

·成果简介·

压缩态光场产生与应用实验研究进展

彭堃堃

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

[关键词] 压缩态, 散粒噪声, 标准量子极限

量子光学是近30年蓬勃发展起来的前沿学科。量子光学研究光场的量子特性及量子化光场与物质的相互作用, 以揭示更多更深层次的物理效应。通过量子光学实验手段, 人们能以精美而简捷的方法直接显示与验证许多量子力学基本原理, 在量子层次上探讨辐射场及原子的动力学行为。另一方面, 某一分量噪声低于散粒噪声基准的非经典电磁场态——光场压缩态 (squeezed state), 应用于光学测量和光通讯系统, 可以突破标准量子精确度极限, 完成超微弱信息的检测与传输。

量子力学的测不准原理使光场的相位和振幅两个可测量囿于一个不可同时测准的极限区, 称为量子极限, 实验上就是可观测量的非零色散现象, 它导致电磁场的量子起伏。在以光波作为信息载体的光学测量与光学通讯系统中, 这种量子起伏噪声是限制灵敏度提高的根本原因。散粒噪声极限 (shot-noise-limit, SNL) 是在光学物理中经常碰到的量子极限, 它代表一对共轭场变量起伏的最小测不准乘积, 且两个共轭量的起伏相等。真空态 (零点起伏) 或相干态光场则具有上述起伏特性, 因此测量中以它们的起伏作为量子噪声基准, 称之为真空噪声或相干态噪声, 即为标准量子噪声极限。压缩态光场是将光波场的共轭变量之一的起伏“压缩” (squeezing) 到相应的真空起伏以下; 同时, 另一场变量起伏则增加。虽然起伏乘积依然受测不准关系制约, 但当我们光学信号编码于起伏被压缩的场分量时, 测量灵敏度将高于散粒噪声极限。从原理上讲, 某一场变量的起伏可以被压缩到趋近于零。实验上也已获得压缩度超过90%的光场压缩态, 并完成了几种将压缩态光场应用于超高精度测量^[1-3]和基本物理原理验证的实验^[4]。

当前国际量子光学研究领域已开始由纯基础科学研究向高科技应用转化, 探索小型密集的压缩态光场产生系统, 研究超越标准量子极限的光学测量技术和超微弱信息的量子传输等。

我们研究所、中国科技大学物理系与中国科学院物理研究所联合承担了国家自然科学基金重点项目“压缩态光场的实验与理论研究”, 实验研究工作主要由山西大学光电研究所承担。以下介绍近期实验研究的进展。

国家自然科学基金重点项目.

本文于1997年5月27日收到.

1 主要研究内容与进展

1.1 正交压缩态光场产生

1992年,我们用自己研制的内腔倍频稳频高功率环行 Nd:YAG 激光器作泵浦源,采用双 KTP 晶体反向串接,通过 OPO 腔内非简并参量下转换过程,从实验上获得了双模压缩态光场,输出耦合模电磁场的一个正交相位分量的量子起伏,较真空噪声水平下降近 30%^[5]。虽然双晶体串接消除了两正交偏振模之间的光束离散效应,达到了三模同时共振,但却增加了内腔损耗,从而破坏了两模之间的量子相关性,使压缩度难以进一步提高,系统稳定性也不够理想。为获得稳定的高压压缩度光场,我们研制了一种新的泵浦源——内腔倍频稳频 Nd:YAP 激光器。YAP 激光波长(1.08 μm)能在 α -切割的 KTP 晶体中实现 90°非临界相位匹配,两非简并亚谐波模在晶体中共线传输,离散现象自动消除。为增加稳定性和进一步降低泵浦阈值,我们设计了半整块(semimonolithic)光学参量振荡腔(OPO),最低振荡阈值约 20 mW。由于内腔损耗较过去的 YAG 系统大大降低,参量变换效率相应提高。近期,用这一系统获得压缩态高于 50%的正交压缩真空态光场,系统稳定性甚好,主要指标均达国际先进水平。结合实验系统设计,我们用全量子理论讨论了内腔三模相互作用过程的参量依赖关系,比较了正交压缩与强度差压缩,预示通过同一实验系统,在不同运转条件下可能产生两类压缩态光场,理论研究为实验设计提供了可靠的依据^[6]。

1.2 量子相关孪生光子对与强度差压缩的获得

除正交光场压缩态以外,运转于阈值以上的光学参量振荡腔,通过参量下转换,可以产生“类激光”(laserlike)高强度量子相关孪生光束。在参量下转换过程中,孪生光子对总是同时产生,具有很高的强度量子相关性,因而由 OPO 腔输出的信号光与闲置光的强度差噪声,在腔带宽频率范围内低于散粒噪声极限,称之为强度差压缩。与正交压缩相比,强度差压缩对实验条件限制相对较低,所以有利于实际应用。

1996年,我们分别用 YAG 和 YAP 两种激光器作泵浦源,经过阈值以上内腔参量下转换,获得 1.06 μm 与 1.08 μm 波长的孪生光束,其强度差噪声功率分别较相应的散粒噪声极限降低 50%和 80%^[7,8]。

与国外同类实验相比,我们的 KTP/YAG 系统采用了双 KTP 反向串接,消除了光束离散与偏振混合等不利因素,增长了非线性光学作用长度,参量转换效率较高,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。而法国居里大学赫兹光谱实验室的 KTP/YAG 系统,用 390 mW 的泵浦功率,仅获得总强度为 6 mW 的孪生光子对^[9]。

我们的 α -切割 KTP/YAP 系统,由于采用了非临界 90°相位匹配,不仅泵浦阈值低,转换效率高,而且内腔损耗小,用 90 mW 的泵浦功率即得到 20 mW 的谐波模输出,其实测强度差压缩度高达 80%。若计及探测系统的不完善性,OPO 腔前实际输出光的强度差噪声应低于散粒噪声极限 90%以上^[8]。

为了优选实验参数并与理论对照,我们测定了归一化噪声功率谱,并分别用不同透射率的输出耦合镜测定压缩度与泵浦功率的关系,实验结果与理论预测符合很好^[8]。此外,由于选取了半整块型设计,系统有较高的稳定性,可用于进行低于散粒噪声极限的光学测量。近期采用 γ -切割 KTP/YAG 系统,我们获得了频率为 1.039 μm 和 1.09 μm 的量子相关孪生光子

时, 实测强度差压缩度高达 88%, 用之进行微弱信号检测, 信噪比提高 7 dB。

1.3 用强度差压缩光进行低于散粒噪声极限的光学测量

我们用 KTP/YAP 系统产生的强度差压缩光进行了微弱信号恢复与微弱吸收测量, 灵敏度较相应的散粒噪声极限提高 2.5 dB 左右。根据我们的实验结果, 当振幅调制信号或光吸收信号低于散粒噪声极限时, 若采用经典光场, 噪声将淹没于散粒噪声背景之中, 无法探测, 而当采用强度差压缩光时, 由于背景噪声降低, 微弱信号则能从低噪声背景中“浮现”出来(有关论文已于 1998 年 1 月应邀投送《Applied Physics B——Lasers and Optics》(特刊))。我们从理论上分析了应用强度差压缩光进行微弱吸收光谱学测量的实验方案, 半经典理论证明, 当压缩度接近百分之百时, 原则上最小可探测吸收可趋近于零^[10]。目前, 从实验上获得压缩度高于 90% 的强度差压缩光已不太困难, 因此, 这类超高精度光学测量系统有着不可低估的应用潜力。

1.4 半导体激光噪声压缩

半导体激光器(LD)以其密集、低能耗、高稳定和可调谐等诸多优点受到愈来愈广泛重视, 特别是在通讯与光谱学领域中已成为普遍采用的新型光源。虽然已有实验通过常电流驱动源抑制泵浦噪声, 在低温(66K)下将 LD 的强度噪声压缩到散粒噪声极限以下 8.3 dB, 然而至今未能解释为什么某些激光器可以采用此方法压缩噪声, 而另一些则不行, 即这种方法依然存在某些不确定因素^[11]。另一方面, 在低温下产生压缩光, 对实际应用极为不便。为此, 1994 年在中法量子光学合作交流计划支持下, 我们研究所与法国国家科学中心实验室合作, 采用光栅反馈与注入锁定两种途径, 对单模量子阱 LD 量子噪声进行了深入的研究, 通过外部光栅反馈, 在常温下将输出激光的强度噪声压缩到散粒噪声极限以下 2.3 dB。据我们所知, 这是目前室温下能得到的 LD 最大压缩度^[12]。同时, 通过注入方式将 LD 的位相起伏也大大降低^[12]。实验中首次发现 LD 主模与边模之间的负关联效应, 并通过实验和理论证实, 这种负关联是导致强度噪声降低的重要原因^[11]。为了寻求更简单更适宜实际应用的 LD 噪声压缩方法, 1995 年, 我们研究所在国家自然科学基金的青年科学基金资助下, 采用单镜弱反馈系统, 将 LD 的强度噪声压缩到散粒噪声极限以下^[13]。近期, 通过外腔自锁定方法, 使 LD 的位相噪声降低了 40 dB, 同时强度噪声被压缩 19%。

1.5 全固化小型“压缩器”研究

压缩态光场产生的原理性研究现已趋成熟, 人们开始将注意力集中于压缩光场的应用, 研制适宜于实际应用的小型、稳定的压缩光产生系统——压缩器(squeezer)。以 LD 作泵浦源的全固化系统当是首选目标。1996 年, 我们与法国国家科学中心巴黎第六大学量子光学实验室合作, 用他们的全固化系统, 通过 OPO 腔内级联非线性过程, 分别在三模共振与失谐情况下, 得到相位压缩与强度压缩态光场^[14]。

由于国外的单模全固化激光器售价过高, 我们用国产品体, 自行设计研制了单频 LD 泵浦 YAG 内腔倍频与谐振倍频全固化激光器, 最高基频光输出已超过 500 mW, 倍频光输出功率约 300 mW。目前通过谐振倍频, 我们的全固化系统已能产生强度噪声低于标准量子极限的压缩态光场, 压缩度约 20%。这项成果为制作小型“压缩器”奠定了基础。

2 结束语与展望

我们在国家自然科学基金和山西省自然科学基金的长期支持下, 建成了一定规模的量子

光学实验室, 开展了该领域一系列前沿科学实验研究, 并已能产生不同类型的压缩态光场。在非经典光场应用方面也作出了有创新性的研究成果。今后, 我们将集中于压缩态光场的应用研究, 一方面将非经典光场应用于超高精度光学测量与光学信息处理, 如量子非破坏性测量, 干涉仪测量和量子信息处理等; 另一方面, 建立冷原子系统, 用噪声极低的压缩光为探针, 研究原子微观量子效应。

参 考 文 献

- [1] Xiao M, Wu L A, Kimble J J. Precision Measurement Beyond the Shot-Noise Limit. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59** (3): 278—281.
- [2] Grangier P, Slusher R E, Yurke B, et al. Squeezed-Light-Enhanced Polarization Interferometer. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59** (19): 2153—2156.
- [3] Polzik E S, Carri J, Kimble H J. Spectroscopy with Squeezed Light. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68** (20): 3020—3023.
- [4] Ou Z Y, Pereira S F, Kimble H J, et al. Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox for Continuous Variables. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68** (25): 3663—3666.
- [5] 彭堃焯, 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] 张天才, 谢常德, 彭堃焯. 三模相互作用非经典性的理论研究. *中国科学 (A辑)*, 1992, **23** (8): 832—838.
- [7] 王海, 薛晨阳, 郜江瑞等. 由双 KTP 内腔参量下转换产生量子相关孪生光子对. *光学学报*, 1997, **17** (8).
- [8] 潘庆, 张云, 张天才等. Experimental investigation of intensity difference squeezing using Nd: YAP laser as pump source. *J. of Physics D: Appl. Phys.*, 1997, **30**: 1588—1590.
- [9] Mertz J, Debuisschert T, Heidmann A, et al. Improvement in the Observed Intensity Correlation of Optical Parametric Oscillator Twin Beams. *Opt. Lett.*, 1991, **16** (16): 1234—1236.
- [10] 王海, 谢常德, 郜江瑞等. 应用强度差压缩光进行微弱吸收光谱光学测量. *光学学报*, 1996, **16** (8): 1143—1147.
- [11] Marin F, Zhang T C, et al. Squeezing and Intermode Correlations in Laser Diodes. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75** (25): 4606—4609.
- [12] Zhang T C, Poizat J-Ph, Grelu P, et al. Quantum noise of free-running and externally-stabilized laserdiodes. *Quantum and Semiclassical Optics*, 1995, **7** (4): 601—614.
- [13] 张天才, 侯占佳, 王军民等. Generation of Intensity Squeezing in Laser Diodes by Weak External Cavity Feedback. *Chin. Phys. Lett.*, 1996, **13** (10): 734—737.
- [14] Katsuyuki kasai, Gao J R, Wu L A, et al. Observation of Quantum Noise Reduction Using Cascading Nonlinearities. *European Quantum Electronic Conf.*, (1996, Sept) (invited talk).

PROGRESS IN EXPERIMENTAL RESEARCHES OF SQUEEZED STATES AND APPLICATIONS

Peng Kunchi

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

Key words squeezed state, shot noise, standard quantum limit