

空间走离对量子光学频率梳压缩特性的影响*

李娟¹⁾ 刘鹏¹⁾²⁾ 项晓¹⁾ 刘涛¹⁾²⁾ 董瑞芳^{1)2)†} 张首刚¹⁾²⁾

1) (中国科学院国家授时中心, 中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

2) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2022 年 12 月 9 日收到; 2023 年 2 月 4 日收到修改稿)

量子光学频率梳在量子计算、量子信息以及高精度量子测量等领域都有重要的价值, 同步泵浦光学参量振荡器是制备量子光频梳最主要的手段. 本文采用中心波长为 815 nm、脉冲宽度为 130 fs 的锁模飞秒脉冲激光二次谐波泵浦 I 类共线 BiB₃O₆ 晶体以制备真空压缩态量子光频梳, 给出了同步泵浦光学参量振荡器中空间走离效应对获得量子光频梳压缩度的影响. 研究表明, 随着晶体长度的增加, 压缩度的增长会受到空间走离效应限制, 经计算在晶体长度为 1.49 mm 时压缩达到最大. 在此基础上, 本文实验研究了在四种晶体长度下获得的真空压缩态量子光频梳的压缩特性, 当 BiB₃O₆ 长度为 1.5 mm 时获得了 (3.6±0.2) dB 的最大真空压缩, 考虑损耗后为 (7.0±0.2) dB, 实验结果与理论分析相符. 该研究揭示了飞秒脉冲光在非线性晶体中存在的空间走离效应是影响量子光频梳压缩特性的重要因素, 为优化量子光频梳的实验测量提供了指导.

关键词: 量子光频梳, 压缩, 空间走离

PACS: 42.50.-p, 05.45.-a, 42.25.Lc

DOI: 10.7498/aps.72.20222343

1 引言

压缩光^[1]因某个分量噪声低于真空噪声, 故可将其用于提高测量精度^[2-6]和检测灵敏度^[7-10], 并提升量子信息和量子计算的容错性能^[11,12]等, 是连续变量领域的重要资源. 在制备压缩光的各种方法中, 光学参量振荡器 (optical parametric oscillators, OPO)^[13-16]被证明是最成功的一种方式. 截止目前, 在理论和实验上用连续光泵浦 OPO 产生单模压缩态已经被广泛地研究. 与连续光相比, 锁模飞秒脉冲激光有着超高的峰值功率和良好的光学相干性, 拥有极宽的谱线宽度, 在一个脉冲之内包含着成千上万个等间隔的频率成分, 又被称作光学频率梳 (简称光频梳). 基于同步泵浦光学参量振

荡器 (synchronously pumped optical parametric oscillators, SPOPO)^[17], 同样可以获得具有压缩特性的量子光频梳, 该光源是一种时域多模的非经典光场^[18,19]. 利用该多模特性可生成多模纠缠态^[20], 进一步用于扩大信息容量和基于测量的量子计算. 此外, 量子光频梳在精密测量 (如时间^[21,22]、距离) 以及参数估计^[23]等方面具有非凡的价值, 可以减少量子噪声从而提高测量精度, 且所有这些性能的提升在很大程度上都取决于制备的压缩水平.

基于 OPO 的压缩光于 1986 年首次在实验上制备成功^[24], 到 2016 年, 德国马普实验室利用 532 nm 的连续光泵浦 OPO 已将真空压缩态的压缩度提高到 15 dB^[16]. 与之相比, 具有压缩特性的量子光频梳的研究与制备相对较晚, 2012 年法国 Pinel 等^[25]最早在实验上获得了正交振幅压缩的

* 国家自然科学基金 (批准号: 12033007, 61875205, 61801458, 91836301)、中国科学院前沿科学重点研究项目 (批准号: QYZDB-SW-SLH007)、中国科学院战略性先导科技专项 C 类项目 (批准号: XDC07020200)、中国科学院“西部青年学者”项目 (批准号: XAB2019B17, XAB2019B15) 和中国科学院重点项目 (批准号: ZDRW-KT-2019-1-0103) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongruifang@ntsc.ac.cn

量子光频梳, 压缩度为 1.2 dB. 2013 年, 该研究组^[26]开展了基于量子光频梳的波分复用量子网络研究, 在实验上获得的真空压缩度为 3.6 dB, 扣除损耗后的压缩度为 6.0 dB. 到 2020 年, 该研究组^[27]又利用量子光学频率梳和超快脉冲整形制备了多组分爱因斯坦-波多尔斯基-罗森导引, 且将真空压缩进一步提高到了 5.0 dB, 扣除损耗后的压缩度为 7.0 dB. 在国内, 2013 年, 山西大学刘洪雨等^[28]利用阈值以下 SPOPO 也获得了 2.5 dB 的正交位相压缩. 我们研究组^[22]也于 2018 年制备了 2.0 dB 的正交位相压缩, 并利用该压缩光与平衡零拍探测相结合, 在实验上进行了精密时延测量的演示.

在压缩光的实验制备中, 当非线性介质采用各向异性晶体时, 会由于双折射效应发生空间走离效应, 影响参量下转换的效率, 从而对压缩的产生造成不良影响. 此前, 量子光频梳的制备中均未考虑过空间走离的影响. 基于此, 本文利用中心波长为 815 nm、脉冲宽度为 130 fs 的锁模飞秒脉冲激光二次谐波泵浦 I 类共线硼酸铋 (BiB_3O_6 , BIBO) 晶体制备真空压缩态量子光频梳, 分析了 SPOPO 中空间走离效应对压缩度的影响, 并对系统阈值和压缩的表达式进行了修正. 研究表明, 随着晶体长度不断加长, 压缩的增强受限于空间走离效应, 存在一个最佳的晶体长度 (本系统中为 1.49 mm). 在此基础上, 实验研究了 BIBO 长度分别取 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0 mm 四种情况下获得的真空压缩态量子光频梳的压缩特性. 当 BIBO 长度为 1.5 mm 时, 在分析频率 1 MHz 处获得 (3.6 ± 0.2) dB 的最大真空压缩, 考虑损耗后为 (7.0 ± 0.2) dB, 且实验结果与理论分析相符. 这表明我们理论分析的准确性, 为提高量子光频梳的压缩度提供了指导, 且该方法也可扩展到单模压缩的制备优化中.

2 理论分析

根据脉冲光泵浦 I 类 SPOPO 的量子理论模型, SPOPO 的输出场为一系列相互正交且具有压缩特性的“超模”场^[18], 各“超模”的压缩特性可通过平衡零拍探测装置进行测量. 以零阶超模为例, 在不考虑空间走离效应时, 其噪声表达式^[19]写为

$$\delta^2 \hat{S}_0^{(\pm)}(\omega) = 1 \pm \eta_{\text{total}} \rho \frac{4r_0}{(1 \mp r_0)^2 + (\omega/\gamma_s)^2}, \quad (1)$$

$$r_0 = \sqrt{P/P_{\text{thr0}}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{thr0}} = \frac{\varepsilon_0 c^3 n_0^2 (T + \delta)^2}{32(\omega_0 \chi l)^2 A_0^2} \left(\frac{A_s}{A_0} \right)^2, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_0 &= \int \exp \left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{w_s^2} \right] \exp \left[\frac{-(x^2 + y^2)}{w_p^2} \right] dx dy \\ &= \left(\frac{2}{A_s} + \frac{1}{A_p} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\hat{S}^{(\pm)}$ 分别表示零阶超模的正交振幅算符和正交位相算符; ω 为分析频率; η_{total} 表示总的探测效率; $\rho = T/(T + \delta)$ 为逃逸效率; T 为输出耦合镜的透过率; δ 为内腔损耗; $\gamma_s = c(T + \delta)/L$ 表示信号场的损耗因子; r_0 为归一化泵浦参数; P 表示注入 SPOPO 的泵浦功率, P_{thr0} 表示系统的泵浦阈值; χ 为非线性晶体的二阶磁化率; ω_0 为信号光的中心频率; 当满足相位匹配条件时, $n(2\omega_0) = n(\omega_0) = n_0$, n 为晶体的折射率; A_0 为零阶超模的本征值; A_0 为相互作用面积; $\exp[-(x^2 + y^2)/w_{s(p)}^2]$ 为信号 (泵浦) 光的横向高斯分布, $w_{s(p)}$ 为信号 (泵浦) 光的腰斑半径; $A_{s(p)} = \pi w_{s(p)}^2$ 为信号 (泵浦) 光的横向光斑面积.

当脉冲光泵浦 I 类相位匹配 ($o \rightarrow e + e$) 共线的 BIBO 晶体时, 由于双折射效应, 会不可避免地存在空间走离效应^[29]. 其中, 泵浦光的空间走离角为 0° , 信号光的空间走离角为 α ($\alpha \neq 0$). 随着光场在晶体内不断传播, 信号光会逐渐与泵浦光偏离, 导致二者的相互作用面积减小, 进而限制压缩光场的产生. 因此, 分析空间走离效应对压缩的影响至关重要. 相互作用面积、阈值以及压缩重新定义如下:

$$\begin{aligned} A_1 &= \int \exp \left[\frac{-2(x^2 + (y - l \tan[\alpha/2])^2)}{w_s^2} \right] \\ &\quad \times \exp \left[\frac{-(x^2 + y^2)}{w_p^2} \right] dx dy = MA_0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$P_{\text{thr1}} = \frac{P_{\text{thr0}}}{M^2}, \quad (6)$$

$$\delta^2 \hat{S}_0^{(\pm)}(\omega) = 1 \pm \eta_{\text{total}} \rho \frac{4r_0 M l}{(1 \mp r_0 M l)^2 + (\omega/\gamma_s)^2}, \quad (7)$$

式中, $M = \exp \left[\frac{-2l^2 \tan^2(\alpha/2)}{2w_p^2 + w_s^2} \right]$, 其与晶体长度 l , 走离角 α 以及信号 (泵浦) 光腰斑半径 $w_{s(p)}$ 有关.

以我们的实验为例,使中心波长 815 nm 的脉冲光在 I 类 SPOPO 内共振,在其腰斑处 ($w_s = 60 \mu\text{m}$) 放置 BIBO 晶体. 根据 BIBO 的折射率方程^[30]可得,空间走离角 $\alpha = 3.28^\circ$. 根据 (6) 式和 (7) 式可得系统阈值和压缩随晶体长度的变化情况如图 1 所示. 图 1(a) 中,在不考虑空间走离时,随着晶体长度的增加,相互作用效应增强,从而系统阈值会不断减小;受到空间走离的影响时,系统阈值则会先减小后增大,在晶体长度为 1.49 mm 时阈值达到最小. 相应的压缩会先增大再减小,在晶体长度为 1.49 mm 时压缩最大,如图 1(b) 所示.

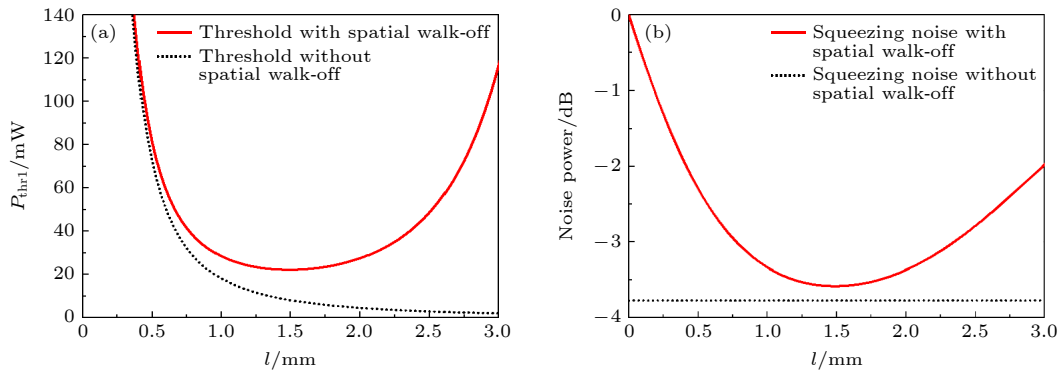


图 1 系统阈值 (a) 和压缩 (b) 随晶体长度的理论变化曲线. 黑色虚线和红色实线分别是无空间走离和有空间走离的结果. $n_0 = 1.82$, $\chi = 3.54 \text{ pm/V}$, $\delta = 0.0468$, $T = 0.1$

Fig. 1. System threshold (a) and squeezing noise levels (b) as a function of crystal length, respectively. The black dotted line and red line are the results without/with spatial walk-off respectively. $n_0 = 1.82$, $\chi = 3.54 \text{ pm/V}$, $\delta = 0.0468$, $T = 0.1$.

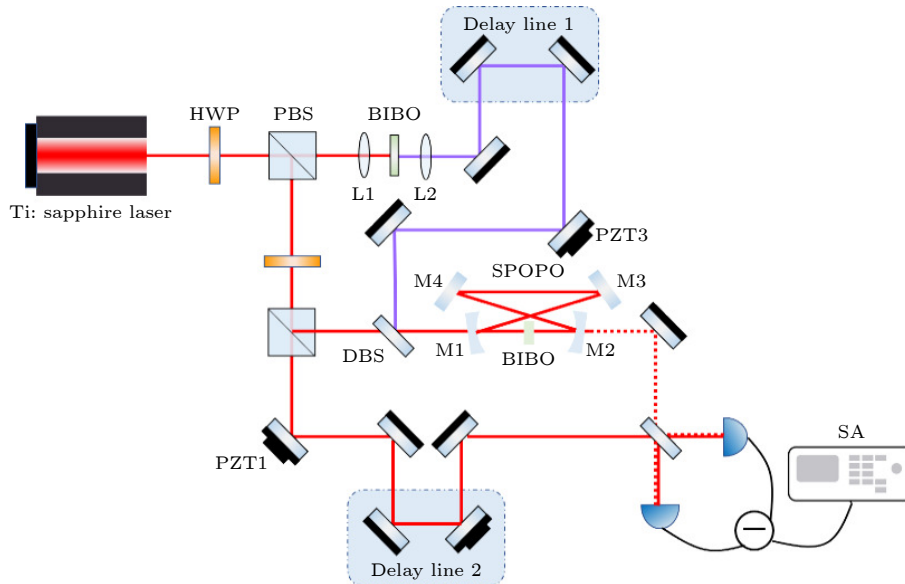


图 2 量子光频梳产生和测量的实验装置图. HWP, 半波片; PBS, 偏振分束器; DBS, 双色镜; SPOPO, 同步泵浦光学参量振荡器; PZT, 压电陶瓷; SA, 频谱分析仪器

Fig. 2. Experimental setup for the generation and measurement of squeezed frequency comb states. HWP, half-wave plate; PBS, polarizing beam splitter; DBS, dichroic beamsplitter; SPOPO, synchronously pumped optical parametric oscillator; PZT, piezoelectric transducer; SA, spectrum analyzer.

3 实验装置

图 2 是量子光学频率梳产生的实验装置简图. 钛宝石激光器 (Fusion 100-1200, Femtolasers) 输出中心波长为 815 nm、脉冲宽度 130 fs、重复频率 75 MHz 的激光脉冲. 从激光器输出的光场分为两部分: 一部分脉冲光经过一个长度为 0.5 mm 的 BIBO 晶体倍频产生中心波长为 407.5 nm 的蓝紫光作为 SPOPO 的泵浦场, 产生的倍频光功率及倍频效率见图 3; 另一部分经过分束镜又分为两路,

小部分作为种子光注入 SPOPO 内, 其余作为平衡零拍探测的本地光用于探测压缩光.

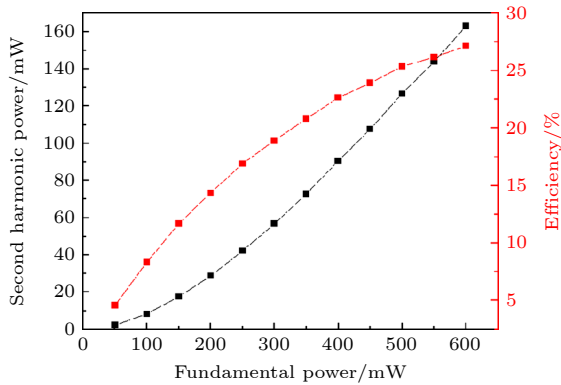


图 3 倍频光功率及倍频效率随基频光变化的实验结果
Fig. 3. Experimentally dependence of second harmonic power and efficiency on fundamental power.

实验中采用的 SPOPO 是一个腔长为 4 m 的 13 镜环形腔, 其自由光谱区与激光器输出脉冲光的重复频率一致, 以满足信号光的共振条件. 为了简化装置, 在图 2 中使用一个四镜环形腔来代替. 该谐振腔仅对 815 nm 的脉冲光单共振, 输入耦合镜 M1 对种子光具有高反射率 ($R_1=99\%$), 对泵浦光增透, 腔镜 M3 和 M4 均对 815 nm 脉冲光高反.

SPOPO 的腔长是通过从输入镜注入一束与种子光传播方向相反的参考光并采用 Pound-Drever-Hall 技术^[31]来进行锁定的. 对种子光和泵浦光的光谱进行了测量, 如图 4 所示, 两者的光谱半高全宽分别为 7.0 nm 和 2.5 nm. 接下来把种子光与泵浦光同时注入腔内, 在发生参量下转换前需要对种子光与泵浦光进行匹配, 即空间重合与时间同步. 锁定 SPOPO 的腔长, 扫描种子光与泵浦光的相对位相, 可观察到增益曲线. 输出的信号光与本地光在 50:50 的分束镜上耦合, 其中本地光为零阶时域模式, 在其光路上加一段延迟线 (Delay line2) 用于确保和信号光的时间重合. 信号光与本地光的相对相位可通过 PZT1 进行扫描. 挡住种子光, 此时获得真空压缩的量子光频梳, 噪声起伏通过频谱分析仪 (Rohde&Schwarz, FSH4) 进行采集.

根据上述理论分析部分得出的最佳晶体长度, 实验上选择长度为 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0 mm 的 BIBO 晶体进行了实验研究. 此外, 考虑到适当提高输出镜的透过率可以提高 SPOPO 的逃逸效率, 可测量到更大的压缩, 因此分别在透过率为 10.0%, 20.5% 和 30.0% 三种情况下进行了测量.

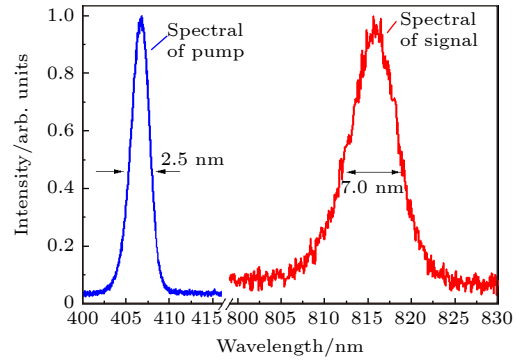


图 4 种子光与泵浦光的光谱
Fig. 4. The spectral profiles of the seed and pump.

4 实验结果与分析

图 5 为在三种输出镜透过率下, 系统阈值随晶体长度的变化. 实验中每种情况下的系统阈值都使用光功率计 (Thorlabs, PM400) 测量 6 次后标定误差, 结果如图中所示. 其中在采用 0.5 mm-BIBO, $T = 30\%$ 时, 注入全部泵浦功率 (实验中倍频产生的最大泵浦功率约 240 mW) 未测量到阈值, 通过采集不同泵浦功率下增益进行拟合得该情况下的阈值约 527 mW. 从图 5 中可以直观地看到, 当晶体长度不变时, 系统阈值随着透过率的增大而增大, 也就是说提高逃逸效率后会使得系统阈值增大, 这将对实验制备泵浦功率提出更高的要求. 而且提高功率后会引入一系列新问题, 如晶体的热效应, 经典噪声的引入等. 当输出镜透过率一定时, 系统阈值则随着晶体长度的增大而先减小再增大. 实验测量阈值与理论结果基本相符, 受空间走离效应的影响阈值在使用 1.5 mm-BIBO 时最小.

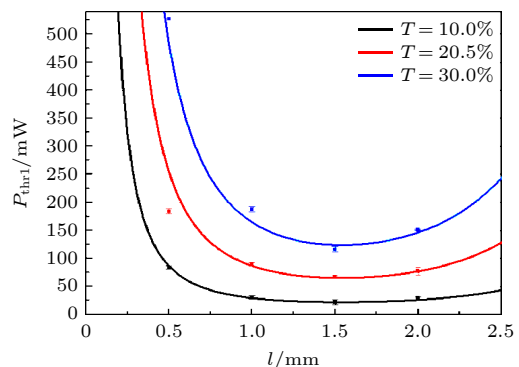


图 5 在三种不同透过率下, 系统阈值随晶体长度的变化. 方块为实验测量结果, 曲线为理论计算结果

Fig. 5. Dependence of the pump threshold on the crystal length under three different transmissions. The square is the experimental measurement result, and the curve is the theoretical calculation result.

如图 6 所示, 在 1 MHz 分析频率处测量了三种透过率、四种晶体长度下量子光频梳的真空压缩. 对每种情况的噪声谱都进行了三次测量得到最后的误差, 见图 6. 由于每次测量时本地光与信号光之间的干涉可见度具有一定差异, 因此为了在同一条件进行对比, 图中的压缩度均是考虑了探测损耗后的真空压缩. 从图 6 中可以看出, 随着输出镜透过率的增大, 获得的压缩度也在提高. 当透过率一定时, 压缩度会随着晶体长度的增加先增大, 此时走离效应还不显著, 同时相互作用长度在增加, 故压缩得到了提升. 而当晶体过长 (2.0 mm-BIBO), 走离效应显著带来的损耗过大, 压缩的增强最终受限于存在的空间走离效应. 因此, 在使用 1.5 mm-BIBO 时获得的压缩最大, 且该情况下的系统阈值也最低.

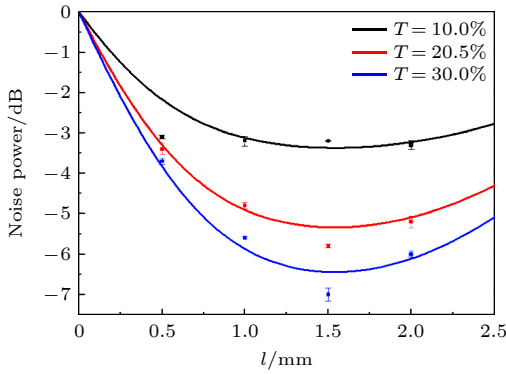


图 6 在三种不同透过率下, 真空压缩随晶体长度变化的结果. 方块为实验测量结果, 曲线为理论计算结果. RBW = 100 kHz, VBW = 100 Hz
Fig. 6. Dependence of squeezing noise levels on the crystal length under three different transmission. The square is the experimental measurement result, and the curve is the theoretical calculation result. RBW = 100 kHz, VBW = 100 Hz.

如图 7 是晶体长度 1.5 mm 和输出耦合镜透过率 30% 时获得的最佳真空压缩 (3.6 ± 0.2) dB. 图中黑线为散粒噪声基准 (shot noise limit, SNL); 红线为扫描信号光和本地光相对相位时的真空压缩噪声谱线. 在实验中使用的光电二极管量子效率为 94.0%, 压缩光的传输效率为 98.0%, 干涉为 87.5%, 因此总的探测效率为 70.5%. 考虑这些探测损耗之后, 实际 SPOPO 输出的真空压缩为 (7.0 ± 0.2) dB.

目前实验获得的压缩度仍然较低, 主要有以下原因: SPOPO 是由 13 个腔镜组成, 引入的腔内损

耗大; 由于两束脉冲光的重合需要同时满足时间同步和空间重叠, 这给实验中信号光与本地光和泵浦光与种子光的重合增加了难度, 不易获得高的干涉可见度. 另外 SPOPO 失谐引入非共振的损耗以及整个系统的稳定性等都会对压缩造成一定的影响. 除空间走离外, 泵浦光和信号光在晶体内的群速度不同会导致时间走离, 削弱相互作用强度从而影响压缩光的制备 [19].

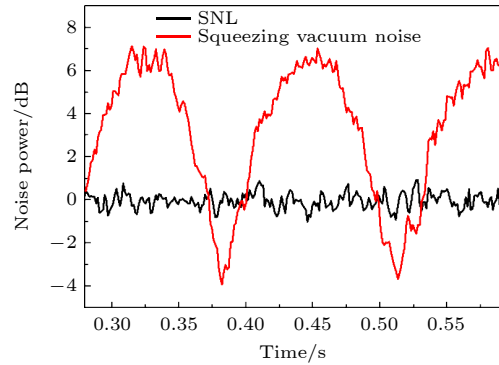


图 7 晶体长度 1.5 mm、输出耦合镜透过率 30% 时的真空压缩噪声谱

Fig. 7. Squeezed vacuum states versus the sweeping time with 1.5 mm crystal length and 30% transmission.

在倍频过程中, 倍频效率通常也会受到空间走离的限制. 有研究表明 [32–34] 通过晶体级联可以对走离效应进行补偿, 从而提高倍频效率. 利用两个光轴反向倾斜的级联晶体替代单个非线性晶体, 可以补偿双光子制备过程中的空间走离效应, 使双光子振幅对称分布 [35]. 因此, 在量子光频梳制备过程中考虑对空间走离效应进行补偿, 有望使压缩度得到进一步的提高.

5 总结

本文利用 130 fs 的钛宝石锁模飞秒激光泵浦 I 类 SPOPO 来产生量子光频梳, 在理论上给出了空间走离效应对压缩影响的理论模型, 实验测量了在四种晶体长度下获得的真空压缩态量子光频梳的压缩特性. 通过理论和实验表明, 随着晶体长度的不断增加, 压缩增强最终受限于存在的空间走离效应, 在超过最佳晶体长度 1.49 mm 后压缩并未进一步提升. 当晶体长度为 1.5 mm、输出耦合镜透过率为 30% 时, 获得的真空压缩最大为 (3.6 ± 0.2) dB, 考虑损耗后压缩为 (7.0 ± 0.2) dB, 与理论结果基本相符. 我们的方法可以为之后开展量子光

频梳的应用提供高质量的光源, 也为其他基于双折射非线性晶体制备高压缩光源的实验提供参考。

参考文献

- [1] Walls D F 1983 *Nature* **306** 141
- [2] Xiao M, Wu L, Kimble H J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 278
- [3] Kong J, Ou Z, Zhang W 2013 *Phys. Rev. A* **87** 023825
- [4] Ou Z 2012 *Phys. Rev. A* **85** 023815
- [5] Xin J, Liu J, Jing J 2017 *Opt. Express* **25** 1350
- [6] Liu S, Lou Y, Xin J, Jing J 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 064046
- [7] Li Y, Guzun D, Xiao M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 5225
- [8] Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 035002
- [9] Shi S, Wang Y, Yang W, Zheng Y, Peng K 2018 *Opt. Lett.* **43** 5411
- [10] Zheng S, Lin Q, Cai Y, Zeng X, Li Y, Xu S, Fan D 2018 *Photonics Res.* **6** 177
- [11] Menicucci N C 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 120504
- [12] Chen H, Liu J 2009 *Chin. Opt. Lett.* **7** 440
- [13] Vahlbruch H, Mehmet M, Chelkowski S, Hage B, Franzen A, Lastzka N, Schnabel R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 033602
- [14] Mehmet M, Ast S, Eberle T, Steinlechner S, Vahlbruch H, Schnabel R 2011 *Opt. Express* **19** 25763
- [15] Eberle T, Steinlechner S, Bauchrowitz J, Handchen V, Vahlbruch H, Mehmet M, Schnabel R 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 251102
- [16] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnabel R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801
- [17] Driel H M V 1995 *Appl. Phys. B* **60** 411
- [18] de Valcárcel G J, Patera G, Treps N, Fabre C 2006 *Phys. Rev. A* **74** 061801
- [19] Patera G, Treps N, Fabre C, de Valcárcel G J 2010 *Eur. Phys. J. D* **56** 123
- [20] Cai Y, Roslund J, Ferrini G, Arzani F, Xu X, Fabre C, Treps N 2017 *Nat. Commun.* **8** 15645
- [21] Lamine B, Fabre C, Treps N 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 123601
- [22] Wang S, Xiang X, Treps N, Fabre C, Liu T, Zhang S, Dong R 2018 *Phys. Rev. A* **98** 053821
- [23] Cai, Y, Roslund J, Thiel V, Fabre C, Treps N 2021 *npj Quantum Inf.* **7** 82
- [24] Wu L, Kimble H J, Hall J L, Wu H 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 2520
- [25] Pinel O, Jian P, de Araujo R M, Feng J, Chalopin B, Fabre C, Treps N 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 083601
- [26] Roslund, J, de Araújo R M, Jiang S, Fabre C, Treps N 2014 *Nat. Photonics* **8** 109
- [27] Cai Y, Xiang Y, Liu Y, He Q, Treps N 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 032046
- [28] Liu H Y, Chen L, Liu L, Ming Y, Liu K, Zhang J X, Gao J R 2013 *Acta Phys. Sin.* **164206** 164206 (in Chinese) [刘洪雨, 陈立, 刘灵, 明莹, 刘奎, 张俊香, 郜江瑞 2013 物理学报 **164206** 164206]
- [29] Shi S X, Chen G F, Zhao W, Liu J F 2012 *Nonlinear Optics* (Xidian: University Press) p105 (in Chinese) [石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 刘继芳 2012 非线性光学 (西安: 电子科技大学出版社) 第105页]
- [30] Hellwig H, Liebertz J, Bohaty L 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 240
- [31] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [32] Gehr R J, Kimmel M W, Smith A V 1998 *Opt. Lett.* **23** 1298
- [33] Zhou X G, Wang Y L, Wu H, Ding L E 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 2630 (in Chinese) [周绪桂, 王燕玲, 吴洪, 丁良恩 2009 光学学报 **29** 2630]
- [34] Meng X H, Liu H G, Huang J H, Dai S T, Deng J, Ruan K M, Chen J M, Lin W X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164205 (in Chinese) [孟祥昊, 刘华刚, 黄见洪, 戴殊韬, 邓晶, 阮开明, 陈金明, 林文雄 2015 物理学报 **64** 164205]
- [35] Perez A M, Just F, Cavanna A, Chekhova M V, Leuchs G 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 125201

Effect of spatial walk-off on squeezing properties of quantum optical frequency combs^{*}

Li Juan¹⁾ Liu Peng¹⁾²⁾ Xiang Xiao¹⁾ Liu Tao¹⁾²⁾
 Dong Rui-Fang^{1)2)†} Zhang Shou-Gang¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

2) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 9 December 2022; revised manuscript received 4 February 2023)

Abstract

Quantum optical frequency combs are of great significance in the fields of quantum computing, quantum information, and high precision quantum measurement, which can be produced by using a degenerate type-I synchronously pumped optical parametric oscillator (SPOPO). When anisotropic crystal is used as a nonlinear medium in the SPOPO, the spatial walk-off effect will occur due to the birefringence effect, which cannot be ignored and will adversely affect the generation of squeezed state. In this work, we investigate the influence of spatial walk-off effect on the squeezing level of quantum optical frequency combs both theoretically and experimentally. A Ti:sapphire mode-locked femtosecond pulsed laser which produces 130 fs pulse trains at 815 nm with a repetition rate of 76 MHz is utilized as a fundamental source. Its second harmonic at 407.5 nm is used to pump the collinear BiB₃O₆ (BIBO) crystal for generating the squeezed vacuum frequency comb. It is indicated that as the crystal length increases, the area of interaction between pump light and signal light decreases gradually. Thus the enhancement of squeezing is eventually limited by the spatial walk-off effect. According to the simulations, the squeezing level reaches a maximum value when the crystal length is 1.49 mm. The quantum properties of squeezed vacuum optical frequency combs obtained for four crystal lengths (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mm) are subsequently measured experimentally. When the length of BIBO is 1.5 mm, the maximum vacuum squeezing of (3.6 ± 0.2) dB is obtained, which is (7.0 ± 0.2) dB after being corrected for detection loss. The experimental results are consistent with the numerical simulations. This study demonstrates that the spatial walk-off effect in nonlinear crystal is a significant factor affecting the quantum optical frequency comb, and the theoretical model presented in this paper can be used to provide a guideline for optimizing the experimental implementation.

Keywords: quantum optical frequency comb, squeezed state, spatial walk-off

PACS: 42.50.-p, 05.45.-a, 42.25.Lc

DOI: 10.7498/aps.72.20222343

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12033007, 61875205, 61801458, 91836301), the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDB-SW-SLH007), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDC07020200), the “Western Young Scholars” Project of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XAB2019B17, XAB2019B15), and the Key Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. ZDRW-KT-2019-1-0103).

[†] Corresponding author. E-mail: dongruifang@ntsc.ac.cn



空间走离对量子光学频率梳压缩特性的影响

李娟 刘鹏 项晓 刘涛 董瑞芳 张首刚

Effect of spatial walk-off on squeezing properties of quantum optical frequency combs

Li Juan Liu Peng Xiang Xiao Liu Tao Dong Rui-Fang Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 084206 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222343

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222343>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高灵敏度的量子迈克耳孙干涉仪

High sensitivity quantum Michelson interferometer

物理学报. 2018, 67(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172563>

太赫兹半导体激光光频梳研究进展

Research progress of terahertz semiconductor optical frequency combs

物理学报. 2020, 69(18): 189501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200399>

光频链接的双光梳气体吸收光谱测量

Optical frequency linked dual-comb absorption spectrum measurement

物理学报. 2018, 67(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180150>

太赫兹量子级联激光器频率梳的色散

Group velocity dispersion analysis of terahertz quantum cascade laser frequency comb

物理学报. 2019, 68(10): 109501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190217>

用于光学薛定谔猫态制备的滤波设计与滤波腔腔长测量

Filter cavity design and length measurement for preparing Schrödinger cat state

物理学报. 2020, 69(18): 184204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200589>

基于非简并光学参量放大器产生光学频率梳纠缠态

Generation of continuous variable frequency comb entanglement based on nondegenerate optical parametric amplifier

物理学报. 2020, 69(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200107>