

双 KTP 内腔参量下转换产生量子 相关孪生光子对*

王 海 薛晨阳 郜江瑞 谢常德 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

摘 要 使用双 KTP 晶体串接, 经光学参量振荡腔内参量下转换, 在 300 mW 泵浦功率下, 获得总功率约 23 mW 的强度相关的孪生光束, 在 1.25 MHz 处其强度差噪声功率较散离噪声极限降低 50% (3 dB)。

关键词 参量下转换, 强度差压缩。

1 引 言

过去十年, 实验科学家采用各种途径已经将电磁场的量子噪声降低到标准量子极限以下, 获得了不同类型的压缩态光场^[1~5]。运行于阈值以上的光学参量振荡腔, 通过参量下转换过程, 可以产生“类激光”(laserlike)的高强度量子相关孪生光子对, 其强度噪声低于相应的散离噪声极限。这类具有一定强度量子相关的光束在低于散离噪声极限的光学测量中有着广泛的应用前景^[6, 7]。法国居里大学赫兹光谱实验室, 对通过 II 类匹配 KTP 晶体内腔参量下转换产生孪生光束的物理过程进行了一系列的理论与实验研究, 最后在 390 mW 的泵浦功率下获得总强度为 6 mW 的孪生光子对, 其强度差压缩度高达 86% (8.5 dB), 是迄今为止由实验所获得的最高压缩度^[8]。由于内腔倍频 Nd:YAG 激光器所输出的波长为 0.53 μm 的二次谐波, 在 KTP 晶体中通过 II 类临界相位匹配完成参量下转换, 两正交偏振的红外亚谐波模 (subharmonic mode) 之间存在光束离散效应, 它们在高精细度腔内不能保持共线传输, 因此转换效率难以提高^[9]。

本文采用双 KTP 晶体反向串接, 消除了信号与闲置模之间的光束离散^[5, 9], 使参量转换效率进一步提高, 在泵浦功率为 300 mW 的情况下, 获得总强度为 23 mW 的红外孪生光束, 在 1.25 MHz 处实测强度差噪声功率低于散离噪声极限 50% (3 dB)。压缩度不够高的原因, 一方面是晶体表面增透不够理想, 双晶体串接增加了内腔损耗, 另一方面是实验输出耦合镜的红外透射率仅为 3%, 而文献^[8]为 6.3%, 因此实验系统的输出耦合效率较低, 从而降低了压缩度。但这些均为可克服的技术问题, 因此采用本文建议的双 KTP 串接光学参量振荡腔, 可望获得高强度、高量子相关的孪生光束。

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

收稿日期: 1996 年 9 月 20 日; 收到修改稿日期: 1996 年 11 月 14 日

2 实验原理

在内腔光学参量下转换过程中, 信号与闲置光子总是同时产生, 之后存储在腔内, 存储时间与内腔光子寿命 τ_c 同数量级。因此, 分别测量由光学参量振荡腔输出的信号与闲置光子数量, 若计数时间较 τ_c 长许多, 则测定的信号与闲置光子数量应该相等, 也就是说, 在低于 τ_c^{-1} 的噪声频率范围内, 输出信号与闲置光的强度差 ($I = I_1 - I_2$) 噪声将低于标准量子极限。由简单的半经典理论模型, 可得出孪生光子对强度差的噪声功率谱表达式^[8]:

$$S(\Omega) = S_{\text{SNL}} [1 - \eta\zeta / (1 + \Omega^2\tau_c^2)] \quad (1)$$

式中 S_{SNL} 为总强度等于 $(I_1 + I_2)$ 的相干光场的噪声功率, 即为相应的标准量子极限, τ_c 为光子在内腔中的寿命, Ω 为噪声频率, η 为探测系统的量子效率; ζ 为光学参量振荡腔的输出耦合效率, 它依赖于输出镜的透射率 T 及内腔额外损耗 μ :

$$\zeta = T / (T + \mu) \quad (2)$$

虽然由(1)式求知, 在零频附近噪声压缩度最高, 但由于在低于 1 MHz 的频率范围, 激光系统的噪声极大, 信号与闲置光各自都具有很大的经典噪声, 很难通过相减而完全消除, 因此测量一般都在 1 MHz 至几 MHz 范围内进行。

3 实验装置与步骤

实验装置如图 1 所示, 主要由三部分组成。

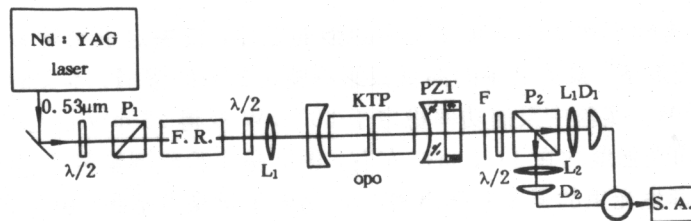


Fig. 1 Experiment Layout

L_1 : mode matching lens; P_1 : beam splitter; F. R.: faraday rotator; $\lambda/2$: half-wave plate; F: filter; KTP: KTP crystal; L_1, L_2 : focusing lens; D_1, D_2 : detectors; S. A.: spectrum analyzer

3.1 泵浦光源

实验采用自制的倍频稳频 Nd:YAG 激光器, 单模倍频光功率为 600 mW, 频率稳定性小于 ± 3 MHz^[6]。实验中将倍频光功率调整在 300 mW 左右。偏振棱镜 P_1 与法拉第旋转器 FR 构成光学隔离系统, 防止泵浦光反馈影响激光器的稳定。光学参量振荡腔前的 $\lambda/2$ 波片使泵浦光的偏振方向与光学参量振荡腔内 KTP 晶体的 XY 平面平行。透镜 L_1 保证泵浦光与光学参量振荡腔模匹配。

3.2 光学参量振荡腔

光学参量振荡腔为近共心结构, 输入与输出耦合镜曲率半径为 20 mm, 腔几何长度为 36 mm。输入耦合镜对泵浦绿光 ($0.53 \mu\text{m}$) 透射率为 10%, 对谐波模 ($1.06 \mu\text{m}$) 全反; 输出耦合镜对 $1.06 \mu\text{m}$ 信号光透射率为 3%, 对泵浦光全反。一对光学性质与几何形状完全相同的 KTP 晶体, 按一定方位反向串接, 作为参量下转换的非线性介质, 晶体方位可调, 以达到最高转换效率并最大限度消除光束离散与偏振混合现象。KTP 晶体两端面均镀制 $1.06 \mu\text{m}$ 增透膜。为保证输出信号光强度的稳定性, 晶体置于自制控温炉内, 晶体温度被控制在室温附近

(18℃), 探温精度达 $\pm 0.004^\circ\text{C}$ 。通过调节固定于输出耦合镜上压电陶瓷(PZT)的电压, 可控制光学参量振荡腔长, 获得稳定的红外光输出。光学参量振荡腔对泵浦光(0.53 μm)及红外光(1.06 μm)的精细常数分别为 35 和 70, 内腔额外损耗(晶体表面反射, 吸收及散射等)约为 1.4%。由(2)式求知, 输出耦合效率 $\zeta = 68\%$ 。

3.3 探测系统

光学参量振荡腔的输出光经二向色滤波片(F)滤掉泵浦光后, 红外孪生光束由半波片($\lambda/2$)与偏振分束器(P_2)分为两支, 当半波片与 P_2 的轴平行时($\theta = 0^\circ$), 两正交偏振的信号与闲置模经 P_2 偏振分束, 然后分别通过聚光透镜 L_1 与 L_2 到达探测器 D_1 与 D_2 (InGaAs EXT300), D_1 与 D_2 产生的光电流经低噪声放大器放大后, 由减法器(一)相减, 最后输入 HP 8590L 谱仪(SA)进行噪声功率谱分析。

正如文献[4]中所详细证明的, 当半波片与 P_2 光轴夹角($\theta = 22.5^\circ$)时, 信号与闲置模偏振方向经半波片后旋转 45° , 半波片与 P_2 的作用相当于通常的 50%分束器, 此时被谱仪测定的信号正是孪生光束的散离噪声极限。应该注意的是探测系统的任何光子损耗都将破坏孪生光束之间的量子相关性, 从而降低强度差压缩度, 所以探测系统所有光学表面都镀有对 1.06 μm 波长的增透膜, 此外实验对探测器两臂的平衡度较敏感, 实验之前必须筛选元件, 仔细校准达到光学与电子学两方面最大限度平衡。

4 实验结果

由(1)式知, 强度差噪声功率谱与泵浦功率的强弱无关, 仅决定于光学参量振荡腔的输出耦合系数及探测系统效率。泵浦功率的高低只影响输出信号的强弱, 本文的光学参量振荡阈值泵浦功率为 150 mW, 实验中泵浦功率稳定于 300 mW 获得 23 mW 的总红外信号输出。孪生光束每一支的平均光强度均在 11.5 mW 左右, 图 2 是实验所测噪声功率谱: 曲线(a)为散离噪声基准, (b)为孪生光束的强度差噪声谱; (c)为电子学噪声基底。由公式:

$$S(\Omega) = [S_M(\Omega) - S_e(\Omega)] / [S_{SNL}(\Omega) - S_e(\Omega)] \quad (3)$$

可以计算不同分析频率强度差噪声压缩度 $S(\Omega)$, 式中 $S_M(\Omega)$ 为强度差噪声功率, $S_{SNL}(\Omega)$ 为相应的散离噪声基准, $S_e(\Omega)$ 为电子学噪声, 图 3 中为实验所测归一化噪声功率。探测系统的总效率(由探测器效率、及波片、棱镜、透镜的透射决定)约为 75%, 由(1)式可从理论上计算得强度差噪声功率 $S(\Omega = 1 \text{ MHz}) = 49\%$ 与实验结果基本符合。

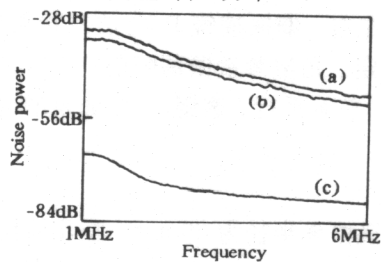


Fig. 2 Experiment results

curve (a): the associated shot-noise power spectrum;
curve (b): the beam intensity difference noise power spectrum;
curve (c): the electrical noise floor

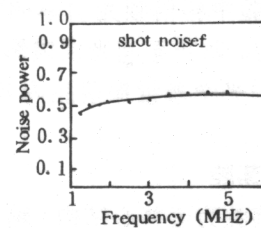


Fig. 3 Intensity difference noise spectrum. The points are experimental data

结 论 由于双KTP串接最大限度消除了两正交偏振模之间的光束离散效应及偏振混合现象,所以有利于通过光学参量振荡腔内参量下转换过程获得高强度量子相关孪生光束,这种具有强度差压缩特性的类激光,在灵敏度高于散离噪声极限的光学测量中,如痕量吸收光谱分析等,具有特殊的应用潜力,也可在保密通讯等领域获得应用。

参 考 文 献

- [1] R. E. Slusher, L. W. Hollberg, B. Yurke *et al.*, Observation of squeezed states generated by four-wave mixing in an optical cavity. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(22): 2409~2412
- [2] L. A. Wu, H. J. Kimble, J. Hall *et al.*, Generation of squeezed states by parametric down conversion. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(20): 2520~2523
- [3] S. Machida, Y. Yamamoto, Ultrabroadband amplitude squeezing in a semiconductor laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **60**(9): 792~794
- [4] A. Heidmann, R. J. Horowicz, S. Reynaud *et al.*, Observation of quantum noise reduction on twin laser beams. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(22): 2555~2557
- [5] 彭堃堦, 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
- [6] J. J. Snyder, E. Giacobino, 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
- [7] C. D. Nabors, R. M. Shelby, Two-color squeezing and sub-shot-noise signal recovery in doubly resonant optical parametric oscillators. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **42**(1): 556~559
- [8] J. Mertz, T. Debuisschert, A. Heidmann *et al.*, Improvement in the observed intensity correlation of optical parametric oscillator twin beams. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(16): 1234~1236
- [9] 刘晶, 谢常德, 廉毅敏等, 双KTP晶体倍频过程的实验研究. *光学学报*, 1991, **11**(5): 409~411
- [10] C. Fabre, E. Giacobino, A. Heidmann *et al.*, Noise characteristics of a non-degenerate optical parametric oscillator. *J. Phys.*, 1989, **50**(15): 1209~1225
- [11] Gao Jiangrui, Wang Hai, Huang Maoquan *et al.*, Intracavity frequency-doubled and stabilized CW ring Nd:YAG laser with a pair of KTP crystals. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(9): 1519~1522

Quantum Correlated Twin Beams Generation Through an Intracavity Parametric Down-conversion in a Pair of KTP

Wang Hai Xue Chenyang Gao Jiangrui Xie Chengde Peng Kunchi

(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006)

(Received 20 September 1996; revised 14 November 1996)

Abstract The quantum correlated twin beams have been generated by an optical parametric oscillator with a pair of KTP crystals, the total power of the output twin beams is 23 mW at the pump power of 300 mW. The quantum noise reduction of 50% (3 dB) in the intensity difference between the twin beams was observed near 1.25 MHz.

Key words parametric down-conversion twin beams, the squeezing of the intensity difference.