

# 反向传播自发参量下转换源 在绝缘体上的铌酸锂中

Jost Kellner,\* Alessandra Sabatti,† Tristan Kuttner, Robert J. Chapman, and Rachel Grange

*Optical Nanomaterial Group, Institute for Quantum Electronics,  
Department of Physics, ETH Zurich, CH-8093 Zurich, Switzerland*

(10Dated: 2025 年 6 月 28 日)

量子光子技术依赖于在可扩展平台上生成、操纵和干涉不可区分的单光子的能力。在各种方法中，自发参量下转换 (SPDC) 仍然是用于生成纠缠或纯光子对的最广泛使用的方法之一。然而，大多数依赖共传播几何结构的集成 SPDC 光源具有有限的信使光子纯度，或者需要有损耗过滤器。类型-II SPDC 过程可以产生纯净可分离的光子，但由于偏振管理问题通常效率较低且复杂性更高。在这里，我们展示了绝缘体上铌酸锂上的第一个反向传播光子对源，在这里信号和闲频光子以相反的方向生成。反向传播几何结构导致无需光谱过滤就能得到光谱无关的光子对。联合光谱强度测量和非信使  $g^{(2)}$  相关性，获得纯度为  $(92\pm 3)\%$ 。两个独立光源之间的干涉实现了  $(71\pm 3)\%$  的信使可见度，证实了该平台的可扩展性。这些结果确立了一条通往集成、高纯度和调谐光子源的新途径。所展示的反向传播几何结构为量子光子网络提供了一个可扩展解决方案。

## 介绍

自发参量下转换 (SPDC) 是一种广泛使用且研究充分的方法，用于生成单光子源 [1]。在这个非线性光学过程中，相干泵浦光子被转化为一对低能量的光子，通常称为信号光和闲频光 [2]。这些光子对已成为各种实验中的重要工具，从量子光学的基本研究到诸如量子密钥分发等实际应用 [3, 4]。当受到强泵浦驱动时，SPDC 还可以用于生成压缩态，这对于量子计算和量子计量至关重要 [5, 6]。

早期的演示使用了方解石和铌酸锂 (LN) 等块状晶体中的双折射相位匹配 [7, 8]。后来，通过制造周期性极化铌酸锂和 KTP 块状晶体来调节光源特性 [9]。随着钛扩散波导在 LN 中开发出的重大效率提升 [10, 11]，以及最近在绝缘体上铌酸锂 (LNOI) 平台上的高约束薄膜波导的制造 [12]，这些结构实现了高效的非线性过程，包括二次谐波产生、超连续谱生成、高速电光调制器和 SPDC [13–16]。

生成具有高纯度的光谱和空间分离的光子是单光子对源的关键目标 [1, 17]。高纯度能够在光子被预报时不扰动另一个光子的量子态，这对于多光子干涉以及复杂、高维量子态的生成至关重要 [18]。典型的

共传播类型 0 SPDC (自发参量下转换) 产生的光子对处于单个空间模式中 (见图 1a)。共传播类型 0 SPDC 具有如图 1c 所示的相位匹配函数，这在频率域内产生了最大纠缠的光子对，如图 1e 中的 JSI 所展示的那样 [19, 20]。相比之下，类型-II 过程可以实现具有高光谱纯度几乎不相关的光子对 [21, 22]。然而，类型-II 配置收集了 LN (铌酸锂) 中非线性张量的一个较小部分，因此效率降低。另一个缺点是需要管理正交偏振。类型-0 受益于最强的非线性张量分量和单极化使用，但需要过滤以实现高纯度，这降低了生成和检测效率 [23]。

一种结合两种过程优势的有希望的方法由 Booth 等人提出 [24]。通过相位匹配以相反方向传播的两个光子，可以利用 LN 强大的非线性张量，同时在不同的空间模式中产生光谱可分离的光子。图 1b 说明了两个产生的光子 (橙色和红色) 通过不同的端口从波导中发出。由于该配置的有利色散特性，产生的光子对本质上是光谱不相关的，并表现出高纯度 [25]。这种过程的相位匹配函数和 JSI 分别如图 1d 和图 1f 所示。该方法首次在大量周期极化的 KTP [26] 中演示，后来又在第五和第三次极化的扩散波导中进行 [20, 25, 27]，最近则是在 z 切 LNOI 上用于生成对称二次谐波 [28]。据我们所知，在集成平台上从未报道过反向传播的 SPDC 光源，也没有在此相位匹配过程中在 x 切 LNOI 上的任何实现。在广泛应用于集成光子学的 x 切平台上展示这一过程，将能够无缝地与调制器和其他已建立的

\* These authors contributed equally to this work.; kellnerj@ethz.ch

† These authors contributed equally to this work.

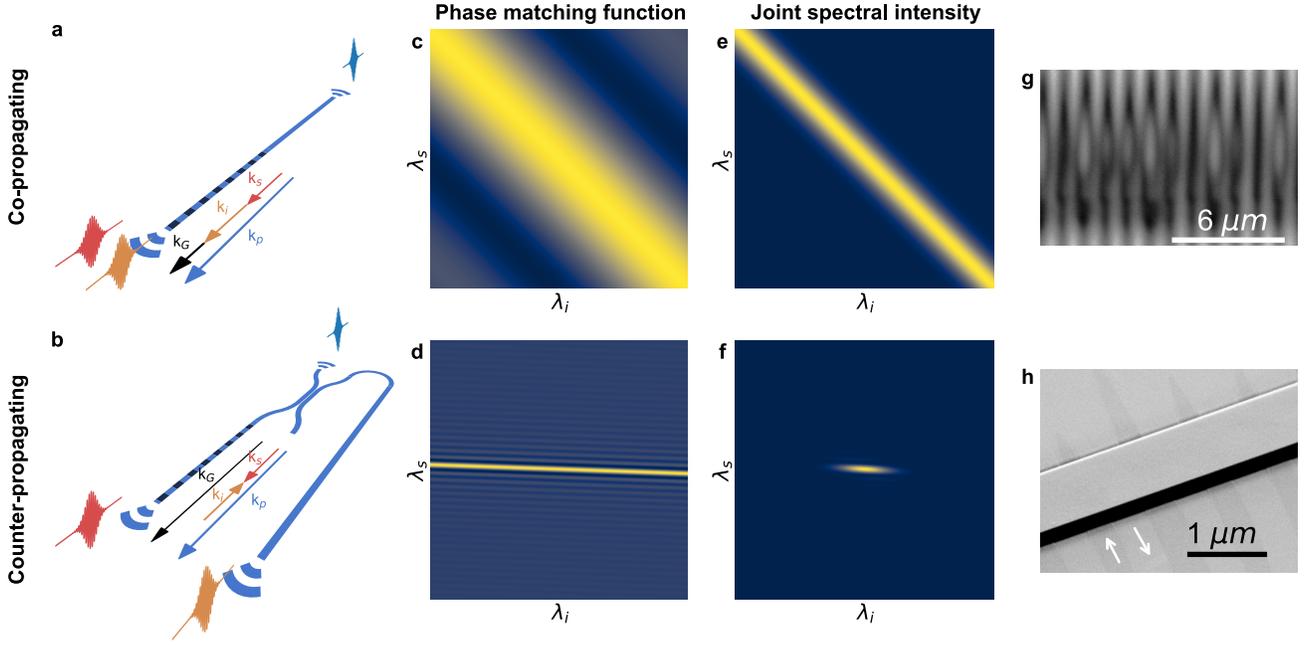


图 1. 自发参量下转换源在铌酸锂中。共传播 SPDC (a) 和反向传播 SPDC (b) 源的示意图, 彩色箭头表示泵浦 (蓝色)、信号 (红色) 和闲频 (橙色) 光子动量的方向。黑色箭头表示周期性极化光栅给出的动量。c, d, 分别为共传播和反向传播配置下的相位匹配函数。e, f, 由泵浦光谱与相应相位匹配函数重叠产生的联合光谱强度, 分别针对共传播和反向传播情况。g, 波导制造前极化薄膜的双光子显微图像。h, 带有可见反转畴灰色阴影的已制备波导的扫描电子显微镜图像。白色箭头指示畴的方向。

组件进行集成。

## 结果

### A. 源设计与经典特征化

在这里, 我们展示了首次在绝缘体上的铌酸锂  $x$  切平台上完全集成的反向传播 SPDC 源。我们表征了该源的光谱特性, 并将测量到的相位匹配函数与数值模拟进行了比较。我们演示了广泛的可调性, 并通过 Hong - Ou - Mandel 干涉验证了该源的量子性质, 实现了连续波操作下的可见度为  $(87.3 \pm 0.6)\%$ 。我们表征了该源的联合光谱强度并进行了未受控制的  $g^{(2)}$  测量, 确认获得了高纯度  $(92 \pm 3)\%$ , 这是在使用带宽为  $1.1 \text{ nm}$  的脉冲激光泵浦源时获得的。最后, 我们将来自两个独立光源的光子进行干涉, 并证实了受控单光子的高光谱纯度。通过宣告两个来源的两个闲频光子, 我们实现了可见度为  $(71 \pm 3)\%$  的 Hong-Ou-Mandel 干涉。

源设计包含三个光栅耦合器用于光的入射和出射。其中两个耦合器针对接近  $1550 \text{ nm}$  的操作进行了优化, 对应于信号光子和闲频光子, 而第三个则为泵浦场在  $775 \text{ nm}$  处进行设计。通过泵浦光栅耦合器进入的光被路由到一个定向耦合器中, 该耦合器作为波长解复用器工作, 允许泵浦光沿同一臂通过并重新引导 C 频段内的光线。随后在周期性掺杂区域生成光子对: 信号光子向前传播并直接从芯片出射, 而闲频光子则向后传播并通过波长解复用器及其相应的光栅耦合器被路由出去。源的示意图如图 1b 所示。由于信号和闲频光子的动量相互抵消, 掺杂动量必须补偿整个泵浦动量。由于亚微米掺杂周期的技术挑战, 我们采用了一个三阶掺杂方案, 其掺杂周期为  $1.18 \mu\text{m}$ 。一阶掺杂对应的周期约为  $400 \text{ nm}$ 。只要顺序是奇数, 使用高阶 QPM 仍然可以实现相位匹配 [29]。对于阶数为  $n$  的极化, 效率与一阶效率相比按  $\frac{1}{n^2}$  规模变化。有关更详细

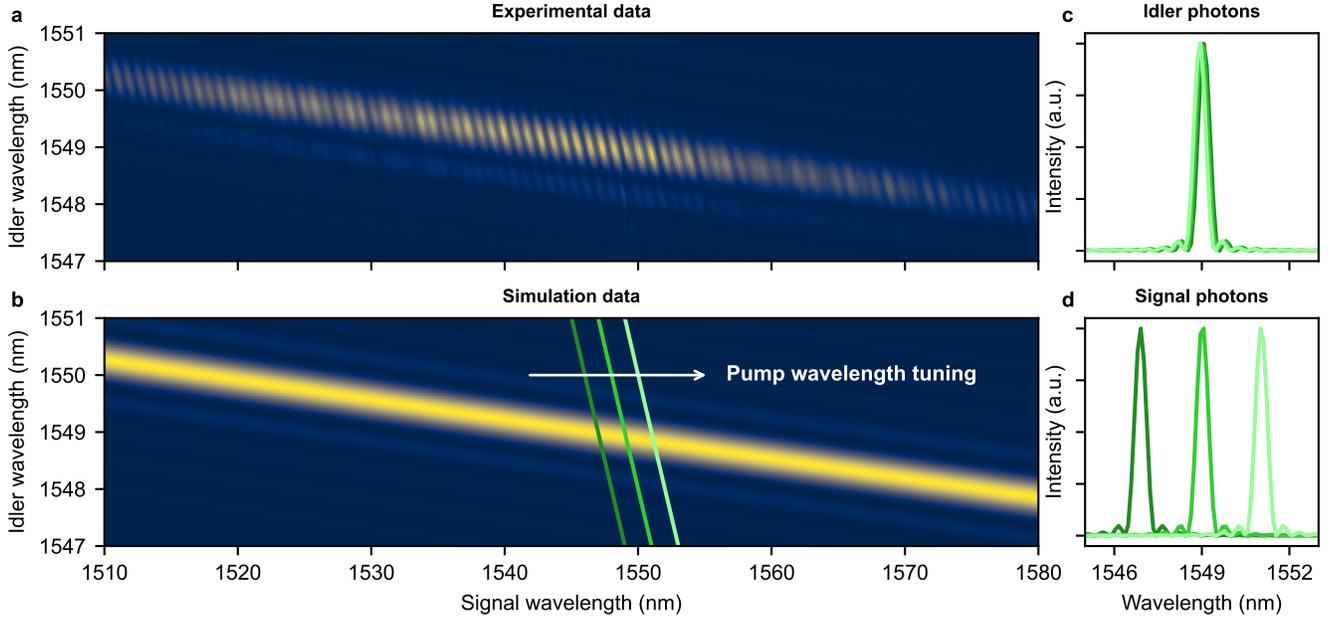


图 2. 相位匹配函数特性分析。a, 实验测量的和频生成光谱。b, 模拟的 SFG 光谱, 叠加了三条不同的连续波泵浦波长对应的能量守恒线。c, 从三个不同泵浦波长中恢复出的闲频光子光谱, 显示变化最小。d, 相应的信号光子光谱, 显示出对泵浦波长有较强的依赖性。

的讨论, 请参见补充信息。图 1g 展示了制作前的双光子显微镜图像。图 1h 显示了制造出的波导的扫描电子显微镜图像。反转区域由于电信号对比度而清晰可见。

我们首先通过测量和频生成的相位匹配函数 (PMF) 来表征光源。两个可调谐激光器, 在接近 1550 nm 处工作, 通过与信号模式和闲频模式对应的光栅耦合器耦合到设备中。它们的非线性相互作用在泵浦波长处产生光, 并使用硅光电探测器进行检测。通过对输入波长进行光栅扫描, 我们绘制出 PMF。实验测量的结果显示在图 2a 中, 并与图 2b 中的模拟 PMF 很好地吻合。图案中观察到的微小振荡归因于设备内 775 nm 光反射引起的弱法布里-珀罗共振。

### B. 连续波泵浦制度

在连续波 (CW) 泵浦下, 反向传播的光源展现出独特的光谱特性。在图 2b 中, 三条绿色线代表不同泵浦波长的能量守恒。通过将相位匹配函数和泵浦场的乘积 (即能量守恒线) 投影到信号或闲频轴上, 我们可以恢复生成的光子各自的光谱强度分布。由于 PMF 斜率平缓, 闲频光子的光谱几乎不随泵浦调谐而变化 (图

2c), 而信号光谱对泵浦波长表现出强烈的敏感性 (图 2d)。这种不对称性预示着有前途的应用: 闲频光子可以保持固定在电信 C 带内, 而信号可以通过调谐光谱来与不同的系统接口。通过仔细调整泵浦波长, 可以控制信号和闲频光子之间的光谱重叠程度, 使它们的发射既可以是不可区分的也可以是可以区分的。

Hong - Ou - Mandel (HOM) 实验涉及单一光源产生不可区分的光子。通过改变光子之间的时间偏移, 可以观察到诸如光子聚束 [30] 等干涉效应。在我们的案例中, 我们使用反向传播的片上源来生成信号和闲频光子, 并且这些光子与一个离芯片分束器发生干涉, 如图 3c 所示意。为了改变时间偏移, 我们使用光纤耦合光学延迟线通过调整长度改变闲频光子的路径。我们的实验中, 光子对率是 20 kHz, 在泵浦功率为 7 mW 时测量到的符合与偶然比率为 3000。

为了观察 HOM 干涉, 首先将泵浦波长调至信号光子和闲频光子在谱上无法区分的值。这个最优条件可以从图 2a 中的 SFG 图谱中识别出来。鉴于光子具有 sinc 形的谱轮廓, 我们预期会出现三角形的 HOM 凹陷, 如模拟所示 (图 3b) [31]。实验观测到的凹陷呈现在图 3a 中, 其可见度为  $(87.3 \pm 0.6)\%$ 。与理想凹

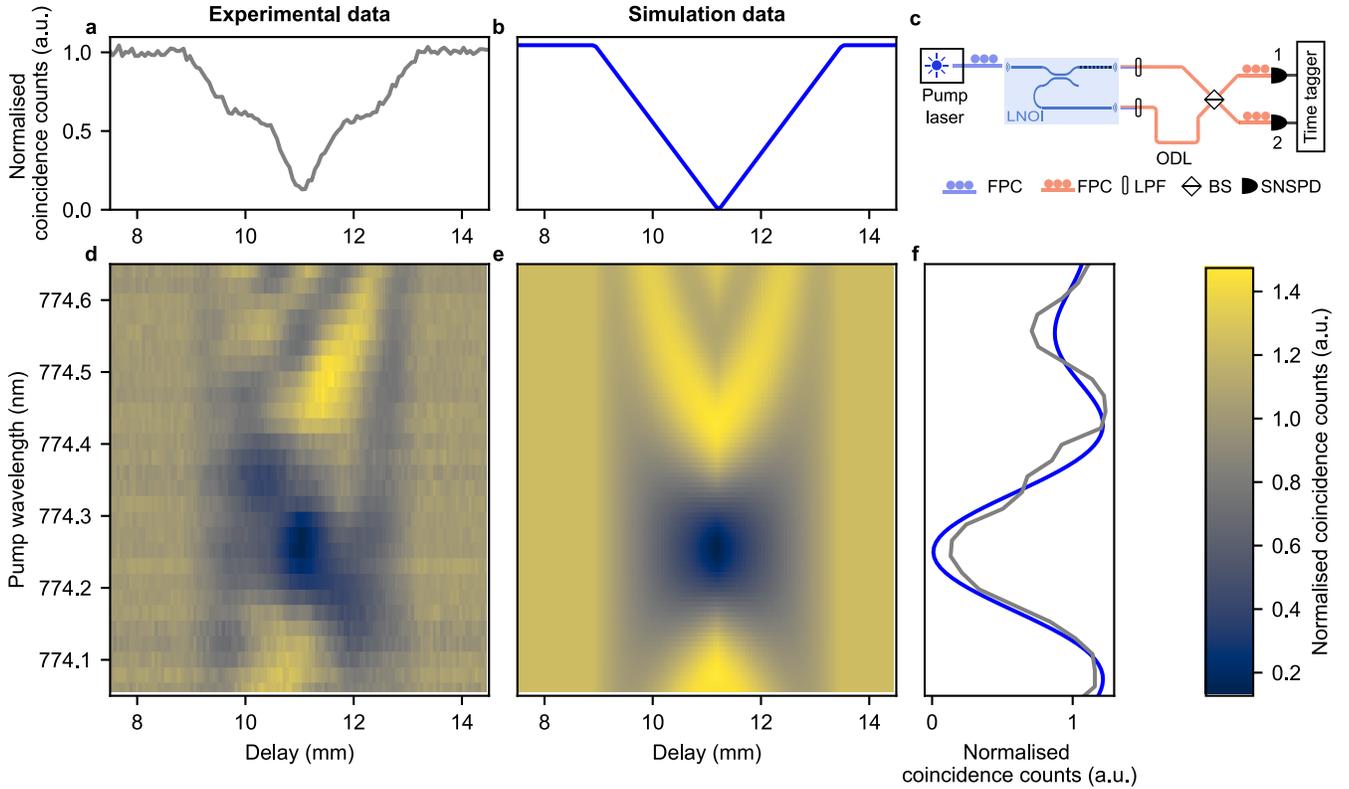


图 3. Hong-Ou-Mandel 干涉在时域和频域中的表现。a, 在泵浦波长下测量的 HOM 干涉图样, 此时信号光子和闲频光子不可区分。b, 理想系统中的预期 HOM 凹陷。c, 测量设置示意图。一个可调连续波激光器通过光纤偏振控制器 (FPC) 耦合到芯片上。生成的信号光子和闲频光子从芯片中输出; 闲频光子通过一个可调光学延迟线 (ODL)。两个光子在分束器 (BS) 上干涉, 并由超导纳米线单光子探测器 (SNSPDs) 检测, 使用时间标签记录同时事件。对于每个泵浦波长, 通过改变光子延迟来测量 HOM 干涉图样, 结果得到如 d 所示的实验映射和对应的理论映射在 e 中。f, 通过在零时间延迟处切片 d 和 e 获得的 HOM 干涉光谱域投影 (11 mm)。仿真结果用蓝色绘制, 测量结果用灰色表示。

陷形状的偏差归因于光源中的光谱缺陷, 这可能是由于电极化周期的微小变化引起的。有限的可见度也可以通过与衍射耦合器相关的反射效应来解释 (参见补充信息)。不仅可以通过时间作为调节旋钮来控制不可区分性, 而且还可以在频率域内进行调整, 方法是保持时延固定的同时改变泵浦波长。光谱调谐背后的原理利用了图 2b - d 所示的效果。这种聚束现象源于信号谱的变化, 而闲频则保持不变。我们以 HOM 干涉的二维图为形式展示这一测量结果, 其中纵轴为泵浦波长, 横轴为闲频路径延迟。对于每个泵浦波长, 都会测量一个归一化的 HOM 凹陷。通过在零延迟处提取垂直切片 (在这种情况下 11 mm), 我们获得频率空间中的 HOM 凹陷。测量的干涉图谱显示在图 3 d 中, 并与图 3e 中的模拟图谱进行了比较。干涉图案中的不对称性表明了电极化中存在的残留缺陷, 这些缺陷影

响了光子的频谱对称性。实验数据和模拟数据对应的频谱切片绘制在图 3 f 中。在这种情况下, HOM 凹陷呈现出类似 sinc 的轮廓, 这与时间延迟域观察到的三角形凹陷形成了对比。我们报告了这两种测量结果相同的可见度 ( $87.3 \pm 0.6$  %), 因为它们对应于通过图谱同一中心区域的投影。我们注意到, 无论是测量还是模拟的归一化重合图谱在某些位置都显示出超过 1 的值。高于 1 的值表明了反聚束行为, 在这种情况下, 光子从分束器不同端口射出的概率比随机分裂所预期的更高。在这种归一化中, 1 对应的值代表经典的随机分裂, 而 0 则表示在分束器处完美的光子聚束。高于 1 的值也在类似帽形的光谱中报告过, 通常是由带通滤波造成的, 在这种情况下, HOM 凹陷遵循一个 sinc 形状 [32]。

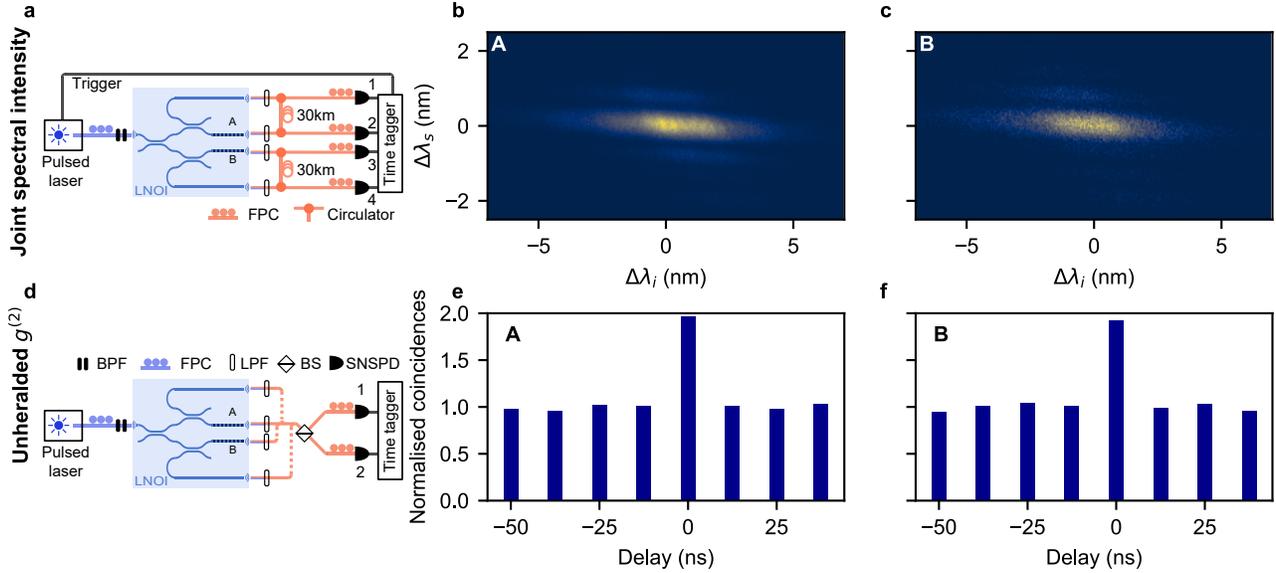


图 4. 联合光谱强度测量和非伴随的  $g^{(2)}$  分析。a, 用于测量联合光谱强度 (JSI) 的实验装置。一个在 775 nm 处的脉冲激光, 其光谱带宽为 1.1 nm, 耦合到芯片上。信号和闲频光子通过一个 30 km 色散模块, 并记录它们的到达时间以重建 JSI。b, c, 分别为源 A 和 B 测量的 JSIs。d, 未预告  $g^{(2)}$  测量的设置, 其中仅通过平衡分束器和两个探测器分析信号 (或闲频) 光子。e, f, 分别基于未预告  $g^{(2)}$  测量提取源 A 和 B 的纯度, 报告值分别为  $(96 \pm 4) \%$  和  $(92 \pm 3) \%$ 。缩略语: FPC, 光纤偏振控制器; BPF, 带通滤波器; LPF, 低通滤波器; BS, 分束器; SNSPD, 超导纳米线单光子探测器。

### C. 脉冲泵运行模式

如上所述, 在连续波操作下, 该光源表现出有前景的性能。然而, 其主要优势之一是可以产生信标单光子。在下文中, 我们利用三种互补方法研究该光源的纯度和光谱特性。对于这些测量, 我们使用了一台工作在重复频率为 80 MHz、中心波长位于 774 nm 的锁模钛宝石激光器, 并通过光谱滤波将其带宽限制到 1.1 nm。该装置的详细信息在方法部分中进行了描述。我们通过测量两个片上独立光源的联合光谱强度 (JSI)、未信标的二阶相关函数  $g^{(2)}$ , 以及最终在双源信标韩-欧曼德尔实验中的不可区分性来表征这些光源。

量化光谱纯度的第一种方法基于测量的联合光谱强度。由于此测量不涉及相位信息, 计算出的纯度仅反映了幅度相关性。使用激光的触发信号和连接到时间标签器的两个单光子探测器来测量 JSI。为了获得光谱分辨率, 信号光子和闲频光子通过环形器和相当于 30 km 光纤长度的色散模块 (图 4a)。触发提供了一个时间参考点, 并且利用已知的色散剖面将光子相对到达时间转换为波长。两个光源的 JSI 结果如图 4b 和 c 所示。请注意, 绝对中心波长无法从此次测量中获取, 而

是通过之前测量的 SFG 谱推断得出。我们分别计算出 A 源和 B 源的纯度值为 83.1% 和 84.5%。纯度值是通过从测量 JSI 提取的 JSA 应用奇异值分解来计算的。

第二种方法涉及直接测量未预告的二阶相关函数  $g^{(2)}$ 。使用相同的泵浦配置, 我们隔离其中一个光源并仅收集闲频光子 (图 4d)。一个平衡定向耦合器将光子流分成两个探测器, 并记录重合直方图。中心峰反映了光子统计, 而侧峰被归一化为单位。更高的中央峰值对应于更高的纯度。我们在来自 A 和 B 光源的闲频光子上进行了这项测量。结果如图 4e - f 所示, 分别得到纯度为  $(96 \pm 4) \%$  和  $(92 \pm 3) \%$ 。JSI 测量值与  $g^{(2)}$  测量值之间的差异归因于 JSI 技术有限的光谱范围中的不确定性和相关性测量中潜在的噪声。该实验在一个非简并配置下进行, 因为输出衍射光栅耦合器上的小反射可能导致信号光子从闲频端口逸出, 在连续波泵浦状态下已经观察到了这一点。为了抑制任何虚假的信号光子, 我们引入了一个中心频率在 1550 nm 的 12 nm 带通滤波器。

在最终的表征步骤中, 我们同时操作芯片上的两个集成光源以展示它们之间的相互干涉。泵浦准备按照之前描述的方式进行, 使用平均功率为 2 mW。信

号光子和闲频光子都从片外收集，并通过预告信号或闲频光子来研究干涉现象。相应的预告的闲频或信号光子经过一个光学延时线并通过平衡光纤定向耦合器发生干涉。干涉光子使用两个单光子探测器进行检测，而预告光子则在另一对单独的探测器上进行监控。通过扫描光学延时线并记录四重符合数，我们提取了两种情况下的 Hong - Ou - Mandel (HOM) 干涉峰谷。实验装置如图 5a 所示。

图 5 b 和图 5 c 分别显示了闲置光子对和信号光子对的测量和模拟 HOM 陷波。我们观察到闲置光子对的可见度为  $(46 \pm 6)\%$ ，而信号光子对的可见度为  $(71 \pm 3)\%$ ，而仿真预测的最大可见度为 88%。值得注意的是，信号光子对与闲置光子对之间的可见度差异已经在模拟中出现，并且通过实验得到了证实。闲置光子可见度降低的原因是两个光源之间相位匹配条件不一致。具体来说，A 源的相位匹配函数相对于 B 源略有偏移，这特别影响了闲置光子谱。正如图 2 所示，信号光谱紧密跟随泵浦波长和带宽，而闲置光谱则更强烈地由周期调制决定。在其中一个光源附近引入局部加热器可以通过精细调整有效折射率并因此调整相位匹配条件来补偿这些差异，从而平衡光谱特性并提高干涉可见度。

### 讨论与结论

在这项工作中，我们基于反向传播光子对源 [20, 26] 的潜在优良特性，并且据我们所知，展示了此类光源的首个集成实现。为了表征其独特特征，我们进行了和频生成测量，揭示了相位匹配函数的不同行为：虽然闲置光子表现出与泵浦波长相关的调谐性，信号光子则保持光谱稳定性。这种光谱行为上的不对称性为光谱工程和混合量子系统开辟了新的机遇。

此外，我们通过在时域和频域进行 Hong - Ou - Mandel (HOM) 干涉测量验证了信号光子和闲散光子的高度不可区分性。两个光子中的一个的可调谐频率使得能够展示出超越传统基于时间延迟方法的 HOM 干涉，其可见度为  $(87.3 \pm 0.6)\%$ ，突显了一个额外的控制维度。

为了进一步研究光谱特性，我们测量了同一芯片上两个独立光源的联合光谱强度 (JSI)，首次对一个集成反向传播平台进行了这种表征。从 JSI 中提取的

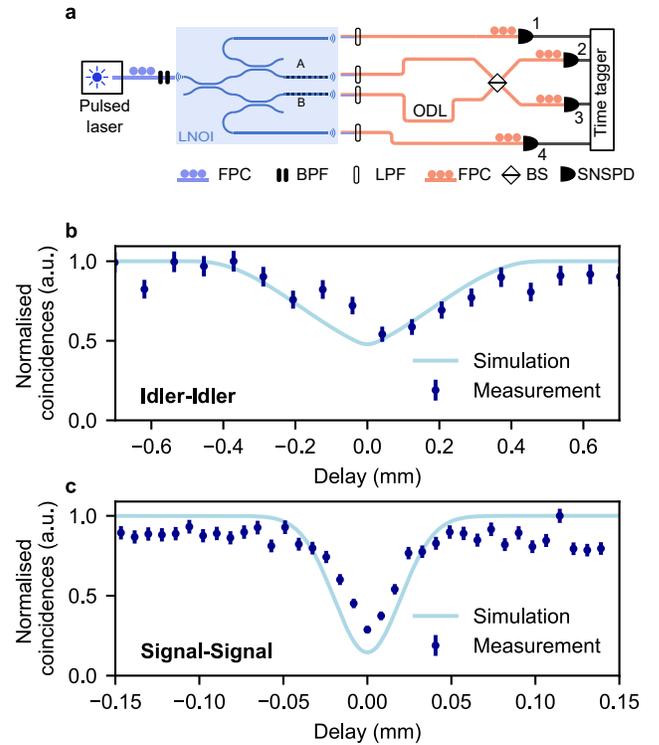


图 5. 受 heralded 两源 Hong-Ou-Mandel 干涉。a, 芯片上两个独立光源产生的信号-信号或闲频-闲频光子对之间的受实验 Hong-Ou-Mandel (HOM) 干涉实验设置。光纤偏振控制器 (FPC) 准备泵浦，将其耦合到芯片上。信号和闲频光子通过带通滤波器 (BPF) 和低通滤波器 (LPF) 进行分离和过滤，并通过平衡分束器 (BS) 引导以产生干涉。使用超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 测量符合计数。b, 受验闲频-闲频情况的 HOM 干涉谷：测量数据 (深蓝色) 和相应的仿真结果 (浅蓝色)。c, 受验信号-信号情况的 HOM 干涉谷：测量数据 (深蓝色) 和仿真结果 (浅蓝色)。

纯度分别为 83.1% 和 84.5%。这些值通过无预告的  $g^{(2)}$  测量得到了独立确认，结果相似并支持了生成光子的高光谱纯度。

最后，我们利用这两个光源展示了信号光子和闲频光子之间的受 heralded 控制的 Hong - Ou - Mandel 干涉。观测到的  $(71 \pm 3)\%$  的可见度凸显了该光源在量子干涉实验中的适用性，并为基于反向传播几何结构的集成多光子量子光学铺平了道路。

总之，我们的工作建立了反向传播集成光源作为高纯度量子光子学的强大且可调平台，具有在量子干涉和纠缠实验中的直接应用，并且对于可扩展的量子光子网络有着光明的前景。展望未来，在 400 nm 附近

实施这种类型的源可能通过一次阶极化实现显著更高的效率并减少泵浦功率需求。此外，集成反向传播的成功演示为更先进的片上设备提供了基础，例如由连续波光源泵浦的无镜光学参量振荡器或用于量子传感应用的双模压缩机。

## 方法

**设备制造。**电路是通过 LNOI 平台实现的，使用了一层厚度为 300 nm 的 5% 掺镁铌酸锂 (LN) 薄膜，并且有一层 2  $\mu\text{m}$  厚的埋氧化物。周期性极化在波导蚀刻之前完成，使用了用于高压脉冲应用的 100 nm 厚的钛电极。这些电极通过电子束光刻 (EBL)、电子束蒸发和剥离来成型。在极化过程中，将一种用作电气绝缘层的光致抗蚀剂施加到芯片上。去除光致抗蚀剂和极化电极后，使用另一步骤的 EBL 将波导图案化到 FOX16 掩模中。薄膜通过 ICP-RIE[33] 过程中的氩离子蚀刻 200 nm 进行蚀刻。在蚀刻过程中重新沉积的铌酸锂通过 RCA-SC1 清洗步骤去除，随后用 BHF 浸渍以去除剩余的掩模。

**实验设置。**脉冲泵浦激光器是相干变色龙超频，重复频率为 80 MHz，带宽为 8 nm。通过两个级联的带通滤波器 (Thorlabs FBH780-10) 将其光谱过滤到 1.1 nm。激光使用准直仪和半波片设置偏振耦合到保持偏振 (PM) 光纤中。通过将单模光纤在适当的角对接在光栅耦合器上方，实现输入耦合。对于输出耦合，使用了光纤阵列 (Oz Optics)。PM 长通滤波器 (Oz Optics) 放置在芯片后以去除残留的泵浦光。为了确保光子和探测器之间的偏振匹配，在每个超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 前都放置了光纤偏振控制器 (FPCs)。八通道 SNSPD 系统由 Single Quantum 提供。检测事件使用 Swabian Ultra 时间标签记录。对于 Hong-Ou-Mandel 实验，采用光纤分束器 (Thorlabs PN1550R5A2) 进行干涉。对于联合光谱强度测量，采用了相当于 30 km 光纤的色散模块 (Tellabs 82.71532-30-R5)。

## 作者贡献

J.K. 和 A.S. 同等地为这项工作做出了贡献。J.K.、A.S. 和 R.J.C. 提出了这个想法。A.S. 和 J.K. 设计了

芯片。A.S. 制备了样品并进行了器件级的表征。J.K. 进行了光学表征和光学测量，得到了 T.K. 的输入。手稿由 J.K. 和 A.S. 撰写，并得到所有作者的贡献。R.G. 监督了这个项目。

## 竞争利益

作者声明没有竞争性的财务或非财务利益。

## ACKNOWLEDGMENTS

我们感谢苏黎世联邦理工学院和 IBM Ruschlikon 的光学与电子显微镜科学中心 ScopeM 以及洁净室设施 BRNC 和 FIRST 对我们样品制作和表征的支持。R.J.C. 感谢瑞士国家科学基金会通过 Ambizione 奖学金计划 (项目编号 208707) 提供的支持。R.G. 感谢欧洲空间局 (项目编号 4000137426 和 4000136423)、瑞士国家科学基金会通过 Bridge 计划 (项目编号 194693) 以及 Sinergia 计划 (项目编号 CRSII5 206008) 提供的支持。我们感谢 Chiprin Costea 对一些初步实验的贡献。

## 数据可用性声明

支持本研究发现的数据在文章和补充材料中均可获得。原始数据和分析代码可根据合理请求从通讯作者处获取。

- 
- [1] M. D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, and S. V. Polyakov, Invited review article: Single-photon sources and detectors, *Review of Scientific Instruments* **82**, 071101 (2011).
- [2] W. H. Louisell, A. Yariv, and A. E. Siegman, Quantum fluctuations and noise in parametric processes. i., *Phys. Rev.* **124**, 1646 (1961).
- [3] D. C. Burnham and D. L. Weinberg, Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 84 (1970).
- [4] C. H. Bennett and G. Brassard, Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing, *Theoretical Computer Science* **560**, 7 – 11 (2014).
- [5] C. S. Hamilton, R. Kruse, L. Sansoni, S. Barkhofen, C. Silberhorn, and I. Jex, Gaussian boson sampling, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 170501 (2017).
- [6] A. J. A. B. e. a. Aasi, J., Enhanced sensitivity of the ligo gravitational wave detector by using squeezed states of light, *Nature Photonics* **7**, 613 – 619 (2013).
- [7] D. C. Burnham and D. L. Weinberg, Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 84 (1970).
- [8] R. G. Smith, K. Nassau, and M. F. Galvin, Efficient continuous optical second-harmonic generation, *Applied Physics Letters* **7**, 256 (1965).
- [9] D. S. Hum and M. M. Fejer, Quasi-phasematching, *Comptes Rendus. Physique* **8**, 180 (2007).
- [10] R. V. Schmidt and I. P. Kaminow, Metal-diffused optical waveguides in linbo3, *Applied Physics Letters* **25**, 458 (1974).
- [11] J. Webjorn, F. Laurell, and G. Arvidsson, Fabrication of periodically domain-inverted channel waveguides in lithium niobate for second harmonic generation, *Journal of Lightwave Technology* **7**, 1597 – 1600 (1989).
- [12] P. Rabiei and P. Gunter, Optical and electro-optical properties of submicrometer lithium niobate slab waveguides prepared by crystal ion slicing and wafer bonding, *Applied Physics Letters* **85**, 4603 (2004).
- [13] A. Boes, L. Chang, C. Langrock, M. Yu, M. Zhang, Q. Lin, M. Lončar, M. Fejer, J. Bowers, and A. Mitchell, Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum, *Science* **379**, 10.1126/science.abj4396 (2023).
- [14] J. Lu, J. B. Surya, X. Liu, A. W. Bruch, Z. Gong, Y. Xu, and H. X. Tang, Periodically poled thin-film lithium niobate microring resonators with a second-harmonic generation efficiency of 250,000%/w, *Optica* **6**, 1455 (2019).
- [15] C. Wang, M. Zhang, X. Chen, M. Bertrand, A. Shams-Ansari, S. Chandrasekhar, P. Winzer, and M. Lončar, Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at cmos-compatible voltages, *Nature* **562**, 101 (2018).
- [16] M. Reig Escalé, F. Kaufmann, H. Jiang, D. Pohl, and R. Grange, Generation of 280 thz-spanning near-ultraviolet light in lithium niobate-on-insulator waveguides with sub-100 pj pulses, *APL Photonics* **5**, 121301 (2020).
- [17] F. Graffitti, J. Kelly-Massicotte, A. Fedrizzi, and A. M. Brańczyk, Design considerations for high-purity heralded single-photon sources, *Phys. Rev. A* **98**, 053811 (2018).
- [18] P. J. Mosley, J. S. Lundeen, B. J. Smith, P. Wasylczyk, A. B. U'Ren, C. Silberhorn, and I. A. Walmsley, Heralded generation of ultrafast single photons in pure quantum states, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 133601 (2008).
- [19] J. Zhao, C. Ma, M. Rüsing, and S. Mookherjea, High quality entangled photon pair generation in periodically poled thin-film lithium niobate waveguides, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 163603 (2020).
- [20] K.-H. Luo, V. Ansari, M. Massaro, M. Santandrea, C. Eigner, R. Ricken, H. Herrmann, and C. Silberhorn, Counter-propagating photon pair generation in a nonlinear waveguide, **28**, 3215.
- [21] C. J. Xin, J. Mishra, C. Chen, D. Zhu, A. Shams-Ansari, C. Langrock, N. Sinclair, F. N. C. Wong, M. M. Fejer, and M. Lončar, Spectrally separable photon-pair generation in dispersion engineered thin-film lithium niobate, **47**, 2830, publisher: Optica Publishing Group.
- [22] T. Kuttner, A. Sabatti, J. Kellner, R. Grange, and R. J. Chapman, Scalable quantum interference in integrated lithium niobate nanophotonics (2025), arXiv:2506.20519 [quant-ph].
- [23] E. Meyer-Scott, N. Montaut, J. Tiedau, L. Sansoni, H. Herrmann, T. J. Bartley, and C. Silberhorn, Limits on the heralding efficiencies and spectral purities of spectrally filtered single photons from photon-pair sources, *Phys. Rev. A* **95**, 061803 (2017).
- [24] M. C. Booth, M. Atatüre, G. Di Giuseppe, B. E. A. Saleh, A. V. Sergienko, and M. C. Teich, Counterpropagating entangled photons from a waveguide with periodic nonlinearity, *Phys. Rev. A* **66**, 023815 (2002).

- [25] Y.-C. Liu, D.-J. Guo, K.-Q. Ren, R. Yang, M. Shang, W. Zhou, X. Li, C.-W. Sun, P. Xu, Z. Xie, *et al.*, Observation of frequency-uncorrelated photon pairs generated by counter-propagating spontaneous parametric down-conversion, *Scientific Reports* **11**, 12628 (2021).
- [26] C. Canalias and V. Pasiskevicius, Mirrorless optical parametric oscillator, **1**, 459, publisher: Nature Publishing Group.
- [27] I. Z. Latypov, A. A. Shukhin, D. Akat'ev, A. V. Shkallikov, and A. A. Kalachev, Backward-wave spontaneous parametric down-conversion in a periodically poled ktp waveguide, *Quantum Electronics* **47**, 827 (2017).
- [28] F. Yang, J. Lu, M. Shen, G. Yang, and H. X. Tang, Symmetric second-harmonic generation in sub-wavelength periodically poled thin film lithium niobate, **11**, 1050.
- [29] M. Houe and P. D. Townsend, An introduction to methods of periodic poling for second-harmonic generation, *Journal of Physics D: Applied Physics* **28**, 1747 (1995).
- [30] C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference, **59**, 2044.
- [31] A. M. Brańczyk, Hong-ou-mandel interference.
- [32] A. Maeder, G. Finco, F. Kaufmann, A. Sabatti, J. Kellner, R. J. Chapman, and R. Grange, On-chip tunable quantum interference in a lithium niobate-on-insulator photonic integrated circuit, *Quantum Science and Technology* **9**, 035040 (2024).
- [33] F. Kaufmann, G. Finco, A. Maeder, and R. Grange, Redeposition-free inductively-coupled plasma etching of lithium niobate for integrated photonics, *Nanophotonics* **12**, 1601 (2023).
- [34] R. Ghosh, C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, Interference of two photons in parametric down conversion, **34**, 3962.
- [35] P. S. Kuo, D. V. Reddy, V. Verma, S. W. Nam, A. Zukauskas, and C. Canalias, Photon-pair production and frequency translation using backward-wave spontaneous parametric downconversion, **1**, 43.
- [36] A. Gatti, T. Corti, and E. Brambilla, Temporal coherence and correlation of counterpropagating twin photons, **92**, 053809.
- [37] A. Christ, A. Eckstein, P. J. Mosley, and C. Silberhorn, Pure single photon generation by type-i PDC with backward-wave amplification, .
- [38] Y.-C. Liu, D.-J. Guo, K.-Q. Ren, R. Yang, M. Shang, W. Zhou, X. Li, C.-W. Sun, P. Xu, Z. Xie, Y.-X. Gong, and S.-N. Zhu, Observation of frequency-uncorrelated photon pairs generated by counter-propagating spontaneous parametric down-conversion, **11**, 12628 ().
- [39] M.-Y. Gao, Y.-H. Li, Z.-Q.-Z. Han, Q. Zhou, G.-C. Guo, Z.-Y. Zhou, and B.-S. Shi, Polarization entanglement by two simultaneous backward phase-matching processes in a single crystal, **21**, 034029 ().
- [40] P. Mutter, F. Laurell, V. Pasiskevicius, and A. Zukauskas, Backward wave optical parametric oscillation in a waveguide, **1**, 38.
- [41] Y.-C. Liu, D.-J. Guo, R. Yang, C.-W. Sun, J.-C. Duan, Y.-X. Gong, Z. Xie, and S.-N. Zhu, Narrowband photonic quantum entanglement with counterpropagating domain engineering, **9**, 1998 ().
- [42] M.-Y. Gao, Y.-H. Li, Z. Ge, S.-J. Niu, G.-C. Guo, Z.-Y. Zhou, and B.-S. Shi, Observing multiple processes of backward-phase-matching spontaneous parametric downconversion in a single-periodic crystal, **48**, 3953 ().
- [43] J.-C. Duan, J.-N. Zhang, Y.-J. Zhu, C.-W. Sun, Y.-C. Liu, P. Xu, Z. Xie, Y.-X. Gong, and S.-N. Zhu, Generation of narrowband counterpropagating polarization-entangled photon pairs based on thin-film lithium niobate on insulator, **37**, 2139.
- [44] X. Guo, C.-l. Zou, C. Schuck, H. Jung, R. Cheng, and H. X. Tang, Parametric down-conversion photon-pair source on a nanophotonic chip, **6**, e16249.
- [45] R.-B. Jin, T. Gerrits, M. Fujiwara, R. Wakabayashi, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, R. Shimizu, M. Takeoka, and M. Sasaki, Spectrally resolved hong-ou-mandel interference between independent photon sources, **23**, 28836.
- [46] S. Mundhra, E. Sendonaris, R. M. Gray, J. Williams, and A. Marandi, Optimizing for a near single-mode type-0 optical parametric amplifier in nanophotonics.
- [47] Y.-C. Liu, D.-J. Guo, R. Yang, C.-W. Sun, J.-C. Duan, Y.-X. Gong, Z. Xie, and S.-N. Zhu, Narrowband photonic quantum entanglement with counterpropagating domain engineering, *Photon. Res.* **9**, 1998 (2021).