



## 宽频带压缩态光场光学参量腔的设计

王俊萍 张文慧 李瑞鑫 田龙 王雅君 郑耀辉

### Design of optical parametric cavity for broadband squeezed light field

Wang Jun-Ping Zhang Wen-Hui Li Rui-Xin Tian Long Wang Ya-Jun Zheng Yao-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 234204 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200890

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200890>

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

基于中红外光参量振荡器光束质量优化的90° 像旋转四镜非平面环形谐振腔型设计与分析

Design and analysis of 90° image rotating four-mirror non-planar ring resonator based on mid-infrared optical parametric oscillator beam quality optimization

物理学报. 2019, 68(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182001>

低分析频率压缩光的实验制备

Generation of squeezed states at low analysis frequencies

物理学报. 2018, 67(2): 024207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171767>

音频段1.34  $\mu\text{m}$ 压缩态光场的实验制备

Generation of audio-band frequency squeezed light at 1.34  $\mu\text{m}$

物理学报. 2018, 67(17): 174203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180301>

铷原子D1线真空压缩光场的产生及态重构

Generation and quantum state reconstruction of a squeezed vacuum light field resonant on the rubidium D1 line

物理学报. 2018, 67(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172396>

基于电磁诱导透明机制的压缩光场量子存储

Analysis of electromagnetically induced transparency based on quantum memory of squeezed state of light

物理学报. 2017, 66(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074201>

基于参量放大器的铯原子D<sub>2</sub>线明亮偏振压缩光源的产生

Generation of bright polarization squeezed light at cesium D<sub>2</sub> line based on optical parameter amplifier

物理学报. 2020, 69(1): 014207 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191009>

## 宽频带压缩态光场光学参量腔的设计\*

王俊萍<sup>1)</sup> 张文慧<sup>1)</sup> 李瑞鑫<sup>1)</sup> 田龙<sup>1)2)</sup> 王雅君<sup>1)2)†</sup> 郑耀辉<sup>1)2)</sup>

1) (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, 太原 030006)

2) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2020年6月11日收到; 2020年7月8日收到修改稿)

压缩态光场是量子光学研究中的一种重要量子资源. 在量子信息应用中, 压缩态光场的频谱带宽是限制信息传输容量的重要指标. 目前, 光学参量振荡器是产生强压缩度非经典光场最有效的方法之一. 本文通过分析输出耦合镜透射率、线宽、阈值功率对简并光学参量振荡器频谱带宽的影响, 实验完成了低阈值 (18 mW)、宽频带 (84.2 MHz)、高稳定 (锁定基线标准偏差为 0.32 MHz) 量子压缩器的设计. 结果表明, 相比单共振光学参量振荡器, 双共振腔型具有低阈值、高稳定的特点, 更适用于宽频带压缩态光场的制备与实际应用.

**关键词:** 压缩态光场, 光学参量振荡器, 泵浦阈值, 压缩带宽**PACS:** 42.50.-p, 42.65.Lm**DOI:** 10.7498/aps.69.20200890

## 1 引言

压缩态光场某正交分量噪声可超越量子噪声极限, 是高精度测量领域 (如引力波探测<sup>[1,2]</sup>、量子精密测量<sup>[3,4]</sup>) 和量子信息领域 (如量子隐形传态<sup>[5-7]</sup>) 的重要非经典资源. 利用光学参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 增强光学参量下转换过程是产生强压缩的最有效方法之一<sup>[8,9]</sup>. 两个单模压缩态通过位相关联耦合制备得到纠缠态光场, 进而可应用于量子计算、量子通信和量子信息<sup>[10-12]</sup>. 此外, 基于纠缠态的量子照明方案<sup>[13-15]</sup>可应用于高信噪比的目标检测<sup>[14]</sup>, 在高损耗和噪声的环境中, 与相干光照明方案相比, 纠缠态具有更优越的抗损耗和噪声干扰能力; 同时, 量子照明还可以在窃听免疫通信中<sup>[15]</sup>, 有效提升了信息传递的安全性. 然而, 通信双方数据传输速率和信息容量要求压缩态光场应具有一定的频谱带宽, 满足多种信

息的同时也能高效传输.

在现有的 OPO 腔设计方案中, 存在单共振 OPO 和双共振 OPO 两种类型, 其中单共振 OPO 仅信号光与腔长谐振, 而双共振 OPO 信号光和泵浦光同时在腔内共振. 在单共振 OPO 中, 泵浦光双次穿过非线性晶体并输出腔外, 为了增强非线性偶极相互作用 (与功率密度成正比), 通常需要不断增大输入功率, 因而具有较高的泵浦阈值<sup>[16]</sup>. 而双共振 OPO 信号光与泵浦光同时谐振, 由于泵浦光在腔内多次穿过非线性晶体, 在较低的输入功率下, 将获得更高的内腔功率密度, 因此具有更低的阈值功率<sup>[17-19]</sup>. 此外, OPO 腔的线宽大小直接决定了输出压缩态光场的压缩带宽, 通常为了获取宽频带压缩态光场, 需要提高输出耦合镜的透射率来增加光学线宽. 同时, 大透射率输出耦合镜可以满足高逃逸效率<sup>[18,19]</sup>, 有利于提高压缩态光场的压缩度, 即满足宽频带的同时可以获取更高压缩度的压缩态光场. 目前, 单共振与双共振 OPO 技术已经应用

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62027821, 11654002, 11874250, 11804207)、国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0301401)、山西省三晋学者特聘教授项目、山西省重点研发计划 (批准号: 201903D111001)、山西省“1331”重点建设学科和山西省高等学校中青年拔尖创新人才计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangyajun\_166@163.com

于连续变量量子压缩态光场的研究中<sup>[16–19]</sup>. 在 1064 nm 压缩态光场应用中, 2017 年, 杨文海等<sup>[16]</sup>通过单共振 OPO 技术实现了 12.6 dB 的明亮压缩态光场输出, 其阈值功率为 220 mW; 2016 年, 德国马普所 Vahlbruch 等<sup>[18]</sup>通过双共振 OPO 技术实现了最高压缩度为 15 dB 的压缩真空态光场输出. 在 1550 nm 波段, 通过采用双共振 OPO 技术, 已经在实验上实现了 12.3 dB 的明亮压缩态光场<sup>[19]</sup>和 13 dB 的压缩真空态光场<sup>[20]</sup>的输出, 其抽运阈值分别为 16 和 12 mW. 在宽频带压缩态光场研究中, 德国马普所分别于 2010 年和 2013 年, 通过采用单共振 OPO 和整块 OPO 双共振技术实现了探测带宽为 170 MHz 和 1.2 GHz 的压缩真空态光场输出<sup>[21,22]</sup>. 然而, 现有工作中并未详细讨论两种 OPO 技术在宽频带压缩态光场制备中的区别与各自的优势.

本文理论分析了输出耦合镜透射率、线宽等参数与简并单共振和双共振 OPO 两种腔型的压缩带宽和阈值的关系, 并实验验证了理论分析结果, 详细对比了两种腔型在宽频带压缩态光场制备中的优缺点, 为 OPO 技术的实际应用提供了重要依据. 实验与理论结果均表明, 双共振 OPO 具有极低的阈值功率、更高的锁定稳定性和更小的激光功率消耗, 更有利于宽频带压缩态光场的实际应用.

## 2 理论分析

### 2.1 两种 OPO 腔型结构

宽傅里叶频谱压缩态光场是基于非经典光场的高速量子通信和信息处理中的必备资源. 其压

缩带宽<sup>[21]</sup>可定义为最小压缩方差  $V_1$  增加到  $V_1 + 0.5(1 - V_1)$  时对应的分析频率的谱宽 (方差归一化至单位真空噪声), 低于阈值的 OPO 压缩和反压缩正交分量方差 (分别为  $V_1$  和  $V_2$ ) 可表示为<sup>[23]</sup>

$$V_{1,2} = 1 \pm \eta\gamma \frac{4\sqrt{P_{sh}/P_{th}}}{\left(1 \mp \sqrt{P_{sh}/P_{th}}\right)^2 + 4K^2}, \quad (1)$$

其中,  $P_{sh}$  是二次谐波抽运光的功率;  $P_{th}$  是达到 OPO 阈值所需的抽运功率;  $\eta\gamma$  为总探测效率, 与逃逸效率  $\gamma$ , 传输损耗, 干涉效率, 探测器光电二极管的量子效率有关. OPO 的逃逸效率  $\gamma = T_s / (T_s + L_s)$  是由输出耦合镜对信号光的透射率  $T_s$  和信号光在腔内往返损耗  $L_s$  决定的. 无量纲参数  $K = 2\pi f / \beta$  是傅里叶频率  $f$  和腔的衰减率  $\beta = (T_s + L_s) c / l$  的比值, 光在腔中往返一周的光程长度为  $l$ , 腔的线宽定义为  $\delta\nu = \beta / (2\pi)$ . 由表达式 (1) 可知, 要获得大的压缩带宽和高压缩度光场输出, 需要提高输出耦合镜对信号光的透射率.

下面以图 1 单共振和双共振 OPO 为例, 分析两种腔型在宽频带压缩态光场制备中的区别. 如图 1 上半部分所示, 红线表示信号模, 绿线表示泵浦模, 单共振 OPO 泵浦模非共振, 腔内轴向功率密度差异较小, 无需基模和泵浦模的峰值重合即可实现有效的参量下转换 (图 1(a)); 双共振 OPO 则需要条件苛刻的双模重合, 如图 1(b) 所示, 当双共振 OPO 正常工作时, 需要严格保证在相位匹配的温度条件下实现泵浦模和基模的严格重合, 当两模发生分离时, 将无法产生参量下转换光子.

图 1 中的下半部分是单共振 OPO 和双共振 OPO 谐振腔的具体结构, OPO 谐振腔由一面凹面

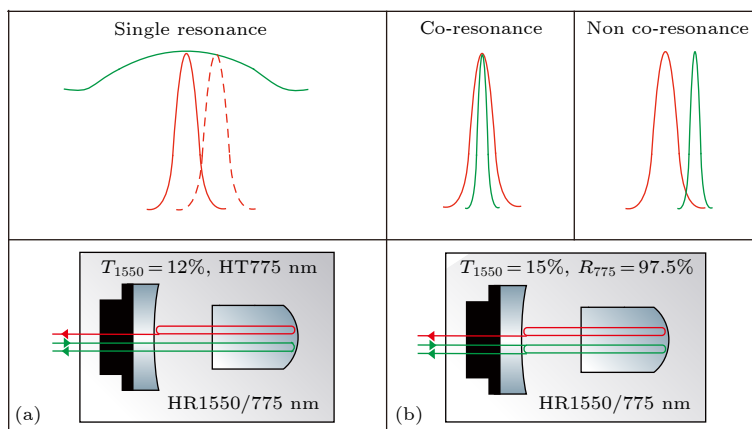


图 1 OPO 结构示意图 (a) 单共振 OPO; (b) 双共振 OPO

Fig. 1. Schematic diagram of OPO structure: (a) Singly-resonant OPO; (b) doubly-resonant OPO.

镜和一块周期性极化的磷酸钛钾晶体 (periodically poled potassium titanyl phosphate, PPKTP) 组成. 其中, PPKTP 晶体长度为  $l_0=10$  mm, 曲面的曲率半径为 12 mm, 在 1550 和 775 nm 处反射率均高于 99.9%, 平面为双减反膜, 空气间隙长度为 21 mm. 凹面镜作为输出耦合镜, 其曲率半径为 25 mm, 单共振 OPO 的凹面镜对泵浦光高透, 对于双共振 OPO, 凹面镜对泵浦光的反射率为 97.5%.

## 2.2 OPO 的阈值泵浦功率

首先, 分析单共振和双共振 OPO 的阈值泵浦功率. 对于只有信号光共振、泵浦光双穿晶体的单共振 OPO<sup>[24]</sup>, 其阈值泵浦功率表示为

$$P_{th} = \frac{\pi w_0^2}{2} \frac{c \varepsilon_0 n_s}{2} |E_3|^2, \quad (2)$$

$$E_3 = \sqrt{\frac{(T_{1s} + L_s)^2 n_s^2 \lambda_s^2}{4d_{eff}^2 I_0^2 (2\pi)^2}}, \quad (3)$$

其中, 泵浦光的腔腰斑半径为  $w_0=45.6$   $\mu\text{m}$ ;  $c$  为真空中的光速;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $n_s = 1.81$  为信号光在非线晶体中的折射率<sup>[25]</sup>; 信号光的波长  $\lambda_s = 1550$  nm;  $E_3$  为泵浦场的振幅;  $T_{1s}$  为单共振 OPO 输出耦合镜对信号光强的透射率; 腔内信号光的往返损耗  $L_s=0.004$ ;  $d_{eff}$  为腔内非线性晶体的有效非线性系数<sup>[26]</sup>, 数值为 10.7 pm/V; 晶体长度为  $l_0=10$  mm.

泵浦光和信号光同时共振的双共振 OPO<sup>[27,28]</sup>, 其阈值泵浦功率为

$$P_{th} = \frac{(T_{2p} + L_p)^2 (T_{2s} + L_s)^2}{64T_{2p}E}, \quad (4)$$

其中参量  $E$  为

$$E = \frac{4\mu_0 d_{eff}^2 \omega_s^2 \omega_i^2 l_0 h(\xi)}{\pi c^2 n_p^2 \omega_p}. \quad (5)$$

在双共振 OPO 中, 泵浦光通过 OPO 腔的凹面镜注入谐振腔, 腔对外部注入泵浦光的透射率为  $T_{2p}=0.25$ , 泵浦光在腔中的总往返损耗  $L_p=0.004$ . OPO 腔的凹面镜对腔内信号光的透射率为  $T_{2s}$ , 信号光在腔中的总往返损耗  $L_s=0.004$ . 这里的参量  $E$  为考虑了高斯光束聚焦函数  $h(\xi)$  的非线性系数, 取  $h(\xi) \approx 1$ ,  $\mu_0$  为真空磁导率.  $\omega_s$ ,  $\omega_i$  和  $\omega_p$  分别为 1550 nm 信号光、闲置光和 775 nm 泵浦光的角频率, 泵浦光在晶体中的折射率是  $n_p=1.84$ <sup>[25]</sup>.

由 (2) 式和 (4) 式可知, 信号光的透射率将直接引起阈值泵浦功率的变化. 为了更加直观地对比两种 OPO 腔的阈值差别, 分析了 OPO 阈值随信号光透射率的变化趋势, 结果如图 2 所示.

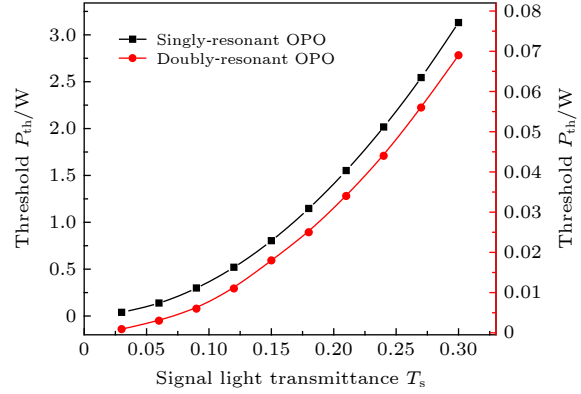


图 2 OPO 阈值  $P_{th}$  随信号光透射率  $T_s$  变化图  
Fig. 2. Diagram of the change of OPO threshold  $P_{th}$  with the transmittance of signal light  $T_s$ .

图 2 中黑色、红色曲线分别为单共振 OPO 和双共振 OPO 的阈值变化曲线. 通过观察图 2 发现, 两种腔型随信号光透射率的增加而单调递增, 而双共振的阈值功率较单共振阈值低 1—3 个数量级. 例如, 当输出耦合镜透射率大于 0.17 后, 单共振 OPO 的阈值泵浦功率达到 W 量级, 而双共振 OPO 的阈值泵浦功率仅为几十 mW, 并且随着信号光透射率的增大, 双共振 OPO 的阈值变化不会太显著. 因此, 与单共振 OPO 相比, 在相同带宽压缩态光场的设计中, 双共振 OPO 的阈值泵浦功率要小很多, 即消耗的激光能量小, 更适用于实际应用.

## 2.3 压缩带宽

接下来, 通过公式 (1) 计算两种 OPO 对应的压缩带宽. 由于 OPO 过程越接近其振荡阈值, 量子相关性越强, 产生的压缩越大<sup>[18]</sup>. 在实验条件下, 通常当泵浦因子  $P_{sh}/P_{th}$  为 80% 时, 获得最高压缩度光场输出. 下面选取傅里叶分析频率为  $f=5$  MHz, 光学损耗  $\eta=0.94$  计算压缩带宽、OPO 信号光线宽、压缩度随信号光透射率  $T_s$  变化的关系 (图 3).

图 3 中的绿色、蓝色和红色曲线分别为压缩带宽、OPO 信号光线宽、压缩度随信号光透射率  $T_s$  的变化趋势. 结合图 2 和图 3 可以看出, 对于 OPO 腔型, 如果要获得大的压缩带宽, 需要增加 OPO 输出耦合镜对信号光的透射率, 这是因为逃逸效率

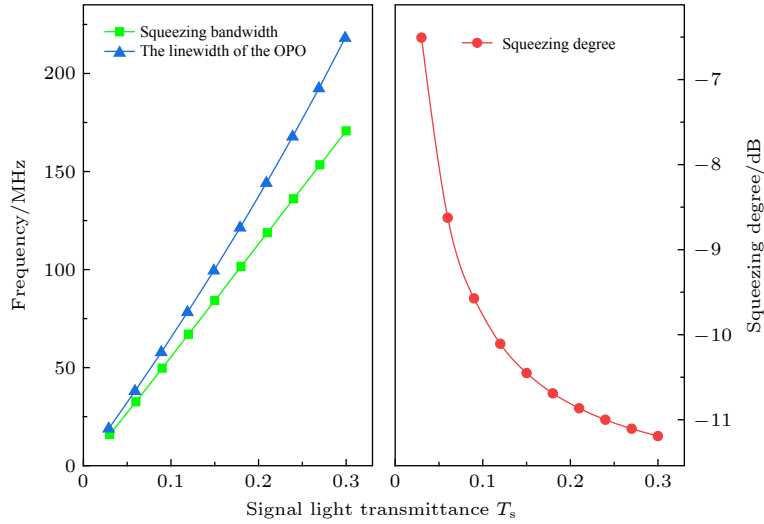

 图 3 压缩带宽、OPO 信号光线宽、压缩度随  $T_s$  变化图

 Fig. 3. Diagram of squeezing bandwidth, signal light linewidth of OPO and squeezing degree changing with  $T_s$ .

增加, 将产生更高的压缩, 但同时阈值功率将升高. 这对于单共振 OPO 来说, 较高的泵浦功率不仅需要大功率的激光设备, 而且会引起严重的晶体热效应, 其腔镜的反射光反馈至上游光学系统将导致整套光学系统稳定性变差, 影响高压压缩度光场制备. 对于双共振 OPO 而言, 随着信号光透射率的变大, 阈值功率变化不是很明显, 仍然保持低的阈值泵浦功率, 同时双共振 OPO 对信号光的线宽变大, 可以产生更高的压缩度和更大的压缩带宽. 例如, 要获得 106.5 MHz 的压缩带宽, 信号光的透射率应为 0.18, 此时在 5 MHz 处的压缩度为 -10.7 dB, 对应的 OPO 的线宽为 121.3 MHz, 双共振 OPO 的阈值泵浦功率仅为 0.025 W, 而单共振 OPO 的阈值泵浦功率则高达 1.147 W. 因此, 对于宽频带压缩态光场的制备, 双共振光学腔更具优势.

### 3 实验结果

采用与文献 [19] (已解决 OPO 腔的双共振谐振条件) 相同的实验装置, 对单共振与双共振 OPO 腔的泵浦阈值、线宽和压缩带宽进行测量, 其中两种腔型具体参数如图 1 所示, 实验中两腔型保持腔长相同, 通过更换输出耦合镜实现两种腔型的切换. 为了验证透射率对压缩带宽的影响, 增大双共振 OPO 输出耦合镜对信号光的透射率, 其中, 单共振 OPO 输出耦合镜对 1550 nm 波长的反射率为 88%, 双共振 OPO 输出耦合镜对 1550 和 775 nm 的反射率分别为 85% 和 97.5%. 测试装置如图 4

所示, 首先 OPO 仅注入泵浦光并处于腔长扫描状态, PPKTP 晶体控制于相位匹配温度点 43.77 °C; 不断增加泵浦功率, 由信号光路中的光电探测器 (photodetector, PD) 在示波器上观察到恰好有信号光输出时, 即表明 OPO 达到阈值功率. 经测试, 单、双共振 OPO 的阈值泵浦功率分别为 520 和 18 mW.

其次, 扫描 OPO 一个自由光谱区 (自由光谱区为  $\Delta\nu=c/l=3.8$  GHz), 并通过示波器 (oscilloscope) 记录自由光谱区, 同时展开测量一个信号光透射峰波形 (图 5). 由测试结果计算得到, 单共振 OPO 信号光的精细度为 49.5, 线宽为 77.4 MHz; 双共振 OPO 信号光的精细度为 39.5, 线宽为 97.1 MHz.

随后, 通过平衡零拍探测器 (balanced homodyne detector) 对两种 OPO 产生的压缩态光场的压缩度及压缩带宽进行测量. 实验中, 注入单、双共振 OPO 的泵浦功率分别为 416 和 12 mW (两种腔型输出压缩光的最高压缩度均达到 10 dB, 避免最大初始压缩度对压缩带宽测量的影响), 平衡零拍探测交流信号直接连接到频谱仪 (spectrum analyzer, SA), 测量了分析频率分别为 5—80 和 5—100 MHz 的正交振幅压缩态光场, 分辨率带宽 (resolution bandwidth, RBW) 为 300 kHz, 视频带宽 (video bandwidth, VBW) 为 200 Hz. 实验结果如图 6 所示, 上图为单共振 OPO 结果, 下图为双共振 OPO 结果, 均扣除了电子学噪声的影响. 其中, 单共振 OPO 在 5 MHz 处的压缩度为 -10.1 dB, 压缩带宽为 67 MHz; 而双共振 OPO 的压缩度为 -10.5 dB, 压缩带宽为 84.2 MHz.

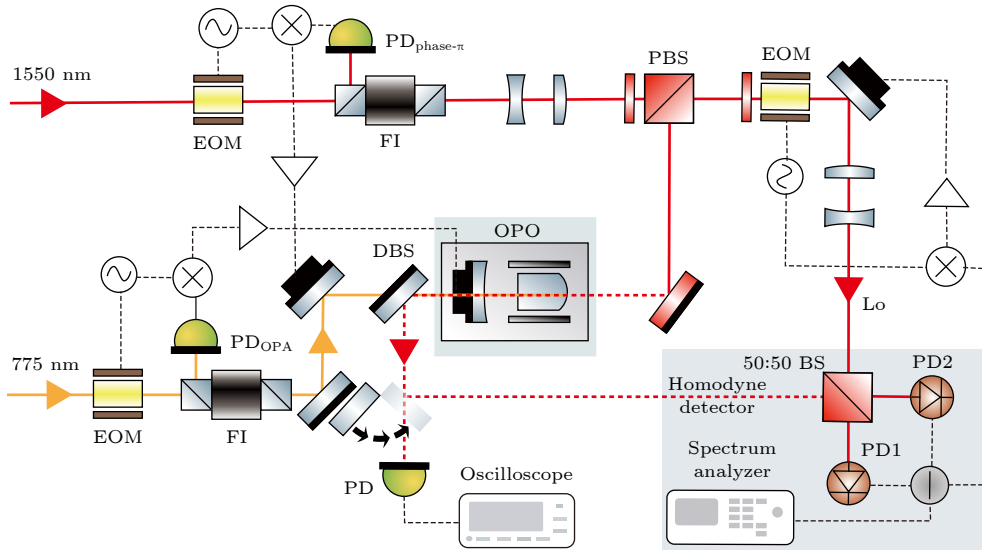


图 4 实验装置图

Fig. 4. Diagram of experimental set-up.

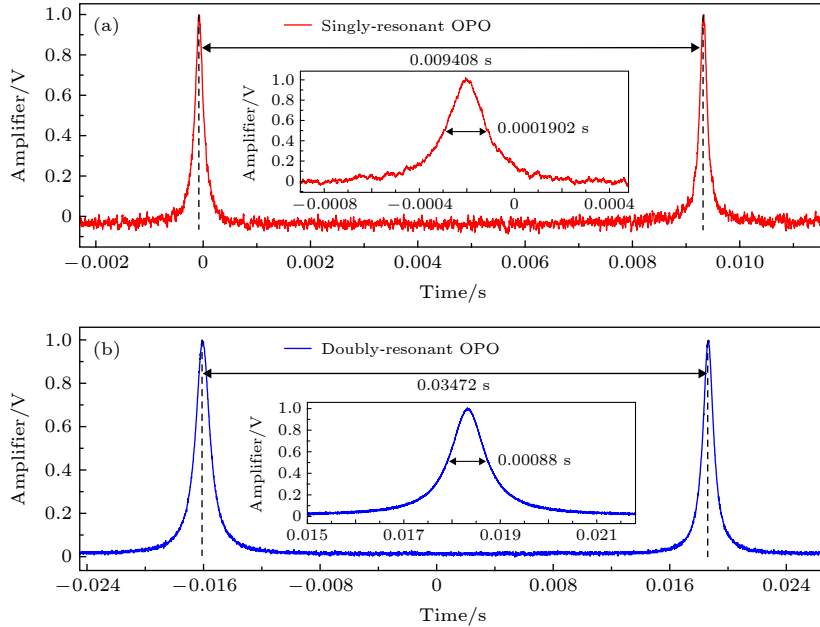


图 5 OPO 信号光的透射峰 (a) 单共振 OPO 的透射峰; (b) 双共振 OPO 的透射峰

Fig. 5. The transmission peaks of OPO signal light: (a) The transmission peaks of singly-resonant OPO; (b) the transmission peaks of doubly-resonant OPO.

以上结果表明, 增加输出耦合镜对信号光的透射率可有效拓宽压缩带宽, 双共振 OPO 具有更低的泵浦阈值功率 (仅为单共振 OPO 腔阈值功率的 3.5%), 更有利于宽频带压缩态光场的制备, 实验与理论结果相吻合.

同时, 发现单共振 OPO 测量噪声谱相比双共振的测量结果, 基线上叠加了较大的噪声. 经过分析, 可能是由 OPO 腔长锁定回路引入, 于是对两种腔型锁定误差信号的频谱分布进行了分析. 具体

测试方法如下: 在利用 PDH 方法锁腔时, 先使 OPO 腔长处于扫描的状态下, 在示波器上读取误差信号的电压幅值的峰-峰值  $A_0$ , 然后将腔长锁定, 再次读取示波器上误差信号基线峰-峰值, 由文献 [29] 计算锁定后的标准偏差  $\sigma$ , 可获得如图 7 所示的正态分布图.

图 7 中, 单共振 OPO 用种子光锁腔长, 有用信号少; 双共振 OPO 可以用泵浦光锁腔长 [19,30], 有用信号多, 锁定比较简单. 为了比较两种 OPO

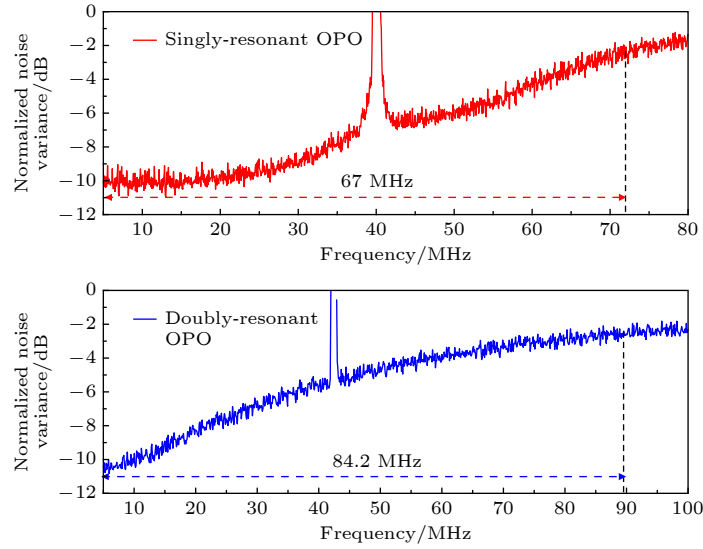


图 6 OPO 的压缩带宽实验结果图

Fig. 6. Experimental results of OPO squeezing bandwidth.

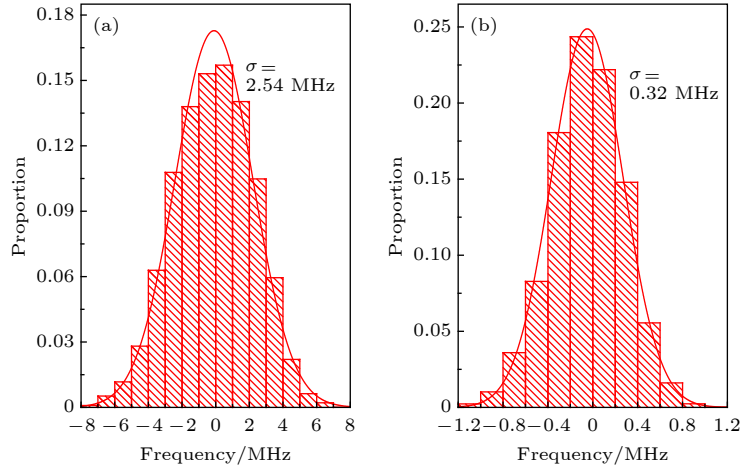


图 7 OPO 的误差信号频率分布统计图 (a) 单共振 OPO; (b) 双共振 OPO

Fig. 7. Statistical graph of frequency distribution of error signal of OPO: (a) Singly-resonant OPO; (b) doubly-resonant OPO.

腔长的锁定稳定性, 将锁定后的误差信号数据进行了处理<sup>[29]</sup>. 其中, 单共振 OPO 锁定后的标准偏差为 2.54 MHz, 双共振标准偏差为 0.32 MHz, 表明双共振 OPO 锁定后稳定性高于单共振腔. 其主要原因是, 采用 PDH 稳频技术锁定 OPO 腔长时, 单共振 OPO 泵浦光不共振, 只能通过反射端基频光提取误差信号, 为欠耦合输入, 基频光大部分被反射, 仅有少量光进入 OPO, 反射信号携带腔内光场的信息极少, 通过反射端探测器直流输出看不到反射峰, 导致提取出的误差信号信噪比较小, 因而腔长锁定后稳定性较差. 而双共振 OPO 腔采用泵浦光锁定, 泵浦光为过耦合输入, 注入腔内信号多, 因而反射信号携带腔内谐振信息较多, 提取误差信

号信噪比较高, 锁定后噪声较小.

## 4 结 论

本文对比分析了制备压缩态光场单共振与双共振 OPO 光学参量腔的泵浦阈值、线宽、压缩带宽与输出耦合镜透射率之间的关系. 理论与实验研究结果均表明, 与单共振 OPO 相比, 双共振 OPO 具有更低的泵浦阈值, 更容易在低泵浦功率条件下, 通过增加输出耦合镜透射率提高压缩带宽, 获得可应用于高速量子通信的宽频带压缩态光场. 实验中两种腔型结构对比, 在相同的初始压缩度 ( $> -10$  dB) 的条件下, 单共振 OPO 腔的压缩带宽为 67 MHz,

双共振腔的带宽达到 84.2 MHz, 此时二者的泵浦功率分别为 416 和 12 mW. 同时, 双共振 OPO 腔长锁定后标准偏差较小, 仅为 0.32 MHz(单共振为 2.54 MHz), 具有更好的锁定稳定性; 通过继续缩短腔长、增加输出耦合镜透射率可进一步拓宽频谱带宽. 由此可见, 双共振腔消耗能量低、稳定性高, 更适用于实际应用. 例如, 对于量子照明, 实际应用需要消耗的功率越小越容易维护, 体积相应也可以做得更小. 低泵浦阈值双共振 OPO 的实现将推动量子技术外场技术的开发与研究.

## 参考文献

- [1] Grote H, Danzmann K, Dooley K L, Schnabel R, Slutsky J, Vahlbruch H 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 181101
- [2] Oelker E, Mansell G, Tse M, Miller J, Matchard F, Barsotti L, Fritschel P, McClelland D E, Evans M, Mavalvala N 2016 *Optica* **3** 682
- [3] Cheng J, Feng J X, Li Y J, Zhang K S 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 244202 (in Chinese) [成健, 冯晋霞, 李渊骥, 张宽收 2018 物理学报 **67** 244202]
- [4] Feng J X, Du J S, Jin X L, Li Y J, Zhang K S 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 174203 (in Chinese) [冯晋霞, 杜京师, 靳晓丽, 李渊骥, 张宽收 2018 物理学报 **67** 174203]
- [5] Su X L, Tian C X, Deng X W, Li Q, Xie C D, Peng K C 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 240503
- [6] Huo M R, Qin J L, Cheng J L, Yan Z H, Qin Z Z, Su X L, Jia X J, Xie C D, Peng K C 2018 *Sci. Adv.* **4** eaas9401
- [7] Nie M, Zhang Y X, Yang G, Zhang M L, Sun A J, Pei C X 2019 *Acta Sin. Quantum Opt.* **25** 395 (in Chinese) [聂敏, 张怡心, 杨光, 张美玲, 孙爱晶, 裴昌幸 2019 量子光学学报 **25** 395]
- [8] Shi S P, Wang Y J, Yang W H, Zheng Y H, Peng K C 2018 *Opt. Lett.* **43** 5411
- [9] Nie D D, Feng J X, Qi M, Li Y J, Zhang K S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 094205 (in Chinese) [聂丹丹, 冯晋霞, 戚蒙, 李渊骥, 张宽收 2020 物理学报 **69** 094205]
- [10] Wan Z J, Feng J X, Cheng J, Zhang K S 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024203 (in Chinese) [万振菊, 冯晋霞, 成健, 张宽收 2018 物理学报 **67** 024203]
- [11] Chang Y H, Liu A P 2019 *Acta Sin. Quantum Opt.* **25** 297 (in Chinese) [常彦红, 刘阿鹏 2019 量子光学学报 **25** 297]
- [12] Yu S, Liu H Z, Liu S S, Jing J T 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 090303 (in Chinese) [余胜, 刘焕章, 刘胜帅, 荆杰泰 2020 物理学报 **69** 090303]
- [13] Lloyd S 2008 *Science* **321** 1463
- [14] Zhang Z S, Mouradian S, Wong F N C, Shapiro J H 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 110506
- [15] Zhang Z S, Tengner M, Zhong T, Wong F N C, Shapiro J H 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 010501
- [16] Yang W H, Shi S P, Wang Y J, Ma W G, Zheng Y H, Peng K C 2017 *Opt. Lett.* **42** 4553
- [17] Rihan A, Andrieux E, Zanon-Willette T, Briaudeau S, Himbert M, Zondy J J 2011 *Appl. Phys. B* **102** 367
- [18] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnabel R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801
- [19] Zhang W H, Wang J R, Zheng Y H, Wang Y J, Peng K C 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 171103
- [20] Schönbeck A, Thies F, Schnabel R 2018 *Opt. Lett.* **43** 110
- [21] Mehmet M, Vahlbruch H, Lastzka N, Danzmann K, Schnabel R 2010 *Phys. Rev. A* **81** 013814
- [22] Ast S, Mehmet M, Schnabel R 2013 *Opt. Express* **21** 13572
- [23] Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, Furusawa A 2007 *Opt. Express* **15** 4321
- [24] Sambrowski A 2012 *Ph. D. Dissertation* (Hannover: Leibniz Universität Hannover)
- [25] Emanuelli S, Arie A 2003 *Appl. Opt.* **42** 6661
- [26] Vanherzeele H, Bierlein J D 1992 *Opt. Lett.* **17** 982
- [27] Schiller S, Schneider K, Mlynek J 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1512
- [28] Martinelli M, Zhang K S, Coudreau T, Maître A, Fabre C 2001 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **3** 300
- [29] Jia M Y, Zhao G, Zhou Y T, Liu J X, Gou S J, Wu Y Q, Ma W G, Zhang L, Dong L, Yi W B, Xiao L T, Jia S T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 104207 (in Chinese) [贾梦源, 赵刚, 周月婷, 刘建鑫, 郭松杰, 吴永前, 马维光, 张雷, 董磊, 尹王保, 肖连团, 贾锁堂 2018 物理学报 **67** 104207]
- [30] Zhang H Y, Wang J R, Li Q H, Ji Y J, He Z Y, Yang R C, Tian L 2019 *Acta Sin. Quantum Opt.* **25** 456 (in Chinese) [张宏宇, 王锦荣, 李庆回, 吉宇杰, 贺子洋, 杨荣草, 田龙 2019 量子光学学报 **25** 456]



# Design of optical parametric cavity for broadband squeezed light field\*

Wang Jun-Ping<sup>1)</sup> Zhang Wen-Hui<sup>1)</sup> Li Rui-Xin<sup>1)</sup> Tian Long<sup>1)2)</sup>  
Wang Ya-Jun<sup>1)2)</sup>† Zheng Yao-Hui<sup>1)2)</sup>

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

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

( Received 11 June 2020; revised manuscript received 8 July 2020 )

## Abstract

The field of squeezed state is an important quantum resource in the study of quantum optics. In the application of quantum information, the spectrum bandwidth of the squeezed light field is an important index to limit the information transmission capacity. Currently, the optical parametric oscillator (OPO) is one of the most efficient ways to generate high squeezed non-classical optical fields. In this paper, the degenerate singly-resonant and doubly-resonant OPO structures are introduced. Both OPOs are composed of concave mirrors and periodically poled potassium titanyl phosphate crystals (PPKTP). The length of PPKTP crystal is 10 mm. The curvature radius of the curved surface is 12 mm, and it has high reflectivity at 1550 nm and 775 nm. The plane surface is coated with anti-reflection coating. The air gap length is 21 mm. The concave mirror is an output coupling mirror, and its radius of curvature is 25 mm. In the singly-resonant OPO, only the signal light resonates in the cavity, and the pump light passes through the nonlinear crystal twice and then outputs out of the cavity. The reflectivity of OPO output coupling mirror to the wavelength of 1550 nm is 88%. The linewidth of the corresponding fundamental frequency wave is 77.4 MHz. For doubly-resonant OPO, both the signal light and the pump light resonate simultaneously in the cavity. The reflectivity of OPO output coupling mirror to 1550 nm and 775 nm is 85% and 97.5%, respectively. The linewidth of the corresponding fundamental frequency wave and harmonic is 97.1 MHz and 15.6 MHz, respectively. Then the threshold of OPO is calculated. The threshold pump power of OPO increases with signal light transmittance increasing, but the threshold value of doubly-resonant OPO is obviously smaller than that of singly-resonant OPO. After that, the variation of the squeezing bandwidth of the squeezed light field generated by OPO with the transmittance of the signal is analyzed. Finally, we complete the design of quantum squeezer with low threshold (18 mW), broadband (84.2 MHz) and high stability (the standard deviation of locking baseline is 0.32 MHz) experimentally. The results show that compared with the singly-resonant optical parametric oscillator, the doubly-resonant cavity has the characteristics of low threshold and high stability, which is more suitable for the preparation and practical application of broadband squeezed light field.

**Keywords:** squeezed light field, optical parametric oscillator, pump threshold, squeezing bandwidth

**PACS:** 42.50.-p, 42.65.Lm

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200890

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62027821, 11654002, 11874250, 11804207), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0301401), the Program for Sanjin Scholar of Shanxi Province, the Key Research and Development (R&D) Projects of Shanxi Province, China (Grant No. 201903D111001), the Shanxi "1331 Project", China, and the Program for Outstanding Innovative Teams of Higher Learning Institutions of Shanxi, China.

† Corresponding author. E-mail: wangyajun\_166@163.com