

用于塑料光纤通信的 Si 基单片集成光接收芯片的研制

史晓凤¹, 程翔^{2*}, 陈朝^{1,3}, 李继芳², 颜黄苹², 潘江炳², 范程程²

(1. 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学机电系, 福建 厦门 361005; 3. 厦门大学能源研究院, 福建 厦门 361005)

摘要:设计并用低成本的 0.5 μm BCD(bi-plor, CMOS and DMOS)工艺实现了用于 650 nm 塑料光纤(POF)通信的 Si 基单片集成光接收芯片, 其中包含了与标准工艺兼容的大面积的叉指状 PIN 结构的光电探测器(PD)、跨阻放大器(TIA)以及后端放大器(PA)。采用 NI 公司的图形化编程软件 LabVIEW 和硬件 PXI 并结合光学调整平台的测试方案对流片后的光接收芯片进行测试, 结果表明, PD 的暗电流为 pA 量级, 响应度为 0.25 A/W, 电容为 4.4 pF; 对 650 nm 的入射光, 在 180 Mbit/s 速率的伪随机二进制序列(PRBS)以及小于 10^{-9} 的误码率(BER)条件下, 测得光接收芯片的灵敏度为 -14.6 dBm, 并能得到清晰的眼图, 包括 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的 PD 在内总的芯片面积 0.9 mm^2 , 5 V 的电源下功耗为 60 mW。

关键词:塑料光纤(POF)通信; Si 基单片集成; 光接收芯片; 光电探测器(PD)

中图分类号: TN491; TN303 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2013)11-2086-06

Research of silicon-based monolithic integrated optical receiver for POF communication

SHI Xiao-feng¹, CHENG Xiang^{2*}, CHEN Chao^{1,3*}, LI Ji-fang², YAN Huang-ping², PAN Jiang-bing², FAN Cheng-cheng²

(1. Dept. of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Dept. of Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. School of Energy Research, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper describes a silicon-based monolithic integrated optical receiver for 650 nm plastic optical fiber (POF) communication realized in 0.5 μm bi-plor, CMOS and DMOS (BCD) process. It consists of large area cross finger-type PIN photodetector (PD) that is compatible with standard process, transimpedance amplifier and post amplifiers. Testing scheme with the graphical programming software LabVIEW, hardware PXI and optical adjustment platform is proposed to test the optical receiver chip after tap-out. Measurement results show that the dark current of PD is at pA magnitude, the responsivity is 0.25 A/W and the capacitance is 4.4 pF. The sensitivity of receiver is -14.6 dBm at 180 Mbit/s pseudo random binary sequence (PRBS) and BER is less than 10^{-9} for 650 nm input light. A clear eye diagram is demonstrated. The area of optical receiver is 0.9 mm^2 including the PD area of 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, and the power dissipation is 60 mW with power supply of 5 V.

Key words: plastic optical fiber (POF) communication; Si-based monolithic integrated circuit; optical receiver; photodetector (PD)

1 引言

塑料光纤(POF)由于其纤芯直径比石英光纤

大、成本低、连接方便和可较大幅度弯曲等优点被广泛运用到低成本的短距离光互连的通信中^[1,2]。为降低成本、减少体积和提高性能, 单片光电集成

* E-mail: chengflying@163.com

收稿日期: 2013-04-01 修订日期: 2013-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(61205060)、福建省自然科学基金(2011J01361)和中国福建省科技计划重点项目(2013H0047)资助项目

接收芯片相应的关键工艺成为 POF 通信领域研究的热点^[3~6]。

为了方便且快速的测试,本文采用 NI 公司的硬件 PXI 和 LabVIEW 图形化编程软件结合光学调整平台的测试方案。PXI 是一种开放式的、多厂商标准的测试测量和自动化平台,它和旧式的测量和自动化构架相比,具有低成本、简单易用性、模块化和灵活性等优点;使用 NI LabVIEW 图形化编程,借助直观的图标和连线,能迅速连接测试与控制硬件、分析数据、共享结果并发布系统。

目前国内对于光电集成接收芯片研究多集中在 850 nm 波长的光接收芯片,速率一般在 Gbit/s 级以上^[7~10]。这主要是因为 850 nm 光电探测器(PD)的面积一般只需 50 μm×50 μm,其结电容只有 0.3 pF,所以整体芯片可以达到较高的速率^[11,12]。其中文献^[12]为我们前期关于 850 nm 单片光电集成接收芯片的研究,整体芯片工作速率可以达到 622 Mbit/s,PD 是 50 μm×50 μm 的 PIN 结构。在 650 nm 的 POF 通信中,POF 纤芯较粗,要求光接收芯片的 PD 必须具备较大的光敏面,这导致 PD 结电容大和噪声高。文献^[13]是我们前阶段的理论设计研究成果,其中 PD 采用 200 μm×200 μm 的 PIN 结构。另外,国外现有的应用到 POF 通信的光接收芯片在 ×10² Mbit/s 速率水平,而且非单片光电集成^[14,15],功耗和成本都较高。由于 Si 材料探测器对 650 nm 仍具备一定的响应度,光接收芯片完全可能在标准工艺下实现低成本的单片集成。为达到通信的灵敏度和带宽要求,必须设计高性能 PD 和信号放大电路。为此,本文在文献^[12]研究的基础上改进 PD 结构,提出采用叉指状的 PIN 结构以提高 PD 结电容特性使之变小;跨阻放大器(TIA)采用低噪声的带有负反馈的共源级放大器,使整个光接收芯片获得了较高的灵敏度和带宽。在 CSMC 采用 0.5 μm 的标准 Si 工艺流片,并对其进行了测试及分析。

2 光接收芯片的设计

2.1 光接收芯片的结构设计

图 1 是光接收芯片的框图。光接收芯片包括叉指状 PIN 结构 PD、TIA、自动增益控制(AGC)、后端放大器(PA)、输出缓冲器(OB)以及参考电压电路。PD 将输入光信号转换成光电流信号,TIA 再将光电流信号转换成电压信号,PA 对之进一步放大到所需的电压幅度。PA 采用三级电流源做负载的差分共源级放大器,增益一般要求 20~40 dB,每级增益应该逐级递减,带宽逐级递增以保证

整个电路的输出增益和带宽;OB 是采用带有 50 Ω 负载电阻的共源级差分放大器^[12]。AGC 的作用是对 TIA 的增益进行控制,使输出信号保持在一定的幅度范围内。参考电压电路为 TIA、AGC、PA 以及 OB 电路提供其所需要的稳定的偏置电压以及电源电压 V_{ido} 。

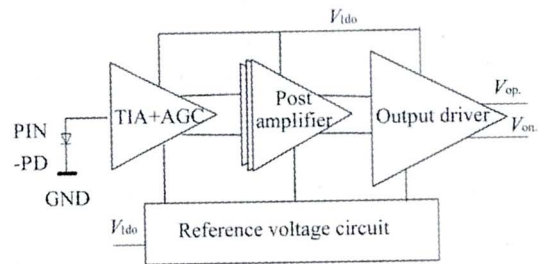


图 1 光接收芯片的结构框图

Fig. 1 Structure diagram of the optical receiver chip

2.2 PD 的结构和等效模型

针对现有的 Si 基 PD 的短波响应差、频率响应低、结电容大、制备工艺与 CMOS 标准工艺不完全兼容等缺点,设计一种与 BCD (biolor, CMOS and DMOS) 标准工艺完全兼容的叉指状 P 型重掺杂硅/N-EPI 外延层/BN⁺埋层结构的 650 nm 的 PD,其光敏面的面积为 200 μm×200 μm,叉指的个数为 11 个,图 2 是 PD 的左半边剖面图,右半边则是以图 2 中最右边那根虚线为对称轴镜像得到的。大面积的 PD 能够更有效地与大纤芯的 POF 进行耦合。另外,与同尺寸的一般的 PIN 相比,P 型多叉指结构 PD 拥有较小的结电容和较高的响应度。由于是采用标准 BCD 工艺,不需要对工艺

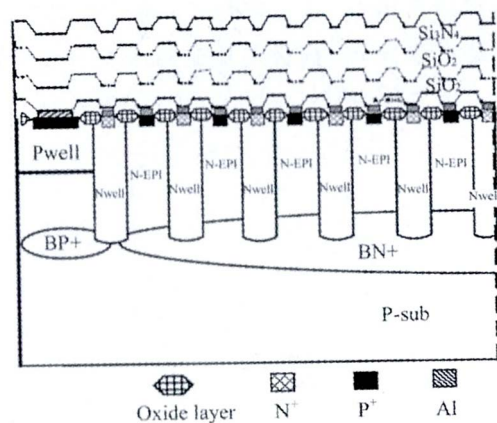


图 2 叉指状 P⁺/N-EPI/BN⁺的半边剖面图

Fig. 2 Half profile chart of cross finger-type P⁺/N-EPI/BN⁺

做任何修改,提高了整体光电集成芯片的性能,简化了封装过程,有效降低了650 nm POF通信的成本。

PD的等效模型如图3所示,等效成一个四端网络结构,以 P_{opt+} 和 P_{opt-} 两端的电压差“ $V(P_{opt+}) - V(P_{opt-})$ ”等效入射光的光功率,可以直接在 P_{opt+} 和 P_{opt-} 两端之间接一个电压源 V_0 等效。图中, I_{opt} 和 I_{dark} 分别表示PD的光电流和暗电流, C_{pd} 表示PD的结电容, R_s 为PD串联电阻。PD在反向电压下工作,所以阴极接高电位,阳极接低电位。

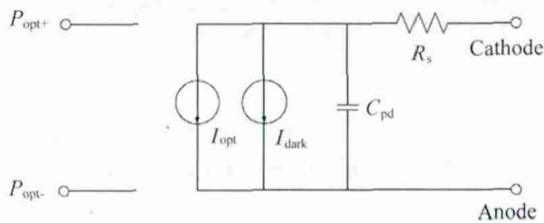


图3 PD等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of PD

2.3 TIA 及噪声分析

TIA 采用带有负反馈的共源级放大器作输入级,如图4所示,在输入管 M_1 的栅极和漏极之间跨接一个反馈电阻 R_f 。放大器的优点是噪声小、灵敏度高和跨阻增益高。AGC也是个负反馈网络,即将TIA输入级电路的输出 V_{ol} 和参考电压 V_{ref} 通过一个电压比较器进行比较得到一个控制电压 V_{agc} ,在 R_f 两端并联上一个MOS管 M_f , V_{agc} 反过来控制着 M_f 管的栅极, V_{ref} 是由参考电压电路产生的一个稳定的直流电压值,该值的大小由PD的最大光电流和输入级跨阻增益来决定。 V_{agc} 随着 V_{ol} 的变化而变化,因此可以通过改变 M_f 栅极电压进行改变负反馈电阻的阻值。电流较小时, V_{ol} 比 V_{ref} 小,AGC不工作, M_f

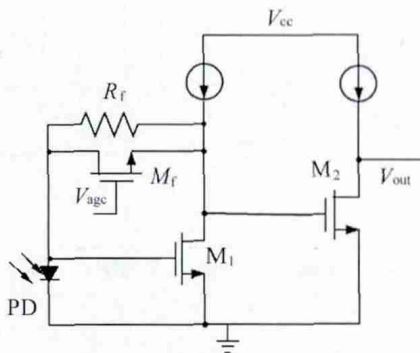


图4 负反馈 TIA

Fig. 4 TIA with negative feedback

处于关闭状态;当输入电流变化很大时, V_{ol} 比 V_{ref} 大,AGC开启, M_f 也处于工作状态,可以控制跨阻增益,同时输出电压摆幅也得到稳定。

图5给出了负反馈TIA的噪声模型。图中, $\overline{V_{n,A}^2}$ 为开环电压放大器的等效输入噪声谱密度, $\overline{V_{n,rf}^2}$ 是反馈电阻 R_f 噪声电压谱密度, $\overline{I_{n,PD}^2}$ 为PD探测器的等效电流噪声密度, $\overline{V_{n,out}^2}$ 是输出电压噪声谱密度。

假设各噪声源不相关,开环放大器增益 $A_0 \gg 1$,则输出噪声电压和输入噪声电流谱密度分别为

$$\left. \begin{aligned} \overline{V_{n,out}^2} &= \overline{I_{n,PD}^2} R_f^2 + 4KT R_f + \overline{V_{n,A}^2} \\ \overline{I_{n,in}^2} &= \overline{I_{n,PD}^2} + 4KT/R_f + \overline{V_{n,A}^2}/R_f^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

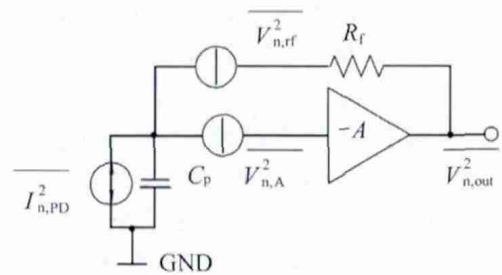


图5 负反馈 TIA 噪声模型

Fig. 5 Noise model of TIA with negative feedback

由式(1)可以看出,跨阻的噪声直接加到输入端,增加跨阻值可以减少等效输入电流谱密度。但是,在噪声减小的同时降低了放大器的带宽。

通过以上分析,可知TIA的跨阻增益、带宽和噪声之间存在权衡。 A 是放大器的增益,总的输入电容包括PD的结电容 C_p 和TIA的输入电容,当 A 和总的输入电容一定时,反馈越深,即 R_f 越小,TIA的频带就越宽。但是反馈越深,跨阻增益就越小。而且,反馈越深,反馈电阻所引入的噪声就越大。因此,要选取最合适的器件参数,将各性能指标间的矛盾降至最低,使整个电路的性能达到最优。

另外,TIA的噪声影响了光接收芯片的灵敏度。光接收芯片的灵敏度定义为在保证在达到给定的误码率(BER)条件下,光接收芯片所需要输入的最低光功率。文献[16]给出了输入光电流 I_p 的公式为

$$I_p = \frac{2Q \cdot n}{T_R} \quad (2)$$

其中 n 是均方根(RMS)输出噪声; T_R 是中频带跨阻;当 $BER=10^{-9}$ 时,因子 $Q=6$ 。式(2)中, n/T_R 项就是总的RMS输入电流噪声 $I_{n,in}$ 。若已知PD的光响应度 R_{pd} ,就可以通过光响应度的倒数和输入光电流 I_p 的乘积得到灵敏度 S 。此时灵敏度的单位是

μW ,通过单位转换公式 $S/\text{dBm} = 10\lg(S/\mu\text{W}/1/\text{mW})$ 将灵敏度转换为 dBm 的表示方式。可见,若以 dBm 为单位,光接收芯片的灵敏度是个负值,大小和 TIA 的输入电流噪声以及 PD 的光响应度有关。

3 结果及分析

3.1 仿真结果

如图 6 所示,输入电流在 $4\sim 300\ \mu\text{A}$ 范围内,输出结果都是稳定的,整个光接收芯片的增益 86 dB, TIA 的跨阻为 $3.5\ \text{k}\Omega$,带宽为 200 MHz。

TIA 的等效输入噪声如图 7 所示。可以看出在 100 kHz 与 200 MHz 的通频带里的等效输入电流噪声谱密度近似为白噪声频谱,其大小约为 $5\ \text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

根据输入电流噪声和探测器的光响应度由式(2)算出光接收芯片灵敏度的理论值约为 $-19\ \text{dBm}$ 。

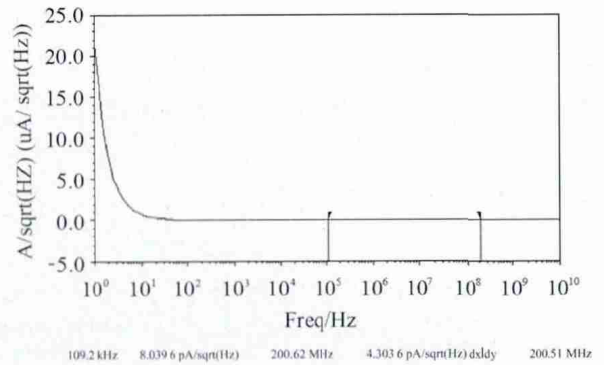


图 7 TIA 的噪声特性

Fig. 7 Noise characteristic of TIA

3.2 封装及测试结果

图 8 是光接收芯片的封装显微镜图片,包括 $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ 的 PD 在内的总的芯片面积是 $0.9\ \text{mm}^2$ 。

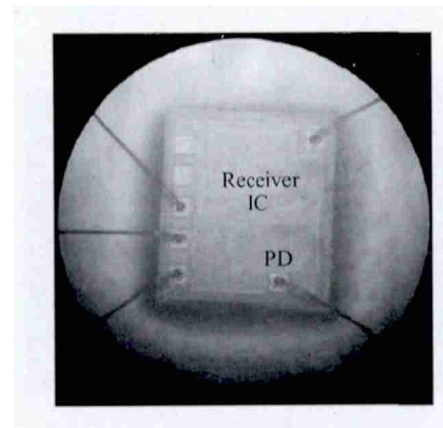


图 8 光接收芯片的显微镜照片

Fig. 8 Micrography of the optical receiver chip

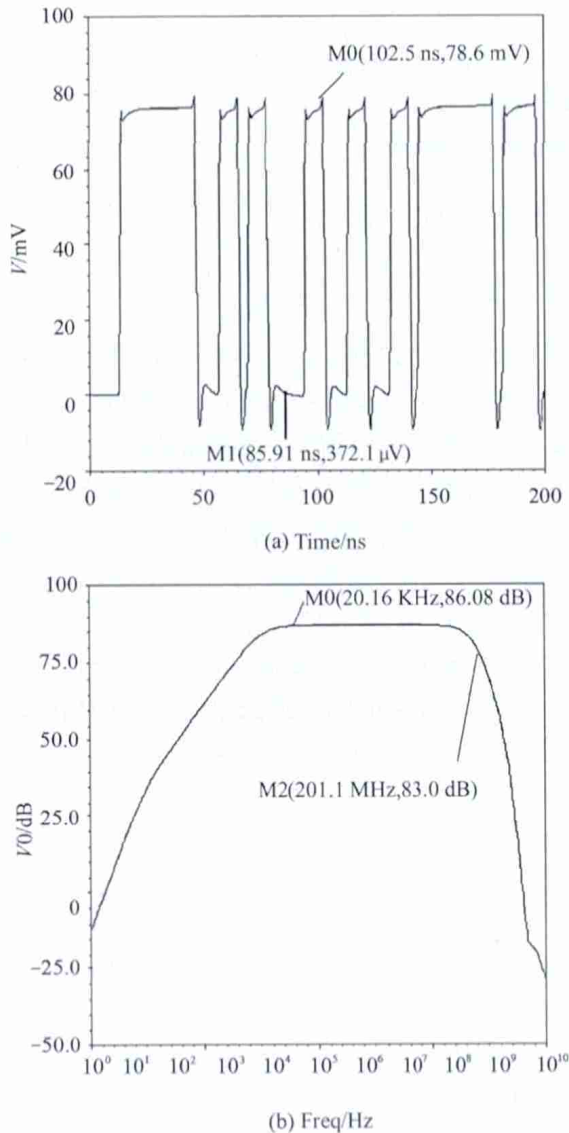


图 6 OEIC 输出的(a)瞬态和(b)增益带宽曲线
Fig. 6 (a) Transient and (b) gain bandwidth curves of OEIC output

图 9 是整个 POF 通信链路的测试概念图。码型产生器产生 PRBS 电信号加载到驱动电路,驱动电路将 PRBS 电压信号转换成调制电流信号去驱动光源发出 650 nm 的红光,其光功率由光功率计监测,光信号经过 POF 到达光接收芯片,光接收芯片的输出信号波形可以在示波器中观察,采用 NI 公司的 PXI 硬件和 LabVIEW 图形化编程软件测试眼图。

采用了 NI 公司的 PXI 硬件和 LabVIEW 图形化编程软件的测试方案。光发射机采用 Firecomms 公司的 EDL300,其光源是垂直腔面发射二极管(RCLED),发出的是 650 nm 红光。POF 的标准纤芯直径是 0.98 mm,数值孔径 NA 是 0.5。光接收芯

片是裸片经过 ROSA (Receiver optical sub-assembly) 封装的。采用 PXI 仪器测试光接收芯片的不同参数时,只需将相应的测试采集卡插到 PXI 面板对应的位置,搭建好测试电路,再将 PXI 硬件接到电脑显示器,打开虚拟仪器 LabVIEW,即可采用 LabVIEW 软件进行图形化编程,对采集到的数据进行处理。

图 10 是 2^7 -1PRBS 信号输入时从 NI 公司的 PXI 眼图测试仪测得的眼图。在 180 Mbit/s 速率和 10^{-9} 的 EBR 下,测得光接收芯片的灵敏度为 -14.6 dBm,和理论设计值相差不大。从图 10 可以看到,测得眼图的眼睁开度较大,线迹清晰,无码间串扰,噪声很小,上升时间和下降时间均为 1.3 ns,可见满足传输要求,可以正常工作。

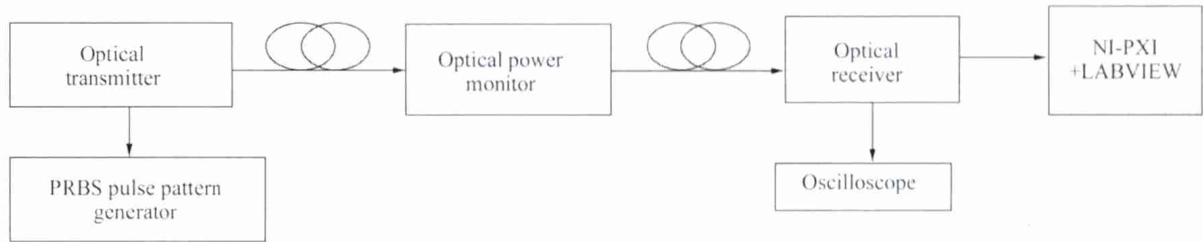


图 9 POF 通信链路的测试概念图

Fig. 9 Measurement diagram of POF link in concept

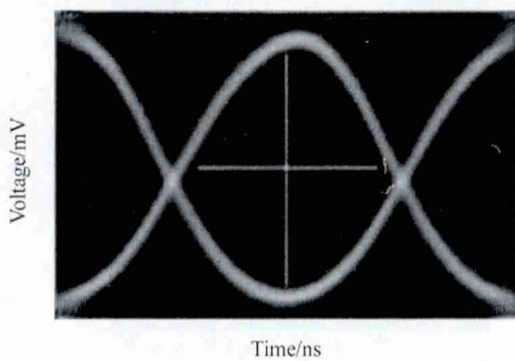


图 10 POF 通信链路眼图

Fig. 10 Eye diagram of POF link

采用 NI-PXI-4132 的采集卡测试了 PD 的 I - V 特性,器件的正向阈值电压是 0.25 V,反向击穿电压 24 V;在 650 nm 波长和 2.5 V 的偏压下,PD 的响应度为 0.25 A/W,响应度比 850 nm 波长的大^[12];用 PXI-4071 采集卡测试了 PD 的暗电流,测得 PD 的暗电流很小,为 1 pA;采用 PXI-4072 采集卡对 PD 结电容进行测试,扣除寄生电容,在 2.5 V 反向偏压下 PD 的结电容约为 4.4 pF。而同尺寸的普通 PIN 结构的 PD 一般响应度为 0.21 A/W,结电容为 10 pF。可以看到,经过本文的优化设计,有效改善了 PD 的结电容和响应度,设计的 PD 和后端放大电路有很好的耦合以及较好的协同性,能够正常工作在 180

Mbit/s 速率的 POF 通信中。

4 结 论

基于 $0.5 \mu\text{m}$ BCD 工艺研制了用于 POF 通信的 650 nm 光接收芯片。光接收芯片实现了低成本的单片集成。采用 NI 公司的图形化编程软件 LabVIEW 和硬件 PXI 并且结合光学调整平台的测试方案对流片后的经 ROSA 封装后的光接收芯片进行测试,测试结果表明,在 650 nm 波长和 2.5 V 的偏压下,PD 的响应度为 0.25 A/W,电容为 4.4 pF;在 180 Mbit/s 速率和 10^{-9} 的 EBR 下,测量光接收芯片的灵敏度为 -14.6 dBm,并得到了清晰的眼图,上升时间和下降时间均为 1.3 ns,无码间串扰,噪声很小。

参考文献:

[1] Nespola A, Abrate S, Gaudino R, et al. High-speed communications over polymer optical fibers for in-building cabling and home networking [J]. Journal of Photonics, 2010, 2(3): 347-358.

[2] Abrate S, Nespola A, Straullu S, et al. Gigabit home networking with 1 mm PMMA fibers [A]. Proc. ICTON [C]. 2010, 1-4.

[3] CHENG Bu-wen. Study on Si-based OEIC photoreceiver [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003, 14(5): 659-664.

成步文. Si 基高速 OEIC 光接收机芯片的研究 [J]. 光电

- 子·激光,2003,14(5):659-664.
- [4] Filip Tavernier, Michiel Steyaert. A bandwidth enhanced transimpedance amplifier with improved noise performance[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2011, 66(2): 277-283.
- [5] Karppinen Mikko, Tanskanen Antti, Ollila Jyrki, et al. Fiber-optic transceiver for high-speed intra-satellite links [A]. Proc. of AVFOP[C]. 2012, 34-35.
- [6] Cardenas Lopez D F, Nespola A, Abrate S, et al. 100 Gbit/s ethernet transmission over 275 m of large core step index polymer optical fiber: results from the POF-all european project[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(14): 2908-2915.
- [7] XIAO Xin-dong, MAO Lu-hong, YU Chang-liang, et al. A 1 Gb/s CMOS optical receiver with regulated cascode scheme[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(4): 520-523.
肖晓东,毛陆虹,余长亮,等. 1 Gb/s CMOS 调节型共源共栅光接收机[J]. 光电子·激光, 2010, 21(4): 520-523.
- [8] TANG Jun, PEI Wei-hua, LU Lin, et al. Fabrication of high speed parallel 12-channel optical receiver module with 40 Gbit/s[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(8): 1187-1189.
唐君,裴为华,鲁琳,等. 40 Gbit/s 高速并行 12 信道光接收模块的研制[J]. 光电子·激光, 2011, 22(8): 1187-1189.
- [9] Kao T S C, Musa F A, Carusone A C. A 5-Gbit/s CMOS optical receiver with integrated spatially modulated light detector and equalization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Paper, 2010, 57(11): 2844-2857.
- [10] LI Ji-fang, CHENG Xiang, YAN Huang-ping, et al. Research of monolithic optoelectronic integrated circuit in 0.5 μm standard CMOS technology[A]. Proc. of NEMS [C]. 2010, 1141-1144.
- [11] YU Chang-liang, MAO Lu-hong, XIAO Xin-dong. Standard CMOS implementation of a novel, fully differential optoelectronic integrated receiver[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(4): 432-435.
余长亮,毛陆虹,肖晓东. 一种新颖全差分光电集成接收机的标准 CMOS 实现[J]. 光电子·激光, 2009, 20(4): 432-435.
- [12] YAN Huang-ping, CHENG Xiang, HUANG Yuan-qing. Research of silicon-based monolithic 850 nm optical receiver[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(4): 676-680.
颜黄苹,程翔,黄元庆. Si 基单片集成 850 nm 光接收芯片研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(4): 676-680.
- [13] LI Ji-fang, YAN Huang-ping, CHENG Xiang, et al. Design of a POF receiver with integrated photodiode in 0.5 μm BCD process[A]. Proc. of ASIC[C]. 2011, 194-197.
- [14] Kang-Yeob Park, Won-Seok Oh, Woo-Young Choi. Design of CMOS led driver and optical receiver for 650 nm POF applications[A]. Proc. of ISCIT[C]. 2009, 1375-1380.
- [15] Kang-Yeob Park, Won-Seok Oh, Jong-Chan Choi, et al. Design of 250-Mb/s low-power fiber optic transmitter and receiver ICs for POF applications [J]. Journal of Semiconductor Technology and Science, 2011, 11(3): 221-228.
- [16] Aznar F, Celma S, Calvo B, et al. A 0.18 μm CMOS integrated transimpedance amplifier-equalizer for 2.5 Gb/s [A]. Proc. of IEEE MWSCAS[C]. 2010, 604-607.

作者简介:

史晓凤 (1987-), 女, 安徽亳州人, 博士研究生, 主要从事塑料光纤通信用的光电集成芯片和接收芯片等方面的研究。