

## 级联 OPC 的 MZI 再生芯片相位保持性能研究

王娅欣, 武保剑\*, 郭飏, 严伟, 汤宇, 文峰, 邱昆

电子科技大学信息与通信工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

**摘要** 许多幅度再生方案可用马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构进行建模。研究级联光学相位共轭器(OPC)的 MZI(OPC-MZI)再生方案,以实现近乎理想的相位保持再生。通过分析整个级联系统的功率和相位转移特性,优化设计了满足需求的硅基 MZI 再生芯片单元。采用正交相移键控(QPSK)调制信号仿真验证了 OPC-MZI 再生方案的可行性。仿真结果表明:当输入信噪比为 16 dB 时,与单级 MZI 再生芯片相比,OPC-MZI 再生方案的噪声抑制比(NRR)可提高 1 dB,相位扰动也由 5.7°降至 0.07°。

**关键词** 光通信; 全光再生; 光学相位共轭器; 马赫-曾德尔干涉仪; 多级调制信号

**中图分类号** O437.4

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL221151

## 1 引言

为了提高光纤链路容量和频谱效率,以正交相移键控(QPSK)和正交幅度调制(QAM)等为代表的高阶调制信号越来越多地应用于光通信系统。然而,与传统的开关键控(OOK)信号等二进制调制格式信号相比,较高的调制格式对幅度和相位噪声更加敏感,更容易受到光纤色散、非线性效应以及放大自发辐射(ASE)噪声等的影响,要求信道具有更高的光信噪比(OSNR)<sup>[1-6]</sup>。全光再生器可以在光域对劣化光信号进行再生,避免采用复杂且耗电的光-电-光转换处理<sup>[7-8]</sup>。然而,在全光幅度再生过程中,幅度噪声往往会转化为相位扰动<sup>[9-11]</sup>。因此,高阶调制信号在幅度再生过程中应避免引入额外的相位扰动,即实现相位保持幅度再生(PPAR)。

目前,高阶调制信号的 PPAR 方法主要采用非线性光环镜(NOLM)<sup>[12-18]</sup>和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[19-20]</sup>结构实现。由于较长的高非线性光纤(HNLF)易受到环境影响,因此基于 HNLF 的 NOLM 再生器较 MZI 结构更加稳定。随着硅光子学的发展,利用硅基波导的非线性效应更适合制作 MZI 再生芯片<sup>[21-22]</sup>。将多个幅度再生单元适当级联起来,可提高幅度再生性能,使功率转移函数(PTF)曲线的再生区域更加平坦<sup>[23]</sup>,但仍无法完全避免幅度噪声转换为相位扰动。为此,文献[15]采用光学相位共轭器(OPC)<sup>[24]</sup>来补偿相位扰动,提升级联 NOLM 再生器系统的 PPAR 性能。由于 NOLM 中存在双向传输光,难以实现完全的相位偏移补偿,仍存在 8.8°的相位偏移。

针对现有再生方案仍存在一定程度相位扰动的问题,本文提出级联 OPC 的 MZI(OPC-MZI)芯片再生方案。通过优化硅基 MZI 再生芯片中光耦合器(OC)的分光比、硅线波导长度以及 OPC 增益等实现光信号的 PPAR 功能,使劣化信号再生前后的相位几乎保持不变。以 QPSK 劣化信号为例,仿真验证了 OPC-MZI 芯片再生方案可行性,并与单级 MZI 芯片和级联光放大器(OA)的再生方案进行了比较。

## 2 OPC-MZI 再生方案

本文提出的 OPC-MZI 相位保持再生方案如图 1 所示,它使用 OPC 将两个 MZI 再生单元级联起来。劣化光信号输入到第一级 MZI 进行初步幅度再生后,经由第一个 OPC 输入到第二级 MZI 再生单元,再生信号由第二个 OPC 输出。第一个 OPC 可使第一级和第二级 MZI 导致的相位偏移相互抵消,第二个 OPC 的作用是在两次相位共轭后恢复原来输入信号的相位信息,从而实现再生器系统的 PPAR 功能。因此,在分析整个级联系统的功率转移性能和相位扰动时,可不考虑第二个 OPC 的影响,除非用于数据信号的 PPAR。

以  $\lambda_s$  为中心波长的信号光  $E_{in}$  从第一级 MZI 端口 1 输入,由耦合器 1(OC-1)分束,并在 MZI 的上、下两臂中产生相移,经耦合器 2(OC-2)双光束干涉输出的光场复振幅为

$$E_1 = E_{in} [A_1 \exp(i\phi_1) - A_2 \exp(i\phi_2)], \quad (1)$$

式中:  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为第一级 MZI 上臂引起的非线性相移和下臂引起的线性相移;  $A_1 = \sqrt{(1 - \rho_1)(1 - \rho_2)} T_1$

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-10-24; 录用日期: 2022-11-14; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(62171078)

通信作者: \*bjwu@uestc.edu.cn

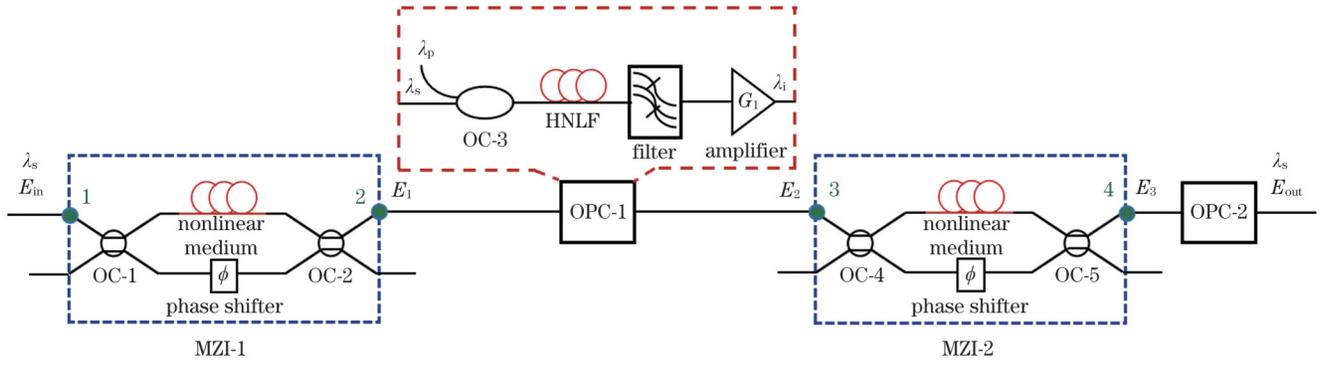


图 1 级联 OPC 的 MZI 相位保持幅度再生方案

Fig. 1 Phase-preserving amplitude regeneration scheme based on MZIs with OPCs

和  $A_2 = \sqrt{\rho_1 \rho_2 T_2}$  分别为 MZI 中两个干涉光束的光场振幅,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  为相应耦合器的耦合比,  $T_1$  和  $T_2$  分别表示第一级 MZI 上、下臂的功率透射率。

第一个 OPC 单元放置于两个 MZI 结构的中间, 实现光学共轭操作。OPC 单元主要包括非线性介质、光学滤波器和 OA, 其中非线性介质可选用 HNLF<sup>[25-26]</sup>、色散位移光纤 (DSF)<sup>[27]</sup>、半导体光放大器 (SOA)<sup>[28-29]</sup>、周期极化铌酸锂 (PPLN) 波导<sup>[30]</sup> 等。例如, 利用 HNLF 中产生的四波混频 (FWM) 闲频光, 再经光学滤波和光学放大后, 可获得共轭光<sup>[31]</sup> (参见图 1), OPC 的净增益与泵浦光功率、FWM 转换效率以及 OA 增益有关。设第一个 OPC 单元的净增益为  $G_1$ , 则它输出的光场复振幅为

$$E_2 = \sqrt{G_1} E_1^* = \sqrt{G_1} E_{in} [A_1 \exp(-i\phi_1) - A_2 \exp(-i\phi_2)]. \quad (2)$$

类似地,  $E_2$  经第二级 MZI 后的输出光场复振幅  $E_3$  为

$$E_3 = E_2 [A_3 \exp(i\phi_3) - A_4 \exp(i\phi_4)], \quad (3)$$

式中:  $\phi_3$  和  $\phi_4$  分别为第二级 MZI 上、下臂引起的非线性相移和线性相移;  $A_3 = \sqrt{(1-\rho_4)(1-\rho_5)T_3}$  和  $A_4 = \sqrt{\rho_4 \rho_5 T_4}$ ,  $\rho_4$  和  $\rho_5$  分别为耦合器 4 (OC-4) 和耦合器 5 (OC-5) 的耦合比,  $T_3$  和  $T_4$  分别表示第二级 MZI 上、下臂的功率透射率。

最终,  $E_3$  经第二个 OPC 的输出作为整个再生系统的输出光场  $E_{out}$ :

$$E_{out} = \sqrt{G_2} E_3^* = \sqrt{G_1 G_2} E_{in} \{ A_1 A_3 \exp[i(\phi_1 - \phi_3)] - A_1 A_4 \exp[i(\phi_1 - \phi_4)] - A_2 A_3 \exp[i(\phi_2 - \phi_3)] + A_2 A_4 \exp[i(\phi_2 - \phi_4)] \}, \quad (4)$$

式中:  $G_2$  为第二个 OPC 的净增益。

利用式 (4) 可以计算再生器的输出信号光功率和相位, 得到再生器随输入功率变化的 PTF 以及幅度噪声到相位的转移曲线。下面分析中, 不妨取  $\phi_2 = \phi_4 = 0$ 。

需要指出的是, 多电平幅度再生要求 PTF 曲线具有多个阶梯形的平坦区域。既然 NOLM 结构可以用 MZI 进行等效分析, 则式 (4) 也可用于分析 NOLM 的级联性能, 区别仅在于 MZI 级联传输时无双向传输光, 更容易实现完全的相位偏移补偿。本文中, MZI 结构拟采用硅基 MZI 再生芯片实现, 有助于保持再生单元的一致性, 整个系统的体积也可减小。

### 3 硅基 MZI 再生芯片设计

#### 3.1 光场在硅线波导中的传播

针对第 2 节提出的 OPC-MZI 再生方案, 当 MZI 结构中的非线性介质采用硅线波导时, 会涉及比 HNLF 情形更为复杂的非线性效应。硅线波导除了具有与光纤类似的非线性效应外, 还包括双光子吸收 (TPA)、

自由载流子吸收 (FCA) 和自由载流子色散 (FCD) 等。沿硅线波导传播的连续光场复振幅  $E$  可表示为<sup>[21, 32]</sup>

$$\frac{\partial E}{\partial z} = i\gamma(1 + ir)|E|^2 E - \frac{\alpha_1}{2} E - \frac{\sigma}{2}(1 + i\mu)N_c E, \quad (5)$$

式中:  $\alpha_1$  和  $\gamma = k_0 n_2 / A_{eff}$  分别为硅线波导的线性损耗系数和非线性系数,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为光波长,  $n_2$  为克尔非线性系数,  $A_{eff}$  为模式有效作用面积;  $r = \beta_{TPA} / (2k_0 n_2)$  为与 TPA 相联系的无量纲参数,  $\beta_{TPA}$  为 TPA 系数; 参数  $\sigma$ ,  $\mu$  和  $N_c$  与 FCA 和 FCD 有关。

式 (5) 右边的第一项与光功率相关, 无 TPA 时  $r = 0$ 。当输入峰值强度  $I_0 \ll 3h\nu_q / (\sigma T_0)$ , 即  $I_0 \ll 2.7 \text{ GW/cm}^2$  时,  $N_c$  可以忽略不计<sup>[32]</sup>, 式 (5) 最后一项可不考虑。进一步地, 将光场复振幅表示为  $E = \sqrt{P} \exp(i\phi - \alpha_1 z/2)$ , 由式 (5) 可计算硅线波导输出的光功率  $P$  及其非线性相移  $\phi$ :

$$P(L) = \frac{P(0) \exp(-\alpha_1 L)}{1 + 2\gamma r P(0) L_{eff}}, \quad (6)$$

$$\phi(L) = \frac{\ln[1 + 2\gamma r P(0)L_{\text{eff}}]}{2r}, \quad (7)$$

式中： $P(0)$  为输入端的功率； $L$  和  $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_1 L)]/\alpha_1$  分别为硅线波导的实际长度和有效长度。

由式 (7) 可知，若  $2\gamma r P(0)L_{\text{eff}} \ll 1$ ，则  $\phi(L) = \phi_{\text{max}} = \gamma P(0)L_{\text{eff}}$ 。在硅基 MZI 芯片中，功率透射率  $T$  和非线性相移  $\phi$  分别由  $P(L)/P(0)$  和  $\phi(L)$  计算得到。

### 3.2 硅基 MZI 再生芯片结构参数

对于图 1 所示的 OPC-MZI 级联再生方案，首先的任务是设计 MZI 结构使其具有一定的相位保持功能，即要求通过 MZI 上臂（对应于非线性相移）的光功率足够小<sup>[21]</sup>，也就是说  $\rho_1$  应尽可能大。然而， $\rho_1$  过大会使 PTF 曲线的阶梯间距（或者再生工作点间隔功率）增加，需要输入更高的信号光功率。不妨取  $\rho_1$  为 55%。为进一步获得阶梯型 PTF 曲线，还需确定上臂硅线波

导的参数和  $\rho_2$  的取值。

硅线波导的设计参数在一定程度上受限于芯片生产工艺。根据合作生产商的流片要求，我们选用脊型硅线波导，其截面如图 2(a) 所示。波导截面顶部和底部宽度分别为 800 nm 和 900 nm，对应的刻蚀深度分别为 70 nm 和 150 nm。在不增加芯片整体损耗的条件下，确定了上臂硅线波导长度为 30 cm，布局如图 2(a) 所示，弯曲半径和波导间距分别为 30  $\mu\text{m}$  和 4  $\mu\text{m}$ 。其他参数取自文献 [21]，即  $\beta_{\text{TPA}} = 5 \times 10^{-12} \text{ m/W}$ ， $\alpha_1 = 0.3 \text{ dB/cm}$ ， $\gamma = 150 (\text{W}\cdot\text{m})^{-1}$ ， $A_{\text{eff}} = 0.13 \mu\text{m}^2$ 。相比之下，下臂硅线波导长度仅为 1.245 mm，所产生的非线性相移可以忽略。

硅基 MZI 再生芯片中的光耦合器由集成双波导结构实现，这里取工艺要求的最小波导间距 180 nm，以尽可能缩短耦合波导的长度。采用光束传播法 (BPM)，仿真得到了耦合效率随耦合长度的变化曲线，如图 2(b) 所示，耦合效率为 55% 时对应的耦合波导长度为 100.667  $\mu\text{m}$ 。

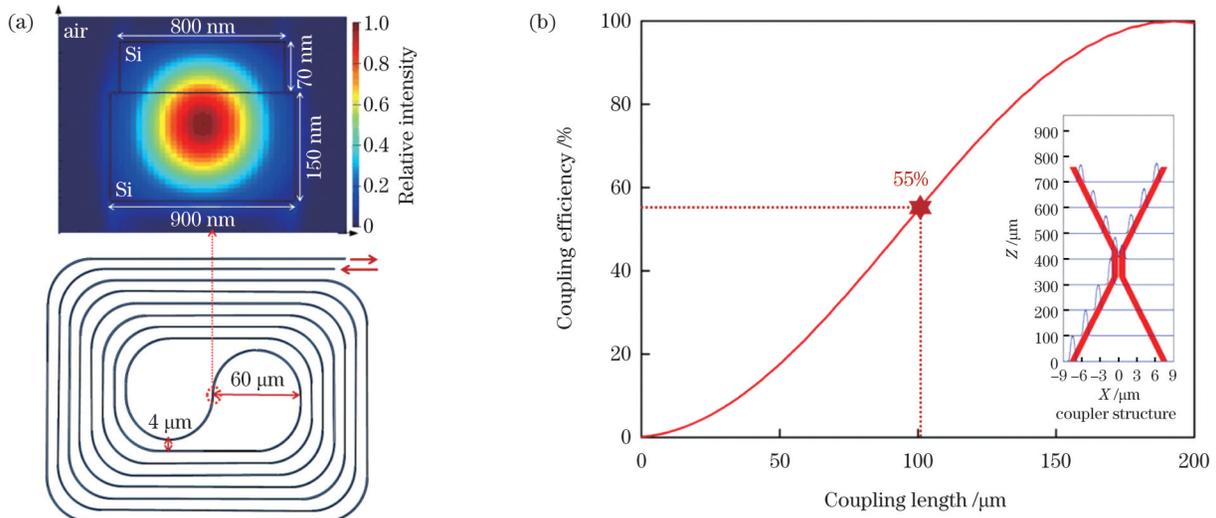


图 2 硅线波导和耦合器的设计。(a) 脊型硅线波导截面及布局；(b) 耦合效率与耦合长度的关系

Fig. 2 Design of silicon wire waveguide and optical coupler. (a) Cross-section and layout of rib silicon wire waveguide; (b) coupling efficiency versus coupling length

接下来，在上述硅线波导参数下确定  $\rho_2$  的取值。为了保证幅度再生性能，应使 PTF 曲线的第一工作点 (WP) 尽可能平坦，由此得到  $\rho_2$  的优化值为 70%，对应耦合器的耦合长度为 120.080  $\mu\text{m}$ 。至此，硅基 MZI 再生芯片的结构参数都已确定，所设计的硅基 MZI 再生芯片版图如图 3 所示，整体布局的长和宽分别为 2.872 mm 和 1.486 mm。该芯片可以由 5 mm  $\times$  5 mm 的有源晶片制造，通过光栅耦合到尾纤中以便测试。

根据硅基 MZI 再生芯片结构参数，由式 (1) 和式 (5) 可计算其 PTF 和相位扰动  $\theta_1$  曲线，如图 4 所示。由图 4 可知，第一个再生工作点的输入功率和输出功率分别为  $P_{\text{in}}^{\text{WP1}} = 0.564 \text{ W}$  和  $P_{\text{out}}^{\text{WP1}} = 0.215 \text{ W}$ ，第一个工作点有最大的相位扰动 (约为  $5.8^\circ$ )。可见，工作点

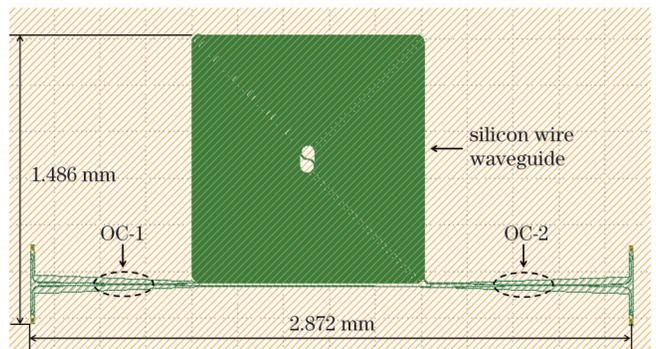


图 3 硅基 MZI 再生芯片版图

Fig. 3 Layout of silicon-based MZI regeneration chip

的平坦性能与相位扰动大小之间有一定的制约关系，工作点越平坦，相位扰动越大<sup>[23]</sup>。

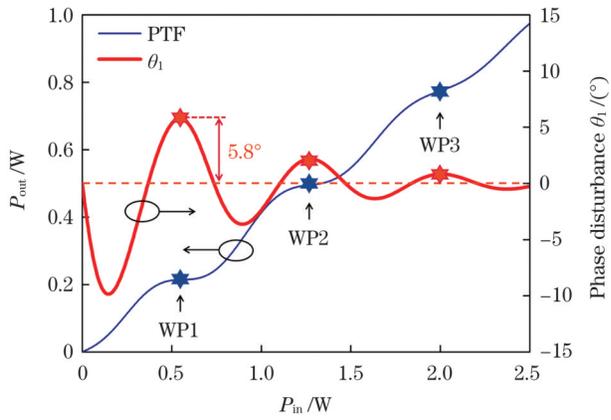


图4 硅基MZI芯片的PTF与相位扰动曲线

Fig. 4 PTF and phase disturbance curves of silicon-based MZI regeneration chip

#### 4 OPC-MZI再生方案性能分析

采用两个完全相同的MZI再生芯片单元构建OPC-MZI再生方案,每级MZI再生芯片单元均工作在第一工作点。因此,将两个MZI再生芯片单元级联起

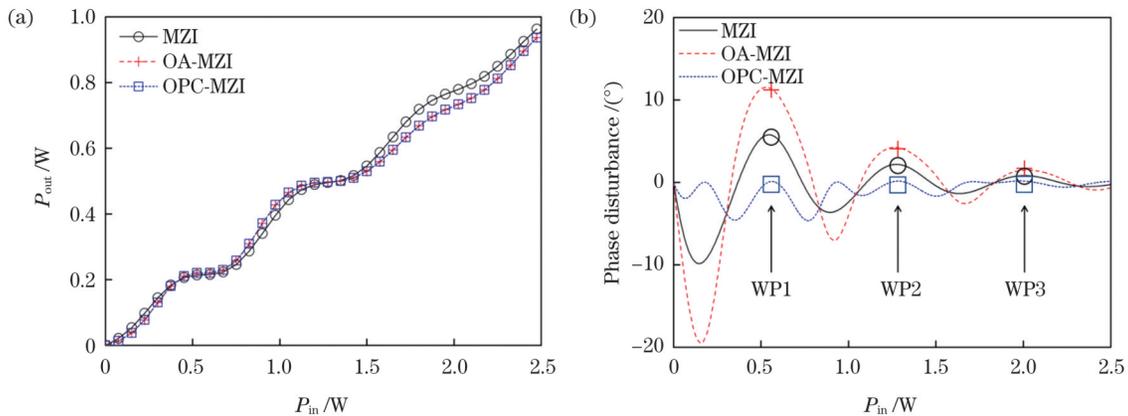


图5 三种再生方案的性能比较。(a)PTF曲线;(b)相位扰动曲线

Fig. 5 Performance comparison of three regeneration schemes. (a) PTFs; (b) phase disturbance curves

基于图5(b)比较三种再生方案的相位扰动性能。可以看出,对于OA-MZI级联方案,其相位扰动为 $11.3^\circ$ ,约为单级MZI芯片方案的两倍,也就是说,在没有OPC的再生芯片级联方案中,相位扰动会进行累积。相比之下,OPC-MZI级联方案在工作点附近有相对最小的相位扰动 $0.1^\circ$ ,各个工作点的相位扰动几乎为0,即实现了完美的相位保持。

#### 5 QPSK信号的相位保持幅度再生验证

前面设计了MZI芯片及OPC-MZI级联系统,当劣化信号的输入功率为 $0.564\text{ W}$ (工作点)时可实现相位扰动几乎为0的完美相位保持幅度再生。为进一步验证OPC-MZI再生方案的相位保持性能,我们利用OptiSystem仿真软件,通过嵌入OPC-MZI再生方案的MATLAB计算模块,搭建了QPSK信号再生的仿真验证系统,主要由

来的第一个OPC除了实现相位共轭外,还具有匹配第二级MZI芯片工作点的作用。根据MZI芯片的第一工作点输入和输出功率 $P_{in}^{WP1}$ 和 $P_{out}^{WP1}$ 可确定两级MZI芯片之间的匹配增益为

$$G_1 = P_{in}^{WP1} / P_{out}^{WP1} \approx 2.6. \quad (8)$$

为了比较说明相位共轭处理在OPC-MZI相位保持再生方案中发挥的作用,我们也考虑了用OA代替OPC的再生方案(用OA-MZI表示),其中OA仅用来匹配工作点。根据MZI芯片的参数以及匹配增益 $G_1$ ,由式(4)可计算整个OPC-MZI再生系统的PTF和相位扰动曲线,如图5(a)和图5(b)所示。图5中还给出了单级MZI再生芯片方案以及OA-MZI再生方案的相应曲线。

由图5(a)可知,OPC-MZI和OA-MZI两种级联方案的PTF曲线完全重合,相位共轭功能不改变PTF曲线形状。在输入功率较低时,三种再生方案的前两个再生工作点基本一致;输入功率较高时,由于MZI芯片的TPA损耗影响突显,两个MZI芯片级联后势必会降低整个级联系统的输出功率。因此,在第三个再生工作点,单级MZI的输出功率更高。

光发射机、再生器和光接收机三部分构成,如图6所示。

光发射机用于产生QPSK信号,并进行劣化。具体实施过程为:1550 nm的连续(CW)光源和任意波形发生器(AWG)分别与IQ调制器进行光电连接,产生QPSK光信号;后接的掺铒光纤放大器(EDFA)和可调衰减器分别用于施加ASE噪声,以调节输入劣化信号的信噪比(SNR),并使输入信号光功率对准再生器的第一个再生工作点。相干接收机将QPSK光信号转化为电信号,恢复QPSK星座图,并用于计算信号的误差向量幅度(EVM)。根据输入到再生器和从再生器输出的信号EVM值( $A_{in}^{EVM}$ 和 $A_{out}^{EVM}$ ),可计算再生器的噪声抑制比(NRR,  $R_{NR}$ )性能<sup>[9,33]</sup>,即 $R_{NR} = 20\lg(A_{in}^{EVM}/A_{out}^{EVM})$ ,该数值大小与非线性介质选取的长度计算单位有一定关系,反映的是输入和输出信号EVM改善的相对情况。

图7给出了三种再生方案的QPSK噪声抑制比随

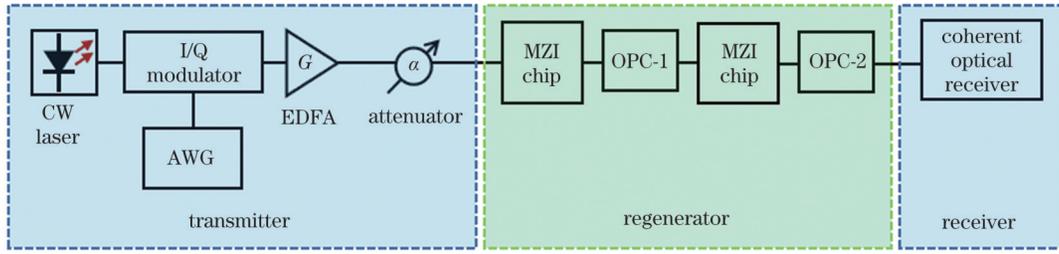


图 6 QPSK 信号再生器仿真系统

Fig. 6 Simulation system of regenerator for QPSK signal

输入信噪比  $R_{SN,in}$  的变化曲线,可以看出,随着输入信噪比的提高,各方案的 NRR 曲线越来越接近,最高可达 2.8 dB,其中 OPC-MZI 再生方案的 NRR 性能最好。当输入 QPSK 信号的信噪比较低时,OA-MZI 再生方案的 NRR 性能低于单级 MZI 芯片方案,当输入信噪比大于 22 dB 时两者开始重合。当 QPSK 信号的输入信噪比为 16 dB 时,OPC-MZI 再生方案的 NRR 为 1.9 dB,而单级 MZI 的 NRR 只有 0.9 dB,前者比后者提高了 1 dB。若 MZI 再生器的 NRR 同样达到 1.9 dB,则对应的输入信噪比需达到 20.5 dB。显然,OPC-MZI 再生方案降低了输入信噪比的要求,能够在更低输入信噪比下获得所需再生性能。换句话说,这 1 dB 的 NRR 提升,相当于降低了 4.5 dB 的输入信噪比要求。

当 QPSK 信号的输入信噪比为 16 dB 时,再生前后的 QPSK 星座图如图 8 所示。根据再生前后 QPSK 信号的星座图,可计算信号的平均相位扰动。具体步骤是:(1) 根据再生前后 QPSK 信号的星座图,求出信号再生前后每个星座点的相角;(2) 针对每一个星座点,计算再生前后相角的偏离值(相位扰动);(3) 对所有星座点的相角偏离求算术平均值,从而得到 QPSK 信号再生后的平均相位扰动。设星座点总数为  $N$ ,用

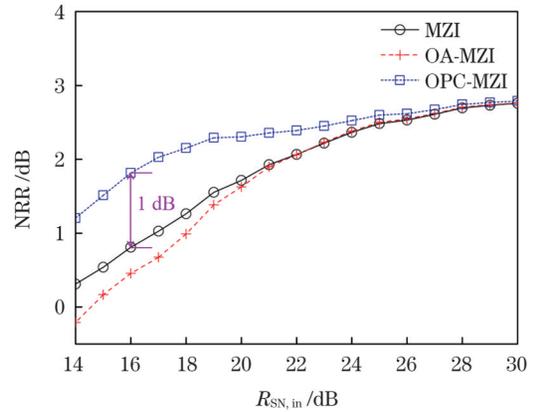


图 7 三种再生方案的 NRR 曲线

Fig. 7 NRR curves of QPSK signal for three regeneration schemes

$\angle E_i$  和  $\angle E'_i$  分别表示第  $i$  个星座点再生前后光场复振幅  $E_i$  的相角,则再生信号的平均相位扰动为

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\angle E'_i - \angle E_i| \quad (9)$$

根据图 8 的仿真数据,可计算出单级 MZI 芯片和 OPC-MZI 方案的平均相位扰动分别为  $5.7^\circ$  和  $0.07^\circ$ ,其相位保持性能与图 5(b) 的计算结果吻合。

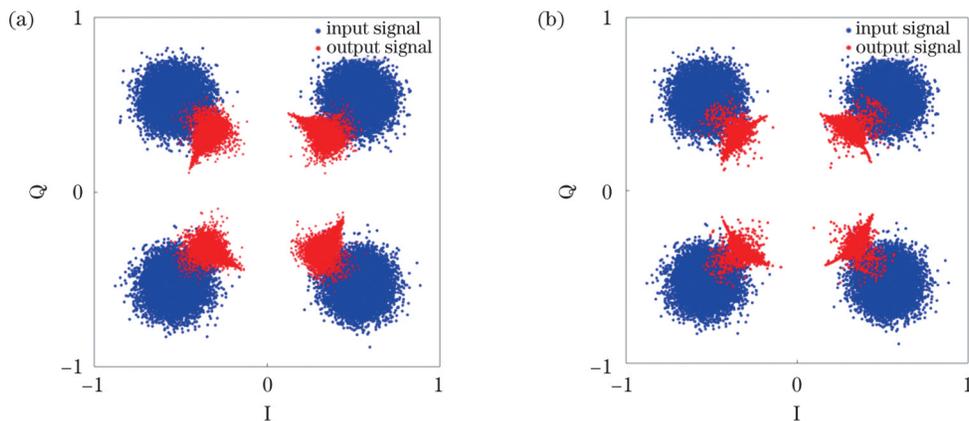


图 8 输入信噪比为 16 dB 时再生前后的 QPSK 星座图。(a) 单级 MZI 芯片;(b) OPC-MZI 方案

Fig. 8 Constellation diagrams of QPSK signal before and after regeneration at input signal-to-noise ratio of 16 dB. (a) Single MZI chip; (b) OPC-MZI scheme

## 6 讨 论

### 6.1 OPC 对相位扰动的抑制作用

MZI 结构单元的再生性能取决于 MZI 上臂引起

的非线性相移  $\phi_1$  和下臂引起的线性相移  $\phi_2$ , 以及 MZI 中两个干涉光束的光场振幅  $A_1 = \sqrt{(1 - \rho_1)(1 - \rho_2)T_1}$  和  $A_2 = \sqrt{\rho_1\rho_2T_2}$ , 它们分别对应

非线性和线性相移分量。前面我们研究了两个完全相同 MZI 再生芯片用 OPC 级联而成的相位保持幅度再生方案性能,这意味着在工作点附近  $A_1 \approx A_3, A_2 = A_4$ , 则式(1)和式(4)可分别化简为

$$E_1 = (A_1 \cos \phi_1 - A_2)(1 + i \tan \theta_1) E_{in}, \quad (10)$$

$$E_{out} = A(1 + i \tan \theta_2) E_{in}, \quad (11)$$

式中:  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为第一级和第二级 MZI 芯片的输出光场相移, 它们满足

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \phi_1}{\cos \phi_1 - A_2/A_1}, \quad \tan \theta_2 = \frac{B}{A},$$

$$A = \sqrt{G_1 G_2} [A_1^2 \cos(\phi_1 - \phi_3) - A_1 A_2 \cos \phi_3 - A_1 A_2 \cos \phi_1 + A_2^2],$$

$$B = \sqrt{G_1 G_2} [A_1^2 \sin(\phi_1 - \phi_3) + A_1 A_2 \sin \phi_3 - A_1 A_2 \sin \phi_1]. \quad (12)$$

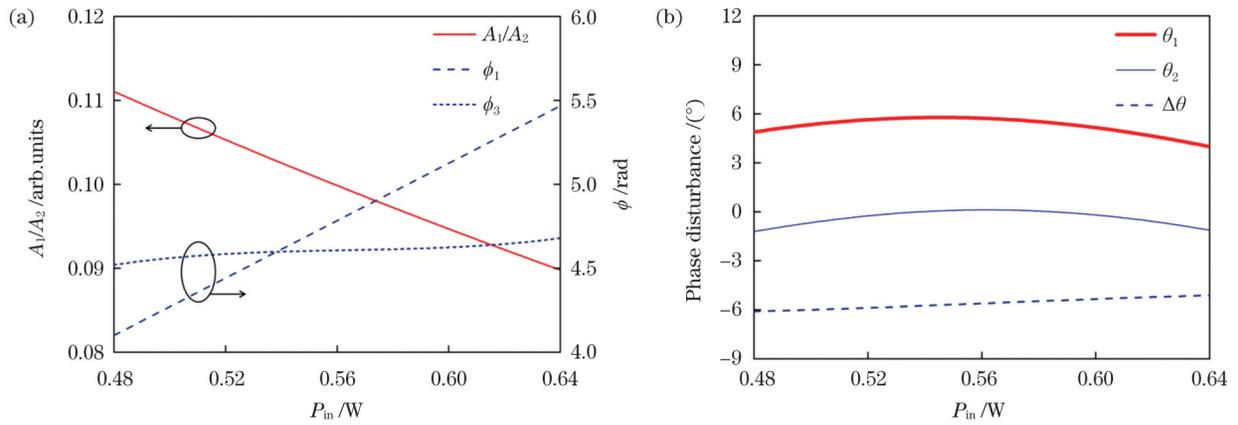


图 9 不同参数的输入功率依赖曲线。(a)  $A_1/A_2, \phi_1$  和  $\phi_3$ ; (b)  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$

Fig. 9 Curves of different parameters depending on input power. (a)  $A_1/A_2, \phi_1$  and  $\phi_3$ ; (b)  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$

## 6.2 波导损耗的影响

考虑到硅线波导加工时的工艺误差,实际损耗可能大于设计值。根据式(10)和式(11)以及光功率与复振幅的关系  $P = |E|^2$ , 可求出 PTF 的振荡周期为  $T_{PTF} = 2\pi / [\gamma P_{in}(1 - \rho_1)L_{eff}]$ 。图 10 给出了波导损耗系数增加至 0.5 dB/cm 时, OPC-MZI 再生器的相位扰动性能, 其中优化后的结构参数如下: MZI 中两个光耦合器的耦合效率分别为 30% 和 85%, 级间匹配放大器增益为 3.9, 其他参数保持不变。由图 10 可知: (1) 当波导损耗增大时,  $L_{eff}$  减小, PTF 的振荡周期变大, 工作点右移, 所需要的输入功率变高, 工作点的相位扰动也因输入功率变高而增大; (2) 通过优化输入和输出端耦合器的分光比和 OPC 增益等参数, 仍可实现近乎完美的相位保持。

需要指出的是, 采用级联 OPC 的方式可以灵活匹配两级再生单元的工作点, 不仅适用于硅基芯片制造过程中工艺误差引起的 MZI 芯片差异, 也适用于其他不同再生单元的级联情况。因此, 本文提出的级联 OPC 再生方案具有普适性。

下面从幅度和相位两个方面比较分析单级 MZI 芯片方案与 OPC-MZI 再生方案的相位保持能力。本质上讲, 再生器具有相位保持功能, 即意味着输出光场的相移  $\theta_1$  和  $\theta_2$  尽可能为 0。对于单级 MZI 芯片方案, 当满足  $A_1/A_2 \ll 1$ , 即 MZI 结构中发生双光束干涉的非线性相移所占的比例远低于线性相移时, 输出光场的相移很小, 这也是传统相位保持方案的实现原理。图 9(a) 画出了第一再生工作点附近  $A_1/A_2$  及  $\phi_1$  和  $\phi_3$  的变化曲线, 此范围内  $A_1/A_2 \leq 0.111$ ,  $\phi_3$  对输入功率的依赖程度远小于  $\phi_1$ , 这也是第一级 MZI 实现相位保持的结果。为了表明级联 OPC 对相位扰动的抑制作用, 图 9(b) 给出了两种再生方案的相移差  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$  随输入功率的变化曲线。图 9(b) 表明, 级联再生方案中引入 OPC 可以很好地补偿第一级 MZI 的残余相位扰动, 因此 OPC-MZI 再生方案的相位保持能力优于单级 MZI 芯片。

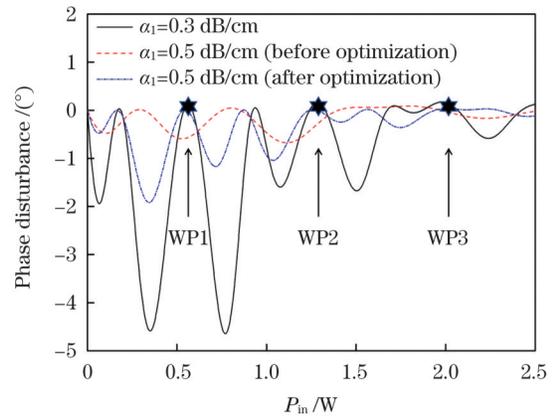


图 10 波导损耗系数增加至 0.5 dB/cm 时优化前后再生器的相位扰动曲线

Fig. 10 Phase disturbance curves of regenerator before and after optimization when waveguide loss coefficient is increased to 0.5 dB/cm

## 7 结 论

本文提出了 OPC-MZI 再生方案, 采用 OPC 将两个 MZI 再生单元级联, 实现相位偏移补偿。为了分

析 OPC-MZI 再生方案的相位保持性能,设计了硅基 MZI 再生芯片作为级联的再生单元,第一工作点功率为 0.564 W。在此基础上,比较了三种再生器结构的相位保持性能,其中 OPC-MZI 再生方案在工作点附近有最小的相位扰动  $0.1^\circ$ ,实现了近乎完美的相位保持,优于单级 MZI 芯片方案和 OA-MZI 方案。通过搭建 QPSK 信号仿真系统,验证了 OPC-MZI 再生方案的相位保持幅度再生功能,当输入信噪比为 16 dB 时,与单级 MZI 再生芯片相比,OPC-MZI 再生方案的 NRR 可提高 1 dB,相位扰动也由  $5.7^\circ$  降至  $0.07^\circ$ 。最后,计算分析了 OPC-MZI 再生方案可实现完美相位保持的工作过程,并指出级联 OPC 再生方案的普适性。

### 参 考 文 献

- [1] Carena A, Curri V, Poggiolini P, et al. Maximum reach versus transmission capacity for terabit superchannels based on 27.75-GBaud PM-QPSK, PM-8QAM, or PM-16QAM[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(11): 829-831.
- [2] 杨雄伟, 赵峰. 基于开关键控调制的光载太赫兹正交相移键控信号产生[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0806002.  
Yang X W, Zhao F. Generation of terahertz quadrature phase shift keying signals over fiber with on-off-keying modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0806002.
- [3] Winzer P J, Essiambre R J. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4711-4728.
- [4] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24190-24239.
- [5] 蒙建宇, 张洪波, 张敏, 等. 基于 IPCA-DNN 算法的光纤非线性损伤补偿[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2406002.  
Meng J Y, Zhang H B, Zhang M, et al. Fiber nonlinear impairments compensation based on IPCA-DNN algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2406002.
- [6] 吴瑞, 杨飞, 孙延光, 等. 基于光纤传输的相位噪声净化与绝对一致相位同步[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2106001.  
Wu R, Yang F, Sun Y G, et al. Phase noise purification and absolutely consistent phase synchronization based on optical fiber transmission[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2106001.
- [7] Willner A E, Khaleghi S, Chitgarha M R, et al. All-optical signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 660-680.
- [8] Willner A E, Fallahpour A, Alishahi F, et al. All-optical signal processing techniques for flexible networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 21-35.
- [9] Zhang S Q, Wu B J, Sun F, et al. Optimization method for universal NOLM-based phase-preserving amplitude regenerator with application to Att-NALM scheme[J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126188.
- [10] Zhang S Q, Wu B J, Wen F. Phase-preserving NALM regenerator with lower input power by optimizing the nonreciprocal phase shifter[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(3): 492-498.
- [11] Striegler A G, Meissner M, Cvecek K, et al. NOLM-based RZ-DPSK signal regeneration[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 639-641.
- [12] Roethlingshoefer T, Richter T, Schubert C, et al. All-optical phase-preserving multilevel amplitude regeneration[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27077-27085.
- [13] Roethlingshoefer T, Richter T, Schubert C, et al. Cascaded phase-preserving multilevel amplitude regeneration[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 31729-31734.
- [14] Guo B, Wen F, Wu B J, et al. All-optical multilevel amplitude regeneration based on polarization-orthogonal continuous-wave-light-assisted nonlinear-optical loop mirror (PC-NOLM) subsystem[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 149666-149671.
- [15] Wen F, Wu B J, Qiu K, et al. Conjugate nonlinear-optical loop mirror (Conj-NOLM)-based phase-preserving multilevel amplitude regenerator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19940-19949.
- [16] Gordon J P, Mollenauer L F. Phase noise in photonic communications systems using linear amplifiers[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(23): 1351-1353.
- [17] Sorokina M, Sygletos S, Ellis A, et al. Regenerative Fourier transformation for dual-quadrature regeneration of multilevel rectangular QAM[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3117-3120.
- [18] Wen F, Tsekrekos C P, Geng Y, et al. All-optical multilevel amplitude regeneration in a single nonlinear optical loop mirror[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12698-12706.
- [19] Guo B, Wu B J, Wen F, et al. All-optical phase-preserving amplitude regeneration of highorder modulated signals based on Mach-Zehnder interferometers[C]//*Laser Science and Technology* 2019, November 11-14, 2019, Wuhan, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2019: JW4A.11.
- [20] Jiang X R, Wu B J, Guo B, et al. A novel Mach-Zehnder-interferometer regenerator for any level number of optical PAM signals using cross phase modulation of orthogonally polarized light[J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124840.
- [21] Guo B, Wu B J, Wang Y X, et al. On-chip Mach Zehnder interferometer-based all-optical amplitude regenerator for optical 16-QAM signals[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27683-27695.
- [22] Long Y, Wang A D, Zhou L J, et al. All-optical wavelength conversion and signal regeneration of PAM-4 signal using a silicon waveguide[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7158-7167.
- [23] 陈皓. 多电平幅度全光再生技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.  
Chen H. Research on all-optical multilevel amplitude regeneration technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [24] 易小刚, 刘毅. 两阶优化增强光学相位共轭技术补偿光纤非线性[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(19): 1906001.  
Yi X G, Liu Y. Enhanced optical phase conjugation technique for fiber nonlinearity mitigation by two-stage optimization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 1906001.
- [25] Radic S, Jopson R M, McKinstrie C J, et al. Wavelength division multiplexed transmission over standard single mode fiber using polarization insensitive signal conjugation in highly nonlinear optical fiber[C]//2003 Optical Fiber Communications Conference, March 23, 2003, Atlanta, Georgia, USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2003: PD12.
- [26] Stephens M F C, Tan M, Phillips I D, et al. 1.14 Tb/s DP-QPSK WDM polarization-diverse optical phase conjugation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11840-11848.
- [27] Herrera J, Ramos F, Marti J. Nonlinear distortion generated by DSF-based optical-phase conjugators in analog optical systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(9): 1688-1693.
- [28] Ramos F, Marti J. Experimental comparison of DSF- and SOA-based optical phase conjugator performance in ASE-limited microwave optical links[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, 29(1): 31-33.
- [29] 刘学君, 栾海英, 戴波, 等. 中间链路光学相位共轭补偿相干光正交频分复用系统的光纤非线性损伤[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s105012.  
Liu X J, Luan H Y, Dai B, et al. Fiber nonlinearity impairment for coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing systems with midlink optical phase conjugation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s1): s105012.
- [30] Umeki T, Kazama T, Sano A, et al. Simultaneous nonlinearity mitigation in  $92 \times 180$ -Gbit/s PDM-16QAM transmission over

- 3840 km using PPLN-based guard-band-less optical phase conjugation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16945-16951.
- [31] 周雯静. 通过光学相位共轭抑制光纤通信非线性效应的性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- Zhou W J. A research on nonlinear effect suppression of optical fiber communication by optical phase conjugation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [32] Yin L H, Agrawal G P. Impact of two-photon absorption on self-phase modulation in silicon waveguides[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(14): 2031-2033.
- [33] Guo B, Wu B J, Wen F, et al. Cascaded nonlinear-optical loop mirror-based all-optical PAM regenerator[J]. *Applied Sciences*, 2019, 10(1): 206.

## Research on Phase-Preserving Performance of OPC-Cascaded MZI Regeneration Chips

Wang Yaxin, Wu Baojian\*, Guo Biao, Yan Wei, Tang Yu, Wen Feng, Qiu Kun

*Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China*

### Abstract

**Objective** With the rapid development of modern communication networks, high-order modulation formats such as quadrature phase shift keying (QPSK) and quadrature amplitude modulation (QAM) have been utilized widely for large capacity and high-speed data transmission. However, signals in such modulation formats are easily degraded by channel crosstalk and amplified spontaneous emission (ASE) noise relative to binary signals. In this case, all-optical regeneration technology is helpful to improving optical signal-to-noise ratio (OSNR) directly in the optical domain. All-optical amplitude or phase regeneration can be usually achieved by some optical configurations with nonlinear effects, such as Mach-Zehnder interferometer (MZI), nonlinear optical loop mirror (NOLM), phase sensitive amplifier (PSA) and semiconductor optical amplifier (SOA). In the process of all-optical amplitude regeneration, the conversion of amplitude noise to phase disturbance is always introduced to certain extent. For this reason, phase-preserving amplitude regeneration (PPAR) schemes for QPSK or QAM signals are put forward. Unfortunately, there still exists phase disturbance (larger than  $3.8^\circ$ ). The objective of our work is to present a perfect PPAR scheme with very low phase disturbance (close to  $0^\circ$ ), especially by silicon-based MZI regeneration chips.

**Methods** Most of amplitude regeneration schemes are able to be modeled by a MZI configuration. In this paper, we propose a phase-preserving regeneration scheme of MZI cascading optical phase conjugator (OPC-MZI) to preserve the optical phase of input signals with very low phase disturbance. By analyzing the transmission characteristics of the input signals in the whole cascade system, the silicon-based MZI regeneration chip is designed and optimized as a regeneration unit. Then, the power and phase transfer characteristics of three different regeneration schemes based on the same designed silicon-based MZI regeneration chip are compared. Further, the feasibility of OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme is verified by simulation on the QPSK modulation signals. Finally, the optical light field output from the OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme is derived, and is utilized to explain the phase preserving mechanism from two aspects of amplitude and phase. In addition, we discuss the influence of the loss coefficient of silicon wire waveguides on phase-preserving amplitude regeneration.

**Results and Discussions** For OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme (Fig. 1), we optimize the structural parameters of silicon-based MZI chip by the power transfer function (PTF) and amplitude-to-phase conversion curves. The phase preserving performance of OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme is analyzed from both amplitude and phase. It is shown that the OPC-MZI phase-preserving regeneration system has a phase disturbance close to  $0^\circ$  at every working point, that is, the so-called perfect phase preserving can be well achieved (Fig. 5). Further, the feasibility of OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme is verified by simulation on the QPSK modulation signal. The parameter of noise reduction ratio (NRR) is defined as the ratio of the input to output error vector magnitudes (EVMS). The simulation results show that, in comparison with the single MZI regeneration chip (Figs. 7 and 8), when the input signal-to-noise ratio (SNR) is 16 dB, the OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme has a larger NRR by 1 dB and the phase disturbance is also reduced to  $0.07^\circ$ . Finally, we discuss the applicability of the OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme when the loss coefficient of silicon wire waveguide increases. It should be pointed out that, when the working points between two MZI regeneration units perfectly match with each other, the perfect phase preserving performance can still be achieved even if the waveguide loss coefficient is increased (Fig. 10).

**Conclusions** To further eliminate the residual phase disturbance of PPAR schemes available now, we propose a phase-preserving regeneration scheme of OPC-MZI, capable of perfectly preserving the optical phase of input signals. In order to analyze the phase preserving performance of OPC-MZI regeneration scheme, a silicon-based MZI regeneration chip is designed and optimized as the cascade regeneration unit, and the input power at the first working point is set to 0.564 W. Among three regenerators considered here, the OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme has a minimum phase disturbance of  $0.1^\circ$  at the first working point, much

better than the single-MZI chip scheme and the MZI cascading optical amplifier (OA) scheme. Then, we simulate the OPC-MZI phase-preserving regeneration scheme for QPSK modulation signals. The simulation results show that, at the input SNR of 16 dB, the OPC-MZI phase-preserving scheme has a larger NRR and the phase disturbance is also reduced to  $0.07^\circ$  compared with the single MZI regeneration chip. At the end of this paper, the phase preserving mechanism of OPC-MZI regeneration scheme is analyzed, and the universality of cascade OPC regeneration scheme is also pointed out.

**Key words** optical communications; all-optical regeneration; optical phase conjugator; Mach-Zehnder interferometer; multi-level modulation signal