

doi: 10.3788/gzxb20144302.0213003

基于硅基微环的光双二进制

陈伟伟¹, 汪鹏君¹, 王宏建³, 周海权³, 杨建义²

(1 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

(2 浙江大学 信息与电子工程学系; 唐仲英传感材料与应用研究中心, 杭州 310027)

(3 浙江南方通信集团股份有限公司, 浙江 湖州 313009)

摘要: 基于硅基微环光调制器, 利用 Optisystem 协同 Matlab 仿真, 实现了 10 Gbit/s 光双二进制信号的产生, 并分析了光源的线宽和中心波长、光纤传输距离以及高斯窄带滤波器的带宽对 10 Gbit/s 光双二进制系统性能的影响。仿真结果表明: 该光双二进制系统对光源的线宽和中心波长敏感; 在误码率为 10^{-9} 量级时, 实现无误码传输的最大距离为 60 km, 且高斯窄带滤波器的最佳带宽为 8 GHz。

关键词: 硅基光子学; 载流子色散; 微环谐振腔; 高斯滤波器; 光双二进制

中图分类号: TN256; TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0213003-4

Silicon-based Microring Resonator Modulator for Optical DuoBinary

CHEN Wei-wei¹, WANG Peng-jun¹, WANG Hong-jian³, ZHOU Hai-quan³, YANG Jian-yi²

(1 Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 Department of Information Science and Electronics Engineering and Cyrus Tang Center for Sensor Materials and Applications, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(3 Zhejiang Nanfang Communications Group, Huzhou, Zhejiang 313009, China)

Abstract: A silicon-based microring modulator and a narrow-band optical Gaussian filter were employed to generate optical duobinary at 10 Gbit/s. Performance of the optical duobinary signal was analyzed in terms of laser linewidth, laser operating wavelength, fiber length, and filter bandwidth using Optisystem and Matlab. Simulation results show the optical duobinary signal is sensitive to laser linewidth and wavelength. At the BER of 10^{-9} , the maximum transmission distance of the optical duobinary format can be up to 60 km with the optimal Gaussian filter bandwidth of 8 GHz.

Key words: Silicon photonics; Carrier dispersion; Microring resonator; Optical Gaussian filter; Optical duobinary

OCIS Codes: 130.4110; 230.3120; 230.7370; 130.3120

0 引言

硅基光子学因具有与现代成熟的 CMOS 工艺兼容、便于大规模集成以及低功耗等特性, 被公认为是实现大带宽、低功耗、低延时的片上互连网络和数据中心互连网络较有吸引力的优势技术^[1]。2004 年以来, 硅基光子学的研究取得了许多突破性成果, 包括光调制器^[2]、光开关^[3]、光源^[4]、光放大器^[5]、光缓存^[6]以及光

探测器^[7]等。

光外调制器具有高速和无啁啾的优势, 实现信息在光波上的加载, 是光通信系统中的关键器件。基于硅基微环光调制器, 结构紧凑、便于级联, 一直以来受到广泛的关注与研究^[8-10]。光双二进制 (Optical Duobinary, ODB) 调制格式为当两个“1”比特之间有奇数个“0”, 则第二个“1”的相位反转 π , 若有偶数个“0”, 则第二个“1”的相位保持不变, 而相位不带有任意信

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2012AA012203)、国家自然科学基金 (Nos. 61274132, 61228501, 61307071)、教育部博士点基金 (No. 20120101110054)、浙江省科技厅公益性技术应用研究计划 (No. 2013C31083)、宁波市自然科学基金 (No. 2013A610005) 和宁波大学学科项目 (No. xkl 1332) 资助

第一作者: 陈伟伟 (1986-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为集成光学器件及其系统。Email: ilt-mc@163.com

导师 (通讯作者): 汪鹏君 (1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体集成电路理论及设计。Email: wangpengjun@nbu.edu.cn

收稿日期: 2013-05-28; **录用日期:** 2013-09-05

<http://www.photon.ac.cn>

息,其信息在幅度变化上,属于部分响应码型(Partial-Response Formats)^[11]. 与不归零码(Not Return to Zero, NRZ)和归零码(Return to Zero, RZ)等一般性二进制振幅键控(On-off Keying, OOK)调制格式相比,该类码型具备较强的抗色散和非线性能力及较高的频谱利用率^[12]. 而与二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制格式相比,由于 BPSK 需要马赫曾德干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)或微环谐振器(Microring)解调器实现相位到强度的转换,而 ODB 格式属于调幅格式,可采用直接解调方式,在解调上具有一定的优势,同时该格式可以构建更高级的调制格式,实现更高的频谱利用率^[13-14].

本文采用硅基微环调制器,实现 10 Gbit/s ODB 的产生并利用 Optisystem^[15]协同 Matlab^[16]仿真,分析光源的线宽和中心波长、光纤传输距离以及高斯窄带

滤波器的带宽对系统性能影响,为进一步优化参量,探索硅基光子器件在高速中长距离传输系统中的应用提供参考依据.

1 ODB 系统设置

10 Gbit/s ODB 系统框架如图 1. 其中,光源采用连续波光源,伪随机码采用 9 级伪随机码序列,伪随机码序列经差分编码后,由 NRZ 信号发生器产生方波,加载在硅基微环光调制器. 调制后的信号经理想窄带高斯滤波后,产生 ODB 信号,由光纤传输,光纤考虑色散(17 ps/nm/km)、损耗衰减(0.2 dB/km)以及 SPM(Self-Phase Modulation)非线性的影响. 系统解调采用直接解调方式. 系统全局参量设置如下:比特率为 10 GBit/s,时间窗口为 12.8 ns,每比特采样 64 次,采样率为 640 GHz.

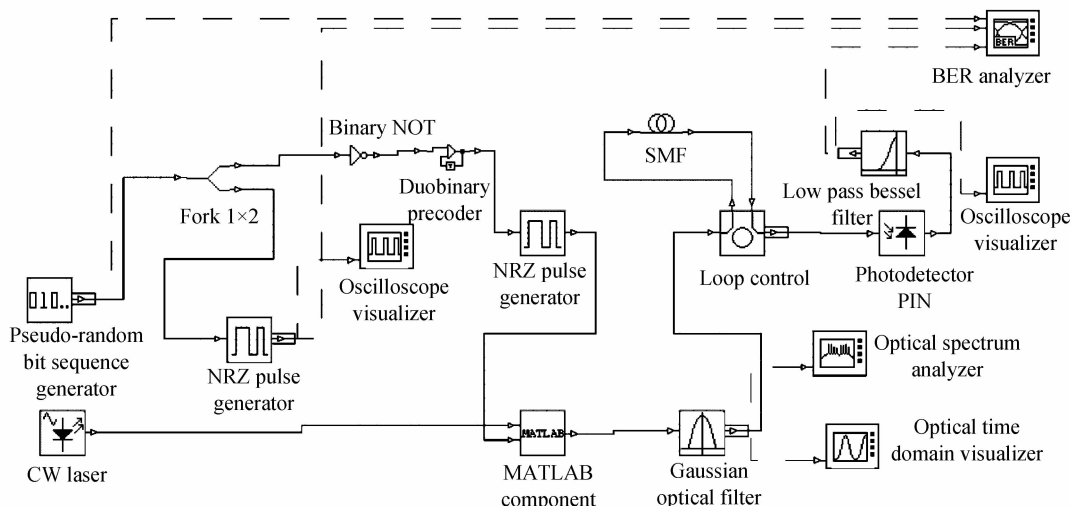


图 1 基于硅基微环谐振器的 ODB 系统结构

Fig. 1 The simulation setup for bit-error validation of microring-modulated ODB

由于 Optisystem 中没有任何硅基光子元器件,所以需要利用 Matlab 建立硅基光子元器件模型,再通过建立 Optisystem 同 Matlab 接口,将硅基光子元器件导入 Optisystem. 本文采用基于载流子色散效应的硅基微环相位光调制器,其光学结构为单总线耦合的微环谐振腔,电学结构为反向 PN 结构,通过传输矩阵方法获得相应的频率响应. 硅基微环光调制器输出功率的最大值和最小值分别出现在非谐振点和谐振点上. 通过设计使得耦合区域的传输比例大于谐振腔的衰减因子,即使得硅基微环调制器处于过耦合状态,相位变化跨度为 π ,以便于实现相位调制,具体示意如图 2. 本文采用的硅基微环相位调制器参量为:半径 $R = 30 \mu\text{m}$,耦合区耦合系数为 0.31,波导横截面为 $340 \times 400 \text{ nm}^2$,其中宽度为 400 nm,刻蚀深度约为 $0.26 \mu\text{m}$. 轻掺杂 p 和 n 区域的浓度均为 $2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$,重掺杂 p+ 和 n+ 区域的浓度均为 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$. 其中,重掺杂

区域位于离脊波导中心 $0.9 \mu\text{m}$ 处.

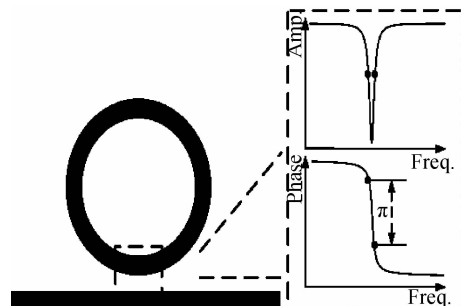


图 2 硅基微环相位调制器结构及其实现原理

Fig. 2 The structure and implementation principle of silicon-based microring phase modulator

2 仿真结果和分析

在背靠背状况下,当光源功率为 -10 dBm 时,加载的伪随机序列的信号幅度曲线如图 3(a),经硅基微

环相位调制器和理想窄带滤波器后,产生 ODB 信号,其幅度曲线和相位曲线如图 3 (c) 和 (d). ODB 信号经光电探测器解调后,产生电信号幅度曲线如图 3 (b).

为了探索 ODB 系统实现无误码传输的最大距离,将对光纤传输距离进行扫描,仿真结果如图 4. 随着传输距离的增加,眼图逐渐闭合. 传输距离为 20 km 处是个拐

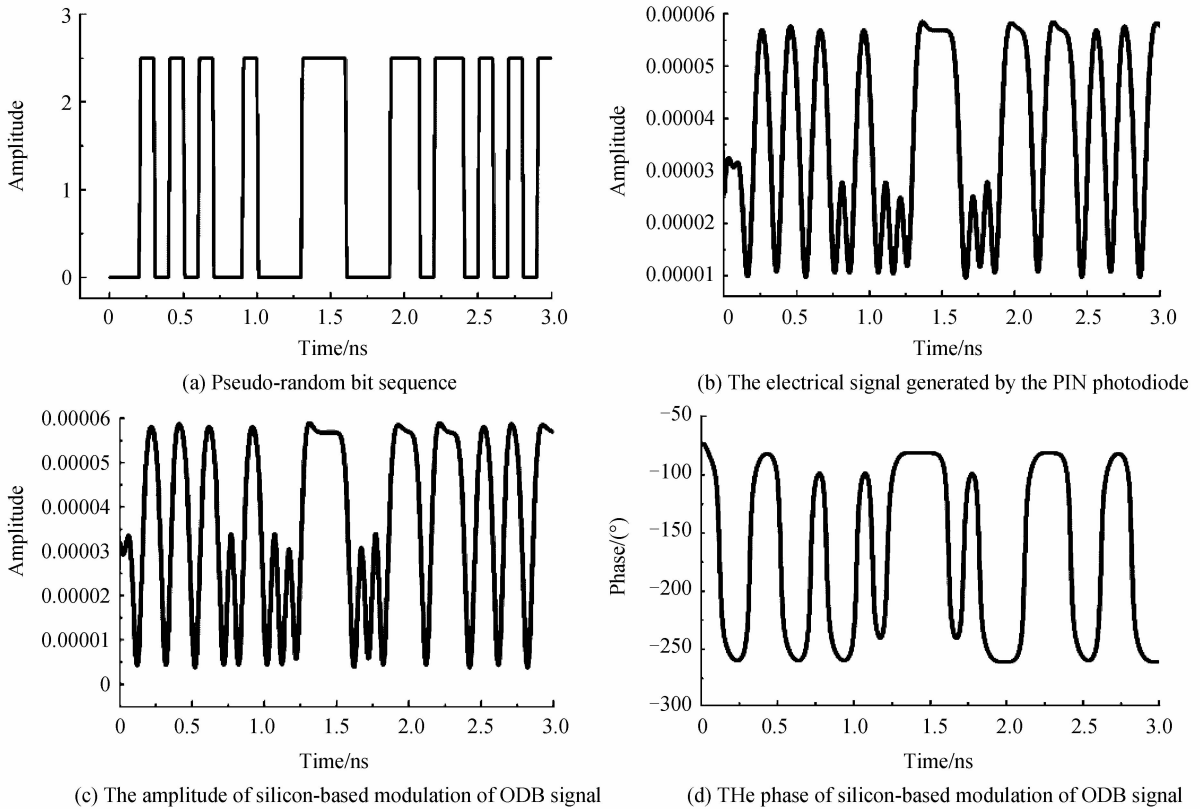


图 3 信号幅度及相位曲线

Fig. 3 Signal waveforms

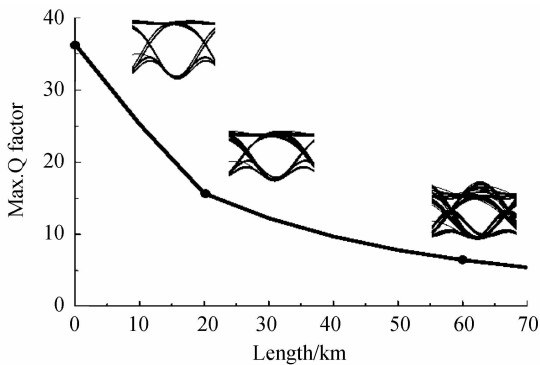


图 4 ODB 信号质量因子随光纤长度的变化关系

Fig. 4 The signal Q factor of ODB is examined with varied fiber length

点,当传输距离大于 20 km 时,信号质量因子(Quality Factor, Q)下降变缓. 对于采用直接解调的 ODB 系统,在误码率为 10^{-9} 量级时,实现无误码传输($Q \geq 6$)的最大距离为 60 km. 为了考虑光源参量对 ODB 信号以及系统性能的影响,在背靠背条件下,对光源线宽进行扫描,仿真结果如图 5. 随着光源线宽的增加,信号质量因子逐渐下降. 其中, A、B、C 和 D 分别表示当线宽为 0 MHz、10 MHz、50 MHz 和 170 MHz 时产生的 ODB 信号幅度曲线. 当光源线宽小于 10 MHz 时,幅度曲线

高电平部分率先由于光源噪音的影响而产生失真. 当

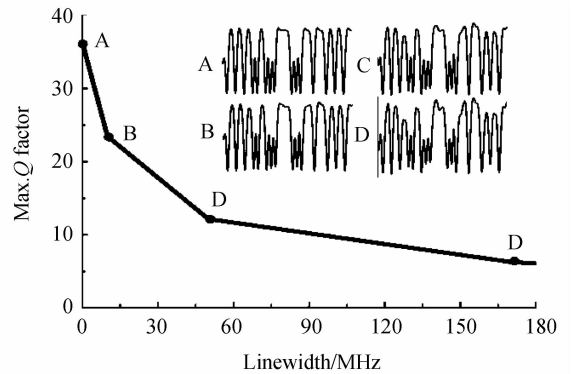


图 5 背靠背状况下, ODB 信号质量因子同光源线宽变化关系

Fig. 5 The signal Q factor of ODB changes dramatically with laser linewidth for back-to-back situation

光源线宽远大于 10 MHz 时,幅度曲线高电平和低电平部分同时受到光源噪音的影响,使得信号质量因子迅速下降. 图 6 是在传输距离为 25 km 时, ODB 系统信号质量因子随光源中心波长的变化关系. 基于硅基微环相位调制器和窄带高斯滤波器产生的 ODB 信号对光源中心波长的偏离较为敏感. 一旦光源中心波长发生偏离,信号质量因子迅速降至 0. 另外,由于本系

统采用硅基微环相位光调制器和理想高斯窄带滤波器实现的 ODB 调制格式,所以在传输距离为 25 km 时,对高斯窄带滤波器的带宽进行扫描,如图 7. 高斯窄带滤波器的最佳带宽为 8 GHz.

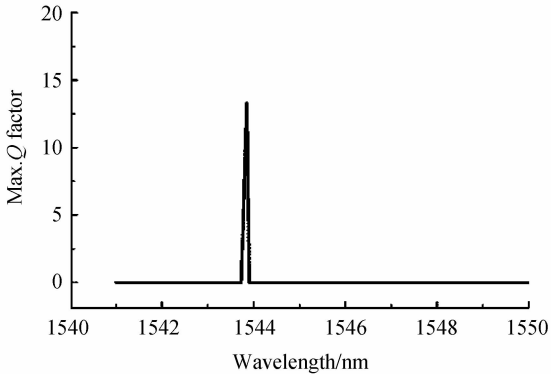


图 6 光纤传输距离为 25 km 时,ODB 信号质量因子同光源中心波长的变化关系

Fig. 6 The signal Q factor of ODB versus laser operating wavelength with the fiber length of 25 km

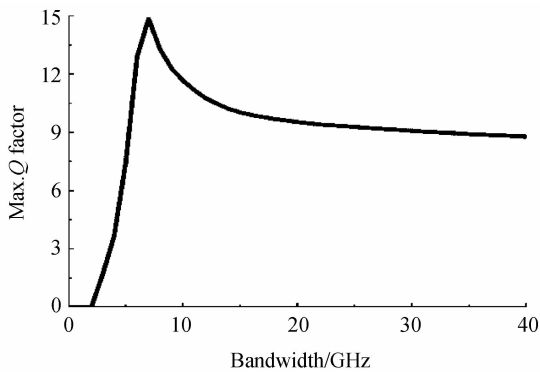


图 7 光纤传输距离为 25 km 时,ODB 信号质量因子同窄带高斯滤波器带宽的变化关系

Fig. 7 The signal Q factor of ODB versus the bandwidth of narrow-band optical Gaussian filter with the fiber length of 25 km

从 ODB 系统仿真结果可知:ODB 调制格式可以由硅基相位光调制器和高斯窄带滤波器产生,其系统性能的提升在于硅基相位光调制器消光比和窄带高斯滤波器带宽的优化.另外,对于采用高斯窄带滤波器实现的 ODB 调制格式对光源中心波长较为敏感,在实际采用硅基微环相位调制器和光滤波器实现 ODB 调制格式时,可考虑利用硅基微环相位调制器集成硅基微环滤波器.

3 结论

本文利用硅基微环相位调制器和高斯窄带滤波器实现 ODB 调制格式,并利用 Optisystem 协同

Matlab 对 10 Gbit/s ODB 系统进行仿真.仿真结果表明:在误码率为 10^{-9} 量级时,该 ODB 系统实现无误码传输的最大距离为 60 km.采用硅基微环相位调制器和高斯窄带滤波器实现的 ODB 信号对光源的线宽和中心波长要求较为严格.一旦偏离中心波长,ODB 系统性能迅速下降.同时,随着光源线宽的增加,ODB 信号幅度曲线的高电平部分受到光源噪音的影响而产生失真情况较为严重,使得 ODB 信号消光比变差,导致系统性能下降.该 ODB 系统采用高斯窄带滤波器的最优带宽为 8 GHz.

参考文献

- [1] SOREF R A. The past, present, and future of silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, 2006, **12**(6): 1678-1687.
- [2] LIU An-sheng, JONES R, LIAO Ling, *et al.* A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor[J]. *Nature*, 2004, **427**(6975): 615-618.
- [3] ALMEIDA V R, BARRIOS C A, PANEPUCCI R R, *et al.* All-optical control of light on a silicon chip[J]. *Nature*, 2004, **431**(7012): 1081-1084.
- [4] RONG Hai-sheng, LIU An-sheng, JONES R, *et al.* An all silicon Raman laser[J]. *Nature*, 2005, **433**(7023): 292-294.
- [5] FOSTER M A, TURNER A C, SHARPING J E, *et al.* Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip [J]. *Nature*, 2006, **441**(7096): 960-963.
- [6] XIA Feng-nian, SEKARIC L J, VLASOV Y. Ultracompact optical buffers on a silicon chip[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(1): 65-71.
- [7] KANG Y, LIU Han-din, MORSE M, *et al.* Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product[J]. *Nature Photonics*, 2008, **3**(1): 59-63.
- [8] DONG P, XIE Chong-jin, CHEN Long, *et al.* Experimental demonstration of microring quadrature phase-shift keying modulators[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(7): 1178-1180.
- [9] PADMARAJU K, OPHIR N, XU Qian-fan, *et al.* Error-free transmission of microring-modulated BPSK [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(8): 8681-8688.
- [10] HU Ying-tao, XIAO Xi, XU Hao, *et al.* High-speed silicon modulator based on cascaded microring resonators[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14): 15079-15085.
- [11] WINZER P J, ESSIAMBRE R J. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport network[J]. *IEEE Journal of Light-wave Technology*, 2006, **24**(12): 4711-4728.
- [12] JOINDOT M, BOSCO G, CARENA A, *et al.* Fundamental performance limits of optical duobinary[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(24): 19600-19614.
- [13] MACHI F, ALFIAD M S, KUSCHNEROV M, *et al.* 111-Gb/s polmux-quadrature duobinary for robust and bandwidth efficient transmission [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2010, **22**(11): 751-753.
- [14] LYUBOMIRSKY I. Quadrature duobinary for high-spectral efficiency 100g transmission[J]. *IEEE Journal Light-wave Technology*, 2010, **28**(1): 91-96.
- [15] Optiwave Systems Inc. Optisystem v7.0 [CP/DK]. Ottawa, Canada: Optiwave Systems Inc, c2008.
- [16] The MathWorks Inc. Matlab R2008b [CP/DK]. Massachusetts, USA: The MathWorks Inc, c2008.