变本振光与探测光的相对相位,进而测量不同相位对应的探测光的噪声分量。实验中电磁诱导透明介质中探测光与耦合光耦合导致探测光噪声的增大,发现在耦合光不同失谐下对探测光不同正交分量引入的额外噪声是不同的,同时得到了探测光噪声与耦合光功率及分析频率的关系。

关键词 非线性光学;电磁诱导透明;平衡零拍探测;正交振幅噪声;正交相位噪声

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0527001

Experimental Study of Quantum Noise Characteristics of the Probe Field in Electromagnetically Induced Transparency Medium

Wang Fang Yu Xudong Meng Zengming Zhang Jing

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract Balanced homodyne detection is used to measure the quadrature amplitude and quadrature phase noise spectra of the probe field in electromagnetically induced transparency (EIT) medium. Through adjusting the voltage of the piezoelectric ceramic transducer, the optical path of the local light is changed so that the relative phase of the local light and the probe light in the balanced homodyne detection is adjusted. Then the noise components of the probe light with different phases are measured. It is observed that the coupling of the probe light and the coupling light leads to the increase of the noise of the probe light in electromagnetically induced transparency medium. It is found that the induced extra noises of different quadrature components of the probe field are different for different detuning values of the coupling light. Simultaneously, the relationship between the noise of the probe field, the power of the coupling light and analysis frequency is obtained.

Key words nonlinear optics; electromagnetically induced transparency; balanced homodyne detection; quadrature amplitude noise; quadrature phase noise

OCIS codes 270.1670; 270.2500; 020.1670; 020.1335; 140.2020

1 引 言

电磁诱导透明(EIT)指的是一束较强的耦合光和一束较弱的探测光与三能级系统相互作用时,较弱的探测光未被吸收而出现透明的现象。Kocharovskaya 等^[1-2]在自己的论文中提出了相关概念。1991年, Boller 等^[3]首次在实验上观察到 EIT 现象,该现象表明当原子与电磁场发生作用时

会吸收能量,但用另一电磁场探测介质时,发现只要这两个电磁场与原子能级之间满足双共振条件,对于探测场介质就变成透明。这是因为相干电磁场与原子体系之间的相互作用可以导致原子态之间的相干叠加,同时原子态之间的相干叠加又可以显著地改变原子体系与电磁场之间的相互作用。产生 EIT 现象的双共振被称作“暗共振”,或者说原子系统处

收稿日期: 2013-11-31; 收到修改稿日期: 2013-12-27

基金项目: 国家 973 计划(2011CB921601)、国家自然科学基金(11234008,61121064)

作者简介: 王 芳(1988—),女,硕士研究生,主要从事超冷波色费米混合气体等方面的研究。

E-mail: fangwang22@163.com

导师简介: 张 靖(1974—),男,博士,教授,主要从事超冷波色费米混合气体等方面的研究。

E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn(通信联系人)

于一个“暗态”上。如今,EIT 效应不仅在原子气室中可以实现,在冷原子^[4]和固体材料^[5],如半导体^[6]等介质中也得到了广泛的研究。它在光量子存储^[7-13]、无粒子数反转激光(LWI)^[14-16]等方面有着广泛的应用前景。在光量子存储过程中,探测场的量子噪声特性是量子存储研究的重要内容,因此探究 EIT 介质中的量子噪声特性具有重要意义。2006 年,Hsu 等^[17]使用相干光实验验证了在 EIT 介质中耦合场会向探测场引入不可忽视的额外噪声。2007 年,Zhang 等^[18]在理论上证明了在 EIT 介质中探测光的振幅噪声由入射光的振幅噪声、相位-强度的转化噪声和原子噪声决定。Xiao 等^[19-20]也使用相干光先后在实验上验证了当探测频率满足双光子共振时,EIT 中相位噪声向振幅噪声的转化被抑制,以及双光子失谐不为 0 时,相位噪声-强度噪声转化所导致的关联。2013 年,李媛^[21]使用相干光,利用自零拍探测测量方法在实验上验证了探测场和耦合场的额外相位噪声都可以向探测场的振幅噪声转化。

本文研究采用自零拍探测测量电磁诱导透明介质中探测场的正交振幅噪声和正交相位噪声。实验中,固定探测光频率扫描耦合光频率,获得探测光 EIT 线型透射谱,改变本振光与探测光的相对相位测量了探测场的正交振幅相位噪声,测量发现在 EIT 介质中耦合场与探测场相互作用导致探测场的噪声增大。本文测量了探测光噪声与耦合光功率,并且分析了与频率的依赖关系。

2 实验装置

本文选用如图 1 所示的 Δ 型三能级结构,其中两个基态 $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 分别对应于⁸⁵Rb 原子 D_2 线能级 $5^2S_{1/2}, F=2$ 和 $5^2S_{1/2}, F=3$ 。激发态 $|c\rangle$ 对应于⁸⁵Rb 原子 D_2 线能级 $5^2P_{3/2}, F=2$ 。两个基态 $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 与激发态 $|c\rangle$ 之间的跃迁角频率分别为 ω_{ac} 和 ω_{bc} 。图 2 为实验装置示意图,Toptica 公司产的 DL 100 半导体激光器输出的光作为耦合光作用 $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁线,其频率以跃迁线为中心扫描,频率失谐为 Δ_c 。另一台 Moglabs 公司产的半导体激光器输出的光通过 PBS1 分成两束,一束光强较强,另一束较弱。较弱的光作为探测光作用 $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁线,并与其共振(探测光失谐 $\Delta_p = 0$),较强的光作为平衡零拍探测的本振光。探测光与耦合光经 PBS2 以小角度在铷泡内耦合,铷泡长 3.5 cm, PBS3 将耦合光与探测光分离。本振光通过 PBS4 后,经 0° 全反射镜 M7(固定在压电陶瓷上)反射,且两次通过 $1/4$ 波片,其偏振方向改变 90° 后与探测光重合,再经过 $1/2$ 波片和 PBS5 本振光与探测光进行干涉,形成平衡零拍探测光路。本振光与探测光的相对相位可以通过 M7 上的压电陶瓷扫描得到。

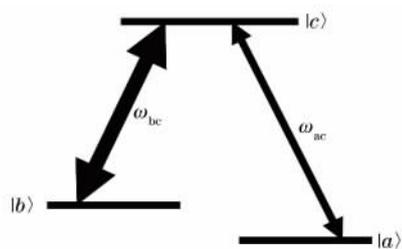


图 1 Δ 型三能级系统

Fig. 1 Δ -type three-level system

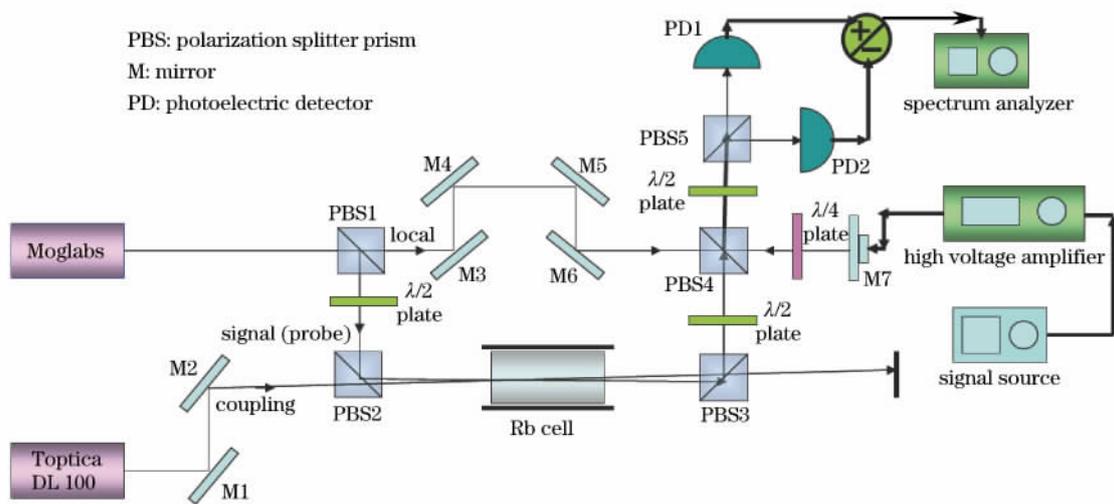


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

3 实验结果与分析

实验测量了固定探测光频率扫描耦合光频率时探测光的透射谱,结果如图 3 所示。通常情况的 EIT 是固定耦合光频率,扫描探测光频率,在实验中,固定探测光频率扫描耦合光频率时探测光的透射谱也呈现相同的 EIT 线型。本振光与探测光来自同一激光器输出,由于本振光与探测光通过干涉进行平衡零拍探测,因此探测光和本振光的频率扫描会对平衡零拍探测引入相位起伏,影响噪声谱的测量,所以选择固定探测光和本振光频率扫描耦合光频率。先将探测光频率调节到与 $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁共振处,此时由于探测光与二能级原子作用而被强烈吸收,探测光光强减弱。当打开耦合光时,随着耦合光频率的扫描,探测光的强度吸收谱在耦合光失谐范围内呈现 W 型即 EIT 现象,其原因为:在耦合光扫描频率逐渐接近 $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁线时,由于耦合光

的抽运效应而使基态 $|b\rangle$ 上的原子布局数增大,而使探测光的吸收变大,当耦合光与 $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁线共振时,由于 EIT 效应,探测光的吸收减弱,而出现透明峰,而在耦合光远失谐时由于耦合光的抽运效应减弱而使探测光的吸收也变弱。图 3(a) 为耦合光频率在相对 $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁 ± 200 MHz 范围内扫描时的透射谱,图 3(b) 为减小耦合光的扫描范围时探测光的透射谱。接下来利用平衡零拍探测测量了本振光与探测光的相对相位为 $0, \pi/3, \pi/2$ 时探测光的噪声谱,结果如图 4 所示。耦合光功率为 $P_c = 6$ mW,探测光功率为 $P_p = 90 \mu\text{W}$ 。在平衡零拍探测系统中本振光功率为 $P_l = 3.5$ mW,干涉度为 94%,谱仪的分析频率为 7 MHz,耦合光扫描频率为 5 Hz,谱仪分析带宽(RBW)为 30 kHz,视频带宽(VBW)为 100 Hz。

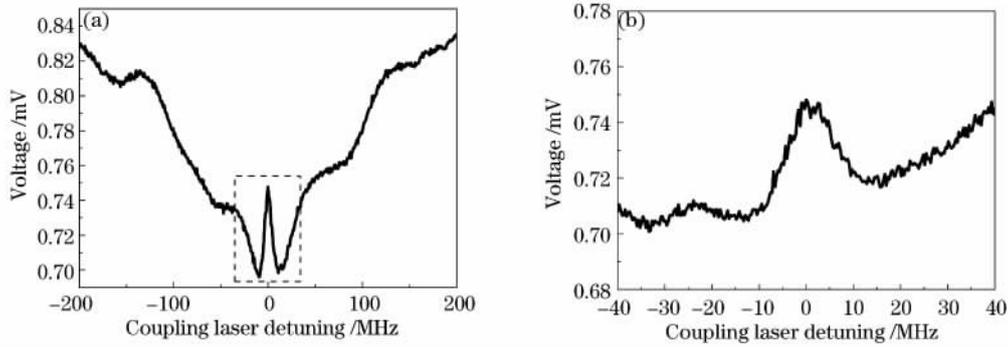


图 3 EIT 透射谱。(a) $-200 \sim 200$ MHz 扫描频率范围下探测光透射谱; (b) $-40 \sim 40$ MHz 扫描频率范围下探测光透射谱

Fig. 3 EIT transmission spectra. (a) Transmission spectrum with frequency scanning range of $-200 \sim 200$ MHz; (b) transmission spectrum with frequency scanning range of $-40 \sim 40$ MHz

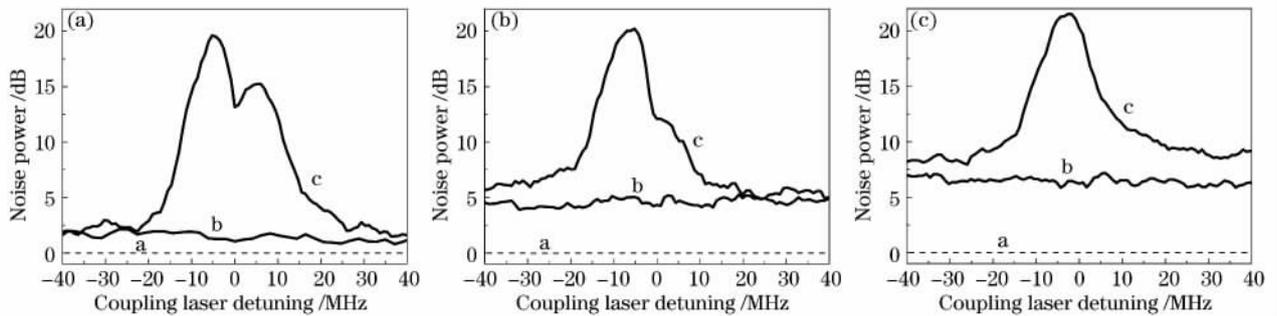


图 4 探测场的噪声谱。(a)本振光与信号光的相对相位为 0 ; (b)本振光与信号光的相对相位为 $\pi/3$; (c)本振光与信号光的相对相位为 $\pi/2$ (曲线 a 为散粒噪声基准,曲线 b 为挡住耦合光时噪声谱,曲线 c 为打开耦合光时噪声谱)

Fig. 4 Noise spectra of the probe field. (a) Relative phase between the local laser and the signal laser is 0 ; (b) relative phase between the local laser and the signal laser is $\pi/3$; (c) relative phase between local laser and signal laser is $\pi/2$ (curve a for shot noise limits, curve b for noise spectra of without coupling laser, curve c for noise spectra with coupling laser)

图 4(a)~(c)中的曲线 b 为挡住耦合光时探测光的噪声谱,可以看出探测光自身的正交振幅噪声接近散粒噪声基准(SNL),正交相位噪声高于散粒噪声基准 5 dB~7 dB。当打开耦合光时,如图 4 中曲线 c 所示,探测光在 EIT 介质中耦合光共振处附近呈现出很大的额外噪声,额外噪声主要由两种机制产生:一是 EIT 介质中的色散(相移)导致探测光相位与振幅噪声之间的相互转化,另一个是在 EIT 介质中耦合场与探测场相互作用导致探测场的噪声增大。在 EIT 介质中当耦合光与 $|b\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁共振时,即满足双光子共振条件($\Delta_c - \Delta_p = 0$, 因为探测光与 $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$ 跃迁线共振, $\Delta_p = 0$)时,探测光相移为 0,而在双光子失谐($\Delta_c - \Delta_p \neq 0$ 或 $\Delta_c \neq 0$)时,探测光相移不为 0,且耦合光红失谐(或双光子红失谐)时对应探测光负的相移,耦合光蓝失谐(或双光子蓝失谐)时对应探测光正的相移。图 4(a)中曲线 c 为本振光与探测光的相对相位为 0(即测量探测光正交振幅噪声)时的情况,在耦合光共振处,探测光本身的正交相位噪声不会转化为正交振幅噪声,而只有 EIT 介质中耦合场与探测场相互作用导致探测场的噪声增大,因此在耦合光共振时探测光会出现一个最低点。而在耦合光红失谐(或双光子红失谐)和蓝失谐(或双光子蓝失谐)处正交振幅噪声谱会出现两个峰,其中包含两种机制引入的额外噪声,即:探测光自身部分正交相位噪声转化的正交振幅噪声和 EIT 介质中耦合场与探测场相互作用过程中转化的正交振幅噪声两部分。图 4(b)中曲线 c 为本振光与探测光的相对相位为 $\pi/3$ 时的情况,此时测得的噪声是探测光部分正交相位噪声和部分正交振幅噪声以及耦合光转化的噪声。由于其他跃迁能级的影响,使 EIT 介质对探测光的色散产生不对称,在实验中铷原子 D_2 线其他能级使耦合光红失谐(双光子红失谐)的色散变大,蓝失谐时的色散减小。对应红失谐时吸收和相移变大,蓝失谐时吸收和相移减小。因此当平衡零拍探测系统中本振光与探测光的相对相位为 $\pi/3$ 时,在耦合光红失谐区域,探测光自身的正交相位噪声会有较大部分转化为所探测的噪声分量上来,而耦合光蓝失谐时探测光自身的正交相位噪声会有相对较小部分转化为所要探测的噪声分量上。所以在图 4(b)中,耦合光红失谐时和蓝失谐时,噪声出现不对称,红失谐时较高,蓝失谐时较低。在图 4(c)中曲线 c 为本振光与探测光的相对相位为 $\pi/2$ 时,在双光子共振处噪声达到最大值,其中包括探测光自身的正交相位噪声和 EIT 介质中耦合

场与探测场相互作用过程中转化的正交相位噪声两部分。

同时利用自零拍探测方法测量了探测光的噪声谱,即探测光正交振幅噪声谱。谱仪的分析频率为 7 MHz,耦合光功率为 $P_c = 6$ mW,探测光功率为 $P_p = 500 \mu\text{W}$,结果如图 5 所示。与平衡零拍探测比较,可以看出该结果与图 4(a)曲线 c 振幅噪声谱的线型基本一致。

利用自零拍探测方法研究噪声转化与耦合光光

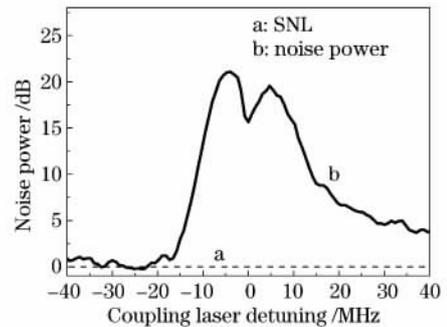


图 5 自零拍探测系统下的探测光的噪声
Fig. 5 Noise power of probe light measured by self-homodyne detection system

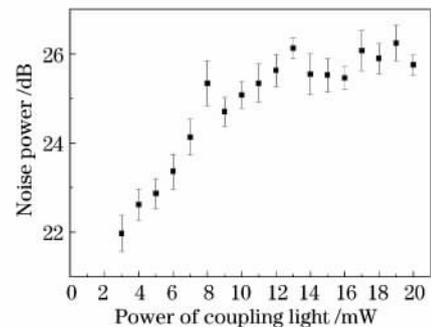


图 6 探测光噪声随耦合光功率的变化
Fig. 6 Noise power of probe light versus power of coupling light

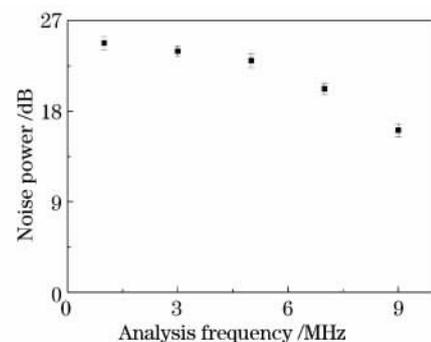


图 7 探测光噪声随分析频率的变化
Fig. 7 Noise power of probe light versus analysis frequency

功率和谱仪分析频率的依赖关系,结果如图6、7所示。图6中,探测场功率为 $500\ \mu\text{W}$,分析频率为 $3\ \text{MHz}$ 。可以看到探测光的额外噪声随耦合光功率增大而增加,当耦合光功率大于 $13\ \text{mW}$ 后,耦合光引入探测光额外噪声出现饱和不再增大。图7中探测场功率为 $500\ \mu\text{W}$,耦合场功率为 $6\ \text{mW}$ 。黑色方块为探测光的正交振幅噪声,从该图可以看出随着分析频率的增加,由于原子跃迁线宽导致引入探测光额外噪声降低。

4 结 论

实验上研究了电磁诱导透明介质中探测场的量子噪声特性,选用了室温下的 ^{85}Rb 原子和两台半导体激光器,利用自零拍探测和平衡零拍探测测量了探测光的噪声谱,通过调节压电陶瓷控制本振光与信号光的相对相位,测量了探测光的不同正交分量的噪声。实验发现,在EIT介质中耦合场与探测场相互作用导致探测场的噪声增大,在耦合光红失谐和蓝失谐时引入的额外噪声出现非对称。

参 考 文 献

- O A Kocharovskaya, Y I Khanin. Coherent amplification of an ultrashort pulse in a three-level medium without a population inversion [J]. *Soviet J Theor Exp Phys Lett*, 1988, 48: 630–634.
- S E Harris. Lasers without inversion-interference of lifetime-broadened resonances [J]. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 1033–1036.
- K J Boller, A Imamolu, S E Harris. Observation of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 66(20): 2593–2596.
- S A Hopkins, E Usadi, H X Chen, *et al.*. Electromagnetically induced transparency of laser-cooled rubidium atoms in three-level Λ -type systems [J]. *Opt Commun*, 1997, 138(1): 185–192.
- Y Zhao, C Wu, B S Ham, *et al.*. Microwave induced transparency in ruby [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 79(4): 641–644.
- H Schmidt, A Imamoglu. Nonlinear optical devices based on a transparency in semiconductor intersubband transitions [J]. *Opt Commun*, 1996, 131(4): 333–338.
- M Fleischhauer, M D Lukin. Dark-State polaritons in electromagnetically induced transparency [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(22): 5094–5097.
- M Fleischhauer, M D Lukin. Quantum memory for photons: dark-state polaritons [J]. *Phys Rev A*, 2002, 65(2): 022314.
- M D Lukin, S F Yelin, M Fleischhauer. Entanglement of atomic ensembles by trapping correlated photon states [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(18): 4232–4235.
- C Liu, Z Dutton, C H Bohroozi, *et al.*. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses [J]. *Nature*, 2001, 409(6819): 490–493.
- D F Phillips, A Fleischhauer, A Mair, *et al.*. Storage of light in atomic vapor [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(5): 783–786.
- J Appel, E Figueroa, D Korystov, *et al.*. Quantum memory for squeezed light [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(9): 093602.
- K Honda, D Akamatsu, M Arikawa, *et al.*. Storage and retrieval of a squeezed vacuum [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(9): 093601.
- H G Robinson. Experimental demonstration of laser oscillation without population inversion via quantum interference in Rb [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(8): 1499–1502.
- H Wu, M Xiao, J Gea-Banacloche. Evidence of lasing without inversion in a hot rubidium vapor under electromagnetically-induced-transparency conditions [J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(4): 041802(R).
- A Imamoglu, S E Harris. Lasers without inversion: interference of dressed lifetime-broadened states [J]. *Opt Lett*, 1989, 14(24): 1344–1346.
- M T L Hsu, G Hézet, O Glockl, *et al.*. Quantum study of information delay in electromagnetically induced transparency [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(18): 183601.
- Junxiang Zhang, Jin Cai, Yunfei Bai, *et al.*. Optimization of the noise property of delayed light in electromagnetically induced transparency [J]. *Phys Rev A*, 2007, 76(3): 033814.
- Yanhong Xiao, Tun Wang, Maria Baryakhtar, *et al.*. Electromagnetically induced transparency with noisy lasers [J]. *Phys Rev A*, 2009, 80(4): 041805(R).
- Lei Feng, Pengxiong Li, Tun Wang, *et al.*. Transition linewidth of cross-correlations in random intensity fluctuations in EIT [J]. *arXiv:1303.1602v2*, 2013.
- Li Yuan. The Study of Quantum Noise of Optical Field in EIT Medium [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013. 36–50.

李媛. 电磁诱导透明介质中光场的量子噪声特性研究[C]. 太原: 山西大学, 2013. 36–50.

栏目编辑: 史敏