

自由空间量子通讯实验中纠缠源的研制*

王少凯^{1)†} 任继刚¹⁾ 金贤敏²⁾ 杨彬²⁾ 杨冬¹⁾ 彭承志¹⁾
蒋硕¹⁾ 王向斌¹⁾

1) 清华大学物理系, 北京 100084)

2) 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

(2007 年 5 月 16 日收到, 2007 年 6 月 4 日收到修改稿)

设计了适合自由空间量子通讯实验的纠缠源. 纠缠光子对的单模光纤搜集率约为每秒 20000 对, 水平竖直方向的纠缠对比度大于 95%, 正负 45° 方向的纠缠对比度大于 90%. 在本地得到了大于 100 个标准偏差的 Bell 不等式破缺. 满足 20 km 量级的自由空间量子通讯试验要求.

关键词: 纠缠光子对, 位相匹配, 收集效率, 贝尔不等式

PACC: 0367, 4265, 4250

1. 引 言

量子纠缠无论是在量子力学基本原理的检验^[1]方面还是在新兴的量子信息, 量子计量及其应用中都扮演着最关键的角色^[2]. 到目前为止, 产生纠缠最成熟的技术是利用非线性晶体中的自发参量下转换过程产生光子对的方法^[3-5]. 上世纪末本世纪初, 由于自发参量下转换技术的进步, 符合计数率有了很大的提高, 量子信息领域的一系列理论设想在实验上纷纷得到了验证^[6-8]. 随着量子通讯向实用化方向的不断发展, 对纠缠源的计数率与纠缠品质提出了更高的要求. 量子通讯实验中信道有两种: 单模光纤与自由空间. 这两种信道各有优缺点. 但是在实现量子安全通讯距离突破 100 km 量级距离限制方面, 自由空间由于只需要突破地面等效大气厚度约为 5—10 km 的距离而更有优势^[9,10]. 在自由空间量子通讯实验中, 由于光子在自由空间传播, 因此必须仔细考虑信号光子的波长. 所选的波长必须具有较高的探测效率与较低的传输损耗. 目前的商用单光子计数器在 700—800 nm 附近具有很高的量子效率(70%)与很低的暗计数水平(100/s), 而且大气透过率也很高. 但是要想产生这个波段的下转换光子, 就须使用波长小于 400 nm 的激光器^[10]. 但是在

这个波段的激光器一般是离子激光器, 使用和维护都比较麻烦, 尤其是在野外自由空间量子通讯实验中就更不具有可行性了. 随着半导体技术的发展, 波长在 400 nm 附近, 功率有几十毫瓦的半导体激光器已经有商用产品. 因此很有必要开发紧凑并容易移动的基于半导体抽运的纠缠源^[11,12].

2. 二类匹配自发参量下转换过程的理论分析

在某些非中心对称性的晶体中, 一个高能量的光子可以通过二阶非线性光学效应, 自发地转换为两个能量较低的光子对. 在这个过程中, 需要满足能量守恒与相位匹配条件. 若两个下转换光子的偏振相同, 我们称这种匹配为一类相位匹配. 若两个下转换光子的偏振正交, 称这种匹配为二类相位匹配. 在这里我们只讨论二类相位匹配的情况. 该过程可以用下面的哈密顿量^[13-16]来描述:

$$H = \epsilon_0 \int d^3 r \chi^2 E_p(z, t) E_s^- E_i^- + \text{H.C.}, \quad (1)$$

$$|\psi\rangle = -\frac{i}{\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} dt H |0\rangle, \quad (2)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数, χ^2 为晶体的二阶非线性张量. E_p , E_s , E_i 分别表示抽运光与信号光以及闲置

* 清华 985 基金(批准号 J051110001)资助的课题.

† E-mail: wsk03@mails.thu.edu.cn

光的电场量。由于 χ^2 通常都很小, 所以可以一阶微扰展开来描述所产生的光场。对(2)式进行积分的结果给出自发参量下转换过程的光谱分布

$$\psi \propto \sin^2\left(\frac{\Delta L}{2}\right), \quad (3)$$

其中 L 为晶体的长度, Δ 为位相失配。图 1 给出了一个典型的二类匹配下转换的光谱分布。

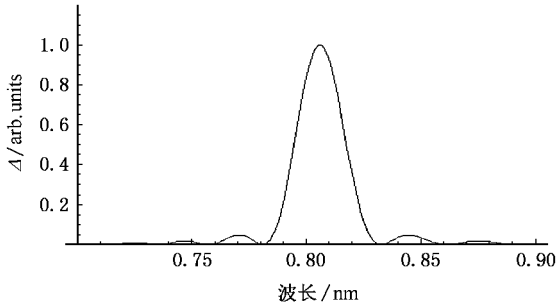


图 1 二类位相匹配下转换的光谱图(计算参数: 抽运光波长 403 nm, 晶体切割角度 $\theta = 42.8^\circ$, $\varphi = 30^\circ$, 晶体厚度 2 mm)

理论计算表明^[13], 当信号光与闲置光的波长相等时, 它们的出射方向是关于抽运光方向对称的两个圆锥, 如图 2 所示。选择合适的晶体切割角, 可以使两个圆锥相交。在两个圆锥的交点上, 出射光子的偏振是不确定的, 但是在任意的基矢下它们的偏振都具有完美的反关联特性, 因此说这两个光子是纠缠的。

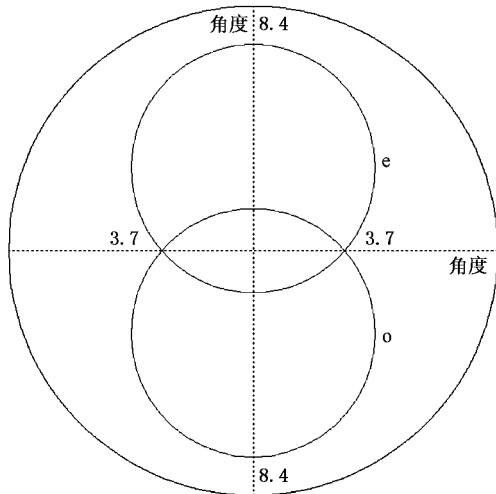


图 2 简并情况下的下转换出射角分布(计算参数: 抽运光波长 403 nm, 晶体切割角度 $\theta = 42.8^\circ$, $\varphi = 30^\circ$, 下转换波长为 806 nm)

在设计纠缠源时, 必须考虑由于晶体的双折射效应导致的纠缠度的降低, 所以必须加以补偿。双折射效应会导致下转换光子在晶体内的横向走离与

纵向走离效应^[5], 这些效应都有可能破坏光子对的相干性, 必须用量子擦除技术^[17]使相干恢复。恢复的办法就是在下转换光路中加入半波片与一块厚度为主 BBO 晶体一半的辅助 BBO, 使横向与纵向的走离都得到补偿。横向走离的大小可由下式^[18]计算:

$$\Delta X = \frac{L}{2} \times \frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin 2\theta}{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}, \quad (4)$$

其中 ΔX 表示寻常光与非常光在离开晶体表面分开的距离, θ 为晶体的切割角, L 为晶体的长度, n_o , n_e 分别为晶体中寻常光与非常光的折射率。纵向走离效应主要考虑由于寻常光与非常光折射率不同导致的光子到达的时间不同, 最大时间差由下式^[13]给出:

$$\delta T = L \left(\frac{1}{u_o} - \frac{1}{\mu_e} \right), \quad (5)$$

其中 L 为晶体的长度, u_o , u_e 分别为晶体中寻常光与非常光的群速度。理论计算给出 2 mm 厚的 BBO 晶体 ($\theta = 42.8^\circ$) 的横向走离为 0.14 mm, 纵向走离为 0.5 ps。这两个数值对抽运光的聚焦、所用激光器的线宽以及收集带宽提出了限制。

好多文献对于如何提高纠缠源的亮度给出了不同的方法, 有的通过聚焦抽运光^[19-20], 有的通过使用周期性极化晶体^[21-22], 还有通过使用共振腔^[23-24]的。本文使用文献[25]中的方法。

3. 实验装置与结果

实验装置如图 3 所示。实验中我们用焦距为 50 cm 的透镜对中心波长为 403 nm, 功率为 40 mW 的激光聚焦, 聚焦后光斑的直径大约为 0.3 mm。抽运激光通过厚度为 2 mm 的, 切割角为 $\theta = 42.8^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ 的 BBO 晶体, 产生自发产量下转换。两个波长简并的光子对在水平面内与抽运光成大约 3.7° 角。在一定范围内, 下转换光子的出射角度与其波长成线性关系, 通过选择收集带宽可以确定所收集光子模式的发散角。我们实验上选取 3 nm 带宽内的光子为

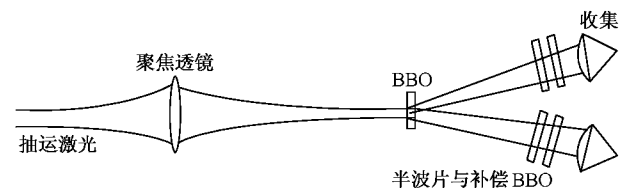


图 3 实验装置

收集目标^[25],其远场发散角约为 0.1° . 该目标模式经过一段距离传输后,经过焦距为 11 mm 的非球面镜作用,与单模光纤的模场相匹配. 收集纠缠光子对的光纤为Thorlabs公司的P1-830A-FC-5,其模场直径为 $\text{MFD} = 5.6\ \mu\text{m}$. 收集到的光子对经过单模光纤直接进入单光子探测器(SPCM-AQR-12). 实验上我们得到符合计数为 20000 cps ,符合门宽度为 5 ns . 在HV基下的对比度大于 95% ,正负基下的对比度为 90% . 在其中一路上加入一块相干滤波片,得到的符合计数率为 10000 cps . 此时HV基下的对比度大于 99% ,正负基下的对比度为 96% ,纠缠对比度曲线如图4所示. 实验的最后我们还以Clauser-Horne-Shimony-Holt(CHSH)不等式^[9,26]作为对纠缠特性的检验. 局域实在论预言 $S \leq 2$,而量子力学则预言 $S \leq 2\sqrt{2}$. 我们实验的每个数据测量时间为 10 s . 结果实验得到139个标准偏差的破缺.

$$\begin{aligned} E(-22.5^\circ, -45^\circ) &= -0.6212 \pm 0.0027, \\ E(22.5^\circ, -45^\circ) &= 0.7345 \pm 0.0024, \\ E(-22.5^\circ, 0^\circ) &= -0.7264 \pm 0.0027, \\ E(22.5^\circ, 0^\circ) &= -0.6287 \pm 0.0024, \\ S &= 2.7108 \pm 0.0051. \end{aligned}$$

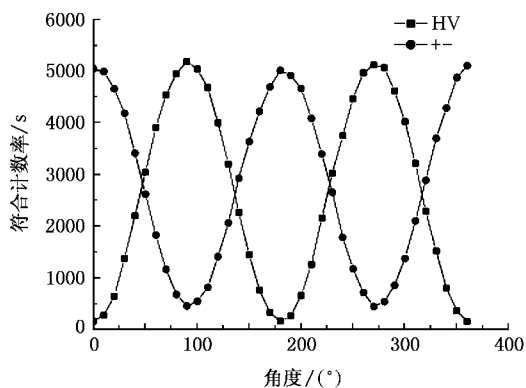


图4 纠缠对比度曲线

4. 讨论与总结

我们设计了用半导体激光器抽运的偏振纠缠源. 在水平垂直方向的纠缠对比度大于 95% ,正负 45° 方向的纠缠对比度大于 90% ,符合计数率为 $500\text{ c}\cdot\text{s}^{-1}\text{ mW}^{-1}$. 在本地进行了Bell不等式的测量,结果有大于100个标准偏差的破缺,满足自由空间量子通讯实验的要求.

[1] Aspect A, Grangier P, Roger G 1981 *Phys. Rev. Lett.* **47** 460
 [2] Zeilinger A 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** S288
 [3] Hong C K, Mandel L 1985 *Phys. Rev. A* **31** 2409
 [4] Rarity J G, Tapster P R 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 2495
 [5] Kwiat P G, Mattle K, Weinfurter H, Zeilinger A, Sergienko A V, Shih Y H, 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 4337
 [6] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K 1997 *Nature* **390** 575
 [7] Jennewein T 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4729
 [8] Mattle K, Weinfurter H, Kwiat P G, Zeilinger A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4656
 [9] Peng C Z, Yang T, Bao X H, Zhang J, Jin X M, Feng F Y, Yang B, Yang J, Yin J, Zhang Q, Li N, Tian B L, Pan J W 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 150501
 [10] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
 [11] Aspelmeyer M, Bohm H R, Gyatso T, Jennewein, Altenbaek T R, Lindenthal M, Molina T G, Poppe A, Resch K, Taraba M, Ursin R, Walther P, Zeilinger A 2003 *Science* **301** 621
 [12] Trojek P, Schmid C, Bourennane M, Weinfurter H 2004 *Optics Express* **12** 277
 [13] Rubin M H 1996 *Phys. Rev. A* **54** 5349

[14] Rubin M H, Klyshko D N, Shih Y H, Sergienko A V 1994 *Phys. Rev. A* **50** 5122
 [15] Shih Y H, Sergienko A V, Rubin M H, Kiess T E, Alley C O 1994 *Phys. Rev. A* **49** 4243
 [16] Shih Y H, Sergienko A V, Rubin M H, Kiess T E, Alley C O 1994 *Phys. Rev. A* **50** 23
 [17] Kwiat P G, Steinberg A M, Chiao R Y 1992 *Phys. Rev. A* **45** 7729
 [18] Boyd R 1992 *Nonlinear Optics* (New York: Academic Press, Inc.)
 [19] Monken C H, Suoto Ribeiro P H, Pa'dua S 1998 *Phys. Rev. A* **57** R2267
 [20] Monken C H, Suoto Ribeiro P H, Pa'dua S 1998 *Phys. Rev. A* **57** 3123
 [21] Kuklewicz C E, Fiorentino M, Messin G, Wong F N C, Shapiro J H 2004 *Phys. Rev. A* **69** 13807
 [22] Ji L L, Wu L A 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 736 (in Chinese) [季玲玲, 吴令安 2005 物理学报 **54** 736]
 [23] Ou Z Y, Lu Y J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2556
 [24] Oberparleiter M, Weinfurter H 2000 *Opt. Commun.* **183** 133
 [25] Kurtsiefer C, Oberparleiter M, Weinfurter H 2002 *Phys. Rev. A* **64** 23802
 [26] Clauser J F, Shimony A 1978 *Rep. Prog. Phys.* **41** 1881

The design of entangled source for free space quantum communications^{*}

Wang Shao-Kai^{1)†} Ren Ji-Gang¹⁾ Jin Xian-Min²⁾ Yang Bin²⁾ Yang Dong¹⁾

Peng Cheng-Zhi¹⁾ Jiang Shuo¹⁾ Wang Xiang-Bin¹⁾

¹ *Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

² *Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

(Received 16 May 2007 ; revised manuscript received 4 June 2007)

Abstract

We design and build an entanglement source suitable for free space quantum communications experiment. The coincidence counting rate after single mode fiber is 20000 cps. The entanglement visibility is more than 95% in horizontal vertical base and more than 90% in diagonal base. The Bell inequality was broken by more than 100 standard deviations in local experiment. The entanglement source satisfies the requirements for 20 km free space quantum communications experiment.

Keywords : entangled photon pair , phase matching , collection efficiency , Bell inequality

PACC : 0367 , 4265 , 4250

^{*} Project supported by the 985 funding of Tsinghua University (Grant No. 051110001).

[†] Corresponding author. E-mail : wsk03@mails.thu.edu.cn