

文章编号: 1007-6654(2013)01-0001-05

利用自制的单频激光器获得近通讯波段正交振幅压缩态光场

邬志强, 周海军, 王雅君, 郑耀辉[†]

(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: 利用自制的 $1.34 \mu\text{m}$ 和 $0.67 \mu\text{m}$ 双波长输出单频激光器作为泵浦源, 泵浦基于 PPKTP 晶体的光学参量放大器, 通过边带锁频技术将光学参量放大腔腔长锁定在激光频率上, 将泵浦光和信号光相对相位锁定在 π 相位, 经参量缩小过程获得低于散粒噪声极限约 3 dB 的正交振幅压缩光。压缩光位于光纤通信窗口—— $1.3 \mu\text{m}$ 波段。

关键词: 通讯波段; 光学参量振荡; 正交振幅压缩光

中图分类号: O431 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/ASQO20131901.0001

0 引言

压缩态光场是一种量子噪声突破了标准量子噪声极限的重要的非经典光场, 关于压缩态的理论研究最早可追溯到 20 世纪 20 年代^[1]。然而, 受实验技术等限制, 关于压缩光的研究及应用直到 20 世纪 80 年代以后才广泛开展起来。由于压缩光具有良好的噪声特性, 在引力波探测等微弱信号探测中能显著提高测量灵敏度。同时, 压缩光也能应用在量子信息科学研究中, 两束压缩光可以构建纠缠光, 用来演示量子离物传态和量子密钥分发等量子光学原理性实验, 以及构建量子信息网络^[2,3]。

连续变量光学参量放大器是一种获得压缩光的有效方法, 自从 1985 年, 实验上首次获得压缩态光场以来^[4], 关于压缩光的实验研究深入开展起来。特别是近几年以来由于激光技术的发展和实验技术的改进, 压缩度获得显著提高。2007 年, 日本东京大学通过改善相位锁定的稳定性和

减小内腔损耗, 获得低于散粒噪声极限 9 dB 的正交压缩光^[4]。德国马普实验室通过技术改进分别获得波长为 1 064 nm 的 10 dB 压缩光和波长为 1550 nm 的 12.3 dB 压缩光, 为目前国际上最高压缩度^[5,6]。为了满足不同领域的应用需求, 最近关于压缩态的研究热点集中在与原子吸收波段和通信波段上^[7-9]。一些实验小组已经成功制备了与铷原子、铯原子对应及位于 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的压缩态光场。而对于另一个光纤通信的重要窗口—— $1.3 \mu\text{m}$ 波段压缩态光场的制备研究工作较少。

本文通过自制的 $1.34 \mu\text{m}$ 和 $0.67 \mu\text{m}$ 双波长输出单频激光器作为泵浦源, 泵浦基于 PPKTP 晶体的光学参量放大器, 通过参量下转换过程获得低于散粒噪声极限约 3 dB 的正交振幅压缩光。压缩光位于光纤通信窗口—— $1.3 \mu\text{m}$ 波段, 具有重要的应用前景。

收稿日期: 2012-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61008001); 山西省自然科学基金(2011021003-2)

作者简介: 邬志强(1987—), 男, 四川巴中人, 研究领域: 量子光学。E-mail: 461549919@qq.com

[†] 通讯作者: E-mail: yhzhen@sxu.edu.cn

1 实验装置

正交振幅压缩光产生的实验装置如图 1 所示。泵浦源采用我们自行研制的 $1.34 \mu\text{m}$ 和 $0.67 \mu\text{m}$ 双波长输出单频激光器^[10]。

光的作用是光学参量放大器的泵浦光。 $1.34 \mu\text{m}$ 光有三个功能:作为光学参量放大腔的注入信号光,作为光学参量放大腔锁定的参考光,作为平衡零拍探测的本底振荡光。

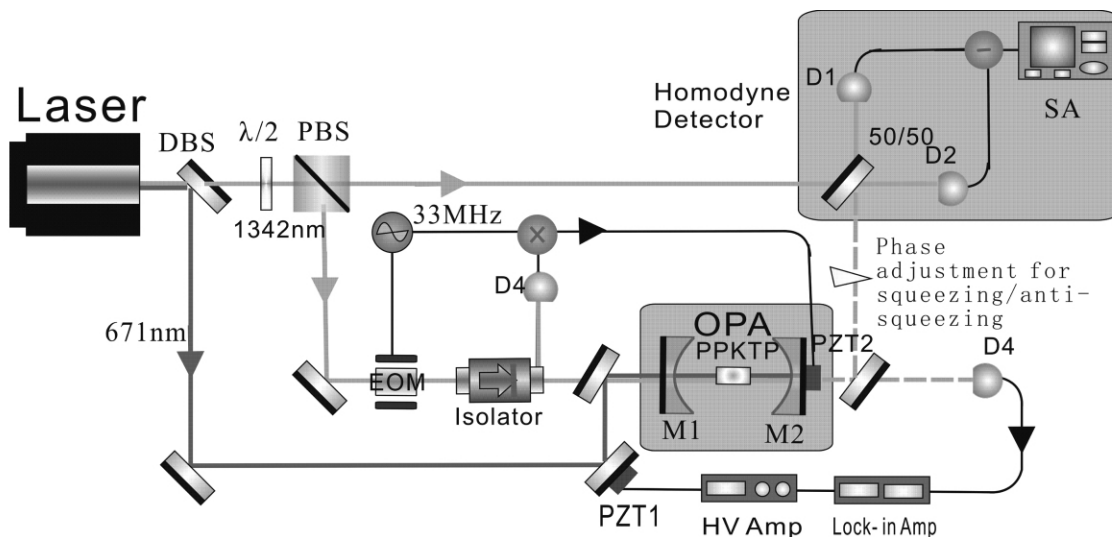


图 1 正交振幅压缩光制备的实验装置图

DBS: dichroic beam splitter; PBS: polarization beam splitter; EOM: electro-optic modulator;

D: detector; SA: spectrum analyzer; PZT: piezoelectric ceramic

Fig. 1 The experimental setup of generating the quadrature amplitude squeezing state

光学参量放大腔采用近共心驻波腔结构,便于减小非线性晶体处的腰斑,改善非线性相互作用的效率。两个腔镜均为曲率半径为 50 mm 的平面镜,其中输入镜对信号光的反射率大于约 99.5% ,对泵浦光高透;输出镜对泵浦光的反射率大于 99.5% ,对信号光的反射率为 95% 。它被装载在压电陶瓷上用于接收 PID 电路反馈的误差信号。非线性晶体选取以色列 Raicol 公司生产的准位相匹配 PPKTP 晶体,尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,极化周期为 $17.575 \mu\text{m}$,晶体两端均镀 1342 nm 与 671 nm 双色减反膜,晶体用铝箔包裹后放置在紫铜夹具中,用自制的温度控制仪进行精确控温到工作温度 40 摄氏度。

实验中采用频率边带调制技术 (PDH) 将光学参量放大腔锁定到激光器的频率上^[11]。信号发生器产生频率为 33 MHz 的调制信号,用功率分束器分为两路,一路经过功率放大器放大后加到相位调制器上,另一路进入混频器,作为混频的本底信号。本底信号与光学参量放大腔的反

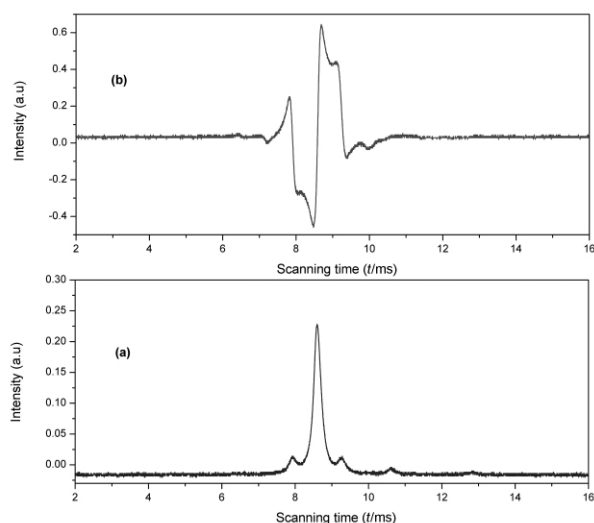
射信号在混频器混频后得到锁定光学参量放大腔的误差信号。激光器输出的基频光经过一组波片棱镜系统分成两束,其中一束经隔离器 (OFR 公司的 IO-4-1342-HP 型) 后耦合进光学参量放大腔,用作光学参量放大腔的注入信号光束,另一束经与光束参量放大腔输出的光束干涉,作为平衡零拍测量过程的本底振荡光。隔离器用来防止光学参量放大腔的反馈光影响激光器的稳定运转,也用来提取光学参量放大器的反射光,获得误差信号。激光器输出的倍频光经隔离器 (OFR 公司的 IO-4-671-HP 型) 后耦合进光学参量放大腔,用作光学参量放大腔的泵浦光束。

光学参量放大腔参量缩小状态是指进入光学参量放大腔的泵浦光和注入信号光的相对相位出于反位相状态。锁定基本原理为信号光与参量下转换产生的下转换光子相互干涉。干涉条纹的极大值对应 0 位相差,干涉条纹的极小值对应 π 位相差,干涉条纹的中间值对应 $\pi/2$ 位相

差。对于干涉极大和极小,其微分信号位于零点。因此,对于 π 位相差的锁定可以用其微分信号作为反馈信号。在实验中,反馈信号通过光学参量放大腔的透射信号在锁相放大器中与锁相放大器的本底信号混频得到。

2 实验过程与结果

实验中,我们首先将探针光注入光学参量放大腔中,扫描光学参量放大腔,通过观察光学参量放大腔的透射峰曲线来决定光学参量放大腔的匹配状态,匹配结果如图 2(a)所示。实验中,实测光学参量放大腔的精细度为约为 60。将光学参量放大腔的反射信号经隔离器取出后与信号源混频得到误差信号,仔细调节信号源的频率、幅度,以及信号的相位延迟得到的误差信号如图 2(b)所示。用此误差信号就可以将光学参量放大腔锁定到激光的频率上。



曲线 a 为透射信号,曲线 b 为误差信号

图 2 光学参量放大腔的透射信号和锁定光学参量放大腔的误差信号

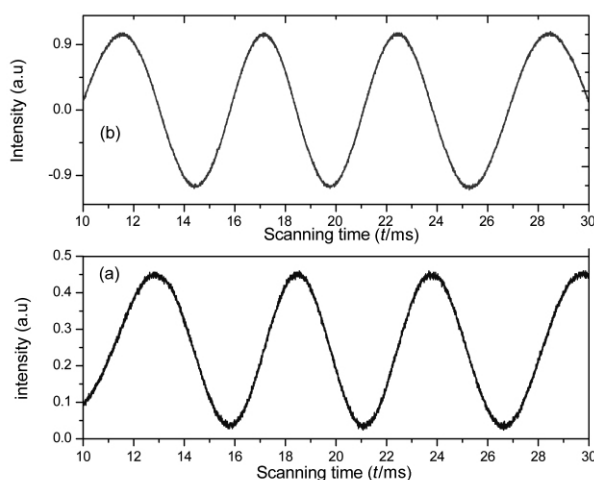
curve a stands for the transmission signal,
curve b stands for the error signal

Fig. 2 Optical signal transmission and error signal of optical parameter amplifier

实验过程的另一个重要环节是光学参量放大腔经典增益的调节。将泵浦光和信号光同时注入光学参量放大腔,扫描泵浦光和信号光的相

对相位,观察信号光的透射信号,可以看到信号光的透射峰曲线随两束光的相对相位变化而呈现有规律的跳变,此跳变的最大值与无泵浦光注入时的透射峰之比即为光学参量放大腔的经典增益。通过调节两束光的重合和扫描非线性晶体 PPKTP 的温度,观察到在最佳匹配下 OPO 腔的阈值为 140 mW。减小泵浦光的功率,当经典增益约为 10 倍时,泵浦光的功率约 110 mW。

将光学参量放大腔锁定到激光的频率上,扫描泵浦光和信号光的相对相位,得到如图 3(a)所示的透射信号。此透射信号经锁相放大器微分后得到如图 3(b)所示的误差信号。用此误差信号反馈到扫描两束光相对相位的压电陶瓷,就可以将两束光的相对相位锁定到 0 和 π 相位上。



曲线 a 为透射信号,曲线 b 为误差信号

图 3 锁定光学参量放大腔后,扫描泵浦光与信号光相对相位获得的透射信号和反位相锁定误差信号

curve a stands for the transmission signal,
curve b stands for the error signal

Fig. 3 Optical transmission signal and error signal of scanning the relative phase between the pump light and the signal light, after locking the optical parameter amplifier

将光学参量放大腔输出的信号光与本底振荡光在两个偏振分束棱镜和一个半波片组成的 50/50 分束器上干涉。实验中,实测两束光的干涉度为 97%。用平衡零拍法测量输出光的压缩度。挡住本底振荡光得到散粒噪声基准(SNL)

如图 4(a) 所示。然后扫描信号光和本底振荡光的相对相位, 得到扫描状态下的噪声曲线如图 4(b) 所示(频谱仪的分析频率是 2 MHz, RBW 是 30 kHz, VBW 是 100 Hz)。从图中可以读出, 压缩光的压缩噪声较散粒噪声极限低 $3 \text{ dB} \pm 0.2 \text{ dB}$, 反压缩噪声较散粒噪声极限高 7.5 dB

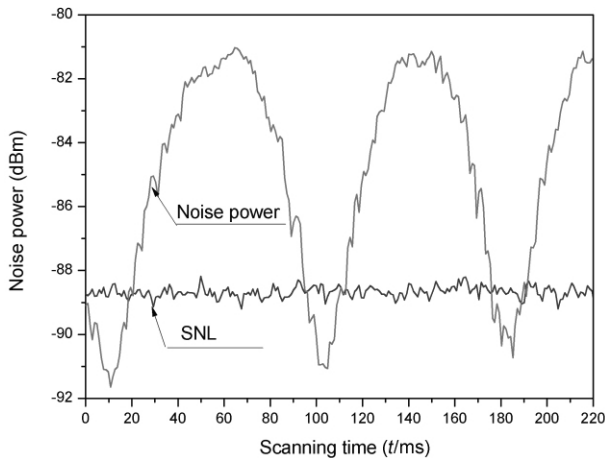


图 4 在分析频率为 2 MHz 时, 正交振幅压缩光的噪声功率

Fig. 4 The noise powers of the amplitude squeezed light at a sideband of 2 MHz, when sweeping the local oscillation phase. The measurement parameter of SA: resolution band width is 30 kHz, video band width is 100 Hz.

参考文献:

- [1] DODONOV V V. 'Nonclassical' States in Quantum Optics: a 'Squeezed' Review of the First 75 Years [J]. *J Opt B: Quantum Semiclass*, 2002, **4**: R1-R33.
- [2] BRAUNSTEIN S L, VAN LOOCK P. Quantum Information with Continuous Variables [J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**: 513-577.
- [3] AKAMATSU D, AKIBA K, KOZUMA M. Electromagnetically Induced Transparency with Squeezed Vacuum [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **92**: 203602.
- [4] SLUSHER R E, HOLLBERG L W, YURKE B, *et al.* Observation of Squeezed States Generated by Four-Wave Mixing in an Optical Cavity [J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**: 2409-2412.
- [5] TAKENO Y, YUKAWA M, YONEZAWA H, *et al.* Observation of 9 dB Quadrature Squeezing with Improvement of Phase Stability in Homodyne Measurement [J]. *Optics Express*, 2007, **15**: 4321-4327.
- [6] VAHLBRUCH H, MEHMET M, CHELKOWSKI S, *et al.* Observation of Squeezed Light with 10-dB Quantum-noise Reduction [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**: 033602.
- [7] TANIMURA T, AKAMATSU D, YOKOI Y, *et al.* Generation of a Squeezed Vacuum Resonant on a Rubidium D1 Line with Periodically Poled KTiOPO₄ [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**: 2344-2346.
- [8] FENG J X, TIAN X T, LI Y M, *et al.* Generation of a Squeezing Vacuum at a Telecommunication Wavelength with

3 结论

我们利用自行研制的单频激光器作为光学参量放大器的泵浦源, 选用对基频光有一定透射率的输出镜, 同时获得基频光和倍频光双波长输出。基频光 $1.34 \mu\text{m}$ 的输出功率为 850 mW, 倍频光 $0.67 \mu\text{m}$ 的输出功率为 2.8 W。用此激光器泵浦光学参量放大器通过光学参量过程获得压缩光输出, 倍频光作为光学参量放大器的泵浦光, 基频光作为光学参量放大器的注入信号光和平衡零拍探测的本底振荡光。通过边带锁频技术将 OPA 腔腔长锁定在激光频率上, 将泵浦光和信号光相对相位锁定在 π 相位, 经参量缩小过程获得低于散粒噪声极限约 3 dB 的正交振幅压缩光。压缩光位于光纤通信窗口—— $1.3 \mu\text{m}$ 波段。

由于该波段位于光纤通信窗口, 较 $1.5 \mu\text{m}$ 波段相比, 更容易获得实用化的固体激光器作为泵浦源, 将为实用化的量子信息网络研究展现了广阔的前景。

- Periodically Poled LiNbO₃ [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**: 221102.
- [9] MEHMET M, STEINLECHNER S, EBERLE T, *et al.* Observation of CW Squeezed Light at 1550 nm [J]. *Opt Lett*, 2009, **34**: 1060-1062.
- [10] ZHENG Y H, WANG Y J, XIE C D, *et al.* Single-frequency Nd:YVO₄ Laser at 671 nm with High Output Power of 2.8 W [J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 2012, **48**: 67-72.
- [11] BLACK E D. An Introduction to Pound-Drever-Hall Laser Frequency Stabilization [J]. *Am J Phys*, 2001, **69**(1): 79.

Generation of Bright Amplitude Squeezed-light at 1.3 μm by Using a Home-made All-solid-state Laser as Pump Source

WU Zhi-qiang, ZHOU Hai-jun, WANG Ya-jun, ZHENG Yao-hui

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

Abstract: We present a generation system of CW bright squeezed-light at telecommunication wavelength of 1.3 μm , in which a single-frequency Nd:YVO₄ laser with dual wavelength outputs (including 1.34 μm and 0.67 μm) is used for the pump source of an optical parametric amplifier (OPA) based on PPKTP crystal. The OPA cavity length is locked via PDH technique. The relative phase between the pump and signal beams is 180-degree. Through a subthreshold parametric frequency down-conversion process in the OPA, the bright squeezed light of 3 dB \pm 0.1 dB below the shot noise limit (SNL) at 1342 nm is experimental measured, which is located at the fiber winders.

Key words: quantum communication window; optical parametric oscillator cavity; quadrature amplitude squeezing state