

利用周期性极化 KTiOPO_4 晶体参量缩小过程 产生明亮振幅压缩光*

马红亮 卫 栋 叶晨光 张 靖† 彭 壻

(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)

(2004 年 11 月 8 日收到,2005 年 1 月 25 日收到修改稿)

利用周期性极化 KTiOPO_4 晶体构成的连续准相位匹配简并光学参量缩小谐振腔,获得了注入红外的明亮正交振幅压缩光.参量振荡阈值为 35 mW.当抽运光功率为 20 mW 时,测得压缩度为 2.23 dB.特别是当抽运光功率为 8 mW 时,测得压缩度为 2.17 dB.

关键词:准相位匹配,简并光学参量放大器,明亮振幅压缩光

PACC:4250,4265

1. 引 言

压缩态光场^[1]是一类重要的非经典光场.两单模压缩态通过分束器可构成纠缠源.纠缠源^[2]作为量子信息的核心,可以完成量子离物传态(quantum teleportation)^[3,4],量子密集编码(quantum dense coding)^[5-8]和量子保密通信(quantum cryptography)^[9]等.目前产生压缩态和纠缠源的光学参量过程大多采用传统的相位匹配晶体,如 KTiOPO_4 , LiNbO_3 和 KNbO_3 .由于受相位匹配条件限制,这些晶体适用的波长范围窄,且不能利用晶体的最大非线性系数.

近年发展起来的一类新型频率转换晶体,周期性极化 LiNbO_3 , LiTaO_3 和 KTiOPO_4 ^[10]等,通过非线性光学系数的周期变化,弥补色散引起的相位差,实现相互作用波长的准相位匹配.这种技术可以利用晶体的最大非线性系数,并且可以避免晶体走离效应的限制.原则上,在晶体透明波段的任何波长都可通过这种技术实现参量相互作用.周期性极化 KTiOPO_4 晶体与周期性极化 LiNbO_3 和 LiTaO_3 晶体相比,优点是室温运转且没有光折变现象;与传统的相位匹配晶体 KTiOPO_4 , LiNbO_3 和 KNbO_3 晶体相比,

优点是适用波长范围宽 0.35—4.5 μm 、匹配温度带宽为 6.5 $^\circ\text{C}$ ^[11]以及室温运转.对 1064 nm 波长,在其他参数相同的情况下,10 mm 周期性极化 KTiOPO_4 晶体的单次通过转换系数是 5 mm KTiOPO_4 晶体(长度受走离效应限制)的 3 倍多.

用周期性极化晶体通过准相位匹配产生连续压缩光已有一些报道.2001 年,周期性极化 LiNbO_3 晶体构成的三共振光学参量振荡器获得了 1.5 dB 的反射抽运场压缩^[12],国内报道了 1.1 dB 的压缩^[13];2002 年,周期性极化 LiNbO_3 晶体单共振二次谐波过程产生了近 0.6 dB 的谐波压缩^[14],同年,周期性极化 KTiOPO_4 晶体单共振二次谐波过程也产生了近 0.6 dB 的谐波压缩^[15].目前尚未见有周期性极化 KTiOPO_4 晶体参量下转换过程产生连续压缩光的实验报道.

注入信号光共振、抽运光不共振的简并光学参量放大器(degenerate optical parameter amplifier,简记为 DOPA)易于腔锁定和长期稳定运行.我们利用周期性极化 KTiOPO_4 晶体构成的该装置,在 532 nm 抽运光功率 20 mW 时,得到了 300 μW 的基波正交振幅压缩光,实测压缩度为 2.23 dB.特别是在晶体温度保持不变、同样的注入光功率、抽运光功率在 8—20 mW 之间变化时,我们测到压缩度变化不大.与以往

* 国家重点基础研究发展规划(批准号 2001CB309304)、国家自然科学基金(批准号 60178012)、教育部新世纪优秀人才支持计划和山西省青年科学基金(批准号 20021014,20031005)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn

的装置^[4,16,17]相比,我们的装置主要优点是抽运光功率低,这样可以小型化压缩光源,进而建成结构紧凑的纠缠光源,用于量子通信方面的实验研究。

2. 实验装置和实验结果

实验装置如图 1 所示.激光器是我们自行研制的激光二极管抽运全固体化连续单频环形 Nd:YVO₄-KTiOPO₄ 532 nm 绿光激光器,808 nm 抽运光功率为 2.5 W,绿光输出功率为 220 mW,偏振方向与垂直方向的夹角为 45°,5 h 长期功率稳定性小于 ±1%;可同时输出 1064 nm 红外 20 mW.输出绿光和红外光经绿光高透、红外高反的平面镜片后分开.透

射绿光先经过一个焦距为 300 mm 的平凸透镜准直为近似平行光,然后经过半波片和偏振棱镜组成的分束器控制进入 DOPA 腔的功率,其后的半波片调整偏振为垂直方向.反射的红外光先经过起相同作用的 450 mm 平凸透镜,然后经过半波片和电光调制器(EOM)实现相位调制.半波片、偏振棱镜、法拉第旋转器组成的光隔离器用来防止 DOPA 腔反射的红外光影响激光器的稳定运转,同时可调节进入 DOPA 腔的功率大小.红外光在经过调整偏振为垂直方向的半波片后,与绿光一同进入谐振腔.腔前焦距 90 mm 的凸透镜完成绿光及红外的模式匹配.实验装置中,为了匹配效果更好,红外光路隔离器和透镜 L₃ 之间加有一 1.1 m 焦距的平凸透镜.

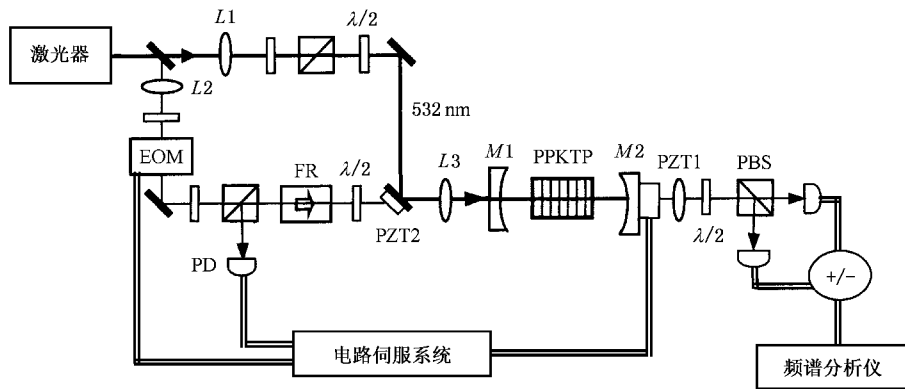


图 1 用周期性极化 KTiOPO₄(PPKTP)晶体产生振幅压缩光的实验装置图 L₁,L₂,L₃为透镜,PZT₁,PZT₂为压电陶瓷,M₁,M₂为腔镜,λ/2为半波片;EOM为电光调制器;FR为法拉第旋转器;PD为光电探测器;PBS为偏振分光棱镜

DOPA 腔输入镜 M₁ 的凹面对 1064 nm 高反,反射率为 99.9%,平面对 532 nm 增透,整个镜片对 532 nm 的透射率为 70%,曲率半径为 30 mm.输出镜 M₂ 的凹面对 1064 nm 的反射率为 96.7%,对 532 nm 高反,平面对 1064 nm 增透,曲率半径为 30 mm.腔内周期性极化 KTiOPO₄ 晶体长×宽×厚的尺寸为 12 mm×2 mm×1 mm,两端面都镀有 1064 和 532 nm 的双色增透膜.这样两腔镜和晶体就形成了基频光共振、抽运光双次穿过的 DOPA 腔.周期性极化 KTiOPO₄ 晶体的电场极化周期为 9.00 μm,利用了 KTiOPO₄ 的最大非线性系数 d₃₃,有效非线性系数为 (2/π)d₃₃≈9.5 pm/V^[18],要求基频光和抽运光的偏振方向均与厚度方向(折射率椭球 z 轴)一致.晶体被置于紫铜块之中,紫铜块固定在装有半导体制冷块的金属支架上,通过反馈控温电路控制其温度,控温精度为 0.005 °C.由于谐振腔透射输出的红外光有较大发散角,所

以用紧靠输出镜镀有 1064 nm 增透膜的 f=148 mm 透镜准直为近似平行光.利用自平衡零拍探测装置测量激光的振幅噪声:用半波片和偏振分光棱镜将红外光分为等功率的两束,分别经过 f=75 mm 的聚焦透镜后进入 ETX 500T(InGaAs)光电二极管,输出光电流的交流部分经过射频放大和加减法器后,送到谱仪记录噪声功率谱.加电流相应于所探测光的正交振幅噪声,减电流相应于所探测光的散粒噪声基准.

我们采用标准的边带锁腔技术^[19]实现谐振腔与注入红外光的共振.EOM 上的调制频率为 20 MHz,谐振腔反射的红外光经隔离器与注入光分离后进入光电探测器 PD,探测器输出的交流信号经过锁腔电路伺服系统后,加到腔镜的压电陶瓷 PZT₁ 上.这样,利用反馈回路产生的纠偏电压,将谐振腔腔长锁定在注入红外光频率上.

实测不加晶体时谐振腔的精细度为 172, 加上晶体后为 148.2, 由此推算 DOPA 腔的内腔损耗约为 0.94%. DOPA 腔长为 59.2 mm (估算晶体中腰斑半径约为 $55 \mu\text{m}$), 晶体温度为 $31.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 我们测得光学参量振荡 (OPO) 阈值为 35 mW. 由上述参数估算出 DOPA 腔线宽约为 14.6 MHz. 当聚焦因子^[20]取 $h = 1$, 理论上计算得晶体的单次通过转换系数为^[18] $E_{\text{NL}} = 1.55\%/W$, 是通常所用角度相位匹配 5 mm KTiOPO_4 晶体的 3.7 倍. 取相同聚焦因子, 理论计算^[16]的 OPO 阈值为 29 mW, 与实验值基本相符.

实验中, 通过调节抽运光路中导光镜后的压电陶瓷 PZT2, 实现抽运光和注入光相对相位的变化. 当相对相位取参量放大时, 输出为正交相位压缩光, 取参量缩小时, 输出为正交振幅压缩光. 自平衡零拍探测装置只能进行正交振幅压缩的测量, 所以我们的实验取参量缩小状态. 当晶体温度为 $31.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、抽运光功率为 20 mW、1064 nm 注入功率为 10 mW 时, 基波透射功率由不加抽运光时的 $700 \mu\text{W}$ 缩小为 $300 \mu\text{W}$ (由于红外光从高反射率腔镜一端注入, 所以经腔后透射出的功率与注入功率相比很低), 在 2 MHz 频率处我们测得压缩度为 2.23 dB, 所得结果见图 2. 由于透射光功率很低, 电子学噪声 (低于散粒噪声约 8.2 dB) 不能忽略, 考虑后压缩度为 2.78 dB.

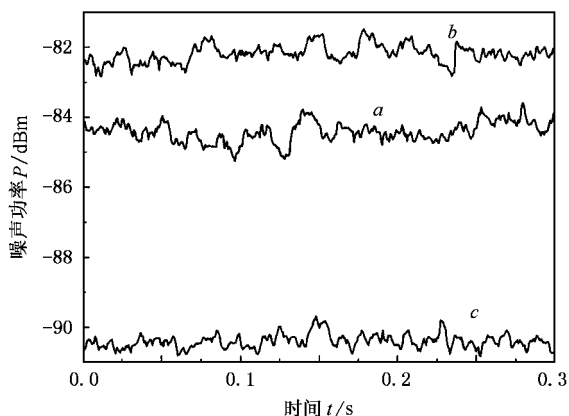


图 2 在 2 MHz 频率处观察到的基波正交振幅噪声 (曲线 a)、相应的散粒噪声 (曲线 b) 及电子学噪声 (曲线 c). 曲线 a 较之曲线 b 降低了 2.23 dB. 谱仪分辨率带宽 30 kHz, 视频带宽 30 Hz

考虑到 DOPA 腔后 $\eta_1 = 90\%$ 的光路传输效率和 $\eta_2 = 93\%$ 的探测器量子效率, 谐振腔输出处振幅压缩光的噪声 V_{sq} 可利用下式^[16]计算:

$$V_{\text{sq}} = \frac{V_{\text{sq det}} - 1 + \eta}{\eta}, \quad (1)$$

式中, $\eta = \eta_1 \times \eta_2$ 为总探测效率, $V_{\text{sq det}}$ 为探测器探测到的噪声. 由此可推算谐振腔输出处压缩光的实际压缩度为 3.62 dB.

特别是在 8 mW 抽运光功率和 10 mW 注入光功率时, 我们测得的压缩度为 2.17 dB, 考虑了电子学噪声和总探测效率后压缩度为 3.35 dB. 当注入光功率不变, 抽运光功率在 8 和 20 mW 之间变化时, 实测压缩度变化不大. 而当抽运光功率为 25 mW 时, 压缩度明显降低, 实测值仅为 1.47 dB. 抽运光功率为 30 mW 时, 临近阈值, DOPA 系统变得不稳定, 不再能测到压缩.

理论上, 处于参量缩小状态的 DOPA 腔透射压缩光的归一化噪声为^[16]

$$V_{\text{sq}} = 1 - \frac{4T_2}{A} \frac{(P_{2\omega}/P_{2\omega th})^2}{[1 + (P_{2\omega}/P_{2\omega th})^2]^2 + (2f/\gamma_c)^2}, \quad (2)$$

式中, V_{sq} 为谐振腔输出处基频光噪声, T_2 为谐振腔输出镜透射率, A 为谐振腔总损耗, $P_{2\omega}$ 为抽运光功率, $P_{2\omega th}$ 为抽运光阈值功率, f 为测量噪声时选取的频率, γ_c 为谐振腔线宽. 由实验参数计算可得, 当抽运光功率为 20 mW 时, 谐振腔输出处压缩光的压缩度为 5.95 dB. 压缩度理论值和实验值的差别, 主要来源于^[17]抽运光噪声的传递、抽运光照射晶体时基频光损耗的增加以及腔锁定的不够理想等. 这些因素将是我们下一步需要研究和改进之处.

3. 结 论

利用周期性极化 KTiOPO_4 晶体的准相位匹配光学参量缩小过程, 在 532 nm 抽运光功率为 20 mW 和 1064 nm 注入光功率为 10 mW 时, 我们得到了 $300 \mu\text{W}$ 的基波输出正交振幅压缩光, 实测压缩度为 2.23 dB, 考虑了电子学噪声和探测效率后, 压缩度为 3.62 dB. 特别是在 8 mW 的 532 nm 抽运光功率和同样的注入光功率下, 压缩度为 3.35 dB, 当抽运光功率在 8—20 mW 之间变化时压缩度变化不大. 我们装置的主要优点是抽运光功率低, 这样可以压缩光源, 进而建成结构紧凑的纠缠光源, 用于量子通信方面的实验研究.

- [1] Guo R X , Jia X J , Xie C D *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1262
(in Chinese] 郭蕊香、贾晓军、谢常德等 2002 物理学报 **51** 1262]
- [2] Li X Y , Jing J T , Zhang J *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 966 (in Chinese] 李小英、荆杰泰、张 靖等 2002 物理学报 **51** 966]
- [3] Furusawa A , Sphrensen J L , Braunstein S L *et al* 1998 *Science* **282** 706
- [4] Zhang T C , Goh K W , Chou C W *et al* 2003 *Phys. Rev. A* **67** 033802
- [5] Zhang J , Peng K C 2000 *Phys. Rev. A* **62** 064302
- [6] Li X Y , Pan Q , Jing J T *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 047904
- [7] Zhang J , Xie C D , Peng K C 2000 *Phys. Rev. A* **62** 064302
- [8] Jing J T , Zhang J , Yan Y *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 167903
- [9] Zhang J , Xie C D , Peng K C 2003 *Europhys. Lett.* **61** 579
- [10] Martin M F , Gregory A M , Dieter H *et al* 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 2631
- [11] Firuz T G , Erling R 2003 *Opt. Commun.* **227** 389
- [12] Zhang K S , Coudreau T , Martinelli M *et al* 2001 *Phys. Rev. A* **64** 033815
- [13] Li Y M , Fan Q Y , Zhang K S *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1492
(in Chinese] 李永民、樊巧云、张宽收等 2001 物理学报 **50** 1492]
- [14] Lawrence M J , Byer R L , Fejer M M *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 1592
- [15] Andersen U L , Buchhave P 2002 *Opt. Express* **10** 887
- [16] Schneider K , Bruckmeier R , Hansen H *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1396
- [17] Schneider K , Lang M , Mlynek J *et al* 1998 *Opt. Express* **2** 50
- [18] Arie A , Rosenman G , Mahal V *et al* 1997 *Opt. Commun.* **142** 265
- [19] Drever R W P , Hall J L , Kowalski F V *et al* 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [20] Boyd G D , Kleinman D A 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 3597

Bright amplitude-squeezed light generation by an optical parametric deamplifier in a periodically poled KTiOPO_4 crystal^{*}

Ma Hong-Liang Wei Dong Ye Chen-Guang Zhang Jing Peng Kun-Chi

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

(Received 8 November 2004 ; revised manuscript received 25 January 2005)

Abstract

We demonstrated experimentally the generation of bright amplitude-squeezed light by a continuous-wave quasi-phase-matched degenerate optical parametric deamplifier based on periodically poled KTiOPO_4 . The threshold of the optical parametric oscillator is 35 mW. With the pump power of 20 mW, the amplitude noise reduction of 2.23 dB is observed directly. It is significant that the amplitude noise reduction of 2.17 dB can be observed only at the pump power of 8 mW.

Keywords : quasi-phase-matched , degenerate optical parametric amplifier , bright amplitude-squeezed light

PACC : 4250 , 4265

^{*} Project supported by the State Key Development for Basic Research of China (Grant No. 2001CB309304) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60178012) , the Foundation for the New Century Excellent Talents in University of Education Ministry , and the Young Science Foundation of Shanxi Province , China (Grant Nos. 20021014 20031005) .