



光量子芯片中级联移相器的快速标定方法

邢泽宇 李志浩 冯田峰 周晓祺

High-speed calibration method for cascaded phase shifters in integrated quantum photonic chips

Xing Ze-Yu Li Zhi-Hao Feng Tian-Feng Zhou Xiao-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 184207 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210401

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210401>

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

基于级联四波混频过程的量子导引

Quantum steering based on cascaded four-wave mixing processes

物理学报. 2021, 70(16): 160301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201981>

飞秒激光直写光量子逻辑门

Femtosecond laser direct writing of optical quantum logic gates

物理学报. 2019, 68(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190024>

级联四波混频系统中纠缠增强的量子操控

Quantum manipulation of entanglement enhancement in cascaded four-wave-mixing process

物理学报. 2019, 68(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181837>

基于同步光解的OH自由基标定方法

Calibration source for OH radical based on synchronous photolysis

物理学报. 2020, 69(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200153>

级联四波混频相干反馈控制系统量子纠缠特性

Quantum entanglement in coherent feedback system based on the cascaded four wave mixing processes

物理学报. 2020, 69(13): 130301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200042>

基于单个量子级联激光器的大气多组分测量方法

Detection of atmospheric multi-component based on a single quantum cascade laser

物理学报. 2017, 66(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.094203>

光量子芯片中级联移相器的快速标定方法*

邢泽宇 李志浩 冯田峰 周晓祺†

(中山大学物理学院, 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510006)

(2021年3月2日收到; 2021年4月15日收到修改稿)

集成光学技术在光量子信息处理等新兴技术有着重要的应用. 相比于分立光学, 集成光学技术具有体积小、成本低、稳定性好以及易操控的优势. 然而, 随着集成光量子芯片线路的复杂程度和规模的增加, 对芯片上的移相器, 比如级联马赫-曾德尔干涉仪中的相移器的标定, 将会成为一个棘手的问题. 传统的级联马赫-曾德尔干涉仪的移相器标定时间是随着级联个数的增加而指数增加的, 目前所报道实现的最大级联个数仅为5个移相器. 本文针对上述问题, 提出了一种高效的标定方法. 使用该方法对级联马赫-曾德尔干涉仪移相器的标定时间只随移相器数量线性增长, 相比于传统方法实现了指数级的加速. 本文在计算机上模拟了20个级联马赫-曾德尔干涉仪移相器的标定, 结果显示保真度都大于99.8%, 从而验证了该标定方法的有效性. 本工作有望应用于光量子信息处理与光计算等方面.

关键词: 光量子芯片, 级联移相器, 标定方法

PACS: 42.82.-m, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.70.20210401

1 引言

量子信息技术已经被证明相比于经典技术在通信^[1-5]、计算^[6-11]和模拟^[12,13]等方面具有优势, 比如量子密钥分发在理论上可以实现通信的无条件安全^[5], Shor算法可以破解目前的RSA加密算法^[10], Grover算法可以实现对无序搜索的提速^[11]. 目前, 主流的量子系统有超导^[14,15]、离子阱^[16]和光子^[4,17-31]等, 其中光子系统具有相干性好、速度快和不易与环境相互作用等优势, 是有潜力实现大规模量子信息处理的物理系统之一. 过去光子系统主要以分立光学实现为主^[4,17-22], 然而分立光学系统尺寸大、稳定性差、光路搭建复杂, 不具备良好的可扩展性. 与之相对, 集成光学^[23-31]具有体积小、成本低、稳定性好、易于操作和可扩展性高等优点, 有效地解决了分立光学的问题.

近年来, 集成量子光学技术发展极为迅速. 2008

年布里斯托尔大学研究团队^[23]制备了第1个集成光量子芯片, 可在片上实现两比特的量子逻辑门. 2011年该团队^[24]制备了可重构的集成光量子芯片, 实现了片上纠缠态的产生、操控. 2018年, 布里斯托尔大学联合中山大学研究团队^[25]制备了可实现任意两量子比特操作的光量子处理器. 同年, 布里斯托尔大学和北京大学合作在芯片上实现了集成接近一千个组件的可编程光量子芯片^[26]. 2019年, 加利福尼亚大学伯克利分校团队^[27]实现了芯片上集成57600个光开关. 随着集成度的进一步提升, 在光量子芯片上集成的组件有望超过一百万^[28].

随着光量子芯片复杂度的提高、集成组件数目的增加, 对片上移相器的相位标定成为1个亟待解决的问题. 例如, 图1(a)展示的是1个实现任意 6×6 的幺正变换的芯片结构^[31], 图1(b)则展示的是1个可以实现任意两比特量子操作的芯片结构^[25]. 这些芯片在工作前都需要对其中所有的移相器相位进行标定, 即找到移相器相位与施加在其上的

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0305200, 2016YFA0301700) 和广东省重点领域研发计划 (批准号: 2018B030329001, 2018B030325001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouxq8@mail.sysu.edu.cn

电压或电流之间的函数关系. 图 1(a) 的 Reck scheme 结构 [32] 虽然看起来比较复杂, 但是可按照一定的顺序依次标定, 实现不同移相器之间的解耦, 从而完成芯片的移相器标定. 与图 1(a) 相比, 图 1(b) 的芯片中存在两路波导间级联的 3 个马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 共 5 个移相器的结构, 无法实现移相器之间的解耦. 文献 [25] 使用的是暴力拟合的方法进行标定, 即每个移相器取 10 种电流, 共 10^5 种电流组合, 得到 10^5 种输出结果并进行强行拟合. 很明显, 随着级联移相器数目的增加, 使用这种方法进行标定所耗费的时间和资源都随指数增长, 完全不具备可扩展性. 针对该问题, 本文提出了一种新型的标定方法, 耗费的资源只随级联移相器数目 N 线性增长, 可以实现对如图 2 所示的包含任意多个级联移相器的芯片进行标定. 使用该方法, 我们成功地模拟了对级联 20 个移相器的芯片结构的标定, 结果显示保真度都大于 99.8%, 验证了该方法的有效性. 本文工作有望应用在光量子信息处理与光计算等方面.

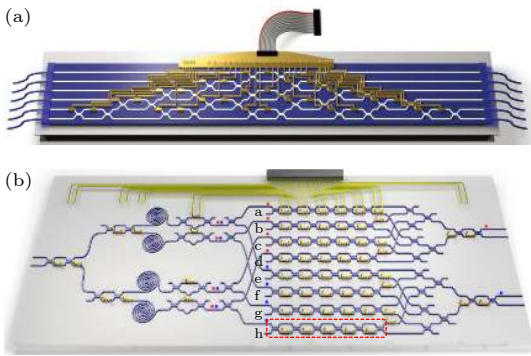


图 1 (a) 使用 Reck Scheme 构造任意 6×6 幺正变换 [31]; (b) 实现任意两量子比特操作 [25]
Fig. 1. (a) Realization of 6×6 unitary using Reck Scheme [31]; (b) implementing arbitrary two-qubit processing [25].

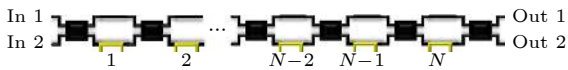


图 2 级联 N 个移相器的 2×2 光波导线路图
Fig. 2. 2×2 optical waveguide circuit of N -cascaded phase shifter.

2 标定方法

移相器是光量子芯片中的核心组件之一, 对芯片上的移相器进行相位标定是实现芯片运行的关键步骤. 在硅基芯片中, 通常是利用硅的热光效应 [33], 改变两路光波导中一路的折射率来实现移相器的相位调节. 目前常用的移相器种类有掺杂硅

移相器 [34]、p-i-n 移相器 [35] 和金属电热移相器 [36], 以及最近出现的硅基铈酸锂混合移相器 [37]. 这里以金属电热移相器为例来介绍我们的标定方法, 对其他种类移相器标定的方法与之类似.

2.1 金属电热移相器的电学特性

标定电热移相器的目的是找到移相器相位与施加在电热移相器上的电压或电流之间的关系. 下面, 具体分析电热移相器的标定过程. 首先, 需要扫描电热移相器电压, 找到电流-电压 ($I-V$) 的关系. 通常情况下, $I-V$ 曲线是一条直线, 可以用线性方程 $I = (V - \delta V) / R$ 来进行拟合, 其中 R 代表电热移相器的电阻, δV 代表电流为 0 mA 时的电压漂移. 这里存在电压漂移的原因在于, 实际所用的电压源并非理想电压源, 当测量电流为 0 mA 时测量电压不完全为 0 V. 这个电压漂移对于每个具体的移相器是固定的, 但是不同移相器的电压漂移并不相同.

由于电热移相器的工作原理是通过加热电阻改变光波导的折射率, 进而改变移相器的相位, 因此移相器的相位 θ 与电流 I 的关系可以表示为

$$\theta(I) = \gamma I^2 + \phi, \quad (1)$$

其中 γ 和 ϕ 就是移相器标定要确定的参数. 由芯片制备工艺的影响, 每个移相器的 γ 和 ϕ 往往是不一样的.

2.2 单个移相器的标定

如图 3 所示, 该芯片结构由两个多模干涉耦合器 (multimode interferometer, MMI) 和中间的移相器 (phase shifter, PS) 构成. MMI 的传输矩阵可以表示为

$$M_{\text{MMI}}[\eta] = \begin{pmatrix} \sqrt{\eta} & i\sqrt{1-\eta} \\ i\sqrt{1-\eta} & \sqrt{\eta} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

通常 η 设计为 0.5, 对应的 MMI 分光比为 50:50. 可以通过改变 MMI 的形状来改变 η 的值 [38]. 移相器的传输矩阵可以表示为

$$M_{\text{PS}}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

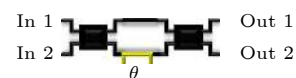


图 3 由单个移相器构成的 2×2 光波导线路图
Fig. 3. 2×2 optical waveguide circuit constructed by a single phase shifter.

光从输入端 In 1 入射, 输出态为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} O_{\text{Out1}} \\ O_{\text{Out2}} \end{pmatrix} &= M_{\text{MMI}}(0.5) \cdot M_{\text{PS}}(\theta) \cdot M_{\text{MMI}}(0.5) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 - e^{i\theta} \\ i(1 + e^{i\theta}) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Out 1 端的分束比 T 定义为 Out 1 端的输出功率与总输出功率的比值, 其与施加在移相器上的电流 I 的关系为

$$\begin{aligned} T &= O_{\text{Out1}} \cdot O_{\text{Out1}}^* \\ &= \frac{1}{2} [1 - \cos(\theta)] = \frac{1}{2} [1 - \cos(\gamma I^2 + \phi)]. \end{aligned} \quad (5)$$

扫描电流 I 并测量分束比 T , 对 T 和 I 进行非线性拟合即可得到 γ 和 ϕ , 从而完成对移相器的标定.

2.3 级联移相器的标定

下面讨论如何对如图 2 所示的是级联 N 个移相器 2×2 光波导线路进行标定. 本文方法的核心思想是将级联 N 个移相器的标定过程分解为多组两个移相器的联合扫描.

图 4(a) 展示的是光波导线路包含移相器 $N-1$ 和移相器 N 的部分, 我们的目标是要标定移相器 N , 即确定 γ_N 和 ϕ_N 的值. γ_N 的值可以很容易地确定. 通过扫描移相器 N 的电流 I_N 并测量相应的分束比 T 的值, 得到 $T-I_N^2$ 的关系曲线, 该曲线为周期性的余弦函数, 测量其周期即可推出 γ_N . 接下来确定 ϕ_N 的值.

$$\begin{aligned} |\psi_{\text{Out}}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta_N} \end{pmatrix} |\psi_N\rangle \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{N-1}) + ie^{i(\beta_{N-1} + \theta_{N-1})} \sin(\alpha_{N-1}) - e^{i\theta_N} \cos(\alpha_{N-1}) + ie^{i(\beta_{N-1} + \theta_{N-1} + \theta_N)} \sin(\alpha_{N-1}) \\ i \cos(\alpha_{N-1}) - e^{i(\beta_{N-1} + \theta_{N-1})} \sin(\alpha_{N-1}) + i \cos(\alpha_{N-1}) e^{i\theta_N} + e^{i(\beta_{N-1} + \theta_{N-1} + \theta_N)} \sin(\alpha_{N-1}) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 θ_N 为移相器 N 的相位, 由加载在移相器 N 上的电流决定. 输出端 Out1 测得的分束比 T 为

$$\begin{aligned} T &= O_{\text{Out1}} \cdot O_{\text{Out1}}^* \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\alpha_{N-1}) \cos(\theta_N) \\ &\quad - \frac{1}{2} \sin(2\alpha_{N-1}) \cos(\beta_{N-1} + \theta_{N-1}) \sin(\theta_N). \end{aligned} \quad (9)$$

如图 5 所示, 通过联合扫描 I_{N-1} 和 I_N , 寻找 T 的极小值, 可以得到两组 $T = 0$ 的结果, 即图 5 中的红色点, 分别对应:

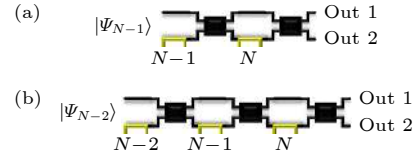


图 4 简化移相器标定方法示意图 (a) 级联扫描移相器 $N-1$ 和移相器 N ; (b) 级联扫描移相器 $N-2$ 和移相器 $N-1$

Fig. 4. Schematic diagram of the simplified phase shifter calibration method: (a) Two-dimensional (2D) scan of phase shifter $N-1$ and N ; (b) 2D scan of phase shifter $N-2$ and $N-1$.

这里把到达移相器 $N-1$ 前的量子态记为

$$|\psi_{N-1}\rangle = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{N-1}) \\ e^{i\beta_{N-1}} \sin(\alpha_{N-1}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 $\alpha_{N-1}, \beta_{N-1}$ 为 0 到 2π 间的相位. 移相器 $N-1$ 将实现么正变换 $M_{\text{PS}}(\theta_{N-1}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta_{N-1}} \end{pmatrix}$, 其中 θ_{N-1} 的值由加载在移相器 $N-1$ 上的电流 I_{N-1} 决定. 由此, 到达移相器 N 前的量子态 $|\psi_N\rangle$ 可以表示为

$$\begin{aligned} |\psi_N\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta_{N-1}} \end{pmatrix} |\psi_{N-1}\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{N-1}) \\ e^{i(\beta_{N-1} + \theta_{N-1})} \sin(\alpha_{N-1}) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

之后 $|\psi_N\rangle$ 再依次经过移相器 N 和 MMI, 从而在输出口得到量子态:

$$\begin{aligned} \theta(I_{N-1}^{(1)}) &= -\beta_{N-1} + 2j\pi, \\ \theta(I_N^{(1)}) &= 2\alpha_{N-1} + 2k\pi \end{aligned} \quad (10)$$

和

$$\begin{aligned} \theta(I_{N-1}^{(2)}) &= \pi - \beta_{N-1} + 2l\pi, \\ \theta(I_N^{(2)}) &= -2\alpha_{N-1} + 2m\pi, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 j, k, l, m 均为整数. 由 $I_N^{(1)}$ 和 $I_N^{(2)}$ 的值可以计算出:

$$I_N^{(3)} = \sqrt{\frac{(I_N^{(1)})^2 + (I_N^{(2)})^2}{2}}, \quad (12)$$

满足

$$\begin{aligned} \theta(I_N^{(3)}) &= \frac{\theta(I_N^{(1)}) + \theta(I_N^{(2)})}{2} \\ &= \gamma_N (I_N^{(3)})^2 + \phi_N = a_N \pi, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $a_N = 0$ 或 1 . 对应与图 5 中的白色点. 将之前得到的 γ_N 代入, 即可得到

$$\phi_N = a_N \pi - \gamma_N (I_N^{(3)})^2. \quad (14)$$

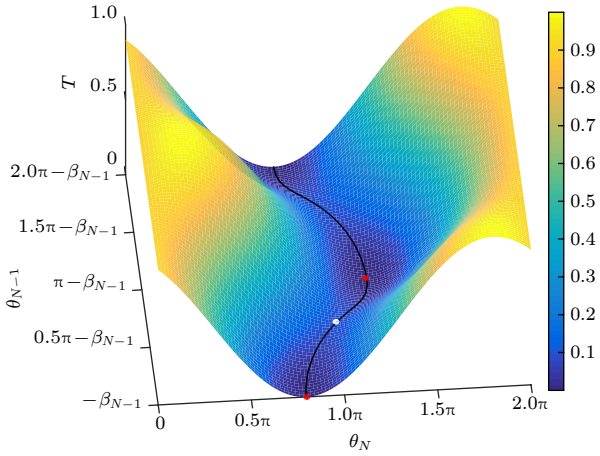


图 5 级联 N 个移相器的 2×2 光芯片分束比与移相器 $N-1$ 的相位和移相器 N 的相位的关系图. 每改变移相器 $N-1$ 的相位一次, 都完整扫描一遍 $T-\theta_N$ 曲线, 并标记曲线的最低点为黑色. 两个红色点代表 T_{\min} 取最小值的情况, 白色点代表 T_{\min} 取最大值的情况, 此时白色点对应的 $\theta_N = 0$ 或 π

Fig. 5. Splitting ratio 2×2 optical waveguide circuit versus phase shifter $N-1$ and phase shifter N . For every change of θ_{N-1} , we scan a full $T-\theta_N$ curve and mark its lowest point black. The two red point represents the minimum of T_{\min} while the white point represents the maximum of T_{\min} . The white point corresponding to $\theta_N = 0$ or π .

完成移相器 N 的标定后, 来对移相器 $N-1$ 进行标定. 图 4(b) 展示的是光波导线路包含移相器 $N-2, N-1$ 和 N 的部分. 类似地, 可以通过扫描移相器 $N-1$ 的电流 I_{N-1} 并测量相应的分束比 T 的值来确定 γ_{N-1} 的值. 同样地, 把到达移相器 $N-2$ 前的量子态记为 $|\psi_{N-2}\rangle = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{N-2}) \\ e^{i\beta_{N-2}} \sin(\alpha_{N-2}) \end{bmatrix}$, 其中 $\alpha_{N-2}, \beta_{N-2}$ 为 0 到 2π 间的相位. 与前面的推理类似, 输出端 Out 1 测得的分束比 T 为

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin(\beta_{N-2} + \theta_{N-2}) \cos(\theta_N) \sin(2\alpha_{N-2}) \\ &\quad + \frac{1}{2} \sin(\theta_N) \cos(2\alpha_{N-2}) \sin(\theta_{N-1}) \\ &\quad - \frac{1}{2} \cos(\beta_{N-2} + \theta_{N-2}) \sin(\theta_N) \\ &\quad \times \sin(2\alpha_{N-2}) \cos(\theta_{N-1}). \end{aligned} \quad (15)$$

将 θ_N 设为 $\pi/2$ 或 $-\pi/2$, 联合扫描 I_{N-2} 和 I_{N-1} , 也可以得到两组 $T=0$ 的结果, 分别对应:

$$\begin{aligned} \theta(I_{N-2}^{(1)}) &= -\beta_{N-2} + 2j\pi, \\ \theta(I_{N-1}^{(1)}) &= -\frac{\pi}{2} + 2\alpha_{N-2} + 2k\pi \end{aligned} \quad (16)$$

和

$$\begin{aligned} \theta(I_{N-2}^{(2)}) &= \pi - \beta_{N-2} + 2l\pi, \\ \theta(I_{N-1}^{(2)}) &= -\frac{\pi}{2} - 2\alpha_{N-2} + 2m\pi. \end{aligned} \quad (17)$$

由 $I_{N-1}^{(1)}$ 和 $I_{N-1}^{(2)}$ 的值可以计算出:

$$I_{N-1}^{(3)} = \sqrt{\frac{(I_{N-1}^{(1)})^2 + (I_{N-1}^{(2)})^2}{2}}, \quad (18)$$

满足

$$\begin{aligned} \theta(I_{N-1}^{(3)}) &= \frac{\theta(I_{N-1}^{(1)}) + \theta(I_{N-1}^{(2)})}{2} \\ &= \gamma_{N-1} (I_{N-1}^{(3)})^2 + \phi_{N-1} \\ &= (a_{N-1} - 1/2) \pi, \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $a_{N-1} = 0$ 或 1 . 将之前得到的 γ_{N-1} 代入, 即可得到

$$\phi_{N-1} = \left(a_{N-1} - \frac{1}{2}\right) \pi - \gamma_{N-1} (I_{N-1}^{(3)})^2. \quad (20)$$

下面来讨论对其他移相器的标定方法, 如图 6 所示, 将 θ_{N-1} 和 θ_N 都设为 0 或 π , 等效于让移相器 $N-1$ 、移相器 N 以及最后两个 MMI 实现 Identity 操作 (或 Swap 操作), 这样移相器 $N-3$ 和移相器 $N-2$ 就相当于变成了最靠近输出端的两个移相器, 从而可以用前面的方法进行标定. 以此类推, 可以完成对所有移相器的标定.

由 (14) 和 (20) 式知, 目前标定得到的每个移相器的相位 θ_i 都有一个未定的相位差 0 或者 π , 即:

$$\theta_i = \gamma_i I_i^2 + \phi_i + a_i \cdot \pi, \quad (21)$$

其中 $a_i = 0$ 或 1 . 下面要来确定每个移相器 a_i 的具体数值.

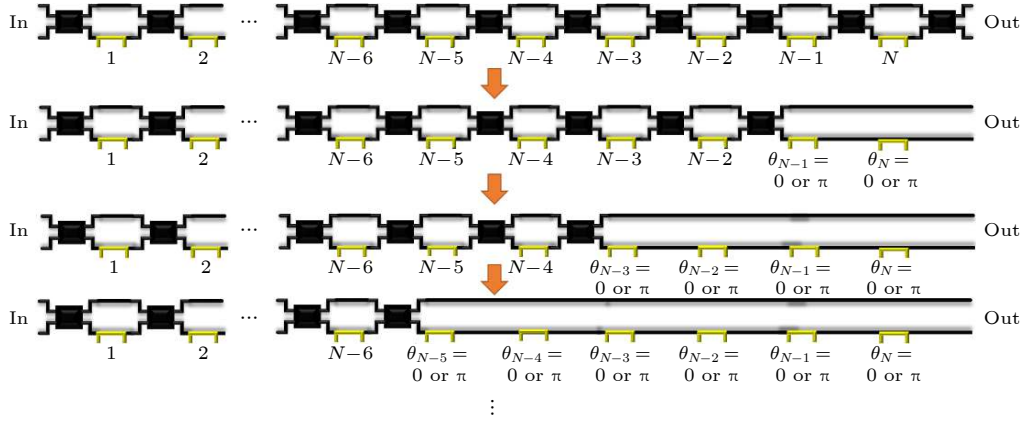


图 6 级联移相器的标定顺序

Fig. 6. Calibration sequence of cascaded phase shifters.

首先讨论移相器数目为奇数的情况. 如图 7(a) 所示, 移相器数目 $N=2P-1$ (P 为正整数), 共有 P 个奇数项移相器和 $P-1$ 个偶数项移相器. 对移相器 a_i 的确定共分为 4 个步骤. 每个步骤中标黑色的移相器相位均设为 0 或 π , 标红色与标蓝色的移相器相位设为 0.4π 或 1.4π . 标蓝色的移相器在执行该步骤后可确定对应 a_i 的具体数值. 这里要说明的是选取 0.4π 相位用来标定 a_i 是为了方便, 实际上可去除 $0, \pm 0.5\pi, \pm\pi$ 以外的任何其他相位用来标定 a_i .

第一步, 按照图中 Step 1 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定奇数项中 $a_i = 1$ 的数量是奇数还是偶数;

第二步, 按照图中 Step 2 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定偶数项中 $a_i = 1$ 的数量是奇数还是偶数;

第三步, 按照图中 Step 3 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定蓝色移相器的 a_i 的值, 按照箭头方向依次向左标定, 可以完成所有偶数项移相器的标定;

第四步, 按照图中 Step 4 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定蓝色移相器的 a_i 的值, 按照箭头方向依次向右标定, 可以实现所有奇数项移相器的标定.

下面再来讨论移相器数目为偶数的情况. 如图 7(b) 所示, 移相器数目 $N=2P$ (P 为正整数), 共有 P 个奇数项移相器和 P 个偶数项移相器. 对移相器 a_i 的确定共分为 5 个步骤. 每个步骤中标黑色和标绿色的移相器相位均设为 0 或 π , 标红色的移相器相位设为 0.4π 或 1.4π . 标绿色的移相器在执行该步骤后可以确定对应 a_i 的具体数值.

第一步, 按照图中 Step 1 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定所有移相器中 $a_i = 1$ 的数量是奇数还是偶数;

第二步, 按照图中 Step 2 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定在下划线上的移相器中 $a_i = 1$ 的数量是奇数还是偶数;

第三步, 按照图中 Step 3 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定在下划线上的移相器中 $a_i = 1$ 的数量是奇数还是偶数;

第四步, 按照图中 Step 4 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定绿色移相器的 a_i 的值, 按照箭头方向向左依次移动就可以完成对偶数项移相器的标定;

第五步, 按照图中 Step 5 标注的颜色对移相器设置相位, 通过测量分束比 T 可以确定绿色移相器的 a_i 的值, 按照箭头方向向右依次移动就可以完成对奇数项移相器的标定.

这里要说明的是, 无论 N 是奇数还是偶数的情况下, 对第 1 个和最后 1 个移相器同时加 π 相位都不会对分束比 T 产生影响, 因此无需确定 a_1 和 a_N 的具体数值, 而只需要知道两者的关系即可. a_1 和 a_N 具体关系可以从图 7 的标定步骤中推断出来. 综上所述, 使用上述方法可以确定所有移相器的 a_i 的具体数值, 结合之前确定的 γ_i 和 ϕ_i , 从而可以完成所有移相器的相位标定.

这里将使用传统标定方法与使用该方法对 N 个级联移相器标定所耗费资源进行一个简单的比较. 假设每个移相器加载的电流扫描 10 个点, 使用传统的标定方法需要扫描 10^N 个点, 使用我们的方法总共只需要扫描 $111N-1$ 个点即可.

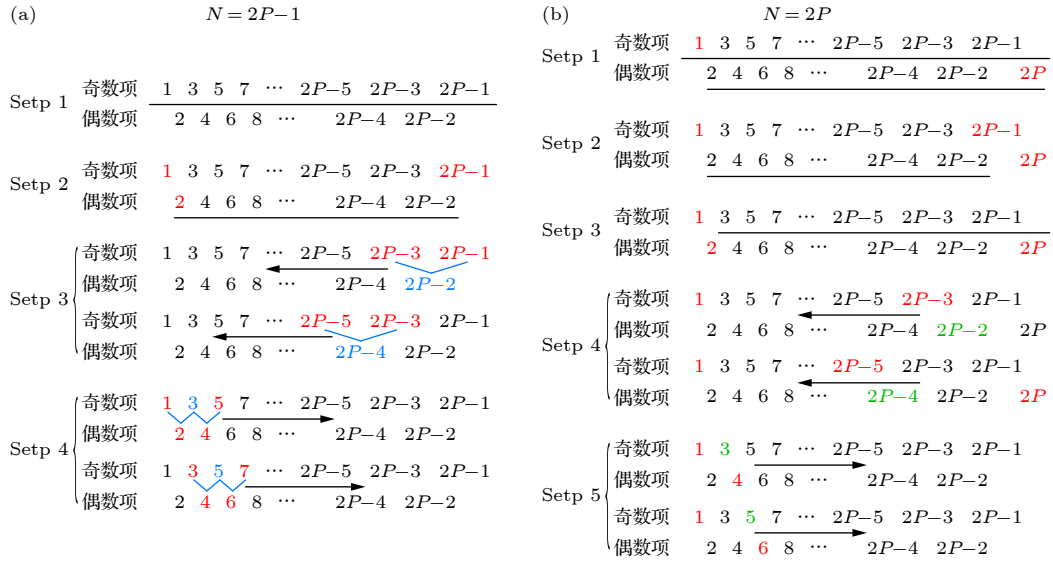


图 7 确定 a_i 的标定顺序, 其中颜色为黑色与绿色的移相器相位设为 0, 其他颜色的移相器相位设为 0.4π , 有下划线步骤可以确定下划线部分的 $a_i = 1$ 为奇数或偶数个, 箭头为标定方向, 蓝色移相器和绿色移相器为对应步骤可以完成标定的移相器 (a) 移相器数量为奇数的标定顺序; (b) 移相器数量为偶数的标定顺序

Fig. 7. Calibration sequence to determine a_i , where the phase shifters with color black and green are set to phase 0 and the others are set to 0.4π . Steps with underline can determine whether the red underline part of $a_i = 1$ is an odd or even number of shifts. The arrow is the calibration direction. Phase shifters in blue color or red color are the phase shifters that can be calibrated in the corresponding steps. (a) Calibration sequence with an odd number of phase shifters; (b) calibration sequence with an even number of phase shifters.

3 模拟验证

我们在程序中改变多个参数来模拟检验该方法的稳定性. 设置输入态为 $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, 然后对所有移相器同时加电, 得到实验输出态 $|\psi_e\rangle$, 同时按照标定移相器的结果代入电流值来计算得到计算输出态 $|\psi_c\rangle$, 最后测量其保真度 $Fidelity = |\langle \psi_e | \psi_c \rangle|^2$. 图 8(a) 展示的是一个级联 20 个移相器的 2×2 光波导线路, 将对这些移相器加载电流, 比较输出态相对于理想态的保真度, 来评估我们方法的有效性. 这里使用了两种加载电压的方式. 第一种方式是对每个移相器加载 0 或 3 V 的电压, 共 $2^{20} = 1048576$ 种加载电压的组合方式, 输出态的保真度分布如图 8(b) 所示, 保真度均大于 0.999999. 第二种方式是对每个移相器随机加载 0 到 9 V 间某个电压, 选取了相同数量 (1048576 种) 随机加载电压组合, 输出态的保真度分布如图 8(c) 所示, 保真度均大于 0.999996. 可以看到, 输出态的保真度与加载电压的方式有关, 随机加载电压的方式保真度分布更分散, 但无论采用哪种方式, 输出态的保真度都非常高.

然后模拟了不同的实验测量误差对标定结果

的影响, 如图 9(a) 所示, 本文设置的实验中的测量误差 ε 从 0% 增加到 9%, 模拟级联了 8 个移相器, MMI 的 η 设为 0.5, 每个移相器的取点数为 81, 这里设置的实验误差是实验上测量光功率时的误差 (比如光纤发生微小的抖动). 从图 9(a) 可以看到, 该方法对实验测量误差的容忍度非常好, 在 0%—9% 的实验测量误差范围内输出得到的态的保真度始终大于 99.9999%. 此外, 还研究了采样点数量对输出态保真度的影响. 如图 9(b) 所示, 这里模拟的是对级联 8 个移相器的 2×2 光波导线路的标定, MMI 的 η 设为 0.5, 光功率测量误差为 5%, 可以看到当每个移相器的采样点数量大于 10 时, 可以实现大于 99.99% 的保真度, 当采样点数量大于 20 后保真度的值趋于稳定.

还模拟了光芯片包含的移相器数量对标定精度的影响, 结果如图 9(c) 所示, 级联的移相器数量分别为 5, 8, 11, 14, 17, 20, 这里设置的实验测量误差为 5%, 每个移相器的取点数为 81. 从图 9(c) 可以看到, 随着级联移相器数量的增多, 输出态的保真度只是缓慢下降, 经过直线拟合发现, 当移相器数量达到 17600 时输出态的保真度仍然可以达到 99.9%.

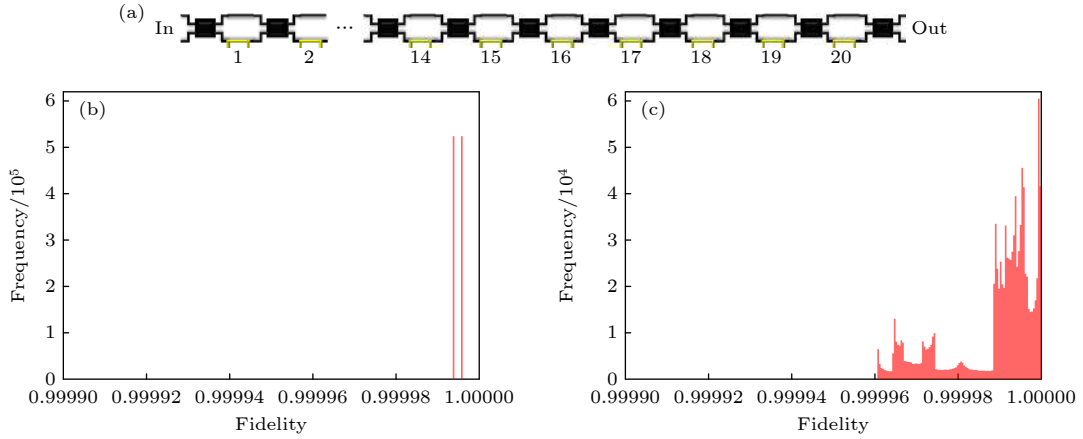


图 8 (a) 级联 20 个移相器的 2×2 光波导线路; (b) 每个移相器加载 0 或 3 V 的电压, 输出态的保真度分布; (c) 每个移相器随机加载 0 到 9 V 间某个电压, 输出态的保真度分布

Fig. 8. (a) 2×2 optical waveguide circuit of 20-cascaded phase shifter; (b) the distribution of statistical fidelity of output state applying voltage of 0 or 3 V for each phase shifter; (c) the distribution of statistical fidelity of output state applying voltage randomly between 0 and 9 V for each phase shifter.

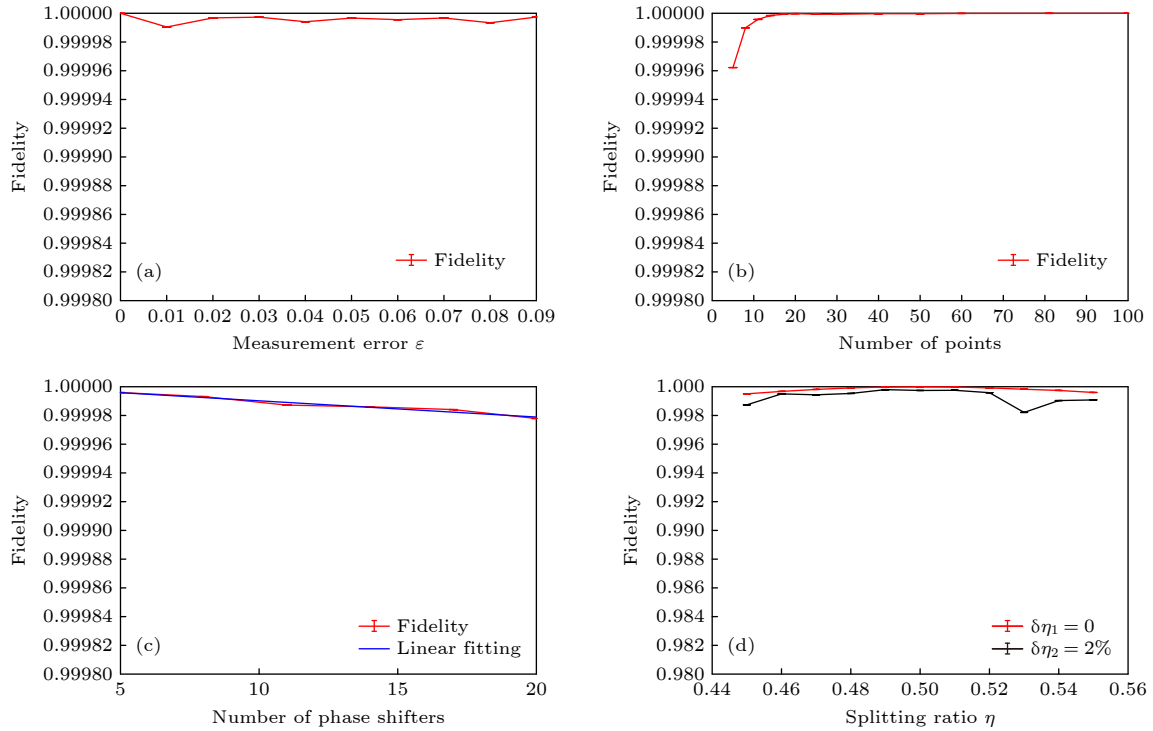


图 9 (a) 不同实验测量误差对保真度的影响; (b) 不同取点数量对保真度的影响; (c) 不同数量移相器对保真度的影响; (d) 不同的 MMI 分光比 η 值对保真度的影响

Fig. 9. (a) Effect of different experimental measure errors on fidelity; (b) effect of different number of points on fidelity; (c) effect of different numbers of phase shifters on fidelity; (d) effect of different values of the MMI spectral ratio η on fidelity.

在实际制备的光芯片中, MMI 的分光比由于工艺误差可能不是设计的 50:50 ($\eta = 0.5$). 此外, 不同 MMI 的分光比之间可能也有一定的差异. 我们对这种情况下的移相器标定也进行了模拟, 如图 9(d) 所示, 模拟级联 8 个移相器, 光功率测量误差为 5%, 每个移相器的取点数为 81. 图 9(d)

中红线对应每个 MMI 的 η 值相同且已知情况, 即 $\delta\eta_1 = 0$, 黑线表示每个 MMI 的 η 值在给定的 η 附近有 $\pm 2\%$ 波动的情况, 即 $\delta\eta_2 = 2\%$. 由图 9(d) 可看到, 对于不同 MMI 的分光比相同的情况下, 即使 η 取到了 0.45 或 0.55 这样的值, 得到的保真度依然可以超过 99.95%. 对于 MMI 分光比

不同的情况,保真度只是略有下降,仍然可以超过99.8%.

4 讨论与总结

本文提出了一种用于标定级联多个移相器的光波导线路的方法. 相比于传统标定方法^[25],该方法在标定效率上相比传统方法有指数级的提升. 例如对于 N 个级联移相器,传统的标定方法需要扫描 10^N 个点,而该方法仅需扫描 $111N - 1$ 个点即可. 我们在计算机上模拟了使用该方法对级联20个移相器的光波导线路的标定,实现了传统标定方法无法完成的任务. 本文提出的标定方法将极大地降低标定所需要的时间以及数据存储量,有望在光量子信息处理、光计算处理等方面得到应用.

参考文献

- [1] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [2] Xu F H, Ma X F, Zhang Q, Lo H K, Pan J W 2020 *Rev. Mod. Phys.* **92** 025002
- [3] Wei K J, Li W, Tan H, Li Y, Min H, Zhang W J, Li H, You L X, Wang Z, Jiang X, Chen T Y, Liao S K, Peng C Z, Xu F H, Pan J W 2020 *Phys. Rev. X* **10** 031030
- [4] Yin J, Li Y H, Liao S K, et al. 2020 *Nature* **582** 501
- [5] Bennett C H, Brassard G 1984 *Proceedings of the International Conference on Computers, Systems and Signal Processing Bangalore, India December 9–12, 1984* p175
- [6] Ladd T D, Jelezko F, Laflamme R, Nakamura Y, Monroe C, O'Brien J L 2010 *Nature* **464** 45
- [7] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. 2020 *Science* **370** 1460
- [8] Bentivegna M, Spagnolo N, Vitelli C, et al. 2015 *Sci. Adv.* **1** e1400255
- [9] Ciampini M A, Orioux A, Paesani S, Sciarrino F, Corrielli G, Crespi A, Ramponi R, Osellame R, Mataloni P 2016 *Light-Sci. Appl.* **5** e16064
- [10] Shor P W 1994 *Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science Santa Fe, USA November 20–22, 1994* p124
- [11] Grover L K 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 325
- [12] Aspuru-Guzik A, Walther P 2012 *Nat. Phys.* **8** 285
- [13] Sparrow C, Martin-Lopez E, Maraviglia N, Neville A, Harrold C, Carolan J, Joglekar Y N, Hashimoto T, Matsuda N, O'Brien J L, Tew D P, Laing A 2018 *Nature* **557** 660
- [14] Zhong Y P, Chang H S, Biefait A, Dumur E, Chou M H, Conner C R, Grebel J, Povey R G, Yan H X, Schuster D I, Cleland A N 2021 *Nature* **590** 571
- [15] Song C, Xu K, Li H K, Zhang Y R, Zhang X, Liu W X, Guo Q J, Wang Z, Ren W H, Hao J, Feng H, Fan H, Zheng D N, Wang D W, Wang H, Zhu S Y 2019 *Science* **365** 574
- [16] Bohnet J G, Sawyer B C, Britton J W, Wall M L, Rey A M, Feig M F, Bollinger J J 2016 *Science* **352** 1297
- [17] Wang H, Qin J, Ding X, Chen M C, Chen S, You X, He Y M, Jiang X, You L, Wang Z, Schneider C, Renema J J, Höfling S, Lu C Y, Pan J W 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 250503
- [18] Liu W Z, Li M H, Ragy S, Zhao S R, Bai B, Liu Y, Brown P J, Zhang J, Colbeck R, Fan J Y, Zhang Q, Pan J W 2021 *Nat. Phys.* **17** 448
- [19] Li Z P, Huang X, Cao Y, Wang B, Li Y H, Jin W J, Yu C, Zhang J, Zhang Q, Peng C Z, Xu F H, Pan J W 2021 *Photonics Res.* **8** 1532
- [20] Zhong H S, Li Y, Li W, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 250505
- [21] Wang X L, Luo Y H, Huang H L, Chen M C, Su Z E, Liu C, Chen C, Li W, Fang Y Q, Jiang X, Zhang J, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 260502
- [22] Wang H, He Y, Li Y H, et al. 2017 *Nat. Photonics* **11** 361
- [23] Politi A, Cryan M J, Rarity K G, Yu S Y, O'Brien J L 2008 *Science* **320** 646
- [24] Shadbolt P J, Verde M R, Reruzzo A, Politi A, Liang A, Lobino M, Matthew J C F, Thompson M G, O'Brien J L 2012 *Nat. Photonics* **6** 45
- [25] Qiang X G, Zhou X Q, Wang J W, Wilkes C M, Loke T, O' Gara S, Kling L, Marshall G D, Santagati, R, Ralph T C, Wang J B, O'Brien J L, Thompson M G, Mathews J C F 2018 *Nat. Photonics* **12** 534
- [26] Wang J W, Paesani S, Ding Y H, et al. 2018 *Science* **360** 285
- [27] Seok T J, Kwon K, Henriksson J, Luo J H, Wu M C 2019 *Optical Fiber Communication Conference San Diego, USA March 3–7, 2019* pTh1E.5
- [28] Wang J W, Sciarrino F, Laing A, Thompson M G 2020 *Nat. Photonics* **14** 273
- [29] Paesani S, Ding Y H, Santagati R, Chakhmakhchyan L, Vigiari C, Rottwitt K, Oxenlowe L K, Wang J W, Thompson M G, Laing A 2019 *Nat. Phys.* **15** 925
- [30] Llewellyn D, Ding Y H, Faruque I I, et al. 2020 *Nat. Phys.* **16** 148
- [31] Carolan J, Harrold C, Sparrow C, et al. 2015 *Science* **349** 711
- [32] Reck M, Zeilinger A, Bernstein H J, Bertani P 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 58
- [33] Kang G, Kim S H, You J B, Lee D S, Yoon H, Ha Y G, Kim J H, Yoo D E, Lee D W, Youn C H, Yu K, Park H H 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **31** 1685
- [34] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, Hosseini E S, Watts M R 2013 *Nature* **493** 195
- [35] Hulme J C, Doyle J K, Heck M J R, Peters J D, Davenport M L, Bovington J T, Coldren L A, Bowers J E 2014 *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVI San Francisco, USA February 1, 2014* p898907
- [36] Kwong D, Hosseini A, Covey J, Zhang Y, Xu X C, Subbaraman H, Chen R T 2014 *Opt. Lett.* **39** 941
- [37] He M B, Xu M Y, Ren Y X, et al. 2019 *Nat. Photonics* **13** 359
- [38] Deng Q Z, Liu L, Li X B, Zhou Z P 2014 *Opt. Lett.* **39** 5590

High-speed calibration method for cascaded phase shifters in integrated quantum photonic chips^{*}

Xing Ze-Yu Li Zhi-Hao Feng Tian-Feng Zhou Xiao-Qi[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Physics,

Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

(Received 2 March 2021; revised manuscript received 15 April 2021)

Abstract

Integrated photonics has the advantages of miniaturization, low cost, stability and easy manipulation in comparison with bulk optics. However, as the scale and complexity of the chip increase, the calibration of cascaded phase shifters on-chip will be almost impossible. The time needed to calibrate the cascaded phase shifters with using conventional method increases exponentially with the number of cascades, and the maximum number of cascades achieved so far is only 5. In this paper, we propose a high-speed calibration method by which the calibration time increases only linearly with the number of cascades increasing, achieving an exponential acceleration. For N -cascaded phase shifters, the number of points scanned by each shifter is m , our method only needs to scan $(m^2 + m + 1)N - 1$ points instead of m^n with using the proposed method. The main idea of this method is that we can calibrate phase shifters one by one via two-dimensional (2D) scanning. For example, for N -cascaded phase shifter, the calibration of phase shifter N can be realized by calibrating the 2D scanning phase shifter $N - 1$ and the 2D scanning phase shifter N , and the calibration of phase shifter $N - 1$ can be achieved by calibrating the 2D scanning phase shifter $N - 2$ and the 2D scanning phase shifter $N - 1$, and so on. The 2D scanning phase shifter $N - 1$ and the 2D scanning phase shifter N scan the phase shifter N by m points and then the current of phase shifter $N - 1$ is changed to scan the phase shifter N . Whenever changing the current of phase shifter $N - 1$ once, we can plot a curve of current-transmission. The lowest point of the curve changes with the change of the current phase shifter $N - 1$. When the lowest point of the curve takes a maximum value, that point is the 0 or π phase of phase shifter N . Similarly, when the lowest point of the curve takes a maximum value, that point is the -0.5π or 0.5π phase of phase shifter $N - 1$. Then we can calibrate all phase shifters by using this method, but each phase shifter has two possibilities. Then we can set a specific current of all phase shifters to finish the calibration. The different parameters are verified to see their effect on fidelity. It is found that small experimental error has little effect on fidelity. When $m > 20$, the fidelity becomes approximately a constant. For every 1760 increase in N , the fidelity decreases by about 0.01%. The fidelity of 20-cascaded phase shifters is 99.8%. The splitting ratio of MMI may is not 50:50 as designed because of chip processing errors. So, different splitting ratios are simulated and it is found that the splitting ratio affects the fidelity more seriously than other parameters. But our method works still well even when the splitting ratio is 45:55, whose fidelity is 99.95% if we know the splitting ratio. The method will greatly expand the application scope of integrated quantum photonics.

Keywords: integrated quantum photonics, cascaded phase shifters, calibration method

PACS: 42.82.-m, 03.67.-a

DOI: 10.7498/aps.70.20210401

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2017YFA0305200, 2016YFA0301700) and the Key Areas Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2018B030329001, 2018B030325001).

[†] Corresponding author. E-mail: zhouxq8@mail.sysu.edu.cn