

多用非经典光场产生系统的实验研究^{*}

潘 庆 王 海 张 云 苏 红 谢常德 彭 堃

(山西大学光电子研究所, 太原 030006)

于正刚 路庆明

(山东大学化学学院, 济南 250100)

(1998 年 2 月 17 日收到; 1998 年 3 月 20 日收到修改稿)

由 α -切割 KTP 晶体组成的半整块非简并光学参量振荡腔, 以倍频 Nd:YAP 激光器作抽运源, 可在不同运转条件下获得两类非经典光场. 低于振荡阈值, 该系统输出最大压缩度为 3.7 dB 的双模正交压缩真空态; 高于阈值, 产生强度差压缩度为 7 dB 的量子相关孪生光子对. 系统能在锁定状态下持续稳定运转半小时以上.

PACC: 4250; 4265

1 引 言

由于光场压缩态、亚泊松分布光场和量子相关孪生光子对等非经典电磁场态, 从本质上揭示了光波场的量子性, 并在高科技领域有着重要应用前景, 近十年已引起科技界的广泛研究兴趣. 特别是压缩态光场, 其某一可观测量的起伏低于标准量子极限 (SQL), 可用于超高精度光学测量与微弱信息探测, 克服量子噪声对测量灵敏度的限制^[1]. 通过光学参量振荡腔 (OPO) 所产生的正交压缩真空态光场与具有强度差压缩特性的孪生光子对均已被应用于各类亚散粒噪声极限 (SSNL) 的光学测量. 实验证明, 测量信噪比高于相应的 SQL^[2-5].

为了实际应用, 压缩态光场产生系统应尽可能简单和运转可靠. 1986 年美国 Kimble 小组以灯泵稳频 Nd:YAG 激光器为抽运源, 铌酸锂晶体为非线性介质, 通过 OPO 腔内简并参量下转换, 产生了 1.06 μm 波长的单模正交压缩真空态光场, 噪声低于真空量子起伏 3 dB^[6]. 近期, 德国 Mlynek 小组用半导体激光 (LD) 驱动的倍频 Nd:YAG 激光器, 抽运全整块铌酸锂光学参量振荡腔, 获得压缩度为 5.5 dB 的单模正交压缩真空态^[7]. 虽然 I 类相位匹配铌酸锂晶体非线性系数较高, 光学质量好, 但由于匹配温度范围很窄 (约 0.3°C)^[8], 控温较困难, 难以获得长时间稳定的压缩光输出, 加之下转换信号模与闲置模具有相同的偏振态, 不便于量子相关孪生光子对的分离、探测与利用. II 类相位匹配 KTP 晶体兼有较高非线性变换效率、较宽相位匹配温度范围、大接收角和在 0.5 至 1.4 μm 波段内吸收系数甚低等诸多优点, 获得了广泛应用. 法国 Kastler-rossel 实验室用 II 类角度

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 69438010)、山西省自然科学基金和山西省归国留学人员基金资助的课题.

匹配 KTP 晶体,通过运转于阈值以上的 OPO 腔内参量下转换,在 430 mW 的抽运功率下获得强度差压缩度高达 86% (8.5 dB),总功率为 6 mW,波长为 1.06 μm 的孪生光束^[9]. 在按 II 类角度匹配要求切割的 KTP 晶体中,偏振方向正交的信号模与闲置模之间不可避免地存在光束离散效应,从而影响变换效率的提高,阈值抽运功率也相应增大.由于光束离散,两个亚谐波模在 OPO 腔内不能准确重合,所以不能用之获得耦合模的双模正交压缩态.我们用双 KTP 晶体反向串接,消除了光束离散,于 1992 年初获得压缩度约 30% 的双模正交压缩真空态^[10],并于近期在 300 mW 的抽运功率下产生了强度差压缩度为 50% (3 dB),总强度高达 23 mW 的孪生光束^[11].但是,双 KTP 晶体串接增加了两个入射面,内腔损耗增大,影响压缩度的提高. Kimble 小组在用连续变量实现 EPR (einstein-podolsky-rosen) 的实验中,以 Nd:YAP 激光器的倍频光 (0.54 μm),抽运由 α -切割 KTP 晶体构成的环形光学参量振荡腔,经阈值以下 II 类 90° 非临界相位匹配参量下转换,获得压缩度约 3.6 dB 的双模正交压缩真空态^[12].由于这一系统采取抽运场与亚谐波场分别在两个不同的环形腔内振荡,结构复杂(共有六面腔镜),对光学元件质量要求甚高.我们设计了 α -切割 KTP 半整块 Fabre-Perot OPO 腔,在较低的抽运功率 (90 mW) 下,通过阈值以上的光学参量下转换,获得波长近 1.08 μm 的孪生光子对,总强度约 20 mW,强度差压缩度为 80% (7 dB)^[13].在文献 [13] 中半整块腔的凹面镜曲率半径 $r = 20$ mm,总腔长仅 19 mm,因而单模线宽较宽,在实验上很难使信号模与闲置模准确重合及双模同时共振,因而未能获得正交压缩态.

为了用同一系统产生不同类型的非经典光场,我们将 OPO 输出耦合镜曲率半径增大,腔长增长,并用光楔补偿不同波长之间的色散,在三模严格共振的条件下,获得压缩度为 3.7 dB 的双模正交压缩真空态光场,并在同一系统上,通过阈值以上的参量下转换,产生了偏振非简并,频率近简并的孪生光束,其强度差压缩度为 7 dB.系统能在维持压缩度基本不变的锁定状态下连续运转半个小时以上.

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,抽运源为自行设计与研制的内腔倍频稳频 Nd:YAP 激光器^[14],最大倍频光 (0.54 μm 波长) 输出可达 1 W.实验中,将倍频光功率稳定在 800 mW 左右,功率波动小于 $\pm 2.5\%$,频率稳定性优于 ± 1.9 MHz,此时激光器约有 260 mW 的基频光 (1.08 μm 波长) 输出,被用于激光器锁定, OPO 腔校准和平衡零差探测器的本底振荡光.

为了提高平衡探测器的零差效率,必需要求本底光与 OPO 输出的红外信号光模空间分布严格重合.为此,我们在红外光路中插入近共焦腔 F-P1 (腔长 110 mm,精细度 160) 作为模清洁剂.经过模清洁器的基波光束不仅消除了由于 Nd:YAP 激光晶体各向异性所造成的椭圆形横模结构^[15],获得规整的圆形高斯光束,而且也大大降低了本底光的振幅噪声.通过多次白光校准^[2],我们确定了在 1 MHz 以上其噪声水平可作为标准量子极限.模清洁剂输出的红外光一部分注入平衡零差探测器作为本底振荡光 (约 2 mW),一部分注

入光学参量振荡腔 OPO 来模拟红外信号光, 便于光路校准. 在平衡零差探测器中本底光与模拟信号光模的空间重叠程度可用其干涉条纹可见度表征^[10]. 与文献[10]相比, 由于加入了模清洁剂, 干涉效率由 $\sim 90\%$ 提高到 $\sim 98\%$, 因而探测系统的零差效率也相应提高. 此外, F-P1 腔又兼作激光器稳频系统的频率标准, 通过电子学反馈稳定激光频率. 扫描共焦腔 F-P2 与示波器相联, 用于监视激光器频率跳动. 在压缩态测量过程中不容许跳

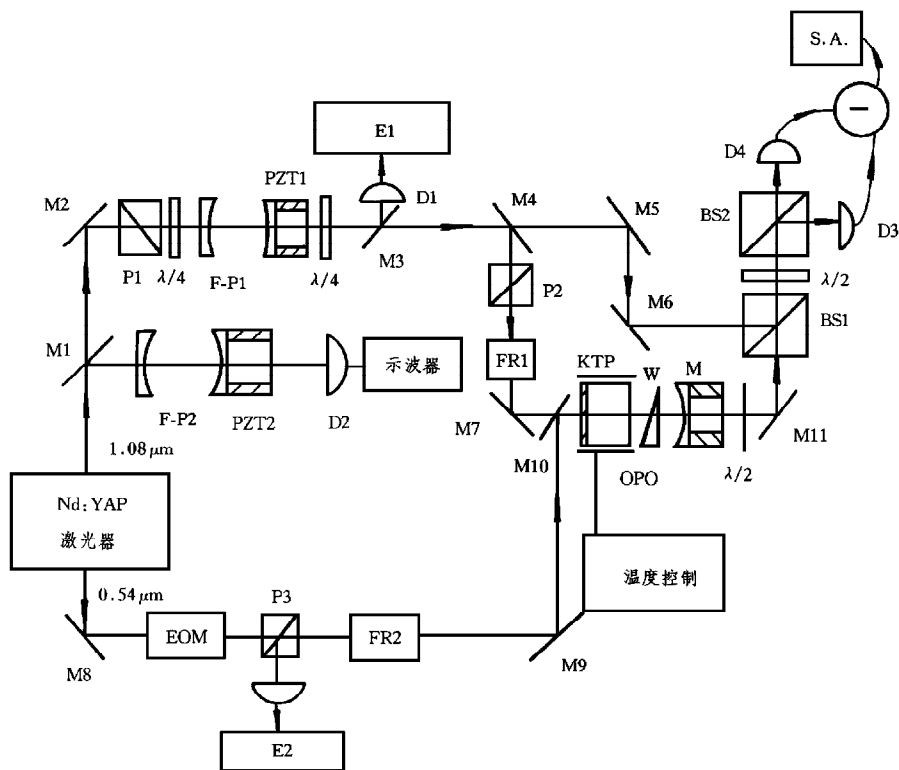


图1 实验装置图 E1为锁定激光器的电反馈系统;E2为锁定OPO腔的电反馈系统.M1,M3,M4为 $1.08\mu\text{m}$ 部分反射镜;M2,M5,M6,M7,M11为 $1.08\mu\text{m}$ 全反镜;M8,M9,M10为 $0.54\mu\text{m}$ 全反镜;P1,P2,P3,BS1,BS2为偏振分光棱镜;F-P1为模清洁剂;F-P2为共焦参考腔; $\lambda/4$ 为四分之一波片; $\lambda/2$ 为半波片;PZT为压电陶瓷;D1,D2,D3,D4,D5为探测器;FR1,FR2为法拉第旋转器;EOM为电光调制晶体;KTP为KTP晶体;W为光楔;OPO为光学参量振荡腔;M为OPO输出镜;S.A.为频谱分析仪.

模现象发生, 我们的激光系统一般可连续运转几小时, 无跳模现象. 偏振棱镜(P1)与 $1/4$ 波片($\lambda/4$)及偏振棱镜(P2)与法拉第旋转器(FR1)组成两个光学隔离器, 防止腔镜反射光影响激光的稳定性.

激光器输出的二次谐波($0.54\mu\text{m}$)经电光调制晶体(EOM), 偏振棱镜(P3)和法拉第旋转器(FR2)注入OPO腔, 作为参量下转换的抽运光.P3与FR2组成光学单向器防止激光反馈, 并从反射光中提取EOM的调制信号完成OPO腔的边带锁频.

OPO腔采用半整块结构, 总腔长为 49 mm . α -切割($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$), KTP晶体长

10 mm, 前端镀有对 $1.08\ \mu\text{m}$ 全反, 对 $0.54\ \mu\text{m}$ 的反射率为 88% 的双色膜, 兼作 OPO 的输入耦合镜, 另一端镀有对 1.08 和 $0.54\ \mu\text{m}$ 的双增透膜, 晶体置于控温精度为千分之一度的精密控温炉中, 在相位匹配稳定范围内微调温度可使 $1.08\ \mu\text{m}$ 的 e_1 和 e_2 模同时共振. 输出耦合镜为曲率半径 $r=50\ \text{mm}$ 的凹面镜(M), 对 $0.54\ \mu\text{m}$ 全反, 对 $1.08\ \mu\text{m}$ 透射率为 5%. 固定于 M 上的 PZT 可在校准过程中扫描 OPO 腔长. 在正交压缩态产生实验中, 内腔插入两面均镀有双增透膜的光楔(W), 在光束中横向平移光楔, 可通过色散补偿 1.08 与 $0.54\ \mu\text{m}$ 波长之间的光程差, 达到抽运、信号与闲置模三模严格共振. OPO 腔对 1.08 与 $0.54\ \mu\text{m}$ 波长的精细度分别为 80, 50.

以往, 探测正交压缩真空态光场的平衡零差探测器, 均采用 45° 入射对 S 偏振光为 50/50 的多层介质膜为分束镜^[2,10], 虽然结构较简单, 但因为分束片的分束比由膜层决定. 一般很难做到 50/50 精确分束的要求, 加之膜层质量会随着时间的推移而下降, 造价较高. 采用由两个偏振棱镜(BS1 和 BS2)和一个半波片($\lambda/2$)组成的分束系统, BS1 与 BS2 的透振方向平行, 光束经半波片后偏振方向旋转 45° . 这种结构不仅易于保证进入探测器 D3 和 D4(ETX500T)的光能量完全平衡, 而且在其一臂上本底光与信号光的位相相同, 在另一臂上位相相反, 因而与介质膜分束镜相同, 两探测器输出光电流经减法器相减后, 将反映信号光场的噪声起伏.

3 压缩态光场的探测

3.1 正交压缩真空态

正交压缩真空态光场中, 电磁场某一正交分量的起伏被“压缩”到低于真空起伏, 与此同时, 另一分量的起伏增加至高于标准量子极限, 二者的乘积仍受测不准关系制约^[10]. 在这种情况下, 电磁场的量子起伏依赖于位相. 电场算符正交分量 $x = \hat{a} + \hat{a}^+$ 和 $p = (\hat{a} - \hat{a}^+)/i$ 的起伏相应于极大噪声增加 S_+ (antisqueezing - “反压缩”)和最大压缩 S_- (squeezing). 在不考虑系统效率和传输损耗时, 从 OPO 腔输出光场的压缩谱 $S_{\pm}$ 可表示为^[7]

$$S_{\pm}(\Omega, P) = \pm \frac{4\sqrt{P/P_{\text{th}}}}{(\Omega/\Gamma)^2 + (1 \mp \sqrt{P/P_{\text{th}}})^2}. \quad (1)$$

其中 Ω 为噪声分析频率, P 为抽运功率, P_{th} 为 OPO 的阈值功率, Γ 为腔线宽.

实验中, 谱分析仪记录由平衡零差探测器输出光电流起伏谱 ϕ , 被测量的光电流谱密度与压缩谱 $S_{\pm}$ 之间的关系为^[7]

$$\phi_{\pm}(\Omega, P) = \phi_0[1 + \xi\rho S_{\pm}(\Omega, P)]. \quad (2)$$

这里 ϕ_0 为真空态输入的谱密度. ξ 为 OPO 输出耦合效率, $\xi = T/(T + \delta)$, T 为 OPO 输出耦合镜的透射率, δ 为 OPO 腔内的额外损耗, 对我们的 OPO, $T \approx 5\%$, $\delta \approx 1.3\%$, $\xi = 79\%$. ρ 为探测效率, 由 OPO 腔之后光学系统的传输效率 ($\mu \approx 85\%$), 探测器量子效率 ($\epsilon \approx 89\%$) 和零差效率 ($\eta \approx 98\%$) 决定^[10]

$$\rho = \mu\epsilon\eta^2 = 73\% . \quad (3)$$

由(1)式知,从理论上讲,在零频和阈值抽运功率可得最大压缩,即 $S_- = -100\%$. 然而,实际情况中,零频附近激光器自身热噪声很大,而高于 1 MHz 后迅速降低至标准量子极限. 取探测频率为 2 MHz , 经白光校准,此时的激光噪声与散粒噪声基准重合. 在阈值功率附近, OPO 腔附加噪声很大,反而会降低压缩,我们选择 90 mW 的抽运功率(约为阈值功率的 $3/4$)进行压缩测量. 从(1)式可计算出理论压缩度为

$$S_- \approx -99\% . \quad (4)$$

OPO 腔被精确调节至三模同时共振后,去掉注入的红外信号光,通过边带锁频技术将 OPO 腔长锁定于抽运光的透射峰上,扫描本底光的位相,即可进行探测. 图 2 是在 $\Omega = 2\text{ MHz}$ 时谱仪所记录的 OPO 腔输出光均方根(rms)噪声电压对本底振荡光位相的依赖关系. 曲线 a 是腔输出被屏蔽时,真空场的噪声电压,为压缩态探测的真空噪声基准. 曲线 b 是 OPO 输出存在时,所记录的噪声电压,它随本底振荡光位相扫描而呈周期性起伏,曲线的最低谷与实测的 ϕ_- 相对应. 取真空噪声基准为 0 dB , $\phi_- = -3.7\text{ dB}$, 相对于实测压缩度 $\xi\rho S_-(\Omega, P) = 57\%$, 与由(1)式计算的 S_- 一致.

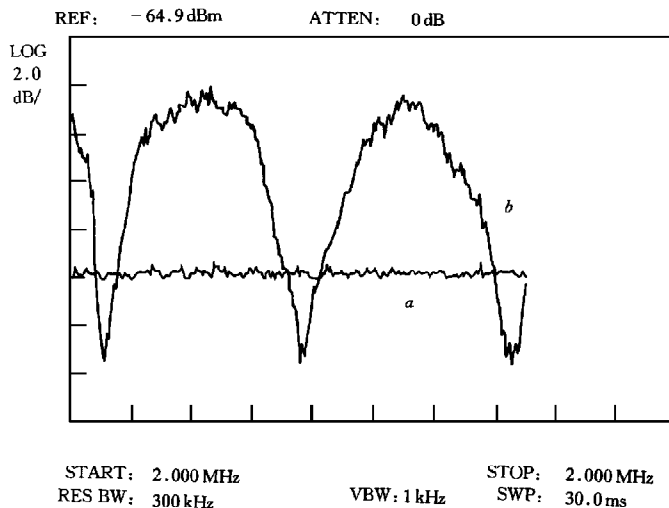


图 2 正交位相压缩态实验结果

3.2 强度差压缩

因为强度差压缩只依赖于 OPO 腔的输出耦合效率,不要求严格的三模同时共振,所以不需插入光楔补偿程差. 移出光楔后, OPO 内腔损耗降低,输出耦合效率提高,阈值功率由 120 mW 降至 50 mW . 依然在 90 mW 的抽运功率下,获得 16 mW 的量子相关红外孪生光子对输出. 由于 OPO 运转于阈值以上,强度差压缩探测不需本底光,由偏振棱镜将输出的 e_1 与 e_2 光分束后,由探测器直接探测(详见文献[13]). 图 3 是实验测定的归一化强度差噪声功率谱,在 2.2 MHz 附近压缩度约为 80% ($\sim 7\text{ dB}$).

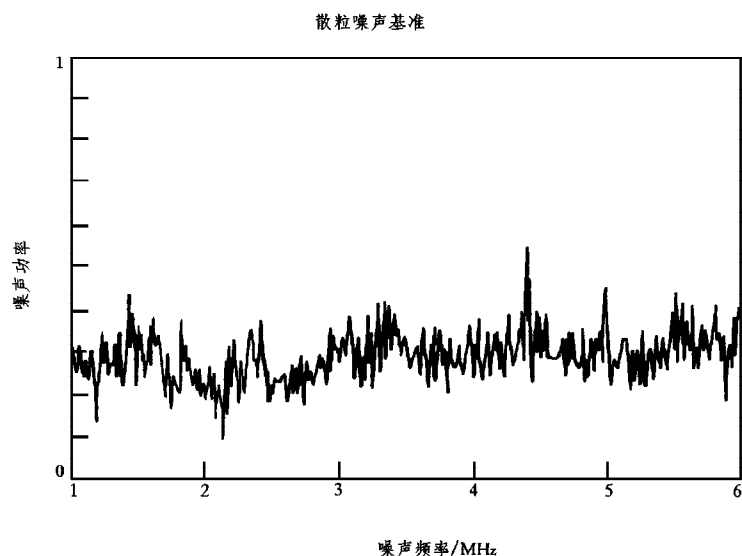


图3 强度差压缩态实验结果

4 结 论

我们设计了由 α -切割 KTP 晶体组成的半整块连续非简并光学参量振荡腔,用内腔倍频稳频 Nd:YAP 激光器为抽运源,在低于与高于振荡阈值的运转条件下,分别获得双模正交压缩真空态光场与强度差压缩态光场.由于腔型结构简单,易于调整,运转可靠,所以有希望发展为一种实用的多功能非经典光场产生系统.据我们所知,迄今为止还未见报道用同一系统获得两种不同类型的非经典光场态.在通过 II 类相位匹配晶体产生双模正交压缩态实验中,要求不同偏振态的信号模与闲置模同时共振,并要求两模损耗尽可能平衡,与经由 I 类匹配晶体产生的单模正交压缩态实验相比,难度增加,压缩度提高也受到影响,但双模压缩系统在量子非破坏测量、EPR 实验及孪生光子对产生等诸多应用中有着不可替代的用途.特别是 α -切割 II 类匹配 KTP 晶体的使用,消除了两模之间的光束离散效应,使变换效率提高,阈值降低,更拓宽了应用前景.目前半导体激光抽运的 Nd:YAP 全固化激光器已在实验室研制成功,用之作抽运源,可望完成全固化、小型、可供实际应用的多用非经典光场产生系统.

- [1] Applied Physics B, Special issue on Quantum noise reduction in optical system: experiments, **B55**(1992), 189.
- [2] M. Xiao, L. A. Wu and H. J. Kimble, *Opt. Lett.*, **13**(6)(1988), 476.
- [3] P. Grangier, R. E. Slusher, B. Yurke and A. Laporta, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(19)(1987), 2153.
- [4] E. S. Polzik, J. Carri and H. J. Kimble, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(20)(1992), 3032.
- [5] W. Hai, X. Changde, P. Qing, X. Chengyang, Z. Yun and P. Kunchi, (The Proceeding of the Third International Conference on Quantum Communication and Measurement, Sept. 25—30, 1996, in Shizuoka, Japan), Edited by O. Hirota

- et al.*, (Plenum Press, New York, 1997), p.445.
- [6] Ling-An Wu, H.J. Kimble, J.L. Hall and Huifa Wu, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(20)(1986), 2520.
 - [7] G. Breitenbach, T. Muller, S.F. Pereira, J. Ph. Poizat, S. Schiller and J. Mlynek, *J. Opt. Soc. Am.*, **B12**(11)(1995), 2304
 - [8] Ling-An Wu, Min Xiao and H.J. Kimble, *J. Opt. Soc. Am.*, **B4**(10)(1987), 1465 .
 - [9] J. Mertz, T. Debuisschert, A. Heidmann, C. Fabre and E. Giacobino, *Optics Letters*, **16**(16)(1991), 1234.
 - [10] Pang Kunchi, Huang Maoquan, Liu Jing, Lian Yimin, Zhang Tiancai, Yu Chen, Xie Changde, *Acta Physica Sinica*, **42**(1993), 1079(in Chinese).
 - [11] Wang Hai, Xue Chenyang, Gao Jiangrui, Xie Changde, Peng Kunchi, *Acta Optica Sinica*, **17**(8)(1997), 1002(in Chinese).
 - [12] Z. Y. Ou, S. F. Pereira, H. J. Kimble and K. C. Peng, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(25)(1992), 3663.
 - [13] Pan Qing, Zhang Yun, Zhang Tiancai, Xie Changde, Peng Kunchi, *Chinese Journal of Lasers*, **24**(7)(1997), 631 (in Chinese).
 - [14] Pan Qing, Zhang Jun, Zhang Tiancai, Li Ruining and Peng Kunchi, *Chinese Journal of Lasers*, **A23**(1)(1996), 6 (in Chinese).
 - [15] Shen Hongyuan, Zhou yuping, Yu Guifang, Huang Xiaoliang, Wu Caiming, Ni Yuyun, *Acta Physica Sinica*, **31**(1982), 1235(in Chinese).

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ABOUT THE GENERATION SYSTEM OF MULTIPLE NONCLASSICAL LIGHTS *

PAN QING WANG HAI ZHANG YUN SU HONG XIE CHANG-DE PENG KUN-CHI

(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006)

YU ZHENG-GANG LU QING-MING

(College of Chemistry, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 17 February 1998; revised manuscript received 20 March 1998)

ABSTRACT

The configuration of a semimonolithic continuous nondegenerate optical parameter oscillator consisting of an α -cut KTP crystal pumped by an intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YAP laser is designed. Both two-mode quadrature-phase squeezing of 3.7 dB and intensity-difference squeezing of 7 dB have been generated from the cw-NOPO operating respectively below and above the oscillation threshold. The system can operate stably to generate the squeezed light for over half an hour.

PACC: 4250; 4265

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China under the Grant No. 69438010.