

doi:10.3788/gzxb20134209.1018

塑料光纤通信 650 nm 单片集成光接收芯片研究

颜黄苹,程翔,黄元庆,谢海鹤

(厦门大学 物理与机电工程学院 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘 要:设计了一种用于塑料光纤通信的 650 nm 单片集成光接收芯片,包括光电探测器、跨阻前置放大器、单双端转换、差分放大器、输出缓冲器及失调电压补偿电路.基于合理假设与近似,从稳态连续方程和边界条件出发,分析了探测器的光谱响应;采用拉普拉斯变换方法,分析其频率响应.采用 0.5 μm BCD 工艺流片,光接收芯片版图面积 $832 \times 948 \mu\text{m}^2$ 进行测试,结果表明 5V 反向偏压下,探测器在 650 nm 的响应度为 0.26 A/W;光接收芯片在 180 Mbps 速率及误码率小于 10^{-9} 情况下,灵敏度为 -14.6 dBm;在 100 Mbps 非归零伪随机二进制序列信号速率及误码率小于 10^{-9} 情况下,能得到清晰的眼图.

关键词:光接收芯片;单片集成;光电探测器;塑料光纤通信

中图分类号:TN364+.2;TN303;TN491 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2013)09-1018-7

Research of 650 nm Monolithic Optical Receiver for Plastic Optical Fiber Communication

YAN Huang-ping, CHENG Xiang, HUANG Yuan-qing, XIE Hai-he

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

Abstract: A 650 nm monolithic optical receiver for plastic optical fiber communication is proposed, including a photodetector, a transimpedance preamplifier, a single to differential conversion, a cascade of differential amplifiers, an output buffer and an offset voltage compensation. Based on reasonable assumption and approximation, the spectral response of photodetector is analyzed according to its steady-state continuity equation and boundary conditions. Analysis of frequency response is established due to the basic equations of the photodetector by Laplace transform method. The layout area of monolithic optical receiver is about $832 \times 948 \mu\text{m}^2$ with 0.5 μm BCD process. Measurement results indicate that the responsivity of photodetector is 0.26 A/W for 650 nm at 5 V reverse bias. The sensitivity is -14.6 dBm at 180 Mbps and bit error rate less than 10^{-9} . A clear eye diagram is demonstrated for 100Mbps pseudorandom binary sequence and bit error rate less than 10^{-9} .

Key words: Optical receiver; Monolithic; Photodetector; Plastic optical fiber communication

0 引言

近年来,塑料光纤(Plastic Optical Fiber,POF)因具有芯径大、质地柔软、联结容易、质量轻、价格便宜、传输带宽大等优点适用于短距离、甚短距离通信而受到国际上的普遍关注^[1-3].

目前国内外商业用塑料光纤通信 650 nm 光接收芯片产品均为光电探测器与后续处理电路分立的状态.国外研究者也开始采用光电集成(Opto-Electronic Integrated Circuits,OEIC)的方式对 650 nm 的光接收芯片进行研究,但为数不多.2010 年,比利时 Oleksiy Pazyuk 等^[4]采用 BiCMOS 工艺

基金项目:国家自然科学基金(No.61205060)和福建省自然科学基金(No.2013J01251)资助

第一作者:颜黄苹(1975-),女,讲师,博士,主要研究方向为光电集成、光电传感与检测. Email:hpyan@xmu.edu.cn

收稿日期:2013-03-25;录用日期:2013-07-08

对光电探测器和跨阻放大器进行单片集成, 150 Mbps 传输速率下灵敏度达到 -26 dBm. 奥地利 M. Atef, R. Swoboda 等人对 650 nm 单片集成光接收芯片开展大量研究^[5-7], 其中基于 $0.6 \mu\text{m}$ BiCMOS 工艺, 采用双探测器结构, 并在处理电路中加入均衡器, 实现 650 nm 光接收芯片的单片集成, 1.25 Gb/s 传输速率下灵敏度达到 -22 dBm. 2011 年加拿大多伦多大学 Dong Yunzhi, K. Martin 等人^[8]采用台积电 65 nm CMOS 工艺通过电路设计补偿 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 大面积探测器带来的带宽损失, 虽然传输速率可达 3.125 Gbps, 但灵敏度仅为 -3.8 dBm.

文献^[9]研究了 850 nm 单片集成光接收芯片, 多次流片成功并获得较好的测试结果. 在此基础上, 本文基于华润上华低成本 $0.5 \mu\text{m}$ BCD (Bipolar, CMOS & DMOS) 工艺研制了可用于光纤到户 (Fiber To The Home, FTTH)^[10-11] 的 650 nm 单片集成光接收芯片, 对 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 大面积光电探测器进行协同设计与优化, 对标准工艺下纵向结构大面积光电探测器和横向结构跨阻放大器结构和工艺兼容性问题进行了探索. 测试结果表明, 5 V 反向偏压下, 光电探测器在 650 nm 的响应度为 0.26 A/W , 光接收芯片速率可达 180 Mbps, 在误码率小于 10^{-9} 情况下, 灵敏度为 -14.6 dBm.

1 光接收芯片工作原理

图 1 是 650 nm 光接收芯片的原理框图, 主要由光电探测器 (Photodetector, PD)、跨阻放大器 (Transimpedance Amplifier, TIA)、单双端转换电路、差分放大器 (Differential Amplifier, DA)、输出缓冲器 (Output Buffer, OB) 及失调电压补偿电路组成. 其中, 光电探测器的作用是将经过塑料光纤传输

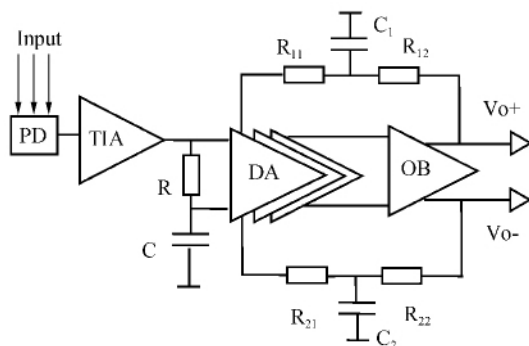


图 1 650 nm 光接收芯片的原理框图
Fig. 1 Schematic of 650 nm optical receiver

衰减和畸变后的微弱光脉冲信号通过光电转换变为电流信号. 因此, 对光电探测器的基本要求是高光电转换效率、低附加噪音和快速响应.

光电探测器产生的光电流十分微弱, 需要一个宽带跨阻放大器将微弱电流信号转换为电压信号并进行放大. 综合考虑带宽、噪音、增益和功耗等因素, 采用了可调节共源共栅 (Regulated Cascade, RGC) 结构作为跨阻前置放大器^[12].

为了获得较低的噪音和较大的带宽, 宽带跨阻放大器的增益不能太高. 因此, 经前置放大后的信号经过单双端转换的 RC 滤波器, 进入差分放大器进一步放大, 以达到所要求的幅度, 驱动后续的时钟恢复和数据判决电路. 差分放大器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.

差分放大器各级之间采用直接耦合方式, 且有较高的增益. 工艺过程中, 由于前级放大单元的器件不匹配等因素产生的直流失调电压经过放大后, 会导致后级放大单元直流工作点大幅度的偏移, 甚至可能使其后的放大级和输出缓冲级达到截止或饱和. 失调电压补偿回路中, 电阻 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{21} 和 R_{22} 与电容 C_1 和 C_2 构成低通滤波网络, 直流反馈从输出端接至输入端, 使用低通滤波消除交流信号, 同时利用负反馈实现放大器多级偏置, 减小器件不匹配对工作点和放大器增益的影响, 减小电路对工艺变化的敏感度^[13].

最后, 输出缓冲器采用 50Ω 电阻作负载的差分共源级放大器, 用于实现与传输线的阻抗匹配.

2 光电探测器设计

2.1 光电探测器结构

基于单片集成光接收芯片中对光电探测器的要求及 $0.5 \mu\text{m}$ BCD 工艺规则, 设计了光电探测器的结构 (如图 2). 探测器采用 P+/N-EPI/BN+ 垂直结构, 以消除衬底中光生载流子慢扩散对响应速度

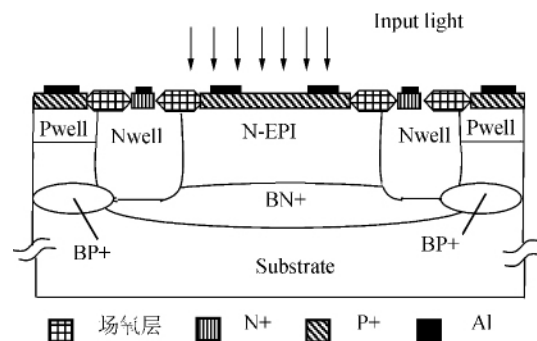


图 2 探测器结构
Fig. 2 Structure of photodetector

的影响. 利用 BCD 工艺中的 BN+ 埋层作为探测器的阴极, 阴极接高电位; N-EPI 外延层类似 PIN 探测器的 I 层, 为 $4.5 \mu\text{m}$; P+ 为光电探测器的阳极, 接后续处理电路. 图中省略了电极、多层金属互连以及层间介质层二氧化硅 SiO_2 和表面钝化层氮化硅 Si_3N_4 . SiO_2 和 Si_3N_4 层可间接作为抗反射膜 (Anti-Reflection Coating, ARC).

图 3 给出图 2 所示的 P+/N-EPI/BN+ 结构探测器的一维物理模型, 从左往右依次是 BCD 工艺中的 Si_3N_4 和 SiO_2 、P+、N-EPI、BN+、P-Sub.

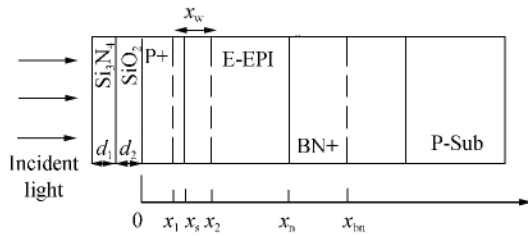


图 3 探测器一维物理模型

Fig. 3 One-dimensional physical model of photodetector

2.2 光谱响应

当入射光功率为 P 时, 不计表面钝化与介质层对光的吸收, 可以得到稳态下在器件内距光入射表面 x 处的光生载流子产生率^[14]为

$$G(x) = -\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} = \alpha \varphi_0 \exp(-\alpha x) = \frac{P(1-R)\alpha \cdot \exp(-\alpha x)}{A \cdot h\nu} \quad (1)$$

式中 α 为光吸收系数, φ_0 为稳态下表面单位面积入射光子通量, h 为普朗克恒量, ν 为入射光频率, R 为器件表面反射系数.

在稳态工作条件下, 设 $\Delta p_n(x)$ 为 N-EPI 区的非平衡少数(空穴)浓度; $\Delta n_p(x)$ 为 P+ 区的非平衡少数(电子)浓度; p_{n0} 和 n_{p0} 分别为 N-EPI 区中空穴的平衡浓度和 P+ 区中电子的平衡浓度; τ_p 和 τ_n 分别为 N-EPI 区和 P+ 区的少数寿命; $D_{p\text{BN}^+}$ 、 D_p 、 D_n 分别为 BN+ 区、N-EPI 区和 P+ 区的少数扩散系数; $L_{p\text{BN}^+}$ 、 L_p 、 L_n 分别为 BN+ 区、N-EPI 区和 P+ 区的少数扩散长度, s_1 为表面复合速率. N-EPI 与 BN+ 之间形成高低结结构, BN+ 区对少子的影响归结到表面结泄露速度 s_{nn^+} .

基于合理的假设与近似^[15], 理论分析得到小注入、稳态情况下 P+/N-EPI/BN+ 探测器各个区及总的电流密度为

1) P+ 区

P+ 区光生少数(电子)以扩散运动为主, 其稳态连续方程和边界条件为

$$D_n \frac{\partial^2 \Delta n_p(x)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p(x)}{\tau_n} + G(x) = 0 \quad (2)$$

$$D_n \frac{\partial \Delta n_p(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = s_1 \cdot \Delta n_p(x=0) \quad (3)$$

$$\Delta n_p(x=x_1) = n_p(x_1) - n_{p0} = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

P+ 区的光电流密度可表示为

$$J_{P^+} = -qD_n \frac{\partial \Delta n_p(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -qD_n \left\{ \frac{\frac{\alpha \varphi_0 \tau_n}{L_n^2 \alpha^2 - 1} \exp\left(\frac{x_1}{L_n}\right) \left[\left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + s_1 \right) \exp\left(-\alpha x_1 + \frac{x_1}{L_n}\right) - s_1 - \alpha D_n \right]}{(D_n + L_n s_1) \exp\left(\frac{2x_1}{L_n}\right) + D_n - L_n s_1} + \frac{n_{p0} \exp\left(\frac{2x_1}{L_n}\right) \left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + s_1 \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right]}{(D_n + L_n s_1) \exp\left(\frac{2x_1}{L_n}\right) + D_n - L_n s_1} + \frac{n_{p0} \exp\left(\frac{-2x_1}{L_n}\right) \left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} - s_1 \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right]}{(D_n - L_n s_1) \exp\left(\frac{-2x_1}{L_n}\right) + D_n + L_n s_1} - \frac{\frac{\alpha \varphi_0 \tau_n}{L_n^2 \alpha^2 - 1} \exp\left(\frac{-x_1}{L_n}\right) \left[\left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} - s_1 \right) \exp\left(-\alpha x_1 - \frac{x_1}{L_n}\right) + s_1 + \alpha D_n \right]}{(D_n - L_n s_1) \exp\left(\frac{-2x_1}{L_n}\right) + D_n + L_n s_1} + \frac{\alpha^2 \varphi_0 \tau_n}{L_n^2 \alpha^2 - 1} \exp(-\alpha x_1) \right\} \quad (5)$$

2) P+/N-EPI 耗尽区

P+/N-EPI 耗尽区光电流主要由光生载流子漂移产生, 该区的光电流密度为

$$J_{\text{depl}} = q \int_{x_1}^{x_2} G(x) dx = q \varphi_0 \exp(-\alpha x_1) \cdot [1 - \exp(-\alpha x_w)] \quad (6)$$

3) 非耗尽 N-EPI 区与 BN+ 区

非耗尽 N-EPI 区与 BN+ 区光生少数(空穴)以扩散运动为主, 其稳态连续方程和边界条件为

$$D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n(x)}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n(x)}{\tau_p} + G(x) = 0 \quad (7)$$

$$D_p \frac{\partial \Delta p_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_n} = -S_{\text{nn}^+} \cdot \Delta p_n(x=x_n) \quad (8)$$

$$\Delta p_n(x=x_2) = p_n(x_2) - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

非耗尽 N-EPI 区与 BN+ 区光电流密度可表示为

$$J_{N-EPI} = qD_p \frac{\partial \Delta p_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = qD_p \left\{ \frac{\frac{\alpha \varphi_0 \tau_p}{L_p^2 \alpha^2 - 1} \left[(s_{nn^+} - \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}) \exp\left(-\alpha x_2 + \frac{2x_2}{L_p}\right) - (s_{nn^+} - \alpha D_p) \exp\left(-\alpha x_n + \frac{x_n + x_2}{L_p}\right) \right]}{(L_p s_{nn^+} - D_p) \exp\left(\frac{2x_2}{L_p}\right) - (L_p s_{nn^+} + D_p) \exp\left(\frac{2x_n}{L_p}\right)} + \frac{p_{n0} \exp\left(\frac{2x_2}{L_p}\right) (s_{nn^+} - \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}) \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right]}{(L_p s_{nn^+} - D_p) \exp\left(\frac{2x_2}{L_p}\right) - (L_p s_{nn^+} + D_p) \exp\left(\frac{2x_n}{L_p}\right)} + \frac{\frac{\alpha \varphi_0 \tau_p}{L_p^2 \alpha^2 - 1} \left[(s_{nn^+} + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}) \exp\left(-\alpha x_2 - \frac{2x_2}{L_p}\right) - (s_{nn^+} - \alpha D_p) \exp\left(-\alpha x_n - \frac{x_n + x_2}{L_p}\right) \right]}{(L_p s_{nn^+} + D_p) \exp\left(\frac{-2x_2}{L_p}\right) - (L_p s_{nn^+} - D_p) \exp\left(\frac{-2x_n}{L_p}\right)} + \frac{p_{n0} \exp\left(\frac{-2x_2}{L_p}\right) (s_{nn^+} + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}) \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right]}{(L_p s_{nn^+} + D_p) \exp\left(\frac{-2x_2}{L_p}\right) - (L_p s_{nn^+} - D_p) \exp\left(\frac{-2x_n}{L_p}\right)} + \frac{\alpha^2 \varphi_0 \tau_p}{L_p^2 \alpha^2 - 1} \exp(-\alpha x_2) \right\} \quad (10)$$

总的电流密度可表示为

$$J = J_{P+} + J_{depl} + J_{N-EPI} = J_L + J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

式中 J_L 为光电流密度, J_0 为与光照无关的反向饱和电流密度, 由热平衡载流子的扩散产生, 可以归结为探测器暗电流的一部分。

因此, 其响应度可表示为

$$R_{es} = \frac{(1-R)J_L}{\varphi_0 h\nu} \quad (12)$$

式中器件表面反射系数 R 由 SiB_3N_4 和 SiO_2 组成的双层薄膜结构决定。

根据以上理论分析和探测器主要模型参量, 得到 P+/N-EPI/BN+ 光电探测器在 5 V 反向偏

压、 SiO_2 和 Si_3N_4 层作为抗反射膜条件下的光谱响应曲线, 如图 4. 5 V 反向偏压下, 探测器在 650 nm 的响应度为 0.263 A/W。

2.3 频率响应

在不接外电路情况下, 探测器的动态特性主要受耗尽区内光生载流子的漂移时间、扩散区内载流子的扩散时间的限制, 由此造成的频率限制称为光电探测器的固有频率; 结电容和负载电阻加上串联电阻构成的时间常量的限制对应地可称为光电探测器的电器频率。

下面直接从光电探测器的基本方程出发, 采用拉普拉斯变换方法, 分析其频率响应特性。因为探测器的固有频率与负载无关, 因此以下分析考虑短路条件的情况。

从稳态响应度分析知道, 热平衡少子仅对暗电流有贡献, 在频率响应分析中可以不考虑热平衡少子的影响。根据探测器各部分的载流子运动方程与边界条件, 采用拉普拉斯变换法, 引入复数参量 s , 可得到

$$1) \text{ P+ 区} \quad D_n \frac{\partial^2 \Delta n_p(x, s)}{\partial x^2} - \left(\frac{1}{\tau_n} + s\right) \Delta n_p(x, s) = -\alpha \varphi(s) e^{-\alpha x} \quad (13)$$

$$D_n \frac{\partial \Delta n_p(x, s)}{\partial x} \Big|_{x=0} = s_1 \Delta n_p(x=0, s) \quad (14)$$

$$\Delta n_p(x=x_1, s) = 0 \quad (15)$$

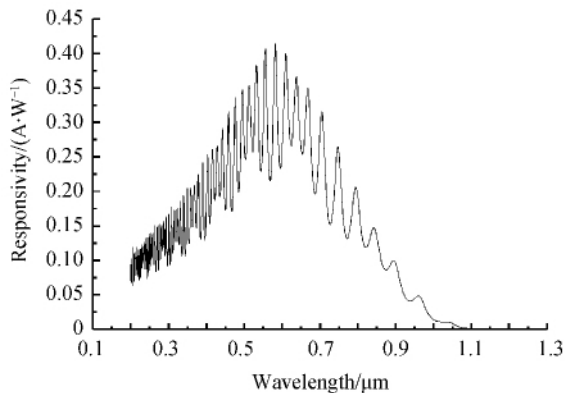


图 4 650 nm 探测器光谱响应

Fig. 4 Spectral response of 650 nm photodetector

2) N-EPI 区

$$D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n(x, s)}{\partial x^2} - \left(\frac{1}{\tau_p} + s \right) \Delta p_n(x, s) = -\alpha \varphi(s) e^{-\alpha x} \quad (16)$$

$$D_p \frac{\partial \Delta p_n(x, s)}{\partial x} \Big|_{x=x_n} = -s_{nn^+} + \Delta p_n(x=x_n, s) \quad (17)$$

$$\Delta p_n(x=x_n, s) = 0 \quad (18)$$

求解后得到

$$\Delta n_p(x, s) = c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx} + c_3 e^{-\alpha x} \quad (19)$$

$$\Delta p_n(x, s) = c_4 e^{hx} + c_5 e^{-hx} + c_6 e^{-\alpha x} \quad (20)$$

式中 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, h, m$ 可分别求得.

因此, 可得到

$$J_p(s) = -qD_n \cdot \frac{\partial \Delta n_p(x, s)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \frac{qD_n \alpha \varphi(s)}{\left(\frac{1}{\tau_n} + s \right) - D_n \alpha^2} \left[\frac{m(e^{-\alpha x_2 + mx_1} - e^{-\alpha x_1 + mx_2}) - 2\alpha}{e^{mx_1} + e^{-mx_1}} + \alpha e^{-\alpha x_1} \right] \quad (21)$$

$$J_{n-EPI}(s) = qD_p \cdot \frac{\alpha \Delta P_n(x, s)}{\alpha x} \Big|_{x=x_2} = -qD_p C_6 \left[\frac{(e^{hx_n - hx_2} + e^{hx_2 - hx_n})(he^{-\alpha x_2 + hx_2 - hx_n} - he^{-\alpha x_2 - hx_2 + hx_n} - 2\alpha e^{-\alpha x_n})}{e^{2hx_n - 2hx_2} + e^{-2hx_n + 2hx_2} + 2} + \alpha e^{-\alpha x_2} \right] \quad (22)$$

3) 耗尽区

由于 $J_{depl} = J_{depl-p} = J_{depl-n}$, 因此只需要考虑其中之一, 本文在讨论中取 J_{depl} .

求解后得

$$J_{depl}(s) = \frac{q\varphi(s) e^{-\alpha x_1} (1 - e^{-\alpha x_w})}{1 + \frac{s x_w}{v_s}} \quad (23)$$

因此, 总的光谱响应为

$$R_{es} = [(1-R)J_{p+}(j\omega) + (1-R)J_{N-EPI}(j\omega) + (1-R)J_{depl}(j\omega)] / h\nu\varphi(j\omega) \quad (24)$$

图 5 是 P+/N-EPI/BN+ 探测器在入射光功率为 $10 \mu W$ 、入射光波长为 650 nm 时, 5 V 反向偏压下的频率响应特性曲线, 其中横坐标取频率值的对数.

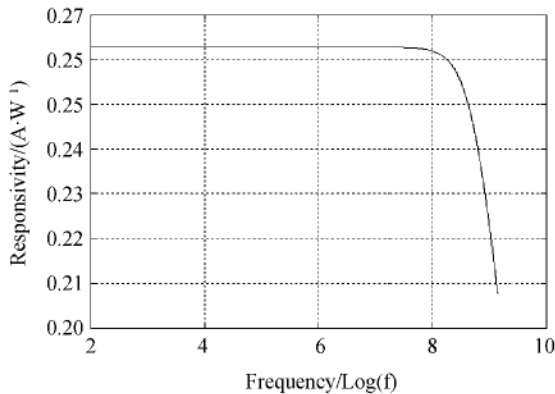


图 5 650 nm 探测器的频率响应
Fig. 5 Frequency response of 650 nm photodetector

3 版图设计

650 nm 单片集成光接收芯片版图如图 6 所示, 整体布局将 PD、TIA、DA 和 OB 依次排列. 光电探测器与处理电路部分之间保持一定的距离, 以减少入射激光照射到电路部分产生影响. 在整个芯片外

围, 设计了保护环, 并与芯片地线相连, 以屏蔽衬底的噪音影响. 整个版图有效面积为 $832 \times 948 \mu m^2$, 其中 650 nm 探测器的版图面积为 $300 \times 300 \mu m^2$. 版图中应用虚拟金属遮盖了光接收芯片的非光敏部分, 解决了光照下引起的信号干扰问题, 也满足了 BCD 工艺对金属覆盖率的要求.

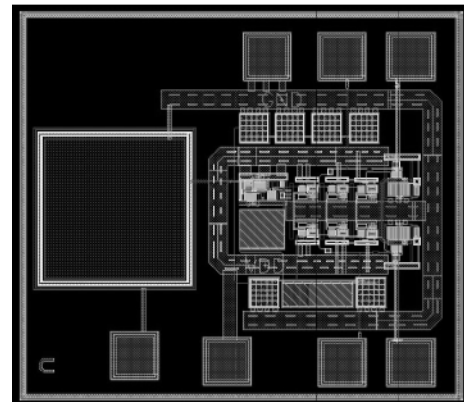


图 6 单片集成光接收芯片版图
Fig. 6 Layout of monolithic optical receiver

4 实验与结果

为了便于测试, 流片后的光电探测器及单片集成光接收芯片均采用光接收组件 (Receiver Optical Sub-Assembly, ROSA) 封装方式.

4.1 响应度与结电容

将直流光源由光纤进入探测器. 直流电源为探测器提供偏压. 光功率计测出进入探测器的光功率, 微安表测出探测器的光电流, 便可计算出探测器的响应度. 在 5.0 V 反向偏压下, 光电探测器在 650 nm 波长的响应度为 0.26 A/W , 与仿真结果较好吻合.

采用高频 C-V 特性测试仪对光电探测器结电

容进行测试. 由于封装、焊盘等带来的寄生电容的影响, 测试结果比计算结果偏大, 但是 $C-V$ 变化趋势与计算结果基本一致. 电容测量值主要包括被测探测器电容及寄生电容. 扣除寄生电容影响, 在 5.0V 反向偏压下, 面积 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 的探测器结电容约为 9.4 pF.

4.2 眼图与灵敏度测试

为了衡量传输系统的性能优劣, 通常用示波器观察接收信号波形来分析码间串扰和噪声对系统性能的影响, 这就是眼图分析法. 它是判断数字光纤通信系统中有无码间干扰、接收性能好坏及接收速率的最直观简单的方法.

经过调制的信号光经光纤耦合到光电探测器光敏区, 将光信号转变为电信号, 并经后续处理电路放大, 最后输出到高速示波器 Agilent 86100A, 生成眼图. 图 7 为 BCD 工艺下 650 nm 单片集成光接收芯片在输入 100 Mbps 的非归零伪随机二进制序列 (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) 信号作用下输出的眼图. 100 Mbps 速率下, 眼睛开很大, 迹线又细又清晰, 无码间串扰, 噪音很小, 上升时间为 1 ns, 下降时间为 890 ps.

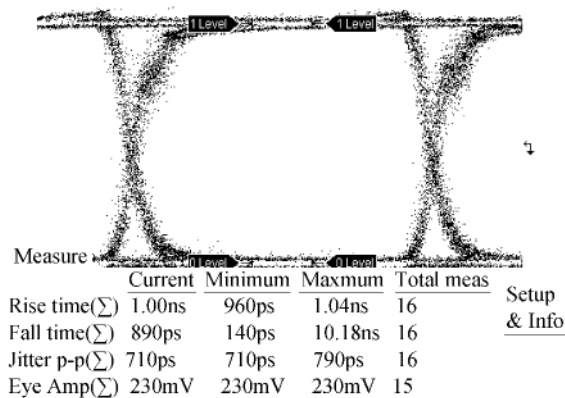


图 7 光接收芯片 100 Mbps 眼图

Fig. 7 100 Mbps Eye diagram of optical receiver

在 180 Mbps 速率及误码率小于 10^{-9} 情况下, 灵敏度为 -14.6 dBm.

5 结论

本文基于华润上华 0.5 μm BCD 工艺研制了一种用于塑料光纤通信的 650 nm 单片集成光接收芯片, 包括光电探测器、跨阻前置放大器、单双端转换、差分放大器、输出缓冲器及失调电压补偿电路. 光电探测器光谱响应和频率响应的仿真结果表明, 在 5.0 V 反向偏压下, 探测器在 650 nm 的响应度为 0.263 A/W, 固有截止频率约为 900 MHz. 光接收芯片版图面积约为 $832 \times 948\ \mu\text{m}^2$, 其中探测器的面积约为 $300 \times 300\ \mu\text{m}^2$. 测试结果表明, 5V 反向偏

压下, 探测器在 650 nm 的响应度为 0.26 A/W. 光接收芯片在 180 Mbps 速率及误码率小于 10^{-9} 情况下, 灵敏度为 -14.6 dBm; 在 100 Mbps 速率及误码率小于 10^{-9} 情况下, 能得到清晰的眼图. 本文的测试结果相比于国外的研究成果仍存在一定的差距, 主要原因在于探测器结构、处理电路组成以及两者的匹配. 在后续研究中, 处理电路可考虑加入均衡器, 用于补偿带宽, 减少码间串扰, 降低整个系统的误码率. 探测器和处理电路的匹配及探测器、处理电路的结构、工艺与 BCD 工艺兼容等关键问题还需深入研究, 争取早日实现芯片的商用化.

本文采用低成本的 BCD 工艺对塑料光纤通信中的单片集成光接收芯片进行研究, 对下一步 650 nm 光电集成收发芯片的设计和研制具有参考价值和指导意义, 同时该研究工作还将带动其他波长例如各种家用遥控器 940 nm 单片光电集成接收芯片的研究开发.

参考文献

- [1] SAVOVIĆ S, DJORDJEVIĆ A. Influence of the angle-dependence of mode coupling on optical power distribution in step-index plastic optical fibers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(1): 80-184.
- [2] MOHANTY L, KUANG K S C. Surface structure monitoring with plastic optical fiber[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, **49**(7): 984-987.
- [3] LIU Rong-hua, ZHANG Ning. Design of three priority control protocol applied to plastic optic fiber access network [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1356-1360. 刘荣华, 张宁. 用于塑料光纤接入网的三优先级控制协议设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1356-1360.
- [4] PAZYUK O, DEVOS A, SHCHYRIN L, et al. 150 Mbps PDIC receiver [C]. Sevastopol: 20th International Crimean Conference (Microwave and Telecommunication Technology), 2010: 607-609.
- [5] ATEF M, SWOBODA R, ZIMMERMANN H. 1.25 Gbit/s over 50 m step-index plastic optical fiber using a fully integrated optical receiver with an integrated equalizer [J]. *Journal of lightwave technology*, 2012, **30**(1): 118-122.
- [6] ATEF M, SWOBODA R, ZIMMERMANN H. 1 Gbit/s transmission over step-index plastic optical fiber using an optical receiver with an integrated equalizer [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(21): 5153-5156.
- [7] ATEF M, SWOBODA R, ZIMMERMANN H. 170 Mb/s multilevel transmission over 115m standard step-index plastic optical fiber using an integrated optical receiver [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(1): 191-194.
- [8] DONG Y, MARTIN K. A monolithic 3.125 Gbps fiber optic receiver front end for POF applications in 65 nm CMOS [C]. San Jose: Custom Integrated Circuits Conference, 2011: 1-4.
- [9] YAN Huang-ping, CHENG Xiang, HUANG Yuan-qing. Research of silicon-based monolithic 850nm 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 850nm 光接收芯片研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2012, **23**(4): 676-680.
- [10] YAN S, CHIGO O, DAVIDE V, et al. Distribution of

- broadband services over 1-mm core diameter plastic optical fiber for point-to-multipoint in-home networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(6): 874-881.
- [11] LI Bin, LE Zi-chun, HU Jin-hua, *et al.* Triplexer chips for FTTH[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 169-173.
李斌, 乐孜纯, 胡劲华, 等. 光纤到户用单纤三向复用器芯片的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 169-173.
- [12] YAN Huang-ping, CHENG Xiang, LI Ji-fang, *et al.* Research of 850nm optical receiver based on BCD technology [J]. *Journal of Xiamen University*, 2010, **49**(5): 640-644.
颜黄苹, 程翔, 李继芳, 等. 一种基于 BCD 工艺的 850nm 光接收芯片的研制[J]. *厦门大学报*, 2010, **49**(5): 640-644.
- [13] TOMITA Y, KABUNE M, OGAWA J, *et al.* A 10-Gb/s receiver with series equalizer and on chip ISI monitor in 0.11 μm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, **40**(4): 986-993.
- [14] RAVEZZI L, DALLA BETTA G F, STOPPA D, *et al.* A versatile photodiode SPICE model for optical microsystem simulation[J]. *Microelectronics Journal*, 2000, **31**(4): 277-282.
- [15] LIU Li-na, CHEN Chao, LIU Cai-hong. Numerical simulation of spectral response for 650 nm silicon photodetector[J]. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2003, **9**(2): 82-88.