

利用准相位匹配光学参量振荡器获得 可调谐强度差压缩光*

李永民 吴迎瑞 张宽收† 彭堃堃

(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, 太原 030006)

(2002 年 5 月 7 日收到, 2002 年 9 月 18 日收到修改稿)

利用 $1.06\mu\text{m}$ 全固化单频 Nd:YVO₄ 激光器抽运由 PPLN 构建的三共振光学参量振荡器, 在光学参量振荡器近简并运转的情况下, 信号光和闲置光的波长相差约为 200nm, 观察到了信号光和闲置光的强度起伏的关联, 实测强度差噪声压缩度达 0.4dB. 在此基础上, 利用温度调谐了信号光和闲置光的波长, 在 17nm 的范围内都观察到信号光和闲置光的强度起伏的关联.

关键词: 准相位匹配, 光学参量振荡, 强度差噪声压缩

PACC: 4250

1. 引 言

准相位匹配晶体是近年来出现的一种新型非线性晶体^[1], 同常规的双折射匹配晶体相比, 它可以利用非线性晶体最大的有效非线性系数进行频率变换, 而且在晶体的整个透明区域内, 参量作用光波都可以获得非严格的相位匹配, 从而拓宽了频率变换的波长范围. 在量子光学应用方面, 同常规的双折射匹配材料相比, 利用准相位匹配材料可以在较低的抽运功率下获得光场量子起伏噪声的降低, 因而引起了人们的浓厚兴趣. 1995 年 Anderson 等^[2]和 Serkland 等^[3]分别利用脉冲激光单次穿过准相位匹配 KTP 波导和准相位匹配 LiNbO₃ 波导进行参量放大, 得到光场的正交位相分量压缩, 首次实现了利用准相位匹配材料得到光场量子起伏噪声的压缩. 随后, Serkland 等^[4]利用脉冲激光单次穿过准相位匹配 LiNbO₃ 波导, 同时获得了倍频光和基频光的压缩. 我们小组也利用准相位匹配 LiNbO₃ 三共振光学参量振荡器得到了反射抽运光的正交位相分量压缩^[5], 同时在理论上分析了存在周期极化误差的准相位匹配晶体对压缩态光场的影响^[6]. 据我们所知, 利用准相位匹配光学参量振荡器通过参量下转换获

得 $2\mu\text{m}$ 附近波段的强度差压缩光目前还没有文献报道.

由于许多化学气体在 $2\mu\text{m}$ 附近都有强的吸收, $2\mu\text{m}$ 激光可广泛应用于微量化学气体的检测、环境保护与监测^[7]. 同时 $2\mu\text{m}$ 附近波长光对于人眼属于安全光, 被广泛应用于医学上^[8]. 在本文中, 我们利用运转于阈值以上的近简并准相位匹配 LiNbO₃ 三共振光学参量振荡器, 得到了 $2\mu\text{m}$ 附近波段可调谐信号光和闲置光的强度差压缩, 实测压缩度为 0.4dB.

2. 实验过程与结果

实验装置如图 1 示: 我们采用全固化单频 Nd:YVO₄ 激光器作为抽运源, 输出波长为 $1.06\mu\text{m}$, 输出功率为 600mW. 利用了一个 40dB 隔离器来防止驻波腔光学参量振荡(OPO)的反射对激光器的干扰. 在抽运光聚焦到晶体的中心之前, 利用 $\lambda/2$ 波片旋转其偏振方向为垂直方向. OPO 腔为由两个曲率均为 30mm 的曲面镜构成的线性驻波腔. 输入耦合镜对抽运光($1.06\mu\text{m}$)的反射率为 87%, 对下转换光的反射率为高反, 输出耦合镜对抽运光的反射率为 99.8%, 对下转换光的反射率为高反. 为了降低阈值抽运功率, OPO 腔型采用近共心结构, 有效腔长为

* 国家自然科学基金(批准号 69938010)和山西省留学回国人员基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

58mm 理论计算,在此腔型结构中抽运光和信号光的腰斑分别为 $40.60\mu\text{m}$,对应的 Bond-Kleinman 聚焦参量 $\xi = 2.1$ (最佳聚焦参量 $\xi = 2.84$).所用的 PPLN 晶体尺寸为 $0.5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 20\text{mm}$,PPLN 晶体采用 I 类相位匹配 ($e - e + e$),共有 15 个光学通道,极化周期分别为从 28.2 到 $31\mu\text{m}$,在一定的温度下,利用不同的通道,可以方便地得到比较大的调谐,在实验中我们采用极化周期为 $31\mu\text{m}$ 的通道(简并温度点

176°C),晶体两端镀以对 $1.06, 1.8\text{--}2.5\mu\text{m}$ 减反膜,剩余反射率均小于 0.6% .由于三共振 OPO 对于外界的扰动非常敏感,所以我们将整个腔固定在一块殷钢板上,并用有机玻璃罩密封起来,以减弱外界的扰动,同时我们以 7kHz 的正弦信号调制 OPO 腔长,利用锁相技术与信号光的光强获得误差信号,经高压放大器放大后驱动 OPO 腔的压电陶瓷,将 OPO 的腔长锁定到下转换的透射峰上.

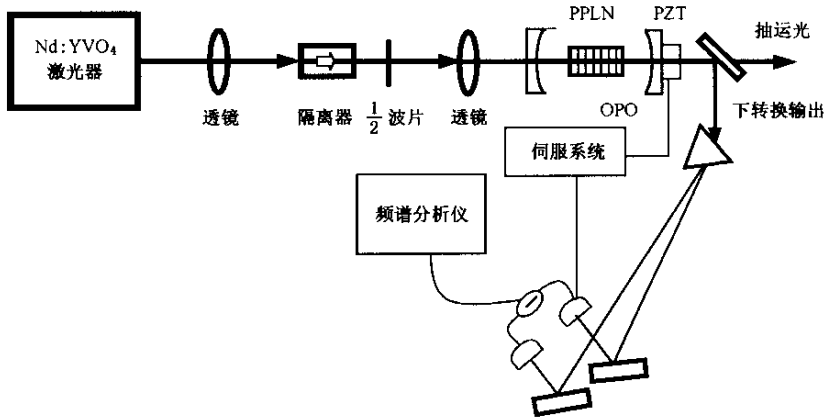


图1 实验装置 PZT代表压电陶瓷

在实验中,我们将晶体置于控温炉中,控温仪精度为 0.01°C ,由于 PPLN 晶体匹配方式为 I 类匹配,信号光和闲置光的偏振简并和 II 类匹配方式不同,无法利用下转换光的偏振特性来分开信号光和闲置光,只能利用下转换光的频率非简并特性^[9]来分开它们.实验中我们通过调节晶体的温度来改变信号光和闲置光的波长,使得信号光和闲置光波长分别位于 2011 和 2260nm 附近.在 OPO 腔后加一双色镜使得抽运光与下转换光分开.利用一色散棱镜(成分 SiO_2 ,入射面与出射面均镀 $1.9\text{--}2.4\mu\text{m}$ 的增透膜)在约 1m 远距离的地方将信号光和闲置光分开 4mm ,利用两个反射镜分别将信号光与闲置光反射到两个探测器上(J23-18I-R01M-2.6,光敏面直径为 1mm ,在波长为 $2.25\mu\text{m}$ 处量子效率 66%),入射到探测器上的光束直径大小为 $470\mu\text{m}$.探测器输出的光电流分别经过低噪声放大器放大(CLC425),接着把放大后的信号相减(Minicircuit ZCSJ-2-1,共模抑制比为 20dB),然后送入射频频谱分析仪对信号的频谱进行观察.

图2是在频率为 1.5MHz 处测量到的信号光和闲置光的强度差起伏功率和相应的散粒噪声功率,OPO 的阈值,抽运功率和下转换输出分别为 9 ,

17 和 2.2mW .从图2中可以看出信号光和闲置光的强度差起伏功率较散粒噪声功率降低了大约 0.4dB ,其中散粒噪声基准由以下方式给出: $1.06\mu\text{m}$ 抽运激光入射到探测器上,使得探测器的直流输出等于测量 OPO 下转换光时的直流输出,再把探测器输出的光电流信号相减得到(如图3).图2的测量是在波长为 2011 和 2260nm 处测量的,通过改变 PPLN 晶体的温度来调谐 OPO 的输出波长,在 2011 和 2260nm 附近 17nm 的范围内都观察到了强度差的压缩.

3. 实验结果分析

我们知道压缩态光场在产生和测量过程中的任何损耗,都会使真空起伏引入,导致实际测量的噪声起伏高于理论上的噪声起伏.我们实验装置输出的强度差噪声谱可由下式来具体描述^[10,11]:

$$R(f) = 1 - \eta_D \eta_{OC} \frac{1}{1 + (f/f_c)^2}, \quad (1)$$

式中 $R(f)$ 为归一化的强度差噪声功率, η_D 为探测效率, η_{OC} 为 OPO 腔的耦合输出效率, f 为分析频率, f_c 为腔的带宽.从(1)式可以看到,在零频处,压缩最

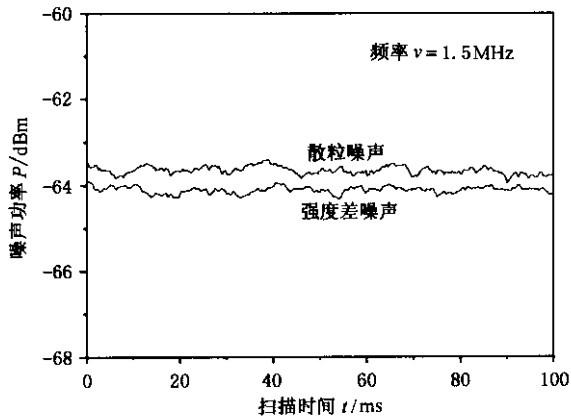


图2 在频率为 1.5MHz 处观察到的强度差噪声和散粒噪声 分辨率带宽为 100kHz, 视频带宽为 30Hz

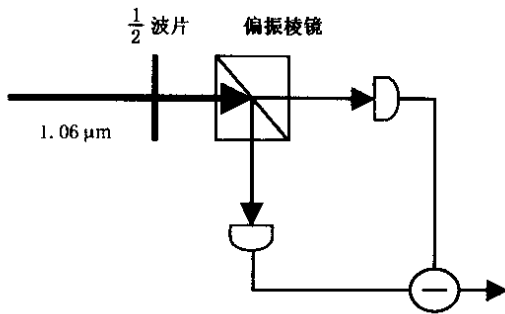


图3 测量散粒噪声的实验装置图

大,其压缩度由探测效率和 OPO 腔的耦合输出效率决定,对于理想情况: $\eta_D = 1$, $\eta_{OC} = 1$,压缩度为无穷大: $R(f) = 0$.在实际情况下,由于光场在低频处的经典噪声非常大,无法在低频处进行测量,所以通常把测量的频率范围选在 2MHz 左右.同时探测器的效率总是低于 1 的,OPO 腔也总是存在内腔损耗,

使得 $\eta_D < 1$ 和 $\eta_{OC} < 1$,导致实际测量到的压缩度总是有限值.

在我们的实验装置中,探测器的效率为 66%,探测光路的效率为 85%,总的探测效率为: $\eta_D = 56%$.OPO 腔的耦合输出效率 $\eta_{OC} = 17%$,腔的带宽为 51MHz,分析频率为 1.5MHz,由(1)式可得: $R(f) = 0.908$,换算成 dB 单位:0.42dB,与我们实验中观测到的 0.4dB 符合得很好.

4. 结 论

我们利用 1.06 μm 全固化单频 Nd:YVO₄ 激光器抽运由 PPLN 构建的三共振光学参量振荡器,在 OPO 近简并运转的情况下:信号光和闲置光的波长相差约为 200nm,观察到了信号光和闲置光的强度起伏的关联,实测强度差压缩度达 0.4dB.在此基础上,我们利用温度调谐信号光和闲置光的波长,在 17nm 的范围内都观察到信号光和闲置光的强度起伏的关联.值得指出的是,我们实验中得到的压缩度比较低,主要有两个原因:1)目前在 2 μm 波段光电探测器的效率受制造技术和工艺的限制,光电转换效率比较低;2)OPO 的腔镜镀膜没有达到最优化:对于信号光和闲置光而言,输出耦合镜的透射率比较小,输入耦合镜存在不应有的透射,这些都导致 OPO 耦合输出效率很低,限制了测量到的压缩度.如果我们优化 OPO 的腔镜镀膜,提高 OPO 耦合输出效率为 80%,同时随着制造技术和工艺的改进和提高,探测器的效率能够达到 90%,通过该装置我们就可以高效率地得到 5.5dB 以上的可调谐强度差压缩光场.

- [1] Myers L E, Eckardt R C, Fejer M M *et al* 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2102
- [2] Anderson M E, Beck M, Raymer M G and Bielein J D 1995 *Opt. Lett.* **20** 620
- [3] Serkland D K, Fejer M M, Byer R L and Yamamoto Y 1995 *Opt. Lett.* **20** 1649
- [4] Serkland D K, Kumar P, Arbore M A and Fejer M M 1997 *Opt. Lett.* **22** 1497
- [5] Li Y M, Fan Q Y, Zhang K S, Xie C D and Peng K C 2001 *Acta Phys. Sin.* **52** 1492 (in Chinese) 李永民、樊巧云、张宽收、谢常

德、彭堃堃 2001 物理学报 **52** 1492]

- [6] Li Y M, Wu Y R, Zhang K S, Xie C D and Peng K C 2002 *Chin. Phys.* **11** 790
- [7] Mihalcea R M, Baer D S *et al* 1998 *Appl. Opt.* **37** 8341
- [8] Bruneall D, Delmonte S and Pelon J 1998 *Appl. Opt.* **37** 8406
- [9] Nabors C D and Shelby R M 1990 *Phys. Rev. A* **42** 556
- [10] Lane A S, Reid M D and Walls D F 1988 *Phys. Rev. A* **37** 4229
- [11] Fabre C, Giacobino E, Heiddmann A and Reynaud S 1989 *J. Phys. (Paris)* **50** 1209

Generation of tunable intensity difference squeezing light from a quasi-phase-matched OPO^{*}

Li Yong-Min Wu Ying-Rui Zhang Kuan-Shou Peng Kun-Chi

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

(Received 7 May 2002 ; revised manuscript received 18 September 2002)

Abstract

A 1.06 μm all-solid-state single frequency Nd:YVO₄ laser was explored to pump a triply resonant optical parametric oscillator (OPO) based on the periodically poled lithium niobate. When the OPO operated near degeneracy , the amplitude fluctuation correlation of the signal and idler modes was observed as their wavelengths were separated about 200nm. The measured squeezing is 0.4dB. The amplitude fluctuation correlation existed in a range of 17nm as we tuned the wavelengths of the signal and idler by change the crystal temperature.

Keywords : quasi-phase-matched , optical parameter oscillator , intensity difference squeezing

PACC : 4250

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69938010) and by the Foundation for Returned Scholars of Shanxi Province , China.