

文章编号: 1007-6654(2014)02-0124-06

超短脉冲光参量振荡器中 TEM_{01} 模经典增益的实现

刘灵, 霍楠, 刘奎, 张俊香, 郜江瑞[†]

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

摘要: 用中心波长为 850 nm, 重复频率为 76 MHz, 脉宽为 130 fs 的飞秒脉冲光产生二次谐波, 泵浦 TEM_{01} 模的同步光学参量振荡器, 实验上获得了 TEM_{01} 模大约 4 倍的经典增益, 并给出了理论分析。这是产生高阶模飞秒脉冲光非经典频率梳的重要步骤, 理论预计该增益下可以得到 -2.20 dB 的 TEM_{01} 模脉冲压缩光。

关键词: 飞秒脉冲光; 同步泵浦光学参量振荡器; TEM_{01} 模经典增益

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20142002.0124

0 引言

非经典态光场是量子信息领域中的重要资源。锁模飞秒脉冲压缩光是具有光学频率梳结构的多模非经典光场, 具有峰值功率高, 谱宽宽, 脉宽窄和特殊量子噪声的特性, 可应用于量子计算^[1-2]、脉冲激光的时间传输^[3]和时间精确计量^[4-5]、高精度参量估算^[6]等领域。然而实验上大多研究的是空间基模脉冲光的压缩^[7-8]。鉴于高阶模式具有复杂的空间结构和包含更大信息量的特点以及空间高阶模压缩^[9-10]在空间精密测量^[11]的重要应用, 我们准备结合空间高阶模与飞秒脉冲光的优点, 获得空间 TEM_{01} 模的脉冲压缩光, 为时域和空间的同时精密测量提供良好的光源。

基于超短脉冲光的同步泵浦光学参量振荡器 (synchronously pumped optical parametric oscillator, 即 SPOPO) 是产生锁模飞秒脉冲光压缩的重要手段。SPOPO 是让脉冲光在 OPO 中往返一周的时间等同于锁模飞秒脉冲激光的周期。它既结合了飞秒脉冲瞬时功率高和谐振腔对光进行放大的优点, 同时又保持了脉冲光原有的频率梳结构。

2011 年, 法国 Fabre 小组用中心波长为 795 nm, 单共振的 SPOPO 首次实现了飞秒脉冲压缩光, 得到了 1.2 dB 的振幅压缩光, 给出了量子态在频域上多模的实验证据^[7]。2013 年, 山西大学利用锁模飞秒脉冲激光二次谐波产生的泵浦光泵浦单共振 SPOPO, 获得了空间 TEM_{00} 模的非经典频率梳, 测得压缩度为 2.58 dB 的正交位相压缩光^[8]。但目前没有关于空间 TEM_{01} 模脉冲压缩光的实验报道。

本文中用中心波长为 850 nm, 重复频率为 76 MHz, 空间 TEM_{00} 模的脉冲光通过 SPOPO 腔, 引入微小平移和倾斜产生了空间上的 TEM_{01} 模。中心波长为 425 nm 的 TEM_{00} 模脉冲光泵浦参量放大器中的 I 类共线 PPKTP 晶体, 获得了 TEM_{01} 模大约 4 倍的增益, 为下一步测量空间高阶模飞秒脉冲压缩态做准备。

1 理论分析

注入到谐振腔的 TEM_{00} 模高斯光束, 当在其竖直方向 y 上引入微小平移量 d 时, 其光场

收稿日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(11274212; 61121064); 国家重点基础研究发展计划(2010CB923102)

作者简介: 刘灵(1989-), 女, 山西运城人, 硕士生, 研究领域: 量子通信与量子测量。E-mail: 374654102@qq.com

[†]通信作者: 郜江瑞, E-mail: jrgao@sxu.edu.cn

应表示为:

$$u_{00d}(x, y + d) \approx u_{00}(x, y) + \frac{d}{\omega} u_{01}(x, y), \quad (1)$$

$$u_{00}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \omega} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{\omega^2}}, \quad (2)$$

$$u_{01}(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \frac{y}{\omega^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{\omega^2}}, \quad (3)$$

其中, u_{00} 和 u_{01} 分别为 TEM₀₀ 模和 TEM₀₁ 模高斯光束在谐振腔腰斑处的横向分布; ω 是腔内 TEM₀₀ 模腰斑; λ 是光场的中心波长; x 与 y 代表与传播方向垂直的横向面上的水平与竖直方向。

因此实验上可以通过对 TEM₀₀ 高斯光束的微小平移和倾斜获得 TEM₀₁ 模。

对于简并光学参量振荡器, 频率为 $2\omega_0$ 的 TEM₀₀ 模谐波场(泵浦场)下转换为频率为 ω_0 的 TEM₀₁ 模基频场(下转换场), 其内腔模的量子朗之万方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}}(t) &= -\gamma \hat{a}(t) + \chi_{01} \hat{a}^+(t) \hat{b}(t) + \sqrt{2\gamma_{in}} \hat{a}_{in}(t) + \sqrt{2\gamma_l} \hat{\nu}_l \\ \dot{\hat{b}}(t) &= -\gamma_{sh} \hat{b}(t) - \frac{\chi_{01}}{2} \hat{a}^2(t) + \sqrt{2\gamma_{in,sh}} \hat{b}_{in}(t) + \sqrt{2\gamma_{l,sh}} \hat{\nu}_{l,sh}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \hat{a} 和 \hat{b} 分别为内腔基频场和谐波场; \hat{a}_{in} 和 \hat{b}_{in} 分别为注入的基频场和谐波场; $\hat{\nu}_l$ 表示真空起伏; $\gamma = \gamma_{in} + \gamma_l$ 为基频场的损耗速率; $\gamma_{sh} = \gamma_{in,sh} + \gamma_{l,sh}$ 为谐波场的损耗速率; γ_{in} 、 $\gamma_{in,sh}$ 为输入镜相对于基频场和谐波场的损耗速率; γ_l 、 $\gamma_{l,sh}$ 为基频场和谐波场的腔内损耗速率。

χ_{01} 为 TEM₀₀ 谐波场与 TEM₀₁ 模基频场的非线性耦合系数^[12]:

$$\chi_{01} = 12 \frac{\chi^2 \epsilon_c}{\omega_p} \left(\frac{\omega_0}{n_c L_{eff}} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{\hbar}{\pi \epsilon_0}} A_{I01} = \frac{\chi_{00}}{2}, \quad (5)$$

$$A_{I01} = \iint u_{p00}(u_{s01})^2 dx dy, \quad (6)$$

其中, A_{I01} 是 TEM₀₀ 模谐波场和 TEM₀₁ 模基频场的相互作用有效光斑面积; u_{p00} 和 u_{s01} 分别为 TEM₀₀ 模谐波场和 TEM₀₁ 模基频场在晶体中心处的横向分布; $\chi^{(2)}$ 是长为 ϵ_c 的非线性晶体的二阶磁化系数; ω_0 是基频场的中心频率; ω_p 是谐波

场与腔匹配时的腰斑半径; n_c 是晶体的色散系数; L_{eff} 是有效非线性光学系数; χ_{00} 为 TEM₀₀ 模谐波场和 TEM₀₀ 模基频场的非线性耦合系数。

求解(4)式的稳态解, 得出 TEM₀₁ 模参量振荡器的阈值 P_{th}^{01} 为:

$$P_{th}^{01} = \frac{\gamma}{\chi_{01}} = 2 \frac{\gamma}{\chi_{00}} = 2P_{th}^{00}, \quad (7)$$

其中, P_{th}^{00} 表示基频场为 TEM₀₀ 模时参量振荡器的阈值。

基频场增益 G 与参量振荡器的阈 P_{th} 的关系式^[13]:

$$G = \frac{1}{\left(1 - \sqrt{\frac{P}{P_{th}}}\right)^2}. \quad (8)$$

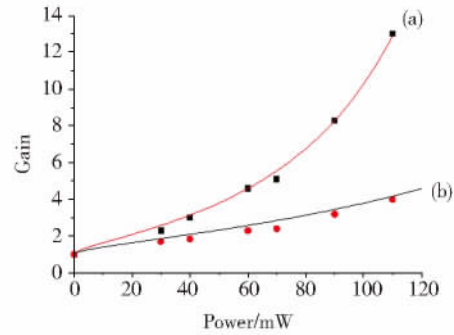


Fig. 1 Graphic of the fundamental field gain and the pump power

(a) stands for the TEM₀₀, (b) stands for the TEM₀₁

图 1 基频场的增益与谐波场平均功率关系图

(a) 基频场为 TEM₀₀ 模, (b) 基频场为 TEM₀₁ 模

可用图 1 表示, (a) 代表 TEM₀₀ 模的 $G-P$ 图, (b) 代表 TEM₀₁ 模的 $G-P$ 图。从图中可以看出, 随着泵浦功率的增大, 基频场的增益 G 增加, 但 TEM₀₀ 模基频场的增益增加的较快; 当 TEM₀₀ 模谐波场泵浦平均功率一定时, TEM₀₀ 模基频场的增益比 TEM₀₁ 模基频场的大, 例如当 TEM₀₀ 模基频场的增益为 13 时, TEM₀₁ 模基频场的增益为 4.1 左右。

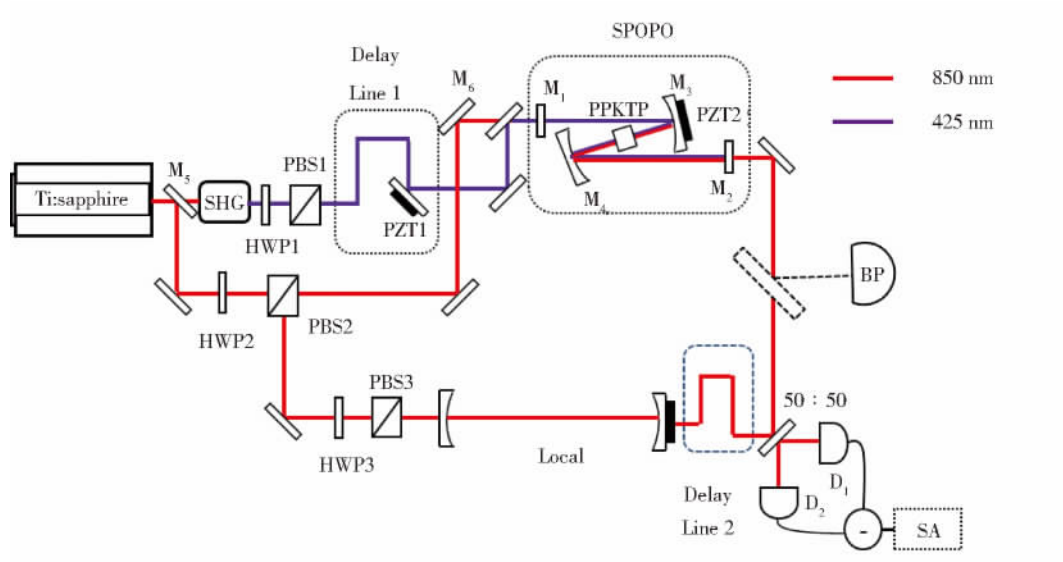
从上面分析可以看出, 参量过程中 TEM₀₀ 模基频场的增益远比 TEM₀₁ 模的大, 为了实现和观测到 TEM₀₁ 模增益, 实验上需要产生 TEM₀₁ 模以实现参量振荡器的注入锁定。

当谐振腔运转于参量放大状态时,其输出噪声功率谱为:

$$V(\omega) = 1 + 4 \frac{\gamma_l}{\gamma} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{G}}\right) \left[\frac{\cos^2(\varphi)}{\frac{1}{G} + 4\Omega^2} - \frac{\sin^2(\varphi)}{\left(2 - \frac{1}{\sqrt{G}}\right)^2 + 4\Omega^2} \right] \quad (9)$$

φ 是本地振荡光与信号场的相位差; Ω 是归一化的测量频率,并且有 $\Omega = 2\pi f/\gamma$, f 是频谱分析仪的测量频率。

2 实验过程



M: mirror; PZTs: piezoelectric transducers; HWP: half wave plate; D: detector;
SHG: the second harmonic generation; PBS: polarization beam splitter; BP: beam profiler;
SPOPO: synchronously pumped optical parametric oscillator; SA: spectrum analyzer;

Fig. 2 Experimental setup

M: 平面镜; PZT: 压电转换器; HWP: 半波片; D: 光电探测器; SHG: 倍频器;
PBS: 偏振分束器; BP: 光束质量分析仪; SPOPO: 同步光学参量振荡器; SA: 频谱分析仪

图 2 实验装置图

实验装置如图 2 所示。钛宝石 (Ti:sapphire) 飞秒激光器 (MIRA 900) 输出中心波长为 850 nm, 重复频率为 76 MHz, 谱宽为 7 nm, 脉宽为 130 fs 的脉冲光, 单次通过 1.5 mm 长的 LBO 晶体, 倍频 (SHG) 产生的 425 nm 光作为单共振光学参量振荡器 (SPOPO) 的泵浦场, M_5 反射的红外经过 HWP2 和 PBS2 组成的分光器件, 一部分作为种子光注入 SPOPO, 用于锁定腔长; 另一部分作为平衡零拍系统中的 Local 场。SPOPO 输出的信号场由平衡零拍探测器 (D_1, D_2) 探测, 得到的电信号输入到频谱分析仪 (SA)。光束质量分析仪 (BP) 用于观察 SPOPO 输出光场的强度分布。

SPOPO 腔由两个平凹镜 M_3, M_4 (曲率半径为 $r = 300\text{mm}$), 平面镜 M_1 (HT425 nm, HR850 nm) 以及平面镜 M_2 (425 nm@HR, 850 nm@T = 20%) 构成。平面镜 M_1 固定在前后可调节的平移架 (精度为 μm 量级) 上, 两平凹镜之间的距离为 34 cm, 平面镜到平凹镜之间的距离约为 81.7 cm, 腔长约为 4 m, 非线性晶体为 300 μm 长的 I 类共线相位匹配 PPKTP 晶体, 匹配后光在晶体中的腰斑为 67 μm 。

将 TEM_{00} 模种子光注入同步光学参量振荡器 (SPOPO) 中, 得到如图 3(a) 所示的透射峰信号, 观察透射峰曲线来判定腔的匹配状态, 测得 SPOPO 的精细度约为 27.9。依照理论分析, 在

垂直于传播方向上,对光场进行微小平移,谐振腔会输出如图 3(b)所示的透射峰信号,图中较低的透射峰为激发产生的 TEM₀₁ 模输出信号,较高的透射峰为 TEM₀₀ 的输出信号。

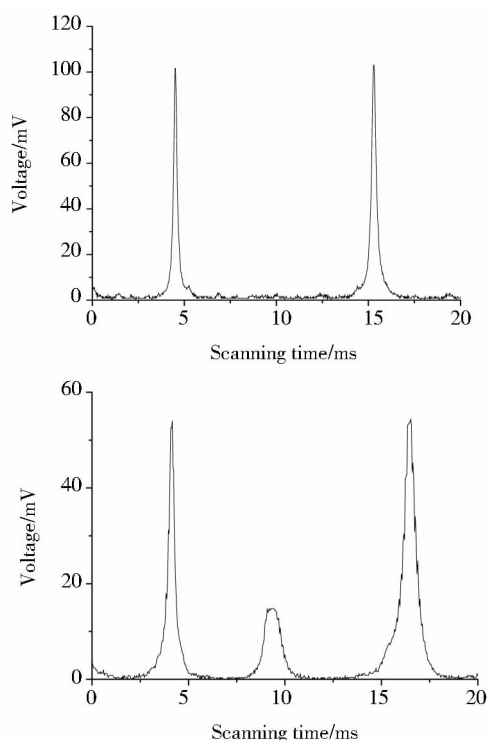


Fig. 3 Optical signal transmission of the synchronously pumped optical parametric oscillator

(a) stands for the optical signal transmission when the beam is mode-matched into the cavity
(b) stands for the optical signal transmission when the beam is misaligned into the cavity

图 3 光学参量振荡腔的透射信号

(a) 曲线为匹配时腔的透射信号,

(b) 曲线为高阶模存在时腔的透射信号

依据 Pound-Driver-Hall^[14] 锁腔原理,将腔的透射峰信号锁定在 TEM₀₁ 上,如图 4 所示,(a) 为将腔长锁定在 TEM₀₁ 模上,SPOPO 输出信号场的光电压信号,(b) 为通过光束质量分析仪(BP),观测到的 TEM₀₁ 模光场强度分布。

通过观察种子光上转换场和泵浦场的干涉,保证种子光和泵浦场光的空间重合和时间同步。用平移台引入的延时(精度可达到 μm 量级),扫描 PZT1 控制种子光与泵浦光的相对位相,得到种子光上转换场和泵浦场干涉可见度约为

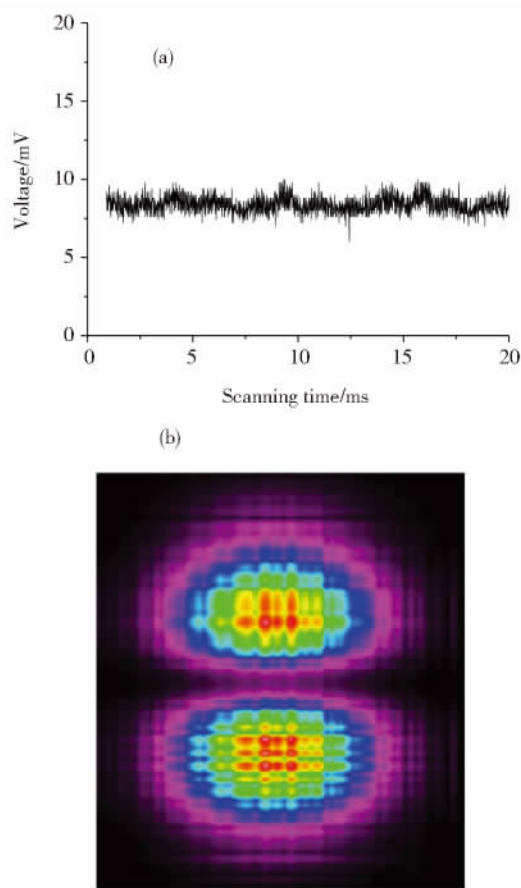


Fig. 4 Stands for the photo-voltage of the SPOPO signal field and the distribution of the optical intensity
(a) stands for the photo-voltage of the SPOPO signal field
(b) stands for the distribution of optical intensity

图 4 将腔长锁定在 TEM₀₁ 模上,

SPOPO 输出信号场的光电压信号和光场强度分布

(a) SPOPO 输出信号场的光电压,(b) 光场强度分布

72.3% 的干涉图样,说明我们初步完成了种子光与泵浦光的空间重合和时间同步。当泵浦光的功率约为 110 mW 时,实验上获得 TEM₀₀ 模约 13 倍的经典增益。

根据前面理论部分可知,由于在同样泵浦条件下 TEM₀₁ 模 SPOPO 的阈值较高,约为 TEM₀₀ 模 SPOPO 的阈值的 2 倍,因此信号场 TEM₀₁ 模的增益相对于 TEM₀₀ 模较低。图 5 为扫描泵浦光与信号光的相对位相时 TEM₀₁ 模的透射峰信号。对比图 4(a),可知获得 TEM₀₁ 模的经典增益 G 约为 4。图 1 中黑色方形点与红色圆点分别代表不同泵浦功率下基频 TEM₀₀ 模和 TEM₀₁ 模增

益的实验值,可见与理论分析吻合的比较。可以通过增加泵浦场平均功率,或采用 TEM₀₀ 模约为 34% 和 TEM₂₀ 模约为 67% 的混合模式作为 TEM₀₁ 模的泵浦场,进一步提高经典增益值^[15]。

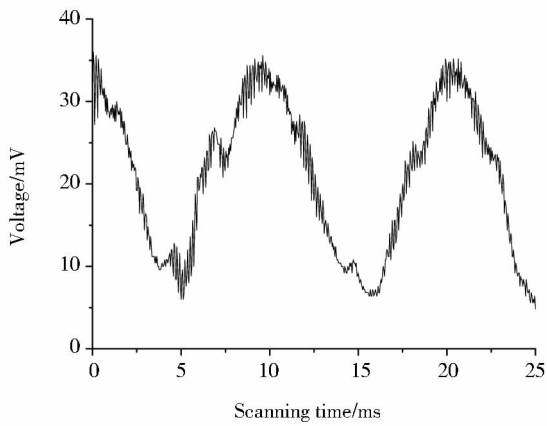


Fig. 5 Optical transmission signal of scanning the relative phase between the pump light and the signal light, after locking the SPOPO

图 5 锁住 SPOPO 同时扫描泵浦光与信号光的相对位获得的透射峰信号

在本实验中 $\gamma_l = 1.5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\gamma = 1.58 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 依据实验室之前在 2 MHz 处测量 TEM₀₀ 的正交位相噪声^[8], 得 $\Omega = 0.797$; 根据 (9) 式可以得到如图 6 所示的正交位相噪声功率谱, 当 TEM₀₁ 模大约 4 倍增益时, 可以得到 -2.20 dB 的正交位相压缩。

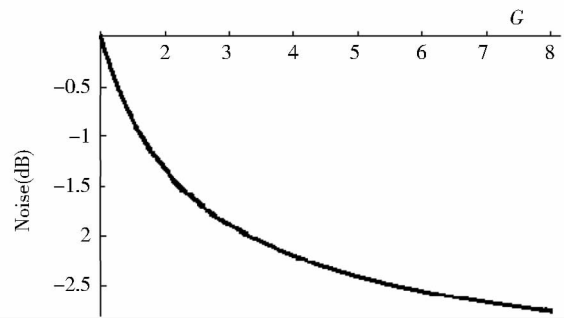


Fig. 6 Blue line stands for the quantum noise levels when Local oscillator beam phase was scanned

图 6 正交位相噪声功率谱

3 结论

中心波长为 850 nm, 重复频率为 76 MHz, 脉宽为 130 fs, 空间 TEM₀₀ 模的脉冲光通过 SPOPO, 通过引入微小平移, 产生空间 TEM₀₁ 模。模式为 TEM₀₀, 中心波长为 425 nm 的脉冲光泵浦参量振荡器, 在实验上获得了 TEM₀₀ 模约 13 倍的经典增益和 TEM₀₁ 约 4 倍的经典增益, 计算此增益下理论上可以得到 -2.20 dB 的 TEM₀₁ 模脉冲光正交压缩。实验中可以通过优化泵浦模式; 增大泵浦场的功率; 降低腔内损耗等方法来提高增益, 以便获得大的 TEM₀₁ 的脉冲压缩光。

参考文献:

- [1] LLOYD S. Quantum Mechanical Computers [J]. *Sci Am (Int. Ed.)*, 1995, **273**:140-146.
- [2] BROWNE D E, RUDOLPH T. Resource-Efficient Linear Optical Quantum Computation [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95**:010501.
- [3] LUDLOW A D, ZELEVINSKY T, et al. Sr Lattice Clock at 1×10^{-16} Fractional Uncertainty by Remote Optical evaluation with a Ca Clock [J]. *Science*, 2008, **315**:1805-1808.
- [4] PINEL O, FADE J, FABRE C, et al. Multimode Squeezing of Frequency Combs [J]. *Phys Rev A*, 2012, **85**:010101.
- [5] JIANG S F, TREPS N, FABRE C. A Time/Frequency Quantum Analysis of the Light Generated by Synchronously Pumped Optical Parametric Oscillators [J]. *N J Phys*, 2012, **14**:043006.
- [6] JIAN P, PINEL O, TREPS N, et al. Real-time Displacement Measurement Immune from Atmospheric Parameters using Optical Frequency Combs [J]. *Opt Express*, 2012, **20**:027133.
- [7] PINEL O, JIAN P, FABRE C, et al. Generation and Characterization of Multimode Quantum Frequency Combs [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, **108**:083601.
- [8] 刘洪雨, 陈立, 郜江瑞, 等. 飞秒脉冲正交位相压缩光的产生 [J]. *物理学报*, 2013, **62**:164206.

- [9] DELAUBERT V, TREPS N, HANS-A. BACHOR, *et al.* Quantum Measurements of Spatial Conjugate Variables: Displacement and Tilt of a Gaussian Beam [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**, **10**:1537-1539.
- [10] DU J, LI W, WEN R, *et al.* Precision Measurement of Single Atoms Strongly Coupled to the Higher-order Transverse Modes of a High-finesse Optical Cavity [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **103**:083117.
- [11] YANG Rong-guo, SUN Heng-xin, ZHANG Jun-xiang, *et al.* Generation of Squeezed TEM_{01} modes with Periodically Poled $KTiOPO_4$ Crystal [J]. *Chin Phys B*, 2011, **20**:060305.
- [12] CARLOS Navarrete-Benlloch, GERMAN J. de Valcarcel and Eugenio Roldan. Generating Highly Squeezed Hybrid Laguerre-Gauss Modes in Large-Fresnel-number Degenerate Optical Parametric Oscillators [J]. *Phys REV A*, 2009, **79**:043820.
- [13] TAKAHITO TANIMURA, DAISUKE Akamatsu, MIKIO Kozuma, *et al.* Generation of a Squeezed Vacuum Resonant on a Rubidium D_1 Line with Periodically Poled $KTiOPO_4$ [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**, **15**:2344-2346.
- [14] ERIC D. BLACK. An Introduction to Pound-Driver-Hall laser Frequency Stabilization [J]. *Am J Phys*, 2001, **69**:79-87.
- [15] LASSEN M, DELAUBERT V, TREPS N, *et al.* Generation of Squeezing in Higher Order Hermite-Gaussian Modes with an Optical Parametric Amplifier [J]. *Journal of the European Optical Society*, 2006, **1**:06003.

The Gain Realization of the Spatial TEM_{01} Mode for The Ultra-short Pulse Light

LIU Ling, KUO Nan, LIU Kui, ZHANG Jun-xiang, GAO Jiang-ru

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

Abstract: With the ultra-short mode-locked femtosecond pulse at 850 nm, and the repetition rates of 76 MHz and the pulse width of 130 fs, through a singly resonant synchronously pumped optical parametric oscillator, periodically poled potassium titanyl phosphate crystal pumped by the second harmonic can generate about 4 times gain for the spatial mode TEM_{01} . Theoretically the signal gain of the mode TEM_{00} is higher than that of the mode TEM_{01} when pumped by the mode TEM_{00} . This is important for the generation of the non-classical frequency combs, for it can generate about -2.20 dB theoretical squeezing light.

Key words: mode-locked femtosecond pulse; synchronously pumped optical parametric oscillator; the gain of the spatial mode TEM_{01}