DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2002.08.007

·成果简介·

全固化多功能压缩态光场产生系统

郭蕊香 贾晓军 彭堃墀

(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,太原 030006)

[关键词] 光压缩器,全固化

20 世纪 60 年代激光的出现使人们获得了噪声极低的相干光源。相干态光场的噪声是经典光源噪声的最小极限,被称为散粒噪声极限或标准量子极限(Standard Quantum Limit)。随着现代科学技术标准进展,使光学测量和光学通讯的精度已经接近量子极限(真空涨落)的水平。当我们把电磁场作为一量子体系处理时,描写电磁场的两正交分量存在无规真空涨落(量子噪声),即使我们采用有效方法去掉测量过程中所有经典误差源的影响,量子噪声仍然存在于各种形式辐射之中,它本质上来源于光的量子性,它的存在从根本上限制了光学测量和光学通讯精度的进一步提高。因此,突破散粒噪声极限,寻找更"安静"的光源,在量子水平上来观察物理现象是近三十年来物理学家十分关心和感兴趣的研究课题,特别是对引力波探测和量子信息科学的发展,更加促进人们对压缩态光场产生及应用研究的极大关注。

1 压缩态光场的实验研究

近十几年来实验研究证明,量子噪声带来的限制能够克服和突破,一个行之有效的方法就是在不违反测不准原理的前提下,使光场的某一正交分量起伏低于标准量子极限,同时另一正交分量起伏变大。当光场某一场分量的量子起伏低于相干态相应分量起伏时,该光场称为光场压缩态 (Squeezed State of Light)。1985 年 Bell 实验室 R.E.Slusher 研究组选用运转于钠原子共振线附近的非简并四波混频作为非线性过程[1],获得噪声功率相对真空涨落降低 7% 的结果,首次在试验上观察到光场压缩态。1986 年美国 Texas 大学 J.Kimble 研究组[2]利用运转于阈值以下光学参量下转换过程,使输出场噪声功率相对于真空涨落降低 63%。之后各国纷纷开展了此方面的研究,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压缩态光场产生系统,产生方法大致可分为两大类,一种方法是利用激光器直接获取压缩光,即通过直接变换或反馈修正技术控制高性能的半导体激光器电流驱动源以获取光子数呈亚泊松分布的振幅压缩态光场[Quadrature Phase (Amplitude) Squeezed State of Light];另一种方法是通过光波场和物质非线性相互作用,在相敏放大与衰减过程中使光场正交位相振幅之一的起伏被"压缩"到低于标准量子极限以下,获得正交位相(振幅)压缩态光场,或利用光学参量下转换过程产生具有强度相关孪生光束(Twin-Beam),其强度差量子起伏低于标准量子极限,获得强度差压缩态光场(Intensity Difference Squeezed State of Light)。因此,目前实验已获得的压缩态光场主要有以下三种,即光子数压缩态又称振幅压缩态或强度压缩态;正交位相(振幅)压缩态光场和强度差压缩态光场。以上三种压缩态性质完全不同,但又相互联系,从不同角度反映了电磁场的压缩态性。1998 年澳大利亚国立大学 Bachor 小组与山西大学光电研究所合作[3],利用全固化技术和整块(Monolithic)OPO 腔装置,获得 80%(7dB)压缩的单模正交位相压缩态光场,1998 年山西大学光电所[4]利用 α 切割 KTP,Nd:YAG 系统 (1.06 μm),获得 88%(9.2 dB)压缩的频率非简并强度差压缩态光场,这是目前压缩态实验的最好结果,采用光学参量振荡腔获得压缩态光场被认为是最有效的产生途径。

国家自然科学基金重点资助项目.
本文于 2002 年 6 月 3 日收到.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 压缩态光场的应用研究

目前光场压缩态产生原理性研究已趋成熟,人们已将注意力转向如何进一步提高压缩态光场的压缩度,向实用化发展,并将它尽快应用于各个方面。压缩光现已被应用于精密光学测量,突破散粒噪声极限的超高精度光谱实验和量子非破坏测量等领域。1987 年,M.Xiao 与 P.Grangier 等利用用正交压缩真空态光场填补 Mach-Zehnder 干涉仪的暗通道[5],使相移,偏振面旋转的测量灵敏度突破散离噪声极限。1988 年 P.R.Tapster[6]使用氩离子激光器(413.4 nm)泵浦 KDP(10 mm)晶体产生的 60 PW 孪生光束实现了亚散粒噪声极限的调制吸收测量,测得信噪比较散粒噪声极限提高 4 dB。1990 年 C.D.Nabors[7]用频率非简并的强度差压缩光进行微弱信号恢复实验研究,获得了信噪比低于散粒噪声极限 2.2 dB 的实验结果。1992 年 E.S.Plozik[8]将频率可调的正交压缩真空态光场应用于铯原子光谱测量,测量灵敏度较散粒噪声水平提高 3.1dB。1996 年山西大学光电所[9]提出了利用孪生光束进行微弱吸收光谱学测量的理论方案,并进行了无调制样品微弱吸收测量的实验研究,测量灵敏度较散粒噪声极限提高 2.5 dB,随后又改进探测装置并提高孪生光束强度差压缩度,使测量灵敏度较散粒噪声极限提高 7 dB[4]。光场压缩态还被应用于量子非破坏测量,M.D.Levenson 小组 ,H.J.Kimble 小组和 Grangier 小组通过正交振幅分量,利用二阶和三阶非线性效应实现了几种不同类型的 QND 测量[10],1998 年山西大学光电所利用量子相关孪生光束完成"类 QND"测量[11]。

近年来,量子信息科学的快速发展为 21 世纪的信息科学提供了新的原理和方法,而量子非局域关联是量子信息研究的基础。1982 年 Aspect 小组[12]首次利用 Ca_{40}原子在级联过程中辐射出的纠缠光子验证了 Bell 不等式,在实验上证明了传统量子力学理论的正确性,他们的实验加深了人们对量子理论的理解,同时也成为 Bennett 等人[13]提出并被实验上证明的分离变量的量子离物传态(Quantum Teleportation)的基础。但是在这些实验中 EPR(Einstein-Podolosky-Rosen)纠缠光子对是通过自发参量下转换产生的,是概率性的,在测量之前无法预知实验何时成功。在量子离物传态中,由于概率分布性使得信号率非常低,加之探测器对单光子的探测效率很低,因此难于完成高保真度的测量。1998 年由 H.J.Kimble 小组[14]利用两束相位相干的正交位相压缩光,在 50%分束器上耦合获得连续变量的 EPR 纠缠光束,首先完成了连续变量的量子离物传态实验。2000 年山西大学光电所通过在Ⅱ类匹配的非线性晶体 KTP 构建的非简并光学参量振荡腔(NOPO)中注入信号光,利用参量缩小过程获得振幅反关联位相正关联的"明亮"的 EPR 源[15],以此为基础实现了连续变量的量子密集编码[16]。虽然连续变量的纠缠态由于损耗的引入会迅速被破坏,但它是非概率性的,因此,连续变量的 EPR 光束在量子通讯中具有特殊的意义。

3 实用化压缩态光场产生系统的研制和应用展望

3.1 实验研究

近年来,随着压缩态产生原理性研究趋于成熟以及压缩态光场应用研究的深入开展,特别是量子信息领域对压缩态光场的需求,人们已将注意力转向进一步提高压缩态光场的压缩度和研制紧凑、可靠、操作简单,能长期稳定运转的压缩态光场产生系统。进入 20 世纪 90 年代后,随着大功率激光二极管的出现和商品化,我们就有可能采用激光二极管作为泵浦源的紧凑小型全固化激光器去代替庞大低效的灯泵固体激光器,为实现实用化的压缩态光场产生系统提供了有利条件。1995 年德国 Constanz 大学的 Mlynek 小组[17]采用激光二极管泵浦的整块小型 YAG 激光器进行外腔谐振倍频获得 0.53 um 单频绿光,用于泵浦由一块 $LiNbO_3$ 晶体构成的光学参量振荡腔,分别获得可以长期稳定运转的单模正交位相真空压缩光和明亮的单模正交振幅压缩光,首次实现了全固化的压缩光产生系统。但是 $LiNbO_3$ 晶体为Ⅰ类匹配晶体,两个下转换模无法分离,因而难于在此装置上产生强度差压缩光和明亮 EPR 对,限制了它在量子信息领域的进一步应用。

国家自然科学基金委员会信息科学部为了进一步推动我国对压缩态光场的应用研究,1999 年将"实用化压缩态光场产生系统研制与压缩态光场应用研究"立为重点课题,要求利用全固化技术将庞大的压缩态光场产生系统简化、紧凑,使一般科技人员可以方便的应用于精密测量和量子通讯的研究和应用。山西大学光电所承担了这一课题。我们在连续激光二极管泵浦的固体激光器研究基础上,将全固化技术与压缩态光场产生技术结合,开展了 LD 泵浦的多功能压缩态光场产生器的研究,首先设计完

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

成了全固化 YAP/KTP 内腔倍频单频激光器，获得功率为 150 mW 波长为 540 nm 单频绿光输出[18]。由于 YAP 激光器发出的 1.080 um 激光可以在Ⅱ类非临界相位匹配的 KTP 晶体中实现倍频和简并的频率下转换，用它泵浦由 α-切割 KTP 晶体构成的光学参量振荡腔，通过控制不同的运行条件，我们获得了多种类型的压缩态光场。

多功能压缩态光源实验装置如图 1 所示，主要由两部分构成：全固化内腔倍频 YAP/KTP 单频激光器和非简并光学参量振荡腔。全固化内腔倍频 YAP/KTP 单频激光器采用整体腔设计，由作为泵浦源的激光二极管，泵浦光整形系统和谐振腔三部分组成。激光器所有元件固定在整体厚壁腔体上，并在整体腔安置腔镜镜架微调装置，可在整体腔外进行调节，在腔体上方用腔盖密封，这样就使激光器机械结构稳定，光路防尘好，可以稳定运转，同时又易于调节。非简并光学参量振荡腔采用半整块(semi-monolithic)腔结构，由一块 α-切割的 KTP 晶体和曲率半径为 r = 30 mm 的凹面镜构成，为了保证光学参量振荡腔的稳定运转，整个光学参量振荡腔固定在一体的殷钢板上。为了减少光学参量振荡腔的额外损耗，KTP 晶体一端的全反模兼作光学参量振荡腔的一个腔镜。由于采用了全固化的泵浦源，整体腔结构的激光器以及半整块光学参量振荡腔，因此整个系统紧凑稳定。在锁定状态下可稳定运转 3 小时以上，总体体积小于 540 × 370 × 150mm^3。在此装置上可以实现多种类型压缩光：在阈值以上产生近 6dB (74%)压缩的量子相关孪生光束[18](图 1)；在阈值以下，通过注入信号光参量缩小过程产生 2.1 dB 压缩的明亮正交振幅压缩光[19](图 2)，同时将参量放大器出射的两个频率简并偏振垂直的孪生光束分开，就可获得进行量子信息研究所必需的量子纠缠态——明亮"EPR"光束对。

3.2 应用前景

我们设计的这种全固化多功能压缩态光场产生系统紧凑、小型、便于操作，利于推广。通过控制不同的运行条件，在它上面可以产生强度差压缩光，正交振幅(位相)压缩光和明亮 EPR 源，由于采用注入平均光强不为零的红外种子光，通过光学参量振荡腔内的参量过程获得明亮的正交振幅(位相)压缩光，与注入真空场相比，突出的优点是可以将腔锁定在注入光的频率上，有利于非线性过程的稳定运转，同时输出场的平均值不为零大大简化了压缩态光场的探测系统，也有利于它的应用。

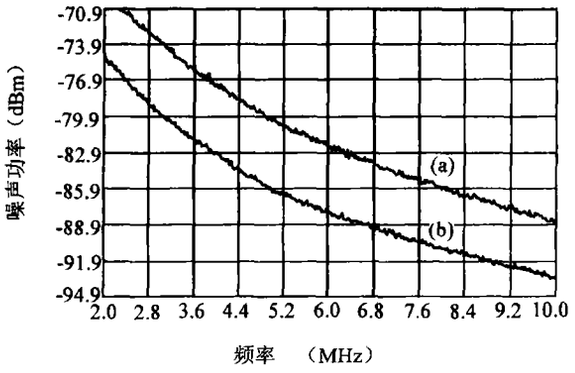

图 1 孪生光束强度差起伏噪声功率谱实验结果
分辨率带宽 100 kHz，视频率带宽 100Hz
(a) 散粒噪声极限 (b) 强度差噪声功率谱

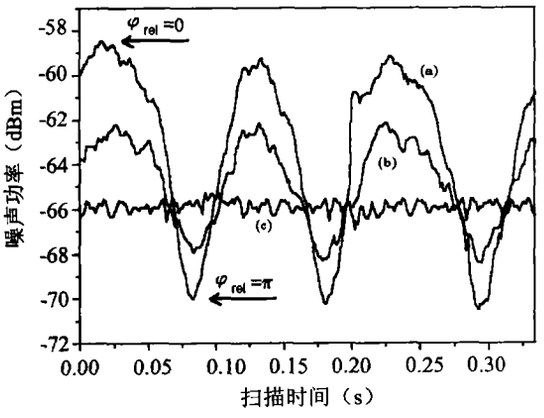

图 2 OPA 腔输出的明亮正交振幅压缩光噪声功率谱
分辨率带宽 10 kHz，视频带宽 30 Hz
(a)(b) 分别为扫描泵浦光与注入光相对位相测得的下转换光的振幅噪声和散粒噪声功率谱 (c) 为没有泵浦光时测得的注入光的散粒噪声基准

要想完成高质量的量子通信实验，如连续变量量子离物传态、量子密集编码以及量子密码术等，高关联度、高稳定性的明亮 EPR 光束的获得是首要的前提条件。我们设计的光压缩器可以在阈值以下，通过控制泵浦光与注入光的相对位相来控制输出场的压缩分量，然后将参量放大器出射的两个频率简并偏振垂直的孪生光束分开，就是进行量子离物传态，量子密集编码等量子信息研究所必需的明亮 EPR 光束对[20]。

另外，Snyder[21]早在 1990 年理论上就提出采用孪生光束实现相敏测量的思想，到目前还未见有关实验的报道，主要是由于实验上高于阈值产生的孪生光束并非严格简并的光束，且无法去控制它们之间的位相，因此无法将之应用于相敏的测量。由于

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我们所产生的压缩态光场在非简并光学参量放大器中,通过注入信号光的方法可以控制输出场的频率,由于采用了Ⅱ类匹配的 KTP 晶体作为非线性介质,下转换光容易分离,可获得频率完全简并,而偏振非简并的孪生光束,并且还可以通过控制泵浦光与注入光的相对位相,控制输出场的压缩分量,因此可以开展在相敏方面的测量。

由于我们所实现的压缩态光场产生系统——光压缩器,结构简单,操作简便,功能多样,不需要进行复杂实验过程就可获得所需 EPR 光束及各种光场压缩态,因此它,必将成为量子测量及量子信息等领域的一个非常有用的工具。

感谢国家自然科学基金重点项目(69837010)的资助。

参 考 文 献

[1] Slusher R E, Grangier P, LaPorta A et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**:2 566.

[2] Wu Lingan, Kimble H J, Hall J L et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**: 2 520.

[3] Lam P K, Ralph T C, Buchler B C et al. J.Opt., 1999, **B1**:469.

[4] Gao Jiangrui, Cui Fuyun, Xue Chenyang et al. Opt. Lett., 1998, **23**: 870.

[5] Xiao Min, Wu Lingan, Kimble H J. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**: 278; Grangier P, Slusher R E, Yurke B et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**:2 153.

[6] Tapster P R, Rarity J G, Satchell J S. Phys. Rev., 1988, **A37**: 2 963.

[7] Nabors C D, Shelby R M. Phys. Rev., 1990, **A42**:556.

[8] Polzik E S, Carri J, Kimble H J. Phys. Rev. Lett., 1992, **68**: 3 020.

[9] 王海,潘庆,薛晨阳等. 中国科学,1998, **A28**:342.

[10] Levenson M D, Shelby R M, Reid M et al. Phys.Rev.Lett., 1986, **57**: 2 473; Pereira S F, Ou Z Y, Kimble H J. Phys.Rev.Lett., 1994, **72**:214; Roch J F, Vigneron K, Grelu Ph et al. Phys.Rev. Lett., 1997, **78**:634.

[11] Wang Hai, Zhang Yun, Pan Qing et al. Phys.Rev.Lett., 1999, **82**: 1 414.

[12] Aspect A, Dalibard J, Roger G. Phys. Rev. Lett., 1982, **49**:1 804.

[13] Bennett C H, Wiesne S J. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**: 2 881; Charles H. Bennett, Gilles Brassard, Claude Crépeau, Richard Jozsa, Asher Peres, liam K. Wootters, Phys. Rev. Lett., 1993, **70**:1 895.

[14] Furusawa A, Sorensen J L, Braunstein S L et al. Science, 1998, **282**: 706.

[15] Zhang Yun. Wang Hai, Li Xiaoying et al. Phys. Rev., 2000, **A62**: 23 813.

[16] Li Xiaoying, Pan Qing, Jing Jietai et al. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**:47 904.

[17] Breitenbach G, Muller T, Pereira S F et al. J. Opt. Soc. Am., 1995, **B12**: 2 304.

[18] Guo Ruixiang, Laurat Julien, Gao Jiangrui et al. Applied Optics, 2002, **41**:2 304.

[19] 郭蕊香,贾晓军,谢常德等. 物理学报,2002, **51**:1 262.

[20] Zhang Yun, Su Hong, Xie Changde et al. Phys. Lett., 1999, **A259**: 171.

[21] Snyder J J, Giacobino E, Fabre C et al. J. Opt. Soc. Am., 1990, **B7**: 2 132.

ALL-SOLID-STATE COMPACT LIGHT SOURCE FOR PRODUCING DIFFERENT TYPES OF SQUEEZED STATES

Guo Ruixiang　　Jia Xiaojun　　Peng Kunchi

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006)

Key words　all-solid-state, squeezer

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net