

doi: 10.3969/j.issn.1003-353x.2010.10.016

光学头中单片光电集成硅基 PDIC 的设计

柯庆福, 程翔, 芦晶, 张寅博, 李继芳, 陈朝

(厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对应用于 DVD 光学头的关键部件 PDIC, 设计了一种芯片面积小、输出失调电压低的单片集成的硅基 PDIC。芯片采用 CSMC 的 0.5 μm BCD 工艺, 集成了 p-i-n 探测器与前置放大电路。重点介绍了 p-i-n 光电探测器及前置放大电路的设计思想。仿真结果表明, 用于光电检测的 p-i-n 光电探测器在 650 nm 光照下响应度达 0.2 A/W, 互阻放大器的 -3 dB 带宽达到 94 MHz, 跨阻增益达 150 k Ω 。可以满足 DVD 系统的性能要求。

关键词: 单片集成; DVD; BCD; 光电探测器; 前置放大器

中图分类号: TN491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2010) 10-1016-04

Design of Monolithic Si-Based PDIC for Optical Pickup

Ke Qingfu, Cheng Xiang, Lu Jing, Zhang Yinbo, Li Jifang, Chen Chao

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

Abstract: PDIC is a key component of the pickup system for DVD players. A monolithic Si-based PDIC with low offset voltage and small area was designed. Using 0.5 μm BCD technology of CSMC, the chip was integrated with p-i-n photodetectors and transimpedance preamplifiers. The design idea of the chip was introduced. The simulation results show that the p-i-n optical detector reaches a responsibility of 0.2 A/W at the 650 nm wavelength, and the -3 dB bandwidth and the transimpedance gain of this transimpedance amplifier are 94 MHz and 150 k Ω respectively. The PDIC meets the performance requirements of the DVD system.

Key words: OEIC; DVD; BCD; photodetector; preamplifier

EEA CC: 7230C

0 引言

DVD 光盘存储系统以其容量大、寿命长、复制速度快等显著优点已经成为现代社会信息存储的重要手段之一。光电信号探测放大芯片 (PDIC, photo detector integrated circuit) 是 DVD 光学头中的关键元件, 包含探测器 (PD) 阵列和信号处理集成电路 (IC) 两部分, 其主要功能是将接收到的光信号转变为可处理的电压信号。因此, 高带宽、响应快、低噪声的 PDIC 已成为 DVD 发展的必要条件^[1,2]。目前光学头的关键部件如激光器、光学元

件、精密机械等部件已经实现国产化, 仅剩 PDIC 技术没有解决。PDIC 不仅有广阔应用前景和市场, 而且是国家光盘产业迫切需要攻关解决的关键技术^[3]。

随着 CMOS 工艺日趋完善, 硅基单片光电集成技术得到快速发展, 在工作波长为 650 nm 的 PDIC 设计中, 将 PD 与 IC 在硅片上进行单片光电集成成为 PDIC 的趋势。本文采用无锡华润上华公司 (CSMC) 的 0.5 μm BCD (bipolar CMOS DMOS) 工艺研制了单片集成的六象限 PDIC。在互补式自偏置差分放大器、负电阻基础上设计了相应的新型放大电路。BCD 工艺技术基于 CMOS 工艺平台, 实现在同一芯片制作双极管 bipolar, CMOS, DMOS 器件,

基金项目: 厦门市科技计划项目 (3502Z20063002)

设计师可以灵活运用工艺流程设计自己的产品。本设计方案充分利用该特点, 设计出与工艺完全兼容的 pin 探测器, 相比 CMOS 工艺^[4], 无需外加工序, 实现单片集成的 PDIC, 芯片面积小, 成本低。

1 PDIC 的设计

本文采用的是六象限光电探测器阵列的 PDIC, 如图 1 示。图中六个反偏连接的二极管分别表示光电探测器 A~F, 其中 A~D 为离焦探测器, E 和 F 为道跟踪探测器。其后紧接着各光电探测器支路的电流电压前置放大器, 把相应支路的微弱的光电流转变成电压信号。此外, 还有求和运算放大器用于信号求和。 $V_{A,out} \sim V_{F,out}$ 为各支路的电压输出; V_{dd} 和 V_c 分别为电源电压和参考电压; GND 为信号地; $S_{RF,out}$ 为读出射频信号, 即 $S_{RF} = S_A + S_B + S_C + S_D$ 。

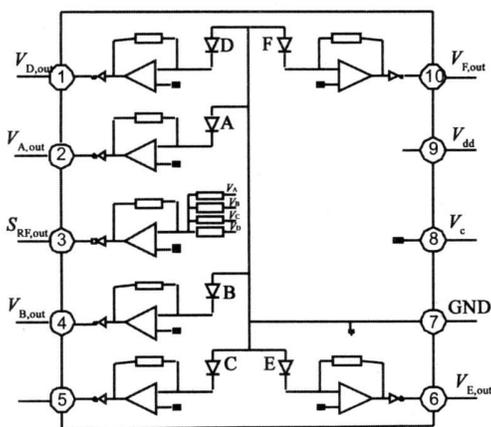


图 1 PDIC 示意图
Fig 1 Schematic of PDIC

1.1 光电探测器的设计

1.1.1 p-i-n 光电探测器

在 BCD 工艺下单个 pn 结探测器的 pn 结结深比 Si 在 650 nm 光照下的吸收长度小得多, 且单个 pn 结的结电容较大。为了克服这个问题, 本文利用 BCD 工艺中拥有低掺杂的外延层和 Bn^+ 埋层的特点设计了 p-i-n 结构的光电探测器, 截面结构如图 2 所示。p-i-n 光电探测器的阳极由 p^+ 源或漏扩散得到。阴极则由 n^+ 埋层组成, 并通过 n 阱、 n^+ 引出。而中间的 i 层则由 n 外延层得到, i 层的宽度较宽可吸收绝大多数光子。这样 p-i-n 结构的光

电二极管不但可以在较高的频率下工作, 而且具有较高的量子效率和光响应度。

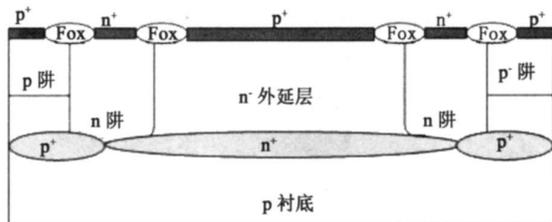


图 2 p-i-n 光电探测器示意图
Fig. 2 Schematic of PIN photodetector

1.1.2 p-i-n 光电探测器阵列版图

如图 3 所示为六象限光电探测器, 其中 A~D 为离焦探测器, E 和 F 为道跟踪探测器。A~D, E, F 这两组探测器面积分别相等且形状相同, 为了保证它们具有相同的电特性, A~D 和 E, F 探测器版图分别完全一致。

在探测器阵列中, 由于光生载流子有一定的扩散长度, 当光照在某个象限探测器且接近相邻象限一侧时, 相邻的这个象限即使不受光照, 也可能有一定的光电流输出, 各象限探测器之间会相互干扰。为了减小探测器阵列中各象限探测器之间的相互影响, 各探测器必须有良好的隔离。光电探测器工作在反向偏压状态, 因此采用 pn 结保护环隔离^[5]。同时, 由于电路工作时要避免光照, 在版图设计规则允许下用虚拟金属遮住电路部分。

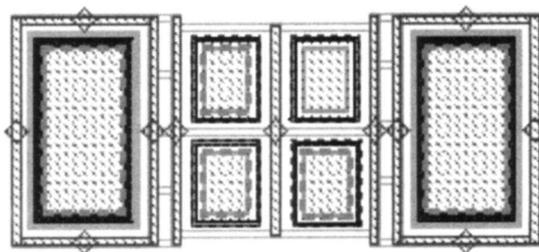


图 3 六象限探测器版图
Fig. 3 Layout of 6 pin photodetectors

1.2 PDIC 互阻放大器结构

通常, 跨阻放大器中可采用差动运算放大器以实现光电流到电压的转换, 但是 CMOS 运算放大器的增益带宽积较低, 要采用 CMOS 工艺实现高速的 PDIC 比较困难。反向器也可以作为放大器使用, 推挽反向器由于两个晶体管都是由输入电压驱动,

具有高的增益。同时, 它可以实现轨到轨的输出摆幅^[6]。与运算放大器相比, 反向器有更高的带宽且占用芯片面积小。负反馈跨阻放大器的带宽、增益以及稳定性之间存在折衷。开环增益的增加可以提高负反馈跨阻放大器的带宽, 采用单级反向器难以实现高带宽的要求, 因此本文采用如图 4 所示的电路结构^[7-8]。

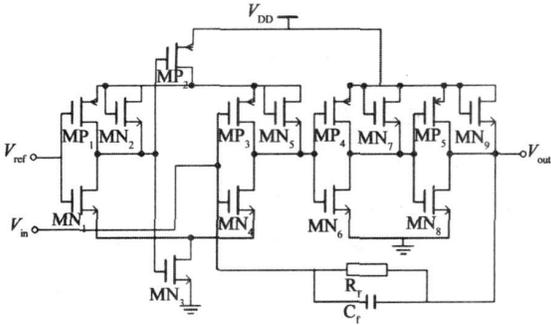


图 4 TIA 结构原理图
Fig 4 Schematic of the TIA

图 4 中以 MN₁~MN₅ 和 MP₁~MP₃ 构成的互补式自偏置差分放大器 (CSDA) 作为输入级。将一个传统的 NMOS 输入差动放大器和一个传统的 PMOS 输入差动放大器去掉负载后连接在一起, MN₃, MP₁ 的栅极都连接在 MN₁ 和 MP₁ 的漏极, 这样构成的自偏置结构带有负反馈回路, 工艺参数、温度等因素的变化引起静态偏置电压的偏移都可以通过此负反馈得到修正, 使静态工作点保持稳定。为了有尽可能大的输出摆幅, MN₁ 与 MP₂ 工作在线性区, 这样 CSDA 的输出摆幅就接近 V_{DD}。CSDA 中有四个输入 MOS 管 (MN₁, MP₁, MN₄, MP₃), 因此其差模电压增益约为传统差动放大器的两倍, 即

$$A_{vd} \approx \frac{g_{m1} + g_{m2}}{g_0}$$

式中, g_{m1} 为 MN₁ 和 MN₄ 的跨导, g_{m2} 为 MP₁ 和 MP₃ 的跨导, g_0 为放大器的输出电导。

MN₆, MN₇, MP₄ 以及 MN₈, MN₉, MP₅ 构成另两个推挽放大器。二极管连接形式的 NMOS 管作为每一级的有源负载, 用来降低每一级的增益, 保证系统的稳定性。这样这个三级放大器和反馈电阻 R_f 就构成了互阻放大器 (TIA)。反馈电容 C_f 用来消除增益峰值。为了驱动电容 10 pF 与 10 kΩ 电阻并

联的负载, 本文采用一个单位增益缓冲器与 TIA 相连作为输出级。

1.3 单位增益缓冲器与求和放大器结构

本文采用的单位增益缓冲器与求和放大器是同一个两级运放如图 5 所示^[9]。MN₁, MN₂ 以及 MP₁~MP₄ 构成输入级。MP₂, MP₃ 交叉耦合成为负电阻, 这样把一组正向 (MP₁, MP₂) 与负向的二极管连接起来, 其阻值为 $\frac{2}{g_{m2} - g_{m1}}$ 。其中 g_{m1} , g_{m2} 分别为 MP₂, MP₃ 与 MP₁, MP₄ 的跨导。因此用电流抵消技术可以容易控制这个差分阻值的大小, 以实现很大的电阻。与普通的差分放大器相比可以达到更高的增益, 经常被用于带宽放大器中。

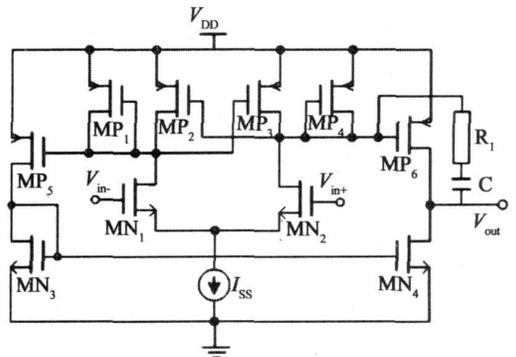


图 5 单位增益缓冲器与求和运放原理图
Fig 5 Schematic diagram of the unity gain buffer and summing amplifier

1.4 芯片版图

图 6 为采用 Candece 的版图工具设计的单片集成 PDIC 的版图。整个芯片版图面积大约为 1.4 mm × 1 mm。

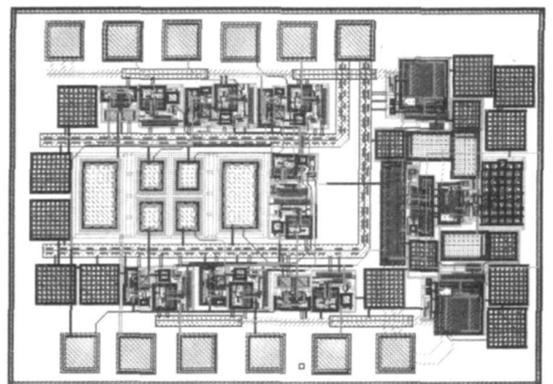


图 6 单片集成 PDIC 的版图
Fig 6 Layout of PDIC

2 仿真结果

本文利用 Silvaco 软件对探测器进行仿真。在 2.5 V 偏压下, 650 nm 波长时 p-i-n 光电探测器的响应度为 0.2 A/W。电路部分采用 CANDLECE Spectre 仿真器进行仿真。图 7 和图 8 分别为互阻放大器的瞬态、交流分析结果。仿真结果显示: 互阻放大器有较好的瞬态响应, 其 -3 dB 带宽为 94 MHz, 跨阻增益达到 150 k Ω 。

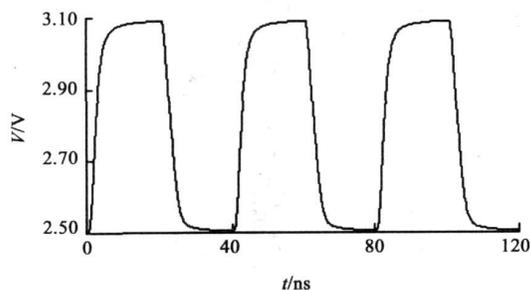


图 7 前置放大电路的瞬态特性图

Fig 7 Transient of the preamplifier

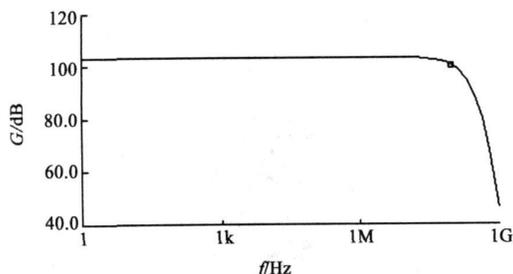


图 8 前置放大电路的频率响应图

Fig. 8 Frequency response of the preamplifier

3 结论

本文充分利用 CSMC 的 0.5 μm BCD 工艺中工艺特点, 优化设计了 p-i-n 结构的光电探测器, 利用 pn 结隔离技术, 有效的防止了各象限探测器之间的串扰。在此基础上设计了相应的前置放大电路, 实现了与工艺完全兼容的单片光电集成的 PDIC。有效减小了探测器与放大电路耦合和寄生电容, 提高了 PDIC 的工作频率和可靠性。仿真表明, PDIC 的关键参数指标均达到了 DVD 光盘存储系统的要求, 芯片已经通过了华润上华流片。

参考文献:

- [1] FORTSCH M, ZIMMERMANN H. Low offset CMOS OEIC for optical storage systems [J]. IEEE Trans on Consumer Electron, 2003, 49(4): 1125-1128.
- [2] 梁恩主, 郑婉华, 冯军, 等. 新型 DVD/VCD 光学头用 PDIC 的研制 [J]. 半导体光电, 2001, 22(5): 347-350.
- [3] 卞剑涛. 单片集成光盘信号探测放大芯片 (PDIC) 的研制 [D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [4] ZIMMERMANN H, GHAZI A, HEIDE T, et al. Advanced photo integrated circuits in CMOS technology [J]. Proc eedings of 49th Electronic Components and Technology Conference. San Diego, CA, 1999: 1030-1035.
- [5] 李红征. 基于 CMOS 工艺的高压 MOSFET 研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [6] ALLEN P E, HOLBERG D R. CMOS 模拟集成电路设计 (第二版) [M]. 冯军, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 145-146.
- [7] MEL B. Two novel fully complementary self biased CMOS differential amplifiers [J]. IEEE JSSC, 1991, 26(2): 165-168.
- [8] HEHEMANN I, BROCKHERDE W. A Single chip optical CMOS detector with in situ demodulating and integrating readout for next generation optical storage systems [J]. IEEE JSSC, 2004, 39(4): 629-635.
- [9] SANSEN W M C. 模拟集成电路设计精粹 [M]. 陈莹梅, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008: 73-75.

(收稿日期: 2010 05 05)

作者简介:

柯庆福 (1977-), 男, 福建人, 硕士研究生, 主要从事于光电单片集成的研究;



程翔 (1977-), 女, 福建人, 博士, 现任厦大机电工程系副教授, 主要开展微电子、光电器件、集成光电子学、宽禁带半导体材料光电性质、光纤通信等信息光电子学领域的研究。