

# 1.08 $\mu\text{m}$ 波长低阈值高效率强度差 压缩光产生的实验研究\*

潘 庆 张 云 张天才 谢常德 彭? 墀

(山西大学光电研究所 太原 030006)

**提要** 用倍频稳频 Nd·YAP 激光器作泵浦源,经 KTP 晶体构成的半整块 OPO 腔,在  $90^\circ$  非临界相位匹配情况下获得高量子相关孪生光束,实测强度差噪声压缩度在 1.5 MHz 附近达 80% (7 dB),阈值泵浦功率为 80 mW。

**关键词** 孪生光束,强度差噪声,OPO 腔

## 1 引 言

孪生光束在超高精度光学精密测量中具有重要的应用前景<sup>[1,2]</sup>。1989 年, T. Debuisscher 等<sup>[3]</sup>用氩离子激光器的 0.528  $\mu\text{m}$  激光谱线泵浦由 KTP 晶体构成的参量振荡腔(OPO), 获得 69% 的强度差压缩, 阈值泵浦功率为 300 mW (输出镜红外透射率为 1.6%)。继后同一实验小组于 1991 年, 改用内腔倍频 Nd·YAG 激光器作泵浦源(波长 0.532  $\mu\text{m}$ ), 在输出镜红外透射率为 6.3% 的情况下使强度差压缩度提高到 86%, 阈值泵浦功率为 390 mW<sup>[4]</sup>, 由于 0.528  $\mu\text{m}$  与 0.532  $\mu\text{m}$  的激光难以在 KTP 晶体内实现一类  $90^\circ$  非临界相位匹配, 两亚谐波红外模之间出现光束离散效应<sup>[5-7]</sup>。从而降低了变换效率, 加之采用分离式元件, 内腔损耗较大, 因而阈值泵浦功率较高。我们选用自行设计制作的内腔倍频稳频 Nd·YAP 激光器<sup>[8]</sup>输出的 0.54  $\mu\text{m}$  的激光作泵浦源, 在由  $\alpha$ -切割的半整块(semimonolithic)KTP 晶体所组成的 OPO 腔内完成了一类  $90^\circ$  非临界相位匹配<sup>[9,10]</sup>, 从而完全消除光束离散, 提高了转换效率, 加之采用半整块腔形设计, 以 KTP 晶体的前表面为输入耦合镜, 进一步降低内腔损耗。在输出耦合镜红外透射率为 5% 的情况下, 泵浦阈值低达 80 mW。当泵浦功率为 90 mW 时, 在 1.5 MHz 附近实测强度差压缩度达 80% (7 dB)。计及探测系统的损耗及效率因子, 实际 OPO 腔输出光束的真实强度差压缩度约为 90% 左右。虽然我们实验室曾采用双 KTP 晶体串接消除光束离散, 达到三模共振<sup>[7]</sup>但双晶体增加了一个入射面和一个出射面, 必然会增加内腔损耗, 更难做到半整块化, 从而阈值较高, 量子相关度也很难进一步改善。我们设计的 Nd·YAP/KTP 量子相关孪生光产生系统, 具有结构简单、效率高、阈值低等诸多优点, 它能在较低的泵浦功率下获得较高压缩度的强度差压缩光场。同时半整块结构有利于集成化, 是一种颇具应用前景的非经典光场产生系统。

\* 国家自然科学基金, 山西省自然科学基金, 山西省归国留学人员基金资助项目。

### 2 理论依据

运转于阈值以上的 OPO 腔, 通过非简并参量下转换产生的孪生光束之间具有很强的强度量子相关性, 因此其强度差噪声可低于相应的散离噪声极限, 强度差噪声谱在一定的频率范围内可表示为<sup>[11]</sup>

$$S(\Omega) = S_{SNL} \left[ 1 - \frac{\eta\xi}{1 + \Omega^2\tau_c^2} \right] \tag{1}$$

其中  $\Omega$  为噪声频率,  $S_{SNL}$  为散离噪声极限,  $\tau_c$  为光子在 OPO 腔中的寿命,  $\eta$  为探测系统的效率,  $\xi = T/(T + \delta)$  为输出耦合效率,  $T$  为 OPO 腔输出镜的透射率,  $\delta$  为 OPO 腔的额外损耗。

### 3 实验装置及实验结果

实验装置如图 1 所示。

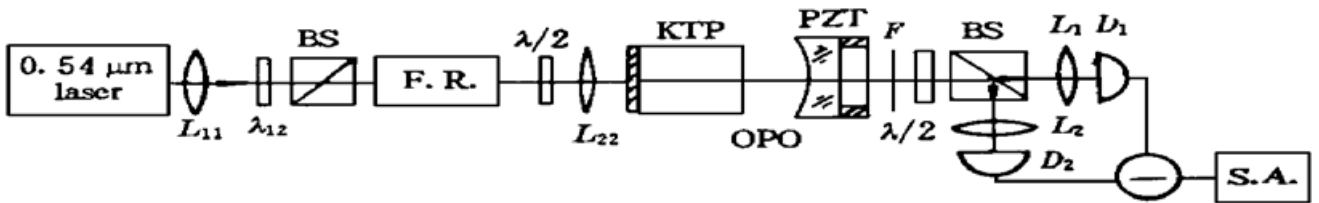


图 1 实验装置图

$L_{11}, L_{22}$ : 模匹配透镜; BS: 分束器; F. R.: 法拉弟旋转器;  $\lambda/2$ : 半波片;  $F$ : 滤光片;  
KTP: 半整块 KTP 晶体;  $L_1, L_2$ : 聚焦透镜;  $D_1, D_2$ : 探测器; S. A.: 谱分析仪

Fig. 1 The experimental layout

$L_{11}, L_{22}$ : mode matching lens; BS: beam splitter; F. R.: Farady Rotator;  $\lambda/2$ : half-wave plate;  $F$ : filter;  
KTP: semimonolithic KTP crystal;  $L_1, L_2$ : focusing lens;  $D_1, D_2$ : detectors; S. A.: spectrum analyzer

由倍频稳频 Nd·YAP 激光器输出的绿光 ( $\lambda = 0.54 \mu\text{m}$ ) 经过由半波片 ( $\lambda/2$ ), 偏振分束器 (BS) 和法拉弟旋转器 (FR) 组成的能量调节与光学隔离系统之后, 入射于光学参量振荡腔 (OPO)。透镜  $L_{11}$  和  $L_{22}$  完成入射光场与 OPO 之间的模匹配。OPO 腔由一块  $\alpha$ -切割的 KTP 晶体和一个红外输出镜组成, KTP 晶体的长度为 10 mm, 前端镀有对  $1.08 \mu\text{m}$  全反, 对  $0.54 \mu\text{m}$  透射率为 15% 的双色膜, 兼作 OPO 腔的输入耦合镜, 另一端镀有对  $1.08$  和  $0.54 \mu\text{m}$  的双增透膜; 输出镜的曲率半径  $r = 20 \text{ mm}$ , 对  $0.54 \mu\text{m}$  全反, 对  $1.08 \mu\text{m}$  的透射率为 5%; OPO 腔的总腔长为 19 mm, 实际测得 OPO 腔对  $1.08 \mu\text{m}$  波长的精细常数为 110, 由此可知红外光的内腔损耗(界面散射, 晶体吸收, 剩余反射等)为 0.3% 左右。对  $0.54 \mu\text{m}$  的精细常数为 47。

将 OPO 腔前的泵浦绿光功率调节到高于阈值, 通过压电陶瓷调节 OPO 腔长, 在相位匹配温度下达到共振条件, 此时获得下转换红外光输出。由于采用一类匹配, 信号模与闲置模偏振方向垂直, 一般情况下难以达到频率完全简并, 但我们的 KTP 晶体按  $1.08 \mu\text{m}$  波长倍频要求切割, 因而可做到频率近简并, 两个红外模的波长差小于 1 nm。

OPO 腔输出光经滤波片 ( $F$ ) 滤除剩余泵浦光后, 偏振正交的两个红外模由偏振分光棱镜分束, 然后分别由短焦距透镜聚焦到探测器  $D_1$  和  $D_2$  (EPITAXX 公司生产的 ETX500 T 型 InGaAs 光电管) 上, 探测器输出的光电流经低噪声放大器放大后由减法器相减, 之后输入谱仪进行噪声谱分析, 为了尽可能保证两路探测系统平衡, 我们对探测器进行了筛选,  $D_1$  和  $D_2$

系统的等效量子效率(计及传输损耗)均近似为 88%。

在 OPO 腔输出端与偏振分束器之间插入一可旋转半波片,正如 Heidmann 等所指出的,当两孪生光束的偏振面相对于偏振分束器透光偏振方向的夹角  $\theta = 0^\circ$  时,谱仪记录的是孪生光束强度差噪声,而当  $\theta = 45^\circ$  时,获得相应的散离噪声基准<sup>[11]</sup>。

将 OPO 腔前的泵浦光功率调至 90 mW,在噪声频率为 1~ 11 MHz 范围内均可获得强度差噪声压缩,实验结果如图 2 所示,曲线 (a) 为散离噪声极限,曲线 (b) 为强度差噪声, (c) 为电子学噪声。由图可知噪声频率在 1.5 MHz 附近压缩度为 80% (7 dB) 左右。

如图 3,我们将实测实验数据(图中实三角)与用(1)式计算的结果(图中实线)相比较,计算中  $\eta = 0.88, \xi = 0.94$ ,均为实际测得的系统参量,两者在 1~ 4 MHz 范围内拟合得很好,在高频段实测压缩度低于计算值,原因是探测系统是在 2 MHz 附近校准的,高频段两路放大倍数略有不平衡,导致实测压缩度较低。

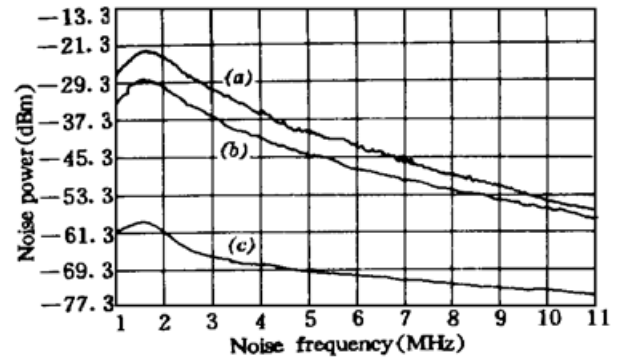


图 2 实验结果

(a): 散离噪声极限; (b): 强度差噪声; (c): 电子学噪声  
 Fig. 2 The experimental results  
 (a): the associated shot-noise power spectrum;  
 (b): the beam intensity difference noise power spectrum;  
 (c): the electrical noise floor

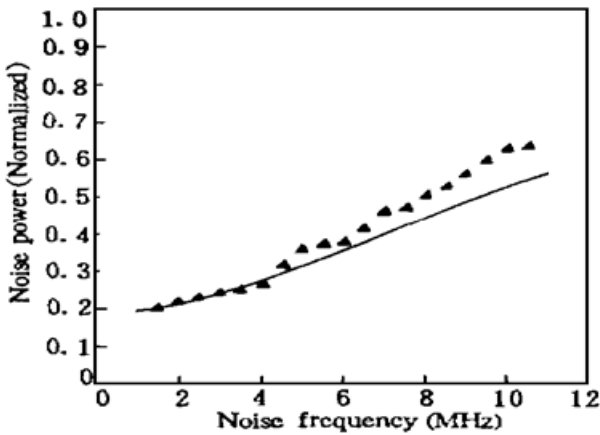


图 3 理论计算与实验结果的比较  
 曲线: 理论计算结果; 三角: 实验结果

Fig. 3 The comparison between the experimental and the theoretical results  
 curve: the theoretical results; triangles: the experimental results

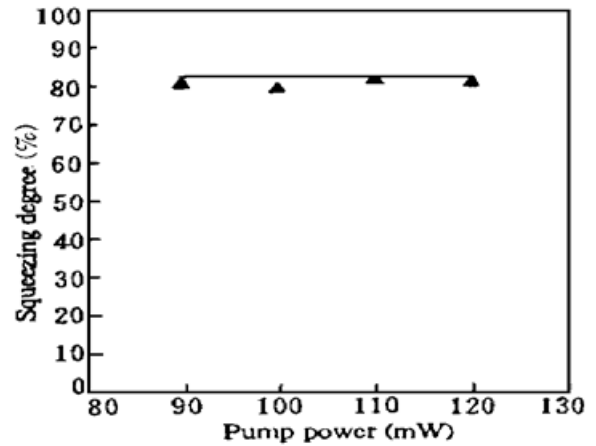


图 4 压缩度与泵浦功率的关系  
 实线: 理论计算值; 三角: 实测值

Fig. 4 The squeezing degrees vs the pump power  
 line: the theoretical results; triangles: the experimental results

我们还在泵浦功率分别为 100, 110, 120 mW 情况下测得了相应的压缩度均在 7 dB 左右,如图 4 所示,图中实线为利用(1)式计算的压缩度,三角为实验测得的压缩度,这说明了压缩度基本上与泵浦功率无关,如考虑探测系统的效率后压缩度为 90% 左右,而用(1)式计算的结果为 92%,二者在测量误差范围内符合得很好。

与过去采用 Nd:YAG/KTP 孪生光束产生系统相比,我们新设计的 Nd:YAP/KTP 系统,具有结构简单、效率高、阈值低等优点。

我们用 0.54 μm 波长绿光泵浦半整块 KTP/OPO 腔,在低至 90 mW 泵浦功率下,获得实

测强度差压缩度为 80%, OPO 腔前光场实际压缩度高达 90% 以上的量子相关孪生光束, 双光束总强度约 20 mW。这种“类激光”非经典光场用于量子通讯与量子测量系统, 可使信噪比突破标准量子极限<sup>[12]</sup>, 若将 KTP 加工成整块(monolithic) OPO 腔, 并设计 LD 泵浦的 Nd:YAP 全固化激光源, 可望研制成功更具实用价值的全固化小型“压缩器”。

### 参 考 文 献

- 1 P. R. Tapster, S. F. Seward, J. G. Rarity. Sub-shot-noise measurement of modulated absorption using parametric down-conversion. *Phys. Rev. A*, 1991, **44**(5) : 3266~ 3269
- 2 J. J. Snyder, E. Giacobin, C. Fabre *et al.*. Sub-shot-noise measurement using the beat note between quantum-correlated photon beams. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(10) : 2132~ 2136
- 3 T. Debuisschert, S. Reynaud, A. Heidmann *et al.*. Observation of large quantum noise reduction using an optical parametric oscillator. *Quant. Opt.*, 1989, **1**(1) : 3~ 9
- 4 J. Mertz, T. Debuisschert, A. Heidmann *et al.*. Improvements in the observed intensity correlation of optical parametric oscillator twin beams. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(16) : 1234~ 1236
- 5 刘 晶, 谢常德, 廉毅敏等. 双 KTP 晶体倍频过程的实验研究(一), 腔外串接倍频. 光学学报, 1991, **11**(5) : 409; 双 KTP 晶体倍频过程的实验研究(二), 光学参量振荡腔内串接倍频. 光学学报, 1991, **11**(11) : 602
- 6 刘 晶, 张天才, 廉毅敏等. 非简并光学参量振荡腔的经典增益. 光学学报, 1993, **13**(6) : 655~ 659
- 7 彭? 擢, 黄茂全, 刘 晶等. 双模光场压缩态的实验研究. 物理学报, 1993, **42**(7) : 1079~ 1085
- 8 潘 庆, 张 钧, 张天才等. 环行倍频稳频 Nd:YAP 激光器. 中国激光, 1996, **A23**(1) : 6~ 10
- 9 S. F. Pereira, K. C. Peng, H. J. Kimble. Coherence and quantum optics IV. edited by J. H. Eberly, L. Mandel, E. Wolf, New York : Plenum, 1990, 889~ 891
- 10 Z. Y. Ou, S. F. Pereira, E. S. Polzik *et al.*. 85% efficiency for cw frequency doubling from 1.08 to 0.54  $\mu\text{m}$ . *Opt. Lett.*, 1992, **17** : 640~ 642
- 11 A. Heidmann, R. J. Horowitz, S. Reynaud *et al.*. Observation of quantum noise reduction on twin laser beams. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(22) : 2555~ 2557
- 12 王 海, 谢常德, 郜江瑞等. 应用强度差压缩光进行微弱吸收光谱学测量. 光学学报, 1996, **16**(8) : 1143

## Experimental Research for Intensity Difference Squeezed Light Generation at 1.08 $\mu\text{m}$ Wavelength with Low Pump Threshold and High Conversion Efficiency

Pan Qing Zhang Yun Zhang Tiancai Xie Changde Peng Kunchi  
(Institute of Opto-electronic Researches, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract** The twin beams with high quantum correlation at 1.08  $\mu\text{m}$  wavelength have been generated from the semimonolithic KTP OPO pumped by a frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YAP laser. The parametric frequency down conversion with the type  $^{-90^\circ}$  non-critical phase matching has been achieved in the  $\alpha$ -cut KTP for the 0.54  $\mu\text{m}$  pump power. The quantum noise reduction of 80% (7 dB) around 1.5 MHz on the intensity difference between the twin beams has been observed. The pump threshold for the OPO is about 80 mW.

**Key words** twin-beam, intensity difference noise, OPO cavity