

双模光场压缩态的实验研究*

彭堃堦 黄茂全 刘 晶 廉毅敏 张天才 于 辰 谢常德

山西大学光电研究所, 太原 030006

郭光灿

中国科学技术大学物理系, 合肥 230026

1992 年 6 月 9 日收到

利用非简并参量下转换过程, 在实验上获得了双模光场压缩态, 在电磁场的一正交位相分量上噪声水平较真空噪声水平下降近 30%.

PACC: 4250; 4265

一、引 言

有关光场压缩态的理论和实验研究一直吸引着人们的广泛注意. 利用参量下转换过程产生光场压缩态, 是获得光场压缩态的重要途径之一. 在简并参量下转换过程中已获得噪声水平下降近 70% 的单模光场压缩态^[1]. 本文作者在文献[2]工作的基础上, 进行了理论和实验研究, 并通过非简并(偏振正交)参量下转换过程获得双模压缩态, 其噪声水平较真空噪声水平下降近 30%.

双模光场压缩态很容易将两个正交偏振模分开, 两模之间有很强的量子相关性, 这为进一步研究量子相关性及量子非破坏测量(QND)等有关问题提供了重要条件. 文献[2]着重于通过非简并参量下转换证明连续谱动力学变量的 EPR 佯谬, 而未对双模压缩态的产生与探测进行详尽的分析. 基于双模压缩态在基础科学研究, 超低噪声光学通讯与光学测量中的重要应用前景, 我们认为有必要对其产生机理与实验方法进行更为细致的研究. 同时我们在实验方法上也作了某些改进. 文献[2]采用内腔充入色散气体并通过压强控制的方法, 补偿进入 OPO 腔的泵浦波与亚谐波模之间的光程差, 但由于 OPO 腔难以密闭, 加之空气流动等因素的影响, 系统稳定性较差. 我们通过内腔插入光楔补偿程差, 达到三模稳定共振. 同时, 还采用测定本底光与腔透射红外光之间干涉条纹可见度的方法, 严格地测定与校对探测器的零差效率, 确保了压缩态探测的可靠性. 此外在泵浦光源与腔频锁定系统方面也有所改进.

二、理论分析

在简并参量下转换过程中, 产生的信号模和闲置模是简并的, 因此获得的光场压缩态

* 国家自然科学基金及山西省自然科学基金资助的课题.

被称为单模压缩态.但在非简并的情况下就复杂一些,信号模和闲置模是可以分开的,第一个模显示 Gaussian 起伏,类似于热场(Bose-Einstein)的起伏,然而两模组合态是光的非经典态,在信号模和闲置模叠加构成的耦合模上显示了起伏被压缩,此态称之为压缩态,它产生于信号模和闲置模之间强的量子相关性^[3].

采用非简并(偏振互相垂直)参量下转换过程如图 1 所示,频率为 2ω 的泵浦光入射到 OPO 腔内,与非线性晶体发生相互作用,产生频率为 ω 的偏振互相垂直的一对光子,系统的哈密顿量为

$$H = H_{\text{rev}} + H_{\text{irrev}},$$

$$H_{\text{rev}} = 2\hbar\omega a_1^\dagger a_1 + \hbar\omega a_2^\dagger a_2 + \hbar\omega a_3^\dagger a_3 + i\hbar k/2(a_1 a_2^\dagger a_3^\dagger - a_1^\dagger a_2 a_3) + i\hbar\epsilon_1[a_1^\dagger \exp(-2i\omega t) - a_1 \exp(2i\omega t)],$$

$$H_{\text{irrev}} = \sum (a_i \Gamma_i^\dagger - a_i^\dagger \Gamma_i), \quad (1)$$

其中 H_{rev} 代表哈密顿量中可逆部分,而 H_{irrev} 为不可逆部分, a_i, a_i^\dagger 为第 i 个模的湮灭和产生算符(a_1 为泵浦模, a_2, a_3 分别为信号模和闲置模), k 为耦合常数, $\Gamma_i, \Gamma_i^\dagger$ 为第 i 个模的热浴算符, ϵ_1 正比于相干泵浦场的振幅,耦合模为^[4]:

$$a = (a_2 + a_3)/\sqrt{2}, \quad (2)$$

$$a^\dagger = (a_2^\dagger + a_3^\dagger)/\sqrt{2}, \quad (3)$$

其正交可测分量为

$$D_+ = (1/2\sqrt{2})(a_2 + a_3 + a_2^\dagger + a_3^\dagger), \quad (4)$$

$$D_- = (1/2\sqrt{2})(a_2 + a_3 - a_2^\dagger - a_3^\dagger), \quad (5)$$

测不准原理要求

$$\langle (\Delta D_+)^2 \rangle \langle (\Delta D_-)^2 \rangle \geq 1/16.$$

如果某一分量上起伏小于 $1/4$, 则此态称为双模压缩态. 我们通过理论分析得到, 泵浦能量接近阈值时可获得最大的起伏减少, 高于或低于阈值均可产生双模压缩, 但压缩度较阈值处低. 低于阈值获得压缩真空态, 高于阈值输出压缩相干态, 当 OPO 腔运转于阈值以上时可能产生跳模现象而影响系统的稳定性, 同时难于保证频率简并, 所以我们的实验在阈值以下进行, 获得压缩真空态.

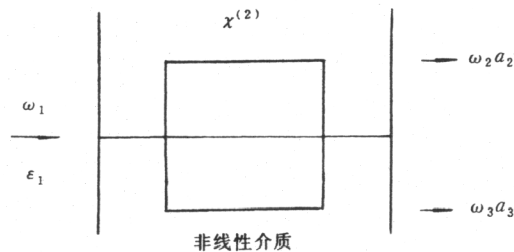


图 1 非简并参量振荡器(OPO)

三、实验装置

实验装置如图 2 所示,主要由三部分组成.

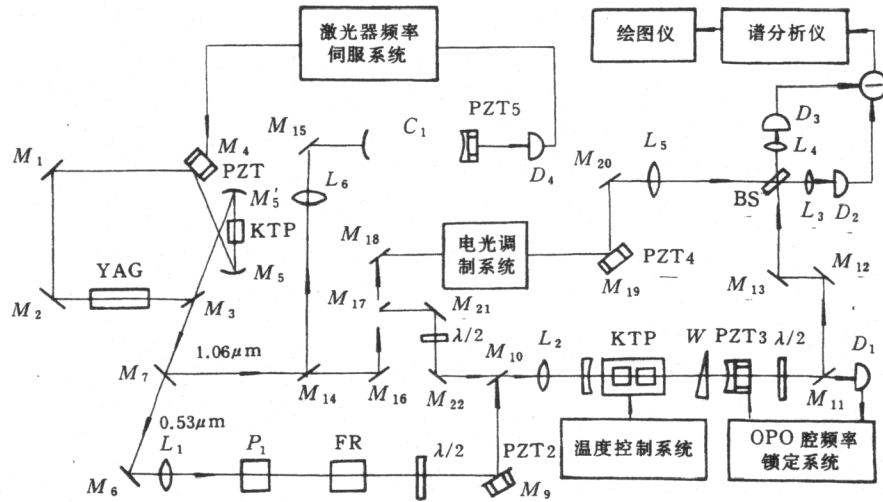


图 2 实验装置示意图

1. 泵浦光源

由于泵浦光自身强度起伏与频率漂移均会在相当大的程度上影响压缩态产生与探测,所以实验对光源要求甚高.我们在原有倍频稳频 Nd:YAG 激光器的基础上^[5,6],采用环行六镜腔形,倍频晶体 KTP 被置于曲面腔镜 M_5 与 M_6 的共心处并精密控温,在保持倍频光($0.53\mu\text{m}$)的频率稳定性小于 10MHz 的情况下,获得基频光($1.06\mu\text{m}$)输出 800mW ,其波动小于 4% ,倍频光输出 250mW .一般倍频光输出稳定在 180mW 左右,连续工作十几小时,输出功率没有明显下降.实验过程中不容许纵模跳动.

经分色镜 M_7 反射的基频波,一小部分经反射镜 M_{14} 与 M_{15} 及匹配透镜 L_6 进入作为鉴频器的共焦腔 C_1 ,用于激光器频率锁定.其余一部分经 M_{16} 和 M_{18} 反射进入平衡零拍探测系统,作为压缩态探测必须的本底振荡光,另一部分经反射镜 M_{17} , M_{21} 和 M_{22} 注入参量振荡腔,用作辅助光路及腔镜校准的探针光束.探针光的偏振方向可以通过光路中的 $1/2$ 波片随意变换.透镜 L_2 使红外探针光与 OPO 腔模匹配.

输出的倍频光经模匹配透镜 L_1 与 L_2 进入 OPO 腔,作为参量下转换过程的泵浦光源,偏振棱镜 P_1 与法拉第旋转器 FR 构成光学隔离系统,防止由腔镜反射回来的光进入激光器,以保证激光器稳定运转.

2. 光学参量振荡腔(OPO)

这是实验的关键部分,参量下转换与光场压缩态产生均在腔中进行.由于任何损耗机制都将破坏亚谐波模 a_2 和 a_3 之间的量子相关,从而降低耦合模的压缩度^[4],因此所有内腔元件及由输出镜到探测器之间的光学输出元件均要求具有很高的光学质量,将光学损耗降至最低限度.

我们采用非对称共心腔型结构,腔长为 150mm,前镜曲率半径为 50mm,对 $1.06\mu\text{m}$ 的反射率大于 99.7%,对 $0.53\mu\text{m}$ 的反射率近似等于 97%,后镜曲率半径为 100mm,对 $1.06\mu\text{m}$ 的反射率近似等于 94%.对 $0.53\mu\text{m}$ 的反射率大于 99.7%.两块长为 5mm,宽高皆为 3mm 的 KTP 晶体,按一定方法串接,并置于 OPO 腔内泵浦光的腰斑处,以期获得最大增益.双 KTP 晶体串接可以消除偏振垂直亚谐波模之间的离散效应^[8].晶体放置在精密控温炉中,当炉温达到一特定值时,参量下转换产生的两正交偏振模,在晶体中的双折射程差得到补偿,达到双模同时共振.尔后,再插入两面镀有双波长(泵浦波与亚谐波)增透模的微角光楔,通过调谐光在光楔中的行程长度,补偿泵浦波与亚谐波之间的光程差,达到两个亚谐波模与泵浦光之间的三模共振状态.OPO 腔的输出镜放置在筒状压电陶瓷上,通过后腔镜与 M_{11} 漏出的 $0.53\mu\text{m}$ 泵浦光进入探测器 D_1 ,与锁定系统配合,可将 OPO 腔锁定在泵浦场透射峰值.

3. 探测系统

为探测 OPO 腔输出红外光场正交位相振幅分量的起伏,我们使用平衡零拍探测器(图 3)^[9,10],一个对入射 S 偏振态为 50/50 的分束镜 BS 将本底振荡光 E_{LO} 与压缩信号光 E_s 分开,尔后两者在探测器 D_2 与 D_3 组合产生光电流.由于本底振荡光在 BS 上是由光密到光疏介质反射不产生相移,而信号光由光疏到光密介质反射产生 π 相移,于是两探测器产生光电流经减法器相减后的组合光电流将反映信号光场的噪声起伏,在本底振荡场比信号场强许多的情况下,归一化光电流起伏谱密度 $R(\Omega, \theta)$ 与压缩谱 $S(\Omega, \theta)$ 之间的关系如下^[7]:

$$R(\Omega, \theta) = 1 + \rho T_0 \beta \eta^2 S(\Omega, \theta), \quad (6)$$

其中 ρ 为输出损耗与总的腔损耗之比,可由实测腔精细度与由输出镜透射率所推算的理想精细度求得, T_0 为 OPO 腔与零差探测器之间所有光学元件的传输效率, β 为平衡零差探测器效率因子,由 D_2 与 D_3 的量子效率及探测器两臂平衡程度决定, η 为探测器零差效率,与光电二极管表面的模重叠情况有关^[11].用基频光以模匹配方式注入 OPO 腔,测定本底光与腔透射光所产生干涉条纹的可见度,则能求得 η .

$$\eta = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{4 \sqrt{U_{LO} V_s}}, \quad (7)$$

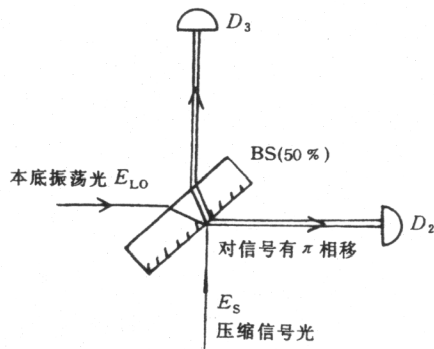


图 3 分束器造成的反射光和透射光之间 π 相移

其中 V_{LO} 与 V_s 为本底光与信号光直流光电压, V_{\max} 与 V_{\min} 为与干涉条纹峰值与谷值对应的光电压.

对我们的实验系统,测得 $\eta = 0.60$, $T_0 = 0.90$, $\beta = 0.80$ 和 $\eta = 0.90$.

四、光路调节与校准

1. 参量振荡腔校准

调整模匹配透镜 L_1 与 L_2 位置,使泵浦光($0.53\mu\text{m}$)与注入红外光($1.06\mu\text{m}$)与腔模达到完全模匹配.通过扫描 OPO 腔长度可在示波器上观察两种波长的透射峰值,当透射峰达到最高且无次峰出现时,说明匹配完善(见图 4).由于采用 II 类相位匹配,所以泵浦波应为 e_2 偏振模,通过旋转位于泵浦波光路上的半波片,可使输出泵浦光偏振严格平行于 e_2 方向.旋转红外光路上的半波片,使 e_1 和 e_2 红外两偏振模的透射峰值具有相等的高度,然后加温双 KTP 晶体,使两偏振模重合,即达到偏振模 e_1 和 e_2 同时在 OPO 腔中共振,这时插入并缓慢移动光楔以补偿泵浦波与亚谐波模之间的程差,从示波器上观察,当泵浦波透射峰与亚谐波透射峰在同一位置出现时获得三模共振状态. KTP 晶体按频率简并下转换要求切割,为了确保参量振荡腔输出的信号波与闲置波同频率,我们扫描泵浦光的位相,仔细调整 KTP 晶体在腔中的方位,使注入红外光增益达到最大.获得最大增益后,停止腔长位相扫描,将 OPO 腔锁定在泵浦光($0.53\mu\text{m}$)的透射峰上.由于注入信号严格为泵浦光频率的二分之一,所以 OPO 腔锁定于信号最大增益处即保证了参量下转换过程两亚谐波模频率简并.实验测得 OPO 腔对红外光与泵浦光的精细度分别为 60 和 80.

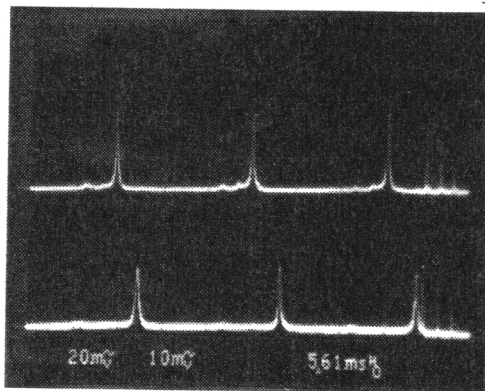


图 4 OPO 腔三模分别共振 上曲线为红外光的两个正交偏振模分别共振;下曲线为泵浦绿光的一个偏振模共振

2. 平衡零差探测器校准

平衡零差探测器的探测效率与两臂平衡状况直接影响压缩态探测的可靠性与准确度,因此在探测之前必须严格校准.由于 OPO 腔运转于阈值之下,所以通过注入模匹配红外光束的输出信号模拟压缩光场进行调整.

首先,为了提高探测器的零差效率 η ,必需要求本底光与红外信号光模空间分布严格重合,即调整通过分束器 BS 之后两臂上的本底与信号高斯光束的空间横向模式,达到在长距离范围内重叠.模式重叠通过调节本底振荡光路上匹配透镜 L_5 的焦距与位置完成.两模重叠情况可以用干涉条纹可见度定量表征[见方程(7)].我们每次测量压缩态之前,

均将 η 调节到 90% 以上.

为了保证噪声信号探测的精确度,在本底光光路中加入电光调制器,用噪声探测频率 (2MHz) 调制本底光,并在与减法器相连接的谱分析仪上观察此调制信号. 调整置于探测器一臂中的衰减器与相移器,使调制信号在谱分析仪上显示的峰值被完全减掉,这就意味着探测系统在 2MHz 处处于严格平衡状态. 由于探测元件在不同频率的噪声起伏不可能完全一致,在探测频率上进行严格校准,对提高探测精度是完全必要的. 从理论计算可知,该过程在零频附近压缩度最高^[4],但在零频附近激光器自身的热噪声很大,而高于几兆赫以上,激光噪声显著降低. 作为折衷,我们取 2MHz 为探测频率.

在探测器调平衡之后,屏蔽住 OPO 腔的注入红外光束,即可进行压缩态探测.

五、实验结果与讨论

在频率简并偏振正交的参量下转换过程中,两亚谐波模中 e_1 与 e_2 偏振态的光子总是同时成对产生,因此在共振情况下它们的耦合模的偏振方向与 e_1 和 e_2 夹角为 $\pm 45^\circ$. 为探测耦合模的噪声压缩,在零差探测器中信号模与本底振荡场应该具有相同的偏振方向,为此在 OPO 腔输出端置一 $1.06\mu\text{m}$ 波长双面增透半波片,其晶轴与 e_1 夹角成 22.5° ,使耦合波经波片后偏振面旋转 45° ,从而与沿 e_1 方向偏振的本底光同偏振方向(该方向亦为分束器 BS 的 S 偏振方向). 用反射镜 M_1 上的 PZT 扫描本底振荡的位相 θ ,则能通过平衡零差探测器在谱分析仪测量耦合模噪声起伏的位相依赖关系. 测定过程中谱仪的分析频率固定在 2MHz,本底光电流电压约 5mV.

首先屏蔽 OPO 腔输出,此时 BS 信号通道为真空场,在谱分析仪上观察到一条与位相无关的有微小波纹的水平线,此即真空噪声基准或称标准量子极限,然后去掉屏蔽,噪声被压缩的耦合模进入信号通道,谱分析仪上出现周期性噪声起伏. 将分析信号输入存储示波器,再通过绘图仪绘出结果. 如图 5 所示,我们的实验获得的最低噪声水平较真空噪声基准下降近 30%;此值是根据实测光电流起伏 R ,用 $R=1-S$ [见方程(6)] 直接计算而

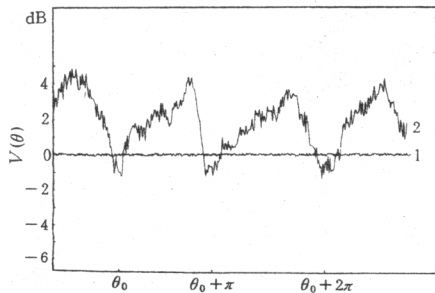


图 5

$V(\theta)$ 为信号进入平衡零拍探测器产生的与本底振荡位相 θ 相关的 rms 噪声电压; 1 为 OPO 腔被屏蔽时,真空场进入探测器产生噪声电压 V . 不依赖于 θ ,即真空噪声; 2 为显示与位相 θ 有关噪声对于真空噪声水平的偏离

得. 若计及系统的损耗与量子效率因子按公式

$$S = \frac{R - 1}{\rho T_0 \beta \eta^2} \quad (8)$$

进行计算,则 S 应为 -85% . 因此改进光学系统及探测器的效率可望获得更高的压缩度. 此外若使输出镜反射率增高,减小红外透射损耗,增加腔的经典增益也能进一步提高压缩量.

从图 5 看到压缩场位相依赖关系出现不规则变化(随 θ 变化不等间距),这是由于本底振荡光程存在微小不规则起伏所致(声振动、PZT 机械振动等)^[12]. 目前我们正做进一步改进工作,以减小系统损耗,增加机械稳定度,提高传输与探测效率,可望将实测噪声压缩提高到 60% 以上,以接近可实用水

平.

物理研究所吴令安副研究员、华北光电研究所周寿桓高级工程师、山东大学化学系蒋德华教授,对我们整个工作给予了大力支持和帮助,在此一并致谢.

- [1] L-A Wu, H. J. Kimble, J. L. Hall and H. Wu, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986),2520.
- [2] S. F. Pererira, Peng Kunchi, H. J. Kimble, *Coherence and Quantum Optics VI*, Plenum Press, New York, (1990), p. 889.
- [3] S. M. Barnett and P. L. Knight, *J. Mod. Opt.*, **34**(1987),841.
- [4] Zhang Tian-cai(张天才), Xie Chang-de(谢常德) and Peng Kun-chi(彭堃堦), *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, **2**(1992),94.
- [5] 彭堃堦、李瑞宁、黄茂全、刘晶、靳少征、李军、周寿桓, *中国激光*, **16**(1989),449.
- [6] 郜江瑞、张小虎、李军、彭堃堦、蒋德华, *中国激光*, **18**(1991),722.
- [7] L-A Wu, Min Xiao and H. J. Kimble, *J. Opt. Soc. Am.*, **B4**(1987),1465.
- [8] 刘晶、谢常德、康毅敏、郜江瑞、彭堃堦, *光学学报*, **11**(1991),410;602.
- [9] H. P. Yuen and V. W. S. Chen, *Opt. Lett.*, **8**(1983),177.
- [10] J. H. Shapiro, *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**(1985),237.
- [11] L. Mandel and E. Wolf, *J. Opt. Soc. Am.*, **65**(1975),413.
- [12] R. E. Slusher, L. W. Hollberg, B. Yurke, J. C. Mertz, J. F. Valley, *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985),2409.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ABOUT TWO-MODE SQUEEZED STATE GENERATION OF LIGHT FIELD

PENG KUN-CHI HUANG MAO-QUAN LIU JING LIAN YI-MIN
ZHANG TIAN-CAI YU CHEN XIE CHANG-DE
Institute of Opto-electronic Researches, Shanxi University, Taiyuan 030006

GUO GUANG-CAN
University of Science and Technology of China, Hefei 230026

(Received 9 June 1992)

ABSTRACT

Two-mode squeezed states of light field are experimentally generated by nondegenerate parametric down conversion in an optical cavity. Noise reductions of about 30% relative to the vacuum noise level are obtained in the quiet quadrature of the electromagnetic field.

PACC: 4250;4265