

基于 II 类周期极化铌酸锂波导的通信波段小型化频率纠缠源产生及其量子特性测量

张越 侯飞雁 刘涛 张晓斐 张首刚 董瑞芳

Generation and quantum characterization of miniaturized frequency entangled source in telecommunication band based on type-II periodically poled lithium niobate waveguide

Zhang Yue Hou Fei-Yan Liu Tao Zhang Xiao-Fei Zhang Shou-Gang Dong Rui-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 144204 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180329

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180329>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于第一性原理的新型非线性光学晶体探索](#)

First principle study of nonlinear optical crystals

物理学报.2018, 67(11): 114203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180189>

[四波混频光相位运算器原理及其噪声性能研究](#)

Principle and noise performance of optical phase arithmetic devices using four wave mixing

物理学报.2018, 67(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172638>

[低分析频率压缩光的实验制备](#)

Generation of squeezed states at low analysis frequencies

物理学报.2018, 67(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171767>

[光折变晶体 LiNbO₃:Fe 中的特殊散射现象](#)

Special scattering in photorefractive crystal LiNbO₃:Fe

物理学报.2017, 66(8): 084206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084206>

[新型偶氮苯衍生物的三阶非线性光学特性](#)

Third-order nonlinear optical properties of an azobenzene derivate

物理学报.2016, 65(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024207>

基于II类周期极化铌酸锂波导的通信波段小型化频率纠缠源产生及其量子特性测量*

张越¹⁾²⁾ 侯飞雁¹⁾³⁾ 刘涛¹⁾³⁾ 张晓斐¹⁾³⁾ 张首刚¹⁾³⁾ 董瑞芳^{1)3)†}

1) (中国科学院国家授时中心, 中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2018年2月13日收到; 2018年3月28日收到修改稿)

自发参量下转换过程制备的纠缠光源在量子光学及其相关领域有着广泛的应用. 本文利用780 nm的分布式布拉格反射镜激光二极管抽运一块长10 mm的II类准相位匹配的周期极化铌酸锂波导, 产生了偏振正交的频率反关联纠缠光子对. 通过实验结果与理论的完美结合得到, 当进入波导的抽运光功率为44.9 mW时, 下转换双光子对的产生速率为 $1.87 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$. 利用单色仪对下转换光子的频谱进行分析, 得到信号和闲置光子的中心波长分别为1561.43 nm和1561.45 nm, 频谱宽度为3.62 nm和3.60 nm, 双光子符合包络宽度约为3.18 nm, 可以得到双光子的频率纠缠度为 $1.13 > 1.00$, 表征了双光子的频率纠缠特性. 利用Hong-Ou-Mandel干涉仪测量双光子的二阶量子干涉特性, 测得的干涉可见度为96.1%, 干涉图谱的凹陷宽度为1.47 ps.

关键词: 小型化频率纠缠源, II类周期极化铌酸锂波导, 量子特性测量

PACS: 42.65.-k, 42.50.-p, 03.67.Bg, 06.30.Ft

DOI: 10.7498/aps.67.20180329

1 引言

量子纠缠源是量子信息处理的基石^[1], 在量子力学的基础研究^[2,3]、量子隐形传态^[4-6]、量子度量^[7-9]、量子相干层析^[10-13]、量子成像^[14-17]、量子通信及量子测量^[18-20]等领域有着广泛的应用. 而当前产生纠缠源最有效的方法是自发参量下转换(SPDC)^[21]过程, 其物理过程可以描述为高频的抽运光场作用于非线性介质, 湮灭掉一个高频光子, 同时产生两个低频光子, 通常称之为信号光和闲置光. 利用自发参量下转换过程产生的光子对通常具有偏振、角动量、频率、动量及能量-时间等纠缠特性.

迄今为止, SPDC过程已相继在非线性晶体(如偏硼酸钡(BBO)、周期极化磷酸氧钛钾(PP-KTP)晶体等)^[22-25]、非线性波导^[26-28]、色散位移光纤和光子晶体光纤^[29-31]中被实现. 随着远距离光纤量子通信链路的出现^[32-35], 具有更高效率、更好稳定性和紧凑性、与通信光纤兼容的纠缠源成为“走出实验室”的实用化量子信息的实现基础. 近年来, 由于波导体积小、强抽运能量聚集及易于实现通信波段纠缠光源等特性, SPDC已被广泛用于产生更高亮度的小型化偏振纠缠光源. 一方面, 基于II类相位匹配的非线性波导的下转换产生的共线传输双光子对可以通过偏振实现空间分离; 另一方面, 较窄的相位匹配带宽使得下转换光子在窄带宽产生, 可避免光纤中的色散和偏振模色散. 目

* 国家自然科学基金(批准号: 91336108, 11273024, 91636101, Y133ZK1101)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号:11403031)、中国科学院前沿科学重点研究项目(批准号: QYZDB-SSWSLH007)、中国科学院科研装备研制项目和中组部“青年拔尖人才支持计划”项目(批准号: 组厅字[2013]33号)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dongruifang@ntsc.ac.cn

前, 基于 II 类相位匹配的非线性波导的高质量的通信波段偏振纠缠光源已见诸报道 [28,32].

由于在量子信息分发中的非定域色散消除效应 [35-37] 及高的时间分辨率, 连续激光抽运非线性介质产生的频率反关联纠缠光子对已被广泛应用于量子定位、量子时间同步 [38,39] 中. 目前我们研究组在实验室条件下利用 PPKTP 晶体已经制备了光通信波段的频率反关联纠缠源 [40], 但是由于当前产生频率纠缠源的装置过于庞大, 不利于其在实际中的应用. 因此研制小型化纠缠源有着十分重要的意义.

本文利用波长为 780 nm 的分布式布拉格反射镜 (DBR) 半导体激光二极管去抽运 II 类相位匹配的周期极化铌酸锂 (PPLN) 波导产生高效的频率纠缠光子对, 相较于以前利用 PPKTP 晶体产生纠缠光子对 [40], 该装置体积大大减小. 并且当进入波导的抽运光功率为 44.9 mW 时, 产生的下转换双光子对数在 1 s 内达到 1.87×10^7 . 通过高斯拟合频谱测量结果, 得到信号光子与闲置光子的中心波长分别位于 1561.43 nm 和 1561.45 nm 处, 其带宽分别为 3.62 nm 和 3.60 nm, 联合频谱分布的带宽为 3.18 nm, 对应双光子的频率纠缠度 [41] $R = 1.13 > 1.00$, 表征了双光子的频率纠缠特性. 基于 Hong-Ou-Mandel (HOM) [42] 干涉仪的符合测量结果表明, 该双光子的频率不可分性高达 96.1%, 双光子相干时间为 1.47 ps.

2 实验装置

用于产生频率纠缠光子对的实验装置如图 1 所示. 抽运光源采用 Photodigm 公司生产的

高功率边发射 780 nm DBR 半导体激光二极管, 它能发出受衍射极限的单横模式和纵向模式光束, 最大输出功率为 150 mW. 该激光器由于具有窄的线宽 (2 MHz), 不需要额外的线宽压窄技术, 大大简化了抽运源结构. 实验中采用自制的电流温控源驱动该激光二极管, 输出激光的中心波长采用波长计 (HighFinesse WS-7) 测量, 获得的激光输出功率及波长随驱动电流及温度的变化曲线如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 当激光二极管控温在 20 °C 时, 抽运光中心波长变化范围在 780.57—780.62 nm, 输出波长的电流调谐约为 0.0011 nm/mA, 温度调谐约为 0.046 nm/K. 当驱动电流为 170 mA, 控温在 20 °C 时, 激光二极管输出功率为 70.4 mW, 中心波长为 780.585 nm. 由于半导体激光器的输出光是发散的, 且光斑呈椭圆形, 在两横向方向的发散角达到 1 : 4, 因此在激光二极管出光端面处放置一个焦距 $f = 4.8$ mm 的聚焦透镜和一对整形棱镜对输出光的光斑进行整形. 通过微调聚焦透镜与激光二极管出光端面的距离, 最终获得一束横向分布基本均匀的准直光束, x 和 y 方向的腰斑半径为 $w_{0x,0y} \approx 585.1 \mu\text{m}$.

实验中采用的非线性介质为 HC Photonics 公司生产的 PPLN 波导, 其长度为 10 mm, 极化周期为 8.3 μm . 波导的输入输出都采用保偏光纤接头, 为减少光纤端面反射对激光二极管的影响, 光纤接头均采用 FC/APC. 根据生产商提供的参数, 780 nm 光纤到波导的耦合效率为 91.21%, 波导到 1560 nm 光纤输出端的耦合效率为 23.21%. 通过焦距为 $f = 2.0$ mm 的可调焦非球面透镜准直器, 上述准直后的抽运光耦合到波导的输入端, 耦合效率

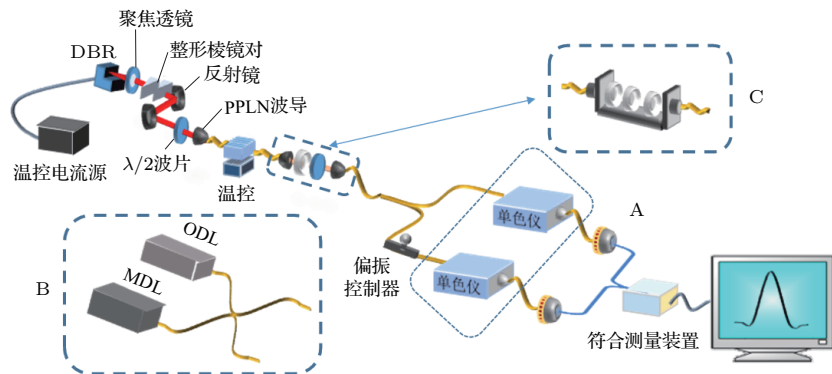


图 1 纠缠源的产生及其量子特性测量实验装置图 (虚线框 A 表示频谱测量装置, 虚线框 B 表示 HOM 干涉仪, 虚线框 C 表示滤波装置)

Fig. 1. Schematic diagram for generation of the frequency entangled source and its quantum characteristic measurement. (Frame A denotes the spectrum measuring setup, frame B represents the HOM interferometer, and frame C represents the filtering setup for removing the remaining pump).

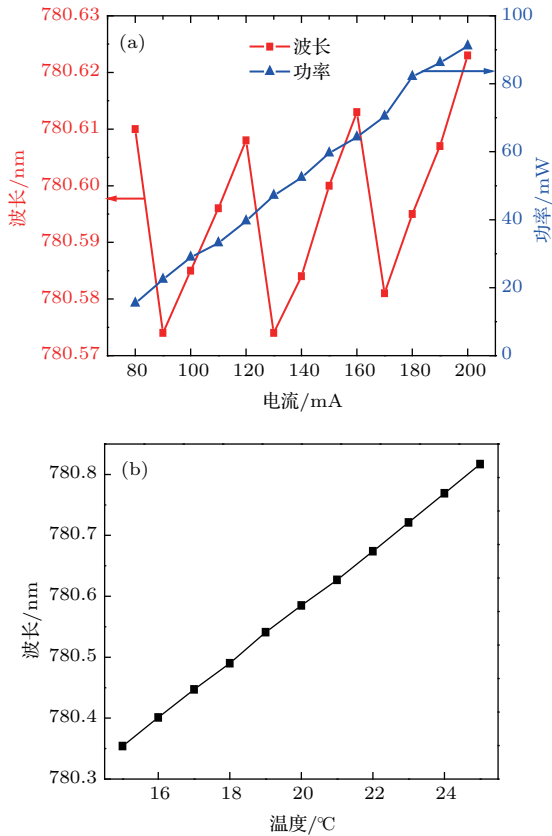


图2 实验系统中 780 nm DBR 半导体激光器的输出中心波长及功率随驱动电流及温度的变化曲线 (a) 激光二极管控温在 20 °C 时, 输出中心波长及功率随驱动电流的变化曲线; (b) 激光二极管驱动电流在 170 mA 时, 输出中心波长随温度的变化曲线

Fig. 2. Curves of the output center wavelength and power of 780 nm DBR semiconductor laser with the change of the driving current and temperature: (a) The measured center wavelength and output power of laser as a function of the driving current when laser diode temperature is controlled at 20 °C; (b) variation of the output center wavelength as a function of the control temperature of the laser diode at driving current of 170 mA.

达到 70%。透镜准直器前的半波片用于调节抽运光偏振, 从而满足 II 类相位匹配的偏振要求。抽运光与 PPLN 波导作用后, 共线输出偏振相互正交的信号光子和闲置光子。由于抽运光单次穿过 PPLN 波导后产生的双光子中包含了大量剩余抽运光, 采用可调式光纤-光纤 U 型台与 3 片高性能长波通滤波片 ($2 \times$ Semrock LP02-980RU-25+ $1 \times$ Thorlabs FGL850) 相结合实现高效光纤滤波器, 对剩余抽运光进行滤波以及对纠缠光高效收集。通过精细调节和测量, 该光纤滤波器对 1560 nm 下转换光子对的传输效率约为 71%。滤除剩余抽运光之后的纠缠光子对被耦合到光纤偏振分束器 (FPBS) 中, 通过

FPBS 前的半波片调整信号光子与闲置光子的偏振方向, 使其分别与 FPBS 的快慢轴方向重合, FPBS 的两路输出则分别对应信号光子和闲置光子。

当对下转换产生的信号光子与闲置光子进行直接符合测量时, FPBS 的两路输出分别接到两台基于 InGaAs 雪崩光电二极管 (APD) 的近红外单光子探测器 D1&D2 上 (上海朗研光电 SPD4)。该单光子探测器运行在盖革模式下, 外部触发信号由波形发生器 (Tektronix AFG3252) 提供, 该信号为脉冲波信号, 频率为 75 MHz, 两个单光子探测器的探测效率为 20%。此时, 两单光子探测器的暗计数分别为 $1.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 和 $1.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。两单光子探测器输出的电脉冲信号分别作为开始和结束信号接到一个时间相关计数器 (PicoQuant PicoHarp300) 上。该时间相关计数器的输出通过 USB2.0 接口连接电脑, 可以用来实现对信号光子与闲置光子间的符合计数分析。当对信号光子与闲置光子的单光子频谱及联合频谱进行测量时, FPBS 的两路 (或其中一路) 输出分别连接到两台光栅单色仪 (Jobin Yvon MicroHR) 上, 通过扫描单色仪, 并将其输出端连接在上述两台单光子探测器上, 配合时间相关计数器, 便可测得相应的联合频谱分布和单光子频谱。当对信号光子与闲置光子进行频率不可分性测量时, 将两个单色仪换成 HOM 干涉仪, 如图 1 中 B 部分所示。其中 ODL 为手动可调光延迟线, 用于调整干涉仪两臂的平衡; MDL 为电动可调光延迟线, 用于调节干涉仪两臂的延迟, 其扫描范围为 0—560 ps, 分辨率为 1 fs。在干涉仪的一臂上加入一个光纤偏振控制器, 以保证到达分束器的两个光子的偏振相同。

3 实验结果与分析

基于上述频率纠缠光源的产生和直接符合探测实验系统, 我们保持抽运激光器的驱动电流为 170 mA 不变, 在波导光纤耦合输入端前加一个可调中性滤光片, 首先测量了两个单光子探测器的光子计数随抽运光功率的变化 (图 3(a))。图中横坐标为进入 PPLN 波导的抽运光功率, 抽运光到波导的输入端的耦合效率为 70%, 780 nm 光纤到波导的耦合效率为 91.21%。从图 3(a) 可以看出, 随着抽运光功率的增大, 单光子计数呈近似线性增大; 当抽运光功率为 44.9 mW 时, 得到两个单光子探测器的光子计数为 $5.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。符合测量的结果如

图3(b)所示,当抽运光功率为44.9 mW时,得到下转换双光子源在1 s内总的符合计数为 1.24×10^4 ,扣除偶然符合后,直接符合计数为 1.22×10^4 .

由于单光子探测器不能分辨出光信号是由单个还是多个光子产生的,所以单光子探测器的计数率可以表示为^[43]

$$S_k = R \sum_{m=0}^{\infty} \frac{p(m)}{2^{2m}} \sum_{n=0}^{2m} \binom{2m}{n} [1 - (1 - T\eta_k)^n], \quad (1)$$

其中 R 为脉冲速率,本实验中由探测器外触发信号的频率表示; $p(m)$ 表示产生 m 对光子的概率; T 表示光子对在整个光路部分的透过率; η_k 为第 k 个探测器的探测效率.同样符合计数率也可以表示为

$$C = R \sum_{m=0}^{\infty} \frac{p(m)}{2^{2m}} \sum_{n=0}^{2m} \binom{2m}{n} [1 - (1 - T\eta_1)^n] \times [1 - (1 - T\eta_1)^{2m-n}]. \quad (2)$$

对于II类自发参量下转换过程,其光子数分布 $p(m)$ 近似为泊松分布,即

$$p(v, m) = \frac{v^m e^{-v}}{m!}, \quad (3)$$

其中 $v \approx KP$ 表征了每个脉冲间隔包含的平均光子对的数目, P 表示抽运光功率, K 为常数.所以方程(1)和(2)可化简为

$$S = R[1 - e^{(-T\eta_k + \frac{T^2\eta_k^2}{4})KP}], \quad (4)$$

$$C = R[1 - 2e^{(-T\eta_k + \frac{T^2\eta_k^2}{4})KP} + e^{(-2T\eta_k + T^2\eta_k^2)KP}]. \quad (5)$$

利用(4)式和(5)式对实验结果进行拟合,可以得到当 $T = 0.14$ 及 $K = 0.006$ 时,下转换光子对的单光子计数及符合计数随进入波导的抽运光功率的变化曲线(图3中红色虚线)与实验结果完美符合(符合度均大于0.997).考虑光路中的损耗.由于波导输出端到光纤的耦合效率为 $T_0 = 0.2321$,下转换光在光纤滤波装置的透过率为 $T_F = 0.71$,FPBS的插入损耗为0.4 dB ($T_{Ins} = 0.91$).假设 T_{WG} 为下转换光在波导中的传输效率,则根据 $T = T_0 T_F T_{Ins} T_{WG}$ 可以得到 $T_{WG} = 0.933$ (对应损耗为0.3 dB/cm),与PPLN波导的典型参数符合.同时,在抽运光功率为44.9 mW时,根据拟合得到的 K 值,可以计算出下转换光子对平均值为 $v \approx 0.25$,又已知 $R = 75 \times 10^6$,最终得到本实验装置在1 s内产生的下转换光子对约为 1.87×10^7 .

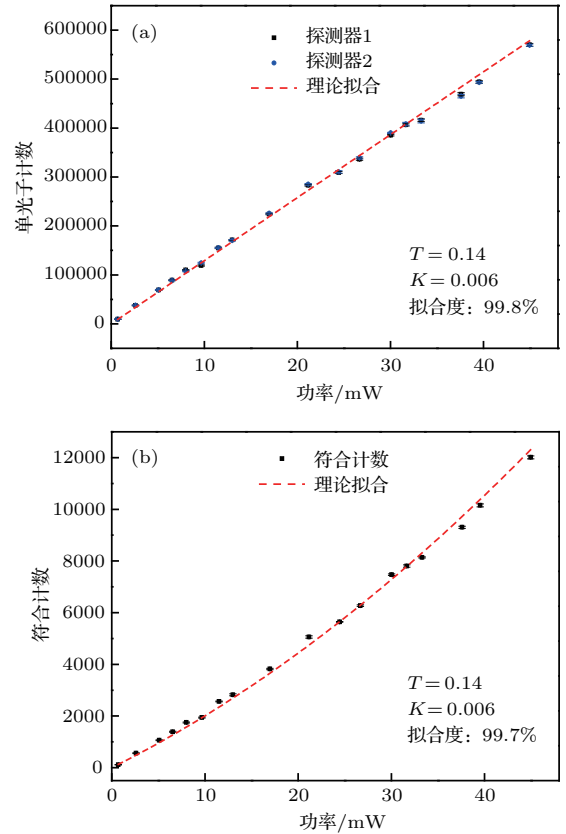


图3 (a)单光子计数及(b)符合计数随抽运光功率的变化(黑色方块表示实验结果,红色虚线表示理论模拟)

Fig. 3. The measured (a) single photon counting rate and (b) coincidence counting rate as a function of the pump light power coupled into the waveguide (the black squares denote the experimental results, while the red dashed lines represent the theoretical simulations).

3.1 纠缠光子对的频谱测量

当测量单光子频谱时,以信号光的单光子频谱测量为例(图1中A部分的实验装置),我们只在信号光路接入单色仪1,闲置光路直接接到单光子探测器D2上,扫描单色仪1,记录下在设定波长处的符合计数值,这样便可测得信号光频谱,利用相同的方法可以得到闲置光的频谱分布.实验中我们设定单色仪1的扫描步长为0.2 nm,在每个扫描波长处,对信号光与闲置光的符合计数测量时间为4 s.改变波导工作温度,重复上面的操作,便可得到不同温度条件下,自发参量下转换过程产生的纠缠光子对的单光子频谱分布.对实验数据进行拟合,可得到在不同波导温度下,自发参量下转换产生双光子对的中心波长随温度的变化(图4(a)).从图4(a)可以看出,当波导温度改变时,PPLN波导折射率也会相应地改变,使得相位匹配函数发

生相应的改变. 当波导温度调节到 46.5 °C 时, 双光子的中心波长基本重合, 此时测得单光子 (信号光和闲置光) 频谱如图 4 (b) 所示, 通过高斯拟合得到, 信号光子的中心波长为 1561.43 nm, 线宽为 3.62 nm, 闲置光子的中心波长为 1561.45 nm, 线宽为 3.60 nm.

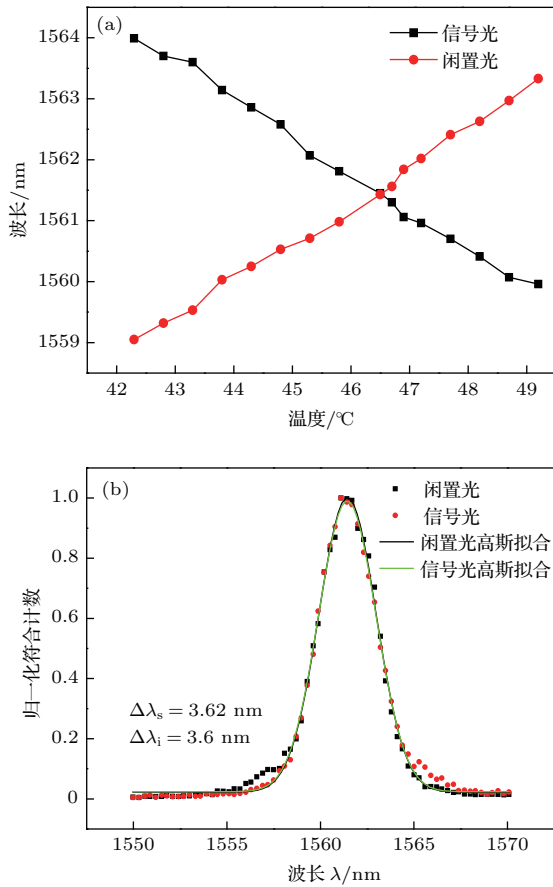


图 4 测量到的 (a) 信号光子 (黑色实心方框点) 和闲置光子 (红色实心圆点) 的中心波长随波导温度的变化; (b) 波导温度在 46.5 °C 时信号光子和闲置光子单光子频谱分布 Fig. 4. (a) The measured center wavelengths of the signal (black square dots) and the idler photons (red solid dot) as a function of the operating temperature of the waveguide; (b) the measured single photon spectral distributions of signal and idler photons at the optimal waveguide temperature of 46.5 °C.

单光子频谱给出了信号光和闲置光的频谱分布, 但不能体现其频率纠缠特性, 所以双光子联合频谱的测量是必须的. 测量联合频谱分布的实验装置如图 1 中 A 部分所示. 测量联合频谱时信号光和闲置光都要经过单色仪, 将单色仪的步长设置为 0.4 nm, 依次改变两个单色仪的输出波长, 每组波长有一个对应的符合计数, 扫描范围为 1550—1570 nm. 图 5 为测得的双光子联合频谱分

布, 根据双光子符合包络及纠缠度的定义, 得到双光子的符合包络带宽为 3.18 nm, 对应的频率纠缠度 $R = 1.13 > 1$, 表征了双光子的频率纠缠特性.

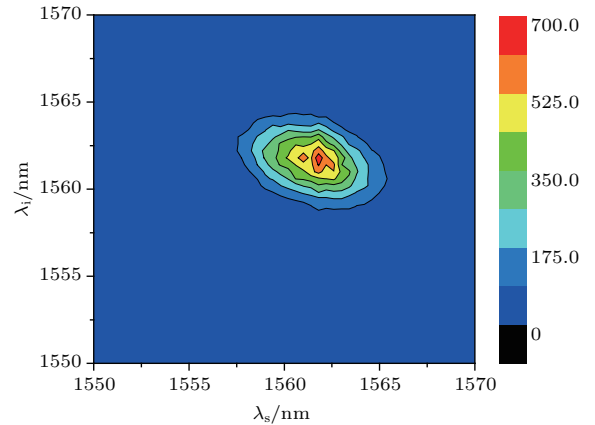


图 5 双光子的联合频谱分布 (不同颜色代表不同的符合计数) Fig. 5. The measured joint spectrum distribution of generated photon pairs (Different colors represent different coincidence counts).

3.2 HOM干涉测量

HOM干涉装置如图 1 中 B 部分所示. 调节偏振控制器使得到达分束器的光子的偏振相同, 通过手动延迟线近似地将干涉仪两臂调节平衡, 扫描电动延迟线, 得到双光子的二阶干涉结果. 为了减少偶然误差导致的影响, 将计数时间设为 10 s. 对结果进行归一化, 测得的结果如图 6 中黑色方框点所示, 双光子的 HOM 干涉可见度为 96.1%, 干涉凹陷的半高全宽为 1.47 ps. 同时,

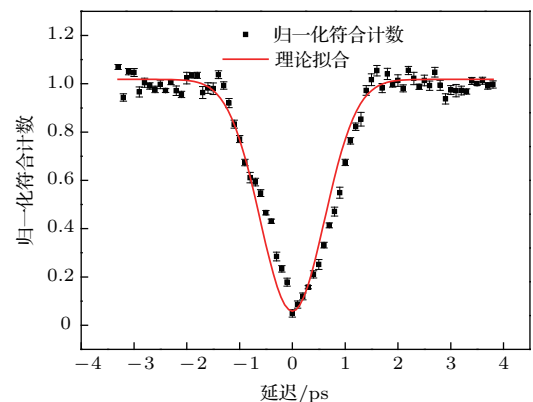


图 6 双光子的 HOM 干涉测量结果 (黑色方框点为测量结果, 红色实线为利用实测的单光子频谱宽度拟合得到) Fig. 6. The measured HOM interferometric result (in black square dots) and its simulation (in red solid curve).

由于HOM干涉宽度取决于相位匹配带宽,而相位匹配带宽决定了连续光抽运条件下产生的参量下转换光子的单光子频谱宽度,利用3.1节测量得到的单光子频谱宽度^[42]给出二阶量子干涉符合率随双光子相对时间差的关系表达式

$$N_C(\tau) = C[1 - V_{\text{HOM}} e^{-(w\tau)^2}], \quad (6)$$

其中 $\Delta\omega$ 表示单光子的频谱宽度, C 表示归一化因子, V_{HOM} 为干涉可见度.最终得到的理论拟合曲线如图6中红色实线所示.从图6可以看出,双光子的HOM干涉时间宽度取决于单光子频谱宽度.

4 总 结

利用780 nm的DBR激光二极管抽运一块长10 mm的II类相位匹配PPLN波导,实现了小型化通信波段频率纠缠光子对的高效产生.通过优化实验参数,当DBR激光二极管的驱动电流为170 mA,PPLN波导工作在46.5 °C时,实验中产生的下转换双光子对速率达到 $1.87 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$.利用单色仪对下转换光子的频谱进行分析,测量得到信号光、闲置光中心波长分别为1561.43 nm和1561.45 nm,频谱宽度分别为3.62 nm和3.60 nm,双光子符合包络宽度约为3.18 nm,对应频率纠缠度 $R = 1.13 > 1$,表征了双光子的频率纠缠特性.利用HOM干涉仪测量得到该双光子的频率不可分性高达96.1%,双光子相干时间为1.47 ps.该实验结果为研制小型化通信波段频率纠缠源样机,及后续的实地量子时间同步研究开展奠定了坚实的基础.

参考文献

- [1] Bouwmeester D, Ekert A, Zeilinger A 2000 *The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation* (Berlin: Springer-Verlag) pp50–55
- [2] Zeilinger A 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** S288
- [3] Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, Horodecki K 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 865
- [4] Bennett C H, Brassard G, Cr'epeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [5] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [6] Kim Y H, Kulik S P, Shih Y H 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1370
- [7] Squier J, Müller M 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 2855
- [8] Brasselet S, Floc'h V L, Treussart F, Roch J F, Zyss J, Botzung-Appert E, Ibanez A 2003 *Phys. Rev. Lett.* **92** 207401
- [9] Dayan B, Pe'er A, Friesem A A, Silberberg Y 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 023005
- [10] Abouraddy A F, Nasr M B, Saleh B E A, Sergienko A V, Teich M C 2002 *Phys. Rev. A* **65** 053817
- [11] Sergienko A V, Saleh B E A, Teich M C 2004 *Opt. Lett.* **29** 2429
- [12] Nasr M B, Saleh B E A, Sergienko A V, Teich M C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 083601
- [13] Nasr M B, Carrasco S, Saleh B E A, Sergienko A V, Teich M C, Torres J P, Torner L, Hum D S, Fejer M M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 183601
- [14] Zerom P, Chan K W C, Howell J C, Boyd R W 2011 *Phys. Rev. A* **84** 061804
- [15] Lund A P, Ralph T C, Haselgrove H L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 030503
- [16] Marek P, Fiurasek J 2010 *Phys. Rev. A* **82** 014304
- [17] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** R3429
- [18] Erkmén B I, Shapiro J H 2009 *Phys. Rev. A* **79** 023833
- [19] Brendel J, Gisin N, Tittel W, Zbinden H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 2594
- [20] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2004 *Science* **306** 1330
- [21] Boyd R W 1992 *Nonlinear Optics* (San Diego: Academic Press) pp74–83
- [22] Kwiat P G, Waks E, White A G, Appelbaum I, Eberhard P H 1999 *Phys. Rev. A* **60** R773
- [23] Fedrizzi A, Herbst T, Poppe A, Jennewein T, Zeilinger A 2007 *Opt. Express* **15** 15377
- [24] Fiorentino M, Beausoleil R G 2008 *Opt. Express* **16** 20149
- [25] Hentschel M, Hübel H, Poppe A, Zeilinger A 2009 *Opt. Express* **17** 23153
- [26] Tanzilli S, Tittel W, de Riedmatten H, Zbinden H, Baldi P, de Micheli M P, Ostrowsky D B, Gisin N 2002 *Eur. Phys. J. D* **18** 155
- [27] Halder M, Beveratos A, Thew R T, Jorel C, Zbinden H, Gisin N 2008 *New J. Phys.* **10** 023027
- [28] Chen J, Fan J, Migdall A 2010 *Proc. SPIE* **17** 6727
- [29] Lee K F, Chen J, Liang C, Li X, Voss P L, Kumar P 2006 *Opt. Lett.* **31** 1905
- [30] Medic M, Altepeter J B, Hall M A, Patel M, Kumar P 2010 *Opt. Lett.* **35** 802
- [31] McMillan A R, Fulconis J, Halder M, Xiong C, Rarity J G, Wadsworth W J 2009 *Opt. Express* **17** 6156
- [32] Fujii G, Namekata N, Motoya M, Kurimura S, Inoue S 2007 *Opt. Express* **15** 12769
- [33] Franson J D 1992 *Phys. Rev. A* **45** 3126
- [34] Steinberg A M, Kwiat P G, Chiao R Y 1992 *Phys. Rev. A* **45** 6659
- [35] Baek S Y, Cho Y W, Kim Y H 2009 *Opt. Express* **17** 19241
- [36] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L, Wong F N C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 117902

- [37] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2001 *Nature* **412** 417
 [38] Fitch M J, Franson J D 2002 *Phys. Rev. A* **65** 053809
 [39] Hou F Y, Dong R F, Quan R A, Zhang Y, Bai Y, Liu T, Zhang S G, Zhang T Y 2012 *Adv. Space Res.* **50** 1489
 [40] Hou F Y, Xiao X, Quan R A, Wang M M, Zhai Y W, Wang S F, Liu T, Zhang S G, Zhang T Y, Dong R F 2016 *Appl. Phys. B* **122** 128
 [41] Fedorov M V, Efremov M A, Volkov P A, Eberly J H 2006 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39** S467
 [42] Hong C K, Ou Z Y, Mandel L 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2044
 [43] Mori S, Söderholm J, Namekata N, Inoue S 2008 *Optics Commun.* **264** 156

Generation and quantum characterization of miniaturized frequency entangled source in telecommunication band based on type-II periodically poled lithium niobate waveguide*

Zhang Yue¹⁾²⁾ Hou Fei-Yan¹⁾³⁾ Liu Tao¹⁾³⁾ Zhang Xiao-Fei¹⁾³⁾
 Zhang Shou-Gang¹⁾³⁾ Dong Rui-Fang^{1)3)†}

1) (Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

2) (College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 13 February 2018; revised manuscript received 28 March 2018)

Abstract

The frequency entangled photon pairs generated by spontaneous parametric down-conversion (SPDC) possess wide applications in quantum optics and relevant fields. To facilitate the practical quantum information technologies, particularly in optical fiber links, a frequency entangled source at telecommunication wavelength with features of compactness, portability, high efficiency and miniaturization is highly desired. In this paper, we report the experimental generation of a miniaturized frequency entangled source in telecommunication band from a 10 mm-long type-II periodically poled lithium niobate (PPLN) waveguide pumped by a 780 nm distributed Bragg reflector (DBR) laser diode. The frequency entangled photon pairs generated by SPDC possess wide applications in quantum optics and relevant fields. When the DBR laser diode is driven by a current of 170 mA at a temperature controlled to 20 °C, the output power is measured to be 70.4 mW with a central wavelength of 780.585 nm. Under this pump, the orthogonally-polarized photon pairs are generated and output from the PPLN waveguide. After filtering out the remaining pump by three high-performance long-pass filters mounted on an adjustable U-type fiber bench, the photon-pair generation rate, spectral and temporal properties of the generated frequency entangled source are measured. The results show that the generation rate of the photon pairs, after being corrected for the detection efficiencies of the single photon detectors and the optical losses,

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91336108, 11273024, 91636101, Y133ZK1101), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11403031), the Frontier Science Key Research Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDB-SSWSLH007), the Research Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences, and the "Young Top-notch Talents" Program of Organization Department of the CPC Central Committee, China (Grant No. [2013]33).

† Corresponding author. E-mail: dongruifang@ntsc.ac.cn

is achieved to be $1.86 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ at a pump power of 44.9 mW (coupled into the waveguide). Optimizing the working temperature of the waveguide and fixing it at 46.5 °C, the frequency degeneracy of the SPDC generated photon pairs is realized. Based on the coincidence measurement setup together with two infrared spectrometers, the spectra of the signal and idler photons are obtained with their center wavelengths of 1561.43 nm and 1561.45 nm, and their 3-dB bandwidths of 3.62 nm and 3.60 nm respectively. The joint spectrum of the photon pair is observed, showing a joint spectrum bandwidth of 3.18 nm. The degree of frequency entanglement is quantified to be 1.13 according to the bandwidth ratio between the single photon spectrum and the joint spectrum. Furthermore, based on the Hong-Ou-Mandel (HOM) interferometric coincidence measurement setup, a visibility of about 96.1% is observed, which indicates the very good frequency indistinguishability of the down-converted biphotons. The measured 3-dB width of the HOM dip is 1.47 ps and shows good agreement with the measured single-photon spectral bandwidth. The experimental results lay a solid foundation for developing portable, miniaturized frequency entangled sources at telecommunication band for the further applications in quantum information areas, such as quantum time synchronization.

Keywords: miniaturized frequency entangled source, type-II periodically poled lithium niobate waveguide, quantum characterization

PACS: 42.65.-k, 42.50.-p, 03.67.Bg, 06.30.Ft

DOI: [10.7498/aps.67.20180329](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180329)