

基于色散位移光纤的高宣布式窄带单光子源*

杨磊 马晓欣 崔亮 郭学石 李小英†

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2010年12月9日收到; 2010年12月21日收到修改稿)

文章利用脉冲激光抽运色散位移光纤, 通过自发四波混频过程产生的关联光子对, 实验演示了一种光通讯波段的窄带宣布式单光子源. 实验测得 -3 dB 带宽为 1.1 nm 单光子场的二阶关联函数 $g^{(2)}(0) = 0.09 \pm 0.01$, 宣布效率可达 0.5 以上. 这种单光子源在量子通信中有潜在的应用前景.

关键词: 宣布式单光子, 光纤, 自发四波混频, 量子通信

PACS: 42.50.Ar, 42.50.Dv, 42.65.Lm

1. 引言

单光子源是指在任意时刻发射且只发射一个光子的光源, 它的量子光学描述为光子数态 $|1\rangle$ ^[1]. 从应用于量子通信的角度出发, 人们主要关心单光子源的三个参数^[2-4]: 1) 单光子场的二阶关联函数 $g^{(2)}(0)$; 2) 单光子发射率, 即单位时间内发射单光子的数目; 3) 单光子能否在光纤中长距离低损耗的传输, 这就要求单光子不仅波长位于光通讯波段, 而且带宽窄. 另外, 单光子源的小型化程度以及能否与光网络的高效连接也是单光子源研制中需要关心的问题.

实现单光子源的方法主要有两种. 一种方法是激发单个发射粒子, 目前已经利用包括量子点^[5]、单原子^[6]或隔离的分子^[7]以及钻石中孤立空穴^[8]等在内的单个发射粒子实验演示了单光子的产生. 另一种是利用参量过程产生的关联光子对, 探测关联光子对中的一个信号光子, 即可宣布它的孪生闲置光子的存在, 这样的单光子也被称为宣布式单光子^[9]. 后者比前者在技术上容易实现.

目前用于制备宣布式单光子的参量过程主要包括: 基于晶体二阶非线性效应($\chi^{(2)}$)的参量下转换过程和基于光纤三阶非线性效应($\chi^{(3)}$)的自发四

波混频过程. 参量过程可以由连续光抽运产生, 也可由脉冲光抽运产生. 对于连续光抽运的情形, 光子对产生的时间随机性大, 所需激光平均功率大; 而对于脉冲光抽运的情况, 则不仅可以定义光子对的产生时间, 且所需激光平均功率较低, 有利于装置的小型化及实现实验中要求的同步问题^[10].

近 30 年来, 人们对于基于参量下转换产生宣布式单光子进行了广泛而深入的研究^[11,12], 但是在将晶体产生的宣布式单光子高效地耦合进光纤以进行存储、操控及传输时, 由于模式匹配的问题, 存在着工程上的困难^[13]; 当采用脉冲光抽运时, 由于光子对空间模式和时间模式之间的关联, 窄带单光子的宣布效率通常较低^[12]. 近年来, 由光纤中自发四波混频产生光子对制备宣布式单光子引起了人们广泛的兴趣, 因为具有与光纤网络耦合效率高, 利于长距离量子通信的优点, 已经有多个小组利用光子晶体光纤产生了这种单光子^[14,15]. 我们小组也在不久前演示了商售色散位移光纤 (dispersion-shifted fiber, DSF) 产生的 1550 nm 宣布式单光子与热光子之间的四阶量子干涉^[16], 但是关于此种单光子源特性的深入分析还未见报道.

本文利用 DSF 产生通讯波段的宣布式单光子, 通过测量光子源的二阶关联函数 $g^{(2)}(0)$ 和宣布效率对其进行了描述, 并分析了影响单光子源性能的

* 国家自然科学基金 (批准号: 10774111)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20070056084)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB923101)、国家博士后科学基金 (批准号: 20100470784)、国家教育部留学回国人员科研启动基金 (批准号: 2009D4-0003) 和天津大学自主创新基金 (批准号: 020-60302054) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

主要因素,为低成本、小型化单光子源的研制奠定了基础.

2. 实验原理

当脉冲抽运光的中心波长位于 DSF 的反常色散区时,自发四波混频可满足位相匹配条件,两个抽运光子通过与光纤的 $\chi^{(3)}$ 非线性效应相作用产生时间-能量纠缠的信号与闲置光子对,在这个过程中满足能量和动量守恒. 自发四波混频过程产生的态函数可近似的表示为^[17]

$$|\Psi\rangle \approx \sqrt{P(0)}|0\rangle + \sqrt{P(1)}|1_s\rangle|1_i\rangle + \sqrt{P(2)}|2_s\rangle|2_i\rangle + \sqrt{P(2)}|3_s\rangle|3_i\rangle + \dots \quad (1)$$

式中 $|0\rangle$ 表示真空态, $|n_s\rangle|n_i\rangle$ 表示 n 对信号与闲置光子的态函数, $P(n)$ ($n=0,1,2,3,\dots$)表示 n 对光子出现的概率. 当光子对中的信号光子被单光子探测器 SPD1 探测时,态函数 $|\Psi\rangle$ 会瞬间塌缩为^[9]

$$|\Psi\rangle \approx \sqrt{P'(1)}|1_i\rangle + \sqrt{P'(2)}|2_i\rangle + \sqrt{P'(3)}|3_i\rangle + \dots \quad (2)$$

式中表示 $P'(n)$ ($n=1,2,3,\dots$) n 个光子出现的概率. 当高阶项可忽略时,(1)式表示双光子态,而(2)式表示的量子态即为单光子态.

单光子场的二阶关联函数 $g^{(2)}(0)$ 可通过 Hanbury Brown-Twiss (HBT) 干涉仪来测量,将被宣布的闲置光场输入 50/50 分束器,分束器的两个输出端口分别被 SPD2 和 SPD3 探测. 测量过程中以 SPD1 的输出电信号作为触发,测量 SPD2 和 SPD3 的单通道光子计数率和符合计数率. 二阶关联函数 $g^{(2)}(0)$ 与光子计数结果之间的关系可以表示为

$$g^{(2)}(0) = \frac{P_{123}P_1}{P_{12}P_{13}} \quad (3)$$

式中 P_1 表示信号通道的单光子计数率, $P_{12(3)}$ 表示 SPD1 和 SPD2 (3) 之间的符合计数率, P_{123} 表示 SPD1,SPD2 和 SPD3 之间的三重符合计数率. 理想单光子源 $g^{(2)}(0)$ 的值等于 0,因此 $g^{(2)}(0)$ 越小,则宣布式单光子源的光子统计特性越好.

描述宣布式单光子源的另一个关键指标是单光子发射率 R ,通常定义为

$$R = \xi R_s f. \quad (4)$$

其中 f 是抽运源的脉冲重复频率; R_s 是信号光子产生率,可以由 P_1 除以信号通道总探测效率 η_1 得到;

ξ 为光子对收集效率^[18]. 对于特定的抽运源,提高 R_s 和 ξ 均能够提高单光子发生率. 但是自发四波混频产生的信号(闲置)光子满足 Bose 光子数分布,提高 R_s 意味着多光子事件的增多,不利于光子源在量子通信中的应用^[19],因此我们在单光子源的研制中需要平衡光子发生率 R 与 R_s 之间的关系,并优化实验装置以获取尽可能高的收集效率 ξ .

对于基于自发参量过程的单光子,宣布效率是信号波段探测到一个光子时,它的孪生光子出现在闲置光波段的概率^[12],则宣布效率即为前文提到的收集效率,可表示为

$$\xi = \frac{P_{12(3)} - P_1 P_{2(3)}}{\eta_{2(3)} P_1} \quad (5)$$

式中分子表示 SPD1 和 SPD2(3)探测到的光子对真实符合计数率, $P_1 P_{2(3)}$ 表示 SPD1 和 SPD2(3)之间的随机符合计数率, $\eta_{2(3)}$ 表示经过 50/50 分束器的闲置通道总探测效率. 根据我们对于光子对频谱特性的研究,单光子源的宣布效率取决于抽运光和光子对滤波器的频谱. 如果抽运和光子对的频谱可由高斯函数描述,则单光子源宣布效率从理论上能够近似表示为^[18]

$$\xi \approx \frac{\sigma_i}{\sqrt{2\sigma_p^2 + \sigma_i^2 + \sigma_s^2}} \quad (6)$$

式中 σ_p , σ_s 和 σ_i 分别代表抽运光,信号光和闲置光-3 dB带宽,(6)式说明选择合适的抽运带宽和光子对滤波器带宽能够有效的提高宣布效率,并且由文献[18]的分析可知,选择超高斯形状的滤波器更利于提高单光子的宣布效率.

3. 实 验

利用 DSF 产生量子关联光子对的实验装置如图 1 所示. 光子对由浸泡于液氮中的 300 m DSF 产生,DSF 的零色散波长 $\lambda_0 \approx 1538$ nm. 抽运脉冲由衍射光栅对光纤飞秒脉冲激光器 (Precision photonics, 1110) 的输出进行色散分光后,截取相应波长的光波所得到. 为了达到所需的抽运功率,抽运脉冲先经过掺铒光纤放大器 EDFA 放大,而后经过两个串联的 1.1 nm 可调谐滤波器 F1 (Newport, TBF-1550-1.0) 滤波,得到中心波长位于 1538.19 nm, -3 dB 带宽为 0.6 nm 的抽运脉冲光. DSF 输出端口的关联光子对和抽运光先通过光纤偏振控制器 FPC 和光纤偏振分束器 FPBS,选取与抽运光同偏振方向的

关联光子对通过, 这样能够抑制与抽运光垂直的拉曼光子, 有利于提高光子对的纯度^[20,21].

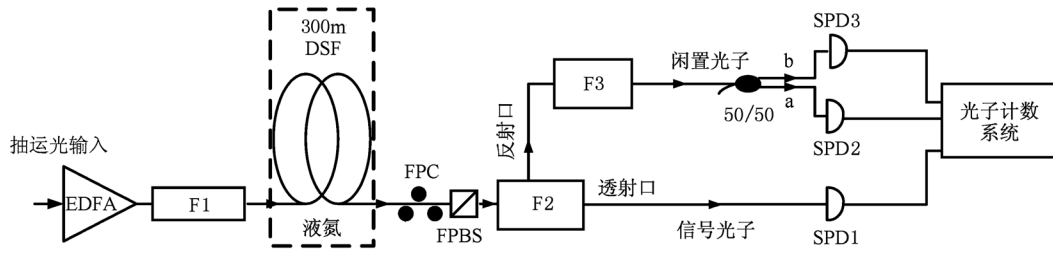


图1 基于 DSF 的宣布式单光子源

由于自发四波混频过程产生光子对的效率较低, 当抽运光的强度为每个脉冲包含 10^7 个光子时, 光子对的产生率约为每个脉冲 0.1 对; 因此要可靠的对光子对进行探测, 则对于抽运光的隔离需大于 100 dB. DSF 输出信号分别经过滤波器 F2 和滤波器 F3 滤波, 以获得信号光子和闲置光子. 滤波器 F2 由 100 GHz 和 200 GHz 的超高斯型 WDM 滤波器串接而成, 中心波长为 1544.53 nm, -3 dB 带宽为 0.6 nm; 滤波器 F3 由两个串联的 200 GHz 超高斯型 WDM 滤波器组成, 中心波长为 1531.9 nm, -3 dB 带宽为 1.1 nm. 滤波器 F2 和滤波器 F3 的透射谱如图 2 所示.

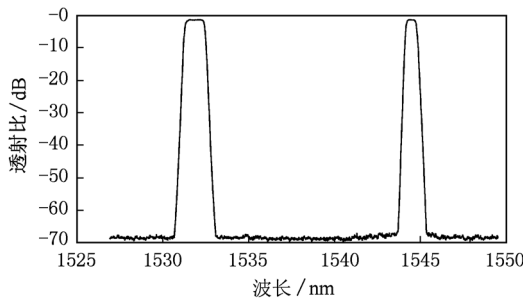


图2 滤波器 F2 和滤波器 F3 的光学透射谱

信号和闲置光子被工作于门模盖革模式下的 SPD1, SPD2 和 SPD3 测量, 门脉冲的宽度分别为 1 ns, 2.5 ns 和 1 ns, 利用数字延时器实现电触发脉冲与光子的同时到达. 探测器的工作频率为 1.29 MHz, 是抽运脉冲重复频率的 1/32, 为了抑制探测过程中的后脉冲效应, 设置三个探测器的死时间分别为 5 μ s, 5 μ s 和 10 μ s. 实验中通过基于 Labview8.0 的单光子数据采集系统记录 SPD1, SPD2 和 SPD3 的三重符合计数率 (P_{123}), SPD1 和 SPD2 (3) 之间的两重符合计数 ($P_{12(3)}$) 以及 SPD1 的单通道计数 (P_1). 信号光、闲置光通道 a 和闲

置通道 b 总的探测效率分别为 9.2%, 2.1% 和 2.6%, 其中 DSF 的传输效率为 72%, 信号光和闲置光通道总的传输效率分别为 54% 和 36%, SPD1, SPD2 和 SPD3 的量子效率分别为 20%, 14% 和 17%.

由于高纯度的关联光子对是产生高质量宣布式单光子的基础, 在我们检验所产生单光子场的光子统计特性和宣布效率之前, 首先描述由 DSF 产生光子对的关联特性. 实验中, 我们利用 SPD1 和 SPD2 记录了在不同平均抽运功率 P_{ave} 下, 信号光通道的单通道光子计数率 P_1 和符合计数率 P_{12} , 如图 3 所示. 图 3 (a) 中利用二阶多项式 $P_1 = s_1 P_{ave} + s_2 P_{ave}^2$ 对信号光通道探测到的光子数进行了拟合, 其中 $s_1 P_{ave}$ 和 $s_2 P_{ave}^2$ 分别代表拉曼光子和四波混频光子的强度. 图中当抽运功率 P_{ave} 大于 0.06 mW 时, 由四波混频产生的光子即占主导地位. 图 3 (b) 表示信号与闲置光子之间符合计数率和随机符合计数率以及它们之间的比值 (CAR)^[22] 随抽运功率的变化关系. 当 $P_{ave} = 0.05$ mW 时, 信号光子产生率为每个脉冲 0.01 个, 此时的 CAR 值可达 ~45, 说明光子对的纯度较高.

接下来我们利用图 1 装置测量不同抽运功率下单光子源的二阶关联函数 $g^{(2)}(0)$ 和宣布效率两个参数. 实验中, 我们利用 SPD1, SPD2 和 SPD3 记录了不同抽运功率下的单通道计数率、二重符合计数率和三重符合计数率. $g^{(2)}(0)$ 可以根据光子计数结果和 (3) 式计算得到, 如图 4 (a) 所示, $g^{(2)}(0)$ 随抽运功率的增大而增大, 当信号光子产生率为每脉冲 0.01 个时, 宣布式单光子场的 $g^{(2)}(0) \approx 0.09 \pm 0.01$, 远低于 $g^{(2)}(0) = 1$ 的经典极限. 图 4 (b) 是单光子源的宣布效率与平均抽运功率之间的关系. 随着抽运功率的增加, 测得的宣布效率值也不断增大; 这是因为抽运功率越高, 拉曼散射光子在信号

光子中所占的比重越低,因此宣布效率的值越高.图 4(b)中修正宣布效率值是根据图 3(a)中结果减

去拉曼噪声光子后得到的,五个数据点的平均值为 0.88 ± 0.02 .

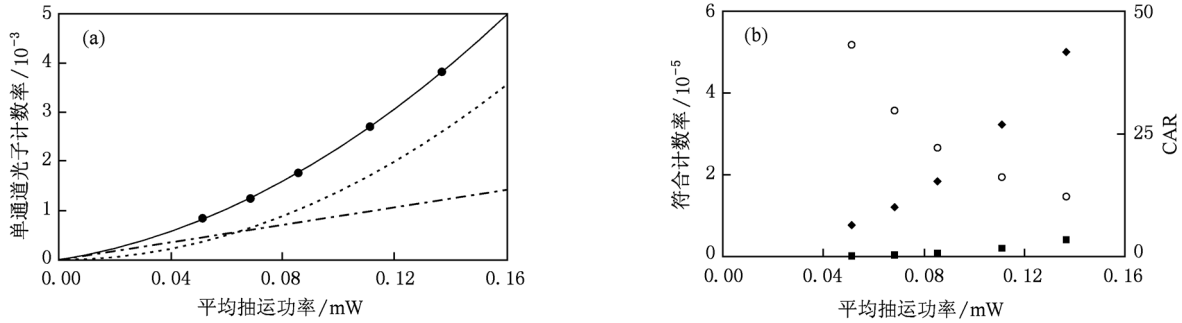


图 3 300 m DSF 产生关联光子对的实验结果 (a) 信号光通道的光子计数率与平均抽运功率的关系 (实线为二阶多项式 $P_1 = s_1 P_{ave} + s_2 P_{ave}^2$, 点划线和和虚线分别代表拟合函数的线性项 $s_1 P_{ave}$ 和平方项 $s_2 P_{ave}^2$, 拟合系数 $s_1 = 0.0089, s_2 = 0.1391$); (b) 符合计数率的实验结果 (实心菱形点和实心方形点分别代表由同一抽运脉冲和相邻抽运脉冲产生的信号和闲置光子的符合计数率和随机符合计数率;空心圆点表示符合计数率与随机符合计数率的比值 CAR 值,由图中的右坐标表示)

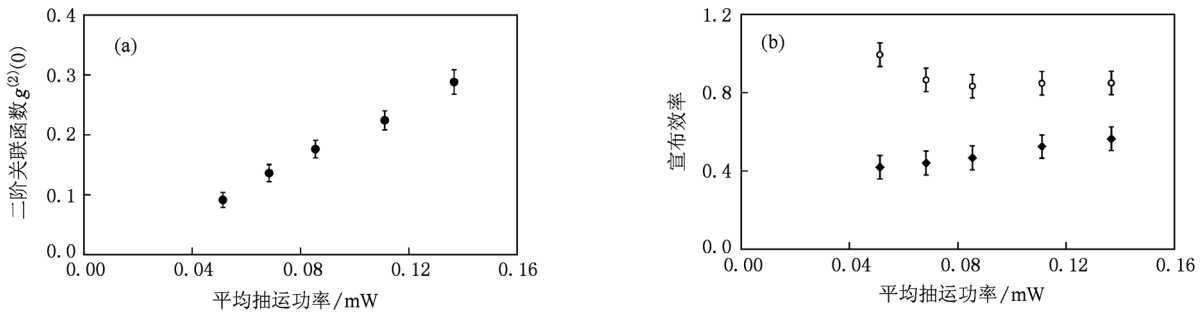


图 4 测试宣布式单光子源的实验结果 (a) 二阶关联函数与平均抽运功率之间的关系; (b) 宣布效率与平均抽运功率之间的关系 (实心菱形点为实验数据,空心圆点为修正后的宣布效率值)

4. 总结与讨论

我们利用 300 m DSF 产生了光通讯波段 -3 dB 带宽为 1.1 nm 的宣布式单光子. 实验测得当信号光子产生率为每脉冲 0.01 个时,单光子的 $g^{(2)}(0) \approx 0.09 \pm 0.01$,光子源的宣布效率测量值能够达到 0.5 以上,减去拉曼光子后的修正值为 0.88. 宣布效率的实测值可通过液氮(4 K)冷却光纤^[23]或产生大失谐的光子对以避开拉曼增益峰^[15]的方法提高至 0.8 以上. 这种在较窄的滤波器带宽条件下达到较高宣布效率的光源,有利于节省通信系统中的信

道资源,为实现密集波分复用的量子通信提供了方便.

我们实验演示单光子源的单光子发生率和探测率尚比较低,一方面是所用激光器的重复频率较低;另一方面为了避免多光子事件的发生,选择了较低的光子产生率,同时也受限于 1550 nm 波段单光子探测器的性能^[24]. 如果利用重复频率 10 GHz 以上的商用光纤激光抽运源或者将多个宣布式单光子源在时间序列上有效的串接起来^[25],便能够在较低的多光子事件下获取高的单光子发生率. 随着高速单光子探测器的出现^[26]和可分辨光子技术^[27,28]的进步,也会不断地推动单光子源的发展.

[1] Lounis B, Orrit M 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 1129

[2] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145

[3] Mi J L, Wang F Q, Lin Q Q, Liang R S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1178

[4] Deng F G, Li X H, Li C Y, Zhou P, Zhou H Y 2007 *Chin.*

- Phys.* **16** 3553
- [5] Waks E, Inoue K, Santori C, Fattal D, Vuckovic J, Solomon G S, Yamamoto Y 2002 *Nature* **420** 762
- [6] Kuhn A, Hennrich M, Rempe G 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 067901
- [7] Brunel C, Lounis B, Tamarat P, Orrit M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2722
- [8] Kurtsiefer C, Mayer S, Zarda P, Weinfurter H 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 290
- [9] Hong C K, Mandel L 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 58
- [10] Castelletto S A, Scholten R E 2008 *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **41** 181
- [11] Fasel S, Alibert O, Tanzilli S, Pascal B, Beveratos A, Gisin N, Zbinden H 2004 *New J. Phys.* **6** 613
- [12] Pittman T B, Jacobs B C, Franson J D 2005 *Opt. Commu.* **246** 545
- [13] Andrews R, Pike E R, Sarkar S 2004 *Opt. Express* **12** 3264
- [14] Goldschmidt E A, Eisaman M D, Fan J, Polyakov S V, Migdall A 2008 *Phys. Rev. A* **78** 013844
- [15] McMillan A R, Fulconis J, Halder M, Xiong C, Rarity J G, Wadsworth W J 2009 *Opt. Express* **17** 6156
- [16] Li X Y, Yang L, Cui L, Ou Z Y, Yu D Y 2008 *Opt. Express* **16** 12505
- [17] Tapster P R, Rarity J G 1998 *J. Mod. Opt.* **45** 595
- [18] Li X Y, Ma X X, Quan L M, Yang L, Cui L, Guo X S 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1857
- [19] Brassard G, Lutkenhaus N, Mor T, Sanders B C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1330
- [20] Li X Y, Chen J, Voss P, Sharping J, Kumar P 2004 *Opt. Express* **12** 3737
- [21] Li X Y, Voss P, Chen J, Lee K F, Kumar P 2005 *Opt. Express* **13** 2236
- [22] Yang L, Wang B S, Li X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4933 (in Chinese) [杨磊、王宝善、李小英 2008 物理学报 **57** 4933]
- [23] Dyer S D, Stevens M J, Baek B, Nam S W 2008 *Opt. Express* **16** 9966
- [24] Ribordy G, Gautier J D, Zbinden H, Gisin N 1998 *Appl. Opt.* **37** 2272
- [25] Migdall A L, Branning D, Castelletto S 2002 *Phys. Rev. A* **66** 053805
- [26] Nmekata N, Sasamori S, Inoue S 2006 *Opt. Express* **14** 10043
- [27] Pomarico E, Sanguinetti B, Thew R, Zbinden H 2010 *Opt. Express* **18** 10750
- [28] Wu G, Jian Y, Wu E, Zeng H P 2009 *Opt. Express* **17** 18782

Fiber-based narrow-band single-photon source with high heralding efficiency*

Yang Lei Ma Xiao-Xin Cui Liang Guo Xue-Shi Li Xiao-Ying[†]

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 9 December 2010; revised manuscript received 21 December 2010)

Abstract

According to the correlated photon pairs produced by spontaneous four-wave mixing in dispersion-shifted fiber, we present a telecom-band single-photon source by using mode-locked laser. Single-photons with a -3 dB bandwidth of 1.1 nm are heralded with more than 50% probability. The measured second-order correlation $g^{(2)}(0)$ is equal to 0.09 ± 0.01 . Our source is well suit for quantum communication systems.

Keywords: heralded single-photons, fiber, spontaneous four-wave mixing, quantum communication

PACS: 42.50.Ar, 42.50.Dv, 42.65.Lm

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10774111), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20070056084), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB923101), the National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (Grant No. 20100470784), the Scientific Research Staring Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education of China (Grant No. 2009D4-0003) and the Self-innovation Foundation of Tianjin University, China (Grant No.020-60302054).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn