

# 利用外腔谐振倍频获得双色量子关联光场

冯晋霞 孙志妮 张宽收\*

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** 报道了利用周期极化铌酸锂晶体外腔谐振增强倍频技术获得波长分别为1560 nm和780 nm双色量子关联光场。由于该量子关联系统的激光波长分别位于量子态传输波段与原子存储波段,可应用于研究实用化量子信息处理系统。在利用谐振倍频获得10 mW倍频光输出、倍频效率达45%的基础上,实测1560 nm基频光与780 nm倍频光的量子关联为1.2 dB。

**关键词** 非线性光学; 量子关联; 谐振倍频; 1560 nm; 780 nm

中图分类号 O437.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0818001

## Two-Color Quantum Correlation Fields Generated by Extra-Cavity-Enhanced Frequency Doubling

Feng Jinxia Sun Zhini Zhang Kuanshou

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

**Abstract** Two-color quantum correlation between fundamental (1.56  $\mu\text{m}$ ) and second-harmonic (780 nm) fields is investigated by an external cavity-enhanced periodically poled lithium niobate frequency doubler. Centers wavelength of the system at 1560 nm and 780 nm are in the wave band of quantum states transmission and quantum storage, respectively. So this kind of system can be employed for researches of practical quantum information processing. When the second-harmonic power of 10 mW is obtained with the conversion efficiency of 45%, 1.2 dB quantum correlation between fundamental (1560 nm) and second-harmonic (780 nm) fields is observed.

**Key words** nonlinear optics; quantum correlation; extra-cavity-enhanced frequency doubling; 1560 nm; 780 nm

**OCIS codes** 140.3515; 190.2620; 270.5565; 270.6570

## 1 引言

量子纠缠态是量子通讯和量子信息处理的基本资源<sup>[1]</sup>。近年来,随着高质量量子纠缠态的实验获得,量子离物传态、量子密集编码、量子保密通信以及量子纠缠交换等量子信息领域的实验研究得到迅速发展<sup>[2-6]</sup>。要想实现实用化的量子计算和长距离量子保密通信,需要实现量子信息在不同特征频率的量子节点存储和量子通道的高保真度传输<sup>[7-10]</sup>。这就要求量子态的波段分别位于作为存储介质的原子吸收线及光纤通信的低损耗波段。780 nm(Rb原子D2跃迁谱线)和1560 nm(光纤低损耗窗口)双色连续变量关联或纠缠的产生是实现实用化量子保密通信网络的理想光源。

利用外腔谐振倍频过程制备基频和倍频光场的双色量子关联光束是一种装置简单更有利于实用化的有效方法<sup>[11-15]</sup>。1989年,Horowicz等<sup>[11]</sup>在理论上预测了倍频产生过程中基频光场和倍频光场之间两种频率相差极大的光场之间存在着非经典的量子关联。2003年,Lodahl等<sup>[12]</sup>在理论上分析了I类匹配单共振倍频过程产生基频和倍频光束的EPR纠缠特性。同年,Andersen等<sup>[13]</sup>理论计算了II类匹配的倍频过程可以产生正交

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61227015,11204167)、山西省自然科学基金(2012011003-1)

作者简介: 冯晋霞(1981—),女,博士,副教授,主要从事量子光学及激光技术方面的研究。E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

振幅反关联、正交相位正关联的纠缠态光场;2006年,山西大学光电所罗玉等<sup>[14]</sup>采用KTP晶体II类匹配谐振倍频过程获得了1080 nm明亮的EPR纠缠光束;2007年,山西大学光电所李永民等<sup>[15]</sup>利用周期极化KTP晶体I类匹配单共振外腔谐振倍频过程获得了0.64 dB的532 nm倍频光与1064 nm基频光之间的关联。

本文报道了利用1560 nm连续单频光纤激光器作为抽运光源,通过I类匹配周期极化铌酸锂(PPLN)晶体外腔谐振倍频过程,对反射基频光场(1560 nm)和输出倍频光场(780 nm)的量子噪声进行了实验研究,获得了中心波长分别位于Rb原子吸收线和光纤低损耗窗口的双色连续变量量子关联光场。

## 2 外腔单共振倍频过程产生量子关联的理论分析

在外腔谐振倍频过程中,倍频腔反射基频场和输出倍频场的正交振幅分量噪声起伏为<sup>[16]</sup>:

$$\delta X_1 = \frac{(\gamma_{in} - \gamma_l - 3\mu|\alpha|^2 + i\omega)\delta X_{1-in}(\omega) + 2\sqrt{2\gamma_{in}\mu|\alpha|^2}\delta X_{2-in}(\omega) + 2\sqrt{\gamma_{in}\gamma_l}\delta X_{vacuum}(\omega)}{\gamma + 3\mu|\alpha|^2 - i\omega}, \quad (1)$$

$$\delta X_2 = \frac{(-\gamma - \mu|\alpha|^2 + i\omega)\delta X_{2-in}(\omega) - 2\sqrt{2\gamma_{in}\mu|\alpha|^2}\delta X_{1-in}(\omega) - 2\sqrt{2\gamma_l\mu|\alpha|^2}\delta X_{vacuum}(\omega)}{\gamma + 3\mu|\alpha|^2 - i\omega}, \quad (2)$$

式中 $\delta X_1$ 和 $\delta X_2$ 分别是倍频腔反射基频场和输出倍频场的正交振幅分量的噪声起伏; $\delta X_{1-in}$ 和 $\delta X_{2-in}$ 分别是基频场和倍频场通过耦合镜输入腔内的振幅起伏, $\delta X_{vacuum}$ 是由于内腔损耗引入的真空振幅起伏; $\gamma = \gamma_{in} + \gamma_l + \gamma_{out}$ 为基频光总的线性损耗速率, $\gamma_{in}$ 、 $\gamma_l$ 、 $\gamma_{out}$ 分别表示由输入耦合镜、内腔损耗和输出耦合镜引入的对于基频光的损耗速率; $\mu$ 为双光子衰减速率,表示内腔基频场转化为倍频场所引起的损耗; $\alpha$ 表示腔内基频场平均振幅; $\omega$ 为分析频率。

反射基频场和输出倍频场的归一化强度量子关联噪声起伏可以写为<sup>[17]</sup>:

$$C(\Omega) = \frac{\langle (\delta X_1 + \delta X_2)^* (\delta X_1 + \delta X_2) \rangle}{\langle \delta X_1^* \delta X_1 \rangle \langle \delta X_2^* \delta X_2 \rangle} = 1 + \frac{\langle (\delta X_1^* \delta X_2)^* \rangle + \langle \delta X_2^* \delta X_1 \rangle}{\langle \delta X_1^* \delta X_1 \rangle + \langle \delta X_2^* \delta X_2 \rangle}. \quad (3)$$

当注入光为理想的相干光场,可根据(1)式和(2)式推导得到:

$$C(\Omega) = 1 - \frac{8\mu|\alpha|^2\sqrt{2\gamma_{in}\mu|\alpha|^2}}{2\gamma^2 + 10\mu^2|\alpha|^4 + 8\mu|\alpha|^2\gamma + 2\omega^2}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出 $C(\Omega) < 0$ ,即反射基频光场和输出的倍频光场存在正交振幅关联。

在量子光学实验中通常使用的平衡零拍探测技术,不适用于不同频域关联光场的探测。采用如图1所示探测方案去测量反射基频光场和输出的倍频光场的量子关联度,模场 $a_1$ 、 $a_2$ 分别表示反射基频模场和输出倍频场的湮灭算符。两束光入射到各自的探测器, $a'_1$ 、 $a'_2$ 表示两探测器接受到反射基频模场和输出倍频场的有效模湮灭算符,则探测器测量到的光电流信号可表示为:

$$n'_1 = g_1 a'^*_1 a'_1 \quad (5)$$

$$n'_2 = g_2 a'^*_2 a'_2 \quad (6)$$

式中 $a'_1 = \sqrt{\eta_1} a_1 + \sqrt{1 - \eta_1} c_{1v}$ ,  $a'_2 = \sqrt{\eta_2} a_2 + \sqrt{1 - \eta_2} c_{2v}$ ;  $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 分别表示两探测器量子效率; $g_1$ 和 $g_2$ 表示探测器电子学增益因子; $c_{1v}$ 和 $c_{2v}$ 表示两探测器的真空场模湮灭算符。根据(5)式和(6)式可得到在傅里叶频域空间光电流信号噪声起伏为:

$$\delta n'_1(\Omega) = g_1 \langle \delta(a'^*_1 a'_1) \rangle = g_1 \sqrt{I_1} [\sqrt{\eta_1} \delta X_1(\Omega) + \sqrt{1 - \eta_1} \delta X_{1v}(\Omega)], \quad (7)$$

$$\delta n'_2(\Omega) = g_2 \langle \delta(a'^*_2 a'_2) \rangle = g_2 \sqrt{I_2} [\sqrt{\eta_2} \delta X_2(\Omega) + \sqrt{1 - \eta_2} \delta X_{2v}(\Omega)], \quad (8)$$

$I_1$ 和 $I_2$ 表示探测到的光场的平均光强,因此有 $I_j = \langle a'^*_j \rangle \langle a'_j \rangle = \langle X'^*_j \rangle^2 / 4$  ( $j=1, 2$ );将两探测器输出光电流经过加法器后输出到频谱分析仪,经过频谱分析仪探测到归一化的噪声起伏为:

$$S(\Omega) = \frac{\langle (\delta n_1' + \delta n_2')^+ (\delta n_1' + \delta n_2') \rangle}{\langle \delta n_1' + \delta n_1' \rangle \langle \delta n_2' + \delta n_2' \rangle} = 1 + \frac{g_1 g_2 \sqrt{\eta_1 \eta_2} I_1 I_2 \langle (\delta X_1^+ \delta X_2) \rangle + \langle \delta X_2^+ \delta X_1 \rangle}{\langle \delta n_1' + \delta n_1' \rangle + \langle \delta n_2' + \delta n_2' \rangle} \quad (9)$$

$$1 + \frac{g_1 g_2 \sqrt{\eta_1 \eta_2} I_1 I_2 \langle (\delta X_1^+ \delta X_2) \rangle + \langle \delta X_2^+ \delta X_1 \rangle}{g_1^2 \eta_1 I_1 \langle (\delta X_1^+ \delta X_1) \rangle + g_1^2 I_1 (1 - \eta_1) + g_2^2 \eta_2 I_2 \langle \delta X_2^+ \delta X_2 \rangle + g_2^2 I_2 (1 - \eta_2)}$$

当  $\eta_1 = \eta_2 = 1$ , 且  $g_1^2 I_1 = g_2^2 I_2$  时, 归一化噪声起伏为:

$$S(\Omega) = 1 + \frac{\langle (\delta X_1^+ \delta X_2) \rangle + \langle \delta X_2^+ \delta X_1 \rangle}{\langle (\delta X_1^+ \delta X_1) \rangle + \langle \delta X_2^+ \delta X_2 \rangle}, \quad (10)$$

可以看出, (10)式给出的归一化噪声起伏测量结果表达式与(3)式理论推导出的归一化量子关联谱表达式一致, 表明该测量方案可以探测双模双色光束的强度量子关联特性。

### 3 实验装置

图1为利用外腔谐振倍频产生反射基频光与倍频光双色量子关联的实验装置。抽运光源是输出功率为2 W的1560 nm连续单频光纤激光器(NP Photonics公司);半波片(HWP<sub>1</sub>)用来控制激光的偏振方向;光隔离器(OI)用来防止由光学元件反射的激光反馈回激光器,保证激光器稳定运转。由于光纤激光器输出激光的强度噪声远高于散粒噪声基准,实验中采用2个自行设计的1560 nm模式清洁剂(MC1和MC2)降低抽运光的强度噪声,模式清洁剂是腔长为1.1 m的无源三镜环形谐振腔,精细度为500。利用Pound-Drever-Hall锁腔技术将MC1和MC2的腔长锁定在基频光共振频率处,1560 nm抽运光的透射率为64%,其强度噪声在分析频率4 MHz处达到散粒噪声基准。

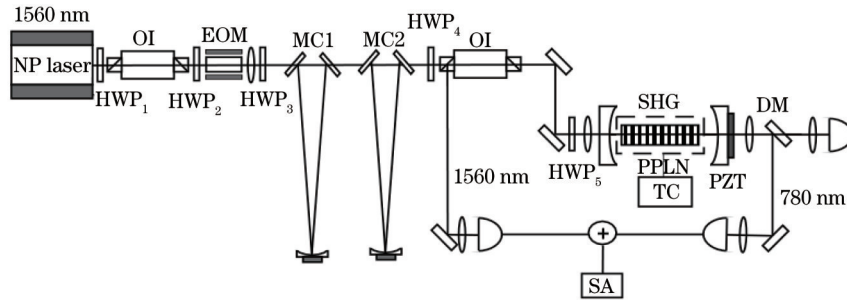


图1 外腔谐振倍频产生双色量子关联光场的实验装置

Fig.1 Experimental setup for the generation of two-color quantum correlation fields via extra-cavity frequency doubling

倍频腔为由两个平凹镜构成的两镜驻波腔,曲率半径为30 mm;输入耦合镜的平面镀基频光减反膜( $R_{1560\text{ nm}} < 1\%$ ),凹面镀基频光部分反射膜、倍频光高反膜( $T_{1560\text{ nm}} = 4.3\%$ ,  $R_{780\text{ nm}} > 99.8\%$ );输出耦合镜的平面镀倍频光减反膜( $R_{780\text{ nm}} < 1\%$ ),凹面镀基频光高反膜、倍频光高透膜( $R_{1560\text{ nm}} > 99.8\%$ ,  $T_{780\text{ nm}} > 90\%$ )。倍频腔的光学腔长为52 mm。采用尺寸为1 mm×10 mm×20 mm的PPLN晶体作为倍频晶体,PPLN晶体的通光面镀基频光和倍频光减反膜( $R_{1560\text{ nm}\&780\text{ nm}} < 0.2\%$ )。PPLN晶体置于控温炉中,用自制的控温精度为0.003 ℃的高精度温度控制仪控制。利用一个焦距为70 mm的聚焦透镜将基频光聚焦至PPLN晶体的中心位置,聚焦腰斑为58 μm,使基频抽运光与倍频腔实现模式匹配。实验中,模式匹配率达到98%。当将PPLN晶体温度控制在120 ℃,采用锁相电子伺服系统将倍频腔腔长锁定在基频光共振频率处,实验获得了稳定的倍频780 nm连续单频激光输出。

倍频腔输出光经过双色镜后,倍频光全部反射,透射的基频光用于锁定倍频腔。反射基频光经光隔离器和偏振分光棱镜后获得。倍频场和反射基频场经过加法器后输入频谱分析仪测量两光场之间的量子关联。

### 4 实验结果

实验中,当基频光注入功率为22 mW,并把倍频腔锁定到基频光的中心波长时,倍频光输出功率为10 mW,倍频转换效率达45%,反射基频光功率为4 mW。实验中分别用两个自制的线性响应范围达12 mW的低噪声探测器测量输出倍频光和反射基频光的噪声及它们之间的量子关联。考虑到基频光的强度噪声

在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪声基准,在分析频率 5 MHz 处进行噪声测量,并用相同直流响应的白光校准散粒噪声基准。图 2 为倍频光功率为 10 mW 时,倍频光场的强度噪声谱,曲线 a 为散粒噪声基准,曲线 b 为倍频光场的强度噪声起伏。可以看出倍频光强度噪声起伏低于散粒噪声基准 1.2 dB(考虑到探测器量子效率及探测光路的传输效率,总的探测效率为 82%,因此倍频光实际输出的振幅压缩度为 1.5 dB)。图 3 为反射基频光功率为 4 mW 时,基频光场的强度噪声谱,曲线 a 为散粒噪声基准,曲线 b 为反射基频光场的强度噪声起伏。可以看出反射基频光强度噪声起伏低于散粒噪声基准 1.5 dB(考虑到探测器量子效率及探测光路的传输效率,总的探测效率为 87.3%,因此倍频光实际输出的振幅压缩度为 1.77 dB)。

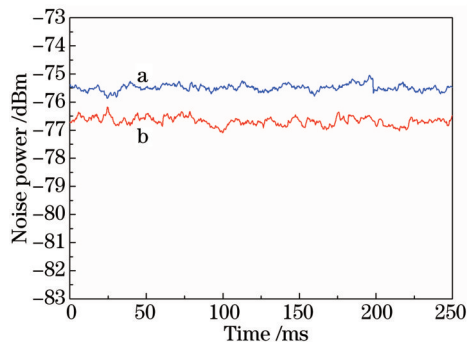


图 2 倍频光强度噪声谱

Fig.2 Noise power spectrum of second-harmonic field

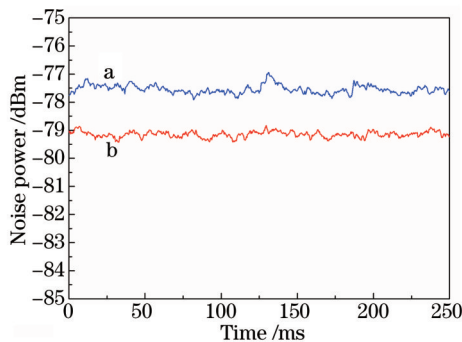


图 3 反射基频光场强度噪声谱

Fig.3 Noise power spectrum of reflective fundamental field

在上述工作基础上,进一步测量了倍频光与反射基频光的量子关联(如图 4 所示),曲线 a 为反射基频光场和倍频光场噪声功率直接相加之和,相当于经典无关联情况两束光噪声功率的叠加。曲线 b 为基频光场和倍频光场的噪声信号经加法器相加后,输入频谱分析仪探测到的噪声功率。可以看出曲线 b 比曲线 a 低 1.2 dB,表明 1560 nm 基频光场与 780 nm 倍频光场之间存在着强度量子关联,量子关联度为 1.2 dB。在双色光场的强度量子关联测量中,利用电衰减器调节校准了两个探测器的平衡。

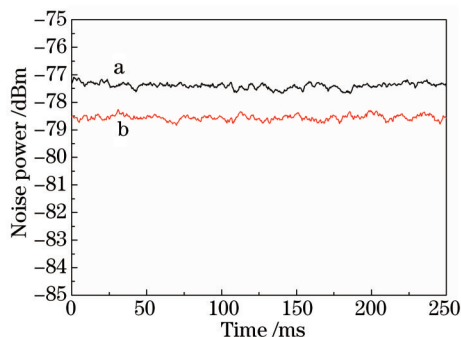


图 4 反射基频光与倍频光的双色强度量子关联

Fig.4 Two-color quantum correlation between fundamental and second-harmonic fields

## 5 结 论

采用 1560 nm 连续单频光纤激光器作为抽运源,抽运由 PPLN 晶体和两镜驻波腔构成的倍频器,通过外腔谐振倍频过程,获得了中心波长分别位于 Rb 原子吸收线和光纤低损耗窗口的双色连续变量量子关联光场。实测 1560 nm 基频光的强度噪声压缩度达 1.5 dB,780 nm 倍频光的强度噪声压缩度达 1.2 dB,基频光与倍频光的量子关联为 1.2 dB。该双色连续变量量子关联光场产生系统可以为实现实用化的基于量子中继的长距离量子通信网络提供良好的量子资源。

## 参 考 文 献

- 1 R Horodecki, P Horodecki, M Horodecki, *et al.*. Quantum entanglement[J]. Rev Mod Phys, 2009, 81(2): 865-942.
- 2 S L Braunstein, P V Loock. Quantum information with continuous variables[J]. Rev Mod Phys, 2005, 77(2): 513-577.
- 3 N Gisin, R Thew. Quantum communication[J]. Nature Photonics, 2007, 1(3): 165-171.

- 4 T D Ladd, F Jelezko, R Laflamme, *et al.*. Quantum computers[J]. *Nature*, 2010, 464(7285): 45–53.
- 5 V Giovannetti, S Lloyd, L Maccone. Advances in quantum metrology[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 222–229.
- 6 Su Xiaolong, Jia Xiaojun, Xie Changde, *et al.*. Multipartite entangled optical fields with continuous variables and their applications in quantum computation[J]. *Physics*, 2010, 39(11): 746–752.  
苏晓龙, 贾晓军, 谢常德, 等. 连续变量多组分纠缠态光场及其在量子计算中的应用[J]. *物理*, 2010, 39(11): 746–752.
- 7 B Julsgaard, J Sherson, J I Cirac, *et al.*. Experimental demonstration of quantum memory for light[J]. *Nature*, 2004, 432(7016): 482–486.
- 8 C W Chou, H De Riedmatten, D Felinto, *et al.*. Measurement-induced entanglement for excitation stored in remote atomic ensembles [J]. *Nature*, 2005, 438(7069): 828–832.
- 9 T Chanelière, D N Matsukevich, S D Jenkins, *et al.*. Storage and retrieval of single photons transmitted between remote quantum memories[J]. *Nature*, 2005, 438(7069): 833–836.
- 10 M D Eisaman, A André, F Massou, *et al.*. Electromagnetically induced transparency with tunable single-photon pulses[J]. *Nature*, 2005, 438(7069): 837–841.
- 11 R J Horowicz. Quantum correlation between fundamental and second harmonic in SHG[J]. *Europhys Lett*, 1989, 10(6): 537–542.
- 12 P Lodahl. Einstein–Podolsky–Rosen correlations in second–harmonic generation[J]. *Phys Rev A*, 2003, 68(2): 023806.
- 13 U L Andersen, P Buchhave. Squeezing and entanglement in doubly resonant, type II, second–harmonic generation[J]. *J Opt Soc Am B*, 2003, 20(9): 1947–1958.
- 14 Luo Yu, Li Ying, Pan Qing, *et al.*. Experimental generation of entangled lights from resonating frequency doubler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 305–310.  
罗 玉, 李 莹, 潘 庆, 等. 利用谐振倍频产生纠缠光束[J]. *光学学报*, 2006, 26(2): 305–310.
- 15 Y M Li, S J Zhang, J L Liu, *et al.*. Quantum correlation between fundamental and second–harmonic fields via second–harmonic generation[J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(3): 660–663.
- 16 R Paschotta, M Collett, P Kurz, *et al.*. Bright squeezed light from a singly resonant frequenc doubler[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 72(24): 3807–3810.
- 17 H M Wiseman, M S Taubman, H A Bachor. Feedback-enhanced squeezing in second–harmonic generation[J]. *Phys Rev A*, 1995, 51(4): 3227–3233.

栏目编辑: 刘丰瑞