

文章编号 1004-924X(2014)07-1715-08

基于BCD工艺的塑料光纤通信光接收机

史晓凤¹,程翔^{1*},陈朝^{1,2*},颜黄苹¹,范程程¹

(1. 厦门大学物理与机电工程学院,福建厦门361005;

2. 厦门大学能源研究院,福建厦门361005)

摘要:研究了光电探测器(PD)的结构、性能以及后续放大电路,实现了塑料光纤通信的高速单片集成光接收芯片。首先,根据工艺流程和参数,采用器件模拟软件对PD结构进行了建模,并对其光谱响应度和结电容进行了理论推导及仿真。基于Cadence/spectre软件和仿真得到的PD参数对由跨阻放大器、限幅放大器和输出缓冲电路组成的后续放大电路进行了协同设计。采用0.5 μm BCD(Bipolar, CMOS and DMOS)工艺对单个PD以及PD和后续放大电路单片集成电路进行了流片、封装和测试。结果表明:PD的光谱响应曲线的峰值波长和仿真结果较一致,约为700 nm,PD结构更适合短波长探测;PD的结电容随着反向电压的增大而减小,结电容越大,光接收芯片的带宽越小;对于650 nm的入射光,在小于10⁻⁹的误码率条件下,光接收机的灵敏度为-14 dBm;最后得到了150 Mb/s速率的清晰眼图。实验结果显示,设计的高速单片集成光接收机可以应用于百兆速率光纤入户通信系统。

关键词:单片集成;光电探测器;有源电感;光接收机;塑料光纤通信;BCD工艺

中图分类号:TN491;TN915.05 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142207.1715

Optical receiver based on BCD process for plastic optical fiber

SHI Xiao-feng¹, CHENG Xiang^{1*}, CHEN Chao^{1,2*}, YAN Huang-ping¹, FAN Cheng-cheng¹

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering,

Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Energy Research, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding author, E-mail: cchen@xmu.edu.cn; chengflying@163.com

Abstract: The structure and characteristics of a photodetector (PD) and its post amplifiers were investigated, and a high-speed monolithic optical receiver for Plastic Optical Fiber (POF) communication was implemented. Firstly, a model of PD structure was established and simulated in a software simulating device based on the process flows and parameters. The spectral responsibility and a junction capacitor were also derived in theory and simulation. Then, the post amplifiers consist of a trans-impedance, a limiting amplifier and an out buffer were simulated in Cadence/spectre by using the PD parameters. Finally, by using the 0.5 μm (Bipolar, CMOS and DMOS) BCD process, the single PD and the monolithic integrated circuit of PD and post amplifiers were taped out, packaged and tested. The tested results indicate that the peak of optical spectral responsible curve agrees with that of the simulated curve, and the wavelength is about 700 nm. The junction capacitance of PD decreases

收稿日期:2013-09-24;**修订日期:**2013-11-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205060);福建省自然科学基金资助项目(No. 2011J01361);福建省科技计划重点项目(No. 2013H0047)

with increasing of the bias voltage and the bigger the junction capacitance, the smaller the bandwidth of optical receiver. For a 650 nm input light, the sensitivity of the optical receiver is -14 dBm under the bit-error-rate of 10^{-9} . Moreover, a clear eye-diagram with the speed of 150 Mb/s is achieved. The designed optical receiver can be applied to 100 Mb/s optical fiber communication systems.

Key words: monolithic integration; photo-detector; active inductor; optical receiver; plastic optical fiber communication; Bipolar CMOS and DMOS(BCD)

1 引言

随着多媒体业务的迅速扩展,对网络速率的要求也越来越高。世界主要发达国家纷纷制定国家宽带战略,将光纤到户(FTTH)、光纤到桌面(FTTD)作为国家信息高速公路建设的战略性基础设施。目前,接入网多采用铜质线缆传输,但铜质线缆对高带宽信号的传输不稳定,这成为限制其传输带宽的瓶颈。“光进铜退”是当前普及宽带网络的必然趋势^[1-2]。大纤芯塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)作为新一代短距离通信介质,因其价格低、带宽大而逐渐应用于最后一公里的家庭宽带接入网中^[3]。在将波长 1 310, 1 550 nm 的石英光纤接入楼宇或路边后,通过波长转换器将长波转换成短波 650 nm。650 nm POF 通信取代铜缆并配合长波 1 310, 1 550 nm 石英光纤完成光纤到桌面的全光网络通信。650 nm POF 通信可以独立组网,常应用于汽车电子,工业控制,电力通信仪表,风力发电等领域^[4-6]。为降低成本、减少体积和提高性能,单片光电集成接收芯片相应的关键技术已成为家庭网络塑料光纤通信领域的研究热点^[7-8]。

硅材料在 650 nm 有一定的响应,可用于 POF 系统的光接收机实现标准硅基工艺光探测器(Photodetector, PD)和前置放大器的单片集成;另外,1 mm 大纤芯直径的 POF 要实现低成本且高效率的光耦合需要大面积且和标准工艺兼容的 PD。然而,大面积 PD 会引入高的结电容和大的噪声^[9-10],而 PD 的结电容过大会直接导致前置放大电路的带宽下降,PD 的噪声也会使光接收芯片的灵敏度降低。因此,需要合理地设计并优化 PD 的结构和性能参数,以获得高速、高灵敏度的光接收芯片。

目前,国内已经有多家生产塑料光纤的公司,如江西大圣等。塑料光纤收发器主要有浙江飞尔

康公司的 EDL300T 和 IDL300E,其速率分别为 100, 250 Mbit/s,其中探测器和放大器芯片分立。国内尚未开展对塑料光纤通信的光电集成接收芯片方面的研究。国际上,欧盟多年来投入了大量研发资金支持塑料光纤通信技术的研究和产品实现。根据欧盟基金与塑料光纤通信项目提供的指标要求,百米百米 1 mm SI-POF 的最大数据速率为 125 Mbit/s,千兆百米系统的最大数据速率为 1 Gbit/s^[11]。然而,现有的塑料光纤通信光接收芯片的速率在百米水平,而且非单片光电集成^[12-14],功耗和成本都较高。为达到通信的灵敏度和速率要求,必须设计高性能 PD 和相应的放大器。本文在前人研究^[15-16]的基础上改进了 PD 结构,跨阻放大器采用低噪声、带有负反馈、具有自动增益控制功能的共源级放大器,使整个单片集成光接收芯片获得了较高的灵敏度和带宽。最后采用 0.5 μm BCD(Bipolar, CMOS and DMOS)工艺对设计的单片集成光接收芯片进行了流片测试及分析。

2 光电探测器结构及其工作原理

2.1 光电探测器结构

本文研究了两种基于 0.5 μm BCD 工艺的 PD,包括 $\text{P}^+/\text{N-EPI}/\text{BN}^+$ (PIN)结构 PD^[16]和改进的多指结构 PIN PD,分别标记为 PD₁ 和 PD₂。图 1 是 PD₁ 改进后的结构剖面图。图中略去了标准 BCD 工艺中的绝缘介质层(SiO_2 和 Si_3N_4),其中电阻率为 $3.5 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 N-EPI 外延层构成了 I 层。I 层不是真实的本征层,而是低掺杂的 N 外延层。连接着 BN^+ 埋层的 N 阱上面的 N^+ 区作为阴极, N 外延层上面的 P^+ 区作为阳极。在 PD₂ 中, N 外延层上有多个 P^+ 区域形成指状,多个 P^+ 指相连作为一个阳极。连接着 BN^+ 埋层的 N 阱上面的 N^+ 区相连作为阴极。不同光敏面的多指结构 PIN PD 的 P^+ 指个数和宽度也不同。

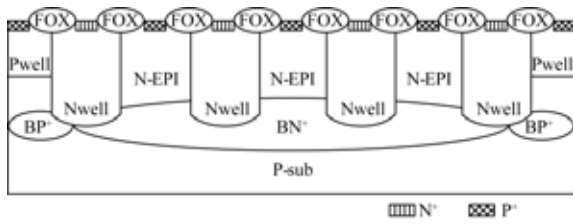


图 1 多指 PIN PD 的剖面图

Fig. 1 Cross-section of multi-finger P⁺/N-EPI/BN⁺ PD

2.2 物理模型和光谱响应度理论分析

图 2 为单指 P⁺/N-EPI/BN⁺ 探测器的一维 X 轴方向结构的物理模型。从左往右依次是 BCD 工艺中的钝化与介质层 (Si₃N₄ 和 SiO₂)、P⁺ (厚度 x_s)、N-EPI (厚度 x_n)、BN⁺ (厚度 x_{bn})、P 衬底 (产生光电流的有效硅片厚度为 x_b)。抗反射层用来提高量子效率特性。该结构的一个特点是增加了 N 外延层,扩展了耗尽区宽度,增强了对光的吸收。另外,BCD 工艺的结深比 CMOS 大,吸收多发生在短波长段,因而更适合短波长 650 nm 的探测。图中 x_w 为 P⁺/N-EPI 二极管耗尽区的宽度, x_{wn} 和 x_{wp} 分别为耗尽区 x_w 在 N-EPI 和 BN⁺ 侧的宽度, x_1 和 x_2 分别为耗尽区两侧边缘至光入射表面 (不计 Si₃N₄ 和 SiO₂ 厚度) 的距离,它们之间的关系式为:

$$x_1 = x_s - x_{wp}, x_2 = x_s + x_{wn}. \quad (1)$$

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}^+ [17]。

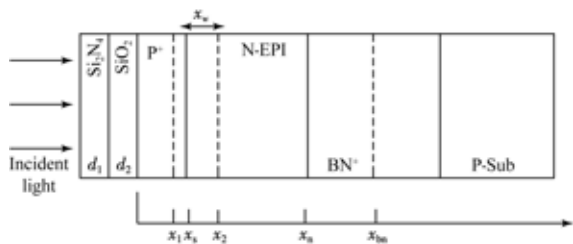


图 2 单指 P⁺/N-EPI/BN⁺ 的探测器的一维物理模型

Fig. 2 One-dimension physical structure of single finger for P⁺/N-EPI/BN⁺ detector

光生电流的产生区可分为 3 个: P⁺ 区、P⁺/N-EPI 耗尽区、非耗尽区 N-EPI 和 BN⁺ 区。从 3 个区域的载流子运动方程出发,采用拉普拉斯 (Laplace) 变换法可以分析获得各区的光生电流

密度 [18]。当入射光功率为 P 时,不考虑表面反射的影响得到稳态下器件内部距离光入射表面 x 处的光生载流子产生率为 $G(x)$ [19]。

(1) P⁺ 区

P⁺ 区的光生电子以扩散运动为主, P⁺ 区的光电流密度为:

$$J_{P^+} = -qD_n \frac{\partial \Delta n(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_1}. \quad (2)$$

(2) P⁺/N-EPI 耗尽区

该区的光生电流主要由光生载流子漂移产生,光电流密度为:

$$J_{depi} = q \int_{x_1}^{x_2} G(x) dx = q\varphi_0 \exp(-\alpha x_1) \cdot [1 - \exp(-\alpha x_w)]. \quad (3)$$

(3) 非耗尽 N-EPI 区和 BN⁺ 区

非耗尽 N-EPI 区与 BN⁺ 区的光生少子以扩散为主,其光电流密度为:

$$J_{N-EPI} = qD_p \frac{\partial \Delta p_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_2}. \quad (4)$$

总的电流密度为:

$$J = J_{P^+} + J_{depi} + J_{N-EPI} = J_L + J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

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:

$$R_{es} = \frac{(1-R)J_L}{\varphi_0 h\nu}, \quad (6)$$

式中,器件表面反射系数 R 由 Si₃N₄ 和 SiO₂ 组成的双重薄膜结构决定。

2.3 光谱响应度仿真和测试结果分析

本文对两种探测器的响应度和电容特性进行了测试。为方便测试,对和单片集成中相同的探测器进行了单独的流片以及 TO 封装。硅材料 PD₁ 和 PD₂ 的正向阈值电压均为 0.7 V,击穿电压分别为 21 V 和 24 V。击穿电压取决于不同 PD 结构中的 PN 结耗尽区的厚度。另外,还测试了 PD 的暗电流,其最大值为 11 pA。

PD 的响应度特性对光电集成光接收芯片的设计至关重要。本文通过器件模拟软件根据标准的集成电路工艺流程构建 PD 结构,并对 PD 的光电性能进行了仿真。根据以上理论分析和探测器的主要模型参量,得到了探测器在 2.5 V 反向偏

压的光谱响应曲线。图 3 和图 4 分别为 PD₁ 和 PD₂ 的光谱响应曲线的仿真和测试结果,光谱为 400~1 200 nm。仿真和测试结果表明,两种 PD 响应度的仿真曲线和测试曲线的变化趋势几乎是相同的,峰值均在短波长 700 nm 附近,只是响应度绝对值有些不同,实际测试得到的响应度绝对值更大一些。PD₂ 的相对光谱响应曲线的最大值和 PD₁ 类似,只是响应度绝对值有些差异。在 400~670 nm,PD₂ 的响应度绝对值比 PD₁ 高;而在 700~900 nm 波段,PD₂ 的响应度绝对值比 PD₁ 要低。例如,对于 650 nm 的入射光,PD₁ 和 PD₂ 响应度的测试值分别为 0.251 A/W 和 0.262 A/W。由此可见,本文优化设计的 PD₂ 由于其叉指状 P⁺/N-EPI/BN⁺ 结构而具有较高的光谱响应度。

早期工作^[15]采用了 CMOS 工艺的 N⁺/N-well/P-sub 和指状 N⁺/N-well/P-sub 结构的 PD,850 nm 波长的响应度分别为 0.274 A/W 和 0.182 A/W,650 nm 时响应度较低,还不到 0.10 A/W。为扩大对短波长光的吸收,文献^[16]采用含有 BN⁺ 埋层的 BCD 工艺代替最初研究的 CMOS 工艺,即为本文中所研究的 PD₁。由响应度分析可知,在 650 nm 处 PD₂ 比 PD₁ 的响应度更高,更适合 650 nm 波长的探测。

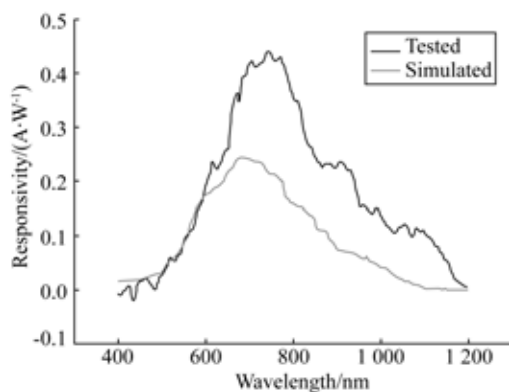


图 3 PD₁ 光谱响应的仿真和测试曲线

Fig. 3 Simulated and tested optical spectral response curves of PD₁

从仿真结果和实验结果可以看出,本文优化设计的 PD 结构具有较好的响应度特性,且通过仿真可以很好地预测其性能,因此可以很好地实现 PD 结构的优化和光接收芯片的协同设计。如图 3 和图 4 所示,测试曲线存在一定的振荡,而仿

真曲线没有,这是因为仿真没有考虑绝缘介质和钝化层对反射系数的影响。

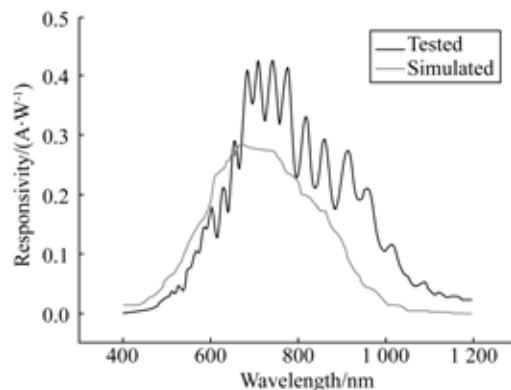


图 4 PD₂ 光谱响应的仿真和测试曲线

Fig. 4 Simulated and tested optical spectral response curves of PD₂

2.4 结电容

如果忽略横向电容的影响,PD 的结电容 C_{pd} 可以看作是一个平板电容器,即有:

$$C_{pd} = \frac{\epsilon_s A_0}{x_w} = A_0 \sqrt{\frac{\epsilon_s q N_A N_D}{2(N_A + N_D)(V_{bi} - 2KT/q - V)}} \quad (7)$$

其中: A_0 是光敏面的面积, ϵ_s 是硅的介电常数, N_D, N_A 分别表示施主浓度和受主浓度, V_{bi} 是内建电势, V 是考虑串联电阻影响下的电容器偏置电压,耗尽区深度 x_w 决定了 C_{pd} 。

对多个尺寸的两结构 PD 进行了流片和测试。在相同尺寸下,PD₁ 的电容值比 PD₂ 的电容值大很多,并且随着反向偏压的增大,两种 PD 的结电容均降低。例如:相同尺寸的 PD₁ 和 PD₂ 在 2.5 V 反向偏压下的结电容分别为 8.3 pF 和 4.31 pF,5 V 反向偏压下的结电容则分别为 6.67 pF 和 3.97 pF。可见,多叉指结构降低了 PD 的结电容。由于寄生电容值一般不随偏压变化,为彻底消除寄生电容对测量结果的影响,应得到探测器真实电容值与偏压之间的微分关系,即: $dC/dV = dC_{pd}/dV$ 。根据式(7)以及测量的电容值得到探测器电容与偏压之间的微分(dC_{pd}/dV)关系曲线,如图 5 所示。可以看出,PD₂ 的理论计算值和测试结果几乎完全一致,而 PD₁ 的测试结果略高于理论计算值,可能是由于一些与偏压有关的寄生电容引起的。图 5 表明,在设计中可以直接按式(7)来估算结电容。

测试结果表明,同尺寸的多指PIN结构的PD比非叉指结构的PIN PD有更低的结电容。这种结构更加适合600~700 nm波长光的探测。在相同反向偏压下,相同结构的PD的面积越大,结电容也越大。如2.5 V反向偏压下,200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 和500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的PD₂的电容值分别为4.31 pF和15.12 pF。因此,由于具有4.31 pF的低结电容和在650 nm处0.262 A/W的高响应度,多叉指结构的PIN PD更适合应用在单片光电集成光接收芯片中。

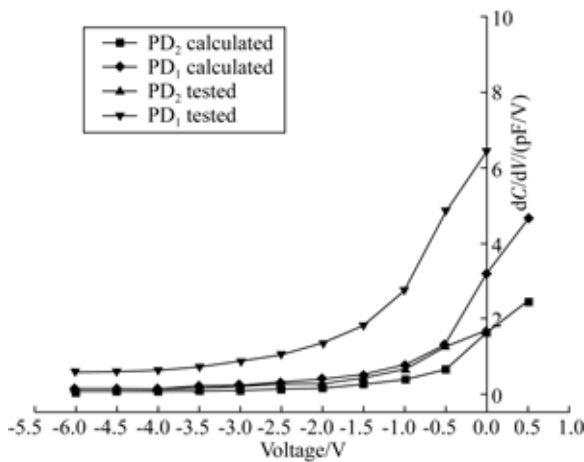


图5 同尺寸下计算和测试的 dC_{pd} - dV 曲线

Fig. 5 Calculated and tested dC_{pd} - dV curves with same size

3 光接收芯片

3.1 光接收芯片设计

设计的光接收芯片包含一个多叉指结构的PD,一个跨阻放大器(Transimpedance Amplifier, TIA)、一个限幅放大器、一个输出缓冲器和一个直流失调补偿电路。多叉指结构的PD具有10个P⁺指和11个N⁺指。P⁺指区位于N外延层表面,所有的P⁺指相连并作为阳极。N⁺指区位于和BN⁺埋层相连的N阱的表面,所有的N⁺指相连作为阴极。每个P⁺指的宽度为10.5 μm ,并被宽度为6.3 μm 的N⁺指间隔开。为满足POF光纤通信的应用,光敏面的总面积设计为200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 。阳极和阴极分别连接到地和TIA的输入端。

TIA采用带有自动增益控制电路(Automatic Gain Circuit, AGC)的共源级放大器作输入级,该放大器的优点是噪声小,灵敏度高,

跨阻增益高。AGC是个负反馈网络,电流较小的时候,AGC不工作;当输入电流变化很大时,AGC开启,可以控制跨阻增益,同时输出电压摆幅也趋于稳定。

后端限幅放大器包括三级级联的有源电感拓展带宽的差分放大器和一个输出缓冲器。每级的直流增益是与工艺、温度和偏置条件无关的。有源电感作负载的差分放大器利用并联峰化技术来拓宽带宽。级联的每级放大器最好采用独立的偏置电路以避免级间干扰。通过分析有源电感的小信号电路以及根据具体的设计选择合适的参数来确定电感值。

输出缓冲电路采用负载电阻为100 Ω 的差分共源级放大器,通过芯片外面并联一个100 Ω 电阻来实现50 Ω 传输线相匹配。这样设计的目的是为了在芯片内部电阻值因工艺而不准确时,可以通过外接电阻来调整输出电阻与传输线相匹配。另外,由于器件不匹配等因素产生的DC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,为了稳定直流工作点和交流增益,必须有直流失调电压补偿回路。该补偿电路采用负反馈的原理,将输出信号的直流反馈到输入端来实现直流失调补偿,电路包括4个电阻R与外加电容C组成了直流负反馈网络,反馈网络的一端接限幅放大器的输入端,另一端接限幅放大器的输出端。

3.2 仿真结果

基于Cadence/spectre仿真环境,对TIA和整个接收芯片的瞬态,AC特性以及输入参考噪声进行了仿真。输入输出的瞬态波形如图6所示。输入信号是脉冲幅度为20 μA ,脉冲周期为5 ns的随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)电流信号,输出为200 mV的电压信号,输入等效结电容为4 pF。从AC特性曲线可知,TIA和整个接收芯片的-3 dB带宽分别为240 MHz和190 MHz,整个光接收芯片的增益为81.93 dB Ω 。改变输入等效结电容,在1~10 pF内变化,如图7所示。从仿真AC结果可以看到,输入结电容越大,芯片的输出增益没有变化,带宽则越小。在1 pF时,输出的-3 dB带宽为334 MHz。图8给出了输入参考噪声和频率的关系曲线,在1 kHz~200 MHz内,输入参考噪声等效为白噪声,平均噪声约为10 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

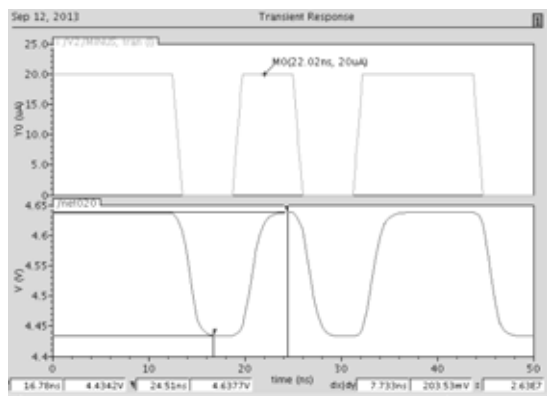


图 6 输入和输出瞬态波形

Fig. 6 Input and output transient waves

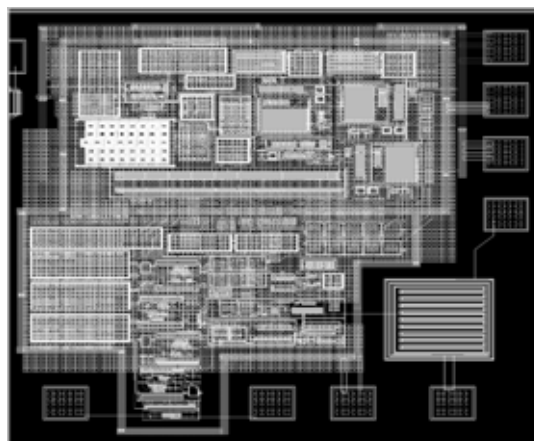


图 9 光接收机版图

Fig. 9 Layout of optical receiver

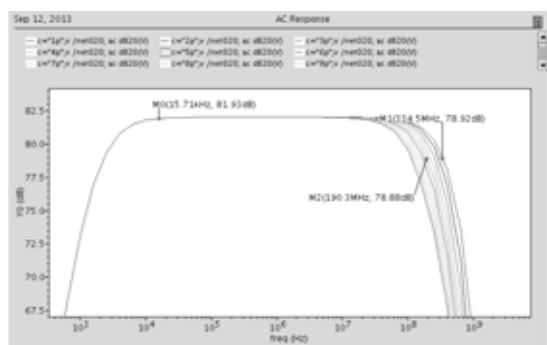


图 7 输入电容 C_{pd} 改变时的 AC 特性

Fig. 7 AC characteristics with variation of input capacitance C_{pd}

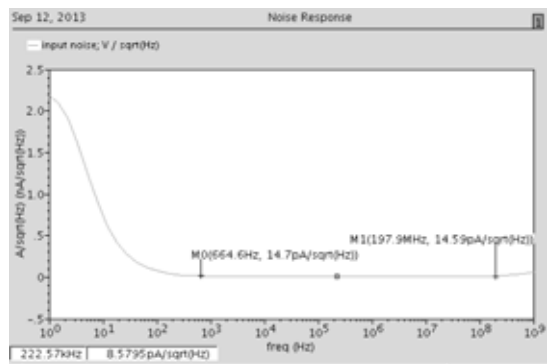


图 8 输入参考噪声曲线

Fig. 8 Curve of input reference noise

3.3 测试结果

采用低成本的 $0.5 \mu\text{m}$ BCD 工艺实现了用于 POF 通信的光接收芯片。图 9 是单片集成光接收芯片的版图。其中集成的 PD 是多叉指状 PIN PD, 整个光接收芯片所占版图面积为 1.1 mm^2 。

光接收芯片在有光照和无光照情况下输出的直流点分别为 4.43 V 和 4.52 V , 结合在 650 nm 处的响应度以及光照前后的电压差值可以计算出被测芯片的增益为 $12 \text{ k}\Omega$ 。该值已经非常接近仿真的增益 $82 \text{ dB}\Omega$ 。调制光源的调制电信号为 $2^7 - 1$ PRBS 信号。光源是发射波长为 650 nm 的谐振腔光发射二极管 (RCLED)。图 10 给出了光接收芯片在 150 Mb/s PRBS 信号下的输出眼图, 眼图清晰且眼张开度较好, 无码间干扰。在误码率为 10^{-9} 时, 测得的光接收芯片的灵敏度是 -14 dBm 。总的来说, 设计的光接收芯片能够工作在百兆 POF 光纤入户通信系统中。

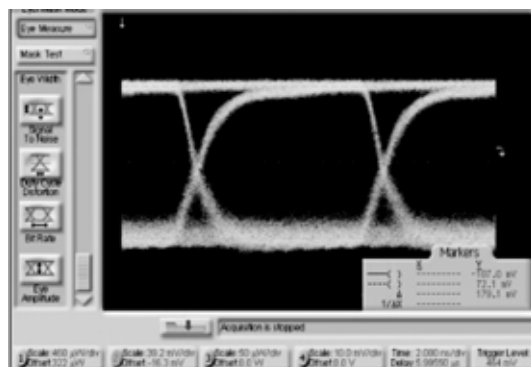


图 10 光接收机测试眼图 @ 150 Mb/s $2^7 - 1$ PRBS

Fig. 10 Tested eye-diagram of receiver @ 150 Mb/s $2^7 - 1$ PRBS

4 结 论

本文对单指 P⁺/N-EPI/BN⁺ 探测器进行了一维物理模型分析,对该模型的光谱响应度进行了理论推导,运用模拟软件对 P⁺/N-EPI/BN⁺ 探测器和多叉指结构 P⁺/N-EPI/BN⁺ 探测器的结构进行了建模和仿真,并且用 0.5 μm BCD 工艺进行了流片、封装和测试。仿真和测试结果显示,仿真曲线和测试曲线的变化趋势几乎相同,只是响应度绝对值有些差别,最大值均在 700 nm 附近。650 nm 时,P⁺/N-EPI/BN⁺ PD 和多叉指结构 PD 的光谱响应度分别为 0.251 A/W 和 0.262 A/W。结电容随着反向电压的增大而减小,随着面积的增大而增大,在反向电压为 5 V

时,同等尺寸 200 μm×200 μm 的结电容分别为 6.67 pF 和 3.97 pF。对 PD 的结电容进行了理论计算和测试,发现多叉指结构的 PD 有较低的结电容和较高的响应度,表明建模和仿真对 PD 的实际设计有预期和指导作用。最后基于 0.5 μm BCD 工艺实现了用于 650 nm 塑料光纤通信的单片集成光接收芯片,并对光接收芯片进行了封装和测试。测试结果表明,在 2⁷-1 的 PRBS 输入信号下,光接收芯片的工作速率为 150 Mb/s;在 10⁻⁹ 误码率下,测得的灵敏度为 -14 dBm,得到了较清晰的眼图,眼睁开度很大,无码间串扰,噪声很小。设计的芯片可以很好地工作在百兆塑料光纤入户通信系统中。光接收芯片的单片集成化研究具备实现更高速率(Gb/s)的光纤入户通信系统的潜力。

参考文献:

- [1] 孙科林,周维超,吴钦章.高速实时光纤图像传输系统的实现[J].光学精密工程,2011,19(9):2228-2235.
SUN K L,ZHOU W CH,WU Q ZH. Realization of high-speed real-time optical fiber image transmission system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(9):2228-2235. (in Chinese)
- [2] 李爽,王瑞光,严飞.全彩发光二极管交通诱导屏光纤传输系统[J].光学精密工程,2012,20(8):1854-1861.
LI SH,WANG R G,YAN F. Full-color LED display of traffic guidance fiber transmission system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(8):1854-1861. (in Chinese)
- [3] KOONEN A M J,SHI Y,TRAN N C, et al.. A perspective from Europe on in-home networking [C]. *Proceedings of Optical Fiber Communication and Exposition 2012 and the National Fiber Optic Engineers*,2013:1-3.
- [4] RICHARDS D H,LOSADA M A,ANTONIADES N, et al.. Modeling methodology for engineering SI-POF and connectors in an avionics system[J]. *Journal of Lightwave Technology*,2013,31(3):468-475.
- [5] 蔡炬,白秋剑,苏鑫.工业控制用低速率塑料光纤接收芯片的设计[J].半导体光电,2013,34(2):287-290.
CAI J,BAI Q J,SU X. Design of plastic optical fiber receiver chip for industry control[J]. *Semiconductor Optoelectronics*,2013,34(2):287-290. (in Chinese)
- [6] 杨东,董雪峰.塑料光纤在通信网中的应用[J].通信技术,2013,37(7):44-46.
YANG D,DONG X F. Application of plastic optical fiber in communication networks [J]. *Optical Communication Technology*,2013,37(7):44-46. (in Chinese)
- [7] AZNAR F,SANCHEZ-AZQUETA C,CELMA S, et al.. Gigabit receiver over 1 mm SI-POF for home area networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*,2012,30(16):2668-2674.
- [8] 刘希,薛原,徐红春.4.25 Gbps 小型可热插拔光收发模块的设计与测试[J].中国光学,2012,5(1):77-82.
LIU X,XUE Y,XU H CH. Design and test of 4.25 Gbps SFP optical transceiver [J]. *Chinese Optics*,2012,5(1):77-82. (in Chinese)
- [9] MIKKO K,ANTTI T,JYRKI O, et al.. Fiber-optic transceiver for high-speed intra-satellite links [C]. *Proceedings of Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference*,2012:34-35.
- [10] KOSTOV P,GABERL W,HOFBAUER M, et al.. PNP PIN bipolar phototransistors for high-speed applications built in a 180 nm CMOS process[J]. *Journal of Solid-State Electronics*,2012,74(SD):49-57.
- [11] PARK K Y,OH W S,CHOI J C, 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.
- [12] 王亚辉. 国际塑料光纤通信系统新发展[EB/OL]. [2012-10-15]. http://fiber.ofweek.com/2012-10/ART-210001-8470-28646027_3.html.
WANG Y H. New development of international POF communication systems[EB/OL]. [2012-10-15]. http://fiber.ofweek.com/2012-10/ART-210001-8470-28646027_3.html. (in Chinese)
- [13] PARK K Y, OH W S, CHOI W Y. Design of CMOS led driver and optical receiver for 650 nm POF applications[C]. *Proceedings of the 9th International Symposium on Communications and Information Technology*, 2009: 1375-1380.
- [14] PARK K Y, OH W S, CHOI J C, *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.
- [15] CHENG X, BIAN J, CHEN C, *et al.*. Research of different structure integrated photodetectors in standard CMOS technology[J]. *SPIE*, 2008, 6838: 6838101-7.
- [16] LI J F, YAN H P, CHENG X, *et al.*. Design of a POF receiver with integrated photodiode in 0.5 μm BCD process [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Anti-Counterfeiting, Security and Identification*, 2011: 194-197.
- [17] SINHA A, CHATTOPANDHYAYA S K. Effect of heavy doping on the properties of high-low junction[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1978, ED-25(12): 1412-1414.
- [18] 施敏. 半导体器件物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.
SHI M. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1987. (in Chinese)
- [19] HAUSER J R, DUNBAR P M. Performance limitations of silicon solar cells [J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1977, 24(4): 305-321.

作者简介:



史晓凤(1987—),女,安徽亳州人,博士研究生,2008年于阜阳师范学院获得学士学位,主要从事塑料光纤通信的光电集成发射芯片和接收芯片等方面的研究。E-mail: shipeilin871106@126.com



程翔(1977—),女,福建厦门人,副教授,1999年,2004年于厦门大学分别获得学士学位和博士学位,主要从事微电子、半导体材料光电性质、光电器件、集成光电子学、光纤通信等信息光电子学领域的研究。E-mail: chengflying@163.com

导师简介:



陈朝(1943—),男,福建厦门人,教授,博士生导师,1965年于厦门大学毕业,主要开展半导体材料光电性质、半导体光电器件、集成光电子学、光纤通信、光接入网、有线电视网等信息光电子学领域的研究。E-mail: cchen@xmu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)