

# 共振增强的光学参变下转换

白云飞 刘洪雨 郜江瑞 张俊香

(山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

**摘要** 多光子纠缠态是量子通讯网络中的重要资源, 光与二阶非线性介质相互作用的自发参变下转换过程是目前制备多光子态较成熟的方案之一。尽管脉冲光可以提高非线性转换效率并简化通信协议, 但是进一步增强光与介质间的相互作用对提高多光子的产生效率依然必要。设计了飞秒脉冲激光谐振腔系统, 在不改变脉冲重复频率和频率梳结构的情况下, 提高了下转换过程的参变增益, 从而获得更有效的多光子态输出。与传统的脉冲光单次穿过晶体方案相比, 单光子与双光子的产生率分别提高 6.25 倍和 38.6 倍。实验结果与理论分析基本一致。

**关键词** 量子光学; 参变下转换; 飞秒脉冲; 谐振腔; 参变增益

中图分类号 O437.4 文献标识码 A doi: 10.3788/ACS201131.0327001

## Resonance-Enhanced Optical Parametric Down Conversion

Bai Yunfei Liu Hongyu Gao Jiangrui Zhang Junxiang

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

**Abstract** Multi-photon entangled states which are produced mainly by the process of spontaneous parametric down conversion between laser and second order nonlinear material is a key resource in the quantum network. Although the application of pulsed laser improves the nonlinear conversion efficiency and simplifies the quantum communication protocol, it is still necessary to enhance the interaction between laser and material for improvement of multi-photon production rate. A resonant cavity for femtosecond pulse is designed to increase the parametric gain and multi-photon production rate while keeping its repetition rate and comb structure. The improved single- and two-photon production rate of cavity system are enhanced by 6.25 and 38.6 respectively compared with that of the single-pass system. The experimental results show agreement with theoretical prediction.

**Key words** quantum optics; parametric down conversion; femtosecond pulse; resonant cavity; parametric gain

**OCIS codes** 270.4180; 140.4780; 190.4410; 320.7110

## 1 引 言

光学参变振荡器(OPO)是产生非经典光场的重要技术手段,在产生频率可调谐光源<sup>[1]</sup>、压缩<sup>[2]</sup>和纠缠态光场<sup>[3,4]</sup>等方面发挥着非常重要的作用。通过OPO过程所产生的各种非经典光源尤其是纠缠光源,它可以应用于引力波探测<sup>[5]</sup>等量子测量、量子离物态和量子密集编码等量子信息诸多领域。利用光学参变过程,在分离变量纠缠源的制备方面,已经从两光子<sup>[6]</sup>扩展到三光子<sup>[7]</sup>、四光子<sup>[8]</sup>、五光子<sup>[9]</sup> GHZ 纠缠态以及四光子 Cluster 态<sup>[10]</sup>、六光子

GHZ 纠缠态、Cluster 纠缠态<sup>[11]</sup>和 Dicke 态<sup>[12]</sup>;在连续变量纠缠源的制备方面,获得了 EPR 纠缠光束<sup>[13]</sup>、明亮 EPR 纠缠光束<sup>[3]</sup>、三组份纠缠态光场<sup>[4]</sup>以及四组份 GHZ 和 Cluster 纠缠态光场<sup>[14]</sup>。

参变下转换的效率是提高非经典特性的关键,提高参变下转换效率最直接的方法之一是增加抽运光的功率<sup>[15]</sup>,因此利用脉冲光具有较高的峰值功率这一特性,脉冲抽运的光学参变过程最初受到普遍关注<sup>[16]</sup>。量子信息研究中,脉冲非经典光的应用还可以简化量子通讯协议<sup>[17]</sup>。而在脉冲参变过程中,

收稿日期: 2010-10-08; 收到修改稿日期: 2010-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(10974126, 60708010)和国家 973 计划(2010CB923102)资助课题。

作者简介: 白云飞(1982—),男,博士研究生,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: yfbai@sxu.edu.cn

导师简介: 张俊香(1966—),女,博士,教授,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: junxiang@sxu.edu.cn

增加峰值功率有二种方法: 其一是脉冲激光经过再生放大系统进一步提高脉冲光的峰值功率, 但是该系统构造复杂, 成本较高, 而且以降低脉冲光的重复频率为代价<sup>[18]</sup>, 从原理上来说, 也破坏了飞秒脉冲激光原有的频率梳的结构; 另一种方法则是利用脉冲光学谐振腔技术, 它不仅结合了飞秒脉冲瞬时功率高和谐振腔对光进行放大的优点, 又保持了原有的频率梳结构, 可以获得脉冲光在原有特性基础上的进一步放大。2008年, 意大利一研究组利用脉冲谐振腔技术增强 393 nm, 82 MHz 的皮秒脉冲, 从而获得产生效率较高的 2 光子福克(Fock)态<sup>[19]</sup>; 近期有实验报道, 经过脉冲谐振腔技术放大 390 nm, 81 MHz 飞秒抽运光峰值功率, 获得有效参变下转换过程, 得到了 780 nm 的 6 光子迪克(Dicke)态<sup>[12]</sup>。在飞秒脉冲谐振腔实验研究中, 其超短、周期性脉冲带来两大问题: 1) 由于腔内色散对飞秒脉冲频率梳的影响较大<sup>[20]</sup>, 在没有色散补偿介质的情况下光与腔模之间的耦合度较低, 限制了腔对于脉冲光的放大作用; 2) 为了匹配脉冲重复频率, 其腔长必须与激光谐振腔匹配, 腔的机械稳定性变差, 因此在锁定谐振腔方面会带来很大的实验难度。本文设计了飞秒脉冲激光谐振腔系统, 有效地提高了参变下转换纠缠光子对的产生效率, 为下一步进行脉冲压缩和纠缠光束的制备提供了一定的指导。

## 2 基本原理

对于一般的激光谐振腔或 OPO 腔(以驻波腔为例), 其共振条件为

$$L = q \frac{\lambda_q}{2} \quad \text{或} \quad \nu_q = q \frac{c}{2L}, \quad (1)$$

式中  $L$  为腔长,  $\lambda_q$  为光波长,  $c$  为光在真空中的光速,  $\nu_q$  为能在腔内产生共振的一系列光的频率,  $q$  为正整数。腔的纵模间隔为  $\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L}$ , 从频域上看, 光频谱中只有那些与腔共振频率相同的频率成份才能共振。对于脉冲激光抽运谐振腔而言, 必须将谐振腔的腔长锁定在锁模脉冲激光器上, 即谐振腔腔长应等于两个相邻激光脉冲之间的空间长度。从时域角度来说, 腔长的选择应使得在腔内循环的光脉冲每传输到输入耦合镜时都会与下一个到达输入耦合镜的脉冲产生相干叠加; 从频域角度来说, 脉冲光频率梳(间隔为  $\Delta\omega_q$ , 即脉冲重复频率)应与腔纵模的多个模式匹配<sup>[21]</sup>, 如图 1 所示, 假设脉冲光频率梳分量的频谱宽度小于腔带宽, 频率梳分量的

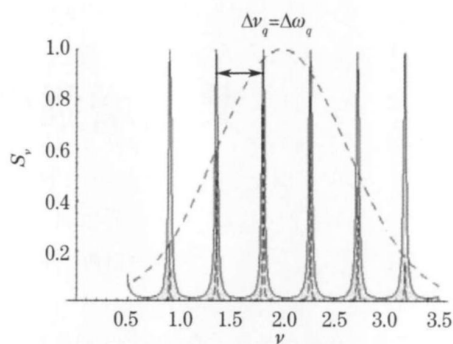


图 1 脉冲光频谱(短虚线)及其包络(长虚线)与腔纵模(实线)示意图

Fig. 1 Pulsed laser spectrum (short dashed line) and its envelope (long dashed line) and cavity longitudinal modes (solid line)

个数也远小于实际值。图 1 纵坐标为空腔透射率  $S_\nu$ 。

当光在腔内共振后, 光场的相干叠加使得腔内激光功率增强。功率增强效应的大小  $M$  与衡量光学谐振腔阻尼强弱的参数—品质因子  $Q$  有关。即腔的  $Q$  参数越高, 光场在腔内振荡的次数就越多, 表明用于相干叠加的场就越多, 增强效应就越强, 可表示为

$$M \propto Q = \omega t \cdot \frac{2\pi}{L_{in}}, \quad (2)$$

式中  $\omega$  为光场的中心频率,  $t$  为光在腔内循环一周的时间,  $L_{in}$  为腔内总损耗。可以看出, 品质因子与腔长、内腔损耗有关。因为腔长是确定的, 所以其仅与内腔损耗有关。内腔损耗越小, 腔的品质因子越高, 腔的放大率就越大。因此, 为了获得较高的内腔光场功率放大率, 必须设计一个内腔损耗小的光学谐振腔。

## 3 实验装置

实验装置如图 2 所示, 其中 R 为反射镜; P1-P4 为腔镜; BS 为分束器; LBO, BBO 为倍频、下转换晶体; L 为凸透镜; PZT 为压电陶瓷; DM 为双色镜; HWP 为半波片; PBS 为偏振分束器; F 为干涉滤光片; C 为光纤耦合头; SPCM 为单光子探测器。插图 为双光子测量装置。实验中所用的激光器为锁模钛宝石飞秒激光器, 其输出基频光中心波长为 850 nm, 脉宽为 130 fs, 重复频率为 76 MHz, 功率为 1.3 W。基频光除了 10% 的能量被反射用于准直光路外, 其余的全部单次穿过 LBO 晶体, 产生波长为 425 nm, 功率为 300 mW 的倍频光。该倍频光通过透镜组 L1, L2 产生与谐振腔本征模匹配的光

波模式, 然后注入到脉冲谐振腔(图 2 虚线框内), 以期获得增强的抽运光峰值功率, 从而增强下转换效率。谐振腔为驻波腔, 腔长为 1.97 m, 输入耦合镜 P1(对波长 850 nm 消反射, 425 nm 透射率  $T=5.1\%$ )放置在电控平移台上, 用于在微米量级上精确调节腔长; 输出镜 P4(对波长 850 nm 消反射, 425 nm 反射率  $R>99.5\%$ )置于压电陶瓷 PZT2 上; 凹面镜 P2 和 P3(对波长 850 nm 和 425 nm 的反射率  $R>99.5\%$ ,  $f=15\text{ cm}$ )之间的距离为 34 cm, P1~P2, P3~P4 间的距离均为 81.7 cm。当 PZT1 上的反射镜 R2 对抽运光进行相位调制时, 携带腔失谐信息的透射信号被光电二极管 D1 探测并反馈给 PZT2 用来驱动 P4 锁定谐振腔。

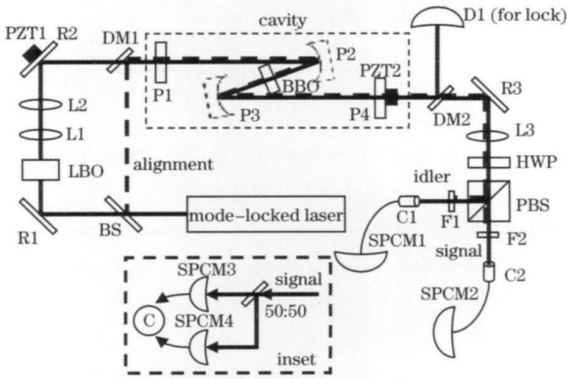


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental setup

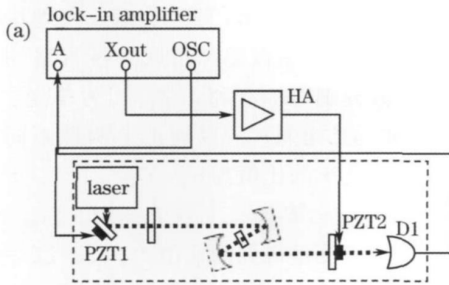
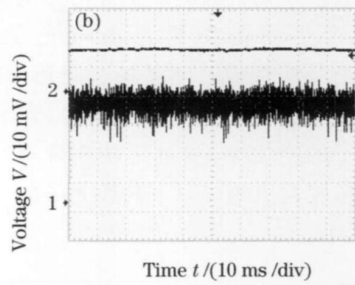


图 3 (a) 锁腔电路, (b) 锁腔后腔透射信号

Fig.3 (a) Sketch of locking cavity, (b) transmitted signal after cavity locking

II类共线的 BBO 晶体放置于两凹面镜 P2 和 P3 连线中心的腔本征模腰斑处, 在抽运光通过谐振腔放大的同时增强产生自发参变下转换光。双色镜 DM2 将漏出腔外的携带腔失谐信息的微弱抽运光导入光电二极管 D1 用于锁腔, 信号光则透过腔输出镜和 DM2 被透镜 L3 耦合进入探测系统。偏振方向相互垂直的信号与闲置光子对被光路中的半波片和偏振分束器组合完全分开后, 分别经过带宽为 10 nm 的干涉滤波片滤除漏过的抽运光子和杂散光子, 最后导入单光子探测器进行单光子计数测量; 并结合符合计数进行双光子计数的测量(图 2 插图所示)。

由于该谐振腔腔长在米的量级, 而且相邻脉冲之间的间隔也受锁模激光器腔长和光路中色散元件的影响而不断变化<sup>23</sup>, 因此锁定腔有着很大的难度。图 3(a)是根据 PDH 锁腔原理<sup>23</sup>设计的锁腔电路示意图。锁相放大器 OSC 端口输出的调制信号加载到 PZT1 上用来调制脉冲光, 携带腔失谐信息的腔透射信号经光电二极管 D1 探测后送入信号输入端 A。该信号和调制信号相乘并滤波后, 从 Xout 端口输出误差信号, 由高压放大器 HA 推动 PZT2 不断改变腔长使之与锁模激光器输出的相邻脉冲之间的空间距离相同。将腔锁定后, 腔的透射信号如图 3(b)所示, 频率稳定性约为 20 MHz, 远小于飞秒脉冲光吉赫兹量级的谱宽, 这表明伺服系统可以将谐振腔稳定地锁定在入射激光的共振状态。



## 4 实验结果与讨论

### 4.1 放大率

当内腔损耗较低时, 精细度可定义为

$$F = 2\pi / (T + L),$$

式中  $T$  为输入耦合镜的透射损耗;  $L$  为光在腔内传输一周时的总损耗(不包括输入耦合镜的透射损耗), 包含由于腔镜反射不完全、腔内色散介质的透射率非理想、空气中微粒对光的散射作用以及腔内

光束偏离光轴传输而散射至腔外等因素带来的损耗。实验中测得腔的精细度为 36, 而输入耦合镜的透射率为  $T=5.1\%$ , 因此内腔损耗  $L$  约为 12.3%。

当  $T \neq L$  即谐振腔没有达到阻抗匹配条件时, 放大率表示为<sup>19</sup>

$$M = \frac{T}{[1 - \sqrt{(1-T)(1-L)}]^2}. \quad (3)$$

放大率、输入耦合镜透射率和内腔损耗之间的关

系如图 4 所示。当内腔损耗越小时, 放大率越大; 内腔损耗一定时, 放大率随输入耦合镜透射率的增加先增加后减小, 当满足阻抗匹配条件时, 放大率达到最大值。由  $T=5.1\%$ ,  $L=12.3\%$  可得  $M$  为 6.6。

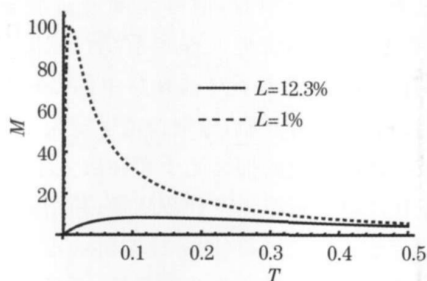


图 4 不同内腔损耗条件下, 放大率与输入耦合镜透射率的关系

Fig. 4 Relationship between magnification and transmittance of input coupling mirror under different cavity losses

#### 4.2 参变增益

在光与介质相互作用过程中, 谐振腔对下转换过程参变增益的提高可由抽运光分别注入谐振腔和单次穿过晶体时纠缠光子对产生率的比值来表征。当加入 P1 镜时, 相当于抽运光在谐振腔内共振增强后与晶体发生相互作用; 当移除 P1 镜时, 相当于抽运光单次穿过晶体。两种方案中除了实际参与相互作用的抽运光的功率不同外, 其他与光子产生率有关的参数如抽运光在晶体位置处的光斑大小、下转换光的发散角和光子收集效率等均完全相同。

单光子产生率的测量可由单光子探测器 SPCM1 或 SPCM2 完成。随着抽运光功率的提高, 每个抽运脉冲产生多光子的几率变大, 为了更可靠地测量单光子的产生率, 将抽运功率降至 20 mW, 并测量了谐振腔输出的一对下转换光子的 HOM 干涉, 如图 5 所示。

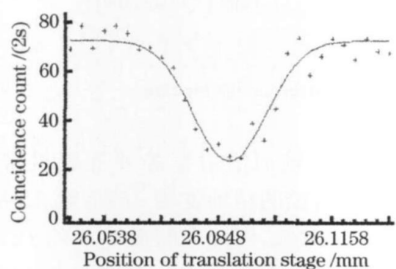


图 5 HOM 测量结果

Fig. 5 HOM measurement result

HOM 干涉的可见度为 75%, 充分证明了实验获得的是较纯的单光子源而非多光子或经典光源以及同时产生的信号光子和闲频光子波包之间具有高

度相似性<sup>24</sup>。两种方案下光子计数统计分布  $p(n)$  ( $n$  为光子计数), 如图 6 所示, 其中计数周期为 65536 ns, 总的测量时间为 2 s。当计数周期远大于光场的相干时间时, 光子统计分布为热光场的下转换光, 其光子计数统计分布为负二项分布。而实验中所产生的下转换光的相干时间  $\tau$  完全取决于干涉滤波片的带宽  $B$ :

$$\tau = \frac{(4\lambda^2 - B^2)\ln 2}{2\pi cB}$$

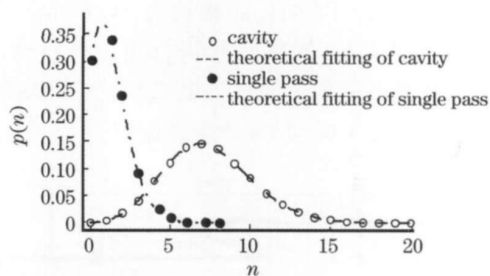


图 6 谐振腔内共振增强和单次穿过晶体时光子计数统计分布与理论曲线

Fig. 6 Photon counting statistical distribution and theoretical curve under cavity resonance enhancement scheme and travelling wave scheme

将相应的参数代入可得相干时间约为 110 fs, 为下转换光脉宽的量级, 远小于 65536 ns 的计数周期, 因此利用负二项分布公式来拟合光子计数统计分布。结果显示, 实验数据点与理论曲线之间的重合度很高; 谐振腔和单次穿过方案测量到的平均光子数分别为 7.5 和 1.2。因为单光子产生率  $P_1 \propto I$  (抽运光光强), 所以理论上两种不同的方案中单光子产生率的比值为

$$P_{1\text{ cavity}}/P_{1\text{ single pass}} = I_{\text{cavity}}/I_{\text{single pass}} = M = 6.6$$

而实验测量得到的比值为  $7.5/1.2 = 6.25$ , 与理论值比较接近。

双光子产生率的测量可由光纤分束器和符合计数模块 P7888 (FAST ComTec Inc.) 来共同完成, 其定义为

$$P_2 = 2 \times N_c,$$

式中  $N_c$  为单位时间内的符合计数, 常数因子“2”是由于光纤分束器对于双光子 50% 的不确定分束概率所引入的。谐振腔和单次穿过方案测量到的双光子产生率分别为 0.54 和 0.014。而双光子产生率  $P_2 \propto P_1^2$ , 因此理论上两种方案中双光子产生率的比值为

$$P_{2\text{ cavity}}/P_{2\text{ single pass}} = M^2 = 43.56$$

这与实验测量得到的比值  $38.6(0.54/0.014)$  定性一致。

## 5 结 论

飞秒脉冲激光谐振腔可以在输入光功率不变的情况下, 提高光与非线性介质相互作用的参变增益并促进非经典态的有效产生。要进一步增强非线性相互作用, 应使用镀膜参数更好的腔镜和晶体, 并采用光纤或柱面镜对抽运光进行空间滤波以提高光场与腔本征模的耦合程度, 使得内腔损耗降到最低<sup>[25]</sup>; 选用满足阻抗匹配条件的输入耦合镜。如当内腔损耗为 1% 且输入镜的透射率满足阻抗匹配条件即 1% 时, 参变增益将提高 100 倍。

## 参 考 文 献

- Hongxin Zou, Shuqin Zhai, Juan Guo *et al.*. Preparation and measurement of tunable high-power sub-poissonian light using twin beams [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11): 1735~1737
- Y. Takeno, M. Yukawa, H. Yonezawa *et al.*. Observation of -9 dB quadrature squeezing with improvement of phase stability in homodyne measurement [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 4321~4327
- W. P. Bowen, N. Treps, B. C. Buchler *et al.*. Experimental investigation of continuous-variable quantum teleportation [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(3): 032302
- Takao Aoki, Nobuyuki Takei, Hidehiro Yonezawa *et al.*. Experimental creation of a fully inseparable tripartite continuous-variable state [J]. *Phys. Rev. L*, 2003, **91**(8): 080404
- Carlton M. Caves. Quantum-mechanical noise in an interferometer [J]. *Phys. Rev. D*, 1981, **23**(8): 1693~1708
- Jiang Yunkun, Shi Baosen, Guo Guangcan. Two-photon interference with femtosecond pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 1~3  
江云坤, 史保森, 郭光灿. 飞秒超短脉冲的双光子干涉 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 1~3
- D. Bouwmeester, J.-W. Pan, M. Daniell *et al.*. Observation of three-photon Greenberger Horne Zeilinger entanglement [J]. *Phys. Rev. L*, 1999, **82**(7): 1345~1349
- J.-W. Pan, M. Daniell, S. Gasparoni *et al.*. Experimental demonstration of four-photon entanglement and high-fidelity teleportation [J]. *Phys. Rev. L*, 2001, **86**(20): 4435~4438
- Z. Zhao, Y. Chen, A. Zhang *et al.*. Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation [J]. *Nature*, 2004, **430**: 54~58
- P. Walther, K. J. Resch, T. Rudolph *et al.*. Experimental one-way quantum computing [J]. *Nature*, 2005, **434**: 169~176
- C. Y. Lu, X. Q. Zhou, O. Gähne *et al.*. Experimental entanglement of six photons in graph states [J]. *Nature Phys.*, 2007, **3**: 91~95
- Witlef Wieczorek, Roland Krischek, Nikolai Kiesel *et al.*. Experimental entanglement of a six-photon symmetric dicke state [J]. *Phys. Rev. L*, 2009, **103**(2): 020504
- Z. Y. Ou, S. F. Pereira, H. J. Kimble *et al.*. Realization of Einstein-Podolsky-Rosen paradox for continuous variables [J]. *Phys. Rev. L*, 1992, **68**(25): 3663~3666
- Xiaolong Su, Aihong Tan, Xiaojun Jia *et al.*. Experimental preparation of quadripartite cluster and Greenberger-Horne-Zeilinger entangled states for continuous variables [J]. *Phys. Rev. L*, 2007, **98**(7): 070502
- Y. Eto, T. Tajima, Y. Zhang *et al.*. Observation of squeezed light at 1.535  $\mu\text{m}$  using a pulsed homodyne detector [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1698~1700
- Zhang Shaoyin, Xu Changtan, Ai Shutao. First-order correction field of circularly polarized ultra-short pulse and its acceleration effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1586~1590  
张绍银, 许长谭, 艾树涛. 超短脉冲圆极化激光场的一阶修正描述及加速效应 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1586~1590
- Yuta Takahashi, Jonas Söderholm, Keiichi Hirano *et al.*. Effects of dispersion on squeezing and photon statistics of down-converted light [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(4): 043801
- N. Kiesel, C. Schmid, G. Toth *et al.*. Experimental observation of four-photon entangled dicke state with high fidelity [J]. *Phys. Rev. L*, 2007, **98**(6): 063604
- Alessandro Zavatta, Valentina Parigi, Marco Bellini. Toward quantum frequency combs: boosting the generation of highly nonclassical light states by cavity-enhanced parametric down-conversion at high repetition rates [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(3): 033809
- Xi Peng, Zhou Chuanqing, Feng Xiaomi *et al.*. Multiphoton microscopy with 10 fs pulse in biomedical imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 46~49  
席鹏, 周传清, 封晓瑞等. 10 fs 脉冲在多光子激发生物成像中的应用 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 46~49
- Steven T. Cundiff, Jun Ye. Colloquium: femtosecond optical frequency combs [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2003, **75**(1): 325~342
- Qu Kenan, Zhang Weigang, Liu Zhoulin *et al.*. Dispersion compensation in ultra-short optical pulse compressing system and transmitting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 449~453  
屈柯楠, 张伟刚, 刘卓琳等. 超短光脉冲压缩系统和传输系统的色散补偿 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 449~453
- Eric D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1): 79~87
- Jun Chen, Kim Fook Lee, Prem Kumar. Deterministic quantum splitter based on time-reversed Hong-Ou-Mandel interference [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(3): 031804
- Liu Huagang, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. High power ultraviolet laser source based on photonic crystal fiber femtosecond laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2812~2816  
刘华刚, 胡明列, 刘博文等. 基于光子晶体光纤飞秒激光技术的高功率紫外激光源 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2812~2816