

文章编号: 1007-6654(2006)02-0092-03

## 利用周期性极化 KTP 外腔谐振倍频过程实现明亮振幅压缩光

杨树荣, 李永民, 张苏净, 张宽收\*

(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:** 利用自制的单频连续 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出的 1064 nm 激光作为抽运源, 通过周期性极化 KTP 晶体外腔倍频过程实现了倍频绿光的正交振幅压缩, 并研究了绿光压缩度对抽运光功率的依赖关系, 当抽运光功率为 59 mW 时, 实验中观察到压缩度为 0.6 dB(考虑到探测效率, 实际压缩度为 1.1 dB)的明亮绿光振幅压缩光, 实验结果与理论预测基本一致。

**关键词:** 准相位匹配; 外腔谐振倍频; 压缩态光场

**中图分类号:** O431 **文献标识码:** A

## 0 引言

压缩态光场可将光场某一可观测量物理量的量子起伏降低至标准量子极限以下, 可以应用于亚散粒噪声的精密光学测量、量子非破坏测量等量子测量方面; 同时两单模正交压缩态光场通过分束器耦合可以得到纠缠态, 纠缠态作为量子信息的核心, 在量子离物态、量子密码术、量子密集编码等量子通讯领域及量子计算领域有着十分重要的应用前景。

目前实验上人们已经通过多种方法制备了压缩态光场, 其中二阶非线性效应被证实是产生压缩态光场非常有效的一种途径。例如: 利用光学参量振荡器、光学参量放大器及谐振倍频过程<sup>[1]</sup>产生压缩态光场, 其中倍频过程不需要注入信号光就可以在不同于泵浦波长的短波长上获得光场的压缩, 装置相对简单; 同时倍频过程可以获得较高功率的明亮压缩光, 所有这些特点非常有利于其在实际中的应用。

理论和实验均表明, 谐振倍频过程产生的压缩态光场的压缩度和非线性相互作用的强度成正比。通常的双折射匹配晶体由于受晶体本身双折射特性的影响, 适用的波长范围窄; 且不能利用晶体的最大非线性系数, 从而无法达到最强的非线性耦合, 对倍频光的压缩度及波长范围造成一定限制。虽然可以通过提高泵浦光的功率来增强非线性耦合强度, 但是一方面高的泵浦功率会增大抽运源的体积和成本, 同时过高的功率会导致额外噪声如热噪声的增加, 不利于光场压缩度的提高。近年来发展起来的准相位匹配晶体<sup>[2]</sup>, 如周期性极化 LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> 和 KTiOPO<sub>4</sub> 等, 通过把晶体铁电畴的周期反转来使其非线性系数的符号周期性反转, 不仅可

以在非线性晶体的整个透光范围内获得有效的参量作用, 从而扩展频率变换的范围; 而且可以利用晶体的最大非线性系数进行频率变换, 并且光场在晶体的整个长度内都可以进行有效的参量相互作用, 从而在较大程度上提高了非线性转换效率。将准相位匹配晶体应用在非经典光场的产生方面<sup>[3-5]</sup>, 就可以在较低的抽运功率下高效产生压缩态光场, 同时可以将非经典光场的波段拓宽到传统双折射匹配晶体不能覆盖的波长范围内。

2002 年 Ulrik L. Andersen<sup>[6]</sup> 等人利用周期性极化 KTP 晶体环形腔谐振倍频过程得到了 0.6 dB 的倍频光压缩(考虑到探测效率, 实际压缩度为 0.8 dB)。在本文中, 我们实验研究了利用周期性极化 KTP 晶体驻波腔谐振倍频过程产生倍频压缩光, 同环形腔相比, 驻波腔中泵浦光两次穿过非线性晶体, 从而增强了非线性相互作用, 有利于倍频光压缩度的提高。同时我们还研究了绿光压缩度对抽运光功率的依赖关系, 并在实验上产生了压缩度为 0.6 dB(考虑到探测效率, 实际压缩度为 1.1 dB)的明亮绿光振幅压缩光, 实验结果与理论预测基本一致。

## 1 实验过程及结果

实验装置简图如图 1 所示。我们采用自制的全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为抽运源, 激光波长为 1064 nm, 单频输出功率为 700 mW。光隔离器用来防止反馈激光对激光器的稳定运转造成干扰。其后的透镜 L1 用来完成激光和模清洁器的模式匹配。由于激光二极管抽运的全固化激光器的

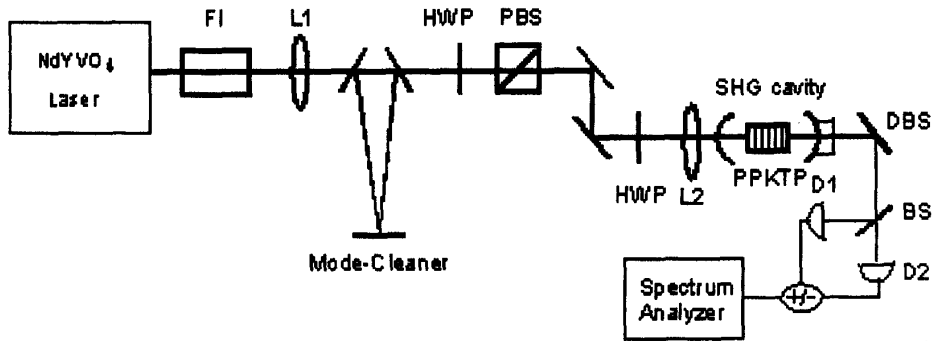
收稿日期: 2005-11-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 60478007); 山西省青年科学基金(No. 20031005); 山西省归国留学人员基金

**作者简介:** 杨树荣, (1975-), 男, 山西原平人, 山西大学光电研究所在读硕士生。 \* 通讯联系人 E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

输出光束并非理想的基模高斯光束,在实验中将会影响抽运激光与倍频腔的模式匹配,同时激光在低频段存在较大的弛豫振荡噪声,在非经典光场产生实验中将会导致光场压缩度的减小。为此我们设计了一个三镜环形窄带 F-P 腔<sup>[7]</sup>来改善入射激光的质量,当 F-P 腔与人射激光共振时,输出激光将改善为近理想的基模高斯光束,与此同时激光的低频噪声得到过滤:经过模清洁剂 (Mode Cleaner) 后激光噪声在 5 MHz 处达到散粒噪声极限 (未经过模清洁时,在 20 MHz 处达到散粒噪声极限)。模清洁剂后的半波片和偏振分束镜构成激光能量调节装置,用来控制输入倍频腔的激光功率。倍频腔前的透镜 L2 用来实现激光和倍频腔的模式匹配,半波片用来调节抽运激光的偏振方向为 S 偏振,以满足倍频晶

体 PPKTP 的相位匹配要求。倍频腔为由两个曲率半径为 20 mm 的曲面镜构成的驻波腔。输入耦合镜对抽运基频光 (1064 nm) 的反射率为 95%,对倍频光 (532 nm) 的反射率为 99.8%;输出耦合镜对抽运基频光 (1064 nm) 的反射率为 99.8%,对倍频光 (532 nm) 为高透射。倍频腔采用近共心结构,有效腔长 36 mm,这时有 Boyd-Kleinmann 因子 ~ 1,保证了抽运光的最佳聚集。倍频晶体采用 PPKTP 晶体,尺寸为 10 mm × 2 mm × 1 mm (长 × 宽 × 高),相位匹配方式为 I 类相位匹配 (e - e + e),极化周期为 9.00 μm,由于采用准相位匹配,晶体的最大非线性系数  $d_{33}$  可以被利用 (有效非线性系数  $2d_{33}/\pi \approx 9.5 \text{ pm/V}$ )。实验中晶体被置于精密控温炉中,控温精度可达 0.005 °C。



FI, 光隔离器; L1, L2, 模式匹配透镜; HWP, 半波片; PBS, 偏振分束棱镜; DBS, 双色镜; BS, 50/50 分束器; D1, D2, 光电探测器。

图 1 利用 PPKTP 谐振倍频过程产生明亮振幅压缩光的实验装置简图

FI, Faraday isolator; L1, L2, mode-matched lens; HWP, half wave plate; PBS, polarizing beam splitter; DBS, dichroic beam splitter; BS, 50/50 beam splitter; D1, D2, photodiode.

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

实验中首先仔细调节了抽运光和倍频腔之间的模式匹配,使得模式匹配效率大于 96%;接着利用电子伺服系统锁定倍频腔的腔长,使其与抽运激光严格共振;同时精确控制 PPKTP 晶体的温度于最佳倍频温度 (调节温度使得倍频光输出功率最大)。在获得了高效的外腔谐振倍频的基础上,我们采用自平衡零拍装置测量了倍频光正交振幅分量的起伏噪声功率,所用光电探测器的型号为 FND-100Q。图 2 是当抽运光功率为 59 mW 时,输出倍频光正交振幅分量的噪声功率谱及相应的散粒噪声基准。从图中可以看出,当分析频率大于 3 MHz 时,倍频光开始出现压缩,在分析频率为 8 MHz 处,实测的压缩度为 0.6 dB。考虑到 58% 的探测效率 (包括光路的透射效率及探测器的量子效率),输出倍频光在 8 MHz 处的实际压缩度为 1.1 dB。

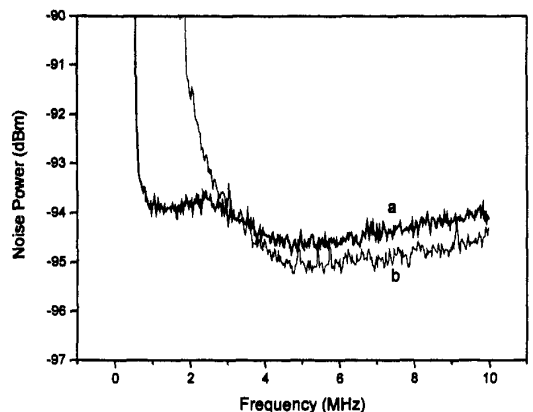


图 2 倍频光的正交振幅分量噪声功率谱 (a) 及相应的散粒噪声基准 (b)

Fig. 2 The quadrature amplitude squeezing of second harmonic (a) and corresponding shot noise limit (b)

图 3 是在不同的抽运功率下相应的倍频光的正交振幅分量噪声起伏的压缩度,其中实线为由方程 (1) 所决定的理论曲线<sup>[8]</sup>

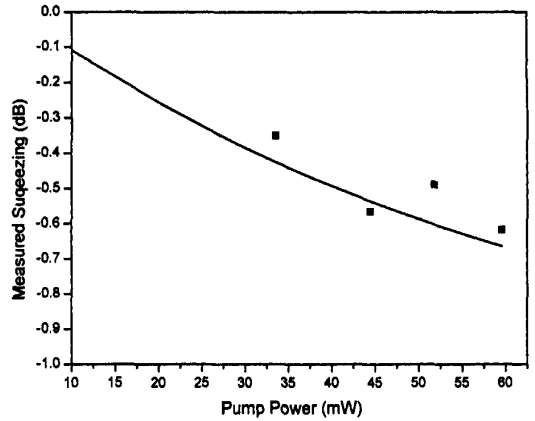
$$V_{sh} = 1 - \frac{8\mu^2 |\alpha|^4}{(\gamma + 3\mu |\alpha|^2)^2 + (2\pi\nu)^2}, \quad (1)$$

其中,  $V$  为输出倍频光的正交振幅分量起伏谱,  $\mu$  为双

光子衰减速率,  $\alpha$  为倍频腔内抽运光的振幅平均值,  $\gamma$  为倍频腔对抽运光的总光子衰减速率,  $\nu$  为分析频率。由图 3 可以看出, 随着抽运功率的增大, 倍频光的正交振幅分量噪声起伏的压缩度也越大。可见抽运光功率的增大有利于获得高的压缩度。

## 2 总结

利用自制的单频连续 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出的 1064 nm 激光作为泵浦源, 通过周期性极化 KTP 晶体外腔谐振倍频过程实现了倍频绿光的正交振幅压缩, 实测压缩度为 0.6 dB (考虑到探测效率, 实际压缩度为 1.1 dB)。同时还研究了绿光压缩度随着抽运功率的依赖关系, 实验结果与理论预测基本一致。如果采用更高质量镀膜的腔镜及晶体, 或者采用半整块腔甚至整块腔, 从而大大降低内腔损耗; 同时采用更窄线宽的模清洁剂过滤抽运激光在低频端的额外噪声, 使抽运激光能在更低的频率处就到达散粒噪声极限, 我们就可以在更大的频率范围内得到更高的压缩。



实心方框为实验测量结果, 实线为理论计算值。

图3 倍频光的正交振幅分量压缩度随着抽运光功率的变化

Solid square, experimental results; solid line, theoretical value

Fig. 3 The quadrature amplitude squeezing of second harmonic versus the pump power

## 参考文献:

[1] PEREIRA S F, XIAO M, KIMBLE H J, *et al.* Generation of Squeezed Light by Intracavity Frequency Doubling [J]. *Phys Rev A*, 1988, **38**: 4931-4934.

[2] MYERS L E, ECKARDT R C, FEJER M M, *et al.* Quasi-phase-matched Optical Parametric Oscillators in Bulk Periodically Poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, **12**: 2102-2116.

[3] ZHANG K S, COUDREAU T, MARTINELLI M, *et al.* Generation of Bright Squeezed Light at 1.06  $\mu$ m Using Cascaded Nonlinearities in a Triply Resonant Cw Periodically-poled Lithium Niobate Optical Parametric Oscillator [J]. *Phys Rev A*, 2001, **64**: 033815.

[4] 李永民, 樊巧云, 张宽收, 等. 三共振准相位匹配光学参量振荡器反射抽运场的正交位相压缩 [J]. *物理学报*, 2001, **50**: 1492-1495.

[5] LAWRENCE M J, BYER R L, *et al.* Squeezed Singly Resonant Second-harmonic Generation in Periodically Poled Lithium Niobate [J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, **19**: 1592-1598.

[6] ANDERSEN U L, BUCHHAVE P. Green Bright Squeezed Light from a Cw Periodically Poled KTP Second Harmonic Generator [J]. *Opt Expr*, 2002, **10**: 887-892.

[7] 陈艳丽, 张靖, 李永民, 等. 利用模清洁剂降低单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的强度噪声 [J]. *中国激光*, 2001, **28**: 197-200.

[8] PASCHOTTA R, COLLETT M, *et al.* Bright Squeezed Light from a Singly Resonant Frequency Doubler [J]. *Phys Rev Lett*, 1994, **72**: 3807-3810.

# Bright Quadrature Amplitude Squeezed Light from Periodically Poled KTP Second Harmonic Generation

YANG Shu-rong, LI Yong-min, ZHANG Su-ying, ZHANG Kuan-shou

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

**Abstract:** The authors realize the experimental observation of green bright quadrature amplitude squeezed light through a home-made 1064nm single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser doubled in a periodically poled KTP crystal inside a standing-wave cavity. The squeezing as a function of input power is investigated. When the pump power is 59 mW, the result is we observed 0.6 dB second harmonic squeezing. The experimental results agree with the theoretical predictions.

**Key words:** quasi-phase-matched; extra-cavity resonant doubling; squeezed light

# 利用周期性极化KTP外腔谐振倍频过程实现明亮振幅压缩光

作者: [杨树荣](#), [李永民](#), [张苏净](#), [张宽收](#), [YANG Shu-rong](#), [LI Yong-min](#), [ZHANG Su-jing](#),  
[ZHANG Kuan-shou](#)  
作者单位: [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](#)  
刊名: [量子光学学报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)  
英文刊名: [ACTA SINICA QUANTUM OPTICA](#)  
年, 卷(期): 2006, 12 (2)

## 参考文献(8条)

1. PEREIRA S F;XIAO M;KIMBLE H J [Generation of Squeezed Light by Intracavity Frequency Doubling](#) 1988
2. MYERS L E;ECKARDT R C;FEJER M M [Quasi-phase-matched Optical Parametric Oscillators in Bulk Periodically Poled LiNbO3](#) 1995
3. ZHANG K S;COUDREAU T;MARTINELLI M [Generation of Bright Squeezed Light at 1.06  \$\mu\$ m Using Cascaded Nonlinearities in a Triply Resonant Cw Periodically-poled Lithium Niobate Optical Parametric Oscillator](#) 2001
4. 李永民;樊巧云;张宽收 [三共振准相位匹配光学参量振荡器反射抽运场的正交位相压缩](#) 2001
5. LAWRENCE M J;BYER R L [Squeezed Singly Resonant Second-harmonic Generation in Periodically Poled Lithium Niobate](#) 2002
6. ANDERSEN U L;BUCHHAVE P [Green Bright Squeezed Light from a Cw Periodically Poled KTP Second Harmonic Generator](#) 2002
7. 陈艳丽;张靖;李永民 [利用模清洁剂降低单频Nd:YVO4激光器的强度噪声](#) 2001
8. PASCHOTTA R;COLLETT M [Bright Squeezed Light from a Singly Resonant Frequency Doubler](#) 1994

引用本文格式: [杨树荣](#), [李永民](#), [张苏净](#), [张宽收](#), [YANG Shu-rong](#), [LI Yong-min](#), [ZHANG Su-jing](#), [ZHANG Kuan-shou](#) [利用周期性极化KTP外腔谐振倍频过程实现明亮振幅压缩光](#)[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2006(2)