光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022062702

激光脉冲测距专用 CMOS 高速高增益读出芯片设计

郭晋远[1]，袁剑辉[1,2]*

（1. 长沙理工大学 物理与电子科学学院，长沙 410114；
2. 柔性电子材料基因工程湖南省重点实验室，长沙 410114）

摘　要： 为进一步实现激光回波脉冲处理电路的高增益、高带宽基本要求，对 CMOS 集成电路结构设计进行了深入研究：采用改进型 RGC 跨阻放大器、自动增益控制 Cherry-Hooper 级联结构、与双端输出源极跟随器分别作为前置放大器、电压宽带放大器与缓冲环节构成激光脉冲信号的接收通路；利用 MOS_L 等效并联电感峰化技术实现电路带宽拓展。在 0.5 μm 的 CMOS 工艺条件下，对其电路性能进行了仿真检测。结果表明：该信号处理电路的信号带宽、增益、输入阻抗与输出电压的响应幅度分别为 100 MHz，141 dB，117 Ω 和 1 V。最后对其电路提出具体的版图设计与测试方案等。

关键词： MOS_L 技术；RGC-TIA；Cherry-Hooper；高速高增益；激光测距

中图分类号： TN492　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1130－06

Design of High Speed and High Gain CMOS Readout Chip for Laser Pulse Ranging

GUO Jinyuan[1]，YUAN Jianhui[1,2]

（1. School of Physics and Electronic Science，Changsha University of Science and Technology，Changsha 410114，CHN；
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Flexible Electronic Materials Genome Engineering，Changsha 410114，CHN）

Abstract： In order to further realize the basic requirements of high gain and high bandwidth of laser echo pulse processing circuit，the structural design of CMOS integrated circuit was deeply studied in this paper. The improved RGC transimpedance amplifier，the cascade structure of automatic gain control Cherry-Hooper，and the two terminal output source follower were used as preamplifier，voltage broadband amplifier and buffer link respectively to form the receiving path of laser pulse signal. The circuit bandwidth expansion was realized by using MOS_L equivalent parallel inductance peaking technology. The circuit performance parameters were simulated and tested under the CMOS process condition of 0.5 μm. The results show that the signal bandwidth，DC gain，input impedance and output voltage response amplitude of the signal processing circuit are 100 MHz，141 dB，117 Ω and 1 V respectively. Finally，the specific layout design and test scheme of the circuit were proposed.

Key words： MOS_L technology；RGC-TIA；Cherry-Hooper；high speed and high gain；laser ranging

0　引言

光电探测技术是现代信息获取的主要手段之一，近年来已在军事和民用领域占有越来越重要的地位。在光电测距领域，由于激光具有直线性好、发散角小、能量高度集中等特点，其成为最为常用的光电测距手段之一。激光测距也是光电探测中最早且较为成熟完备的一个领域，并取得巨大发展，如光孤子[1-4]、空间碎片[5-8]、卫星[9-14]及激光雷达[15-17]等测

收稿日期：2022－06－27.
基金项目：国家自然科学基金项目(61771076)；湖南省自然科学基金项目(2020JJ4625).
* **通信作者：**袁剑辉　**E-mail：**wdxyjh@163.com

距方法。其中脉冲激光测距技术的发展也日异月新，其精度需求逐步从米级发展到厘米甚至毫米量级，与其技术发展相应的是对其探测器及处理器提出更高的性能参数要求，如更小的暗电流、更好的响应速度、更高的增益等[18]。

激光脉冲测距技术的原理是针对激光的飞行时间差进行测距，它是利用激光脉冲持续时间极短，能量在时间上相对集中，瞬时功率很大的特点进行测距。在有合作目标时，可以达到很远的测程，该方法主要用于地形测量、战术前沿测距、导弹运行轨道跟踪、激光雷达测距，以及人造卫星、地月距离测量等。激光脉冲从发射到经被测物体反射回来所用的时间的一半再乘以激光的传播速度，即为被测目标距离。如被测目标距离为 S，光脉冲发射接收的总时间为 t，光的传播速度为 c，则 $S=ct/2$，其测量精度可表示为 $\Delta s=\frac{c}{2}\Delta t$ [19]。显然测量距离精度主要取决于测量时间间隔的精度，而激光传播的测量时间主要受接收通道带宽、探测器信噪比、激光脉冲的上升沿等影响。

脉冲激光测距系统主要包括窄脉冲激光发射系统、脉冲激光接收系统、高精度时间间隔测量系统、微控制器、液晶显示、串口以及光学系统组成。其接收通道中最重要的是模拟放大模块，传统的放大模块由 PCB 板级外围电路构成，在此基础上，本文对其 CMOS 集成电路芯片电路进行适当改进设计。采用改进型 RGC 跨阻放大器与改进型自动增益控制 Cherry-Hooper 级联分别作为前置放大器与电压宽带放大器，最后由源极跟随结构作为缓冲输出，构成了激光脉冲信号的接收通路，并在前置放大器中利用 MOS_L 并联电感峰化技术来实现电路带宽拓展。仿真结果表明：该方法能很好地满足激光引信系统和激光测距系统的高性能需求，可为该类型电路设计在 CMOS 工艺上的研究提供参考。

1　电路结构设计

本文设计的电路整体结构如图 1 所示，主要由前置跨阻放大器、电压宽带放大器、增益控制电路，以及输出缓冲级构成。首先采用一对 RGC-TIA 作为前置放大器将光电探测的光敏元件被激光照射后所产生的电流小信号转换成电压信号，随后由 Cherry-Hooper 三级级联电压宽带放大器将前置放大器所产生的电压小信号放大，同时为保证放大电压在有效范围内，设计增益控制电路(GCC)来控制电压增益，通过电压放大器放大后的电压小信号有足够的电压幅度驱动下一级负载。因终端系统需求双端信号，最后采用源极跟随器双端输出，并提供大的充放电电路以驱动较大的片外容抗负载。

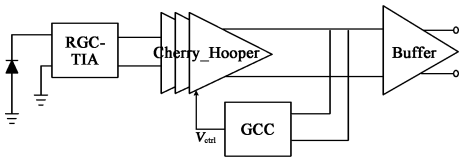


图 1　总体电路框架图

本文设计了一种新型的 RGC-TIA 放大器，其原理图如图 2 所示。将 RGC 结构作为输入缓冲级的好处是将减小输入节点对电路整体带宽的影响[20]。如图 2 所示，对比于传统的 RGC 结构，利用推挽结构对 Mn2 的栅压反馈能更好地拓展带宽，之后用两级差分结构进行放大，能极大地提高电路增益和有效减少电路失调和噪声。

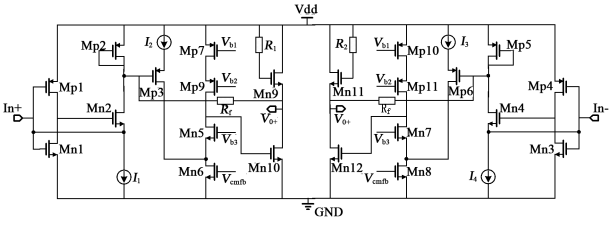


图 2　改进型 RGC-TIA 原理图

对改进型 RGC 小信号模型进行分析，可得其输入阻抗为[21]

$$Z_{in}(0)=\frac{r_{ds,p2}+r_{ds,n2}}{1+g_{m,n2}\cdot r_{ds,n2}(1+(g_{m,n1}+g_{m,p1})r_{ds,n1}\ /\!/\ r_{ds,p1})}\approx\frac{1}{g_{m,n2}(1+A_{inv})} \tag{1}$$

$$A_{inv}=(g_{m,n1}+g_{m,p1})\cdot r_{ds,n1}\ /\!/\ r_{ds,p1} \tag{2}$$

其中，g_m，r_{ds} 分别对应晶体管的跨导和内阻，A_{inv} 为由 Mn1 与 Mp1 构成的反相器增益。由上式可知，可通过调节 A_{inv} 大小来控制输入电阻。因此，理论上该结构可得到与传统 RGC 相比更低的输入阻抗，从而减小由输入结点带来的对整体带宽的影响，使前置放大器有着更高的带宽。通过以上分析，进一步得到第一和第二极点分别为

$$\omega_{p1}\approx\frac{1+g_{m,n2}\cdot r_{ds,n2}(1+A_{inv})}{(r_{ds,n2}+r_{ds,p2})C_{in}} \tag{3}$$

$$\omega_{p2} \approx \frac{1}{r_{ds1,eq}C_L} \tag{4}$$

−3 dB 带宽为

$$BW = \frac{1 + g_{m,n2} \cdot r_{ds,n2}(A_{inv}+1)}{2\pi(r_{ds,n2}+r_{ds,p2})C_{in}} \tag{5}$$

其中，$C_{in} = C_{gs1} + (1+A_{inv})C_{gs2}$，$C_L$ 为输出负载电容。上述公式表明：增加反相器的增益可提高带宽，即可采取增加 Mn1，Mp1 的宽长比来实现。这种 RGC 结构不仅可降低输入电阻，而且能提高增益，更好地匹配后续电路。另外，为进一步增加带宽，在前置放大器中设计加入 MOS_L 技术来实现并联电感峰化以拓展电路带宽[22]。采用图 2 所示电路中的 R_1，Mn9 组成等效有源电感 MOS_L，其等效模型如图 3 所示。与标准工艺下的螺旋电感相比，MOS_L 可节省大量的芯片面积。其等效电感可表示为[23]

$$L = \frac{C_{gs}}{g_{m9}}\left(R_1 - \frac{1}{g_{m9}}\right) \tag{6}$$

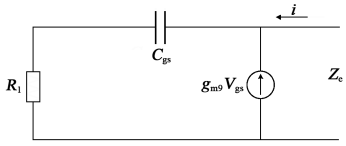
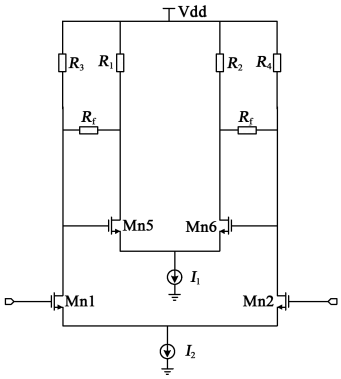


图 3 MOS_L 等效电路图

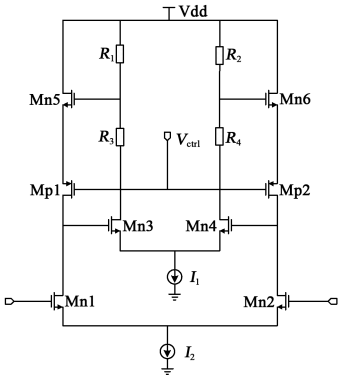
设计方案中的宽带电压放大器采用 Cherry-Hooper 结构，如图 4。由于实际应用中光敏元件产生的电流大小范围较大，有时甚至超过接收器的有效范围，所以在设计宽带放大器时，要使接收的光电流信号放大在一定范围内。相对于传统的 Cherry-Hooper，如图 4(a)，本文采用改进型的自动增益控制 Cherry-Hooper 放大器，如图 4(b)，增益控制电压 V_{ctrl} 由增益控制电路(GCC)生成。其主要特点为在反馈路径中引入源极跟随器 Mn3 和 Mn4。如此改进的好处是既提高了增益又不损失带宽[24]，同时利用工作在三极管区的 MOS 管形成可调控的反馈电阻，实现增益变化，并保证其线性变化。工作在三极管区的 MOS 管形成的等效反馈电阻可利用调谐 MOS 管工作在线性区的特性来实现[25]。图 5 给出了这种 Cherry-Hooper 小信号模型，其差分小信号增益 A_{MCH}(Modified-Cherry-Hooper，MCH)可表示为[24]

$$A_{MCH} = g_{m1}R_f f_{MCH} \frac{1 - s\dfrac{C_{gd3}}{g_{m3}}}{s^2(RC)^2_{MCH}\dfrac{R_f}{g_{m3}} + s(RC)_{MCH} + 1} \tag{7}$$

其中，$f_{MCH} = 1 + \dfrac{R_2}{R_1}$，$(RC)_{MCH} = C_{gd3}R_f f_{MCH} + C_1\dfrac{R_f}{R_1 g_{m3}} + \dfrac{C_L f_{MCH}}{g_{m3}}$。



(a) 传统的 Cherry-Hooper 结构



(b) 改进型自动增益控制 Cherry-Hooper 结构

图 4 Cherry-Hooper 结构

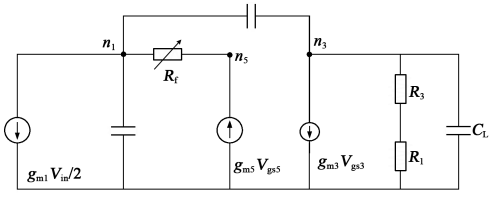


图 5 改进型自动增益 Cherry-Hooper 结构小信号模型

2 仿真结果

基于 CSMC 0.5 μm 的 CMOS 工艺条件，利用实验室专用 EDA 集成电路仿真工具，对该电路的性能进行了仿真。为更好地模拟实际探测信号，本文采用输入信号通过并联脉冲电流源和等效电容的方式来模拟光敏二极管所产生的高速脉冲信号。

图 6 是本文改进型 RGC-TIA 作为输入缓冲级情况下，输入阻抗 R_{in} 的小信号仿真结果。采用改进型的 RGC 做为隔离输入级时，输入阻抗为 117 Ω，小于传统 RGC 作为输入级的输入阻抗 419 Ω[18]。

在不同控制电压下改进型自动增益控制的

Cherry-Hooper 放大器的幅频特性曲线如图 7 所示，V_{ctrl} 变换范围在 1 V 以内。可见，在控制电压变化范围内，其增益变化范围为 15～20 dB。

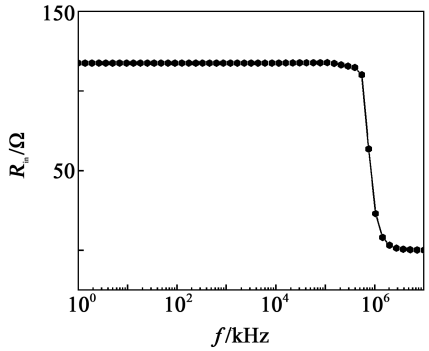


图 6　改进型 RGC-TIA 输入阻抗

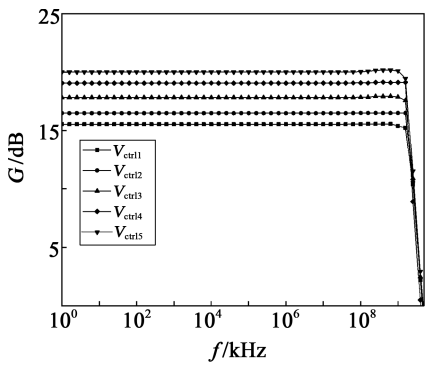


图 7　改进型自动增益控制 Cherry-Hooper 的幅频曲线

整体的幅频特性曲线如图 8 所示。当输入电容取为 2 pF、输出负载电容取为 2 pF 时，整体带宽为 140 MHz(曲线 Gain1)；接着将负载电容增大到接近实际值的 5 pF 时，其带宽为 100 MHz(曲线 Gain2)；当输出负载继续增加到 10 pF 时，其带宽降到 51 MHz(曲线 Gain3)。在容抗负载下电路整体增益为 141 dB。这些结果已在近年来报道的 83 MHz 带宽与 125.5 dB 增益的脉冲激光测距的专用 CMOS 芯片性能参数基础上[26]，实现了一定程度的改进。

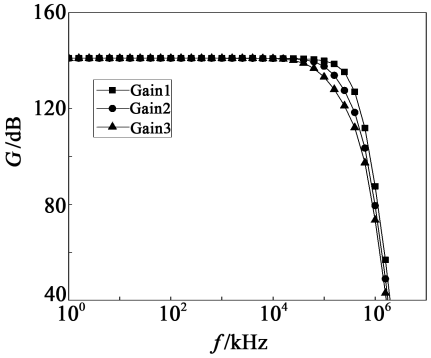
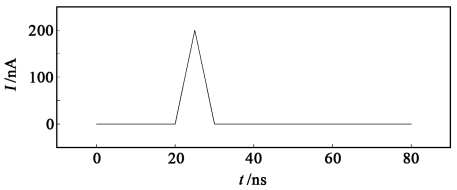
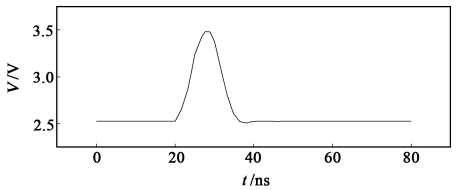


图 8　整体幅频曲线

整体电路的瞬态响应仿真结果如图 9 所示。上方输入波形为三角脉冲激励波形，上升下降时间均为 5 ns，幅度为 200 nA。下方则为激励响应波形。可看出输出电压信号波形上升时间为 8 ns，下降时间约为 10 ns，延时约为 3 ns。响应的电压幅度约为 1 V。



(a)　输入激励波形



(b)　输出响应波形

图 9　瞬态仿真波形

为反映本文改进效果，表 1 对比列出了近年报道的激光脉冲测距芯片的主要性能参数。显然本文方法已在带宽、增益、输入阻抗和瞬态响应方面，实现一定程度突破，所设计激光测距电路性能已在前人基础上实现进一步的提升。

表 1　设计芯片性能对比

参数	文献[26]	文献[18]	本论文
CMOS 工艺制程/μm	0.6	0.5	0.5
带宽/MHz	83	90	100
增益/dB	125.5	134	141
输入电阻/Ω	—	419	117
延时时间/ns	—	5	3

3　版图设计与测试方案

通过电路仿真完成设计指标后，对其整体版图做了进一步设计，如图 10 所示。电路偏置参考电流由外部提供。信号从 RGC 输入端双端输入，三级改进型自动增益控制 Cherry-Hooper 和增益控制电路级联，输出端采用源极跟随。一般取定左下角管脚为 1，那么八个管脚分别为：1-In-；2-GND；3-Bias；4-V_{out-}；5-V_{out+}；6-V_{ref}；7-V_{dd}；8-In＋。本方案面积大小为 1.2 mm×1.5 mm。其具体测试方案如图 11 所示。通过 PCB 板将光电探测器和设计的芯片相互连接，通过波形发生器给出激励信号激活脉冲激光器发射激光信号，激光脉冲照射光电探测器后

产生微弱的电流脉冲信号。然后通过芯片将该电流脉冲信号进行放大并转换为电压信号，接着在输出端测量其电压幅值响应。通过示波器测量展示的电压信号幅值和上升沿，计算测量电路的整体增益和带宽速度响应。通过测量响应信号到最后的发射信号之间的整体延时，测试板块中的各模块延时和芯片延时，得到芯片的具体性能指标。

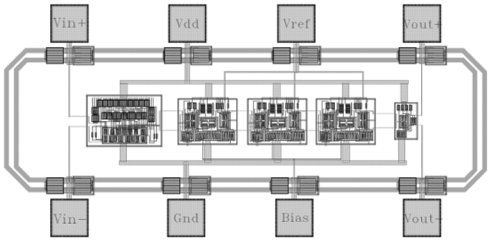


图 10 整体方案版图

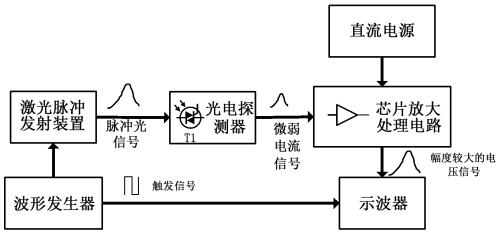


图 11 测试方案示意图

4 结论

本文基于 0.5 μm CMOS 工艺条件对高速激光回波信号探测电路进行了改进，并对其电路提出具体的版图设计与测试方案等。主要设计了一种改进型 RGC-TIA 放大器，并且利用 MOS_L 等效电感并联峰化技术，为前置 RGC-TIA 跨阻放大器提供更大的带宽增益。另外，采用改进型的自动增益控制 Cherry-Hooper 结构三级级联构成电压宽带放大，在输出端利用源极跟随器双端输出以提供更好的容抗负载驱动。在理想的仿真条件下，该新设计电路成功实现 100 MHz 的带宽、3 ns 脉冲激励信号响应延时、141 dB 的增益，以及 117 Ω 的输入阻抗与 1 V 左右输出电压响应幅度等。这些结果已在目前脉冲激光测距的专用 CMOS 芯片相应性能参数基础上，实现一定程度的改进。其方法可逐步满足激光引信对激光测距技术更高性能参数需求，并对进一步深入研究激光脉冲测距技术在其主要性能提升方面提供技术参考。

参考文献：

[1] Riemensberger J, Lukashchuk A, Karpov M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb[J]. Nature, 2020, 581(7807): 164-170.

[2] Suh M G, Vahala K J. Soliton microcomb range measurement [J]. Science, 2018, 359(6378): 884-887.

[3] Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafastoptical ranging using microresonator soliton frequency combs[J]. Science, 2018, 359(6378): 887-891.

[4] Yang Q F, Yi X, Yang K Y, et al. Counter-propagating solitons in microresonators[J]. Nature Photon., 2017, 11 (9): 560-564.

[5] Steindorfer M A, Kirchner G, Koidl F, et al. Daylight space debris laser ranging[J]. Nat. Commun., 2020, 11(1): 1-6.

[6] Prochazka I, Kodet J, Blazej J, et al. Photon counting detector for space debris laser tracking and lunar laser ranging [J]. Adv. Space Res., 2014, 54(4): 755-758.

[7] Kim S, Lim H C, Bennett J, et al. Analysis of space debris orbit prediction using angle and laser ranging data from two tracking sites under limited observation environment[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1950.

[8] Zhu F, Lu S, Sun J, et al. Inter-satellite laser-ranging based on intradyne coherent detection[J]. Appl. Opt., 2021, 60 (28): 8930-8938.

[9] Wilkinson M, Schreiber U, Procházka I, et al. The next generation of satellite laser ranging systems[J]. J. Geo., 2019, 93(11): 2227-2247.

[10] Kucharski D, Kirchner G, Bennett J C, et al. Photon pressure force on space debris TOPEX/poseidon measured by satellite laser ranging[J]. Earth Space Sci., 2017, 4(10): 661-668.

[11] Xue L, Li Z, Zhang L, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1 064 nm wavelength[J]. Opt. Lett., 2016, 41(16): 3848-3851.

[12] Behroozpour B, Sandborn P A M, Wu M C, et al. Lidar system architectures and circuits[J]. IEEE Commun. Mag., 2017, 55(10): 135-142.

[13] Strugarek D, Sósnica K, Zajdel R, et al. Detector-specific issues in satellite laser ranging to swarm-A/B/C satellites [J]. Measurement, 2021, 182: 109786.

[14] Yang W, Zhao Y, Fan C, et al. Real-time range gate control of a satellite laser ranging system based the on heterogeneous processor architecture[J]. Appl. Opt., 2021, 60(2): 296-305.

[15] Xu X, Zhang H, Luo M, et al. Research on target echo characteristics and ranging accuracy for laser radar[J]. Infrared Phys. & Technol., 2019, 96: 330-339.

[16] Peng J, Xu W, Liang B, et al. Pose measurement and motion estimation of space non-cooperative targets based on laser radar and stereo-vision fusion[J]. IEEE Sensor J., 2018, 19(8): 3008-3019.

[17] Gao M, Tang J, Yang Y, et al. An obstacle detection and avoidance system for mobile robot with a laser radar[C]//

2019 IEEE 16th Inter. Conf. on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2019: 63-68.

[18] 余金金，邓若汉，袁红辉，等. 一种用于高速激光回波信号处理的专用 CMOS 集成电路芯片[J]. 科学技术与工程，2012，12(17)：4300-4303，4311.

Yu Jinjin, Deng Ruohan, Yuan Honghui, et al. A high speed CMOS ASIC for pulsed laser echo signal processing[J]. Science Technol. and Engineering, 2012, 12(17): 4300-4303, 4311.

[19] 甄文庆. 脉冲激光测距机的研究[D]. 南京：南京理工大学，2014.

Zhen W Q. Research on pulsed laser rangefinder[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.

[20] Zohoori S, Shafiei T, Dolatshahi M. A 274 μW, inductorless, active RGC-based transimpedance amplifier operating at 5 Gb/s [C]// 2019 27th Iranian Conf. on Electrical Engineering (ICEE), 2019: 1-4.

[21] 赵君赫，国云川. 一种改进 RGC 结构 10 Gb/s 无电感跨阻放大器设计[J]. 微波学报，2016，32(S2)：340-343.

Zhao J H, Guo Y C. Design of an improved RGC 10 Gb/s inductance-free transresistance amplifier[J]. J. of Microwaves, 2016, 32(S2): 340-343.

[22] Belini V L, Romero M A. Design of active inductors using CMOS technology[C]// Proc. 15th Symp. on Integrated Circuits and Systems Design, 2002: 296-301.

[23] 韩　良，王新胜. 2.5 Gb/s CMOS 光接收机限幅放大器[J]. 光器件，2008(1)：39-42.

Han Liang, Wang Xinsheng. 2.5 Gb/s CMOS optical receiver limiter amplifier[J]. Optical Device, 2008(1): 39-42.

[24] Hermans C, Steyaert M. A high-speed 850 nm optical receiver front-end in 0.18 μm CMOS[J]. J. Solid-State Circuits, 2006, 41(7): 1606-1614.

[25] 安文星，佟　玲，刘亚轩，等. 基于 55 nm CMOS 工艺的可变增益放大器[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2020，47(6)：103-108.

An Wenxing, Tong Ling, Liu Yaxuan, et al. A variable gain amplifier based on 55 nm CMOS process[J]. J. of Hunan University(Natural Sciences), 2020, 47(6): 103-108.

[26] Chen Y, Huang G. A CMOS transimpedance amplifier for pulsed laser range finder[J]. Proc. SPIE, 2010, 7658: 765860.

作者简介：

郭晋远(1997－)，男，湖南省长沙市人，硕士研究生，研究方向为集成电路设计；

袁剑辉(1962－)，男，湖南省南县人，博士，教授，研究方向为纳米材料与纳米结构的物性模拟、光电子发光材料性能及应用，以及微电子学与物理电子学。