

# 用于量子纠缠密钥的多波长量子关联光子对的产生\*

胡飞飞<sup>1)</sup> 李思莹<sup>1)</sup> 朱顺<sup>1)</sup> 黄昱<sup>1)</sup> 林旭斌<sup>1)</sup>  
张思拓<sup>1)</sup> 范云茹<sup>2)†</sup> 周强<sup>2)</sup> 刘云<sup>2)</sup>

1) (中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510663)

2) (安徽省量子安全工程技术研究中心, 芜湖 241002)

(2024年9月10日收到; 2024年10月11日收到修改稿)

随着量子信息技术的发展, 多用户量子纠缠密钥分发网络受到越来越多的关注. 其中, 多波长量子光源是建立多用户连接的关键器件. 尽管近年来在多波长量子光源的研究上取得了显著的进展, 但受限于非线性光学器件的设计和制备技术, 增加量子光源的输出波长数仍然具有挑战性. 本文系统分析了氮化硅微环谐振腔的色散和尺寸等关键参数; 设计并制备得到了自由光谱范围为 20 GHz 的氮化硅微环谐振腔, 实验测试了氮化硅微环腔中量子关联光子对的产生和输出特性. 实验结果表明, 该光源在 25.6 nm 的波长范围内实现了 71 对波长上的关联光子对产生.

**关键词:** 微环谐振腔, 量子光源, 量子关联, 量子纠缠密钥

**PACS:** 03.67.Hk, 42.50.-p, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.73.20241274

**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241274

## 1 引言

20 世纪以来, 经典信息科技在信息获取、处理和传递方面取得了巨大进展, 为人类社会的发展提供了重要保障. 随着量子物理研究的深入, 量子信息技术应运而生, 将量子力学的基本原理和资源(如态叠加、不可克隆、不确定性和量子纠缠等)融入信息科技, 发展出包括量子精密测量、量子计算、量子通信等在内的多项技术<sup>[1-3]</sup>. 这些技术有望在测量精度、信息处理能力、传输容量和信息安全等方面超越经典信息技术的极限. 在量子信息技术中, 其核心关键是量子信息载源的物理实现. 近年来, 在核磁共振、冷原子、超导线路和量子光学等系统中提出了多种量子信息载源方案<sup>[4-6]</sup>. 其中, 光子因其无静止质量、良好相干性、低损耗和高速传输

等优势, 成为高性能量子信息载源的主要候选者<sup>[7-9]</sup>.

多波长量子光源是构建多用户量子纠缠密钥分发网络的不可或缺的组成部分<sup>[10,11]</sup>. 此外, 它们对光子量子技术的发展也具有重要意义, 比如提高量子通信的性能、推动光量子计算的发展、提升量子测量的灵敏度. 2020 年, Joshi 等<sup>[12]</sup> 基于周期性极化铌酸锂 (periodically poled lithium niobate, PPLN) 波导实现了 8 对量子关联/纠缠光子对的产生, 进而建立了 8 用户全连接量子纠缠网络. 最近, 基于腔增强的微腔器件利用其天然的多波长特性, 为多波长量子光源的制备提供了重要的器件基础. 基于二阶非线性材料的自发参量下转换 (spontaneous parametric down-conversion, SPDC) 过程以及基于三阶非线性材料的自发四波混频 (spontaneous four-wave mixing, SFWM) 过程产生多波长量子关联/纠缠光子对的研究得到了越来越多的

\* 中国南方电网有限责任公司科技项目 (批准号: 000005KK52220034 (ZDKJXM20222036)) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yunrufan@gmail.com

关注 [13–17]. 2020 年, Ma 等 [13] 基于利用 PPLN 微环谐振腔 (micro-ring resonator, MRR) 实现了 6 对量子关联光子的产生. 2021 年, Yin 等 [14] 基于氮化硅微环谐振腔实现了 42 对量子关联光子对的产生.

为了进一步实现更多输出波长的量子光源以建立更多用户的量子纠缠网络, 本文基于氮化硅微环谐振腔研究多波长对量子关联的产生. 首先, 针对关联光子对的产生和输出特性, 系统地分析了氮化硅微环谐振腔的色散和尺寸等关键参数; 其次, 设计并制备了自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 为 20 GHz 的氮化硅微环谐振腔, 搭建了氮化硅微环量子光源实验装置, 实验测试了氮化硅微环腔中量子关联光子对的产生和输出特性. 实验结果表明, 该光源在 25.6 nm 的波长范围内实现了 71 对关联光子对的产生, 为建立多用户全连接量子纠缠密钥分发网络奠定了基础.

## 2 器件设计与谐振特性测试

### 2.1 器件设计与制备

微环谐振腔是多波长对量子关联产生和输出的器件基础. 光学微腔的色散决定了微腔中能否产生关联光子对, 谐振特性决定了微腔中关联光子对的产生和输出速率, 微腔的自由光谱范围决定了产生关联光子对的间隔以及个数. 基于有限元方法, 设计了如图 1 所示的氮化硅微环谐振腔 [16,18]. 其中, 微环和直波导厚度为 0.8  $\mu\text{m}$ , 宽度为 1.8  $\mu\text{m}$ , 微环与直波导的间隔为 0.3  $\mu\text{m}$ . 根据微环 FSR 与微环周长直接的关系以及氮化硅波导的群折射率, 即 (1) 式和 (2) 式可计算得到微环周长:

$$\Delta\nu_{\text{FSR}} = \frac{v_g}{L} = \frac{c}{n_g \cdot L} \Rightarrow L = \frac{c}{n_g \cdot \Delta\nu_{\text{FSR}}}, \quad (1)$$

其中  $v_g$  为群速度;  $L$  为微环周长;  $c$  为真空光速;  $n_g$  为氮化硅波导的群折射率, 定义为

$$n_g = \frac{d\beta}{dk} = n_{\text{eff}} - \lambda_0 \frac{dn_{\text{eff}}}{d\lambda}. \quad (2)$$

根据有限元仿真计算得到在 1540 nm 处氮化硅波导的群折射率  $n_g$  为 2.11. 因此, 当微环 FSR 为 20 GHz 时, 微环周长为 7100  $\mu\text{m}$ . 为方便后续长时间稳定测试, 对氮化硅微环芯片进行了光纤尾纤封装, 如图 1(c) 所示. 封装后器件的输入输出总损耗为 3.2 dB. 为了确保与国际电信联盟 (international telecommunication union, ITU) 信道的波长对准, 将芯片安装在温度反馈控制台上, 可相应地调整谐振波长的位置.

### 2.2 谐振特性

氮化硅微环腔的谐振特性测试原理装置图如图 2 所示. 通过宽带可调谐激光器 (Toptica DLC Pro) 对氮化硅微环谐振腔进行波长扫描, 以获取其光学传输谱线. 通过偏振控制器调整入射光的偏振状态, 使其与波导的 TE<sub>00</sub> 模式对齐, 从而最大化耦合效率. 经过耦合后, 输出的光信号由光电探测器 (PDA015 C/M, Thorlabs) 转换为电信号, 再由示波器 (WavePro 804 HD-MS, Teledyne LeCroy) 记录电信号, 结合激光器的波长扫描参数可得到传输谱线. 传输谱线中相邻谐振峰之间的波长间隔即为自由光谱范围 (FSR), FSR 越小, 说明微环谐振器可以支持波长分布更密集的光学谐振模式, 这对于产生多波长的量子光源非常重要. 图 3 展示了微环谐振器从 1525—1555 nm 范围内的光学传输谱线, 通过分析相邻谐振峰之间的波长间隔, 计算得到微环的自由光谱范围为 20 GHz.

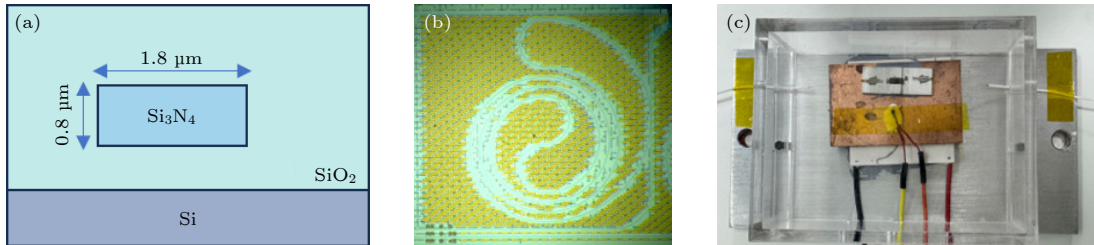


图 1 氮化硅微环器件 (a) 理论设计的氮化硅波导的截面尺寸; (b) 氮化硅微环器件的显微图片; (c) 尾纤耦合和温控封装后的器件实物图

Fig. 1.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  microring device: (a) Designed cross-sectional dimensions of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  waveguide; (b) image of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  microring device; (c) picture of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  device after fiber pigtail coupling and temperature control packaging.

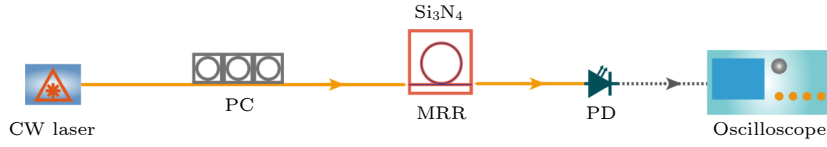


图 2 氮化硅微环谐振特性测试原理装置图. CW laser: 连续激光器; MRR: 微环谐振腔; PD: 光电探测器; Oscilloscope: 示波器

Fig. 2. Schematic of measuring the resonance property of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  MRR. MRR: microring resonator; PD: photodetector.

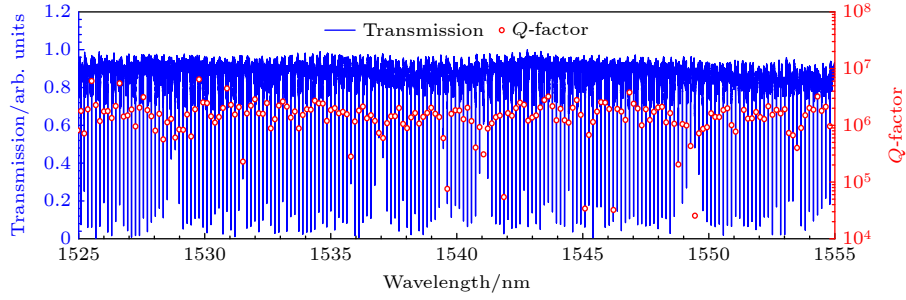


图 3 测量得到的氮化硅微环腔的谐振特性

Fig. 3. Measured resonance property of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  MRR.

品质因子 ( $Q$  值) 是微环谐振器的一个重要性能指标, 表征谐振腔的损耗特性.  $Q$  值越高, 谐振腔内的光子寿命越长, 说明腔内光的损耗越小. 基于谐振波长  $\lambda$  处的光学传输谱线, 通过测量谐振峰的半高全宽  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ , 可计算出微环谐振腔品质因子  $Q$  值:

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}}. \quad (3)$$

逐一计算各个谐振谱线的  $Q$  值, 计算结果如图 3 所示, 其中  $Q$  值平均值为  $1.6 \times 10^6$ , 最大值达到  $6 \times 10^6$ . 在 1540.5 nm 处的归一化传输谱线如图 4 所示, 通过洛伦兹线型函数拟合得到谐振峰的半高全宽为 165 MHz, 品质因子为  $1.2 \times 10^6$ ; 谐振深度为 10 dB, 微环谐振腔接近临界耦合状态.

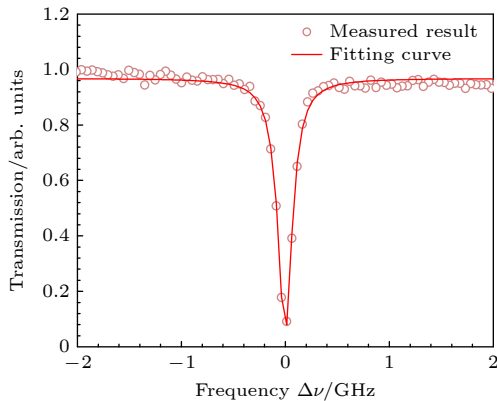


图 4 测量得到的 1540.5 nm 附近光学传输谱线

Fig. 4. Measured transmission spectrum around 1540.5 nm.

### 3 多波长对量子关联的产生和测试

#### 3.1 自发四波混频效应

自发四波混频 (SFWM) 是一种非线性光学过程, 广泛用于制备量子光源, 尤其是在光纤和集成三阶非线性光学芯片中, 通过自发四波混频制备的量子光源具有高度集成、可调谐, 以及与现有光通信基础设施兼容等优点, 成为实现大规模量子通信网络和集成量子信息处理器的理想选择<sup>[19]</sup>. 特别是在集成三阶非线性光学芯片上实现的 SFWM 量子光源, 具有稳定性好、噪声低和调控灵活等特点, 有望在未来的量子技术中发挥关键作用.

四波混频非线性光学过程涉及至少 3 个不同频率的光场相互作用, 通常包括 2 个泵浦光子 (频率为  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ) 和 2 个新产生的光子 (频率为  $\omega_3$  和  $\omega_4$ ). 这一过程遵循能量和动量守恒定律. 其中, 能量守恒条件具体为

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4. \quad (4)$$

为了有效地产生四波混频信号, 必须满足相位匹配条件, 即所有参与光子的动量之和保持平衡. 相位匹配可以通过调节介质的色散特性来实现.

$$\Delta k = k_1 + k_2 - k_3 - k_4 - \gamma P_1 - \gamma P_2 = 0, \quad (5)$$

其中  $k_i$  为波矢 ( $i = 1, 2, 3, 4$ );  $\Delta k$  为相位失配量;  $\gamma$  为非线性光学介质的非线性光学系数;  $P_1$  和  $P_2$  为光功率.

在没有外部驱动的情况下,通过光场的量子涨落自发地产生新光子对,产生的频率为 $\omega_3$ 和 $\omega_4$ 的光功率处于单光子水平,不足以引起任何受激辐射效应,则可以将上述过程称为自发四波混频过程.如果在这一过程中,2个泵浦光子的频率相同,即, $\omega_1 = \omega_2 = \omega_p$ ,则被称为简并自发四波混频过程,如图5所示.2个同频的泵浦光子经过非线性介质(如光纤、波导等)时,产生的2个新光子分别称为信号光子和闲频光子.

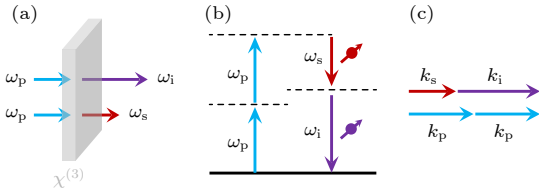


图5 自发四波混频过程<sup>[18]</sup> (a) 三阶非线性光学材料中的自发四波混频过程; (b) 能量守恒条件; (c) 动量守恒条件  
Fig. 5. Spontaneous four-wave mixing process: (a) Spontaneous four-wave mixing process in the third order nonlinear optical materials; (b) energy conservation condition; (c) momentum conservation condition.

此时,能量守恒和动量守恒条件为

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (6)$$

$$\Delta k = 2k_p - k_s - k_i - 2\gamma P_p = 0, \quad (7)$$

其中 $\omega_p$ 是泵浦光子的频率; $\omega_s$ 和 $\omega_i$ 分别是生成的信号光子和闲频光子的频率.这些光子满足能量守恒和动量守恒的条件,信号光子和闲频光子同时产

生,且频率 $\omega_s$ 和 $\omega_i$ 关于泵浦频率对称分布.该过程使得新产生的频率为 $\omega_s$ 和 $\omega_i$ 的光子之间具有量子关联特性,因此被称为关联光子对.

(7)式中 $2\gamma P_p$ 表示泵浦光对于信号光子和闲频光子的非线性相位调制,在泵浦光功率较弱的情况下,可以忽略,则(7)式可以简化为

$$\Delta k = 2k_p - k_s - k_i = 0. \quad (8)$$

### 3.2 实验装置

泵浦激光在氮化硅微环中通过自发四波混频过程,湮灭2个泵浦光子,同时产生一个信号光子和一个闲频光子,进而产生频率对称分布的多波长对量子关联光子对;从非线性介质中输出的光子经分光滤波后,选择出信号光子和闲频光子;使用超导单光子探测器对信号和闲频光子进行探测,将单光子信号转换为电信号,单光子探测器输出的电信号使用时间数字转换器进行测量和分析,完成量子关联特性测量.多波长对量子关联产生和测试的实验装置如图6所示.

具体地,连续激光器(NKT Photonics, E15)输出波长为1540.5 nm的泵浦激光,该波长对应谐振腔的谐振波长.使用掺铒光纤放大器(EDFA)和可变光衰减器(VOA)对输出光功率进行调节,并在90/10的分束器的10%端口使用功率计(PM)监测泵浦功率.调节偏振控制器使泵浦光的偏振方向对准波导TE<sub>00</sub>模式.为了抑制光纤光路系统中产生的拉曼噪声光子和泵浦激光器的边带

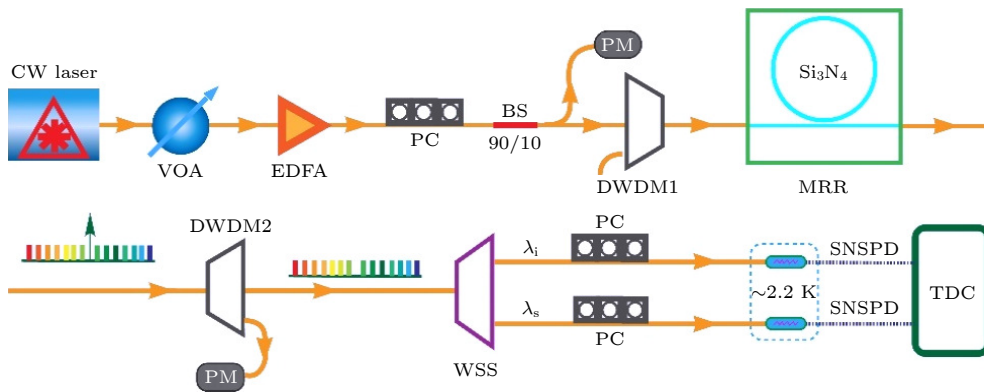


图6 氮化硅微环的关联光子对产生和测试实验原理装置图. CW laser: 连续激光器; VOA: 可调光衰减器; EDFA: 掺铒光纤放大器; PC: 偏振控制器; BS: 分束器; PM: 功率计; DWDM: 密集波分复用器; MRR: 微环谐振腔; WSS: 波长选择开关; SNSPD: 超导纳米线单光子探测器; TDC: 时间-数字转换器

Fig. 6. Experimental setup for generating and measuring correlated photon pairs in  $\text{Si}_3\text{N}_4$  MRR. VOA: variable optical attenuator; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; PC: polarization controller; BS: beam splitter; PM: power meter; DWDM: dense wavelength division multiplexer; WSS: wavelength selective switch; SNSPD: superconducting nanowire single-photon detector; TDC: time-to-digital converter.

噪声, 在芯片前使用 ITU 信道 C46 密集波分复用器 (DWDM1) 进行滤波, 其边带抑制比大于 120 dB, 尾纤长度为 10 cm. 另一个隔离度大于 50 dB 的 C46 密集波分复用器 DWDM2 来抑制泵浦光. 产生的光子对由插入损耗约为 5 dB、滤波带宽为 0.16 nm 的波长选择开关 (WSS, Waveshaper 4000A) 进行选择. 然后, 信号和闲频光子通过超导纳米线单光子探测器进行检测, 并由时间-数字转换器 (TDC, IDQ, ID900) 记录单光子探测器的输出信号.

### 3.3 实验结果

通过测量单边计数率、符合计数率、偶然符合计数及其比值 (coincidence-to-accidental ratio, CAR) 来表征关联光子对的量子关联特性. 首先, 测量了不同泵浦功率下关联光子对单边计数率, 如图 7 所示, 其中蓝色和红色圆圈分别对应于波长为 1542.82 nm 和 1538.66 nm 的信号光子和闲频光子的测量结果. 在泵浦功率为 2.0 mW 时, 产生的信号光子和闲频光子计数率分别达 10.9 kHz 和 9.9 kHz.

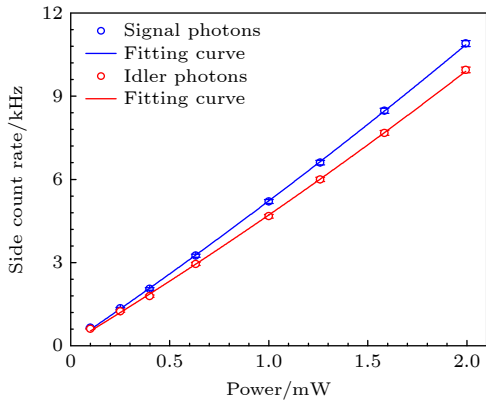


图 7 不同泵浦功率水平下, 信号光子与闲频光子的单边计数率  
Fig. 7. Single side count rates of signal photons and idler photons at different pump power levels.

符合计数指的是在两个探测器中同时检测到来自同一对关联光子的事件, 偶然符合计数是指由于非关联事件 (如探测器的暗计数、背景噪声或多光子产生) 导致的同时探测事件. 符合计数与偶然符合计数的比值, 通常称为 CAR, 是评估量子光源质量的关键指标. 如果产生的光子没有量子关联特性, 则符合计数与偶然符合计数相等, 即, CAR 为 1. 相同情况下, 较高的 CAR 值表明系统背景噪声

相对较低, 具有高质量的关联光子对.

为了表征关联光子对, 测量了信号光子与闲频光子的符合计数直方图. 实验中, 取符合时间窗口为 3 ns. 在泵浦功率为 2.0 mW 时, 测试得到的上述信号光子和闲频光子的符合计数直方图如图 8 所示, 得到单位时间内符合计数值为 74 Hz. 使用双指数函数  $N_c(\Delta t) \propto \exp(-|\Delta t|/\tau)$  [20,21] 对测试数据进行拟合,  $\tau$  为峰值 1/e 处的符合峰宽, 对应关联光子的相干时间, 拟合得到的相干时间为 1.4 ns.

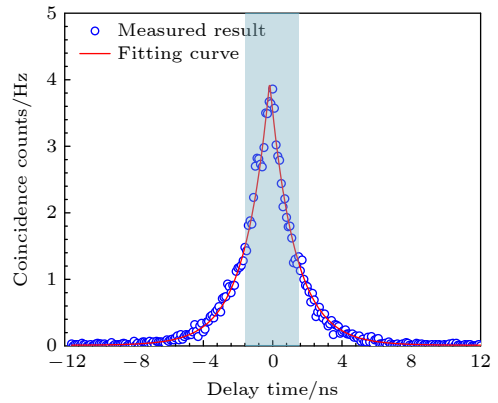


图 8 泵浦功率为 2 mW 时, 信号光子与闲频光子的符合测量结果

Fig. 8. Histogram of coincidence counts between signal photons and idler photons at a pump power of 2 mW.

图 9(a) 展示了不同泵浦功率下测量的符合计数和偶然符合计数, 图 9(b) 展示了相应的 CAR. 从图 9(b) 可以看出, 在测量的泵浦功率范围内, CAR 均不低于 130, 表明氮化硅微腔中产生了具有良好量子关联特性的光子对.

为了测量氮化硅微腔中多波长对量子关联光子对的产生特性, 在 2 mW 的泵浦功率下测量了不同波长对的符合计数, 符合计数累计时间为 100 s. 在滤波抑制泵浦光的过程中使用的 DWDM2 不可避免地会造成泵浦波长附近波长对上产生光子对的损失, 实验中我们测量了关于泵浦波长对称的第 10 对到第 80 对光子对的符合计数, 波长从 1527.94 到 1553.54 nm, 即在 25.6 nm 波长范围内产生了 71 对关联光子对, 如图 10 所示. 与 Yin 等 [14] 中报道的 42 对量子关联光子对的结果相比, 我们通过增大微环的半径, 同时通过设计微环结构保证了微环的品质因子达  $10^6$ , 最终实现了 71 对关联光子对的制备.

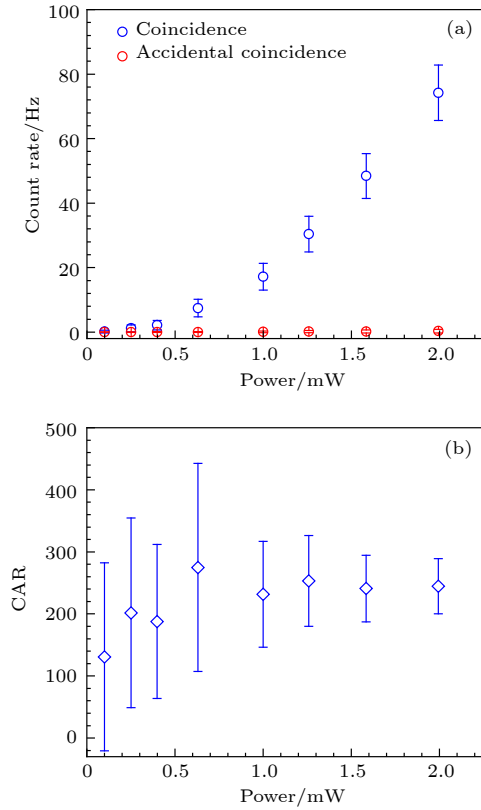


图 9 光子对量子关联特性测量 (a) 不同泵浦功率下信号光子与闲频光子的符合计数与偶然符合计数; (b) 不同泵浦功率下的 CAR

Fig. 9. Quantum correlation measurements of photon pairs: (a) Coincidence count rate and accidental coincidence count rate between signal photons and idler photons; (b) CAR at different pump powers.

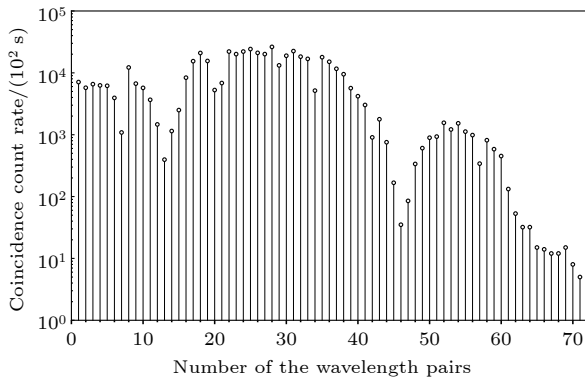


图 10 测量得到的多波长对量子关联光子对的符合计数  
Fig. 10. Measured coincidence count rate with multiple paired wavelengths.

## 4 结论

本文基于氮化硅微环谐振腔,成功地实现了高性能多波长对量子关联的产生和测试.通过系统优化微环的色散和尺寸等关键参数,设计并测试了自

由光谱范围为 20 GHz 的微环谐振器,在 25.6 nm 的波长范围内成功产生了 71 对关联光子对.本文研究作为量子纠缠密钥分发网络的建设提供了器件基础,满足更多用户采用不同波长接入量子网络的需求,不仅展示了氮化硅微环在量子关联光子对产生中的优越性能,还为未来多用户全连接量子纠缠网络的构建奠定了坚实的基础.未来的工作可进一步提高光子对的综合性能与系统的集成度,比如通过进一步优化氮化硅波导的本征损耗和微环器件的耦合损耗,增大微环谐振腔的品质因子,实现更高的符合计数率和 CAR,以推动其在实际量子信息技术中的应用.

## 参考文献

- [1] O'Brien J L 2007 *Science* **318** 1567
- [2] Sheng Y B, Zhou L, Long G L 2022 *Sci. Bull.* **67** 367
- [3] Hu X M, Guo Y, Liu B H, Li C F, Guo G C 2023 *Nat. Rev. Phys.* **5** 339
- [4] Córcoles A D, Takita M, Inoue K, Lekuch S, Mineev Z K, Chow J M, Gambetta J M 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 100501
- [5] Schupp J, Krcmarsky V, Krutyanskiy V, Meraner M, Northup T E, Lanyon B P 2021 *PRX Quantum* **2** 020331
- [6] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, Zoller P 2001 *Nature* **414** 413
- [7] Politi A, Matthews J C, Thompson M G, O'Brien J L 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 1673
- [8] Wang J, Sciarrino F, Laing A, Thompson M G 2020 *Nat. Photonics* **14** 273
- [9] Lu L, Zheng X, Lu Y, Zhu S, Ma X S 2021 *Adv. Quantum Technol.* **4** 2100068
- [10] Wengerowsky S, Joshi S K, Steinlechner F, Hübel H, Ursin R 2018 *Nature* **564** 225
- [11] Roslund J, De Araujo R M, Jiang S, Fabre C, Treps N 2014 *Nat. Photonics* **8** 109
- [12] Joshi S K, Aktas D, Wengerowsky S, Lončarić M, Neumann S P, Liu B, Scheidl T, Lorenzo G C, Samec Ž, Kling L J S A 2020 *Sci. Adv.* **6** eaba0959
- [13] Ma Z, Chen J Y, Li Z, Tang C, Sua Y M, Fan H, Huang Y P 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 263602
- [14] Yin Z, Sugiura K, Takashima H, Okamoto R, Qiu F, Yokoyama S, Takeuchi S 2021 *Opt. Express* **29** 4821
- [15] Rahmouni A, Wang R, Li J, Tang X, Gerrits T, Slattery O, Li Q, Ma L 2024 *Light Sci. Appl.* **13** 110
- [16] Fan Y R, Lyu C, Yuan C Z, Deng G W, Zhou Z Y, Geng Y, Song H Z, Wang Y, Zhang Y F, Jin R B 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2300172
- [17] Zeng H, He Z Q, Fan Y R, Luo Y, Lyu C, Wu J P, Li Y B, Liu S, Wang D, Zhang D C 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 133603
- [18] Fan Y R 2022 *Ph. D. Dissertation* (University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [范云茹 2022 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [19] Wang H, Zeng Q, Ma H, Yuan Z 2024 *Adv. Devices Instrum.* **5** 0032
- [20] Samara F, Maring N, Martin A, Raja A S, Kippenberg T J, Zbinden H, Thew R 2021 *Quantum Sci. Technol.* **6** 045024
- [21] Ou Z Y, Lu Y J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2556

# Generation of multiwavelength quantum correlated photon pair for quantum entanglement key distribution\*

Hu Fei-Fei<sup>1)</sup> Li Si-Ying<sup>1)</sup> Zhu Shun<sup>1)</sup> Huang Yu<sup>1)</sup> Lin Xu-Bin<sup>1)</sup>

Zhang Si-Tuo<sup>1)</sup> Fan Yun-Ru<sup>2)†</sup> Zhou Qiang<sup>2)</sup> Liu Yun<sup>2)</sup>

1) (Power Dispatching Control Center of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

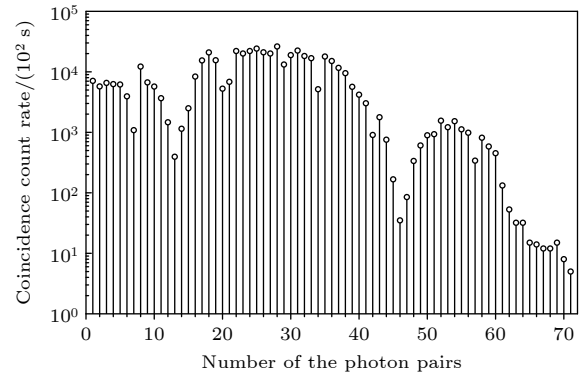
2) (Anhui Quantum-Safe Engineering Technical Research Center, Wuhu 241002, China)

( Received 10 September 2024; revised manuscript received 11 October 2024 )

## Abstract

With the rapid development of quantum information technology, fully connected multi-user quantum entanglement distribution networks have received increasing attention. Among these, multi-wavelength quantum light sources are key devices for establishing connections between multiple users. Despite recent impressive advances, there are still challenges in increasing the wavelength number of photon pairs due to limitations in the design and fabrication of nonlinear optical devices. The potentials of silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) microring resonators (MRRs), as scalable platforms for multi-wavelength quantum light sources, are explored in this work.

The key design parameters of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  MRRs, including waveguide dimension, resonator dispersion, and coupling condition, are comprehensively analyzed to optimize photon-pair generation. Based on these parameters, a  $\text{Si}_3\text{N}_4$  MRR with a free spectral range of 20 GHz and an average quality factor of 1.6 million is designed and fabricated. This small free spectral range can generate more channels of correlated photon pairs by using the same wavelength resources. The high-quality resonator contributes to the enhancement of the rate of generating high photon pairs, which are critical for quantum entanglement distribution. With a continuous-wave pump laser, correlated photon pairs across a wide spectral range are generated through the spontaneous four-wave mixing (SFWM). The coincidence-to-accidental ratio (CAR) measurements verify the strong quantum correlation between photon pairs, highlighting the reliability of the system for entanglement distribution. Furthermore, the generation and output characteristics of quantum-correlated photon pairs are experimentally investigated with a tunable bandpass filter. The results demonstrate that 71 wavelength-correlated photon pairs within a 25.6 nm spectral range are successively generated as shown in the Fig. A. Our results pave the way for developing the multi-wavelength quantum light sources with  $\text{Si}_3\text{N}_4$  platform, thereby advancing the multi-user quantum networks.



**Keywords:** microring resonator, quantum light source, quantum correlation, quantum entanglement key

**PACS:** 03.67.Hk, 42.50.-p, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.73.20241274

**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241274

\* Project supported by China Southern Power Grid Project of Science and Technology (Grant No. 000005KK52220034 (ZDKJXM20222036)).

† Corresponding author. E-mail: [yunrufan@gmail.com](mailto:yunrufan@gmail.com)



## 用于量子纠缠密钥的多波长量子关联光子对的产生

胡飞飞 李思莹 朱顺 黄昱 林旭斌 张思拓 范云茹 周强 刘云

## Generation of multiwavelength quantum correlated photon pair for quantum entanglement key distribution

Hu Fei-Fei Li Si-Ying Zhu Shun Huang Yu Lin Xu-Bin Zhang Si-Tuo Fan Yun-Ru Zhou Qiang Liu Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 230304 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241274

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241274>

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

#### 轨道角动量量子光源的集成化研究

Research progress of integrated quantum light sources with orbital angular momentum

物理学报. 2024, 73(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240791>

#### 基于不可信纠缠源的高斯调制连续变量量子密钥分发

Gaussian-modulated continuous-variable quantum key distribution based on untrusted entanglement source

物理学报. 2023, 72(4): 040301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221902>

#### 利用域排列算法设计铌酸锂晶体实现3 $\mu\text{m}$ 中红外波段频域纯态单光子源

Preparation of spectrally pure single-photon source at 3  $\mu\text{m}$  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>

#### 标记单光子源在量子密钥分发中的应用

Overview of applications of heralded single photon source in quantum key distribution

物理学报. 2022, 71(17): 170304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220344>

#### 关联退相位有色噪声通道下熵不确定关系的调控

Regulation of entropic uncertainty relation in correlated channels with dephasing colored noise

物理学报. 2024, 73(22): 220301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241171>

#### 基于广义等距张量的压缩多光子纠缠态量子密钥分发

Generalized isometric tensor based quantum key distribution protocols of squeezed multiphoton entangled states

物理学报. 2023, 72(17): 170301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230589>