

基于 1/4 波片的腔增强自发参量下转换过程中双折射效应的补偿*

贺海¹⁾ 杨鹏飞¹⁾²⁾ 张鹏飞¹⁾²⁾ 李刚^{1)2)†} 张天才^{1)2)‡}

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

2) (山西大学, 极端光学省部共建协同创新中心, 太原 030006)

(2023 年 3 月 20 日收到; 2023 年 4 月 17 日收到修改稿)

腔增强的光学自发参量下转换是量子光学中产生量子光场的基本方法之一, 然而下转换过程往往受到非线性晶体的双折射效应的影响. 特别是在利用 II 类准相位匹配非线性晶体产生双光子对的过程中, 晶体的双折射效应使得信号光和闲置光不能同时起振. 本文提出并验证了一种利用 1/4 波片补偿信号光和闲置光的光程的方法, 在保证较小内腔损耗及良好的调节自由度的情况下, 以相对简洁的装置实现信号光和闲置光的双共振.

关键词: 腔增强自发参量下转换, 双折射效应, 双共振, 预告式单光子源

PACS: 42.65.Lm, 42.50.-p, 14.70.Bh, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.72.20230422

1 引言

自发参量下转换 (spontaneous parametric down-conversion, SPDC)^[1–3] 是制备单光子源、压缩光等量子光源的基本手段之一, 在量子光学、量子模拟和量子信息处理中有着广泛的应用^[4–11]. SPDC 过程中采用光学谐振腔的增强效应^[12–18] 不但能够提高量子光源的产率, 而且能够压窄量子光源的线宽^[19]. 在利用 II 类准相位匹配非线性晶体的腔增强 SPDC 过程产生双光子对的实验中, 产生的光子对 (信号光和闲置光) 偏振相互垂直, 在晶体中的折射率不同, 从而影响光学腔对于信号光和闲置光的双共振. 为了在特定波长实现光学腔的双共振条件, 增加双光子对的产率, 通常采取腔内放置补偿晶体^[12] 或 1/2 波片^[14]、调节晶体温度^[20]、设计结合型腔^[21] 和簇效应^[22] 等方法来补偿晶体的双

折射效应. 本文提出一种在 SPDC 腔中放置 2 个 1/4 波片 (quarter-wave plate, QWP) 的方法实现信号光与闲置光的双共振. 2 个 QWP 分别放置于非线性晶体两侧, 其光轴与晶体主轴夹角为 45° , 光学腔输出的信号光子和闲置光子偏振分别为固定的左旋和右旋. 此方法能够使非线性晶体工作在最佳温度, 腔型结构简洁, 易于操作, 可用于预告式单光子源的制备, 研究单光子-单原子的相互作用.

2 利用 QWP 补偿双折射效应的理论分析

理论设计图如图 1 所示, 在装有 II 类准相位匹配非线性晶体如周期性极化磷酸氧钛钾 (periodically poled KTiOPO_4 , PPKTP) 的 SPDC 腔中, 放置 2 个光轴与晶体主轴夹角为 45° 的 QWPs, 用于补偿信号光 (signal photon, s) 和闲置光 (idler photon, i) 由于偏振垂直造成的双折射效应, 实现

* 国家自然科学基金 (批准号: 11974223, 11974225) 和山西省“1331 工程”重点学科建设基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gangli@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

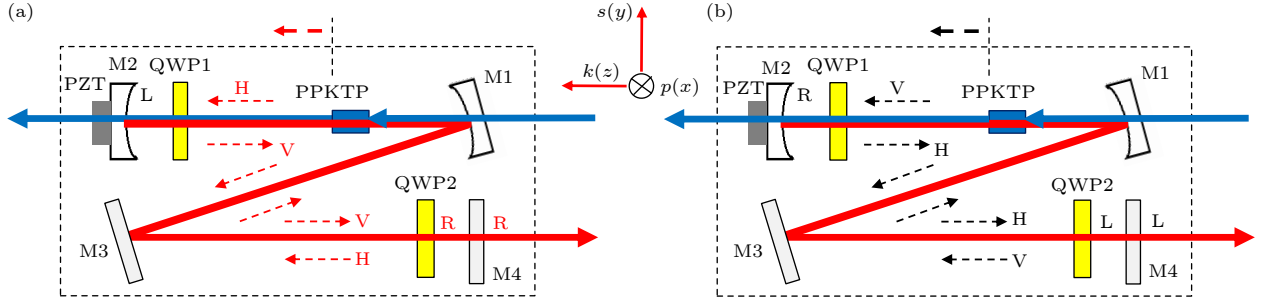


图 1 置有 QWPs 的 SPDC 腔中光子的偏振变化 (PZT, 压电陶瓷) (a) SPDC 产生的水平偏振光子 (红虚线箭头) 的情况; (b) 竖直偏振光子 (黑虚线箭头) 的情况. 其中, 蓝实线箭头和红实线箭头分别表示波长为 426 nm 和 852 nm 的激光, R 和 L 分别表示右旋圆偏振光和左旋圆偏振光, k, s, p 分别表示光波矢 (z 轴)、光场垂直分量 (y 轴) 和平行分量 (x 轴)

Fig. 1. Polarization transformations of photons in SPDC cavity with QWPs. Photon with an initial polarization of H (red dashed arrow) in (a) or V (black dashed arrow) in (b) generated from SPDC. Blue and red solid arrows stand for 426 nm and 852 nm laser respectively, R (L) shows right (left) circular polarization, k is wave vector (z axis), s is perpendicular part (y axis) and p represents parallel part (x axis). PZT represents piezoelectric transducer.

双共振. 图 1(a) 和图 1(b) 分别展示了下转换腔中水平 (H) 偏振 (红虚线箭头) 和竖直 (V) 偏振 (黑虚线箭头) 的光子在腔内完成一次自再现的偏振变化. 图 1(a) 中, SPDC 产生的 H 偏振的光子经 QWP1 后变换为左旋 (L) 圆偏振光, 经反射镜 M2 反射再次经过 QWP1 后变为 V 偏振. V 偏振的光子经 QWP2 后变为右旋 (R) 圆偏振光, 经 M4 反射再次经过 QWP2 时变为 H 偏振, 最后以 H 偏振再次通过 PPKTP 晶体, 完成一次循环. 图 1(b) 为 V 偏振的光子的情况, 与 H 偏振光类似. 综上, 偏振相互垂直的光子在腔内完成一次循环经历了相同的光程, 补偿了双折射效应并实现了光子对的双共振. M4 为输出耦合镜, 出射光子利用 QWP 和偏振分光棱镜 (polarization beam splitter, PBS) 能够将偏振相互垂直的信号光和闲置光完全分开.

利用琼斯矩阵^[23]分析信号光子和闲置光子在腔内循环的偏振变换. SPDC 产生的光子在腔内循环 1 次的琼斯矩阵表示为

$$\begin{aligned} M = & M_{\text{non}} M_1 M_3 M^T(\alpha_2, \pi/2) \\ & \cdot M_4 M(\alpha_2, \pi/2) M_3 M_1 M_{\text{non}} \\ & \cdot M^T(\alpha_1, \pi/2) M_2 M(\alpha_1, \pi/2), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 平面反射镜的琼斯矩阵 $M_l = r_l \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ (r_l 为振幅反射率, $l = 1, 2, 3, 4$). 非线性晶体的琼斯矩阵 $M_{\text{non}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta) \end{pmatrix}$, δ 为晶体相位偏移量. QWP 的琼斯矩阵 $M(\alpha_i, \pi/2) = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha_i - i \sin^2 \alpha_i & (1+i) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \\ (1+i) \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sin^2 \alpha_i - i \cos^2 \alpha_i \end{pmatrix}$ (α_i 为主

轴与 x 轴夹角, $i = 1, 2$), 光路反向^[24]时有

$$M^T(\alpha_i, \pi/2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} M(\alpha_i, \pi/2) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

本文设计选择 $\alpha_1 = \alpha_2 = \pi/4$. 解本征方程 $M E_j = \xi_j E_j$ ($j = 1, 2$) 得到相应的本征偏振态. 以本征偏振态的输入光场在腔内循环一周偏振保持不变, 即能够实现自再现. 本征值 $\xi_j = r_j e^{i\theta_j}$ 为复数, 其中 r_j 为振幅, θ_j 为相位. 当 2 个本征值的振幅、相位均相等时即说明双折射效应得到有效补偿; 本征矢量 E_j 即腔内 2 个相互垂直的纵模.

本文首先模拟分析了调整 QWP 时光学 SPDC 腔的本征值变化, 如图 2 所示. 其中红线和蓝线对应了 2 个不同的本征值. 取 $\delta = 0.5$, $\alpha_2 = 45^\circ$ 并改变 QWP1 时的分析结果如图 2(a) 和 (b); $\alpha_1 = 45^\circ$ 并改变 QWP2 时的分析结果如图 2(c) 和 (d), $\alpha_2 = 0.23\pi$ 并改变 QWP1 时的分析结果如图 2(e) 和 (f). 结合本征值的振幅和相位可以看出, 只有当 2 个波片角度都为 45° 或 135° 时, 2 个本征值完全相等, 可以成功地补偿双折射效应, 实现双共振; 当其中一个 QWP 的角度不等于 45° 或 135° 时, 无论怎样调节另一个 QWP 角度, 无法同时满足本征值的振幅及相位均相等的条件, 不足以实现双共振的补偿.

3 实验装置

图 3 展示了采用所述方法补偿双折射效应的实验装置图. 实验中波长为 852 nm 的激光 (Toptica TA pro 850) 注入倍频腔产生 426 nm 的倍频光. 倍频腔前的 1/2 波片 (half-wave plate,

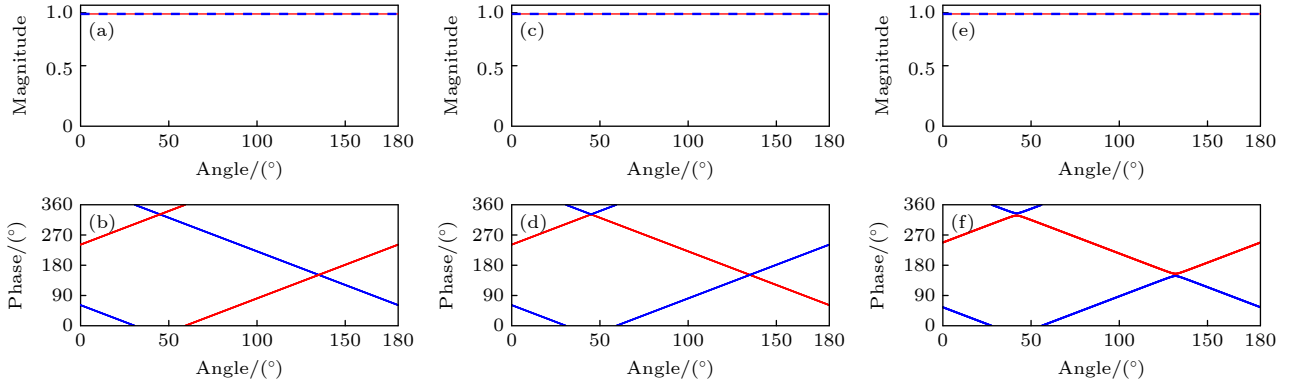


图 2 2 个 QWPs 不同角度下的本征值. $\alpha_2 = 45^\circ$ 并改变 QWP1 时本征值的振幅 (a) 和相位 (b); $\alpha_1 = 45^\circ$ 并改变 QWP2 时本征值的振幅 (c) 和相位 (d); $\alpha_2 = 0.23\pi$ 并改变 QWP1 时本征值的振幅 (e) 和相位 (f). 其中红线和蓝线对应了 2 个不同的本征值

Fig. 2. Eigenvalues with different degrees of two QWPs. Amplitude in (a) of eigenvalues and phase in (b) of the eigenvalues on the condition of $\alpha_2 = 45^\circ$ and different degrees of QWP1; amplitude in (c) and the phase in (d) with $\alpha_1 = 45^\circ$ and different degrees of QWP2; amplitude in (e) and the phase in (f) with $\alpha_2 = 0.23\pi$ and different degrees of QWP1. Red line is about one of eigenvalues, while the blue line is about the other.

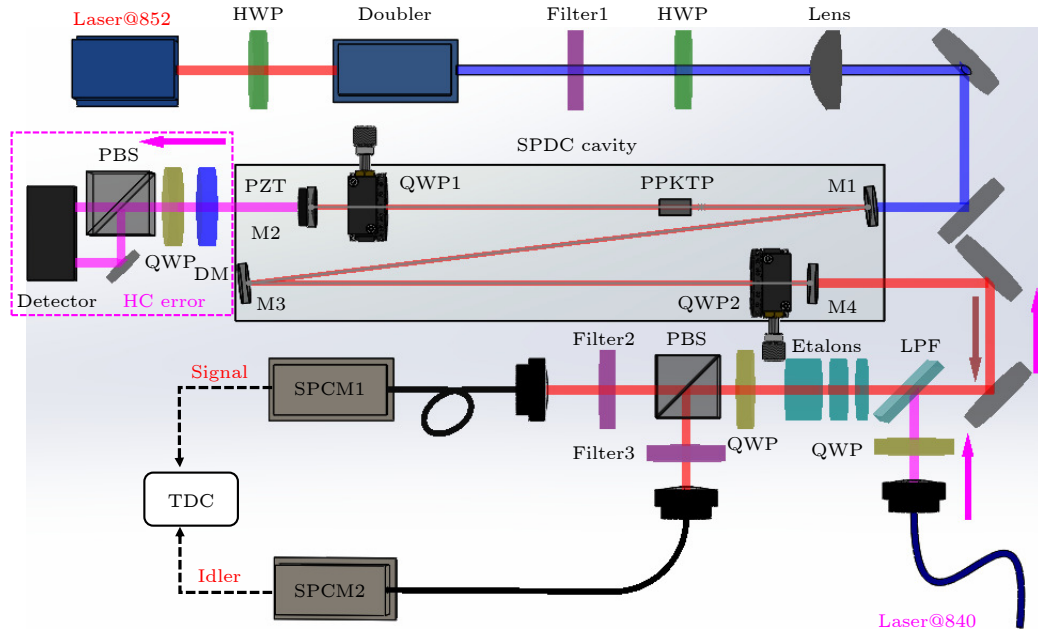


图 3 使用 QWP 补偿双折射效应的装置图. 852 nm 的激光 (红色) 通过倍频腔 (Doubler) 产生腔增强的 SPDC 所需的 426 nm (蓝色) 的泵浦光. SPDC 腔腔长由波长远离光子对的 840 nm 的辅助光 (紫色) 进行锁定. SPDC 产生的偏振相互垂直的光子对耦合进光纤进行后续实验

Fig. 3. Experimental apparatus about birefringence compensating utilizing two QWPs. Laser with the wavelength of 852 nm in red color is sent into the doubler cavity. Generated frequency-doubling light at 426 nm (in blue color) is filtered and coupled to the SPDC cavity after lens-transforming. Length of SPDC cavity is stabilized by the 840 nm auxiliary light. Signal and idler photons generated from SPDC cavity filtered by cascaded etalons are split on a PBS and coupled to multi-fibers for further processing. Doubler, second-harmonic generation cavity.

HWP) 用于调节进腔光的偏振. 倍频产生的 426 nm 光作为泵浦光, 依次经过滤波片 (filter, Thorlabs FESH0500) 过滤 852 nm 的基频光的残留成分、经透镜模式匹配后, 注入 SPDC 腔. SPDC 腔为折叠型 Fabry-Perot 腔, 由 4 面反射镜组成, 物理腔长约为 0.65 m, 自由光谱区 (free spectral

range, FSR) 约为 224.7 MHz. 其中, M1 和 M2 在 852 nm 处反射率 R 大于 99.99%, 曲率半径为 100 mm, 在晶体处产生最佳腰斑来保证足够高的转换效率; M3 为反射率 99.99% (@852 nm) 的平面镜; 平面镜 M4 同样为平面镜并作为输出耦合镜, 其反射率为 98% (@852 nm); 4 个腔镜在

426 nm 处的透射率均大于 99%. 一块温度精确可控的尺寸为 $1\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的 II 类 PPKTP 晶体 (raicol crystals) 置于腔内. 用于补偿双折射效应的 2 个 QWPs 安装在高精度旋转安装座 (Thorlabs PRM05/M) 上, 角度调节精度为 $10'$. SPDC 腔的腔镜、晶体支架和波片架等均安置在一块殷钢底座上, 增加系统的整体稳定性. 通过压电陶瓷 (piezoelectric transducer, PZT) 扫描 SPDC 腔腔长, 并利用 Hansch-Couillard 方法^[25] 锁定. 其中, 频率远离下转换光场且已通过频率链^[26] 锁定的 840 nm 辅助激光经长通滤波片 (long-pass filter, LPF, Semrock TLP01-887-25 \times 36) 反射后耦合进腔, 出射光经双色片 (dichroic mirror, DM) 透射后被探测器收集产生鉴频信号, 进而锁定腔长. SPDC 腔产生的偏振相互垂直的光子对经 LPF 和 3 个长度 (反射率) 分别为 3 mm ($R = 95\%$), 5.56 mm ($R = 92\%$), 11.12 mm ($R = 92\%$) 的级联标准具进行模式过滤, 被 QWP 和 PBS 分离后分别耦合进单模光纤进行探测. 2 片带宽为 3.2 nm 的干涉滤波片 (Semrock LL01-852-12.5) 置于光纤耦合头前, 用于隔离背景噪声. 实验中利用单光子计数模块 (single-photon counting

modules, SPCMs, Excelitas SPCM-850-60-FC) 进行信号探测, SPCMs 的输出信号由时间数字转换器 (time to digital converter, TDC, Swabian Instruments Time Tagger 20) 进行数据分析和处理. 其中使用的 SPCM 的时间分辨率的参考值为 350 ps, 当 2 个 SPCMs 进行符合计数测量时, 符合的时间分辨率为 $\sqrt{2} \times 350 \approx 500\text{ ps}$.

4 实验结果

通过观测光子对的互关联函数, 可以精细调节两波片角度进而有效地补偿双折射效应, 也可用来表征补偿效果. 其中, 光子对之间的互关联函数表示在 t 时刻探测到信号光子, 在延时 τ 后的 $t + \tau$ 时刻探测到闲置光子的概率^[27,28]. 值得注意的是, 实际测量过程中只有当探测系统有限的分辨时间率 τ_D 远小于光子的腔内循环时间 t_{rt} 时, 互关联函数才能呈现由于多纵模造成的以 t_{rt} 为时间间隔的梳状结构.

实验首先探究了腔内 2 个 QWPs 的角度对互关联函数的影响. 如图 4 所示, 固定 QWP2 的角度 β_0 约为 45° , 测量 QWP1 角度 α_0 在 45° 附近变化时

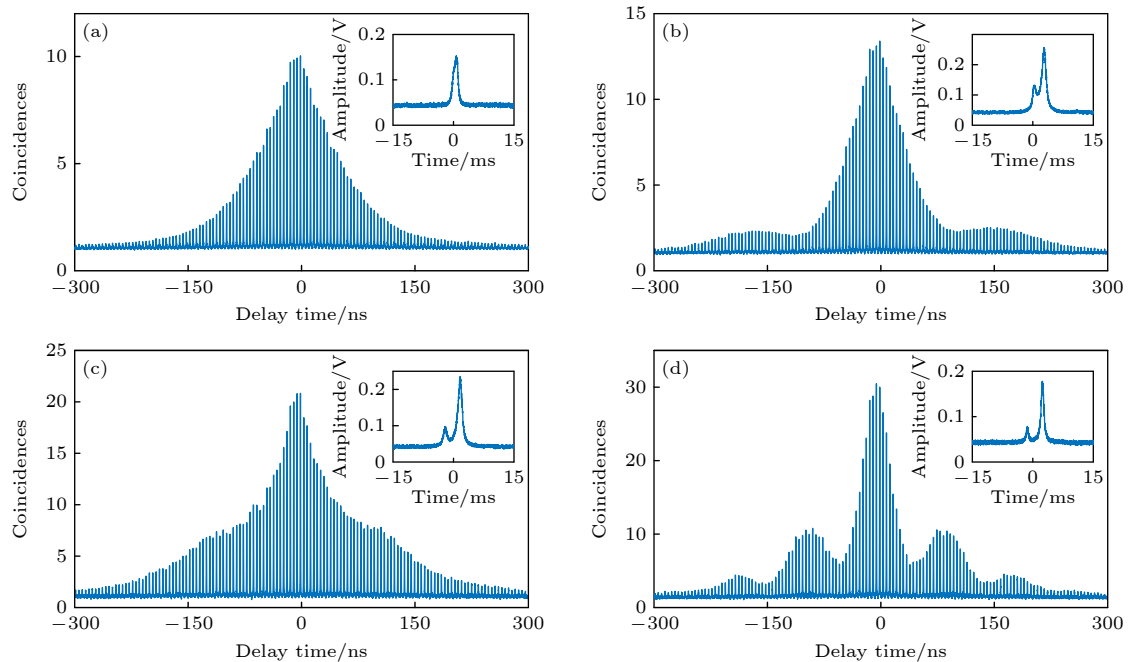


图 4 保持 QWP2 的角度约 45° , QWP1 不同角度 (重合程度) 下的互关联函数 (a) $\alpha_0 + 80'$ (72.8%); (b) α_0 (42.1%); (c) $\alpha_0 - 80'$ (25.0%); (d) $\alpha_0 - 160'$ (14.6%). 插图为相应腔内 2 个本征值所对应纵模的透射峰

Fig. 4. Cross-correlation function with different degrees of QWP1 (overlap) on the condition of the degree of QWP2 approximately equal to 45° : (a) $\alpha_0 + 80'$ (72.8%); (b) α_0 (42.1%); (c) $\alpha_0 - 80'$ (25.0%); (d) $\alpha_0 - 160'$ (14.6%). Insets are corresponding transmission spectra for the two different orthogonal modes.

的互关联函数. 为了更加直观地分析, 插图展示了腔内 2 个本征矢量对应纵模的透射峰. 将 2 个透射峰的重叠程度定义为

$$\eta = \frac{\left| \int E_1^* E_2 dA \right|^2}{\int |E_1|^2 dA \times \int |E_2|^2 dA},$$

其中 $E_1(A)$, $E_2(A)$ 分别为 2 个纵模在空间 A 的电场分布. 测量过程中, 选择泵浦光功率为 $860 \mu\text{W}$, Time Tagger 20 的时间分辨率设置为远小于 t_{rt} 的 75 ps . 如图 4 所示, 对比 QWP1 在不同角度 (重合程度) 下的互关联函数状态: (a) $\alpha_0 + 80'$ (72.8%), (b) α_0 (42.1%), (c) $\alpha_0 - 80'$ (25.0%), (d) $\alpha_0 - 160'$ (14.6%), 可以发现 QWP1 为 $\alpha_0 + 80'$ 时补偿效果相对较好. 距离双共振的最佳角度越远, 双折射效应对光学腔共振条件的影响越大, 2 个纵模的重合程度越小, 梳状信号的包络出现振荡.

将 QWP1 的角度固定为相对较好的 $\alpha_0 + 80'$, 改变 QWP2 的角度为 $\beta_0 - 40'$ (60.9%), $\beta_0 + 40'$ (90.0%), $\beta_0 + 80'$ (35.2%), $\beta_0 + 120'$ (23.8%), 并测量对应的互关联函数, 结果如图 5 所示. 可以发

现 QWP2 处于 $\beta_0 + 40'$ 时, 2 个波片重合程度较好. 由实验结果可以看出, 互关联函数对 QWP 角度的依赖性非常敏感, 只有当 2 个 QWP 角度均为 45° 时才足够补偿偏振相互垂直的纵模的双折射效应, 实现双共振. 参考互关联函数随 QWPs 角度的变化状态, 多次精细调节将腔内 QWP 的角度调到最佳值, 有效地完成对双折射效应的补偿.

互关联函数可以用来衡量补偿效果. 在双共振情况下, 泵浦功率为 1.26 mW 、测量了时间分辨率分别为 100 ps 和 4.4 ns 时的互关联函数, 如图 6 所示. 图 6(a), 互关联函数其归一化最大值随着泵浦功率增大而减小, 光子对之间的聚束效应逐渐减弱 [29,30]. 使用简化的理论模型 $H(\tau)e^{-2\pi\gamma_s\tau} + H(-\tau)e^{2\pi\gamma_i\tau}$ 对图 6(b) 中测量的数据点进行拟合 [17], 其中 $H(\tau)$ 为郝维赛德阶跃函数, γ_s, γ_i 分别表示信号光和闲置光在腔中的衰减率. 拟合得到信号光 (蓝色) 和闲置光 (红色) 的腔衰减率分别为 $(1.58 \pm 0.01) \text{ MHz}$ 和 $(1.69 \pm 0.01) \text{ MHz}$, 进而光子的线宽为 $(1.01 \pm 0.01) \text{ MHz}$ 和 $(1.08 \pm 0.01) \text{ MHz}$ [19]. 比较光子对线宽的差异, 可以发现这一方法把双折射效应补偿得很好.

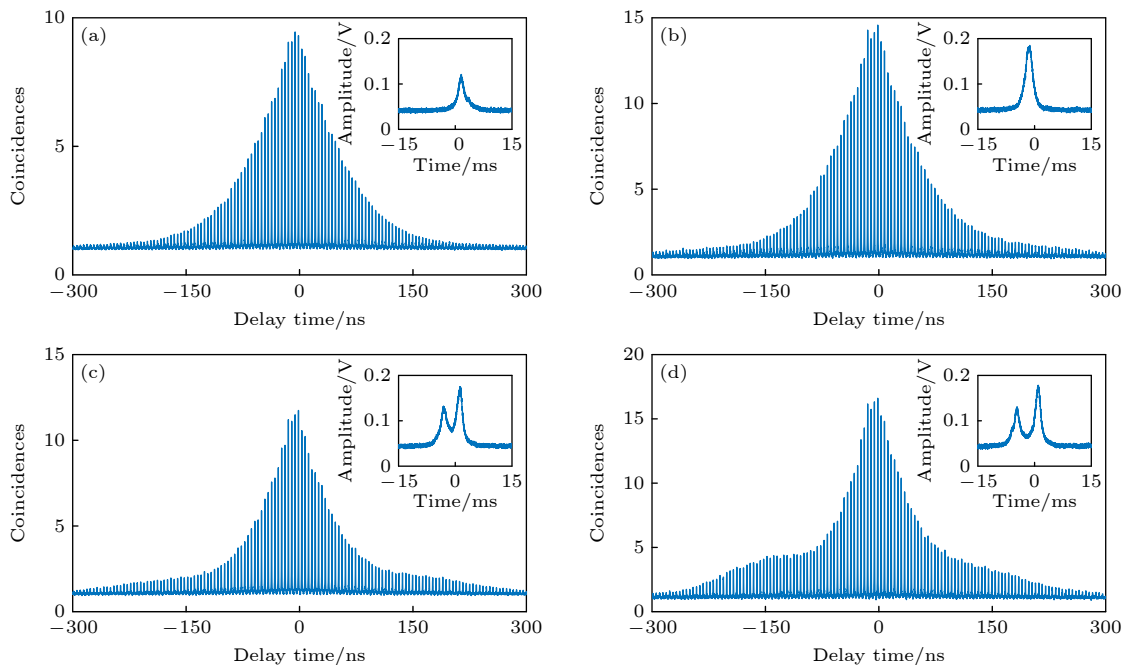


图 5 QWP1 的角度固定为相对较好的 $\alpha_0 + 80'$ 时 QWP2 在不同角度 (重合程度) 下的互关联函数 (a) $\beta_0 - 40'$ (60.9%); (b) $\beta_0 + 40'$ (90.0%); (c) $\beta_0 + 80'$ (35.2%); (d) $\beta_0 + 120'$ (23.8%)

Fig. 5. Cross-correlation function with different degrees of QWP2 (overlap) on the condition of QWP1 equal to $\alpha_0 + 80'$: (a) $\beta_0 - 40'$ (60.9%); (b) $\beta_0 + 40'$ (90.0%); (c) $\beta_0 + 80'$ (35.2%); (d) $\beta_0 + 120'$ (23.8%).

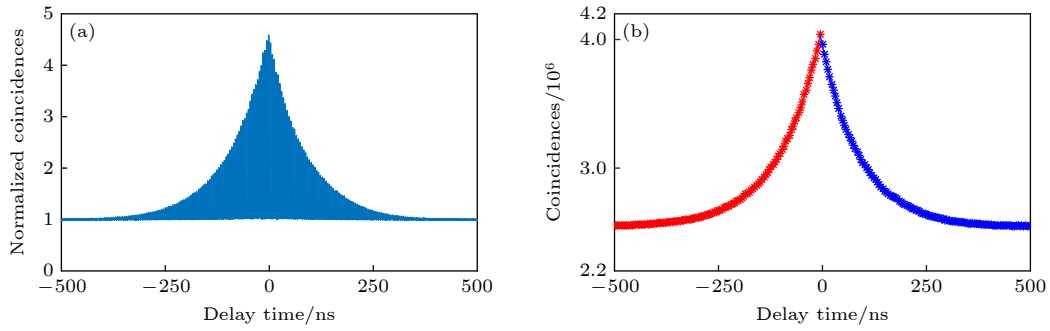


图 6 不同时间分辨率条件下的互关联函数 (a) 100 ps; (b) 4.4 ns, 蓝色曲线 (数据点) 和红色曲线 (数据点) 分别表示信号光和闲置光的拟合曲线 (数据)

Fig. 6. Cross-correlation function with different resolution time: (a) 100 ps; (b) 4.4 ns. The blue curve (points) and red curve (points) are representative fitting curves (experimental data) of signal and idler photons respectively.

5 结 论

本文利用与非线性晶体主轴夹角为 45° 的 2 个 $1/4$ 波片来补偿双折射效应, 实现了 SPDC 腔中线宽分别为 (1.01 ± 0.01) MHz 和 (1.08 ± 0.01) MHz 的信号光和闲置光的双共振. 此方法在成功补偿双折射效应的同时, 引入的内腔损耗较小, 装置相对简洁, 保证非线性晶体工作在最佳温度, 亮度损耗较小. 这一方法能够应用于预告式单光子源的产生.

参考文献

- [1] Perumangatt C, Lohrmann A, Ling A 2020 *Phys. Rev. A* **102** 012404
- [2] Tang J S, Tang L, Wu H D, Wu Y, Sun H, Zhang H, Li T, Lu Y Q, Xiao M, Xia K Y 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 064020
- [3] Yang H E, Wei L F 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 234202 (in Chinese) [杨宏恩, 韦联福 2019 物理学报 **68** 234202]
- [4] Wang B X, Tao M J, Ai Q, Xin T, Lambert N, Ruan D, Cheng Y C, Nori F, Deng F G, and Long G L 2018 *NPJ Quantum Inf.* **4** 52
- [5] Yang B, Sun H, Ott R, Wang H Y, Zache T V, Halimeh J C, Yuan Z S, Hauke P, Pan J W 2020 *Nature* **587** 392
- [6] Piro N, Rohde F, Schuck C, Almendros M, Huwer J, Ghosh J, Haase A, Hennrich M, Dubin F, and Eschner J 2011 *Nat. Phys.* **7** 17
- [7] Pittman T P, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3429
- [8] Zhang H, Jin X M, Yang J, Dai H N, Yang S J, Zhao T M, Rui J, He Y, Jiang X, Yang F, Pan G S, Yuan Z S, Deng Y J, Chen Z B, Bao X H, Chen S, Zhao B, Pan J W 2011 *Nat. Photonics* **5** 628
- [9] Yin J, Cao Y, Li Y H, Liao S K, Zhang L, Ren J G, Cai W Q, Liu W Y, Li S, Dai H, Li G B, Lu Q M, Gong Y H, Xu Y, Li S L, Li F Z, Yin Y Y, Jiang Z Q, Li M, Jia J J, Ren G, He D, Zhou Y L, Zhang X X, Wang N, Chang X, Zhu Z C, Liu N L, Chen Y A, Lu C Y, Shu R, Peng C Z, Wang J Y, Pan J W 2017 *Science* **356** 1140
- [10] Broome M A, Fedrizzi A, Lanyon B P, Kassal I, Guzik A A, White A G 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 153602
- [11] Esposito C, Barros M R, Hernandez A D, Carvacho G, Colandrea F D, Barboza R, Cardano F, Spagnolo N, Marrucci L, Sciarrino F 2022 *NPJ Quantum Inf.* **8** 34
- [12] Scholz M, Koch L, Benson O 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 063603
- [13] Zhou Z Y, Ding D S, Li Y, Wang F Y, Shi B S 2014 *J. Opt. Soc. Am. B* **31** 128
- [14] Rambach M, Nikolova A, Weinhold T J, White A G 2016 *APL Photonics* **1** 096101
- [15] Niizeki K, Ikeda K, Zheng M Y, Xie X P, Okamura K, Takei N, Namekata N, Inoue S, Kosaka H, Horikiri T 2018 *Appl. Phys. Express* **11** 042801
- [16] Liu J J, Liu J C, Yu P, Zhan G Q 2020 *APL Photonics* **5** 066105
- [17] Moqanaki A, Maaas F, Walther P 2019 *APL Photonics* **4** 090804
- [18] Tsai P J, Chen Y C 2018 *Quantum Sci. Technol.* **3** 034005
- [19] Ou Z Y, Lu Y J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2556
- [20] Tian L, Li S J, Yuan H X, Wang H 2016 *J. Phys. Soc. Japan* **85** 124403
- [21] Wang J, Huang Y F, Zhang C, Cui J M, Zhou Z Y, Liu B H, Zhou Z Q, Tang J S, Li C F, Guo G C 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 054036
- [22] Chuu C S, Yin G Y, Harris S E 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 051108
- [23] Lv B D 2003 *Laser Optics* (3rd Ed.) (Beijing: Higher Education Press) pp422–426 (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学(第三版) (北京: 高等教育出版社) 第422—426页]
- [24] Bhandari R 2008 *Opt. Lett.* **33** 854
- [25] Hansch T W, Couillard B 1980 *Opt. Commun.* **35** 441
- [26] Liu X X 2013 *M. S. Thesis* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [刘鑫鑫 2013 硕士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [27] Scholz M, Koch L, Benson O 2009 *Opt. Commun.* **282** 3518
- [28] Li Y 2016 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [李岩 2016 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [29] Bocquillon E, Couteau C, Razavi M, Laflamme R, Weihs G 2009 *Phys. Rev. A* **79** 035801
- [30] Wahl M, Rohlicke T, Rahn J H, Erdmann R, Kell G, Ahlrichs A, Kernbach M, Schell A W, Benson O 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 043102

Birefringence compensation utilizing quarter-wave plates in cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion process^{*}

He Hai¹⁾ Yang Peng-Fei¹⁾²⁾ Zhang Peng-Fei¹⁾²⁾

Li Gang^{1)2)†} Zhang Tian-Cai^{1)2)‡}

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 20 March 2023; revised manuscript received 17 April 2023)

Abstract

Single-photon source is an essential element in quantum information processing, and extensively used in the proof-in-principle demonstration in quantum physics, quantum imaging, quantum cryptography, etc. Considering the operating temperature and system complexity, it is a favorable option to choose spontaneous parametric down-conversion (SPDC) combined with the enhancement effect of a cavity. When generating significant single-photon source via the cavity-enhanced type-II spontaneous parametric down-conversion method, there appears inevitable birefringence effect which obviously influences the resonance condition. In order to compensate for birefringence effect, different approaches have been used such as introducing compensating crystal, placing a half-wave plate, tuning the temperature of the nonlinear crystal, customized conjoined double-cavity structure, and cluster effect. In this work, two quarter-wave plates, with an angle of 45° between the optical axis and the crystal axis, are placed in the cavity to ensure the double resonance of signal photon and idler photon. In the process, the signal photon and idler photon generated simultaneously have different polarizations perpendicular to each other through the type-II nonlinear crystal. Considering horizontally polarized photon, its polarization is changed into left circular polarization by the first quarter-wave plate and then returns as vertical polarization. After traversing a long optical path, it shifts to right circular polarization through the second quarter-wave plate. When the photon passes through the same quarter-wave plate again, the polarization state is originally converted into horizontal polarization state. Then the photon completes a round-trip. The other photon with vertical polarization experiences the same process. As a result, the signal photon and idler photon travel identical optical path. The general explanation is described by the Jones matrices, with the emphasis on the transformation of the polarizations of photons. This method can effectively compensate for birefringence effect, achieving double resonance by using a relatively simple device under the condition of smaller intra-cavity loss and more flexible for adjustment. The signal (idler) photon has a sub-natural linewidth of 1.01(1.08) MHz, demonstrating the feasibility of the proposed technique. This introduced compensating method paves the way to the realization of single-photon quantum source applied to the research of single-photon-single-atom quantum information processing, quantum interface and quantum network node with a single cesium atom confined in the strongly coupled cavity quantum electrodynamics system.

Keywords: cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion, birefringence effect, double resonance, heralded single-photon source

PACS: 42.65.Lm, 42.50.-p, 14.70.Bh, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.72.20230422

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11974223, 11974225) and the Fund for Shanxi 1331 Project Key Subjects Construction, China.

[†] Corresponding author. E-mail: gangli@sxu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

基于1/4波片的腔增强自发参量下转换过程中双折射效应的补偿

贺海 杨鹏飞 张鹏飞 李刚 张天才

Birefringence compensation utilizing quarter-wave plates in cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion process

He Hai Yang Peng-Fei Zhang Peng-Fei Li Gang Zhang Tian-Cai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 124203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230422

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230422>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自发参量下转换源二阶激发过程产生四光子超纠缠态

Generation of four-photon hyperentangled state using spontaneous parametric down-conversion source with the second-order term
物理学报. 2018, 67(6): 060302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172230>

宣布式单光子源宣布效率的宣布测量基相关性

Relevance of the heralded efficiency of the heralded single-photon source to the heralded basis
物理学报. 2019, 68(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190532>

高反射腔镜双折射效应对腔增强光谱技术的影响

Birefringence effect of high reflectivity cavity mirrors and its influence on cavity enhanced spectroscopy
物理学报. 2022, 71(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212090>

利用域排列算法设计铌酸锂晶体实现3 μm 中红外波段频域纯态单光子源

Preparation of spectrally pure single-photon source at 3 μm mid-infrared band from lithium niobate crystal with domain sequence algorithm
物理学报. 2022, 71(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220739>

化学自突触的电导扰动诱导相干或随机双共振现象

Coherent or stochastic bi-resonance induced by conductance disturbance of chemical autapse
物理学报. 2020, 69(23): 230501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200856>

光学腔增强Duan-Lukin-Cirac-Zoller量子记忆读出效率的研究

Experimental study of retrieval efficiency of Duan-Lukin-Cirac-Zoller quantum memory by optical cavity-enhanced
物理学报. 2022, 71(2): 020301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210881>