光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.02.006

一种新型光域 PAM4 调制器及关键性能建模分析

陈　莹[1,2]，刘丰满[1,2,3]*，隗　娟[1,2]，何慧敏[1,2,3]，
薛海韵[1,2,3]，孙　瑜[1,2,3]，郑　奇[1,2]，王启东[1,2,3]

（1. 中国科学院微电子研究所，北京 100029；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 华进半导体封装先导技术研发中心有限公司，江苏 无锡 214135）

摘　要： 四级脉冲幅度调制（PAM4）在高速串行链路系统中的地位日益提高，受到越来越多的关注。传统的行波马赫-曾德尔调制器（TWMZM）的分光比为 1∶1，文章提出了一种非对称光强的行波马赫-曾德尔调制器（Asymmetric Power TWMZM，AP-TWMZM），并对输入端分光比进行独立推算，得到分光比的值为 4∶1。Lumerical 软件的建模仿真结果表明，在插入损耗和消光比与 TWMZM 相当的情况下，AP-TWMZM 具有更高的调制效率和更好的线性度，其线性度高达 0.948。

关键词： 行波调制器；分光比；调制效率；线性度；链路

中图分类号： TN761　**文章编号：** 1001－5868(2021)02－0185－06

A Novel Optical Domain PAM4 Modulator and Its Key Performance Modeling Analysis

CHEN Ying[1,2], LIU Fengman[1,2,3], WEI Juan[1,2], HE Huimin[1,2,3],
XUE Haiyun[1,2,3], SUN Yu[1,2,3], ZHENG Qi[1,2], WANG Qidong[1,2,3]

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN;
3. National Center for Advanced Packaging, Wuxi 214135, CHN)

Abstract: Four-level pulse amplitude modulation (PAM4) plays a more and more important role in high-speed serial link systems and receives more and more attention. The traditional traveling wave Mach-Zehnder modulator (TWMZM) has a spectral ratio of 1∶1. In this paper, a traveling wave Mach-Zehnder modulator with asymmetric light intensity (AP-TWMZM) is proposed. Its optical power spectral ratio at the input side is 4∶1. The PAM4 optical signal is generated by the upper and lower arms modulation to realize the optical domain PAM4 modulation. Modeling and simulation with the Lumerical software shows that compared with traditional TWMZM, AP-TWMZM has higher modulation efficiency and its linearity is as high as 0.948.

Key words: traveling wave modulator; spectral ratio; modulation efficiency; linearity; link

0　引言

随着光通信技术的迅猛发展，大容量、高速率和低损耗的通信方式进入了人们的生活[1]。人们不再依赖传统的两级调制，而是将注意力集中在高阶调制上，如 PAM4（四级脉冲幅度调制），PAM4 信号在短距离数据传输方面具有很强的竞争力。相对不归零码信号（NRZ），PAM4 信号每个符号对应两比特，可以有效地将传输速度提高一倍，从而降低带宽要求和色散损耗。它可以作为成本敏感和色散敏感链路（如以太网光互连和 PON 应用）的调制候选。PAM4 信号包含 4 种电平脉冲幅度调制，与传统

收稿日期：2020－12－24.

* **通信作者：**刘丰满　**E-mail：** liufengman@ime.ac.cn

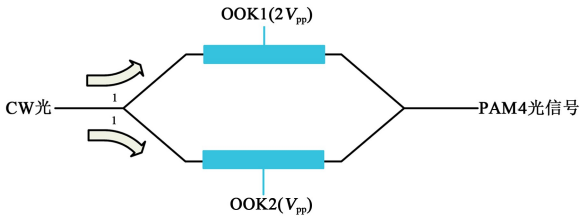
NRZ 信号相比，可以显示更多的比特逻辑信息[2]。因此，PAM4 信号越来越受欢迎。

硅基光子学具有可靠的 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)兼容工艺，将有源和无源光学器件高密度地集成在一个很小的空间内，为光收发器提供了良好的光子集成平台。硅微环调制器和马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator，MZM)均可用于产生 PAM4 光信号。但是，硅微环调制器存在热不稳定性的问题，在发射器设计中需要额外的电路或热控制器来进行波长位移补偿[3]。分段式马赫-曾德尔调制器(MEMZM)[4-5]需要个性化定制，调控起来相对繁琐。并联式马赫-曾德尔调制器(DPMZM)[6]的尺寸和插入损耗相对较大，电压调控也比较复杂。基于硅材料的行波马赫-曾德调制器(TWMZM)具有集成度高、插入损耗小、驱动电压小等优点，被认为是最具应用前景的高速硅光调制器，已成为硅光子学领域的研究热点。

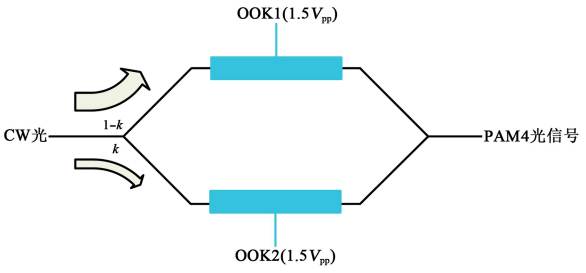
目前已有的光域 PAM4 行波马赫-曾德尔调制器，由两种峰峰值不同(二倍关系)的电开关键控信号(OOK)分别驱动上下两臂进行调制[7]，但调控两种峰峰值不同的 OOK 信号还是比较复杂。本文提出一种非对称光强的行波马赫-曾德尔调制器(Asymmetric Power TWMZM，AP-TWMZM)，经理论推算，其输入端上下两臂按 4∶1 分光，采用两种峰峰值相同的 OOK 电信号驱动能够产生高线性度的 PAM4 光信号。等幅的 OOK 信号调控更简单，更易于实现高密度的光电集成。通过 Lumerical 软件对这两种调制器进行建模和链路仿真，分析对比其电眼图强度、线性度、调制效率、插入损耗、消光比、带宽等参数。仿真结果表明，AP-TWMZM 具有更高的调制效率和更好的线性度，其线性度高达 0.948。

1 调制器结构

图 1(a)和图 1(b)分别为 TWMZM 和 AP-TWMZM 的结构示意图。TWMZM 采用两个不同峰峰值电压的电开关键控信号(OOK)驱动两个调制臂，输入端分光比为 1∶1。AP-TWMZM 采用两个相同峰峰值电压的 OOK 信号，输入端分光比是不对称的，设为(1−k)∶k。为了更好地比较这两种调制器，仿真过程中激光器输入的光功率和调制器两臂所加的总电压 V_{pp} 保持一致。



(a) TWMZM 结构

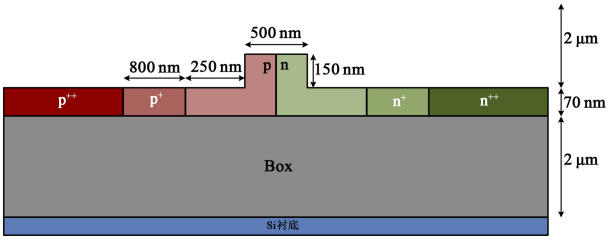


(b) AP-TWMZM 结构

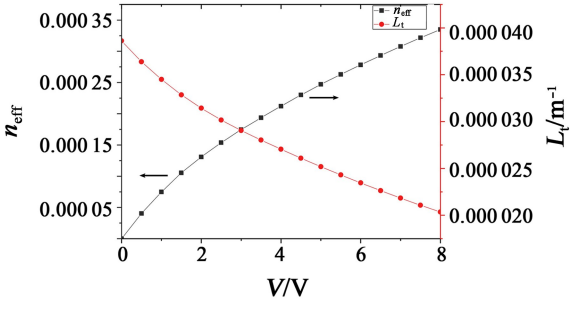
图 1 两种调制器结构示意图

1.1 相移器结构

两种调制器采用相同的相移器结构和长度，图 2(a)是硅电光相移器的横截面示意图。硅脊波导的宽度为 500 nm，厚度为 150 nm。横截面中 p^{++} 和 n^{++} 区域为重掺杂区域，用于和金属接触形成良好的欧姆接触。p^{+} 和 n^{+} 区域为中掺杂区域，位于重掺杂与轻掺杂区域之间，用于减小衬底区域的电阻以及避免过高的光损耗。p 和 n 区域为轻掺杂区域，用于形成 pn 结耗尽区，通过等离子色散效应与光相互作用。n^{++} 和 p^{++} 区域分别连接到行波电极



(a) 横截面示意图



(b) 有效折射率和传播损耗随电压变化曲线

图 2 硅电光相移器结构和特性曲线

的信号线和地线。通过改变施加在电极上的电压，改变 pn 结处的载流子浓度，进而改变光的折射率，实现电光调制。本文设计的调制器相移器长度均为 2 000 μm。图 2(b)显示了 Lumerical Device 建模仿真中该相移器的有效折射率 n_{eff} 和传输损耗 L_{t} 随电压的变化曲线，可以看出，折射率随电压的增大而增大并逐渐平缓，传输损耗随电压的增大而减小。

1.2　分光比

调制器中每个调制臂包含一个高速相移器，单位长度的相移量为 $\Delta\varphi$(rad/μm)，单位长度的光学损耗为 α(μm)，调节与上、下相移器相连的波导长度，引入波导长度差使两臂产生一个初始相位差 φ_0，L 为调制器有源区长度，调制器的输入光场为 E_{in}，假设上下两臂的分光比为 $(1-k):k$，经过电光调制后调制器两臂的光场(E_{arm1} 和 E_{arm2})和最终输出光场(E_{out})为[8]

$$\begin{bmatrix} E_{\mathrm{arm1}} \\ E_{\mathrm{arm2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} \\ \sqrt{k} \end{bmatrix} \cdot E_{\mathrm{in}} \left[1 + \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\varphi_0 \pm \Delta\varphi)}\right] \mathrm{e}^{-\frac{\alpha}{2}L} \quad (1)$$

$$E_{\mathrm{out}} = E_{\mathrm{arm1}} + E_{\mathrm{arm2}} \quad (2)$$

调制器的输出光强 I_{out} 包含四个不同的值，从大到小依次表示为 I_{out11}，I_{out10}，I_{out01}，I_{out00}，与其对应的光场 E_{out} 关系为

$$I_{\mathrm{out}} = E_{\mathrm{out}} \cdot E_{\mathrm{out}}^{*} \quad (3)$$

为了获得良好的线性度，需要准确推算两臂间的输入光功率之比，建立如下方程：

$$\begin{bmatrix} I_{\mathrm{out1}} - I_{\mathrm{out10}} \\ I_{\mathrm{out10}} - I_{\mathrm{out01}} \\ I_{\mathrm{out01}} - I_{\mathrm{out00}} \end{bmatrix} \cong \frac{1}{3}(I_{\mathrm{out11}} - I_{\mathrm{out00}}) \quad (4)$$

通过计算，确定 k 值为 0.2，即调制器输入端分光比为 4∶1。

2　光电链路仿真

2.1　仿真链路

如图 3，在发送端激光器输出 1 550 nm，10 mW 的光，经过光栅耦合器进入调制器，脉冲码型发生器(PPG)将两个独立的 OOK 信号分别施加到调制器上臂和下臂，进行脉冲幅度调制，调制后的光信号通过光栅输出，再通过光纤传输到探测器。在接收端，探测器(PD)将接收到的光信号转换成强弱变化的电流信号，放大器再将接收到的电流信号转换成电压信号。电示波器能够观察电信号眼图，误码仪用来分析信号传输的质量，以分析调制器的性能。

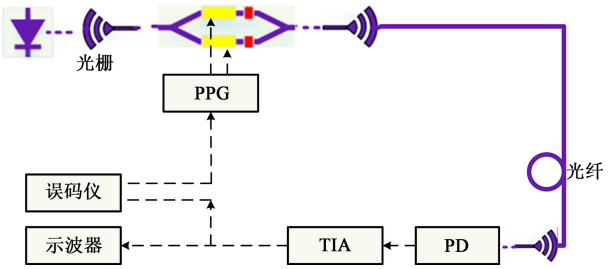
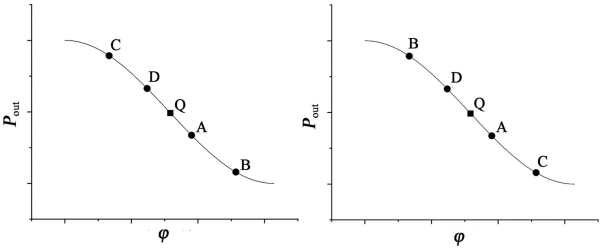


图 3　仿真链路示意图

2.2　驱动条件

图 4 给出了调制器输出光功率 P_{out} 与两臂相位差之间的关系，这条曲线类似于余弦函数，Q 点是 MZM 传输曲线的正交点，通过上下两臂的波导长度差引入的初始相位 φ_0 位于正交点 Q 点附近，调制区域在曲线的线性区，使相邻点之间间距尽可能相等。点 A，B，C，D 表示 PAM4 的四个电平，TWMZM 和 AP-TWMZM 输出 PAM4 信号的四个电平的对应顺序如图 4(a)和(b)所示。表 1 和表 2 给出了 TWMZM 和 AP-TWMZM 的四种状态和驱动条件。



(a)　TWMZM 传输曲线　　(b)　AP-TWMZM 传输曲线

图 4　调制器传输曲线

表 1　TWMZM 和 AP-TWMZM 的 PAM-4 信号电平

调制器	上臂电压	下臂电压	电平	对应点
TWMZM	$V_{\mathrm{b1}}+V_{\mathrm{pp1}}$	V_{b2}	3	C
	V_{b1}	$V_{\mathrm{b2}}+V_{\mathrm{pp2}}$	2	D
	$V_{\mathrm{b1}}+V_{\mathrm{pp1}}$	$V_{\mathrm{b2}}+V_{\mathrm{pp2}}$	1	A
	V_{b1}	$V_{\mathrm{b2}}+V_{\mathrm{pp2}}$	0	B
AP-TWMZM	$V_{\mathrm{b1}}+V_{\mathrm{pp1}}$	V_{b2}	3	B
	$V_{\mathrm{b1}}+V_{\mathrm{pp1}}$	$V_{\mathrm{b2}}+V_{\mathrm{pp2}}$	2	D
	V_{b1}	V_{b2}	1	A
	V_{b1}	$V_{\mathrm{b2}}+V_{\mathrm{pp2}}$	0	C

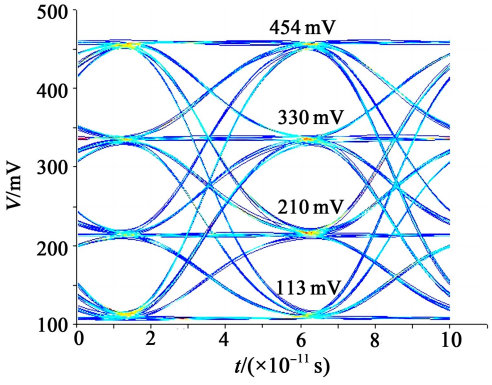
表 2　不同调制器产生 PAM-4 光信号的驱动条件

电压	1	2
直流偏压	$V_{\mathrm{b1}}=1.5$ V	$V_{\mathrm{b1}}=0$ V
	$V_{\mathrm{b2}}=1.5$ V	$V_{\mathrm{b2}}=2$ V
电压峰峰值	$V_{\mathrm{pp1}}=1$ V	$V_{\mathrm{pp1}}=1.5$ V
	$V_{\mathrm{pp2}}=2$ V	$V_{\mathrm{pp2}}=1.5$ V
初始相位	1.505π	1.738π

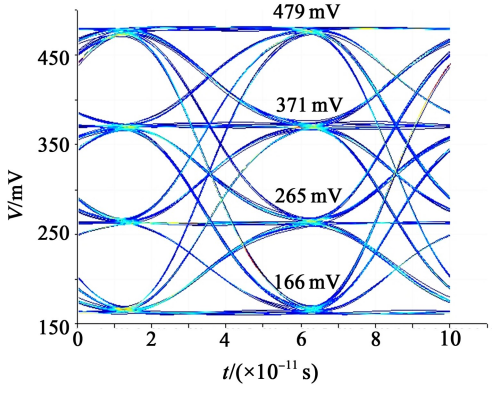
2.3 仿真分析

2.3.1 信号强度

电眼图眼高表征输出信号的强度，通过 Lumerical Interconnect 进行链路仿真得到 TWMZM 和 AP-TWMZM 的 PAM-4 眼图，激光器的输入光功率是 10 mW，如图 5 所示。TWMZM 仿真眼图的最高点位于 454 mV，最低点位于 113 mV，电信号强度为 341 mV，AP-TWMZM 仿真眼图的最高点位于 479 mV，最低点位于 166 mV，电信号强度为 313 mV。仿真结果表明，TWMZM 和 AP-TWMZM 输出电信号强度相差很小。



(a) TWMZM 电眼图



(b) AP-TWMZM 电眼图

图 5 PAM4 眼图

2.3.2 线性度

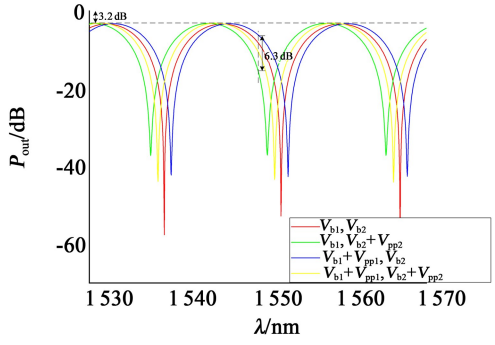
线性度对 PAM4 信号非常重要，良好的线性度可以保证信号高质量的传输。常用电平分离失配比(RLM)来表征信号的线性度。RLM 越接近 1，PAM4 信号的线性度越好。IEEE802.3bs 要求电气接口 $RLM \geqslant 0.92$。其定义如下：

$$RLM = \frac{3\min(V_3 - V_2, V_2 - V_1, V_1 - V_0)}{V_3 - V_0} \quad (5)$$

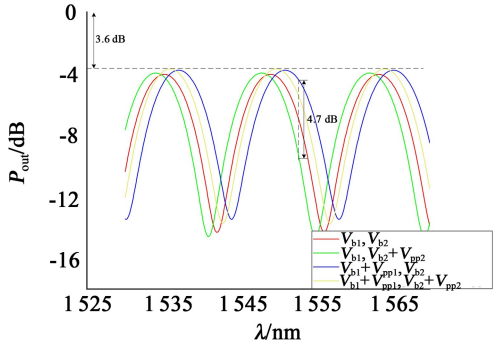
式中，V_0，V_1，V_2，V_3 分别表示从小到大的四个电平值，与图 5 中数值对应，经计算，TWMZM 的 RLM 为 0.854，AP-TWMZM 的 RLM 为 0.948。AP-TWMZM 的线性度明显优于 TWMZM，高达 0.948，满足 IEEE802.3bs 的要求。而 TWMZM 还需要额外的校正和补偿，才能使线性度满足要求。

2.3.3 插入损耗和消光比

在调制器两臂之间引入 40 μm 的波导长度差，得到 TWMZM 和 AP-TWMZM 的传输频谱。图 6 为不同直流电压下 TWMZM 和 AP-TWMZM 的光传输频谱。如图 6(a)，在 1 550 nm 处，“$V_{b1}+V_{pp1}$，V_{b2}”曲线纵坐标值为 PAM4 信号输出功率的最大值，“V_{b1}，$V_{b2}+V_{pp2}$”曲线纵坐标值为 PAM4 信号输出功率的最小值，两者之差即为消光比(ER)。输入功率和最大输出功率之间的差为插入损耗。因此，TWMZM 的消光比为 6.3 dB，插入损耗为 3.2 dB。如图 6(b)，在 1 550 nm 处，“$V_{b1}+V_{pp1}$，V_{b2}”曲线纵坐标值是 PAM4 信号输出功率的最大值，“V_{b1}，$V_{b2}+V_{pp2}$”曲线纵坐标值是 PAM4 信号输出功率的最小值，AP-TWMZM 的消光比为 4.7 dB，插入损耗为 3.6 dB。两种调制器的插入损耗相差很小，且大小关系与眼图仿真中得到的结果一致。



(a) TWMZM 传输频谱



(b) AP-TWMZM 传输频谱

图 6 四种电平下调制器的传输频谱

2.3.4 调制效率

半波电压(V_π)是使调制器的相位差由 0 变化到 π 所施加的电压。L_π 是调制器实现相位移动 π

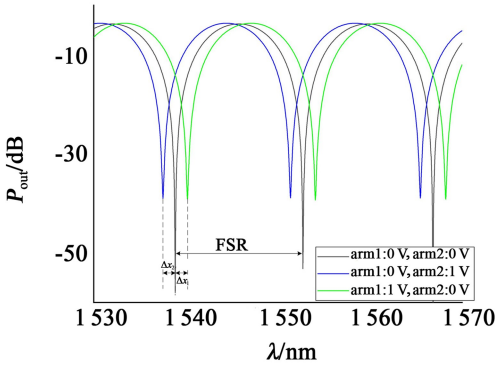
所需要的相移器长度。$V_\pi L_\pi$ 表示调制器的调制效率。当器件足够长，即使施加的电压不能达到半波电压，也能实现相移。$V_\pi L$ 的大小成为表征调制效率的关键，$V_\pi L$ 的值越低，表示调制器的调制效率越高。在调制器上下两臂引入 40 μm 的长度差，出现周期性的频谱，当不同频率的光分光后经过两个调制臂，在输出端耦合叠加，由于两束光的相位不同，输出光强会出现周期性的相长或者相消，该周期性相长或者相消的波长为自由频谱(FSR)，表示为

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g \cdot \Delta L} \tag{6}$$

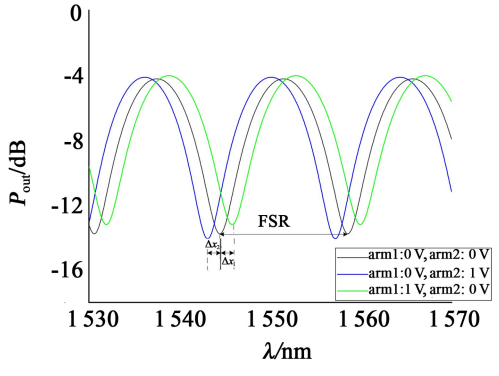
其中，n_g 为群折射率，λ 为波长，ΔL 是调制器两臂波导长度差。已知群折射率为 4.26。计算出的 FSR 为 14.1 nm。$V_\pi L$ 可以表示为

$$V_\pi L = VL\frac{FSR}{\Delta x} \tag{7}$$

式中，Δx 是电压变化导致光谱曲线在 x 轴方向上移动的距离，V 是加在调制器上的直流电压，L 是调制器有源区的长度。如图 7(a)，TWMZM 的 FSR 为 13.85 nm，与计算值非常接近。当上臂电压(arm1)从 0 V 变为 1 V，光谱曲线沿 x 轴正方向移动 Δx_1(1.3nm)，通过式(7)计算，arm1 的 $V_\pi L$ 为 1.065 V·cm。当下臂电压(arm2)从 0 V 变为 1 V，光谱曲线沿 x 轴负方向移动 Δx_2(1.31 nm)，经计算 arm2 的 $V_\pi L$ 为 1.057 V·cm。如图 7(b)所示，AP-TWMZM 的 FSR 为 14.15 nm，与计算值非常接近。当上臂电压(arm1)从 0 V 变为 1 V，光谱曲线沿 x 轴正方向移动 Δx_1(1.34 nm)，经计算 arm1 的 $V_\pi L$ 为 1.056 V·cm。当下臂电压(arm2)从 0 V 变为 1 V，光谱曲线沿 x 轴负方向移动 Δx_2(1.35 nm)，arm2 的 $V_\pi L$ 为 1.048 V·cm。综上可知，电压为 1 V 时 AP-TWMZM 的 $V_\pi L$ 小于 TWMZM 的 $V_\pi L$，AP-TWMZM 的调制效率更高。



(a)　TWMZM 传输频谱

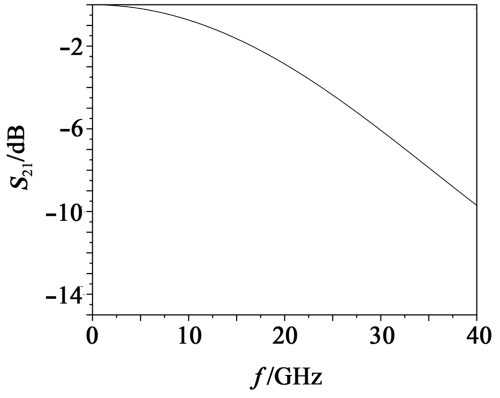


(b)　AP-TWMZM 传输频谱

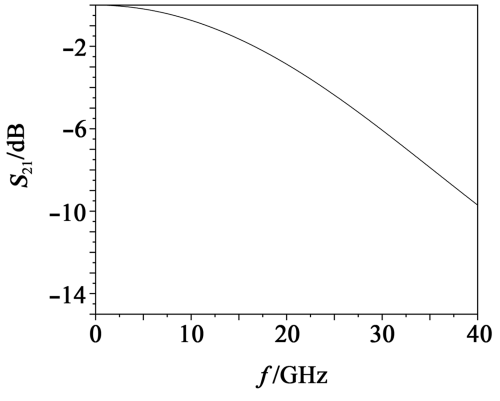
图 7　1 V 电压下调制器的传输频谱

2.3.5　光电带宽

光电带宽代表调制器整个电光转换过程的频率响应特性。它是特征阻抗、传输损耗、电极损耗等指标综合作用的结果，是调制器非常全面和重要的指标。图 8 为 Lumeical Interconnect 调制器链路仿真中直流偏置电压为 0 V 时两个调制器的响应曲线，3 dB 带宽均为 21.127 GHz。由于两种调制器采用相同结构和长度的相移器，仅输入端分光比不同，对调制器光电带宽几乎没有影响。



(a)　TWMZM 的 S_{21} 曲线



(b)　AP-TWMZM 的 S_{21} 曲线

图 8　调制器的归一化 S_{21} 曲线

2.3.6 误码率

AP-TWMZM具有更好的线性度和更高的调制效率。这一节研究AP-TWMZM的误码率(BER),建立一个包括电极损耗、耦合损耗、光纤传输损耗等的仿真链路。激光器输入光功率为10 mW。从图9可以看出,在没有额外的电芯片对PAM4信号进行整形恢复的情况下,AP-TWMZM可以实现40 Gb/s PAM4信号的背对背传输和25 Gb/s PAM4信号1 km光纤的传输,BER低于KP4-FEC阈值2.4×10^{-4}。

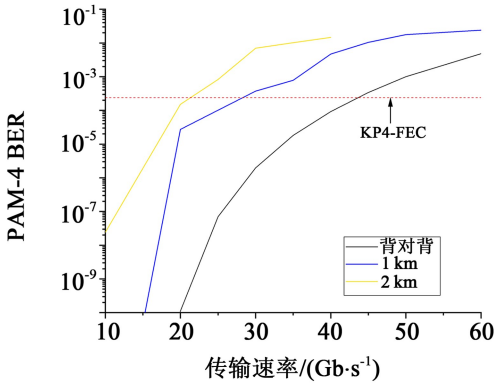


图9 不同条件下误码率随传输速率变化曲线

3 结论

本文提出了一种新型光域PAM4调制器——非对称光强的行波马赫-曾德尔调制器(Asymmetric Power TWMZM, AP-TWMZM),并对AP-TWMZM输入端分光比进行推算,确定分光比为4∶1,建立了相移器的掺杂结构模型和调制器光电仿真链路来分析调制器的关键性能。仿真结果表明,在插入损耗和消光比与TWMZM相当的情况下,AP-TWMZM具有更好的线性度和更高的调制效率,线性度高达0.948。另外,AP-TWMZM由两个独立等幅的OOK信号驱动,调控更加简单,更易于实现高密度的光电集成。

参考文献:

[1] 朱 宁,姚善化,郑晓亮. 移动通信网络风险评价指标体系的分析与模型建立[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2020,37(3):100-106.
Zhu Ning, Yao Shanhua, Zheng Xiaoliang. Analysis and model establishment for mobile communication network risk evaluation index system[J]. J. of Chongqing Technol. and Business University (Natural Science Edi.), 2020, 37(3): 100-106.

[2] Man J, Chen W, Zhang H, et al. High speed optical interconnects with PAM4 modulation for short-reach applications[C]// 2015 IEEE CPMT Symp. Jap, 2015: 70-72.

[3] Baehr-Jones T, Ding R, Liu Y, et al. Ultralow drive voltage silicon traveling-wave modulator[J]. Opt. Express, 2012, 20(11): 12014-12020.

[4] Patel D, Samani A, Veerasubramanian V, et al. Silicon photonic segmented modulator based electro-optic DAC for 100 Gb/s PAM-4 generation[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(23): 2433-2436.

[5] El-Fiky E, Samani A, Sowailem M Y, et al. Dual parallel multielectrode traveling wave Mach-Zehnder modulator for 200 Gb/s intra-data center optical interconnects[J]. IEEE Photon. J., 2019: 1-9.

[6] Samani A, Veerasubramanian V, El-Fiky E, et al. A silicon photonic PAM-4 modulator based on dual-parallel Mach-Zehnder interferometers[J]. IEEE Photon. J., 2017, 8(1): 1-1.

[7] Chen Ling, Zheng Jianfeng, et al. Silicon PAM-4 optical modulator driven by two binary electrical signals with different peak-to-peak voltages[J]. Opt. Lett., 2017, 42(11): 2213-2216.

[8] Deniel L M, et al. DAC-less PAM-4 generation in the O-band using a silicon Mach-Zehnder modulator[J]. Opt. Express, 2019, 27(7): 9740-9748.

作者简介:

陈 莹(1996—),女,江苏人,硕士生,主要研究方向为硅光调制器、高速电路封装及信号完整性;

刘丰满(1980—),男,北京人,博士,研究员,主要研究方向为光、电子集成;信号完整性;系统级封装等。