量子通信技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260124001

一种应用于光电探测器的宽带高增益跨阻放大器

颜艳萍[1,2],万思渝[1,2],陈星宏[3],甄少伟[2,3]*,周 浪[4],奚水清[4],高若尧[4],崔大健[4]

(1. 重庆邮电大学 集成电路学院,重庆 400065; 2. 电子科技大学 重庆微电子产业技术研究院,重庆 401331;
3. 电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室,成都 611731; 4. 重庆光电技术研究所,重庆 400060)

摘 要: 文章提出一种宽带高增益跨阻放大器(TIA),核心TIA采用电压并联负反馈架构,内部主电压放大器采用Cherry-Hooper结构;差分增益级对前端信号进一步放大,引入共模反馈维持差分增益级的输出共模电平;在TIA输入端,集成了暗电流消除电路,抑制输入电流中的直流成分。基于65 nm CMOS工艺设计,版图尺寸为1.1 mm×0.9 mm。后仿真结果表明:在1.6 V供电下,－3 dB带宽达1.6 GHz,差分跨阻增益78 dBΩ,输入参考噪声149 nA。该设计在带宽、增益与噪声间取得良好平衡,适用于对信号完整性要求较高的光电探测系统。

关键词: 光电二极管; 跨阻放大器; Cherry-Hooper; 暗电流消除

中图分类号: TN432 **文章编号:** 1001－5868(2026)02－0248－05

A Broadband High-Gain Transimpedance Amplifier for Photodetectors

YAN Yanping[1,2], WAN Siyu[1,2], CHEN Xinghong[3], ZHEN Shaowei[2,3], ZHOU Lang[4], XI Shuiqing[4], GAO Ruoyao[4], CUI Dajian[4]

(1. School of Integrated Circuits, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN; 2. Chongqing Microelectronics Industry Technology Research Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Chongqing 401331, CHN; 3. State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN; 4. Chongqing Institute of Photoelectric Technology, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: This This paper presents a wideband high-gain transimpedance amplifier (TIA). The core TIA employs a shunt-shunt feedback topology, with the internal main voltage amplifier implemented using a Cherry-Hooper structure. A differential gain stage further amplifies the front-end signal, and a common-mode feedback loop is introduced to stabilize the output common-mode level of the differential gain stage. At the TIA input, a dark current cancellation circuit is integrated to suppress the dark current component of the input current. The design is implemented in a 65 nm CMOS process, occupying a chip area of 1.1 mm × 0.9 mm. Post-layout simulation results demonstrate that, under a 1.6 V supply, the amplifier achieves a －3 dB bandwidth of 1.6 GHz, a differential transimpedance gain of 78 dBΩ, and an input-referred noise current of 149 nA. This design achieves a favorable trade-off among bandwidth, gain, and noise, making it suitable for photodetection systems requiring high signal integrity.

Key words: photodetector; TIA; Cherry-Hooper; dark current cancellation

收稿日期:2026－01－24.

*通信作者:甄少伟

0　引言

随着信息技术的快速发展，光电探测器作为光信号与电信号转换的核心元件，已广泛应用于光纤通信、激光雷达、光学传感及生物医学成像等领域[1-2]。在这些应用中，光电探测器通常输出微安甚至纳安级的微弱电流信号，必须经跨阻放大器（Transimpedance Amplifier，TIA）转换为电压信号并放大至后级电路可处理的幅度。因此，TIA的跨阻增益、带宽及输入噪声特性直接决定了整个光接收系统的灵敏度、动态范围及数据传输速率。

对于跨阻放大器而言，宽带与高增益之间存在固有矛盾。根据闭环跨阻增益与带宽的折中关系，其增益带宽积受限于放大器的开环特性及反馈回路中的极点分布[3]。光电探测器的结电容与TIA输入端的寄生电容共同构成一个低频极点，显著压缩闭环带宽。若采用高增益设计，带宽往往受限，难以满足高速传输需求；反之，若片面追求带宽，则跨阻增益不足，系统灵敏度降低，无法准确检测微弱光信号。因此，如何在确保足够增益的前提下拓展带宽，成为TIA设计中的关键问题。

为缓解带宽与增益的矛盾，研究者提出多种电路技术。电感峰化通过在信号路径中串联或并联电感，利用LC谐振补偿高频增益衰减，但片上电感占用较大面积且易引入寄生效应，不利于集成度的提升[4]。有源反馈与电容退化技术可在不引入无源电感的情况下拓展带宽，但结构复杂度增加，可能带来额外的功耗与噪声[5]。基于上述背景，本文设计了一种应用于光电探测器的宽带高增益跨阻放大器。该电路采用Cherry-Hooper结构，在65 nm CMOS工艺下，跨阻增益达到8 000 Ω，−3 dB带宽达到1.6 GHz，能够满足百兆至吉赫兹级光通信及激光雷达接收前端的应用需求。

1　电路设计

为应对前述挑战，本文研究了应用于光电探测器的宽带高增益跨阻放大器。图1为跨阻放大器的系统框图，子电路模块包括TIA、单转双电路（SDC）、共模反馈电路（CMFB）、差分增益级（AMP）、自动增益控制电路（AGC）、暗电流消除电路（DC Cancellation）、输出缓冲级（Driver）。光电二极管实现光信号到电流信号的转换后输入到TIA，TIA将输入光电流转换放大为单端电压信号，单转双电路将单端信号转为差分信号，差分放大器AMP对信号进一步放大并输入到输出缓冲级，最终输出差分电压信号；引入AGC控制环路实现自动增益控制，拓展输入动态范围；在跨阻放大器输入端设有暗电流消除电路以消除暗电流；CMFB维持AMP的输出共模电平；辅助的偏置电路和低压差线性稳压器（LDO）为TIA提供稳定偏置以及稳定电源。

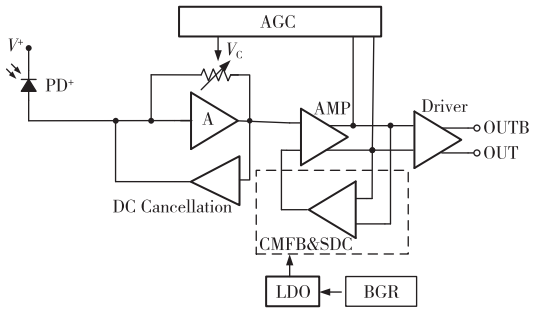


图1　跨阻放大器系统框图

1.1　跨阻放大器

如图2为跨阻放大器的电路图，光电探测器将光信号转换为电流信号传递到TIA，TIA将微弱的光电流转换放大为电压供后端电路进行处理[6]。TIA内部的电压放大器使用三级Cherry-Hooper结构，该结构的典型特征是三个共源放大器级联，每一级均使用电流源负载，两个电阻将相邻两个共源放大器的输出连接，形成局部负反馈网络，以减小放大器内部节点阻抗，拓展放大器带宽，提升速度。反馈电阻RF并联在电压放大器的输入端和输出端，形成并联-并联负反馈结构的跨阻放大器[7]。

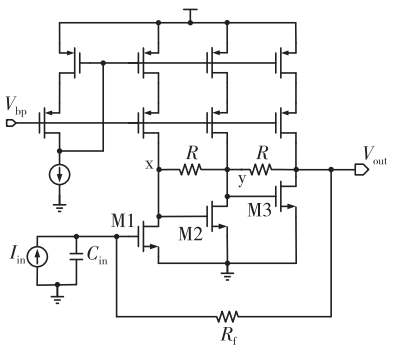


图2　跨阻放大器电路图

可以简要分析放大器内部的极点，以节点x为例，根据图3中的小信号模型计算它的阻抗（假设负载都是理想电流源，忽略M1，M2和M3的沟道长度调制效应）：

$$I=\frac{V-V_1}{R}=g_{m2}V+g_{m3}V_1 \tag{1}$$

$$R=\frac{V}{I}=\frac{1+g_{m3}R}{g_{m2}+g_{m3}} \tag{2}$$

因此，x处对应的极点 $\omega_{p,x}=\frac{1}{R_xC_x}$，其中 C_x 为M2栅端对地的寄生电容，电阻 R 很小，大概为几百欧姆，极点频率约9 GHz，节点y和输出节点处的极点计算方法类似，距离原点非常远。与普通多级放大器相比，这种结构极大减小了内部各节点的阻抗，进而推远了极点，实现了一个宽带电压放大器，避免其内部极点对TIA带宽产生限制[8-9]。

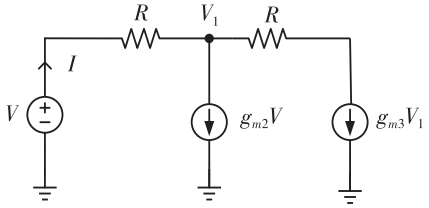


图3 节点x阻抗计算小信号电路

分析TIA的闭环传递函数。假设电压放大器近似为理想运放，可以写出TIA的闭环传递函数，即：

$$\frac{V_{out}}{I_{in}}\approx\frac{R_f}{(1+\frac{R_fC_{in}}{A_v}s)} \tag{3}$$

其中，电压放大器的低频增益为：

$$A_v=-\frac{g_{m1}(g_{m2}R-1)(g_{m3}R-1)}{g_{m2}+g_{m3}} \tag{4}$$

则直流跨阻增益为−3 dB带宽分别为：

$$|Z_{TIA}|=R_f \tag{5}$$

$$BW_{-3dB}\approx\frac{A}{2\pi R_fC_{in}} \tag{6}$$

式中，C_{in} 为光电二极管的结电容和放大器的输入电容。可以看到，反馈电阻 R_f 同时影响跨阻放大器的增益和−3 dB带宽，在确保TIA稳定的前提下调整 A_v 和 R_f，可以同时实现宽带高增益的目标。

由于输入光电流很微弱，容易被噪声淹没，必须考虑TIA在输入端引入的噪声。图4是TIA的简化噪声模型，噪声源主要有两个，即电压放大器输入管和反馈电阻引入的热噪声[10]。可以粗略计算等效输入噪声电流，可表示为：

$$\overline{I_{n,in}^2}=\frac{\overline{V_{n,A}^2}+\overline{V_{n,R_f}^2}}{R_f^2}\approx\frac{4kT\gamma}{g_{m1}R_f^2}+\frac{4kT}{R_f} \tag{7}$$

反馈电阻越大，等效输入噪声越小，TIA灵敏度越高，但是TIA输入动态范围会减小，也会限制带宽。综合考虑，通过增大输入管的电流和宽长比以提高跨导，减小噪声电流。

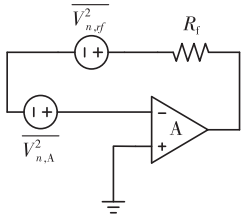


图4 TIA简化噪声模型

1.2 暗电流消除

光信号经光电探测器转换为电流，包含了交流成分和少量直流成分，直接输入TIA容易导致放大器饱和失真，影响交流信号检测精度。为此，在TIA输入端引入图5所示的暗电流消除电路。其基于负反馈机制，核心由低通滤波器、误差放大器及反相器构成：两组匹配的 R_1/C_1 和 R_2/C_2 低通滤波单元分别提取TIA输入/输出端直流电压，同步输入误差放大器；误差放大器放大两路直流采样差值并输出控制电压，反馈至反相器调控MOS管电流，最终实现输入光电流中的直流分量的抵消[10]。

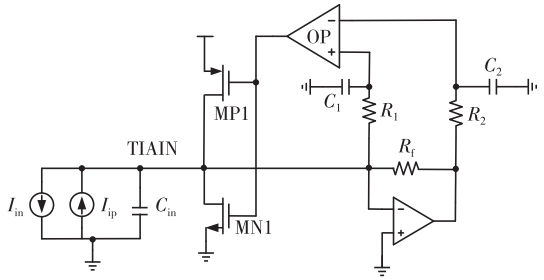


图5 DCR拓扑结构

1.3 共模反馈和单转双电路

光电流经过TIA转换后输出的电压信号不仅摆幅受限，且为单端信号形式，难以满足后续电路对信号幅度及差分驱动的需求。为此，在TIA与输出级之间增设差分增益级，一方面对单端信号进行进一步放大，拓展输出摆幅以适配后续电路处理要求；另一方面提升TIA整体增益性能，使模拟前端电路的总增益达到设计指标。

考虑到放大器输入端的寄生参数会对系统整体带宽产生不利影响，在TIA输出端与差分增益级之间引入源极跟随器，有效隔离前后级寄生效应，避免带宽被寄生电容压缩，同时实现电平移位作用。当TIA与差分放大器级联时，放大器输出端会

引入额外极点，导致系统带宽减小；同时，为避免码间串扰，差分放大器需满足特定带宽要求，使得该放大器的增益无法过高，需在增益与带宽之间进行平衡。

为实现 TIA 输出单端信号到差分信号的转换，同时维持差分增益级输出端的共模电平，设计了一套负反馈环路如图 6 所示。该环路从差分增益级的输出端采集信号，由误差放大器对信号差值进行放大，输出控制电压对差分增益级同相输入端的电平进行调控进而实现对输出共模电平进行钳位，既实现了单端到差分信号的转换，又稳定了差分放大器输出端的共模电平[11]。

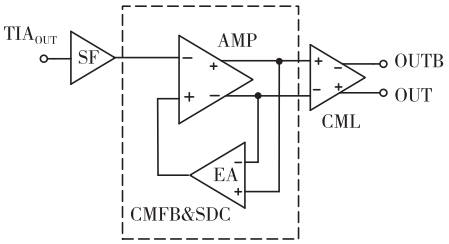


图 6　CMFB&SDC 电路结构

1.4　输出缓冲级

在高速信号传输系统中，为抑制信号反射引起的传输功率损耗，通常需实施阻抗匹配设计。按照业界标准，特性阻抗一般设置为 50 Ω，因此常在电路输出端级联一个输出阻抗为 50 Ω 的缓冲级来实现阻抗匹配。如图 7 展示了所设计的输出缓冲级电路架构，该电路采用 M1，M2，R_1 和 R_2 构成差分放大器结构，通过电路设计实现 50 Ω 的输出阻抗，从而与后续 PCB 板上的传输线实现良好的阻抗匹配。

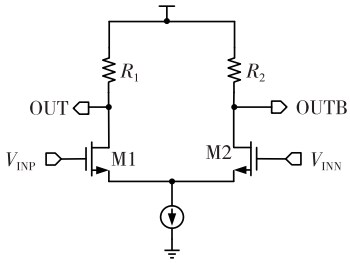


图 7　输出缓冲级

图 8 展示了跨阻放大器的瞬态仿真结果，当输入电流幅度为 8 μA，周期为 50 ns 时，输出信号保持 50 ns 的周期，差分输出摆幅 128 mV，对应的差分增益为 78 dBΩ。

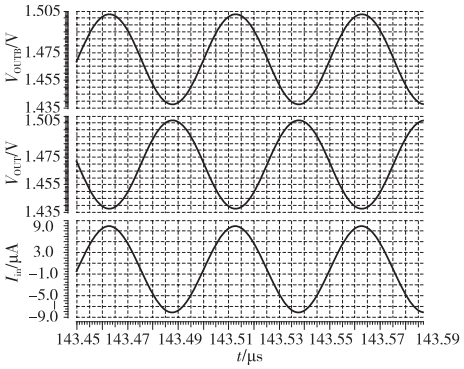


图 8　TIA 瞬态响应曲线

2　芯片版图和后仿真结果

基于 65 nm CMOS 工艺，采用 Cadence Spectre 软件进行设计与仿真，整个芯片版图（包括 BG 和 LDO）如图 9 所示，尺寸为 1.1 mm×0.9 mm。

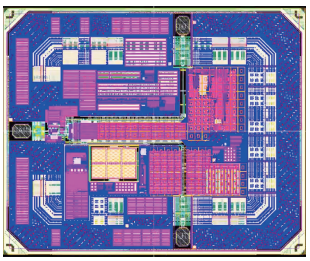


图 9　芯片版图

芯片外部供电电压为 3.3 V，TIA 核心模块工作电压为 1.6 V，功耗为 53 mW，光电探测器总电容为 0.5 pF。对电路原理图和版图进行优化得到 TIA 幅频特性如图 10 所示，跨阻增益为 78 dBΩ，−3 dB 带宽 1.6 GHz，低频截止频率为 10 kHz。

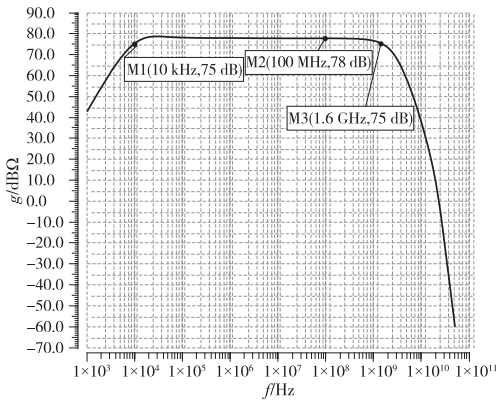


图 10　幅频特性曲线

图 11 为 TIA 的等效输入噪声电流谱密度，当频率为 1 GHz 时，仅为 5.6 pA/$\sqrt{\text{Hz}}$。将设计的 TIA 与现有研究成果进行各性能参数比较，结果见表 1。经过比较，本文的 TIA 在增益、带宽、噪声等关键性

能指标间取得了良好平衡,适合光通信、激光雷达、光电传感器等众多应用场景。

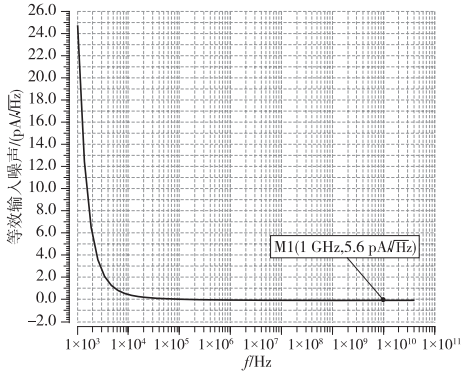


图11 等效输入噪声电流谱密度

表1 性能参数对比

参数	本文	[12]	13]	[14]	[15]
工艺节点/nm	65	28	45	65	90
功耗/mW	53	59	0.25	140	1.4
跨阻增益/dBΩ	78	74	85	72	40
带宽/GHz	1.58	100	0.11	20	7
噪声/(pA/$\sqrt{\text{Hz}}$)	5.6		0.24		20

3 结论

本文实现了一种高增益宽带TIA,采用单端输入差分输出的电路架构。TIA核心工作电压为1.6 V,实现了78 dBΩ的差分跨阻增益,确保了对微弱光电信号的有效转换与放大。在带宽方面,放大器的低频截止频率为10 kHz,−3 dB带宽为1.6 GHz,能够支持高速率信号的完整传输。在噪声性能方面,等效输入噪声电流149 nA,有效提升了微弱信号检测的信噪比。芯片面积仅为1.1 mm×0.9 mm,具有高度的集成度与紧凑的版图布局。

参考文献:

[1] Zhou X, Yi D, Chan D W U, et al. Silicon photonics for high-speed communications and photonic signal processing[J]. npj Nanophotonics, 2024, 1(1): 27.

[2] Seifouri M, Amiri P, Rakide M. Design of broadband transimpedance amplifier for optical communication systems [J]. Microelectronics Journal, 2015, 46(8): 679-684.

[3] Yamada T, Ito D, Nakamura M. Gain enhancement technique for a wideband transimpedance amplifier with common gate feedforward in optical communication[J]. IEICE Electronics Express, 2025, 22(1): 20240597.

[4] Li Y, Lou J, Hu B, et al. A broadband fully differential amplifier in InP DHBT using global shunt-shunt feedback[J]. IEICE Electronics Express, 2024, 21(22): 20240531.

[5] Radfar S, Cowan G. Interleaving active feedback in inverter-based optical receivers for bandwidth extension and linearity improvement [J]. 2024 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2024:1-5.

[6] Analui B, Hajimiri A. Bandwidth enhancement for transimpedance amplifiers [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(8): 1263-1270.

[7] Zhou G, Mao X, Heng W, et al. A 25 Gbps inductorless optical receiver analog front-end based the modified Cherry-Hooper amplifier for optical interconnect[J]. Microelectronics Journal, 2021, 113: 105047.

[8] Säckinger E. Analysis and Design of Transimpedance Amplifiers for Optical Receivers[M]. Hoboken: Wiley, 2017.

[9] 万宵鹏. 基于CMOS工艺的抗辐射加固光电探测芯片设计[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
Wan Xiaopeng. Design of RHBD optical receiver chip based on CMOS process [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

[10] 林少衡. 一种64 GBaud双通道差分线性跨阻放大器[J]. 光通信研究, 2023(6): 57-63.
Lin Shaoheng. A 64 GBaud dual channel differential linear trans-impedance amplifier [J]. Study on Optical Communications, 2023(6): 57-63.

[11] 周永兴,赵 野,杨 洁. 应用于车载激光雷达的宽带AGC跨阻放大器[J]. 微电子学. 2019,49(6):755-759.
Zhou Y X, Zhao Y, Yang J. A broadband AGC transimpedance amplifier applied to automotive LiDAR[J]. Microelectronics, 2019, 49(6): 755-759.

[12] Gu K, Ning Z, Li L, et al. A 500 MHz, 0.5% THD with 400 mVpp linear transimpedance amplifier (TIA) for analog optical and in-memory computing applications [C]//2024 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2024: 188-192.

[13] Süleyman E. 45 nm CMOS inverter transimpedance amplifier for LiDAR applications[J]. Brilliant Engineering, 2024, 5(3): 1-8.

[16] Pan Q, Luo X, Li Z, et al. A 26 Gb/s CMOS optical receiver with a reference-less CDR in 65 nm CMOS[J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(7): 072401.

[15] Zohoori S, Dolatshahi M, Pourahmadi M, et al. A CMOS, low-power current-mirror-based transimpedance amplifier for 10 Gbps optical communications [J]. Microelectronics Journal, 2018, 80: 18-27.

作者简介:

颜艳萍(2000—),女,硕士研究生,研究方向为模拟集成电路设计;

甄少伟(1982—),男,副教授,研究方向为模拟与混合信号集成电路设计技术。