

文章编号: 1007-6654(2009)03-0207-04

孪生光束时域内的关联特性

翟淑琴, 杨荣国, 刘奎, 郜江瑞, 张俊香

(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: 本文在实验上测量了运转于阈值以上的双共振光学参量振荡器所产生的孪生光束在时域内的关联特性。在分析腔带宽对孪生光束强度量子关联影响的基础上, 通过时域内的数据采集, 运用改变孪生光束其中一臂的时间延时的方法来考察时域内孪生光束关联度的变化。在实验上给出了孪生光束关联度大小随时间变化的结果。

关键词: 光学参量振荡器 (OPO); 孪生光束; 时间关联

中图分类号: O431 文献标识码: A

光学参量振荡过程是产生非经典光场的重要手段之一。运转于阈值以上的非简并光学参量振荡 (NOPO) 腔, 通过参量下转换产生的信号光与闲置光是“类激光”的高强度量子相关孪生光束。在理想的参量下转换过程中, 泵浦光每湮灭一个光子, 会同时产生两个光子, 产生的下转换光束具有相同的光子统计分布。在 OPO 中, 腔的损耗会导致下转换光束关联度的降低, 当计数时间长于腔的存储时间的时候, 两个输出光束的光子数几乎相等。换句话说, 在腔带宽频率范围内输出光场的强度差噪声是低于散粒噪声极限 (SNL) 的, 信号光与闲置光是一对强度量子关联光束对。

由于孪生光束只考虑强度, 不用考虑正交分量, 在测量中省去了复杂的锁相系统, 在实验实现上相对简单, 易于广泛的应用。早在上世纪末期, 几个研究组分别实验产生了高亮度孪生光束, 并用自零拍探测装置测量了孪生光束的强度量子关联^[1-4]。自此之后, 孪生光束的产生和应用得到了广泛的研究。利用孪生光束, 人们实现

了亚泊松场的条件制备和条件量子关联传递^[5,6], 随后实验实现了实际光场上的可调谐亚泊松场制备和量子关联传递^[7,8]。近几年也有了利用孪生光束实现连续变量量子密码术的报道^[9-11]。在利用阈值以上的 NOPO 产生的孪生光束进行相关实验的研究过程中, 一般都是在频域内进行的, 通过在频谱分析仪上记录光电探测器产生的差电流来得到孪生光束的关联程度。最近时域内的相关研究引起了人们的关注^[12]。这些研究为时域内量子信息和量子通讯的应用开辟了道路, 成为人们普遍关注的研究课题。本文从 NOPO 腔产生的孪生光束出发, 通过探测器分别对两束下转换光进行直接测量, 然后对信号进行混频滤波之后, 进行高速采集, 分析了孪生光束强度量子关联在时域内的变化。

运行于阈值以上的 NOPO 所产生的两个下转换光场已经在实验上和理论上被证明在同一测量时间内存在强度上的量子关联。在本实验中, 用光电探测器对两个下转换模分别进行直接探测, 在直接探测的过程中, 电流中的大部分电子是光

收稿日期: 2009-01-11

基金项目: 国家自然科学基金 (10774096 60708010 60821004); 国家基础研究项目基金 (2006CB921101); 山西省归国留学人员基金

作者简介: 翟淑琴 (1975-) 女, 山西襄汾人, 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在读博士, 主要从事量子光学与量子信息的研究, E-mail: xiaozha@sxu.edu.cn

电子, 平均电流可以用光电子的平均数 $\langle n \rangle$ 来表示, 因此光电流的起伏可以用光子数的起伏来表示^[13]:

$$\begin{aligned} \langle (\Delta i)^2 \rangle &= \langle \hat{i}^2 \rangle - \langle i \rangle^2 \\ &= (e/T)^2 (\langle \hat{n}^2 \rangle - \langle n \rangle^2) \\ &= (2e\Delta f)^2 \langle (\Delta n)^2 \rangle \end{aligned} \quad (1)$$

其中, e 为电子电量, $\Delta f = 1/2T$ 为探测系统的带宽。因此, 在特定频率点的电流起伏正比于光电子数起伏, 而光电子数起伏依赖于光场量子

态的特征。

在理想探测情况下

$$\langle (\Delta i)^2 \rangle = (2e\Delta f)^2 \langle (\Delta n)^2 \rangle$$

考虑到实际实验中的探测效率, 可以得到

$$\langle (\Delta i)^2 \rangle = (2e\Delta f)^2 [\eta^2 \langle (\Delta n)^2 \rangle + (1 - \eta) \langle n \rangle] \quad (2)$$

时域内孪生光束强度量子关联的实验装置如图 1 所示。

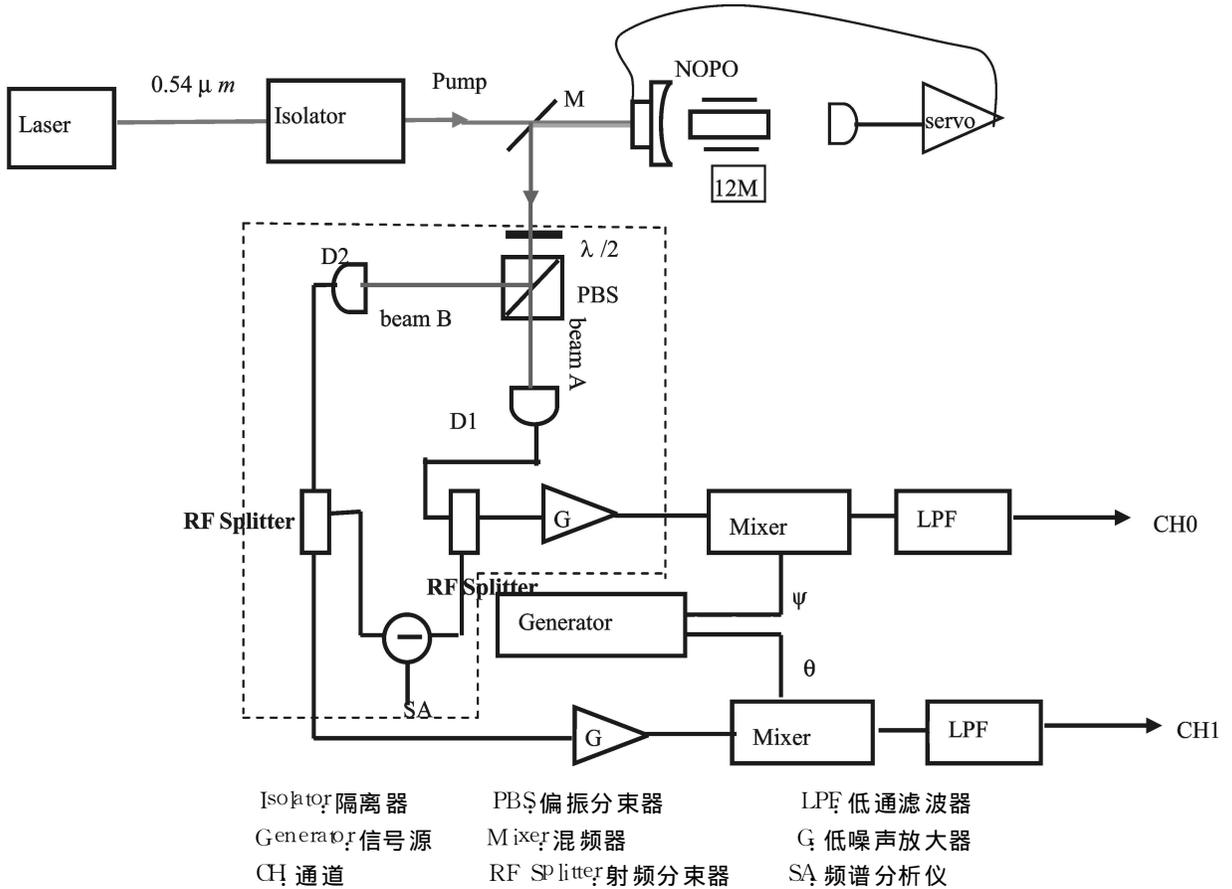


图 1 实验装置图
Fig 1 Experimental setup

实验中所用的激光器是一台自制的连续波内腔倍频 Nd:YVO₄/KTP 环形激光器, 输出二次谐波波长是 532 nm, 二次谐波经过光隔离器后用于泵浦非简并光学参量振荡器 (NOPO) 产生强度量子关联孪生光束 A 和 B。该 NOPO 腔由一块 α 切割的 KTP 晶体和一个 R=20 mm 的凹面镜组成半整体 NOPO 腔。KTP 晶体一面镀 0.53 μm/1.06 μm 双高透膜, 另一面则对于两波长均镀高反射膜, 用作 NOPO 腔的一个腔镜。凹面镜为输出镜, 对泵浦光高透, 红外透射率约为 3%。采用

边带锁腔技术 (Pound-Drever-Hall technique), 将 12 MHz 的调制信号直接加在 KTP 晶体上, 利用高灵敏红外光探测器直接探测透过 NOPO 高反射端泄露的下转换光, 经过混频滤波送往反馈回路, 以达到动态稳定谐振腔的目的。输出的下转换红外光和泵浦绿光在一绿光增透红外高反的二色镜 M 上分开。下转换光由一对频率非简并, 偏振垂直的光束组成, 用偏振棱镜 PBS 将其分开为光束 A 和光束 B。根据腔的精细度, 可算出此 NOPO 腔的线宽约为 55 MHz。常温下 NOPO 输出

的信号光与闲置光的波长分别是 1 039 nm和 1 089 nm, 这两个偏振垂直的光学模分别由两个量子效率探测器 (D_1 和 D_2) 进行探测, 由于两下转换波长不同, 反射镜带宽有限, 引起两模的损耗及输出耦合率不同, 在一定程度上降低了孪生光束的强度量子关联。

因为光电流比较高, 探测器不能响应单个的光子, 而是产生了与两个下转换光场相对应的大的平均电流及小的起伏 (经典的与量子的), 不直接测量电流 $i_1(t)$ 与 $i_2(t)$, 将电流信号 $i_1(t)$ 与 $i_2(t)$ 经过低噪声放大器分别进行放大后, 与 4 MHz 的本底信号进行混频, 经 100 kHz 的低通滤波之后, 送入示波器进行同时数据采集。我们可以获得在某一小的带宽内的光电流谱 $i_1(\Omega, t)$ 和 $i_2(\Omega, t)$ 。最后的测量结果是对应于 beam A 与 beam B 的光子流,

$$\begin{aligned} \hat{a}_1^\psi &= [\hat{a}_1(\omega + \Omega) \exp(-i\psi) + \hat{a}_1(\omega - \Omega) \exp(i\psi)] \\ \hat{a}_2^\theta &= [\hat{a}_1(\omega + \Omega) \exp(-i\theta) + \hat{a}_1(\omega - \Omega) \exp(i\theta)] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, \hat{a}_1 (\hat{a}_2) 对应于探测器 D_1 (D_2) 探测的光束, ω 为光频, ψ (θ) 为驱动混频器的相位。

由 NOPO 产生的孪生光束分别为热光场, 但孪生光束中的每对光子是由泵浦源中的一个高频光子同时产生, 它们的强度具有相同的起伏特征, 强度差噪声低于相应散粒噪声基准。探测从 NOPO 腔出来的两个下转换模的强度差噪声起伏, 需要用图 1 虚线框内的自平衡零拍探测系统。从射频分束器出来的一路信号从谱仪上进行观察, 在 $\Omega = 4$ MHz 处有较好的强度量子关联。谱仪输出的结果可以看出孪生光束在频域范围的强度量子关联为 3-4 dB, 当 $\lambda/2$ 波片的光轴与 PBS 透光方向间的夹角 $\theta = 0$ 时, \hat{a}_1 和 \hat{a}_2 分别对应于信号光与闲置光, 此时对两束孪生光束分别进行信号采集, 它们间的强度量子起伏如图 2 所示, 它们之间的强度起伏呈现量子关联。当 $\theta = 22.5^\circ$ 时, 记录的结果为散粒噪声基准。

对 beam A 与 beam B 的数据采集是在 $\Omega = 4$ MHz 处进行的, 然后进行 100 kHz 的低通滤波, 所设定的示波器的采集速率为 2 Ms/s, 两个通道同时采集, 每个通道各采集 65 000 个数据点。将

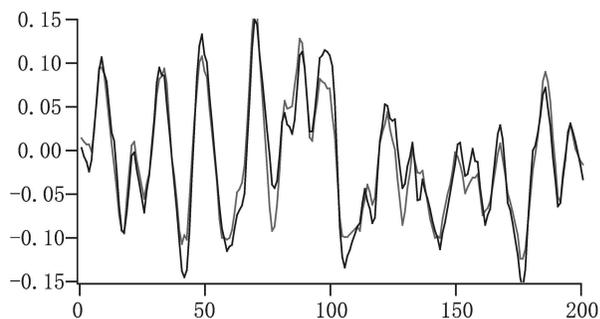


图 2 孪生光束的强度量子起伏

Fig 2 Intensity fluctuation of twin beams

其中一臂的数据点进行时间延时, 相当于改变两臂光的关联时间。如图 3 所示, 其中直线为孪生光束的散粒噪声基准, 点为不同时间延时后两束光的强度量子关联。从图中可以看出, 孪生光束在 $1.5 \mu\text{s}$ 内存在强度量子关联。当延时 $1.5 \mu\text{s}$ 后, 强度差关联噪声与散粒噪声基准一样大, 再接着延时, 强度差关联噪声逐渐高出散粒噪声基准, 此结果表明孪生光束的强度量子关联除直接受 NOPO 腔带宽及泵浦光带宽的影响外, 也存在一定时域内的强度量子关联。

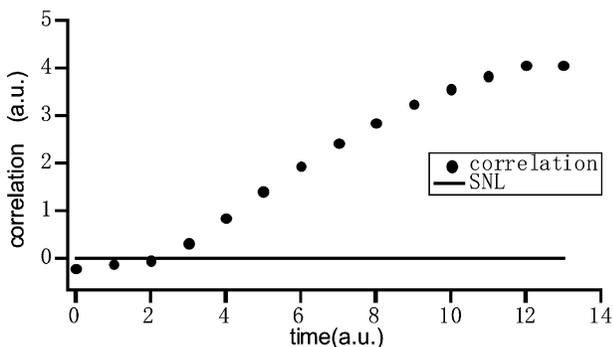


图 3 孪生光束的时间关联特性

Fig 3 The result of intensity correlation in time domain

本文从运转于阈值以上的双共振光学参量振荡器所产生的孪生光束出发, 实验上通过直接探测的方法, 通过改变孪生光束其中一臂的时间延时, 考察了时域范围内孪生光束的强度量子关联。分析了孪生光束的时间关联特性。本文的分析结果将对时域内光场的关联及纠缠测量提供参考。

参考文献:

- [1] HEIDMANN A et al. Observation of Quantum Noise Reduction on Twin Laser beams [J]. Phys Rev Lett 1987, **59**: 2555
- [2] SOUTO RIBEIRO P H et al. Sub-shot-noise High-sensitivity Spectroscopy with Optical Parametric Oscillator Twin Beams [J]. Opt Lett 1997, **22**: 1893
- [3] WANG H et al. Experimental Realization of a Quantum Measurement for Intensity Difference Fluctuation Using a Beam Splitter [J]. Phys Rev Lett 1999, **82**: 1414
- [4] GAO JR et al. Generation and Application of Twin Beams From an Optical Parametric Oscillator Including an α -cut KTP Crystal [J]. Opt Lett 1998, **23**: 870
- [5] LAURAT J et al. Conditional Preparation of Quantum States in the Continuous Variable Regime: Generation of Sub-Poissonian States From Twin Beams [J]. Phys Rev Lett 2003, **91**: 213601.
- [6] ZHANG Y et al. Conditional Transfer of Quantum Correlation in the Intensity of Twin Beams [J]. Phys Rev A 2005, **71**: 062341.
- [7] ZOU H et al. Preparation and Measurement of Tunable High Power Sub-Poissonian Light Using Twin Beams [J]. Opt Lett 2006, **31**: 1735
- [8] ZOU H et al. Transfer of Intensity Quantum Correlation with Twin Beams [J]. Opt Lett 2007, **32**: 2218
- [9] FUNK A C et al. Quantum Key Distribution Using Nonclassical Photon Number Correlations in Macroscopic Light Pulses [J]. Phys Rev A 2002, **65**: 042307.
- [10] ZHANG Y et al. Quantum Channel Using Photon Number Correlated Twin Beams [J]. Opt Express 2003, **11**: 3592
- [11] JIA X et al. Quantum Key Distribution Based on Quantum Intensity Correlation of Twin Beams [Z/OL]. (2005) Quant Ph /0504059
- [12] ZHANG Y et al. Investigation of the Photon Number Statistics of Twin Beams by Direct Detection [J]. Opt Lett 2002, **27**: 1244
- [13] BACHOR H A. Guide to Experiments in Quantum Optics [M]. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 1998

Quantum Correlation of Twin Beams in Time Domain

ZHAI Shu qin YANG Rong guo LIU Kui ZHANG Jun xiang GAO Jiang ni

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

Abstract This paper discusses a time domain measurement scheme of quantum correlation of twin beams generated by a non-degenerated optical parametric oscillator operating above threshold. By using data acquire technique we analyzed quantum correlation of twin beams in time domain. An experimental demonstration about the change of quantum correlation of twin beams along with the time is given in this paper.

Key words optical parametric oscillator (OPO); twin beams; time domain