

# 一种高速大电流的 PAM4 光发射机设计

李 喜 , 林福江

(中国科学技术大学 微电子学院 , 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 随着通信数据比特率不断提升 , PAM4(四阶脉冲幅度调制)光发射机已经在超高速光纤通信系统中得到更广泛的应用。设计了一种包含 NRZ(非归零)编码-RZ(归零)编码转换电路的 PAM4 光发射机 , 基于电流模逻辑增加了电路的工作速度和抗干扰能力。通过带自偏置可控延时电路实现了 NRZ 编码到 RZ 编码的转换 , 减小了长链路信号传输的色散效应。驱动器采用预驱动与主驱动级联的方式增大电路驱动能力 , 并通过串联电阻实现级间的共模电平匹配。电路设计采用  $0.13 \mu\text{m}$  SOI CMOS 工艺 , 仿真结果表明在两路输入数据比特率为  $2.5 \text{ Gb/s}$  , 典型负载为  $25 \Omega$  时 , 最大输出电流为  $120 \text{ mA}$  , 电流脉冲宽度为  $125 \text{ ps}$  , PAM4 眼图张开度良好。

**关键词:** 光纤通信 ; PAM4 ; 光发射机 ; 驱动器

中图分类号 : TN432

文献标识码 : A

DOI : 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.06.010

引用格式 : 李喜 , 林福江 . 一种高速大电流的 PAM4 光发射机设计 [J]. 信息技术与网络安全 , 2020 , 39(6): 53-57.

## Design of a high-speed PAM4 optical transmitter with large current

Li Xi , Lin Fujiang

(School of Microelectronics , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 , China)

**Abstract:** With the continuous improvement of the communication data bit rate , PAM4(four-level pulse amplitude modulation) optical transmitters are more widely used in ultra-high-speed optical fiber communication systems. A PAM4 optical transmitter including NRZ(non-return-to-zero) encoding to RZ(return-to-zero) encoding converter is designed in this paper. Based on current mode logic, it increases the circuit's working speed and anti-interference ability. The self-biased controllable delay circuit is used, to realize the converter from NRZ encoding to RZ encoding, which reduces the dispersion effect of long-link signal transmission. The driver uses a cascade of pre-driver and main driver to increase the driving capability, and achieves common-mode level matching between stages by a series resistor. The circuit design is based on  $0.13 \mu\text{m}$  SOI CMOS process. Simulation results show that the maximum output current is  $120 \text{ mA}$ , the current pulse width is  $125 \text{ ps}$ , and the PAM4 eye pattern is open well at an input data rate of  $2.5 \text{ Gb/s}$  and a typical load of  $25 \Omega$ .

**Key words:** optical-fiber communication ; PAM4(four-level pulse amplitude modulation) ; optical transmitter ; driver circuit

## 0 引言

随着当今社会通信速度与容量的迅速增长 , 光纤通信相比传统的电通信开始展现出巨大优势。光发射机将输入电压信号转化为能调制激光器发光的电流信号 , 其作用在整个光纤通信系统中起着极其重要的作用<sup>[1]</sup>。

在同等波特率下 , 四阶脉冲幅度调制(Four-level Pulse Amplitude Modulation , PAM4)的比特率相比传统的非归零调制(Non-Return-to-Zero , NRZ)提高一倍 , 增大传输效率的同时降低了成本 , PMA4 技术已

经在超高速信号互连系统中得到了广泛认可<sup>[2]</sup>。但 PAM4 在实际应用上尚存在两个问题 : 一是 PAM4 的发射机的调制电流不够大 , 使得激光器的消光比不够大 , 从而使信号在光纤传输时产生误码 ; 二是目前输入数据信号编码通常采用 NRZ 编码 , 其调制产生的光信号在光纤传输中会显著地受色散效应影响造成码间干扰<sup>[3]</sup> , 不适应长距离传输。

本文提出的 PAM4 光发射机则能更好地适应长距离光通信 : 首先采用 SOI CMOS 工艺 , 相比 GaAs 等工艺折中了成本与性能 ; 其次输出调制电流最大

能达到 120 mA, 可以充分提高激光器的消光比; 另外, 设计了编码转换器, 将输入的非归零编码信号转换为归零型(Return-to-Zero, RZ)编码的信号, 调制的光信号更能忍受在光纤传播时的非线性和色散效应<sup>[4-5]</sup>, 从而更好地适应长距离光通信。

## 1 光发射机的整体框架及原理分析

如图 1 所示, 本文提出的光发射机主要由 NRZ-RZ 转换器和驱动器两部分组成, 发射机包含两个通道, 两个通道在输出端直接耦合, 对 DFB 激光器进行直接调制。通道 1、2 的输出调制电流分别为 80 mA、40 mA, 两者均有效时, 输出 120 mA 电流, 从而实现 PAM4 调制, 输出电流与输入数据电平的对应关系如表 1 所示。

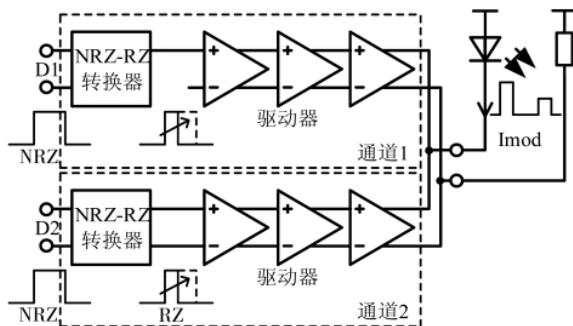


图 1 光发射机系统原理图

表 1 输出电流与输入数据真值表

输入数据 D1	输入数据 D2	输出电流 Imod / mA
0	0	0
0	1	40
1	0	80
1	1	120

NRZ-RZ 转换器主要实现输入数据编码的转换, 其具体模块组成和时序分别如图 2 和图 3 所示, 当输入 NRZ 数据比特率为 2.5 Gb/s 时, 通过控制延时链路的延迟, 再经过一系列与非操作可得到占空比 30%~50%(即信号半高宽为 120 ps~200 ps)的 RZ

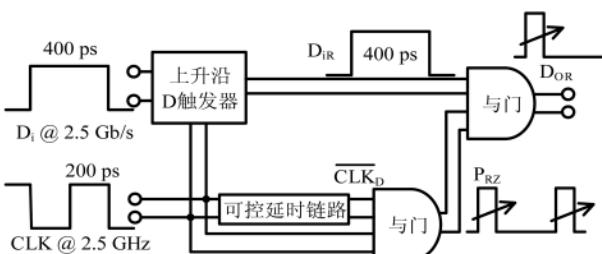


图 2 NRZ-RZ 转换器原理图

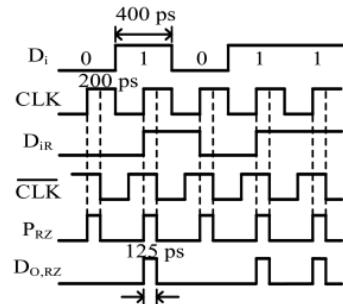


图 3 NRZ-RZ 转换器时序图

信号。但现实中, 无法保证输入数据与参考时钟的相位关系, 因此需引入 D 触发器实现数据信号与时钟信号的同步, 以减小数据中大的抖动带来的不良影响。

驱动器实现对输入的 RZ 信号进行放大, 最后产生足够大的调制电流驱动激光器工作。由于输出调制电流最大为 120 mA, 在 25 Ω 负载上输出摆幅高达 3 V, 若采用单级驱动电路, 其输入电容必定很大, 势必影响前级电路即转换器的设计。因此, 通过三级级联的方式增大驱动能力, 同时将输入电容控制在一定范围内, 以降低对转换器的设计难度。发射机采用直接调制、直流耦合的方式, 驱动器的输出直接与激光器的阴极相连。其工作时序如图 4 所示。

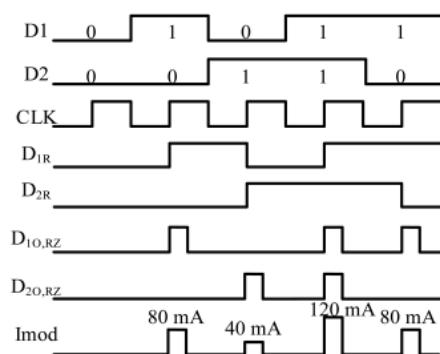


图 4 驱动器时序图

## 2 关键模块设计

### 2.1 基于电流模逻辑的 D 触发器

本文采用的 D 触发器基于电流模逻辑, 原理图如图 5 所示, 其主要功能是实现输入数据与参考时钟的同步。

相比传统的 CMOS 逻辑, 电流模逻辑能获得更高的速度, 同时, 其采用差分信号传输也能更好地抑制噪声等共模信号的干扰。设计 D 触发器时, 需要保证采样差分对管(即图 5 中的 M<sub>S</sub>)的直流增益

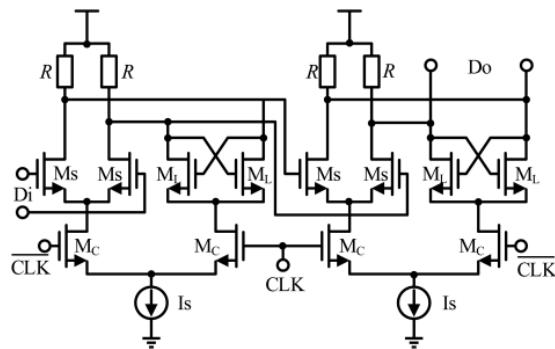


图 5 D 触发器电路原理图

大于  $\sqrt{2}$ ，以保证采样时摆幅不会衰减，同时锁存差分对管（即图 5 中的  $M_L$ ）的支流增益大于 1，确保锁存状态时是正反馈以再生数据。但实际情况下电路工作在大信号状态，具有一定非线性，这里取采样对管和锁存对管的宽长比一致，对于时钟对管（即图 5 中的  $M_C$ ），取其宽长比为  $M_S$  的 1.2 倍。通过在输入端引入 D 触发器，可以减小数据抖动的影响，眼图仿真结果如图 6 所示。

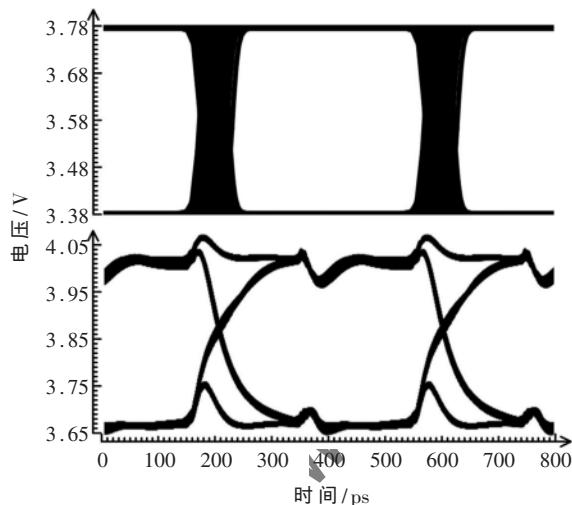


图 6 D 触发器输入数据与输出数据眼图

## 2.2 带自偏置的压控延时链路

延时链路用于对输入信号产生延时，并且延时受输入电压信号控制，本文采用三级基本延时单元级联来产生较大的延时，其基本延时单元和带负反馈的自偏置电路原理图如图 7 所示。

自偏置电路中引入负反馈，在比较大的可控延时范围内，实现延时单元中尾电流源的电流与延时单元输出摆幅保持恒定，负反馈环路中引入米勒补偿电容  $C_c$  和调零电阻  $R_z$ ，环路的相位裕度保持在  $75^\circ$  以上，保证调节延时过程中环路的稳定性。

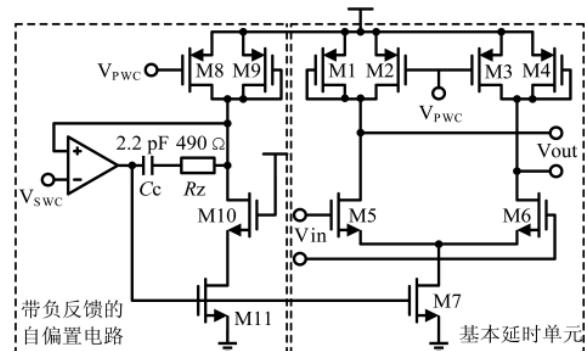


图 7 基本延时单元与自偏置电路原理图

延时通过改变电路的输出时间常数来实现，本文采用改变输出阻抗来改变延时。基本延时单元的可变负载采用受电压控制的对称负载结构<sup>[6]</sup>，由图 7 中的 M1~M4 组成，这种结构能使电压信号  $V_{PWC}$  对负载的等效阻抗的控制更加平滑，从而使得延时能更好地受  $V_{PWC}$  控制。延时随  $V_{PWC}$  电压变化的仿真图如图 8 所示，在 1.5 V~3 V 电压范围内，延时从 120 ps~200 ps 变化，控制曲线比较平滑。由图 3 可知，输出的 RZ 编码信号，其占空比受延时控制，其脉冲半高宽等于延时量，因此，输出的 RZ 信号占空比能得到更好的控制。

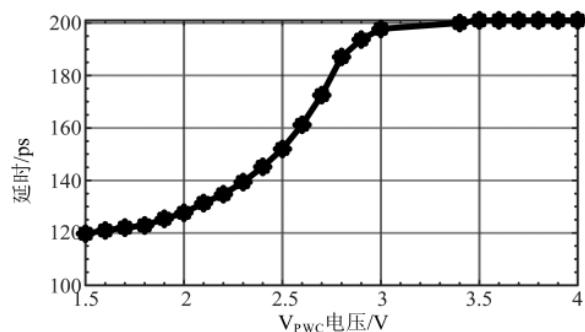


图 8 延时与控制电压的关系

## 2.3 驱动器

驱动器采用两个通道并联输出的连接方式驱动激光器，通道 1 最大提供 80 mA 电流，通道 2 最大提供 40 mA 电流，两者结构相同，这里对电流较大的通道 1 做电路分析，通道 2 不再赘述。

对于通道 1 的驱动器，其电路原理图如图 9 所示，采用两级预放大器加主放大器三级级联的方式对输入电压信号进行放大。

最后一级主放大器电流源为 100 mA, 由于两个通道并联连接, 并且与外部激光器直流耦合输出调制电流, 这里简单采用端接电阻吸收反射, 一个通

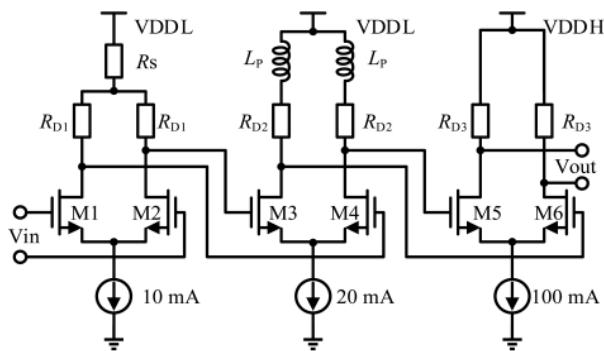


图 9 通道 1 驱动器电路原理图

道输出电阻为  $200 \Omega$ , 两通道并联后的输出阻抗为  $100 \Omega$ , 并且其电压采用更高的电源电压以保证 M5、M6 和采用共源共栅结构的尾电流源能正常工作。因主放大器电流过大使得 M5 和 M6 产生很大的栅极电容, 为节省功耗和减小级联级数, 这里对第二级预放大器做了并联电感峰化<sup>[7]</sup>, 对第二级预放大器做小信号分析, 可得不使用电感峰化时, 其传输函数为:

$$\begin{aligned} H(s) &= g_{m3} \left( \frac{1}{sC_{12}} \parallel (R_{D2} + sL_p) \right) \\ &= g_{m3} \frac{R_{D2} + sL_p}{s^2 L_p C_{12} + sR_{D2} C_{12} + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $C_{12}$  为第二级预放大器总的输出电容, 令  $\omega_{c,0}$ 、 $\omega_c$  分别为使用电感峰化前后电路的  $-3 \text{ dB}$  带宽, 并令  $m$  为:

$$m = R_{D2} C_{12} / (L_p / R_{D2}) \quad (2)$$

则有:

$$\frac{\omega_c}{\omega_{c,0}} = \sqrt{\left(-\frac{m^2}{2} + m + 1\right)^2 + \left(\frac{m}{2} + m + 1\right)^2} + m^2 \quad (3)$$

由式(3)可知, 不同的  $m$  取值对带宽的峰化程度不一样。再根据式(2), 在输出摆幅及电流确定时,  $R_{D2}$  与  $C_{12}$  不变,  $m$  仅受  $L_p$  影响, 调节  $L_p$  即可调节  $m$ 。这里取  $m=2$ , 可获得 80% 的带宽拓展, 而对幅频响应的过冲仅 3%, 保障了电路具有较平坦的幅频响应<sup>[8]</sup>。图 10 给出了通道 1 和通道 2 驱动器的幅频响应曲线, 直流增益分别为  $16.12 \text{ dB}$ ,  $10.13 \text{ dB}$ , 带宽分别为  $6.43 \text{ GHz}$ ,  $6.85 \text{ GHz}$ , 并且不含有明显过冲。在两通道驱动器接收一路  $8 \text{ Gb/s}$  NRZ 随机数据的情况下, 图 11 中(a)~(c)分别给出了通道 1、通道 2 以及两者同时有效时, 驱动器的输出 NRZ 眼图; 图 11(d)则给出了分别输入两路不同的  $8 \text{ Gb/s}$  NRZ

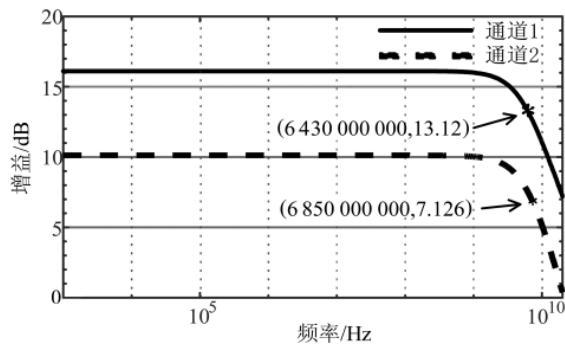


图 10 驱动器的幅频响应曲线

随机数据时, 驱动器的输出 PAM4 眼图。由图可见眼图非常清晰, 张开度很好, 抖动很小。

### 3 整体仿真结果

本文实现了一种包含 NRZ-RZ 转换器的高速大电流光发射机电路, 供电电压为  $6.5 \text{ V}/4 \text{ V}$ , 图 12 给出了发射机的输出调制电流的瞬态波形和眼图, 可见最大输出调制电流为  $120 \text{ mA}$ , 脉宽最小约为  $125 \text{ ps}$ , 相当于数据率为  $8 \text{ Gb/s}$ 。

### 4 结论

基于 GlobalFoundry 130 nm RFSOI CMOS 工艺, 本文设计了一种包含 NRZ-RZ 转换器的光发射机, 通过编码转换减弱了色散效应、码间干扰等问题, 降低了误码率; 输出电流最大为  $120 \text{ mA}$ , 能有效提升激光器工作时的消光比; 发射机的输出电流脉冲宽度可调, 最小为  $125 \text{ ps}$ ; 发射机工作速度高可达  $8 \text{ Gb/s}$ , PAM4 眼图张开度足够好, 抖动较小。

### 参考文献

- [1] 吕光辉.一种基于 CMOS 的光纤通信系统的设计[D].西安:西安电子科技大学, 2014.
- [2] LIAO Q, QI N, ZHANG Z, et al. The design techniques for high-speed PAM4 clock and data recovery[C]. 2018 IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications(ICTA), 2018 : 142–143.
- [3] KOCAMAN N, GARG A, RAGHAVAN B, et al. 11.3 Gbps CMOS SONET compliant transceiver for Both RZ and NRZ applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(12) : 3089–3100.
- [4] LIN H S, LAI P C. Single mach-zehnder modulator with RZ-DPSK modulation signal in 48 Chs×40 Gbit/s long haul DWDM transmission[J]. Journal of Optical Communications, 2013, 34(3) : 155–160.

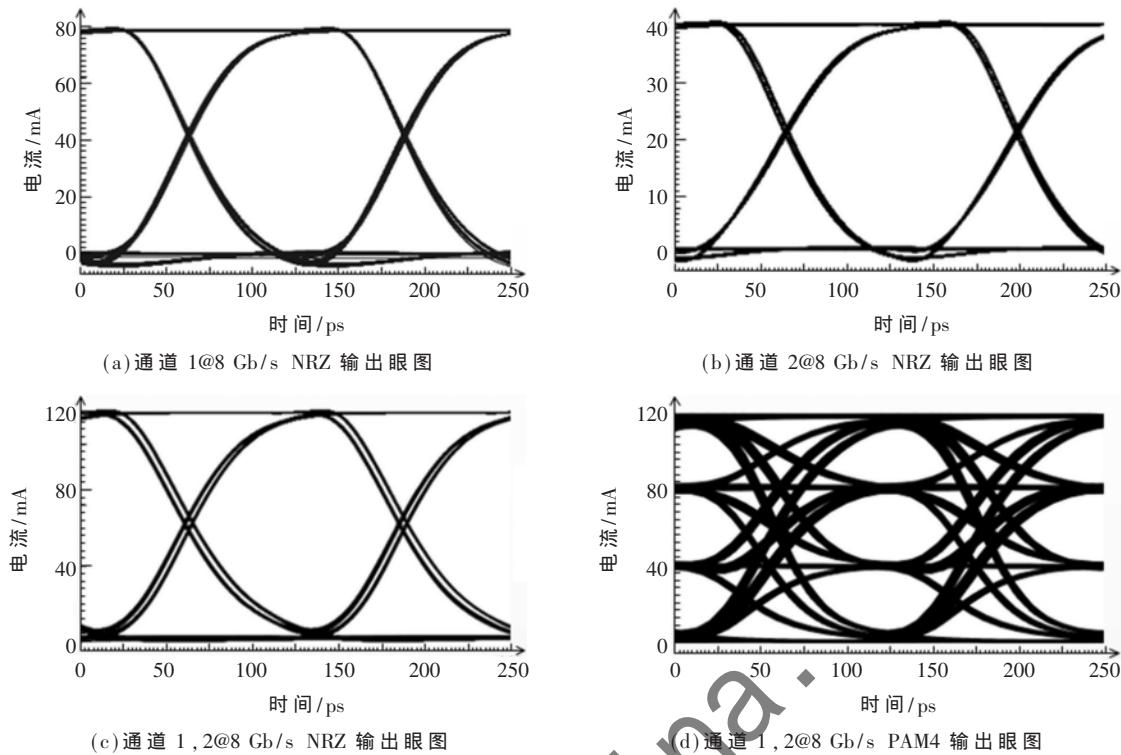


图 11 驱动器输出眼图

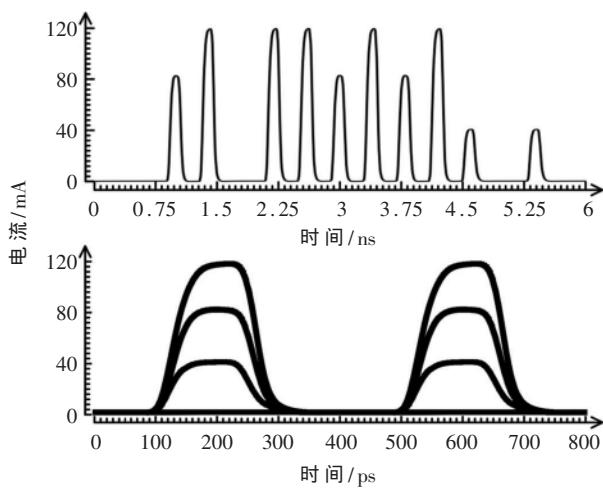


图 12 光发射机输出电流瞬态波形及眼图

- [5] DAI S , HANAWA M .RZ-PAM4 transmission with quasi-Fourier-transform-limited gain-switched pulse source[C]. Optoelectronics & Communications Conference. IEEE , 2016.
- [6] MANEATIS J G , KIM J , MCCLATCHIE I , et al. Self-biased high-bandwidth low-jitter 1-to-4096 multiplier clock generator PLL[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits , 2003 , 38(11) : 1795–1803.
- [7] WU C H , LEE C H , CHEN W S , et al. CMOS wide-

band amplifiers using multiple inductive-series peaking technique[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits , 2005 , 40(2) : 548–552.

- [8] SHEKHAR S , WALLING J S , ALLSTOT D J . Band-width extension techniques for CMOS amplifiers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits , 2006 , 41(11) : 2424–2439.

(收稿日期:2020-01-16)

#### 作者简介:

李喜(1995-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:模拟集成电路设计、光纤通信集成电路设计。

林福江(1959-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:微纳器件的射频建模、芯片设计和微波系统集成。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部  
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所