

引用本文: 梁明, 姜海明, 刘偲嘉, 等. 光功率检测电路研究进展[J]. 光通信技术, 2023, 48(4): 48–52.

光功率检测电路研究进展

梁 明¹, 姜海明^{1*}, 刘偲嘉², 甘育娇², 谢康¹, 袁伟超¹, 李明朗¹, 林毅华¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 广州市自来水有限公司, 广州 510600)

摘要: 光功率检测电路的性能好坏决定了接收信号的质量, 介绍了光功率检测电路中半导体光电探测器的分类以及与光电探测器相连的几种常用的跨阻放大器, 并根据跨阻放大器的性能指标对比了各自的优缺点和应用范围。最后, 展望了光功率检测电路的发展前景。

关键词: 光功率; 光电探测器; 跨阻放大器; 检测电路; 集成互补的金属氧化物半导体电路

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)04-0048-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of optical power detection circuit

LIANG Ming¹, JIANG Haiming^{1*}, LIU Sijia², GAN Yujiao²,

XIE Kang¹, YUAN Weichao¹, LI Minglang¹, LIN Yihua¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Water Supply Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: The performance of the optical power detection circuit determines the quality of the received signal. This paper introduces the classification of semiconductor photodetectors in optical power detection circuits, as well as several commonly used transimpedance amplifiers connected to photodiodes, and compares their advantages, disadvantages and application ranges according to the performance indicators of transimpedance amplifiers. Finally, the prospects for optical power detection circuits development are briefly described.

Key words: optical power, photodetectors, transimpedance amplifier, detection circuit, integrated complementary metal-oxide-semiconductor circuit

0 引言

随着社会的发展, 光纤通信^[1]成为长距离传输的主要通信技术, 并对许多领域发展有着重要作用。光信号接收模块中的光功率检测电路是光纤通信的重要组成部分。在光功率检测电路中, 半导体光电探测器将接收到的光信号转换为光电流, 跨阻放大器(TIA)再将光电流转换为相对合适的电压信号^[2-3]。本文主要介绍光功率检测电路中半导体光电探测器的发展现状以

及与半导体光电探测器相连的几种常用 TIA 优缺点, 据此分析当前该领域面临的挑战与前景。

1 半导体光电探测器发展现状

半导体光电探测器^[4]常用的有光电导探测器和光伏探测器。其中, 光电导探测器是利用半导体材料的光电导效应制成的光探测器件, 有 Ge、Si 掺杂等多种材料。光伏探测器是利用半导体 PN 结光伏效应制成的光探测器件, 主要分为以下几种类型: PN 光电二极管^[4]、雪崩光电二极管(APD)^[5]、PIN 光电二极管^[6]、金属-半导体-金属(MSM)光电探测器^[3]、GaAs/GaAlAs 红外量子阱探测器^[7]等。其中, 普通 PN 光电二极管(如 GaNP-N 结光电二极管)的光谱范围涵盖了紫外光谱, 使用范围广。APD 的内部增益特性^[8]使其常被用于长距离传输, 根据掺杂介质不同可分为 Si-APD、Ge-APD、In Ga As-APD。PIN 光电二极管^[9-10]是在传统 PN

收稿日期: 2022-09-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.11874126)资助。

作者简介: 梁明(1997—), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 主要从事拉曼光纤放大器以及相敏光时域反射仪检测电路的研究。曾获得中国实用新型专利: 一种可切换增益的微弱光电转换电路以及一种过流故障保护电路。



* 通信作者: 姜海明(1976—), 男, 辽宁阜新, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子器件、光纤技术和测控技术等领域的研究。

光电二极管的基础上,在P型半导体和N型半导体中间加一层本征半导体层(I层),其特点是灵敏度高,响应的频带宽,噪声低。但是,由于在高频甚至微波频段,二级I层的总电荷主要由偏置电流产生而非微波电流瞬时值产生,阻值是由偏置直流决定,正偏接近于短路,反偏接近于开路,因此无法对输入信号进行整流。MSM光电探测器^[3,11]为金属-半导体-金属结构,具有制作简单,寄生电容低与FET完全兼容等优点,发展方向是集成小型化、高性能化和应用场景多样化^[12]。GaAs/GaAlAs红外量子阱探测器是薄膜生长技术与微电子学结合的新型器件(结合分子束外延技术和量子阱超晶格材料的产物),改变阱宽和势垒高度就能改变响应峰值波长。

2 用于光电检测的 TIA

在光电检测系统中,光电探测器^[13]通常与TIA^[14-15]相连,因此TIA的性能^[1]至关重要,其性能指标主要有增益、带宽、噪声、功率。在实际应用中,根据需求平衡这4个性能指标。

2.1 基于电阻的 TIA

最简单的基于电阻的TIA电路^[1]如图1所示。图中D为光电二极管。由于电阻阻值 R_1 跟增益 R_T 正相关,因此高阻值会导致高增益。但高阻值会引起符号间干扰(ISI),进而降低了带宽,限制了阻值无限增大,一般选择-3 dB带宽对应的电阻阻值为折中点,因此该结构不能用于高速场景。如果能再有效降低ISI,则该类型的TIA能在低功耗的状态下提高工作带宽^[16]。文献^[17]提出一种采用反馈元件的基于运算放大器的TIA,其输出端连接反馈元件,反馈元件可由电阻、电容、伪电阻(MOS管反向连接)组成,如图2所示。基于电阻的TIA相关公式^[1]如式(1)~式(4)所示,伪电阻的相关公式如式(5)所示:

$$R_T = R_1 \quad (1)$$

$$f_{-3dB,1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_{PD}} \quad (2)$$

$$\overline{V_{n,out}^2} = \frac{kt}{C_{PD}} \quad (3)$$

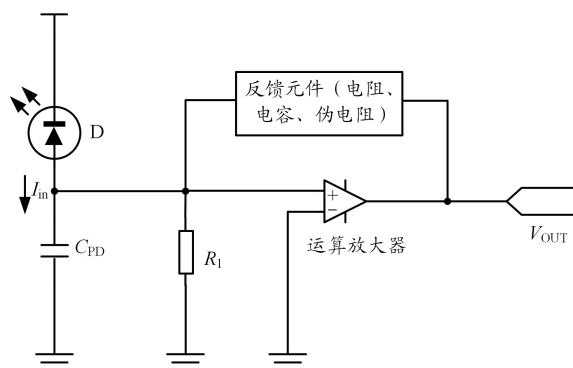


图2 基于运算放大器的 TIA

$$P_{SNR} = \frac{C_{PD}}{kt} I_{in}^2 R_1^2 \quad (4)$$

$$r_{tot} |_{V_{RES}=0} \approx \frac{2NU}{I_0} \quad (5)$$

其中, f_{-3dB} 为-3 dB带宽; C_{PD} 为光电二极管的电容; I_{in} 为输入电流; r_{td} 为伪电阻的阻值; V_{RES} 为伪电阻两端的压差; N 为元件个数; $V_{n,out}^2$ 为输出总噪声; P_{SNR} 为信噪比,电阻越大信噪比的值越大; k 为波尔茨曼常数; t 为绝对温度; $U=kt/q$ 为热力学电压^[17], q 为电荷量; I_0 是偏置电流。由于伪电阻的非线性,采用基于运算放大器的TIA能在保持总电阻固定的情况下,增多串联的元件数量,这使得单个元件的压降变小,漏极-源极电压变小,减小了器件失配的影响。同时,伪电阻并联补偿电容可以提高TIA的带宽。

2.2 基于共栅极的 TIA

在基于电阻的TIA中,由于ISI的存在,很难平衡电阻和带宽的取值。基于共栅极的TIA^[18]可以很好地解决这个问题,其结构图如图3所示,该类型放大器中有晶体管 Q_1 ,能够减轻输入寄生电容的影响,在输入节点能形成主导极点,且输入阻抗小。其增益、电阻、带宽间的关系如下:

$$f_{-3dB,2} = \frac{g_{mQ1}}{2\pi C_{PD}} \quad (6)$$

其中, g_{mQ1} 是晶体管 Q_1 的跨导。可以看出,带宽只与电容和跨导2个变量相关,这样能够在增益提高的情况下,不降低带宽。

但是该类放大器存在着较低的噪声性能,很难权

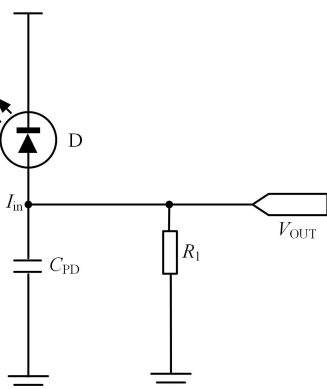


图1 基于电阻的 TIA

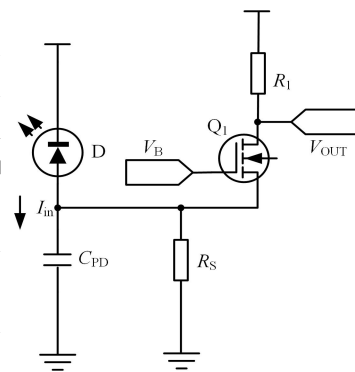


图3 基于共栅极的 TIA

梁明,姜海明,刘恩嘉,等. 光功率检测电路研究进展

平衡带宽^[19-20]与功耗的取舍。2021年,文献[19]通过减少输入电阻来改善带宽,实现了10 GHz的无电感的稳压级联TIA,但该结构的并联反馈增益很小,需在后续输出添加放大器;另外,该结构还存在自身电源电压范围和灵敏度小的问题。因此,文献[21]提出了基于前馈共栅极的TIA,该结构在带宽上更有优势,且放宽了供电电源的要求,其结构图如图4所示。插入的晶体管 Q_2 作为传输晶体管可以提高栅极的电压,晶体管 Q_2 和 Q_3 形成前馈回路,带宽公式如下:

$$f_{-3dB,3} = \frac{g_{mQ1}(1+g_{mQ2}g_{mQ3}R_2R_3)}{2\pi C_{PD}} \quad (7)$$

其中, g_{mQ2} 、 g_{mQ3} 分别是晶体管 Q_2 、 Q_3 的跨导

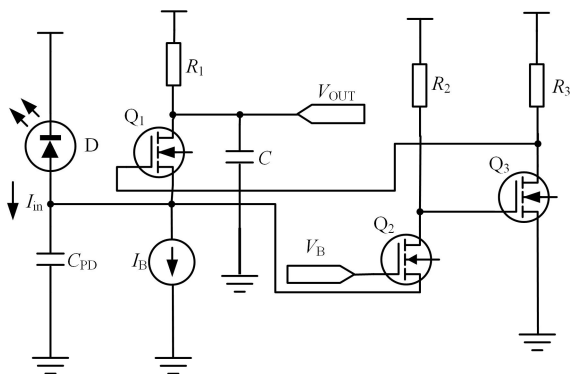


图4 基于前馈共栅极的TIA

2.3 基于电阻、电容反馈的TIA

文献[22]提出一种基于电阻、电容反馈的TIA,该放大器是在基于共栅极的TIA的基础上添加了闭环电阻或电容反馈电路,降低了输入/输出的阻抗,同时降低噪声来增加闭环带宽,其灵敏度很大程度上取决于电阻值。该类放大器通用结构如图5所示,增益、带宽和电阻的相关公式如下:

$$R_{in} = \frac{A}{1+A} R_F \quad (8)$$

$$f_{-3dB,4} = \frac{1+A}{2\pi R_F (C_{PD} + C_{IN})} \quad (9)$$

其中, A 表示放大器的开环增益。

文献[23]提出一种基于电阻反馈的共源极放大器,其结构如图6所示,该放大器结构简单,通常由单个晶体管 Q_1 并联一个反馈电阻 R_F 组成,输入噪声主要是晶体管沟道的热噪声和反馈电阻的热噪声。但该类放

大器在带宽提高的同时会出现增益下降的情况。基于此,文献[1]又提出一种基于共源极放大器、源极跟随器和电阻反馈的TIA,如图7所示,其中 R_F 为反馈电阻。该结构在共源极放大器后接源

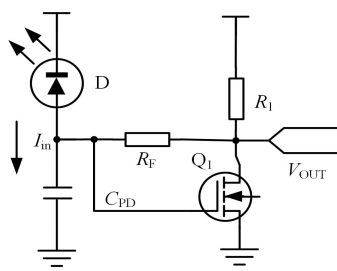


图6 基于电阻反馈的共源极放大器

极跟随器,可以起到电压缓冲的作用。同时,源极跟随器作为输出端,能够提供一个低阻抗的节点,因此,该结构通常适用于提供低输出阻抗的场景,且能提高带宽。为了提高增益,文献[24]采用多级放大器设计出基于多级级联放大器和电阻反馈的TIA,如图8所示。该结构级联3个不同放大器,前级为低带宽的放大器,后两个放大器起到连续时间线性均衡器(CTLE)的作用,三级级联形成负极性增益,增加额外增益,保证反馈回路稳定。尽管基于电阻反馈的TIA有较多优点,但是存在增益、噪声难以权衡的问题;同时,晶体管和电阻都产生噪声,电阻的电流噪声会混合到输入参考噪声中,降低了TIA的噪声性能。文献[25]选择用电容来替代反馈电阻,从而降低噪声,其结构图如图9所示。该结构的噪声主要是由晶体管产生的,可以通过合适的设计来减小;其增益是由2个主电容 C_{PD} 和 C_F 的比率决定的,2个电容不会产生噪声。

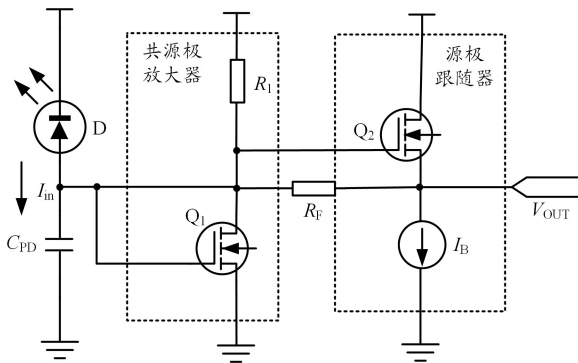


图7 基于共源极放大器、源极跟随器和电阻反馈的TIA

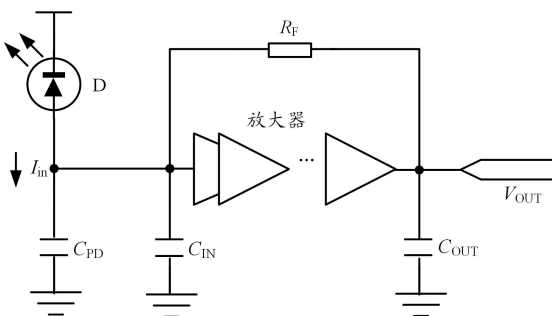


图8 基于多级级联放大器和电阻反馈的TIA

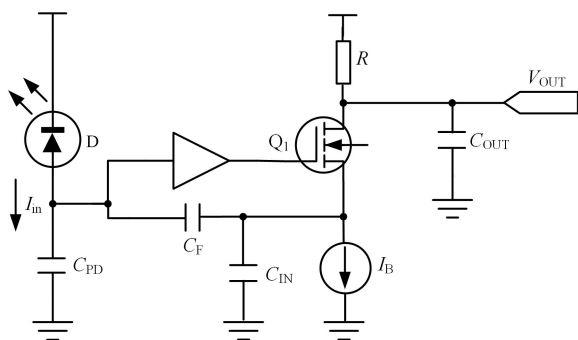


图9 基于电容反馈的TIA

2.4 基于反相器的TIA

由于光电探测器的寄生电容^[26]会限制带宽和噪声性能,基于电阻反馈的TIA中有源反馈级会消耗更多功率并引入噪声。因此,文献[1]提出基于反相器的TIA,其结构如图10所示。该结构的2个晶体管 Q_1 、 Q_2 工作在饱和区,使得反相器也处在高增益区域。因为带宽的增加受限于单级反相器的增益大小^[27],因此该放大器不仅能在消耗功率不大的基础上实现足够的带宽,同时还具有结构简单的优点(仅由反相器和反馈电阻组成,不需要偏置电路)。

基于反相器的TIA在输入节点引入输入电容^[28]的同时会引入米勒电容。文献[29]提出基于反相器的共源共栅极TIA,其结构如图11所示。该放大器在反相器的基础上增加了共源共栅结构并在反馈回路添加电

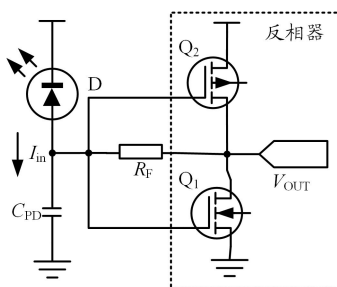


图10 基于反相器的TIA

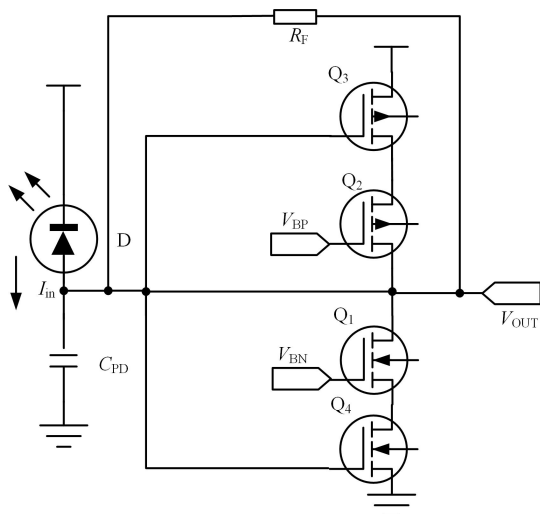


图11 基于反相器的共源共栅极TIA

感。向 Q_1 、 Q_2 施加偏置电压从而产生栅极电压,为了确保晶体管在饱和区工作,放大器的输入/输出信号摆幅不能太大。相比文献[1]提出的TIA,该TIA不仅在输入节点处引入的电容更少,还具有足够的增益,能在提高开环增益的同时避免米勒效应。

3 结束语

本文介绍了光功率检测电路中半导体光电探测器的发展现状以及常用的几种TIA的特点和性能指标(噪声、带宽、增益、功率)之间的关系,在实际应用中可以根据材料特性、电路结构、集成化程度等选择适合的光电探测器。

随着目前通信需求的增长和半导体光电技术的发展,对于高性能的光功率检测电路的需求越来越大。因此,结合更先进的CMOS工艺,研究出低噪声、低功耗和低成本的光功率电路具有重大意义。

参考文献:

- [1] GYU-SEOB J, WOORHAM B, DEOG-KYOON J. Review of CMOS integrated circuit technologies for high-speed photo-detection [J]. Sensors, 2017, 17 (9): 1962-1-1962-40.
- [2] 顾小琨,李永亮,胡伟伟,等. 激光测距系统中光电探测器的研究进展[J]. 量子光学学报, 2019, 25(1): 100-108.
- [3] 莫秋燕,吴家隐. MSM探测器的研究综述[J]. 黑龙江科技信息, 2015 (9): 65-66.
- [4] 赵慧玲. APD微弱光电信号探测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [5] 朱田友. 雪崩光电二极管电流检测电路设计 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [6] 杨成财,鞠国豪,陈永平. 集成PIN光敏元的CMOS探测器光电响应特性研究[J]. 中国光学, 2019, 12(5): 1076-1089.
- [7] 胡小英,刘卫国,段存丽,等. GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As量子阱红外探测器光谱特性研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2305-2308.
- [8] HUANG J, GAO L, ZHOU Y, et al. Design of APD detector circuit for thomson scattering system on J-TEXT tokamak [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(11): 3995-3997.
- [9] 王巍,颜琳淑,王川,等. Ge/Si SACM-APD器件分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1349-1353.
- [10] WANG J X, XIA K Q, LIU J L, et al. Self-powered silicon PIN photo-electric detection system based on triboelectric nanogenerator[J]. Nano Energy, 2020, 69(10): 44611-1-44611-9.
- [11] CHEN Y H, JHENG J W, MISHRA P, et al. GaSb MSM photodetectors on Si waveguides by rapid melt growth method [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(11): 1013-1015.
- [12] HOU X, ZOU Y, DING M, et al. Review of polymorphous Ga₂O₃ materials and their solar-blind photodetector applications [J]. Journal of Physics D-applied Physics, 2021, 54(4): 3001-1-3001-34.

梁明,姜海明,刘偲嘉,等. 光功率检测电路研究进展

- [13] 李亮,皮乐晶,李会巧,等. 二维半导体光电探测器:发展、机遇和挑战[J]. 科学通报,2017,62(27): 3134–3153.
- [14] AULL B. Geiger-mode avalanche photodiode arrays integrated to all-digital CMOS circuits[J]. Sensors, 2016, 16(4): 495–1–495–14.
- [15] 张翼鹏,王雪,纪佩璇,等. 不同响应机制下的石墨烯基光电探测器研究进展[J]. 发光学报,2022,43(4):552–575.
- [16] DJEKIC D, FANTNER G, BEHREND S, et al. A transimpedance amplifier using a widely tunable PVT-independent pseudo-resistor for high-performance current sensing applications [C]//IEEE. Proceedings of Esscirc-IEEE European Solid State Circuits Conference. Leuven: IEEE, 2017: 79–82.
- [17] PROESEL J, RYLYAKOV A, SCHOW C. Optical receivers using DFE-IIR equalization[C]//IEEE. Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers. San Francisco: IEEE, 2013: 130–131.
- [18] SEYED A H, MAJID P, MOHAMMAD R S. Utilization of a cascode-inverter in an RGC structure as a low-power [J]. broadband TIA, Microelectronics Journal, 2020, 99(1): 104749–1–104749–6.
- [19] ELMIRA S P, ZIADDIN D K, SIROOS T. A 10-GHz inductorless modified regulated cascode transimpedance amplifier for optical fiber communication[J]. Microelectronics Journal, 2021, 114(1): 105123–1–105123–7.
- [20] PARK S M, LEE J, YOO H J. 1-Gb/s 80-dB Ω fully differential CMOS transimpedance amplifier in multichip on oxide technology for optical interconnects[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(6): 971–974.
- [21] GHIMOUZ A, RARBI F, GALLIN M L, et al. A preamplifier discriminator circuit based on a common gate feedforward TIA for fast time measurements using diamond detectors [C]//IEEE. Proceedings of 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Bordeaux: IEEE, 2018: 281–284.
- [22] KAITO F, YASUHIRO T, DAISUKE I, et al. 49.4dB Ω 46.8GHz multiple shunt-shunt feedback regulated cascode TIA in 0.25- μ m InP-HBT process [C]//IEEE. Proceedings of 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Hong Kong: IEEE, 2020: 477–479.
- [23] KUMAR V, SARAVANAN G S, DURAISWAMY P, et al. Selvaraja, single stage low noise inductor-less TIA for RF over fiber communication [J]. IEEE Access, 2021, 9(1): 141504–141512.
- [24] LI D, LIU M, GENG L. A 10-Gb/s optical receiver with sub-microampere input-referred noise [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2268–2271.
- [25] ROMANOVA A, VAIDOTAS B. A review of modern CMOS transimpedance amplifiers for OTDR applications[J]. Electronics, 2019, 8(10): 1073–1–1073–33.
- [26] ATEF M, CHEN H, ZIMMERMANN H. 10 Gb/s inverter based cascode transimpedance amplifier in 40nm CMOS technology [C]//IEEE. Proceedings of 16th international symposium on design and diagnostics of electronic circuits & systems(DDECS). Karlovy Vary: IEEE, 2013: 72–75.
- [27] KALANI S, HAQUE T, GUPTA R, et al. Benefits of using VCO-OTAs to construct TIAs in wideband current-mode receivers over inverter-based OTAs[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019, 66(5): 1681–1691.
- [28] BAE W. CMOS inverter as analog circuit: an overview [J]. Journal of Low Power Electronics and Applications, 2019, 9(3): 26–41.
- [29] PAN Q, LUO X. A 58-dB Ω 20-Gb/s inverter-based cascode transimpedance amplifier for optical communications [J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(1): 6–13.