

一种基于 BCD 工艺的 850 nm 光接收芯片的研制

颜黄苹, 程翔, 李继芳, 黄元庆*

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 采用 0.5 μm BCD 工艺研制了一种 850 nm 光接收芯片, 包括光电探测器、跨阻前置放大器及后续处理电路. 通过器件模拟设计并分析了基于 BCD 工艺的光电探测器的结构及其特性; 设计光接收芯片的增益约为 43.23 k Ω , 上限截止频率为 700 MHz. 测试结果表明, 探测器暗电流为 pA 量级, 响应度为 0.08 A/W. 光接收芯片功耗约为 100 mW, 电噪声为 4 nW; 在输入 313 Mbit/s 非归零伪随机二进制序列调制的信号及无误码的情况下, 灵敏度为 -13.0 dB \cdot m; 该光接收芯片速率可达 622 Mbit/s.

关键词: 光接收芯片; BCD; 探测器; 前置放大器

中图分类号: TN 491

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2010)05-0640-05

光接收机是光纤通信系统的重要组成部分. GaAs 基和 InP 基光接收机成本较高, 限制了它们在短距离光通信的应用. 硅材料对 850 nm 波段的光有很好的响应, 并且硅光电探测器与硅微电子工艺完全兼容, 在硅基上实现单片集成的光接收芯片可以提高芯片的整体性能. 光电集成芯片不仅消除寄生参量的影响, 减小芯片的体积, 同时可以大大降低器件成本和封装成本, 可广泛应用于 DVD/CD-ROM、850 nm 光纤通信等领域, 在甚短距离传输等光互连、高速光存储系统中也有重要的应用.

目前, 各类硅基光接收芯片几乎涉及了 Bipolar、CMOS、BiCMOS、BCD (Bipolar、CMOS & DMOS)、SOI (Silicon on insulator) 等工艺. Bipolar、BiCMOS 及 SOI 工艺更适合制备高性能的光电探测器^[1,2]. CMOS 工艺相比 Bipolar 工艺具有低功耗、高集成度、设计简单等优点; CMOS 工艺比 BiCMOS、BCD 和 SOI 工艺则有较低的成本. 2009 年, 加拿大多伦多大学的 Kao 等^[3]报道采用了 0.18 μm CMOS 工艺制作了速率达 5 Gb/s 的光接收机, 但探测器的响应度只有 0.05 A/W. Garrett 与 Zimmermann 等^[4,6]采用自定制 CMOS 工艺得到高性能的硅探测器, 但与商业的 CMOS 标准工艺不完全兼容. 虽然 CMOS 工艺成为低成本单片集成光接收芯片的主流工艺, 但 BCD 工艺可在同一衬底上集成 Bipolar 器件、CMOS 器件和 DMOS 器件, 综合了双极器件高跨导、强负载驱动能

力和 CMOS 集成度高、低功耗的优点, 可以为研制高性能的硅光电探测器和硅基单片集成光接收芯片提供一个创新思路和有益探索. 本文利用 0.5 μm BCD 工艺研制了 850 nm 硅基高速光接收芯片, 经测试表明, 该光电探测器的响应度可达 0.08 A/W, 光接收芯片速率可达 622 Mbit/s.

1 光电探测器设计与模拟

1.1 光电探测器结构

本文研制的 850 nm 光接收芯片, 采用 0.5 μm BCD 工艺, 其中光电探测器利用 BN⁺ 埋层形成垂直的 P-FN 结构, 以消除衬底中光生载流子慢扩散对响应速度的影响. 探测器由 P⁺ 区、N⁺ 区及它们之间的 N-EPI 外延层区形成, 其剖面图如图 1 所示, 图中未给出表面绝缘介质层和钝化层. 利用 BN⁺ 埋层作为探测器的阴极, N⁺ 接高电位; N-EPI 外延层上表面的 P⁺ 作为光电探测器的阳极, 阳极为后续处理电路的输

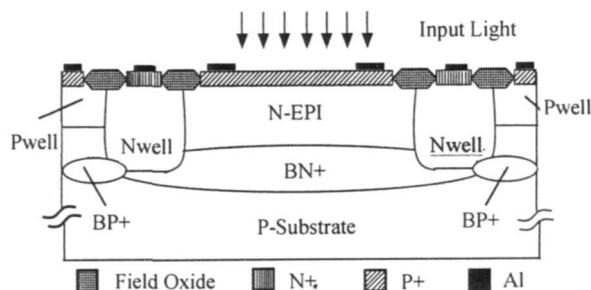


图 1 探测器结构图

Fig. 1 Structure of photodetector

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 厦门市科技计划项目(3502Z20063002)

* 通讯作者: huangyq@xmu.edu.cn

入; N 阱外围的 P 阱可以屏蔽衬底部分光生载流子, 起到了隔离探测器与其他 BCD 器件的作用。

探测器的等效电路模型如图 2 所示. 图中的 I_{opt} 和 I_{dark} 分别为探测器的光电流和暗电流. 探测器暗电流主要包括非耗尽区热平衡载流子的扩散电流、耗尽区的产生-复合电流、表面复合电流以及隧穿电流. 由于探测器工作在低的反偏电压下, 可忽略隧穿电流的影响.

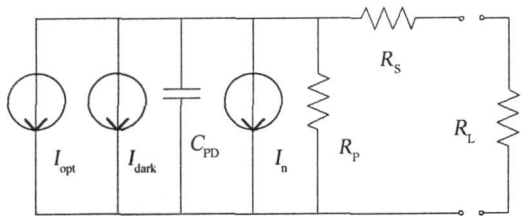


图 2 探测器等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of photodetector

忽略 PN 结侧面电容的影响, 则探测器的结电容 C_{PD} 可近似表示为一个平板电容^[7]:

$$C_{PD} = \frac{\epsilon A}{W} = A \sqrt{\frac{\epsilon_s q N_A N_D}{2(N_A + N_D)(V_{bi} - 2KT/q - T)}}$$

其中 ϵ 为硅的介电常数, A 为探测器的有效光敏面积, W 为耗尽区宽度, q 为电子电量, N_D 和 N_A 分别为施主和受主浓度, V_{bi} 为内建电势; K 为波耳兹曼常数, T 为温度, V 为探测器所加偏压.

R_P 和 R_S 分别表示探测器的并联电阻和串联电阻, R_L 为负载电阻. 探测器的噪声主要有散弹噪声、探测器并联电阻的热噪声及探测器串联电阻的热噪声, 用噪声电流 I_n 表示. 该电路的时间常数 $\tau_{rc} = [(R_S + R_L) // R_P] C_{PD}$. 通常探测器的 R_P 比 R_L 和 R_S 大得多, 它对时间常数的影响可以忽略. 探测器工作在反向偏压下, 暗电流和各种噪声电流远小于光电流, 可以不予考虑. 因此探测器的等效电路模型可进一步简化为由 I_{opt} 、 C_{PD} 、 R_S 组成.

1.2 光电探测器模拟与分析

本文根据 BCD 工艺规则和光接收机要求, 设计了探测器的横向尺寸, 其有效光敏面积为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 并对该探测器进行仿真模拟. 图 3 为探测器在光波长为 850 nm 时, 响应度与外加偏压的关系曲线. 从图上可知, 外加电压对响应度影响不大. 当外加偏压为 5 V 时, 响应度为 0.14 A/W. 图 4 为探测器光谱响应曲线, 从图中可知, 探测器有很宽的光谱响应范围, 在 200~ 900 nm 波长范围内探测器的响应度都能达到 0.05 A/W 以上. 当光波长为 600 nm 时, 响应度达到

峰值, 为 0.34 A/W; 光波长为 850 nm 时, 响应度为 0.14 A/W. 探测器经工艺模拟仿真, 调制频率带宽约为 700 MHz. 探测器的响应速度受到 3 种因素综合作用的限制, 即载流子扩散到耗尽区的时间、耗尽区内的漂移时间和耗尽区的电容.

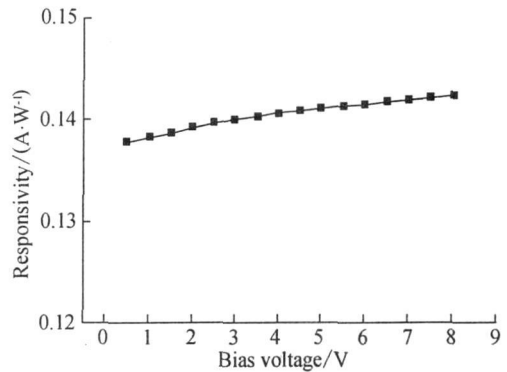


图 3 探测器响应度

Fig. 3 Simulated responsivity of photodetector

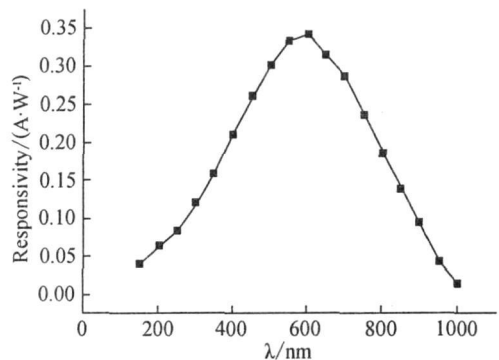


图 4 探测器光谱响应

Fig. 4 Spectral response of photodetector

2 光接收芯片电路设计

BCD 工艺下的 850 nm 光接收芯片的原理框图如图 5 所示, 该芯片包含 1 个硅基光电探测器 (Photodetector, PD), 1 个宽带跨阻放大器 (Transimpedance amplifier, TIA), 一个用于单双端转换的 RC 滤波器, 3 个同样结构的差分放大器 (Differential amplifier, DA) 以及输出缓冲器 (Output buffer, OB). 光电探测器将输入的光信号转变为微弱的光电流, 由 TIA 将微弱的光电流转换成相应的电压, 实现前置放大. 为了提高整个光接收芯片的光响应, 经前置放大后的信号经过单双端转换的 RC 滤波器, 进入 3 个同样结构的 DA 进行二次放大. OB 用于实现与传输线的阻抗匹配.

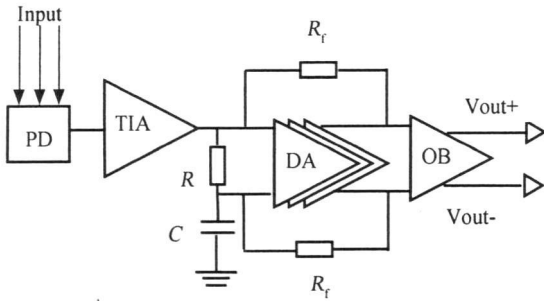


图 5 850 nm 光接收芯片的原理框图

Fig. 5 Schematic of 850nm optical receiver

TIA 是光接收芯片中的一个重要组成部分,影响到整个光接收芯片的性能,如速率、灵敏度和信噪比等.光电探测器产生的光电流很小,通常为 μA 量级.为提高信噪比,一般采用低噪声、高增益的宽带前置放大器.综合考虑带宽、噪声、增益和功耗等因素,采用了 RGC(Regulated cascode) 结构作为 TIA,其结构如图 6(a) 所示. RGC 结构由 M_1, M_b, R_s, R_b, R_1 组成,具有较大的输入跨导,更好地隔离了输入寄生电容(包括探测器的电容)对带宽的限制.同时这种结构也引入了反馈机制,使得直流偏置更稳定. M_2 和 R_2 构成源极跟随器,可以有效隔离后续电路的密勒电容,提高带宽. M_3 和 R_3 构成共漏级放大级,进一步放大信号. M_4 和 R_4 也构成源极跟随器,可以实现阻抗的转变,并利于后续电路的级联.

在图 6(b) 中, DA 采用了有源电感作负载的结构,并利用并联峰化技术有效的拓宽带宽.图 6(c) 所示的是 OB 的电路结构.其中 R 为 100Ω .

图 7 为光接收芯片的频率响应图.从图中可以看出,电路的增益约为 $43.23 \text{ k}\Omega$, 下限截止频率为 570 Hz , 上限截止频率为 700 MHz , 与探测器的 700 MHz 的截止频率相当,可以得出整个光接收芯片的带宽约

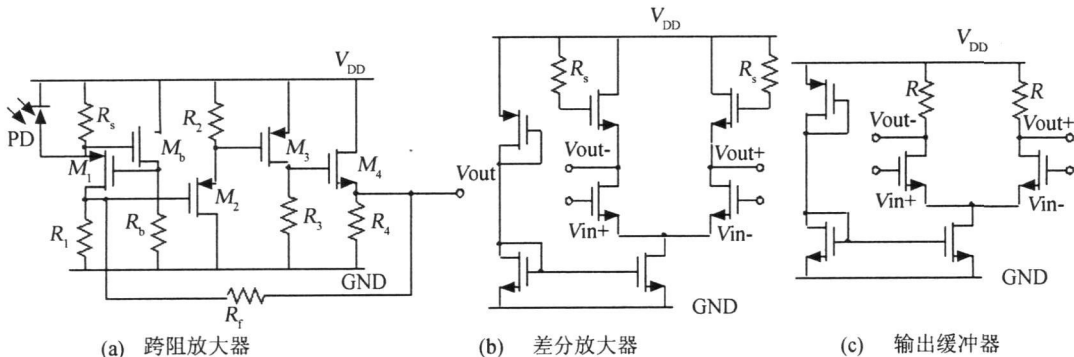


图 6 光接收芯片处理电路图

Fig. 6 Processing circuit of optical receiver

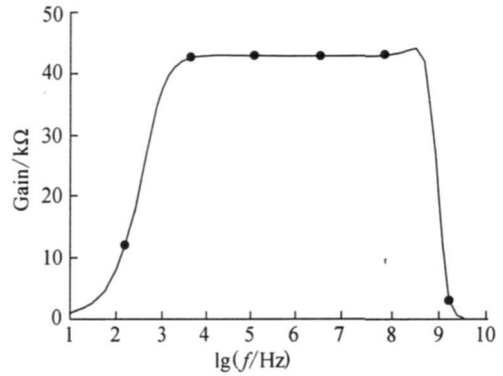


图 7 光接收芯片的频率响应

Fig. 7 Frequency response of optical receiver

为 700 MHz , 基本可以满足千兆光纤接入网的传输要求.

3 实验结果

本文分别对单独的探测器和集成探测器和处理电路的光接收芯片进行了封装测试.单独的探测器经测试,暗电流为 pA 量级, 5 V 反向偏压下 850 nm 的响应度为 0.08 A/W . 测试的响应度 0.08 A/W 与器件模拟仿真的响应度 0.14 A/W 相差较大,初步分析,这是由于光没有完全耦合进去造成的测试响应度数值较小.为了便于测试,对集成探测器及处理电路的光接收芯片进行 ROSA (Receiver optical sub assembly) 封装,经测试,芯片功率约为 100 mW , 经噪声功率计测试,其电噪声为 4 nW . ROSA 在输入 313 Mbit/s 非归零伪随机二进制序列调制的信号及无误码的情况下,灵敏度为 $-13.0 \text{ dB}\cdot \text{m}$.

为了测试 ROSA 的传输特性,估计其小信号带宽,得到光接收芯片的最大传输码率,采用 Agilent E8362B 20 GHz 矢量网络分析仪通过频率扫描进行

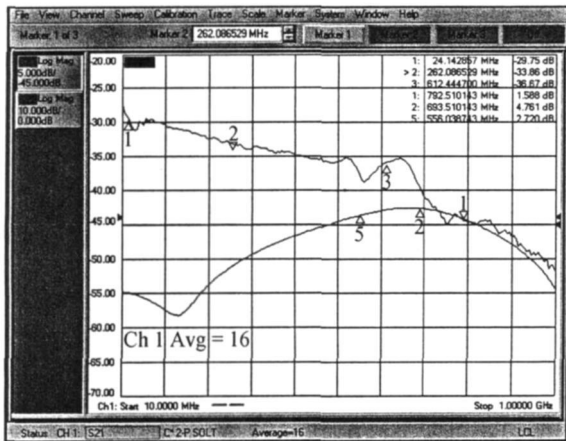


图 8 S_{21} 的频率特性

Fig. 8 Frequency characteristic of S_{21}

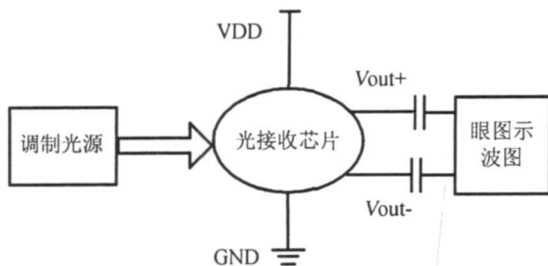
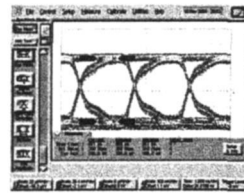


图 9 眼图测试电路

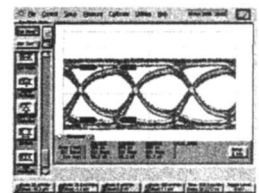
Fig. 9 Testing circuit of eye diagram

了 S 参数的测量. 测试结果如图 8 所示, 横坐标为测试的频率, 扫描频率从 10 MHz 到 1 GHz, 纵坐标为 S_{21} , 单位为 dB. 从节点 1 的频率 24.14 MHz 到节点 3 的频率 612.44 MHz 之间, S_{21} 较为平稳光滑, 其值从 -29.75 dB 到 -36.67 dB. 测试结果可看出 ROSA 在近千兆的传输速率下增益仍可以保持, 其带宽大约为 700 MHz, 最大传输码率约为 1 000 Mbit/s, 与仿真结果基本对应. 但由于测试中还涉及光发射模块、光接收模块及引线等因素, 测试结果只是近似反映 ROSA 芯片的传输特性.

眼图是判断数字光纤通信系统中有无码间干扰、接收性能好坏的最直观简单的方法. 光接收芯片的眼图测试电路如图 9 所示. 调制光源的调制电信号是由安立 ME520B 及 Optellent 3200 脉冲/码型发生器产生的非归零伪随机二进制序列信号. 眼图仪采用安捷伦公司的高速宽带示波器 Agilent 86100A. 经过调制的 850 nm 光信号经光纤耦合到光探测器光敏区, 光接收芯片输出信号输出到 Agilent 86100A 眼图仪. ROSA 在输入 313 和 622 Mbit/s 的 2^7-1 非归零伪随机二进制序列信号作用下输出的眼图分别如图 10(a) 和 (b) 所示, 从图中可以看出, 眼图较为清晰, 张



(a) 313 Mbit/s



(b) 622 Mbit/s

图 10 光接收芯片眼图

Fig. 10 Eye diagram of optical receiver

开度较大, 上升沿与下降沿的交点稍微偏移了中间点. 在 313 Mbit/s 速率信号下, 最大和最小上升时间分别为 889 和 911 ps, 幅值为 106 mV. 在 622 Mbit/s 速率信号下, 最大和最小上升时间都为 689 和 689 ps, 幅值为 90.3 mV. 结果表明, ROSA 在 622 Mbit/s 信号传输速率下可正常工作.

4 结 论

本文采用 0.5 μm BCD 工艺研制了一种 850 nm 光接收芯片, 包括“P+ / N- EPI 外延层/ BN+ 埋层”结构的光电探测器、跨阻前置放大电路及其后续处理电路. 仿真结果表明, 在 850 nm 光照下探测器的响应度为 0.14 A/W, 调制频率带宽为 700 MHz; 光接收芯片的增益约为 43.23 k Ω , 上限截止频率为 700 MHz. 测试结果表明, 探测器暗电流为 pA 量级, 响应度为 0.08 A/W. 光接收芯片功耗约为 100 mW, 电噪声为 4 nW; 在输入 313 Mbit/s 非归零伪随机二进制序列调制的信号及无误码的情况下, 灵敏度为 -13.0 dB·m. 该光接收芯片在 622 Mbit/s 信号传输速率下得到清晰的眼图. 本文采用 BCD 工艺对 850 nm 硅基高速集成光接收芯片的研制进行了有益的探索, 对下一步更高性能的光接收芯片的设计和研制具有参考价值, 同时该研究工作对于 650 nm 塑料光纤通信的光接收芯片的研制也具有指导意义.

参考文献:

- [1] Swoboda R, Knorr J, Zimmermann H. A 5 Gb/s OEIC with voltage up converter [J]. IEEE Journal of Solid state Circuits, 2005, 40(7): 1521-1526.
- [2] Csutak S M, Schaub J D, Wu W E, et al. High speed monolithically integrated silicon optical receiver fabricated in 130 nm CMOS technology [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(4): 516-518.
- [3] Kao Tony Shuo Chun, Carusone Anthony Chan. A 5 Gbit/s optical receiver with monolithically integrated photo

- detector in 0.18 μm CMOS[C]//IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Boston: IEEE, 2009: 451-454.
- [4] Garrett L D, Qi J, Schow C L, et al. A silicon based integrated NMOS p-i-n photoreceiver[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(3): 411-416.
- [5] Zimmermann H. Improved CMOS integrated photodiodes and their application in OEICs[C]//High Performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications Workshop. London: IEEE, 1997: 346-351.
- [6] Zimmermann H, Heide T, Ghazi A. Monolithic high speed CMOS photoreceiver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(2): 254-256.
- [7] 施敏. 半导体器件物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.

Research of 850 nm Optical Receiver Based on BCD Technology

YAN Huang-ping, CHENG Xiang, LI Ji-fang, HUANG Yuan-qing*

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: An 850 nm optical receiver has been developed with 0.5 μm BCD technology, including a photodetector, transimpedance preamplifier and the relevant processing circuit. The structure and characteristics of photodetector based on BCD technology are designed and analyzed by device technology simulation. The gain and uppercut off frequency of optical receiver is designed to 43.23 k Ω and 700 MHz, respectively. Measurement results indicate that the dark current of photodetector is pA magnitude and responsivity is 0.08 A/W. The power dissipation of optical receiver is 100 mW, and the electrical noise is 4 nW. The sensitivity of optical receiver is -13.0 dB \cdot m without bit error for the 850 nm optical signal modulated by 313 Mbit/s NRZ pseudo random binary sequence. The optical receiver is in normal operation for the modulated 622 bit/s optical signal.

Key words: optical receiver; BCD; photodetector; preamplifier