

12 Gb/s GaAs PHEMT 跨阻抗前置放大器

焦世龙^{1,2}, 冯 伟², 陈堂胜², 范 超¹, 李拂晓², 叶玉堂¹

(1. 电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054; 2. 南京电子器件研究所单片集成电路与模块国家级重点实验室, 江苏南京 210016)

摘要: 采用 0.5 μ m GaAs PHEMT 工艺研制了一种单电源偏置光接收机跨阻抗前置放大器. 放大器 3dB 带宽约为 9.5GHz; 在 50MHz~7.5GHz 范围内, 跨阻增益为 $43.5 \pm 1.5 \text{ dB}\Omega$, 输入输出回波损耗均小于 10dB; 带内噪声系数在 4dB~6.5dB 之间, 由此得到的最小等效输入噪声电流密度约为 $17.6 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$; 输入 12Gb/s NRI 伪随机序列时, 放大器输出眼图清晰, 眼开良好.

关键词: PHEMT; 跨阻抗; 前置放大器;

中图分类号: TN722.7 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2006)06-1156-03

12 Gb/s GaAs PHEMT Transimpedance Preamplicifier for Optical Receiver

JIAO Shi-long^{1,2}, FENG Wei², CHEN Tang-sheng², FAN Chao¹, LI Fuxiao², YE Yutang¹

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;
2. National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: A kind of single power supply transimpedance preamplifier (TIA) for optical receiver is developed, using 0.5 μ m GaAs PHEMT process. The TIA has a measured 3 dB bandwidth of 9.5GHz, with transimpedance gain of $43.5 \pm 1.5 \text{ dB}\Omega$ in the range of 50MHz~7.5GHz. The return losses of input and output ports are both less than -10dB. The noise figure (NF) varies from 4dB to 6.5dB within the bandwidth, while the calculated minimal equivalent input noise current density is about $17.6 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. The measured output eye diagram for 12Gb/s NRI pseudorandom binary sequence is clear and satisfying.

Key words: PHEMT; transimpedance; preamplifier

1 引言

光接收机将经过传输通道后发生了衰减和畸变的微弱光信号转变为电信号, 并加以放大、均衡与定时再生, 然后输出到下一级单元. 因此, 作为光通信系统的关键环节, 光接收机一般包括前端(光探测器和前置放大器)、线性通道和数据恢复三个部分, 其中前置放大器在很大程度上决定了整个光接收机的性能.

集总参数前置放大器包括低阻抗、高阻抗、跨阻抗和噪声匹配放大器四种类型^[1]. 跨阻抗放大器具有如下优点: (1) 比高阻抗放大器大的动态范围; (2) 波形失真小; (3) 放大器传输特性由反馈电阻确定, 易于调整; (4) 灵敏度较高. 由于这些独特的优势, 高速光通信系统常采用跨阻抗形式的电路拓扑作为前置放大器.

近年来, 超高速率和超大容量数据传输成为了光通信系统的主要研究方向. 一方面, 单信道传输速率的提高对

相关单元器件及电路提出了更高的要求, 目前 40Gb/s 的跨阻抗放大器研究已经获得很大进展^[2,3]; 另一方面, 超大容量可以通过多路 10Gb/s 信道并行传输获得, 而 10Gb/s 跨阻抗前置放大器技术相对成熟而且处在不断完善之中, 表现在: (1) 电路拓扑的不断优化, 从双电源偏置^[4]到单电源偏置^[5]以降低功耗和方便使用, 以及无源匹配网络的引入以增大带宽^[6]等; (2) 工艺实现手段的多样性, 包括 MESFET^[4]、PHEMT^[5]、HBT^[7] 以及 CMOS^[6] 等几种目前的主流工艺.

跨阻抗放大器电路从双电源偏置到单电源偏置是一个很好的改进, 但是对有源器件模型精度及工艺条件提出了更高的要求, 同时增加了电路设计难度. 为了充分发挥这种电路拓扑在光通信领域的优势, 我们对其进行了详细的研究. 在下面几节中, 本文首先论述基于 PHEMT 器件的单电源偏置跨阻抗放大器设计考虑, 然后给出了频域及时域测试结果, 最后得出结论.

收稿日期: 2005-06-02; 修回日期: 2006-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60277008); 教育部重点科技项目(No. 03147); 单片集成电路与模块国家级重点实验室基金(No. 51491050105DZ 0201)

2 电路设计

本文电路设计采用 $0.5\mu\text{m}$ 栅长, 单指栅宽为 $50\mu\text{m}$ 的耗型 GaAs PHEMT 作为有源器件, 特征频率 f_T 为 32GHz . 跨阻抗

放大器电路拓扑如图 1 所示, 第一级为共源 (CS) 放大单元, 负载采用金属膜电阻而不是有源负载以获得更好的高频端频率响应和噪声性能^[8]; 共源

管源端增加两个肖特基二极管 D_1 、 D_2 以抬高源级电位, 使 B_1 获得负栅压偏置条件, 肖特基二极管由场效应管源漏短接来实现; C_1 起交流旁路作用, 消除 D_1 、 D_2 导通引起的交流负反馈. 第二、三级均为源跟随器, 实现电位平移, 同时隔离输入和输出; 第二级源端和第一级栅端之间接反馈电阻 R_f 形成电压并联负反馈, 以稳定增益和扩展带宽; D_3 、 D_4 降低源端电位确保共源晶体管获得适当的工作电压; 随着工作频率升高, 单级源跟随器隔离能力逐渐减弱, 为了实现输入输出的有效隔离, 同时便于输出端阻抗匹配, 有必要采用两级源跟随器结构.

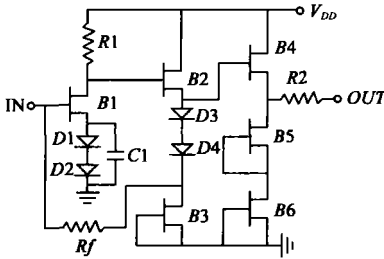


图 1 跨阻抗放大器原理图

管源端增加两个肖特基二极管 D_1 、 D_2 以抬高源级电位, 使 B_1 获得负栅压偏置条件, 肖特基二极管由场效应管源漏短接来实现; C_1 起交流旁路作用, 消除 D_1 、 D_2 导通引起的交流负反馈. 第二、三级均为源跟随器, 实现电位平移, 同时隔离输入和输出; 第二级源端和第一级栅端之间接反馈电阻 R_f 形成电压并联负反馈, 以稳定增益和扩展带宽; D_3 、 D_4 降低源端电位确保共源晶体管获得适当的工作电压; 随着工作频率升高, 单级源跟随器隔离能力逐渐减弱, 为了实现输入输出的有效隔离, 同时便于输出端阻抗匹配, 有必要采用两级源跟随器结构.

综上所述, 在电路设计时应选择适当的晶体管、电路拓扑、开环增益和反馈电阻, 以满足增益、带宽、噪声、稳定性以及脉冲响应波形的需要.

为了确保版图设计不影响电路性能, 需认真考虑电路布局及微带线连接方式, 最后还需用 ADS momentum 软件对版图进行电磁场分析验证.

3 电路性能

在南京电子器件研究所 $0.5\mu\text{m}$ GaAs PHEMT 工艺线流片得到的跨阻抗放大器芯片如图 2 所示, 面积 $1100 \times 710\mu\text{m}^2$.

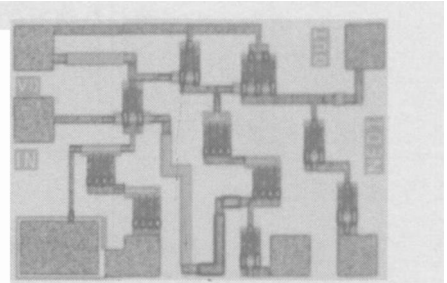


图 2 跨阻抗放大器芯片

装配测试时芯片输入、输出端通过 50Ω 微带线与隔直电容及测试盒两端 SMA 接头相连, 测试盒侧面有偏置端. 在电压为 6V , 电流为 75mA , 输入信号功率为 20dB 条件下, 用 Agilent 8720ES 网络分析仪测试的放大器 S 参数如图 3 所示.

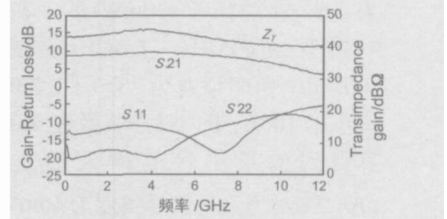


图 3 放大器 S 参数测试结果

放大器 3dB 带宽约为 9.5GHz , 在 $50\text{MHz} \sim 7.5\text{GHz}$ 之间, 放大器小信号增益为 $9\text{dB} \pm 0.5\text{dB}$, 输入输出回波损耗均小于 10dB . 由 S 参数和跨阻增益 Z_T 的关系^[10]:

$$Z_T(\Omega) = \frac{Z_0 S_{21}}{1 - S_{11}} \quad (6)$$

其中 Z_0 为系统阻抗, 此处为 50Ω , 可得放大器跨阻增益曲线如图 3 中所示, 在 $50\text{MHz} \sim 7.5\text{GHz}$ 之间, 跨阻增益为 $43.5 \pm 1.5\text{dB}\Omega$.

图 4 所示为跨阻抗放大器在前述偏置点下测量的噪声系数, 数值约在 $4\text{dB} \sim 6.5\text{dB}$ 之间, 测试设备为 Agilent N8975A 噪声系数分析仪. 将噪声系数按 50Ω 系统转化为等效输入噪声电流密度, 可近似计算得到室温 (300K) 下等效

图 1 所示的跨阻抗放大器 3dB 带宽约为^[4,9]:

$$f_{-3\text{dB}} = \frac{A}{2p((C_g + AC_f)R_f + C_g R_g)} \quad (1)$$

跨阻增益:

$$Z_{\text{trans}} = \frac{-R_f}{1 + j2p f R_f \left(\frac{C_g}{A} + \frac{C_g R_g}{A R_f} + \frac{1}{j2p f R_f A} + C_f \right)} \quad (2)$$

放大器主要的噪声源有以下三项^[4]:

共源晶体管等效输入热噪声电流:

$$\overline{in_{B1}^2} = 4KT\Gamma \frac{(2p f C_g)^2}{g_m} \Delta f \quad (3)$$

反馈电阻 R_f 引起的热噪声电流:

$$\overline{in_{Rf}^2} = \frac{4KT}{R_f} \Delta f \quad (4)$$

在低频端, $1/f$ 噪声电流可表示为:

$$\overline{in_{1/f}^2} = 4kT\Gamma \frac{(2p f C_g)^2}{g_m} \cdot \frac{f_c}{f} \Delta f \quad (5)$$

其中:

- A: 开环增益
- K: 玻耳兹曼常数
- T: 绝对温度
- C_f : 反馈电阻寄生电容
- C_g : B_1 管栅电容
- R_g : B_1 管栅电阻
- g_m : B_1 管跨导
- f_c : B_1 管 $1/f$ 噪声转角频率
- Γ : 噪声因子, 与 B_1 管参数和偏置条件有关

由式(1)和(2)可知, 提高放大器开环增益可以增加带宽和跨阻增益, 但是存在两方面的限制: (1) 由于共源晶体管密勒电容的存在, 提高开环增益的同时, 也增大了密勒电容的影

输入噪声电流密度最小值约为 $17.6 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ [11].

为了评价跨阻抗放大器的时域特性,我们进行了眼图测试,结果如图 5 所示.测试所需伪随机码来自 ADVANTEST D3186 脉冲图形成生器,示波器为 Agilent 86100A.测试时输入电压信号峰峰值为 50 mV ,输出眼图电压峰峰值约为 112 mV ,考虑到连接电缆线及接头损耗(直通时输入、输出峰峰值分别为 50 mV 和 39 mV),此结果与图 3 所示小信号增益一致.由图 5 可见,跨阻抗放大器在 12 Gb/s 速率下眼开良好,“眼皮”较薄,抖动较小,整个眼图清晰、对称.

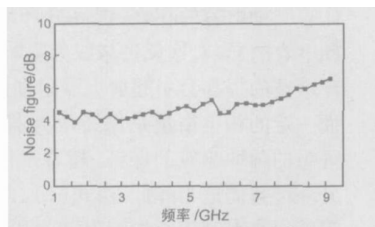


图 4 放大器噪声系数测试结果

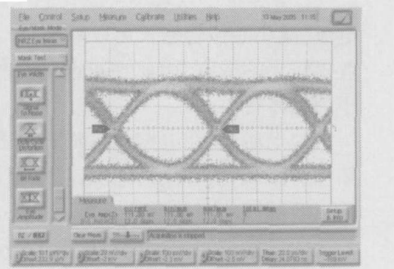


图 5 放大器 12 Gb/s 输出眼图

4 结论

本文在综合考虑放大器频域和时域性能的基础上,采用 $0.5 \mu\text{m}$ GaAs PHEMT 器件研制了单电源偏置光接收机跨阻抗前置放大器芯片,并对该芯片进行了装配测试.结果表明,在功耗为 450 mW 条件下,放大器 -3 dB 带宽约为 9.5 GHz ;在 $50 \text{ MHz} \sim 7.5 \text{ GHz}$ 范围内,小信号增益为 $9 \text{ dB} \pm 0.5 \text{ dB}$,跨阻增益为 $43.5 \pm 1.5 \text{ dB}\Omega$,输入输出回波损耗均小于 -10 dB ;带内噪声系数在 $4 \text{ dB} \sim 6.5 \text{ dB}$ 之间,由此计算得到的最小等效输入噪声电流密度约为 $17.6 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$;当输入信号幅度为 50 mV ,速率为 12 Gb/s 时,放大器输出眼图清晰,均匀对称,眼开良好.芯片面积 $1100 \times 710 \mu\text{m}^2$.

致谢 本文放大器眼图测试由东南大学射光所提供帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] Stephen B Alexander. Optical Communication Receiver Design[M]. Washington: SPIE, 1997.
- [2] Sherif Galal, Behzad Razavi. 40-Gb/s amplifier and ESD protection circuit in $0.18 \mu\text{m}$ CMOS technology[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2004, 39(12): 2389–2396.
- [3] Charles Q Wu, Emilio A. Sovero, Bruce Massey. 40GHz transimpedance amplifier with differential outputs using InP-InGaAs heterojunction bipolar transistors[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2003, 38(9): 1518–1523.
- [4] Miyo Miyashita, Kosei Maemura, Kazuya Yamamoto, et

al. An ultra broadband GaAs MESFET preamplifier IC for a 10 Gb/s optical communication system[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1992, 40(12): 2439–2444.

- [5] V Corso, E M Bastida, V Patiri, C A Finardi. Design and producibility optimization of single-bias D. C. coupled 10 Gbit/s MMIC transimpedance amplifiers using a GaAs enhancement/depletion PHEMT technology [A]. Proceedings of the Microwave and Optoelectronics Conference[C]. 1999. SBMO/IEEE MTT-S, APS and LEOS-IMOC'99. International, 1999. 261–263.
- [6] Behnam Analui, Ali Hajimiri. Bandwidth enhancement for transimpedance amplifiers[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2004, 39(8): 1263–1270.
- [7] D Y Jung, S H Park, K H Lee, et al. An InGaP/GaAs HBT transimpedance amplifier for 10 Gbps optical communication[J]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 2002. 974–977.
- [8] Y Archambault, D Pavlidis, J P Guet. GaAs monolithic integrated optical preamplifier[J]. IEEE J Lightwave Technol, 1987, 5(3): 355–366.
- [9] Kenneth Pedrotti. High speed circuits for lightwave communications[J]. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 1998, 9(2): 313–346.
- [10] K Laursen, C Yuan, D Chu. Design high-speed MMICs and OEICs for 10 Gb/s and 40 Gb/s optical transport front-ends[J]. IEEE GaAs Digest, 2002. 221–224.
- [11] Ravender Goyal. Monolithic Microwave Integrated Circuits: Technology and Design[M]. New York: Artech House, 1989.

作者简介:



焦世龙 男, 1973 年 10 月出生于四川省乐山市, 1997 年毕业于北京理工大学应用物理系, 1997~2002 年在中国科学院光电技术研究所从事自适应光学技术研究, 2002 年起于电子科技大学光电信息学院攻读硕、博士学位. 研究方向为高速单片光电集成(OEIC)光接收机前端设计. E-mail: j-shilong@163.com



冯 女, 1976 年 5 月出生于湖北省荆州市, 1999 年毕业于吉林大学电子材料与元器件专业, 2004 年毕业于南京电子器件研究所, 获工学硕士学位, 目前主要从事光纤通信集成电路设计.