

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0812-03

小型全固化非经典光场产生系统的实验研究*

郭蕊香 马红亮 张云 李小英 张宽收 彭堃堃

(山西大学光电研究所,太原 030006)

摘要: 利用激光二极管(LD)抽运的内腔倍频 YVO₄/KTP 激光器发出的 0.53 μm 的激光,经由 α-切割的 KTP 晶体构建的半整块非简并连续光学参量振荡腔(CW NOPO)内参量下转换,获得了强度量子相关非经典光场,其强度差噪声低于标准量子极限 3.2 dB,抽运阈值低于 10 mW。

关键词: 半整块;光学参量振荡腔;全固化;孪生光束

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

1 引 言

从 20 世纪 80 年代中期至今,实验物理学家设计了不同类型的非经典光场产生系统,连续光学参量振荡器(OPO)是最有效的途径之一^[1~7]。由连续光学参量振荡器所产生的非经典光场已被应用于亚散粒噪声极限光学测量、量子非破坏测量、量子离物态及量子保密通讯等领域^[1,2,5,6]。随着大功率激光二极管(LD)的出现进而商品化,采用激光二极管作为抽运源研制小型化、高效率固体激光器代替庞大、低效的灯抽运固体激光器系统是近年来激光技术的发展趋势。我们实验室在一系列连续激光二极管抽运的固体激光器研究基础上^[8],最近又完成激光二极管抽运的 YVO₄/KTP、Nd:YAP/KTP 连续单频内腔倍频激光器。同时我们将全固化技术与非经典光场产生技术结合,开展了激光二极管抽运的非经典光场产生器的研究,采用全固化系统获得了强度量子相关孪生光束对。本文报道了小型全固化非经典光场产生系统的实验研究。

2 实验设计与装置

2.1 激光二极管抽运的内腔倍频 YVO₄/KTP 激光器

激光二极管抽运的内腔倍频稳频 YVO₄/KTP 激光器采用四镜 8 字形非对称环形腔结构,如图 1 所示,总腔长约 360 mm,非对称腔的设计使抽运光

与腔内振荡的激光腔模匹配,更好地利用抽运能量。

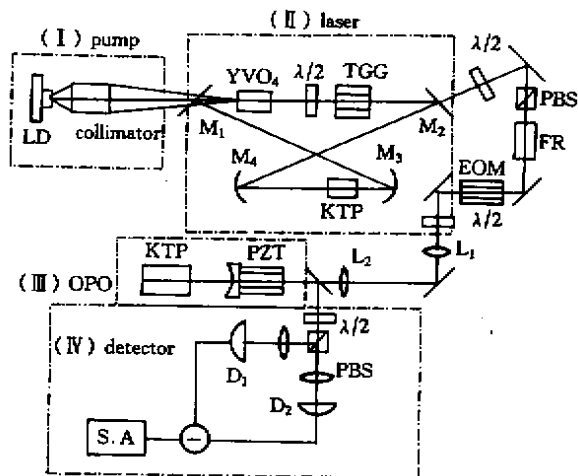


Fig. 1 The experimental setup of mini-all-solid-state of non-classical light generation and the detector setup of noise spectrum of intensity difference between twin beams

图 1 中(II)部分为激光器光路图。采用 SDL-2482-P1 型激光二极管作为抽运源,通过温度调谐将抽运光的输出波长调谐至 YVO₄ 晶体的吸收峰(809 nm),M₁ 为平面输入耦合镜,对 1.06 μm 高反,而对 806 nm 增透;M₂ 为平面输出耦合镜,内表面对 1.06 μm 高反,外表面对 0.53 μm 增透;M₃, M₄ 为曲面双波长全反镜,曲率半径分别为 r₃ = 50 mm, r₄ = 100 mm;YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,一端 1.06 μm、809 nm 双增透,另一端 1.06 μm 增透,TGG 晶体尺寸为 φ3 mm × 5 mm,两端 1.06 μm 增透,磁场加在 TGG 晶体上,对 1.06 μm 激光旋转约 3°,与 1.06 μm 半波片共同构成单向器确保激光器单向运转。倍频晶体为 3 mm × 3 mm × 5 mm 角度匹配 KTP 晶体,两端镀

* 国家自然科学基金(69837010)和山西省青年科学基金资助项目。

1.06 μm 、0.53 μm 双增透膜,插入两凹面镜的腰斑处, YVO_4 晶体和 KTP 晶体均在室温附近精密控温。在注入抽运功率 2.3 W 的条件下,获得 150 mW 的稳定的单频绿光输出,斜率效率为 11%,频率稳定性优于 400 kHz。

2.2 光学参量振荡器腔的设计

光学参量振荡器腔采用半整块腔结构,由一块 α -切割的 KTP 晶体和曲率半径为 $r = 30 \text{ mm}$ 的凹面镜构成,KTP 晶体前表面镀 1.00 $\mu\text{m} \sim 1.10 \mu\text{m}$ 宽波带增透膜和 0.53 μm 增透膜,后表面镀 1.00 $\mu\text{m} \sim 1.10 \mu\text{m}$ 宽波带全反膜和 0.53 μm 全反膜,凹面镜既是输入耦合镜又作输出耦合镜,前表面镀 1.00 $\mu\text{m} \sim 1.10 \mu\text{m}$ 宽波带增透膜和 0.53 μm 增透膜,后表面镀 1.00 $\mu\text{m} \sim 1.10 \mu\text{m}$ 宽波带反射膜(反射率 $R_{1.06 \mu\text{m}} = 97\%$)和 0.53 μm 反射膜(反射率 $R_{0.53 \mu\text{m}} = 92\%$),光学参量振荡器腔长约 31 mm,凹面镜固定在压电陶瓷上以调节腔长,整个连续光学参量振荡器腔固定在一体的殷钢支架上确保系统的稳定。这种腔设计既保证较小的内腔损耗,又无须更换非线性晶体即可达到改变腔参数的目的,并采用尽量短的腔结构,确保在较大的光频范围内压缩度改变不大,提高了内腔功率密度,可有效降低腔阈值。实测光学参量振荡器腔的红外光精细度为 140,绿光精细度为 48。可推出该腔对红外光和绿光额外损耗分别为 1%、2.5%,绿光的损耗中还包含了绿光对红外光的下转换项和热吸收项。

0.53 μm 的激光可以在角度匹配的 KTP 晶体中实现频率简并的下转换光,但角度匹配不可避免地带来光束走离效应,从而影响抽运光、闲置光和信号光的转换效率,并难以作到三模共振。而我们的设计采用 α -切割的 KTP 晶体作为非线性晶体,在频率非简并条件下,可实现下转换光和抽运光的 90°非临界相位匹配,下转换光频率分别在 1.090 μm 和 1.039 μm 附近^[7,9],三模共线传输,易于实现三模共振。采用边带稳频技术锁定光学参量振荡器腔,确保内腔三模共振,使输出的光具有较高的量子相关性。

2.3 强度差压缩光的产生与测量

由全固化内腔倍频稳频 YVO_4/KTP 激光器发出的 0.53 μm 绿光经过半波片($\lambda/2$)偏振分束器(BS)和法拉第旋转器(FR)构成的能量调节与光束隔离系统,入射进光学参量振荡器腔,仔细选择匹配透镜 L_1 、 L_2 完成入射光与光学参量振荡器腔之间的

模匹配。将连续光学参量振荡器腔前的抽运功率提高到阈值以上,采用边带稳频技术锁定光学参量振荡器腔,获得下转换的红外光输出。由于采用 II 类匹配,信号模与闲置模偏振方向垂直,频率非简并,两个红外模的波长相差约 6 nm。

强度差压缩光的探测装置见图 1 的(IV)部分,孪生光束由 P_3 分光后分别入射到探测器 D_1 、 D_2 , D_1 、 D_2 输出的光电流经低噪声放大器放大,再相减后输入谱仪进行噪声谱分析,探测器经过仔细筛选,并通过电子学方法进行补偿,保证两路探测系统平衡。光的偏振方向被 P_3 前的半波片旋转 2β ,当 $\beta = 0^\circ$ 时,谱仪记录的是强度差噪声功率谱,当 $\beta = 22.5^\circ$ 时,谱仪记录的是相应的散粒噪声基准。

光学参量振荡器腔的阈值约 10 mW,将光学参量振荡器腔前的抽运功率调至 16 mW,输出红外光约 1.3 mW,在 4 MHz ~ 10 MHz 的噪声功率范围均可获得强度差噪声压缩,在 13 mW ~ 30 mW 范围内改变腔前功率,对压缩度影响不大。实验结果如图 2 所示。图 2 中曲线 a 为散粒噪声基准,曲线 b 为强度差噪声,实测电子学噪声较散粒噪声低约 22 dB,因此可以不考虑它对散粒噪声及压缩的影响,压缩分贝数可以认为是谱仪上显示的散粒噪声和强度噪声的分贝数直接相减。

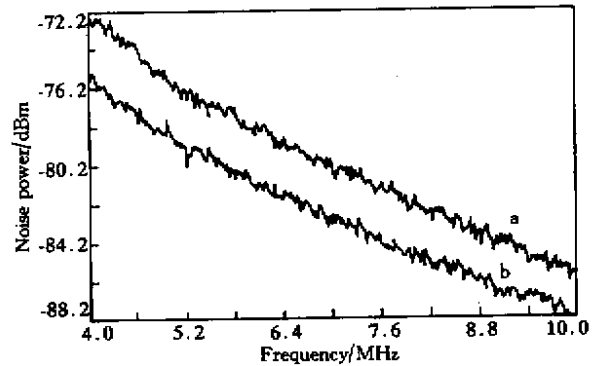


Fig. 2 The noise spectrum of intensity difference between twin beams. (a) The shot noise limit (SNL); (b) The noise spectrum of intensity difference

3 实验结果与讨论

激光在腔长 $l = 31 \text{ mm}$ 的非简并光学参量振荡腔(NOP)内传播一周的时间 $\tau = 2.42 \times 10^{-10} \text{ s}$,下转换的总损耗速率 $d = (T + L)/2\tau = 9.1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$,其中 T 为输出耦合镜对下转换光的透射率, L 为腔内元件对下转换光的额外损耗。在已知探测效率 $\eta = 0.9$ 和耦合效率 $\xi = T/(T + L) \approx 0.68$ 时,由公

式^[3]

$$S'(\Omega) = S_0 \left(1 - \frac{4\xi\eta}{\Omega^2/d^2 + 4} \right)$$

可计算出孪生光束在频率 $\nu = 5$ MHz(分析频率 $\Omega = 2\pi\nu = 31$ MHz)处的强度差压缩是 59%,而实测结果为 52%(3.2 dB),比理论值偏低。我们认为主要是由于非简并光学参量振荡器腔镜镀膜时是以 $1.06 \mu\text{m}$ 为中心的宽波带反射膜,在下转换波长 ($1.039 \mu\text{m}$ 和 $1.090 \mu\text{m}$) 附近透射率略低于 3%,而理论计算用的是 3% 标称值,因而压缩度略高于实测值。由于影响压缩度的主要因素是非简并光学参量振荡腔的红外透射率和内腔损耗^[3],如果选择对红外输出耦合更高的光学参量振荡器腔镜,并用同样的系统设计可获得更高压缩度的非经典光。此外测量系统中所用的红外光全反绿光增透分束器质量不够好,造成红外光损耗也降低了实测压缩度。

结语 报道了全固化量子相关孪生光束产生系统。激光器采用非对称腔结构,最大地利用抽运能量,腔内晶体均被精密控温,产生 150 mW 稳定的绿光输出。光学参量振荡器腔的设计紧凑稳定,凹面镜兼作输入与输出耦合器,便于选择最佳阻抗匹配参数,用 α -切割的 KTP 晶体作为非线性晶体避免了光束走离,提高了转换效率。设计中选择短腔结构,内腔功率密度高,大大降低了抽运阈值,同时保证了小型化要求。我们的实验为发展全固化可实用非经典光场产生系统——“光压缩器”提供了设计方案与技术参考。

参 考 文 献

- [1] Furusawa A, Sorensen J L, Braunstein S L *et al.*. Unconditional quantum teleportation. *Science*, 1998, **282** (5389):706~709
- [2] Wang Hai, Zhang Yun, Pan Qing *et al.*. Experimental realization of a quantum measurement for intensity difference fluctuation using beam splitter. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(7):1414~1416
- [3] Heidmann A, Horowicz R J, Reynaud S *et al.*. Observation of quantum noise reduction on twin laser beams. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(22):2555~2557
- [4] Peng Kunchi, Pan Qing, Wang Hai *et al.*. Generation of two-mode quadrature-phase squeezing and intensity difference squeezing from a CW-NOPO. *Appl. Phys. (B)*, 1998, **66**(6):755~757
- [5] Tapster R, Seward S F, Rarity J G. Sub-shot noise measurement of modulated absorption using parametric down-conversion. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(5):3266~3269
- [6] Snyder J J, Giacobin E, Fabre C *et al.*. Sub-shot noise measurement using the beat note between quantum correlated photo beams. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, **7**(10):2132~2136
- [7] Gao Jiangrai, Cui Fuyun, Xue Chenyang *et al.*. Generation and application of twin beams from an optical parametric oscillator including an α -KTP crystal. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11):870~872
- [8] 张宽收, 张云, 谢常德等. 全固化非平面单频 Nd:YAG 环形激光器. *光学学报*, 1996, **16**(8):1041~1043
- [9] Yang S T, Eckardt R C, Byer R L. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator pumped by a single-frequency resonantly doubled Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12):971~973

Experimental Investigation of Mini-All-Solid-State System of Non-Classical Light Generation

Guo Ruixiang Ma Hongliang Zhang Yun Li Xiaoying Zhang Kuanshou Peng Kunchi
(Institute of Opto-Electronic Research, Shanxi University, Taiyuan 030006)

(Received 13 March 2000; revised 15 May 2000)

Abstract: A mini-all-solid-state system of non-classical light generation has been experimentally demonstrated. The quantum-correlated twin beams were generated from a semi-monolithic nondegenerated optical parametric oscillator including an α -cut KTiOPO_4 crystal pumped by an all-solid intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄/KTP laser ($0.53 \mu\text{m}$). The noise of the intensity difference between twin beams was reduced to 3.2 dB below the standard quantum limit. The pump threshold is lower than 10 mW.

Key words: semi-monolithic; optical parametric oscillator; all-solid-state; twin beams