

文章编号: 1007-6654(2010)04-0241-06

小型真空压缩光产生装置的实验研究

邱克, 于旭东, 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: 压缩态光场是一类重要的非经典光场, 是产生量子纠缠和进行量子通信的基础, 在量子光学研究中具有十分重要的应用价值。本实验通过使用稳定的光学元件和合理的光路系统, 简化系统复杂性, 使压缩光装置整体结构紧凑、调节方便、稳定度高和可靠性好, 通过上述方法, 我们利用周期性极化磷酸钛氧钾 (PPKTP) 晶体获得了稳定的 2 dB 压缩和 8 dB 反向压缩的真空压缩光场。本装置的目的在于提供一种稳定的真空压缩光场产生装置。

关键词: 压缩光产生装置; 周期性极化磷酸钛氧钾晶体; 真空压缩光场

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 引言

压缩态光场是一种重要的非经典光场, 在量子通信, 量子计算, 精细测量等许多领域具有重要的应用^[1, 2]。尤其在量子通信方面, 两个单模压缩态光场通过分束器干涉耦合输出可构成量子纠缠源。量子纠缠源作为量子信息的核心, 可以完成量子离物传态^[2], 量子密集编码^[3, 4]和量子保密通信^[5]等许多经典光不可能完成的任务。

1970年, Stoler^[6]和 Yuan^[7]就在研究光场噪声过程中提出了正交压缩的概念。1985年美国贝尔实验室 Slusher^[8]研究小组首次在实验上观察到 0.7dB 的正交压缩。澳大利亚国立大学 Bachor 研究小组^[9]采用全固化泵浦源及 Monolithic OPO 腔, 获得 80% (7 dB) 的单模正交压缩态。2008年, 汉诺威大学的 Schnabel 小组获得了 10dB 的压缩光^[10]。我们小组也较早开展利用 PPKTP 晶体产生压缩态光场^[11, 12]的实验, 本文目的是研究一种稳定的压缩光场产生装置, 通

过使用稳定的光学元件, 设计合理的光路系统, 简化系统复杂性, 使真空压缩光装置整体结构紧凑, 产生的真空压缩态光场稳定, 该小型化压缩光源在量子信息研究中具有广泛的应用。

1 实验原理和实验装置

目前, 产生压缩态光场最为有效的手段是通过光学参量过程, 光学参量过程大多采用传统的相位匹配晶体, 如磷酸钛氧钾 (KTiOPO₄ 简称 KTP), 铌酸锂 (LiNbO₃) 和铌酸钾 (KNbO₃, 简称 KN), 由于受相位匹配条件限制, 这些晶体适用的波长范围窄, 且不能利用晶体的最大非线性系数。近年发展起来的一类新型频率转换晶体, 如周期性极化 LiNbO₃, 钽酸锂 (LiTaO₃) 和 KTiOPO₄ 等, 通过非线性光学系数的周期变化, 弥补色散引起的相位差, 实现相互作用波长的准

* 收稿日期: 2010-10-20

基金项目: 国家杰出青年基金 (批准号: 10725416); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: 2011CB921601); 国家自然科学基金创新群体基金 (批准号: 60821004)

作者简介: 邱克 (1984), 男, 山西永济人, 山西大学光学专业硕士研究生, 研究领域: 量子光学。E-mail: dike84@yahoo.cn

[†] 通讯作者: E-mail: jzhang74@yahoo.com; jzhang74@sxu.edu.cn

相位匹配。这种技术可以利用晶体的最大非线性系数,并且可以避免晶体走离效应的限制。原则上,在晶体透明波段的任何波长都可通过这种技术实现参量相互作用。周期性极化 KTiOPO_4 晶体与周期性极化 LiNbO_3 和 LiTaO_3 晶体相比,优点是室温运转且没有光折变现象;与传统的相位匹配晶体 KTiOPO_4 , LiNbO_3 和 KNbO_3 晶体相比优点是适用波长范围宽 $0.35 \mu\text{m} \sim 4.5 \mu\text{m}$ 、匹配温度带宽以及可以在室温下运转。对 1064 nm 波长,在其他参数相同的情况下,周期性极化 KTiOPO_4 (PPKTP) 晶体单次穿过转换系数是相同 KTiOPO_4 晶体(长度受走离效应限制)的 6 倍多,利用 PPKTP 晶体产生压缩光场在实验上已经进行了深入的研究^[11,12]。本实验就是采用 PPKTP 晶体,通过连续光学参量振荡器(OPO)产生稳定的真空正交振幅压缩光场。

实验光路图如图 1 所示,包括单频双波长激光器、模清洁器、光学参量放大器、锁腔系统和平衡零拍探测系统。

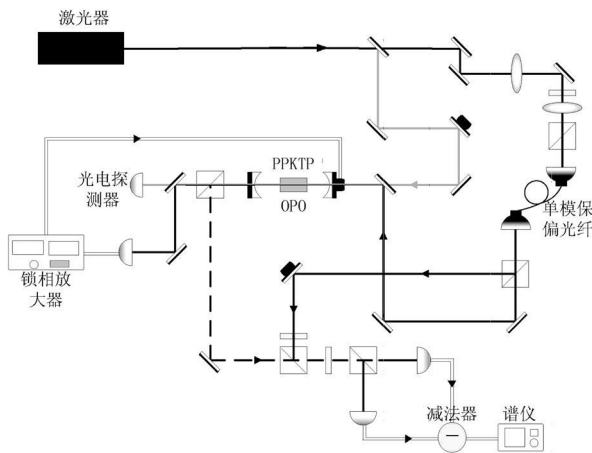


图 1 整体光路图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

如图 1 所示,单频双波长激光器输出的 532 nm 绿光和 1064 nm 红外光经对 532 nm 高反 1064 nm 增透的双色镜后分开。其中, 532 nm 光作为 OPO 的泵浦光,而 1064 nm 光经过两个透镜调节光斑大小,然后通过单模保偏光纤,光纤输出光分为两束,其中一束作为压缩测量时的本振光,另一束作为 OPO 的参考光,与 532 nm 光在 OPO 前通过一个 532 nm 增透、 1064 nm 高

反的双色平面镜合并。合并后一起入射进 OPO 腔,经过 PPKTP 晶体产生光学参量振荡过程,输出的光分为三束,其中 532 nm 光射入光电探测器监控 OPO 中绿光的模式,红外光分为两束,较小一束射入锁腔系统,作为锁腔系统的入射信号,大部分光为真空压缩光,与本振光通过 50/50 分束器干涉耦合,然后由平衡光电探测器探测,其电流信号经减法器相减后送入射频频谱分析仪记录分析真空压缩态光场的量子起伏。

1.1 单频双波长激光器

本文采用的单频双波长激光器是 LD 泵浦全固体化连续单频内腔倍频环形 Nd:YVO₄-KTP 532 nm 绿光/ 1064 nm 红外双波长激光器。如图 2 所示,LD 输出 808 nm 的泵浦光经过透镜组整形后,入射进环形腔中,环形腔由平面镜 M1 和 M2,曲率半径为 50 mm 的平凹镜 M3 和 M4 组成,泵浦光先注入到 Nd:YVO₄ 晶体上,产生的 1064 nm 基频光经过 TGG 晶体和半波片组成的单向器后在腔内共振。基频光经过 M2, M3 反射后穿过 KTP 晶体产生 532 nm 倍频光, 532 nm 光在腔内经 M3, M2 反射后输出,其功率为 220 mW , 5 h 长期功率稳定性小于 $\pm 1\%$,偏振方向与垂直方向的夹角为 45° ,同时输出的 1064 nm 红外光功率为 50 mW 。

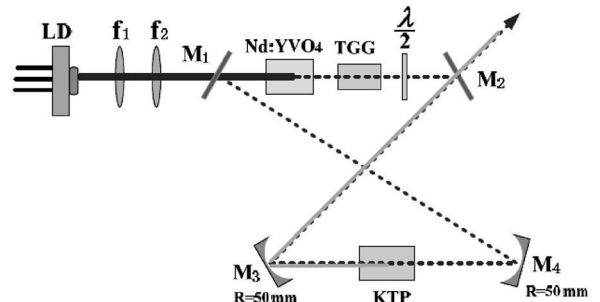


图 2 单频双波长激光器

Fig. 2 Single frequency dual wavelength laser

1.2 模式清洁系统

实验上需要很好的 1064 nm 的 TEM₀₀ 模用于平衡零拍探测,通常使用光学腔进行模式清洁,但是使用光学腔需要独立的锁腔系统,为了简化系统,本文使用单模保偏光纤作为空间模式清洁器。

如图 3 所示, 模式清洁器是由透镜 1, 半波片, 透镜 2, 偏振分束器(PBS), 光纤接收头, 单模保偏光纤和光纤出射头在光轴上依次排列构成。其中, 1 064nm 增透焦距为负 50 mm 的透镜 1 和 1 064 nm 增透焦距为 165 mm 的透镜 2 组成透镜组, 调节入射 1 064 nm 光的光斑大小和聚散情况。1 064 nm 的半波片和 1 064 nm 的偏振分束器(PBS) 调节 1 064 nm 光的偏振情况, 使激光的 TEM₀₀ 模最大效率地通过单模保偏光纤, 达到空间模式清洁的目的。

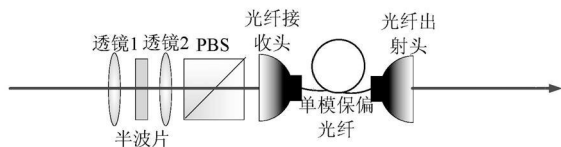


图 3 模式清洁器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mode cleaner

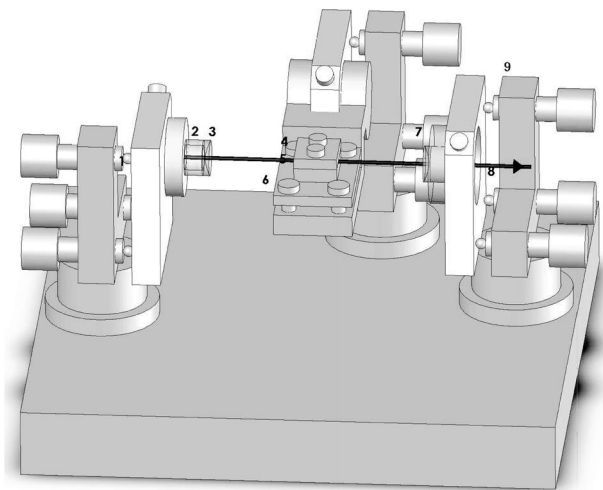
1.3 光学参量振荡器

光学参量振荡器(OPO)由光学参量腔和 PPKTP 晶体系统组成。如图 4 所示, 光学腔由固定在镜架上的两个曲率半径为 30 mm 的腔镜组成, 所用腔镜参数为: 入射镜 M1 对 532 nm 反射率为 70% 同时对 1 064 nm 高反; 输出镜 M2 对 1 064 nm 反射率为 88.7% 同时对 532 nm 高反。腔镜 M1 固定在压电陶瓷上用于控制腔长, 两者构成近共心腔。

腔的中心处, 放置有两端镀有增透膜的 PPKTP 晶体, 整个晶体放置在导热性能良好的紫铜块中, 铜块中的热敏电阻测量晶体的实时温度, 并通过反馈温控电路控制铜块最下方的半导体制冷片的加热来达到调节晶体温度使其工作在最佳温度点的目的。实验中使用固定光学支架代替传统的三维支架, 有效地提高了光学参量下转换过程的稳定度。

1.4 锁腔系统

腔长锁定系统的作用是将光学腔锁定到激光透射峰的最大处。这里我们使用边带锁腔系统。包含的主要仪器有: 信号发生器, 锁相放大器, 示波器, 积分电路, 高压放大器。如图 5 所示, 10 kHz 的正弦信号通过高压放大器加在压电陶瓷上



1: 入射光, 2: 压电陶瓷, 3: 腔镜 M1, 4: PPKTP 晶体, 5: 热敏电阻, 6: 半导体制冷片, 7: 腔镜 M2, 8: 出射光, 9: 镜架调节系统

图 4 光学参量振荡器示意图

1: the incident light, 2: piezoelectric ceramic, 3: cavity mirror M1, 4: PPKTP crystal, 5: thermal resistance, 6: Thermal electronic cooler (TEC), 7: cavity mirror M2, 8: the output light, 9: mirror mount system

Fig. 4 Schematic diagram of optical parametric oscillator (OPO)

调制腔长, 腔的 1 064 nm 透射交流信号输入锁相放大器, 通过相敏解调获得锁腔的鉴频信号, 经过高压放大器加到 OPO 腔的压电陶瓷上, 对腔长进行控制, 使腔长处于激光共振位置, 从而达到锁腔的目的。

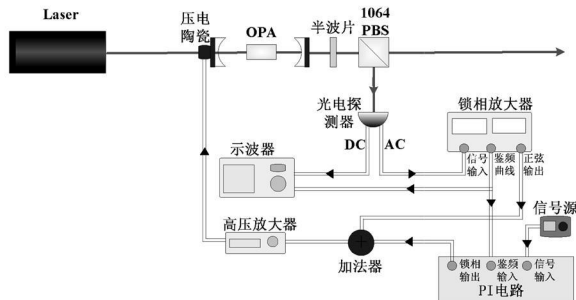


图 5 锁腔系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of lock system

1.5 平衡零拍探测系统

平衡零拍探测系统如图 6 所示, 强的本振光与真空压缩光通过偏振棱镜干涉耦合等分为两束, 然后由一对低噪声宽带平衡零拍探测器探测

分析信号场的噪声起伏的系统。平衡探测器使用 ETX500T 快速响应光电二极管作为探测器, 将光信号转换为电信号, 然后通过两极低噪声放大, 设计和调节电路使一对探测器有着完全相同的性能, 即电子学噪声相等, 增益相同, 在输入光场强度相等的情况下, 噪声都相等, 从而达到平衡的目的。两路光电流相减后由射频频谱分析仪记录分析真空压缩态光场的量子起伏。

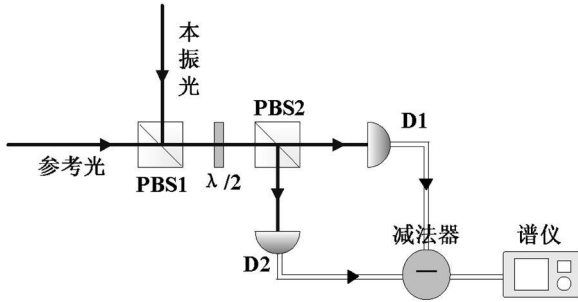


图 6 平衡零拍探测系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of balanced homodyne detection system

2 实验过程和实验结果

2.1 实验过程

如图 1 所示, 激光器输出的绿光先经过一个焦距为 250 mm 的平凸透镜准直为近似平行光, 然后经过半波片和偏振棱镜组成的分束器控制其注入 OPO 腔的功率, 其后的半波片调整偏振为垂直方向, 与 PPKTP 晶体要求泵浦光的偏振方向一致。激光器出射的红外光经过单模保偏光纤进行模式清洁。透射的红外光经过半波片和偏振棱镜进行分束, 一束作为探测压缩光的本振光; 另一束作为 OPO 参考光使用, 先经过透镜组准直为平行光, 然后经过半波片调整为垂直偏振, 在腔前通过双色镜与 532 nm 光合并, 然后从腔镜 M1 入射进 OPO 腔。

OPO 腔为近共心腔, 其参数如实验装置 1.3 所述, 腔中心处放置有 PPKTP 晶体。晶体长 × 宽 × 厚为 12 mm × 2 mm × 1 mm, 两端面都镀有 1 064 nm 和 532 nm 的双色增透膜, 放置在腔内激光腰斑处, 与两腔镜形成基频光共振、抽运光多次穿过晶体的光学腔。PPKTP 晶体被置于紫铜块之中, 紫铜块固定在装有半导体制冷块的金

属支架上, 通过温度控制仪控制其温度, 控温精度为 0.005 °C。OPO 腔的调节过程如下: 首先将准直好 532 nm 光经过一匹配透镜注入到腔中, 调节输入输出镜的角度, 让泵浦绿光在腔内共振, 通过监视 OPO 腔的 532 nm 透射光场, 来判断泵浦光在腔内模式匹配的好坏; 然后调节入射红外光在腔内共振, 也通过监视参量腔输出镜 M2 后的 1 064 nm 的透射光, 来判断基频光在腔内模式匹配的好坏。当绿光和红外都在腔中模式匹配好后, 加入 PPKTP 晶体, 通过温控仪调节晶体温度到最大参量增益温度点, 此时参量腔输出镜 M2 后红外光的增益可达 10 倍以上。

OPO 腔的 1 064 nm 透射光经过腔后的棱镜分为两束, 一束作为平衡零拍探测的参考光, 另一束由光电探测器探测用于锁腔。锁腔原理如图 5 所示, 通过锁腔系统使光学腔锁定到红外透射峰的最大处。参量腔的 1 064 nm 透射光的另一束, 经过分束棱镜反射后, 用一组透镜组进行准直后作为参考光(对应产生真空压缩光场的模式, 真空压缩光场平均光子数非常少, 不能与本振光进行模式匹配, 这里参考光主要为了与本振光进行模式匹配)与本振光在 50/50 的分束器上干涉耦合, 50/50 的分束器由一对棱镜和半波片组成。通过改变两束光的光斑大小调节两束光的干涉效率, 干涉效率对于压缩的测量十分重要, 干涉效率的好坏决定引入额外损耗的大小, 干涉效率越高等效引入的损耗越小。本振光也经过一组透镜准直, 准直后的本振光和参考光光斑模式完全相同才能保证有比较高的干涉效率。通过调节参考光光路上的反射镜组, 使两束光在空间上重合。在本振光光路上的一个反射镜装有压电陶瓷, 通过高压放大器控制压电陶瓷可以扫描本振光与参考光的相对相位而得到干涉信号, 调节两束光的干涉效率达到 94% 以上后, 可使用平衡零拍探测系统进行压缩光的测量。

2.2 实验结果

整个系统优化好后就利用平衡零拍探测装置测量光场的量子噪声。挡掉注入参量腔的 1 064 nm 参考光, 调节本振光的强度在平衡零拍探测器的线性区域, 不要对探测器饱和。等分后的两

束光分别经过 $f=65\text{ mm}$ 的聚焦透镜后进入 ETX500T 光电二极管, 输出光电流的交流部分经过射频放大和加减法器后, 送到频谱分析仪记录噪声功率谱。挡住所有光后测量的噪声功率谱为电子学噪声谱; 只打开本振光得到的是散粒噪声基准; 打开泵浦绿光调节腔共振, 这时参量振荡腔输出压缩真空场。测量结果如图 7 所示, 扫描本振光与参考光的相对相位, 就可得到压缩真空场相空间不同角度分量的量子起伏, 如图 7. a 所示: 其中黑色曲线为散粒噪声基准(SNL), 蓝色曲

线为 OPO 输出场的噪声起伏曲线, 可以看出在低于 SNL 2 dB 和高于 SNL 8 dB 之间周期性振荡。不扫描本振光和参考光的相对相位, 而是使用高压放大器设定两者的相对相位分别为 0 和 $\frac{\pi}{2}$, 可以得到 OPO 透射场压缩分量和反向压缩分量的噪声起伏如图 7. b 所示, 其中, 黑色曲线为散粒噪声基准, 蓝色曲线为压缩分量的噪声曲线, 红色曲线为反向压缩分量的噪声起伏, 可以看出, 本装置可以获得 2 dB 的压缩和 8 dB 的反向压缩。

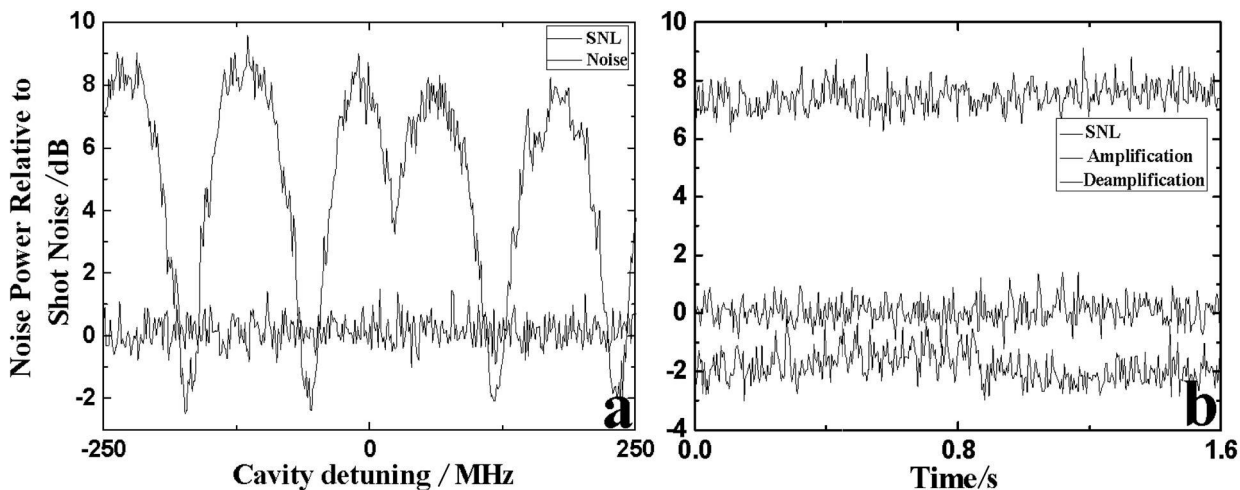


图 7 输出场的噪声起伏曲线

Fig. 7 Noise fluctuation curve of the output field

3 总结与展望

综上所述, 本文实验研究的小型真空压缩光产生装置具有以下优点: 采用较低的光路; 极大地缩小了空间; 整体结构紧促; 且产生的压缩光

场稳定。使用单模保偏光纤作为空间模清洁剂, 便于调节, 模式稳定。该装置产生的稳定度高的压缩态光场可广泛应用于压缩光和纠缠光的研究和应用中。

参考文献:

- [1] BRAUNSTEIN S L, PATI A K. Quantum Information with Continuous Variables [M]. Kluwer Academic Dordrecht, 2003.
- [2] CERF N, LEUCHS G, POLZIK E S. Quantum Information with Continuous Variables of Atoms and Light [M]. Imperial College Press London, 2007.
- [3] FURUSAWA A, SORENSEN J L, BRAUNSTEIN S L, *et al.* Unconditional Quantum Teleportation [J]. *Science*, 1998, **282**: 706-709.
- [4] LI X, PAN Q, JING J, *et al.* Quantum Dense Coding Exploiting a Bright Einstein-Podolsky-Sen Beam [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**: 047904-1-047904-4.
- [5] GROSSHANS F, ASSCHE G V, JWENGER J, *et al.* Quantum key distribution using gaussian modulated coherent states [J]. *Nature*, 2003, **421**: 238-241.
- [6] STOLER D. Equivalence Classes of Minimum Uncertainty Packets [J]. *Phys Rev D*, 1970, **1**: 3217-3219.

- [7] YUAN H P. Two-photon Coherent States of the Radiation Field [J]. *Phys Rev A*, 1976, **13**: 2226-2243.
- [8] SLUSHER R E, HOLLBERG L W, YURKE B, *et al.* Observation of Squeezed States Generated by Four-Wave Mixing in an Optical Cavity [J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**: 2409-2412.
- [9] BREITENBACH G, MÜLLER T, PEREIRA S F, *et al.* Squeezed Vacuum from a Monolithic Optical Parametric Oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, **12**: 2304-2309.
- [10] VAHLBRUCH H, MEHMET M, CHELKOWSKI S, *et al.* Observation of Squeezed Light with 10-dB Quantum-Noise Reduction [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**: 033602-1-033602-4.
- [11] 马红亮, 卫栋, 叶晨光, 等. 利用周期性极化 KTiOPO_4 晶体参量缩小过程产生明亮振幅压缩光 [J]. *物理学报*, 2005, **54**: 3637-3640.
- [12] 叶晨光, 张靖. 利用 PPKTP 晶体产生真空压缩态及其 Wigner 准概率分布函数的量子重构 [J]. *物理学报*, 2008, **57**: 6962-6967.

Experimental Investigation of Small-sized Squeezed Vacuum Light Device

DI ke, YU Xudong, ZHANG jing

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

Abstract: Squeezed light is an important non-classical light field. It is the basis of quantum entanglement and quantum communication and has a very important application value in quantum optics field. In this paper, we utilize stable optical components and simplify the complexity of the generation system of squeezed light, so we could obtain a stable squeezed vacuum light with the squeezed component of 2 dB below shot noise level (SNL) and the anti-squeezed component of 8 dB above SNL by periodically poled potassium titanyl oxygenic phosphate (PPKTP) crystals. The purpose of this paper is to provide a stable generation device of squeezed vacuum light.

Key words: generation device of squeezed light; periodically poled potassium titanyl oxygenic phosphate crystals; squeezed vacuum field