

高阶 TEM₀₁ 模压缩态 Wigner 准概率分布函数的量子重构

杨荣国^{1,2} 张 静^{1,2} 翟淑琴^{1,2} 刘先锋^{1,2}

(¹ 山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006
² 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 将 Nd:YVO₄-KTP 固体激光器输出的 532 nm 和 1064 nm 激光分别作为抽运光和种子光注入一个内置周期极化磷酸氧钛晶体的简并光学参量放大器,通过非线性光学参量过程产生明亮的高阶横模 TEM₀₁ 正交振幅压缩态光场,利用平衡零拍探测系统测得其压缩度为 2.2 dB,利用数字存储示波器记录经信号处理系统变换的数据,再通过自编的软件利用量子层析测量技术得到了该压缩态光场在相空间的 Wigner 准概率分布函数,并将其与理论结果作了对比,两者基本一致。

关键词 量子光学; 压缩态光场; 高阶厄密高斯模; 光学参量放大器; Wigner 准概率分布函数

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0318001

Quantum Resonstruction of Wigner Quasiprobability Distribution Function of High Order TEM₀₁ Squeezed States

Yang Rongguo^{1,2} Zhang Jing^{1,2} Zhai Shuqin^{1,2} Liu Xianfeng^{1,2}

(¹ College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China
² State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract 532 nm and 1064 nm laser outputs of Nd:YVO₄-KTP solid laser, as pump beam and seed light, respectively, are injected into a degenerate optical parametric amplifier with a periodically poled KTP crystal. The bright high order transverse mode TEM₀₁ quadrature amplitude squeezed field, which is generated by the nonlinear optical parametric process, is measured to be 2.2 dB squeezing degree with a homodyne detection system. A group of transformed signal data is saved by a digital storage oscilloscope. The Wigner quasiprobability distribution function of the squeezed field in the phase space is reconstructed using quantum tomography technique with the self-made software, and it's found that there is a good agreement between theoretical and experimental results.

Key words quantum optics; squeezed state field; high order Hermite Gauss mode; optical parametric amplifier; Wigner quasiprobability distribution function

OCIS codes 190.4410; 270.2500; 120.2920; 090.2890

1 引 言

压缩纠缠态光场是一种重要的量子资源,因此纠缠本身及纠缠在量子信息方面的应用引起了人们的极大兴趣和关注。例如在引力波探测^[1-2]、量子

密集编码^[3-4]、量子通信和量子离物传态^[5-6]、量子逻辑操作^[7]、无噪声放大^[8-9]、量子密钥分配^[10-11]、量子密码^[12-13]和纠缠演化动力学行为^[14-15]等方面都有相关研究报道。因此可以说压缩纠缠态光场是

收稿日期: 2013-08-28; **收到修改稿日期**: 2013-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61108003)、山西省青年科技基金(2013021005-2)、量子光学与光量子器件国家实验室开放课题(KF201007)

作者简介: 杨荣国(1978—),男,博士,讲师,主要从事量子光学和量子信息及成像等方面的研究。

E-mail: yrg@sxu.edu.cn

非常重要的非经典光场。目前实验上大多采用传统的方法,通过分束器耦合两个由光学参量过程产生的压缩态光场制备纠缠源^[16-17],或者可以直接利用偏振非简并光学参量放大器(NOPA)直接产生纠缠光场^[18-19]。上述理论和实验研究都是基于传统的TEM₀₀模。连续变量的空间高阶横模的非经典光场也取得了长足的发展^[20],并且集中应用在空间信息传输、量子成像^[21-22]、量子全息^[23]和超高分辨率的测量^[24]。高阶横模或多重空间模可以提升量子信息方案的复杂性^[25],例如量子信息的平行传输、多模量子编码、多通道量子密钥分配等。这种复杂性为大容量、高效率的量子信息提供了条件^[26-27]。除此之外,高阶横模或多重空间模还可以直接应用于无噪声图像放大^[28-29]、微小位移和微小倾斜超越量子噪声极限的超灵敏度测量^[30-33]。以上实验应用的首要条件就是高阶横模压缩态的产生。2007年,Lassen等^[34]通过精细调节非线性晶体的相位匹配实验上实现了高阶模的压缩。2011年山西大学利用简并的光学参量放大器产生了TEM₀₁模的压缩态光场,利用零拍探测系统和测量量子噪声的方法研究量子态,测得压缩度为2.2 dB^[35]。除此之外,量子态的Wigner准概率分布函数也是非常重要的方法之一,Wigner函数与密度矩阵、波函数类似,包含了该量子态的全部信息,虽然量子态的Wigner函数同量子态一样,本身不能被直接测量,但是还是可以通过对量子态的一些可观测量的测量来重构与其对应的Wigner函数,其中最典型的的就是量子层析技术。1993年Smithey等^[36]实验上首次利用平衡零拍探测系统和量子层析技术重构了压缩态光场的Wigner函数。

本文通过一套TEM₀₁模的平衡零拍探测系统对明亮的TEM₀₁模压缩态光场进行量子测量,通过存储示波器获得压缩态光场不同相位角下的噪声分布,利用所记录的数据重构了TEM₀₁模压缩态光场的Wigner准概率分布函数,在相空间呈现出了该量子态的非经典特性。

2 TEM₀₁ 模压缩态实验产生及 Wigner 函数重构

2.1 明亮的 TEM₀₁ 模压缩态的产生

实验装置如图1所示。采用自制的Nd:YVO₄-KTP连续波基频和倍频双波长输出激光器作为光源,该激光器可以提供1 W的532 nm绿光和大约

80 mW的1064 nm红外光。两束光从激光器同时输出,由双色镜在空间上分开。532 nm的绿光作为抽运光注入简并光学参量放大器(DOPA)。1064 nm红外光功率被分成一弱一强两部分:弱的部分作为种子光注入DOPA;强的部分注入与DOPA对称放置的光学腔(这个腔被称为光学模式转换器,该转换器的作用是使得输入的TEM₀₀模变成TEM₀₁模并且可以稳定地输出,从而得到TEM₀₁模平衡零拍探测系统所需要的本底光)。

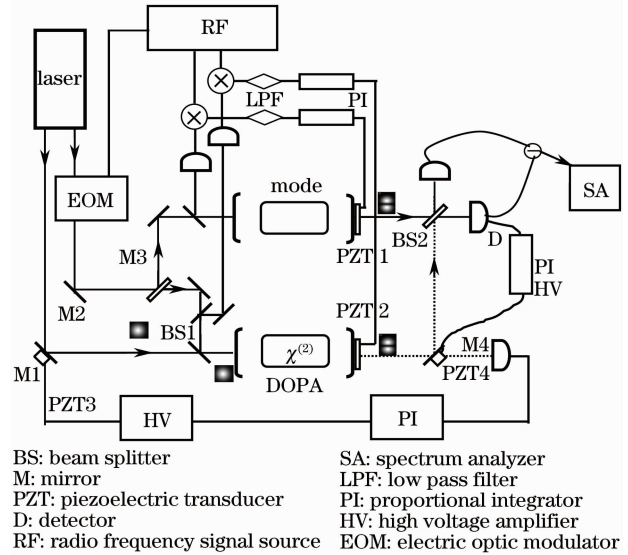


图1 产生TEM₀₁模压缩态的实验装置示意图

Fig. 1 Layout of experimental setup for TEM₀₁ mode squeezed state generation

光学参量放大器采用近共心驻波腔腔型,由两块凹面镜和一块周期极化KTP(PPKTP)晶体组成,为了能够在一定范围内微调腔长,输出镜粘接在一个Φ10 mm×10 mm的环形压电陶瓷上。光学腔的几何腔长为61.5 mm,凹面镜曲率半径为30 mm,左侧的输入镜镀红外的高反膜,绿光透射率为14%,右侧输出镜镀红外透射率为15%的绿光高反膜。与之对称的模式转换器放置在DOPA旁边,其输入镜、输出镜红外透射率分别为6%、15%。对于高阶模压缩实验,能得到约1.5 mW的TEM₀₁模,可作为平衡零拍探测的本底光。PPKTP晶体规格为1 mm×2 mm×10 mm,极化周期为9 μm,其两个端面均镀有1064~532 nm减反膜。光学参量过程利用的是KTP材料的最大非线性光学系数d₃₃,即相互作用光场的传输方向为晶体的x轴,绿光和红外光分别作为抽运和种子光,偏振方向均沿z轴,产生的压缩光偏振也是z偏振,准确地说是0类准相位匹配。

探测系统如图 2 所示,其光路部分由两块偏振分束棱镜和一个 1/2 波片组成,DOPA 输出的明亮的 TEM₀₁ 模压缩态光场 a_s 与模式转换器输出的本底 TEM₀₁ 模光场 a_l 分别以 s 偏振和 p 偏振入射偏振分束棱镜 P1,经过 1/2 波片后两束光的偏振方向

同时旋转 45°,并在偏振分束棱镜 P2 两端输出产生干涉,由一对低噪声宽带探测器 D1、D2(ETX500T InGaAs 光电二极管)转化为电信号,输出的光电流经过减法器相减后输出,由频谱分析仪测量噪声。

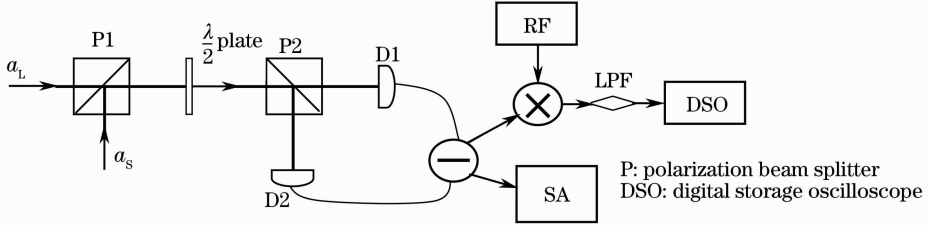


图 2 平衡零拍探测系统

Fig. 2 System of balance homodyne detection

通过精细调节抽运光和种子光,使得两者都能以 TEM₀₁ 模在 DOPA 内共振。抽运功率大约为 410 mW 左右时,通过边带锁腔技术将腔锁定到 TEM₀₁ 模的共振位置,同时微调晶体温度至 32.7 °C,此时,种子光获得最大的经典增益,再锁定抽运光和种子光的相对相位,获得稳定输出的参量缩小压缩光,该光场和模式转换器输出的 TEM₀₁ 模本底光进入后面的平衡零拍探测系统,即可采用 SA 分析压缩光的噪声特性。图 3 是 TEM₀₁ 模压缩光的噪声谱。分析频率为 3.5 MHz,曲线 a~d 分别是散粒噪声基准、压缩噪声、反压缩噪声、本底光扫描相位时的压缩光噪声。分析带宽(RBW)为 300 kHz,可视带宽(VBW)为 300 Hz。由图 3 可见,TEM₀₁ 压缩度为 (2.2±0.2) dB,反压缩度为(4.8±0.2) dB。

2.2 TEM₀₁ 模压缩态 Wigner 准概率分布函数的重构

平衡零拍探测系统的两个探测器输出的光电流信号相减后与 3.5 MHz 射频信号通过混频器混频,再通过低通滤波器,这样就将 3.5 MHz 处的噪声信号转移到零频处。该信号经过低噪声放大器放大后由存储示波器进行数据采集,如图 4 所示。

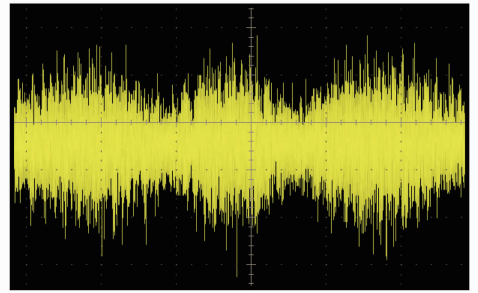


图 4 示波器存储信号

Fig. 4 Storage signal of DSO

取出一个周期的数据(π 相位对应的数据),将其等分为 100 份,则每一份对应着一个 $\pi/100$ 相位区间。将每一个相位区间中的数据点分为 100 个区间,并对所有数据点做统计,统计得出的结果对应在

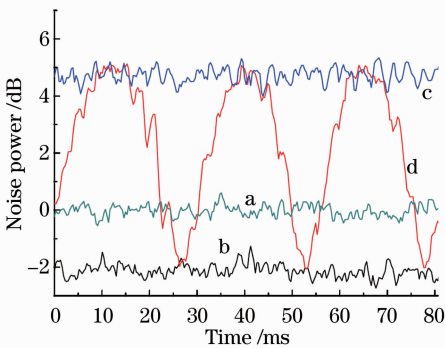


图 3 实验上测得 TEM₀₁ 的噪声谱(曲线 a~d 分别是散粒噪声基准、压缩噪声、反压缩噪声噪声、本底光扫描相位的噪声)

Fig. 3 Experimentally measured noise power spectra for the squeezed TEM₀₁ (curves a~d are the shot noise level, squeezed quadrature noise, antisqueezed quadrature noise and a noise level when the phase of local is scanned, respectively)

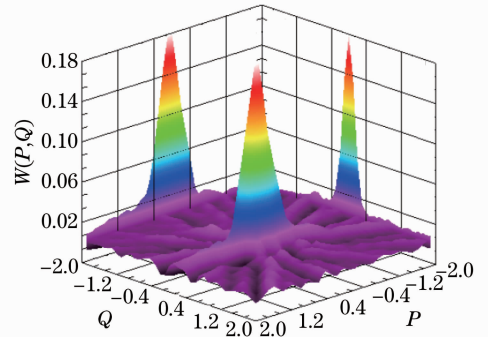


图 5 TEM₀₁ 模压缩态的 Wigner 函数重构

Fig. 5 Wigner function reconstruction of squeezed TEM₀₁ mode

该相位角下量子态噪声的边缘分布。这样就得到了量子态在不同相位角下的 100 个边缘分布。通过 Labview 编写的程序对这一系列边缘分布作逆 Randon 变换,即可重构出该量子态的 Wigner 函数,如图 5 所示。

量子态的 Wigner 函数定义为相空间中的实函数,它具有准概率分布、可为正或负值等基本性质。压缩态 Wigner 函数可表示为^[37]

$$W(P, Q) = \frac{1}{\pi} \exp[-\exp(2\zeta)(P - P_0)^2 -$$

$$\exp(-2\zeta)(Q - Q_0)^2 \tanh\left(\frac{\beta}{2}\right)]. \quad (2)$$

根据实验中产生的压缩光的噪声压缩类型及实测的压缩度可得 $r=0.25, \theta=0$,只考虑光场的量子噪声部分,取 $P_0=0, Q_0=0$ 。通过理论计算可以得到 TEM₀₁ 模压缩态光场的 Wigner 函数,如图 6 所示。

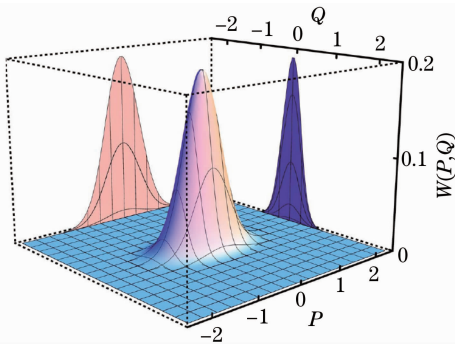


图 6 理论重构 TEM₀₁ 压缩态 Wigner 函数

Fig. 6 Theoretical reconstruction of Wigner function of squeezed TEM₀₁ mode

对比实验和理论结果,Wigner 准概率分布函数在相空间的分布及函数的变化趋势基本一致。对于两幅图相空间的 P - Q 平面,理论计算的结果比实验获得的要平整很多,这主要是由于实验中测得的数据有测量误差,数据点不集中,有一定分布宽度,并且实验中由于机械振动和空气扰动等因素不可避免地会引入一些经典噪声。

3 结 论

通过 532 nm 抽运光和 1064 nm 种子光注入一个 PPKTP 晶体组成的简并光学参量放大器,产生功率约为 90 μ W、压缩度为 2.2 dB 的明亮 TEM₀₁ 模的压缩态光场,通过量子层析技术得到了该压缩态光场在相空间的 Wigner 准概率分布函数,并将

$$\exp(-2\zeta)(Q - Q_0)^2], \quad (1)$$

式中 P 、 Q 分别是量子态的位置和动量,分别对应光场的正交振幅和正交位相,压缩因子 $\zeta = r \exp(i\theta)$,其中 r 为压缩参数, θ 为压缩角。对于实验中得到的 TEM₀₁ 压缩态光场,根据正交量子噪声可判断此量子态不是最小测不准态,存在额外的热噪声^[35],这里用 $\beta = \frac{\hbar\omega}{k_B T}$ 对其修正,其中 ω 为光频, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度^[37]。(1)式可变换为

其与理论结果作了对比,结果表明两者基本一致。

参 考 文 献

- 1 K Mckenzie, N Grosse, W P Bowen, *et al.*. Squeezing in the audio gravitational-wave detection band [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(16): 161105.
- 2 H Vahlbruch, S Chelkowski, B Hage, *et al.*. Demonstration of a squeezed-light-enhanced power- and signal-recycled Michelson interferometer [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95(21): 211102.
- 3 Jing Jietai, Zhang Jing, Yan Ying, *et al.*. Experimental demonstration of tripartite entanglement and controlled dense coding for continuous variables [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(16): 167903.
- 4 Hyuk-jae Lee, Doyeol Ahn, Sung Woo Hwang. Dense coding in entangled states [J]. *Phys Rev A*, 2002, 66(2): 024304.
- 5 A Furusawa, J L Serensen, S L Braunstein, *et al.*. Unconditional quantum teleportation [J]. *Science*, 1998, 282(5389): 706-709.
- 6 Zhai Zehui, Li Yongming, Wang Shaokai, *et al.*. Experimental study of continuous-variable quantum teleportation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(6): 2710-2716.
翟泽辉, 李永明, 王少凯, 等. 连续变量量子离物传态的实验研究 [J]. *物理学报*, 2005, 54(6): 2710-2716.
- 7 S L Braunstein, P V Loock. Quantum information with continuous variables [J]. *Rev Mod Phys*, 2005, 77(2): 513-577.
- 8 V Josse, M Sabuncu, N J Cerf, *et al.*. Universal optical amplification without nonlinearity [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(16): 163602.
- 9 Zhang Shengli, Yang Song, Zou Xubo, *et al.*. Protecting single-photon entangled state from photon loss with noiseless linear amplification [J]. *Phys Rev A*, 2012, 86(3): 034302.
- 10 He Guangqiang, Zu Siwei, Guo Hongbin, *et al.*. Security of quantum key distribution using two-mode squeezed states against optimal beam splitter attack [J]. *Chin Phys B*, 2008, 17(4): 1263-1268.
- 11 Artur Scherer, Barry C Sanders, Wolfgang Tittel. Long-distance practical quantum key distribution by entanglement swapping [J]. *Opt Exp*, 2011, 19(4): 3004-3018.
- 12 A M Lance, T Symul, W P Bowen, *et al.*. Tripartite quantum state sharing [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(17): 177903.
- 13 S Moskal, S Bednarek, J Adamowski. Controlled exchange interaction for quantum logic operations with spin qubits in coupled quantum dots [J]. *Phys Rev A*, 2007, 76(3): 032302.

- 14 Li Zongguo, Fei Shaoming, Wang Z D, *et al.*. Evolution equation of entanglement for bipartite systems[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(2): 024303.
- 15 Li Zongguo, Zhao Mingjing, Fei Shaoming, *et al.*. Evolution equation for entanglement of assistance[J]. *Phys Rev A*, 2010, 81(2): 042312.
- 16 D G Hulet, D Kleppner. Rydberg atoms in “circular” states[J]. *Phys Rev Lett*, 1983, 51(16): 1430–1433.
- 17 P Nussenzveig, F Bernardot, M Brune, *et al.*. Preparation of high-principal-quantum-number “circular” states of rubidium[J]. *Phys Rev A*, 1993, 48(5): 3991–3994.
- 18 Z Y Ou, S F Pereira, H J Kimble, *et al.*. Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox for continuous variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 68(25): 3663–3666.
- 19 Z Y Ou, S F Pereira, H J Kimble, *et al.*. Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox for continuous variables in nondegenerate parametric amplification[J]. *Appl Phys B*, 1992, 55(3): 265–278.
- 20 L A Lugiato, A Gatti, E Brambilla. Quantum imaging[J]. *J Opt B*, 2002, 4(3): S176–S183.
- 21 C Schwob, P F Cohadon, C Fabre, *et al.*. Transverse effects and mode couplings in OPOS[J]. *Appl Phys B*, 1988, 66(6): 685–699.
- 22 S Gigan, L Lopez, V Delaubert, *et al.*. Continuous-wave phase-sensitive parametric image amplification[J]. *J Mod Opt*, 2006, 53(5): 809–820.
- 23 I V Sokolov, M I Kolobov, A Gatti, *et al.*. Quantum holographic teleportation[J]. *Opt Commun*, 2001, 193(1-6): 175–180.
- 24 M Kolobov, C Fabre. Quantum limits on optical resolution[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(18): 3789–3792.
- 25 C M Caves, P D Drummond. Quantum limits on bosonic communication rates[J]. *Rev Mod Phys*, 1994, 66(2): 481–537.
- 26 Xiao Hailin, Ouyang Shan, Nie Zaiping. Capacity of multiple-input-multiple-output quantum key distribution channels [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 6779–6785.
肖海林, 欧阳缮, 聂在平. 多输入多输出量子密钥分发信道容量研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 6779–6785.
- 27 Xiao Hailin, Ouyang Shan, Nie Zaiping. The spatial degrees of freedom of MIMO quantum channels[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3685–3691.
肖海林, 欧阳缮, 聂在平. MIMO 量子信道的空间自由度研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(6): 3685–3691.
- 28 C Fabre, J B Fouet, A Maitre. Quantum limits in the measurement of very small displacements in optical images[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(1): 76–78.
- 29 V Delaubert, N Treps, C Treps, *et al.*. Quantum limits in image processing[J]. *Europhys Lett*, 2008, 81(4): 44001.
- 30 N Treps, N Grosse, W P Bowen, *et al.*. A quantum laser pointer [J]. *Science*, 2003, 301(5635): 940–943.
- 31 N Treps, U Andersen, B Buchler, *et al.*. Surpassing the standard quantum limit for optical imaging using nonclassical multimode light[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88(20): 203601.
- 32 N Treps, N Grosse, W P Bowen, *et al.*. Nano-displacement measurements using spatially multimode squeezed light[J]. *J Opt B: Quantum Semiclass Opt*, 2004, 6(8): S664–S674.
- 33 Li Rui, Zhai Zehui, Zhao Shujin, *et al.*. Experimental investigation of displacement measurement with homodyne detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(11): 7724–7728.
李睿, 翟泽辉, 赵姝谨, 等. 平衡零拍平移测量实验研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(11): 7724–7728.
- 34 M Lassen, V Delaubert, J Janousek, *et al.*. Tools for multimode quantum information: modulation, detection, and spatial quantum correlations[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98(8): 083602.
- 35 Yang Rongguo, Sun Hengxin, Zhang Junxiang, *et al.*. Generation of squeezed TEM₀₁ modes with periodically poled KTiOPO₄ crystal[J]. *Chin Phys B*, 2011, 20(6): 060305.
- 36 D T Smithey, M Beck, M G Raymer, *et al.*. Measurement of the Wigner distribution and the density matrix of a light mode using optical homodyne tomography: Application to squeezed states and the vacuum[J]. *Phys Rev Lett*, 1993, 70(9): 1244–1247.
- 37 Ulf Leonhardt. *Measuring the Quantum State of Light* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 37–66.

栏目编辑: 史敏