

基于周期极化 KTiOPO_4 晶体的 高亮度纠缠源研制*

任继刚^{1)†} 张 涵²⁾ 蔡昕东²⁾ 印 娟²⁾ 周 飞¹⁾ 彭承志^{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, 合肥微尺度物质科学国家实验室, 合肥 230026)

(2009 年 6 月 15 日收到, 2009 年 6 月 22 日收到修改稿)

量子纠缠是量子信息领域的核心资源, 目前利用 β 型硼酸钡(BBO)晶体参量下转换制备的纠缠光子对的亮度较低, 它直接制约了量子通信的最远距离, 已无法满足星地实用化量子通信的发展需求. 利用周期极化 KTiOPO_4 晶体, 采用准相位匹配技术设计产生了一种后选择的纠缠源, 测得的符合计数达到了 $16 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ mW}^{-1}$, 极化对比度达到 27:1, 在亮度上比基于 BBO 的量子纠缠光源提高了一个数量级以上. 这一高亮度的纠缠源可以广泛应用于量子密钥分发、量子隐形传态以及量子计算等新兴量子信息领域, 为实现全球化量子通信提供了有力的保障.

关键词: 纠缠态, 准相位匹配, 周期极化 KTiOPO_4 晶体

PACC: 0367, 4265, 4250

1. 引 言

作为量子力学的最基本元素, 量子纠缠是验证量子力学完备性和非局域性的重要资源, 同时它还是量子信息学的核心资源, 在量子通信(最典型的有量子密钥分发和量子隐形传态)、量子计算等方向有着广泛的应用. 20 世纪 60 年代末期诞生了自发参量下转换(SPDC)技术, 即一个高频的光子穿过某些非线性晶体时, 由于二阶非线性光学效应可以自发地转换为两个低频的光子. 80 年代中期这一技术开始被应用于纠缠光子对的制备. 直到现在, 这仍然是制备纠缠源应用最广泛、最成熟的技术, 期间主要采用 II 型相位匹配的非线性晶体 β 型硼酸钡(BBO)^[1]. 基于 BBO 参量下转换的纠缠源亮度与纠缠品质也不断在提升^[2], 目前已有研究组利用大功率激光器(450 mW)抽运产生的 $360 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ^[3], 以及利用新近发展起来的便携式半导体激光器(40 mW)搭建的小型化纠缠源 $20 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. 小型化纠缠源的发展在某种程度上使得量子通信实用化成为可能, 然而要实现超远距离的实用量子通信, 更长远的要

建立全球量子通信网络, 必须首先解决在地球上任意两地之间建立纠缠的问题, 基于空间平台量子通信是国际公认最为可行的方案之一. 一方面, 基于空间平台的量子通信能避免长距离的大气损耗, 但由于空间平台发射接收望远镜口径的限制, 百公里量级的几何损耗也是很严重的, 要实现空地的纠缠分发, 信道总损耗约为 60 dB 以上, 因此对纠缠源的原始亮度提出了更高的要求, 需要达到 10^7 s^{-1} . 另一方面, 现有的半导体激光功率都比较小, 短期内没有更高的发展空间, 而且随着抽运功率的增长纠缠品质也会有所下降. 综合以上两方面, BBO 晶体参量下转换效率已无法满足需求, 寻找更高转换效率的晶体, 研究开发更高亮度的量子纠缠产生机制成为了当务之急.

最近的研究^[4-9]表明, 基于周期性极化 KTiOPO_4 (PPKTP)晶体和准相位匹配技术能够大幅度提高纠缠光源的亮度. 国际上已有研究组将这种纠缠光源应用于远距离量子通信实验中^[10]. 本文设计了一种基于 PPKTP 晶体后选择纠缠光源, 亮度达到 $16 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ mW}^{-1}$, 该结果比基于 BBO 的纠缠光源^[2]提高了一个数量级以上.

* 清华 985 基金(批准号 051110001)和国家自然科学基金(批准号 60708023)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: pcz@mail.thu.edu.cn

2. PPKTP 晶体纠缠产生机理分析

2.1. 准相位匹配原理

基于非线性晶体的参量下转换过程是实验上产生纠缠光子对的有效方式之一. 所谓参量下转换, 就是指一个高频光子(抽运光 p) 穿过某些非线性晶体时, 由于二阶非线性光学效应可以自发地转换为两个低频光子(信号光 s 和闲频光 i), 本质上这是一个三波混频过程, 要实现有效的参量振荡必须同时满足能量和动量守恒定律, 即

$$\begin{aligned} k_p &= k_s + k_i, \\ \omega_p &= \omega_s + \omega_i. \end{aligned} \quad (1)$$

定义相位匹配条件为

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i = 0, \quad (2)$$

其中波矢 $k = \frac{n\omega}{c}$. 假设信号光和闲频光频率简并, 在理想情况下, 若非线性晶体对不同波长的光折射率相等, 那么相位匹配条件可以得到满足, 简化为 $\Delta k = k_p - 2k_s = 0$. 但在可见光和近红外区域大多数非线性晶体都有正常色散, $n_s > n_p$, 也就导致了无法满足相位匹配条件, 称之为相位失配, $\Delta k \neq 0$. 理论和实验研究表明, 信号光的光强和失配相位之间的关系满足

$$I \propto \text{sinc}^2(\Delta l/2), \quad (3)$$

其中 l 为抽运光进入晶体的距离, 可见相位失配会使信号光光强随着作用距离的不同而周期性地振荡. 定义相干长度为 $l_c = \lambda/4(n_p - n_s)$, 表示抽运光和信号光的相位差变化 π 时的长度. 此时信号光的强度第一次达到极大值. 而当抽运光进入非线性晶体的距离达到 $2l_c$ 时, 信号光强度达到极小值. 这种振荡大大影响了下转换过程的效率. 通常满足相位匹配的方法是对非线性晶体进行特殊的切割方式, 利用非线性晶体的折射率椭球使得相位匹配, 如 BBO 晶体.

本文中选用的 PPKTP 晶体则是通过周期性地改变非线性晶体的极化方向来实现信号光的持续增强. 这也是 PPKTP 晶体转换效率高于 BBO 晶体的主要原因, 我们称为准相位匹配. 其原理如下: 首先周期性地改变非线性晶体的极化方向, 选择极化周期等于两个相干长度 ($2l_c$). 这样, 当抽运光进入非线性晶体内的距离在一个相干长度时, 和相位匹配情

况一样信号光光强持续增加; 当进入距离超过一个相干长度时(即信号光光强即将要下降来完成一个周期的振荡时), 晶体的极化方向就改变. 这使得对于相位差为 π 的信号光再进行一个相干长度的增强. 待到作用距离达到 $2l_c$, 极化方向将再次改变. 这样通过周期性地改变极化方向可以使此过程持续下去, 即使得信号光强永远只重复振荡周期中光强增强的那半个周期过程. 这种方法并没有达到完全相位匹配的效果, 因此称为准相位匹配. 原来的相位匹配条件等效为准相位匹配条件,

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i - \frac{2\pi}{\Lambda(T)}, \quad (4)$$

其中 $\Lambda(T)$ 为极化反转周期.

2.2. 晶体选择及准相位匹配要求

由于反转极化周期 $\Lambda(T)$ 是温度的函数, 晶体的折射率 $n(\lambda, T)$ 又是波长和温度的函数, 抽运光的线宽、波长稳定性以及晶体温度都直接关系到准相位匹配条件是否满足. 抽运光线宽展宽, 温度的大幅变化将导致信号光产生效率低. 由能量守恒定律经理论计算, 当参量放大增益降为最大值一半时, 相应的温度偏差和抽运光线宽有如下表达式:

$$\begin{aligned} \delta T &= \frac{0.4429\lambda}{L} \left| \frac{\alpha(n_s - n_p)}{\partial T} + \alpha(n_s - n_p) \right|, \\ \delta \lambda &= \frac{0.4429\lambda}{L} \left| \frac{n_s - n_p}{\lambda} + \frac{\partial n_p}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{\partial n_s}{\partial \lambda} \right|. \end{aligned} \quad (5)$$

实验中所用的 PPKTP 晶体参数如表 1 所列.

表 1 PPKTP 晶体参数

	晶体长度/mm	极化方向	折射率	热膨胀系数/ 10^{-6}K^{-1}
抽运光	10	Y	1.8522	9.0
信号光	10	Y	1.7591	9.0
闲置光	10	Z	1.8463	0.6

将表 1 中的参数代入(5)式可以算出波长的线宽的可容忍范围是 1.06 nm, 温度偏差范围在 1.34 K, 因此我们在实验中选用线宽在 10 GHz 以上的激光器, 温度控制精度设在 0.1°C , 以满足准相位匹配条件.

2.3. 后选择纠缠源产生原理

如图 1 所示, 光子 1 处于 $|+\rangle$ 极化态, 光子 2 处于 $|-\rangle$ 极化态. A, B, C, D 表示极化分束器(PBS)的四个空间模. 光子 1 由空间模 A 入射, 光子 2 由空间模 B 入射, 让这两个单一极化的光子态在 PBS

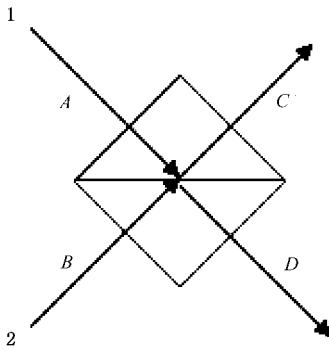


图1 后选择方式产生纠缠源机理示意图

上发生干涉过程解释如下：首先入射光子态可以写为

$$|+_{1}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{1}\rangle + |V_{1}\rangle) \cdot |A_{1}\rangle, \quad (6)$$

$$|-_{2}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{2}\rangle - |V_{2}\rangle) \cdot |B_{2}\rangle.$$

经过 PBS 作用后光子 1 和光子 2 出射时就分别变为如下形式：

$$|+_{1}\rangle \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{1}\rangle |D_{1}\rangle + i|V_{1}\rangle |C_{1}\rangle),$$

$$|-_{2}\rangle \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{2}\rangle |C_{2}\rangle + i|V_{2}\rangle |D_{2}\rangle). \quad (7)$$

两光子的直积态可以写为

$$|\varphi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{1}\rangle |D_{1}\rangle + i|V_{1}\rangle |C_{1}\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{2}\rangle |C_{2}\rangle + i|V_{2}\rangle |D_{2}\rangle). \quad (8)$$

又因为两个光子原则上是不可分辨的，考虑全同性原理，将光子 1 和光子 2 对换又有 $|\varphi_{21}\rangle$ ，因此 PBS 干涉后的态为

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\varphi_{12}\rangle + |\varphi_{21}\rangle). \quad (9)$$

对(9)式作 Bell 基展开，通过空间模 C 和 D 的符合测量手段进行后选择，可以排除两个光子同时走同一空间模的情况，得到双光子纠缠态。通过相位调节实现最大纠缠态为

$$|\phi^{-}_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_{1}\rangle |H_{2}\rangle - |V_{1}\rangle |V_{2}\rangle). \quad (10)$$

3. 实验装置与结果

实验装置如图 2 所示。

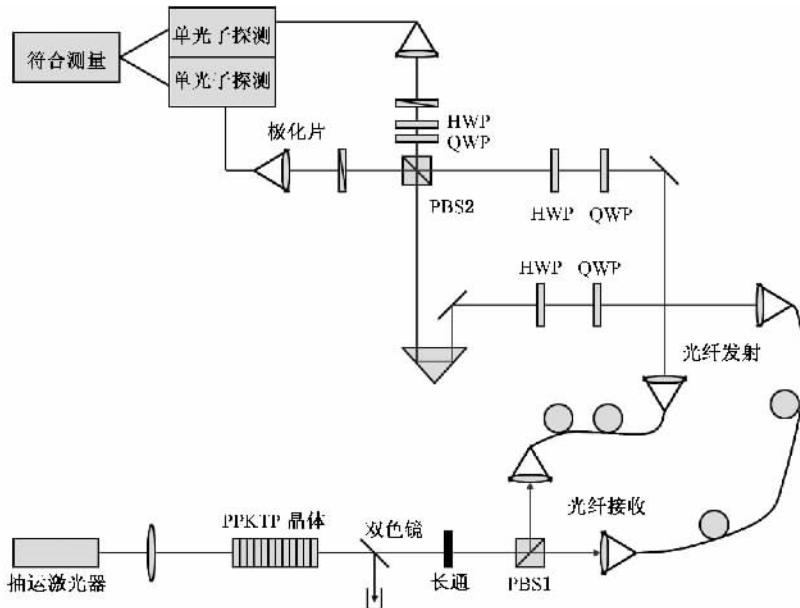


图2 实验装置示意图

实验中采用倍频锁模激光器作为抽运光源，波长为 397.5 nm。水平极化的抽运光经过 10 mm 的 PPKTP 晶体，产生水平 (H) 偏振和竖直 (V) 偏振的参量光。在 PPKTP 后用双色镜和长通滤波片将抽运光分离，参量光经 PBS1 后 H 偏振和 V 偏振部分分离

并分别耦合至单模光纤中。收集到的 H 偏振参量光和 V 偏振参量光经准直器发射后分别经过一块四分之一波片 (QWP) 和一块半波片 (HWP)，旋转光子的偏振方向，H 偏振光子旋转为 45° 偏振，V 偏振光子处于 -45° 偏振，两路参量光在 PBS2 上干涉，以后

选择的方式产生偏振纠缠光子态. 为了调节两路光子达到 PBS 的时间和空间上的精确重合, 实验中将放置在一维平移台上的全反棱镜插入其中一路用以调节两路光程差. 在 PBS2 其中一个端口后插入一个 QWP 和一个 HWP 的组合, 调节相位得到所需要的最大纠缠态.

图 3 为实验测量得到在不同抽运光强下产生纠缠光源亮度曲线. 固定一个接收耦合器前的极化片, 旋转另外一个极化片的角度, 得到纠缠光源对比度曲线. 图 4 为实验测量得到纠缠光源对比度曲线.

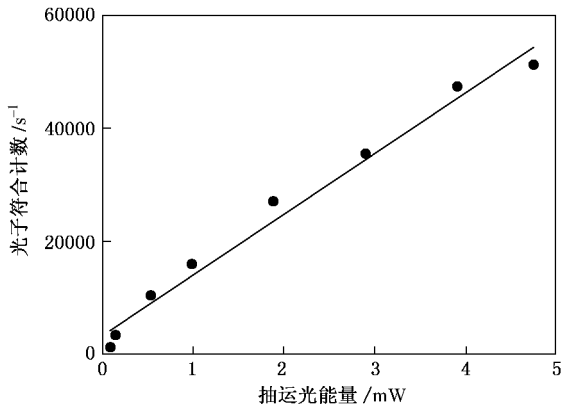


图 3 光源亮度测量曲线

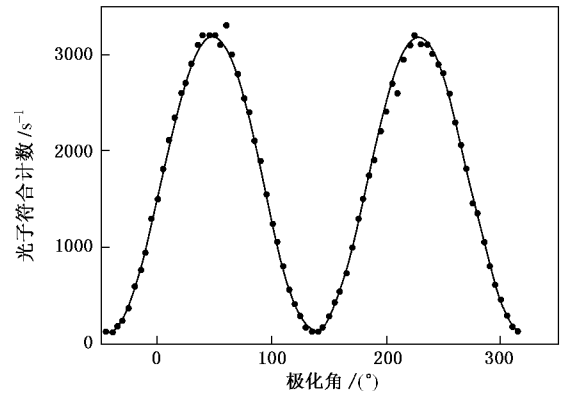


图 4 光源对比度测量曲线

从以上数据可以得到, 实验搭建的纠缠光源亮度达到 $16 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ mW}^{-1}$, 对比度为 27:1.

4. 结 论

基于周期极化准相位匹配 PPKTP 晶体的量子纠缠产生方式可以大大提高量子纠缠光源亮度. 实验搭建了一套基于 PPKTP 晶体的后选择纠缠光源, 测得的符合计数达到了 $16 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ mW}^{-1}$, 极化对比度达到 27:1, 在亮度上比传统基于 BBO 晶体的纠缠光源提高了一个数量级以上.

[1] Kwiat P G ,Mattle K ,Weinfurter H ,Zeilinger A ,Sergienko A V ,Shih Y H 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 4337
 [2] Wang S K ,Ren J G ,Jin X M ,Yang B ,Yang D ,Peng C Z ,Jiang S , Wang X B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1356 (in Chinese) [王少凯、任继刚、金贤敏、杨 彬、杨 冬、彭承志、蒋 硕、王向斌 2008 *物理学报* **57** 1356]
 [3] Kurtsiefer C ,Oberparleiter M ,Weinfurter H 2001 *Phys. Rev. A* **64** 023802
 [4] Fejer M M ,Magel G A ,Jundt D H ,Byer R L 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 2631

[5] Shi B S ,Tomita A 2004 *Phys. Rev. A* **69** 013803
 [6] Kim T ,Fiorentino M ,Wong F N C 2006 *Phys. Rev. A* **73** 012316
 [7] Fedrizzi A ,Herbst T ,Poppe A ,Jennewein T ,Zeilinger A 2007 *Opt. Express* **15** 15377
 [8] Daniel L ,Maria T 2005 *Phys. Rev. A* **72** 062301
 [9] Zhdanov B V ,Yalin L ,Shaffer M K ,Miller W ,Wright D ,Knize R J 2008 *Opt. Express* **16** 17585
 [10] Fedrizzi A ,Ursin R ,Herbst T ,Nespoli M ,Prevedel R ,Scheidt T , Tiefenbacher F ,Jennewein T ,Zeilinger A 2009 *Nature Phys.* **5** 389

Design of high brightness entangled source based on periodically poled KTiOPO_4 crystal^{*}

Ren Ji-Gang^{1,2)} Zhang Han²⁾ Cai Xin-Dong²⁾ Yin Juan²⁾ Zhou Fei¹⁾ Peng Cheng-Zhi^{1,2)†}

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

² *Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, Department of Modern Physics,*

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

(Received 15 June 2009; revised manuscript received 22 June 2009)

Abstract

Entangled states are key resource for quantum information processing. In linear optics quantum computing, the most widely used entanglement resource is polarization entangled photon pairs generated via type-II spontaneous parametric down-conversion. However, the brightness is not sufficient to perform quantum communication experiment between ground and satellite. In this paper we have developed a high-brightness entangled resource based on periodic polarization and quasi-phase matched periodically poled KTiOPO_4 crystal. The number of generated entangled pairs is about $1.6 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \text{ mW}^{-1}$ and the visibility is 27 : 1. Our source is with about one order of magnitude brighter than previous sources based on β -barium borate crystal. This leads to an immediate possibility for applications in the field of quantum key distribution, quantum teleportation and quantum computation. Particularly it would form a solid basis for future global quantum network.

Keywords : entanglement, quasi-phase-matched, periodically poled KTiOPO_4 crystal

PACC : 0367, 4265, 4250

^{*} Project supported by the 985 Foundation of Tsinghua University, China (Grant No. 051110001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60708023).

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