

文章编号: 1007-6654(2004)01-0029-05 \*

## 单光子态的产生与测量

李永明, 樊代和, 翟泽辉, 张俊香, 郜江瑞

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电所, 山西太原, 030006)

摘要: 报道了通过自发参量下转换产生单光子态的实验研究, 使用中心波长 425 nm 的飞秒脉冲泵浦 I 类非共线相位匹配的 BBO 晶体, 在实验上得到单光子计数率为  $2.978 \times 10^{-4}$ , 并分析了实验中的相关问题。

关键词: 光学; 单光子; 自发参量下转换; BBO 晶体; 非共线; 飞秒脉冲

中图分类号: O431 文献标识码: A

单光子态是一种重要的非经典光场, 它在量子保密通讯<sup>[1]</sup>、量子计算<sup>[2]</sup>和基础的量子光学研究<sup>[3]</sup>中都有很重要的作用。为了制备单光子态, 人们发展出量子点<sup>[4,5]</sup>、脉冲激发单个偶极子<sup>[6]</sup>、自发参量下转换 (SPDC)<sup>[7]</sup>等方法。与其他方法相比, 自发参量下转换采用非线性过程, 把泵浦光子转换成一对高度关联的光子对, 只要测到其中之一, 就可以确认它的孪生光子的存在。这样, 我们可以在不破坏单光子(只需测量其孪生光子)的情况下, 确认单光子的存在<sup>[8,9]</sup>。另外, 由于参量下转换过程成对的产生下转换光子对, 可用来产生纠缠光子对。因此, 自发参量下转换在理论<sup>[10,11]</sup>和实验<sup>[12~15]</sup>上都得到广泛的研究。

自发参量下转换根据其泵浦源的不同, 分为脉冲和连续两种。采用脉冲泵浦时, 下转换光子只出现在泵浦脉冲存在的时间范围内, 这样可以有效的降低探测过程中暗记数和环境噪声的影响。本文中, 我们利用飞秒脉冲泵浦 I 类非共线相位匹配的 BBO 晶体<sup>[16,17]</sup>, 通过其自发参量下转化产生了单光

子态。这样做的优点在于, 理论分析较为简单(I 类匹配)下转换光与泵浦光容易分离(非共线匹配), 为了后继信号处理方便, 我们使用了较低的脉冲重复率(500 kHz)。

## 1 理论分析

## 1.1 自发参量下转换

在自发参量下转换过程中, 一束泵浦光入射到一个非线性晶体中, 并产生一对“信号—闲置”孪生光束。其相互作用哈密顿量为<sup>[18]</sup>

$$\begin{aligned}
 H_{\text{in}}(t) = & \epsilon_0 \int d^3 k_s d^3 k_i \chi_{lmn}^{(+)} E_{pl}^{(+)} e^{i(\omega_p t - \vec{k}_p \cdot \vec{r})} \\
 & \times E_{sm}^{(-)} e^{-i(\omega_s(\vec{k}_s) t - \vec{k}_s \cdot \vec{r})} \\
 & \times E_{in}^{(-)} e^{-i(\omega_i(\vec{k}_i) t - \vec{k}_i \cdot \vec{r})} + h.c. \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中,  $\chi_{lmn}$  是二阶非线性极化张量;  $E$  代表光电场幅值, 脚标  $p, s, i$  代表泵浦、信号和闲置光, 而  $l, m, n$  则对应  $\chi_{lmn}$  中的  $l, m$  和  $n$ ,  $k_s, k_i, k_p$  则分别为信号光、闲置光和泵浦光的波矢量。利用一阶摄动理论, 我们可以从相互作用哈密顿量中解出下转换

\* 收稿日期: 2004-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 60278010, 69978013); 山西省自然科学基金; 教育部优秀青年都是奖励基金

作者简介: 李永明(1979-)男, 河北隆尧人, 山西大学光电研究所在读硕士研究生。

光场波函数<sup>[18]</sup>

$$|\Psi\rangle = A \int d^3\vec{k}_s d^3\vec{k}_i \delta(\omega_s(\vec{k}_s) + \omega_i(\vec{k}_i) - \omega_p) \times \delta(\vec{k}_s + \vec{k}_i - \vec{k}_p) \hat{a}_s^\dagger(\vec{k}_s) \hat{a}_i^\dagger(\vec{k}_i) |0\rangle \quad (2)$$

由此得出其频率和相位匹配条件为

$$\begin{aligned} \omega_p &= \omega_s + \omega_i \\ \vec{k}_p &= \vec{k}_s + \vec{k}_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $k_p, k_s, k_i$  分别为泵浦光、信号光和闲置光的波矢量,  $w_p, w_s$  和  $w_i$  分别为泵浦光、信号光和闲置光频率。在泵浦光频率一定的情况下,自发参量下换产生的信号光和闲置光的能量和动量并不确定,它们可能以任何能量(颜色)和动量(传播方向)的形式出现,只要其和满足(3)式即可。但是(3)式同时要求,一旦信号或闲置光二者之一的动量和能量被确定,另一个(孪生光子)的动量和能量也就 100% 的确定了。也就是说,在实验上得到的下转换光是一个彩色的光锥,如图 1 所示。在光锥的任何一点都可以测到下转换光子,但一旦我们在某一点测到一个光子,那么和它对应的孪生光子在光锥的位置马上应当被唯一的确定下来,如图 1 中关于光锥中心对称的两个黑点所示。

当采用飞秒脉冲来作为泵浦源时,为了获得高的转换效率,不但要考虑相位匹配,还应该考虑群速

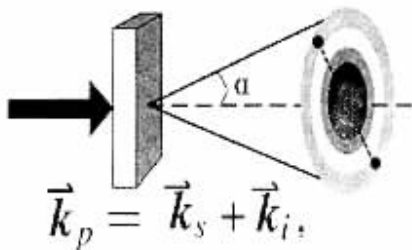


图 1 I 类匹配的 SPDC 下转换光锥

度匹配问题,即要求<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} \nu_p &= \nu_s \cos(\theta_p - \theta_s + \rho) \\ \nu_p &= \nu_i \cos(\theta_p - \theta_i + \rho) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\nu_p, \nu_s$  和  $\nu_i$  分别为泵浦光、信号光和闲置光在晶体中的群速度,  $\theta_p, \theta_s$  和  $\theta_i$  分别为泵浦光、信号光和闲置光与晶体 z 轴的夹角,  $\rho$  为泵浦光在晶体中的走离角。(4)式一般很难严格满足,但采用非共线匹配可有效的减少群速失配的影响<sup>[16,17]</sup>。在实验中,如果晶体很短,可不考虑群速匹配问题。

自发参量下转换根据其相位匹配方式分为 I 类(信号光与闲置光偏振相同)和 II 类(信号光与闲置光偏振垂直),又根据其下转换光与泵浦是否共线分为共线匹配和非共线匹配,它们的下转换光锥的形状如图 2 所示<sup>[18]</sup>。为了选出感兴趣的频率,一般采用针孔和窄带波片进行空间和谱滤波。图 2 中,用虚线连起来的黑点(AB、CD、EF)是一对下换光束所在的位置。I 类相位匹配的 SPDC,针孔取在 AB 两点,则为非共线匹配,针孔取在 O 点则为共线相位匹配。但对于 II 类 SPDC,共线和非共线匹配时下转换光锥的形状并不相同,如图 2(b)(c)所示,共线匹配时针孔在 O 点,非共线匹配时为获得偏振纠缠的光子对,针孔取在 EF 两点。

1.2 单光子的产生

自发参量下转换产生出具有很强关联特性的双光子对,其态函数如式(2)所示。当双光子态  $|\Psi\rangle$  的一臂被触发(探测)后,双光子态的另一臂就塌陷到一个单光子 FOCK 态上。我们将闲置光作为触发光(TRIGGER),并用下标 t 代替 i,则

$$\rho_s = TR_t |\Psi\rangle \langle \Psi| \rho_t \quad (5)$$

上式中  $\rho_s$  为得到的单光子态的密度算符,  $\rho_t$  由下式

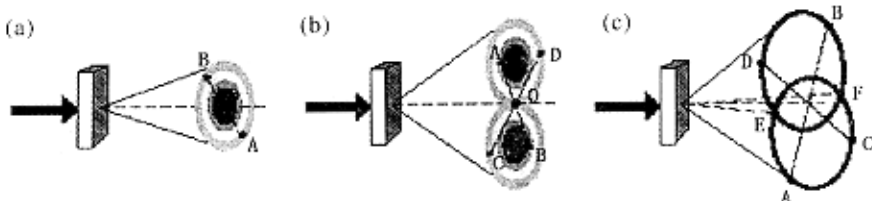


图 2 (a) I 类 SPDC

(b) II 类共线 SPDC

(c) II 类非共线的 SPDC

给出：
$$\hat{\rho}_i = \int d\vec{k}_i T(\vec{k}_i) |1_{\vec{k}_i}\rangle \langle 1_{\vec{k}_i}| \quad (6)$$

其中,  $T(k_i)$  为滤波函数。在这里, 虽然  $|\Psi\rangle$  是纯态, 但  $\rho_s$  和  $\rho_i$  却都是混合态。只有在触发通道采用足够强的滤波后, 也就是说  $T(k_i)$  的空间谱宽远小于泵浦光时,  $\rho_s$  才接近一个纯的单光子态<sup>[14]</sup>。

也就是说, 经过充分的滤波以后, 我们每在触发光路上探测到一个单光子信号, 就在信号光路上制备出一个单光子态来, 如图 3 所示。

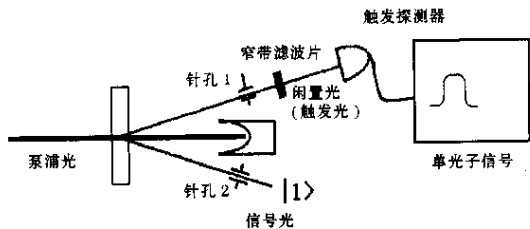


图 3 SPDC 产生单光子示意图

## 2 实验

### 2.1 实验装置

实验装置如图 4 所示, 光源采用 Coherent 公司的钛宝石飞秒激光器 mira900, 输出光中心波长 850 nm, 经过 PULSE PIKER 后重复频率 500 kHz。经过 LBO 晶体倍频后产生的 425 nm 光用于泵浦一块 BBO 晶体, 而剩余的光则打到一个探测器 S5971 产生计数器的触发信号。实验使用 BBO 晶体厚度为 3 mm, 采用 I 类非共线相位匹配, 切割角 28.8°, 两束 850 nm 的下转换光与 425 nm 的泵浦光在晶体外夹解为 5.2°。单光子探测器为 LASERCOMPONENTS 公司的 SPCM - AQR - 15, 暗记数 37 个/秒。在单光子探测器前使用针孔和 NEWFOUCS 公司的 10 nm 窄带滤波片进行空间和谱滤波, SPCM - AQR - 15 探测到的单光子信号送入单光子计数器 RS400 进行记数。

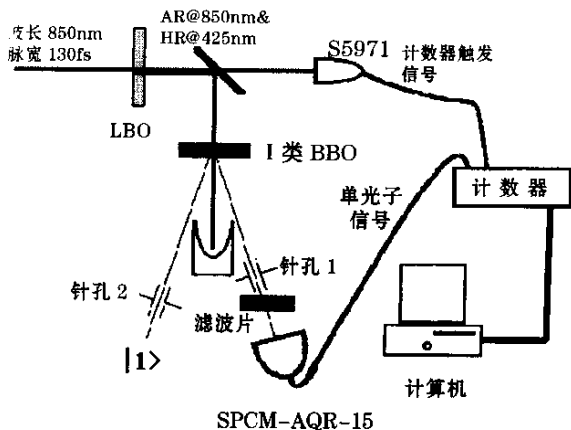


图 4 实验装置图

由于使用脉冲光做泵浦, 为了减低噪声, 计数器 RS400 工作在 Boxcard 状态, 既每当 S5971 有一个触发信号过来, 计数器将门打开 30 ns, SPCM - AQR - 15 输出的电脉冲只有在这段时间内到达才可以被记数。计数器通过数据采集卡与计算机相连, 可以及时将记数结果保存到计算机中。

### 2.2 实验结果及分析

实验中使用的功率 656 微瓦, 脉冲重复频率 500 kHz 的 425 nm 光泵浦 BBO 晶体, 得到下转换的记数为 1489 个/5 M 脉冲。用一片 850 nm 的半波片代替 BBO 晶体后, 得到噪声(包括暗记数)记数为 142 个/5 M 脉冲。考虑到在 850 nm 窄带波片 60% 的透射率和探测器 50% 的效率, 在探测器有效面积<sup>①</sup>上的下转换光的平均光子数为

$$N = (1489 - 142) \div 60\% \div 50\% \div 5000000 = 0.00090 \text{ 个/脉冲。}$$

如果将下转换光近似看作相干光, 在平均光子数  $N$  远小于 1 的情况下, 近似的到每个下转换脉冲处于单光子态的几率  $P(1)$  和处于双光子态的几率  $P(2)$  为<sup>②</sup>

① 所使用的单光子探测器有效面积为一个直径 180 微米的圆, 放置在距下转换晶体 1 米远的位置。

② 设每脉冲的平均光子数为  $\alpha$  则相干态可表示为 FOCK 态的叠加, 即

$$|\alpha\rangle = \exp\left(-\frac{1}{2}|\alpha|^2\right) \times \left(|0\rangle + \alpha|1\rangle + \frac{\alpha^2}{2!}|2\rangle + \frac{\alpha^3}{3!}|3\rangle + \dots\right)$$

如果  $\alpha$  远远小于 1, 则  $\alpha$  的 2 次方以上的项可以忽略不计。

$$P(1) \approx N = 0.00090$$

$$P(2) \approx 0.5 \times P^2(1) = 4.05 \times 10^{-7}$$

由此得 SPCM - AQR - 15 在闲置光路上每触发一次,在信号光光路得到一个双光子态的几率约为  $P(2) \div P(1) = 0.00045$ ,即在 1489 个/5 M 脉冲的记数中,有双光子记数 0.6 个,与噪声相比,可以忽略不记。

又,在噪声中包含了杂散的光和暗记数的影响。

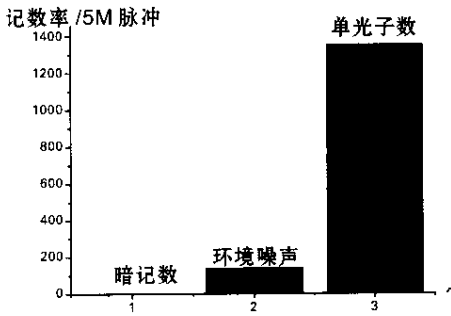


图 5 实验结果

当计数器工作在 Boxcard 状态,每 10 秒的开门时间为  $10 \times 500000 \times 30 \text{ ns} = 0.15 \text{ s}$ ,期间平均暗记数为  $0.15 \text{ s} \times 37/\text{s} = 5.55$  次。

即我们每 5 M 脉冲可以得到 1489 个“单光子”但是这 1489 个“单光子”并不都是真正的单光子态,其中有暗记数 5.55 个和杂散光 136.45 个,如图 5 所示。

### 3 小节

利用飞秒脉冲泵浦 I 类非共线相位匹配的 BBO 晶体产生自发参量下转换,我们每 5 M 脉冲探测 1489 个“单光子态”。由于下转换的平均光子数远小于 1,产生的双光子态可以忽略不记,但是由于环境的杂散光和单光子探测器的暗记数带来的噪声为 142 个。下一步,计划用 50/50 分数器将下转换光的一路一分为二,用两个探测器做复合记数,进一步验证其是单光子态。

### 参考文献 :

[ 1 ] MASAHIRO MATSUOKA , TAKUYA HIRANO . Quantum key distribution with a single photon from a squeezed coherent state [ J ] . *Phys Rev A* , 2003 , **67** : 042307 .

[ 2 ] KNILL E , LAFLMME R , MILBURN G J . A scheme for efficient quantum computation with linear optics [ J ] . *Nature* , 2001 , **409** : 46 - 52 .

[ 3 ] TOSHIKI IDE , HOLGER HOFMANN F , KAKAYOSHI KOBAYASHI , *et al.* Continuous - variable teleportation of single - photon states [ J ] . *Phys Rev A* , 2001 , **65** : 012313 .

[ 4 ] KIM J , BENSON O , KAN H , *et al.* A single - photon turnstile device [ J ] . *Nature* , 1999 , **397** : 500 .

[ 5 ] MOREAU E , ROBERT I , GE 'RARD J M , *et al.* Single - mode solid - state single photon source based on isolated quantum dots in pillar microcavities [ J ] . *APPL PHYS LETT* , 2001 , **79** : 2865 .

[ 6 ] CHRISTIAN KURTSIEFER , SONJA MAYER , PATRICK ZARDA , *et al.* Stable solid - state source of single photons [ J ] . *Phys Rev Lett* , 2000 , **85** : 290 .

[ 7 ] LVOVSKY A I , HANSEN H , AICHELE T , *et al.* Quantum state reconstruction of the single - photon fock state [ J ] . *Phys Rev Lett* , 2001 , **87** : 050402 .

[ 8 ] PAUL G K , *et al.* New High - Intensity Source of Polarization - Entangled Photon Pairs [ J ] . *Phys Rev Lett* , 1995 , **75** : 4337 .

[ 9 ] KOCH U , *et al.* Hot spots in parametric fluorescence with a pump beam of finite cross section [ J ] . *IEEE J Quant El* , 1995 , **31** : 769 .

[ 10 ] MORTON RUBIN H , DAVID KLYSHKO N , SHIH Y H , *et al.* Theory of two - photon entanglement in type - II optical parametric down - conversion [ J ] . *Phys Rev A* , 1994 , **A50** : 5122 .

- [ 11 ] TIMOTHY KELLER E , MORTON RUBIN H. Theory of two – photon entanglement for spontaneous parametric down – conversion driven by a narrow pump pulse[ J]. *Phys Rev A* , 1997 , **56** : 1534.
- [ 12 ] JIANG Yun – kun , SHI Bao – sen , LI Jian , *et al.* Two – Photon interference with the type II spontaneous parametric Down – conversion[ J]. *CHIN PHYS LETT* , 2001 , **18**( 1 ) : 45.
- [ 13 ] KIESS T E , SHIH Y H , SERGIENKO A V , *et al.* Einstein – Podolsky – Rosen – Bohm experiment using pairs of light quanta produced by type – II parametric down – conversion[ J]. *Phys Rev Lett* , 1993 , **71** : 3893.
- [ 14 ] YOON – HO KIM , SERGEI KULIK P , YANHU SHIH. High – intensity pulsed source of space – time and polarization double – entangled photon pairs[ J]. *Phys Rev A* , 2000 , **62** : 011802.
- [ 15 ] YOON – HO KIM , MARIA CHEKHOVA V , SERGER KULIK P , *et al.* Interferometric Bell – state preparation using femtosecond – pulse – pumped spontaneous parametric down – conversion[ J]. *Phys Rev A* , 2001 , **63** : 062301.
- [ 16 ] 夏江帆 , 魏志义 , 张杰. BBO 晶体中非共线参量过程的带宽与增益特性研究[ J]. *物理学报* , 2002 , **49**( 2 ) : 0256.
- [ 17 ] KRYLOV V , GALLUS J , WILD U P , *et al.* Femtosecond noncollinear and collinear parametric generation and amplification in BBO crystal[ J]. *Appl Phys B* , 2000 , **70** : 163 – 168.
- [ 18 ] YANHUA SHIH. Entangled biphoton source – property and preparation[ J]. *Rep Prog Phys* , 2003 , **66** : 1009 – 1044.

## The Generation and Detection of Single – photon – state

LI Yongming , FAN Daihe , ZHAI Zehui , ZHANG Junxiang , GAO Jiangrui

( State key lab of quantum optics and quantum optics devices institute of opto – electronics , Shanxi University  
Taiyuan , 030006 P. R. China )

**Abstract** : Based on SPDC ( Spontaneous Parametric Down – Conersion ) the experiment of single – photon – state generation is completed in which a fs pulse laser is used to pump a type I noncollinear phase match BBO crystal and 1489 single – photon – states per second are get.

**Key words** : optics ; single – photon ; Spontaneous ; BBO crystal ; femto – second pulse laser

作者: 李永明, 樊代和, 翟泽辉, 张俊香, 郜江瑞  
作者单位: 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电所, 山西, 太原, 030006  
刊名: 量子光学学报 ISTIC PKU  
英文刊名: ACTA SINICA QUANTUM OPTICA  
年, 卷(期): 2004, 10(1)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(18条)

1. [MASAHIRO MATSUOKA; TAKUYA HIRANO](#) Quantum key distribution with a single photon from a squeezed coherent state 2003
2. [Knill E; LAFLAMME R; MILBURN G J](#) A scheme for efficient quantum computation with linear optics[外文期刊] 2001
3. [TOSHIKI IDE; HOLGER HOFMANN F; KAKAYOSHI KOBAYASHI](#) Continuous-variable teleportation of single-photon states 2001
4. [Kim J; BENSON O; KAN H A](#) A single-photon turnstile device[外文期刊] 1999
5. [Moreau E; ROBERT I; GE' RARD J M](#) Single-mode solid-state single photon source based on isolated quantum dots in pillar microcavities[外文期刊] 2001
6. [CHRISTIAN KURTSIEFER; SONJA MAYER; PATRICK ZARDA](#) Stable solid-state source of single photons[外文期刊] 2000
7. [Lvovsky A I; HANSEN H; AICHELE T](#) Quantum state reconstruction of the single-photon fock state[外文期刊] 2001
8. [PAUL G K](#) New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs 1995
9. [Koch U](#) Hot spots in parametric fluorescence with a pump beam of finite cross section[外文期刊] 1995
10. [MORTON RUBIN H; DAVID KLYSHKO N; SHIH Y H](#) Theory of two-photon entanglement in type-II optical parametric down-conversion 1994
11. [TIMOTHY KELLER E; MORTON RUBIN H](#) Theory of two-photon entanglement for spontaneous parametric down-conversion driven by a narrow pump pulse 1997
12. [JIANG Yun-kun; SHI Bao-sen; Li Jian](#) Two-Photon interference with the type II spontaneous parametric Down-conversion[期刊论文]-中国物理快报(英文版) 2001(01)
13. [KIESS T E; SHIH Y H; SERGIENKO A V](#) Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm experiment using pairs of light quanta produced by type-II parametric down-conversion[外文期刊] 1993
14. [Yoon-Ho Kim; SERGEI KULIK P; YANHU SHIH](#) High-intensity pulsed source of space-time and polarization double-entangled photon pairs 2000
15. [Yoon-Ho Kim; MARIA CHEKHOVA V; SERGER KULIK P](#) Interferometric Bell-state preparation using femtosecond-pulse-pumped spontaneous parametric down-conversion 2001
16. [夏江帆; 魏志义; 张杰](#) BBO晶体中非共线参量过程的带宽与增益特性研究 2002(02)
17. [KRYLOV V; GALLUS J; WILD U P](#) Femtosecond noncollinear and collinear parametric generation and amplification in BBO crystal[外文期刊] 2000(2)
18. [YANHUA SHIH](#) Entangled biphoton source-property and preparation[外文期刊] 2003(6)

#### 本文读者也读过(10条)

1. [唐筱芳](#), [刘翔](#), [TANG Xiao-fang](#), [LIU Xiang](#) [多粒子任意态的量子隐形传送](#)[期刊论文]-[湖南师范大学自然科学学报](#) 2007, 30(2)
2. [郑仕标](#) [利用多原子与腔场的非共振相互作用实现多原子纠缠态与量子信息](#)[期刊论文]-[量子光学学报](#)2002, 8(z1)
3. [肖连团](#), [降雨强](#), [赵延霆](#), [尹王保](#), [赵建明](#), [贾锁堂](#) [单光子探测用于光子统计测量的研究](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2004, 49(8)
4. [明莹](#), [MING Ying](#) [四粒子团簇态的概率量子隐形传送](#)[期刊论文]-[延边大学学报\(自然科学版\)](#) 2009, 35(2)
5. [查新未](#), [张淳民](#), [Zha Xin-Wei](#), [Zhang Chun-Min](#) [利用一个三粒子W态隐形传送N粒子GHZ态](#)[期刊论文]-[物理学报](#) 2008, 57(3)
6. [陈宇翱](#), [张强](#) [线性网络对光场量子态的变换](#)[期刊论文]-[大学物理](#)2003, 22(6)
7. [闫丽华](#), [高云峰](#), [YAN Li-hua](#), [GAO Yun-feng](#) [利用三粒子W态隐形传送任意三粒子W态](#)[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2008, 14(4)
8. [郭光灿](#) [量子通讯和量子计算](#)[会议论文]-1999
9. [汪兆民](#), [许彤](#), [许咨宗](#), [吴冲](#), [黄胜利](#), [Wang Zhaomin](#), [Xu Tong](#), [Xu Zizong](#), [Wu Chong](#), [Huang Shengli](#) [时间关联单光子计数中的多光子污染](#)[期刊论文]-[光学学报](#)2000, 20(5)
10. [邹蕊](#), [方建兴](#), [Zou Rui](#), [Fang Jianxing](#) [腔QED中三粒子W态的隐形传递](#)[期刊论文]-[苏州大学学报\(自然科学版\)](#) 2009, 25(2)

#### 引证文献(1条)

1. [张晓峰](#), [朱俊](#), [曾贵华](#) [量子光源综述](#)[期刊论文]-[南京邮电大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(2)

引用本文格式: [李永明](#), [樊代和](#), [翟泽辉](#), [张俊香](#), [郜江瑞](#) [单光子态的产生与测量](#)[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2004(1)