

5Gb/s 单片集成 GaAs MSM/PHEMT 850nm 光接收机前端*

焦世龙^{1,2,†} 陈堂胜² 钱峰³ 冯欧³ 蒋幼泉³ 李拂晓³ 邵凯³ 叶玉堂¹

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

摘要: 采用 0.5 μm GaAs PHEMT 工艺研制出了一种单片集成 850nm 光接收机前端, 它包括金属-半导体-金属 (MSM) 光探测器和分布放大器. 探测器光敏面积为 50 μm ×50 μm , 电容为 0.17pF, 4V 偏压下的暗电流小于 17nA. 分布放大器 -3dB 带宽接近 20GHz, 跨阻增益约 46dB Ω ; 在 50MHz~16GHz 范围内, 输入、输出电压驻波比均小于 2; 噪声系数在 3.03~6.5dB 之间. 光接收机前端在输入 2.5 和 5Gb/s 非归零伪随机二进制序列调制的光信号下, 得到较为清晰的输出眼图.

关键词: 金属-半导体-金属光探测器; 分布放大器; 光接收机; 眼图
EEACC: 4270

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)04-0587-05

1 引言

光接收机前端包括光探测器和前置放大器两个部分, 前者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压信号, 然后由具有低噪声性能的前置放大器进行初步放大. 作为光接收第一环节的前端在很大程度上决定了整个光接收机的性能.

目前分立的光探测器和前置放大电路都已达到很高水平, 但将这两种不同类型的器件组合起来却受到一定限制. 对于超高速应用(几十 Gb/s 或以上), 主要是互连分布参数的影响, 两种器件引线的分布参数(电容、电感等)有可能超过器件本身的电容和电感; 对于较低速率, 主要是可靠性、体积和成本的要求, 对面阵列应用尤其如此. 单片光电集成(OEIC)把光探测器和前置放大器制作在同一衬底上, 二者通过空气桥或介质桥互连, 最大程度地减小了互连分布参数的影响, 并且互连一致性得到保障, 是解决上述问题的最佳方案.

另一方面, 单片集成对材料、结构、工艺等都提出了较高要求, 国内仅有少数几家单位开展这方面的研究. 基于南京电子器件研究所 0.5 μm GaAs PHEMT 工艺, 我们成功研制出了工作于 850 nm 的

单片 OEIC 光接收机前端, 下文将进行详细论述.

2 材料、结构和工艺

单片集成光接收机前端材料采用分子束外延(MBE)技术在半绝缘 $\phi 76\text{mm}$ GaAs 衬底上一次完成, 层结构如图 1 所示. 首先是 10 个周期的 AlGaAs/GaAs 超晶格和 100nm 厚的 GaAs 作为缓冲层以隔离衬底缺陷及表面不平整; 然后是 13nm InGaAs 作为二维电子气沟道, 3nm 的 AlGaAs 隔离层与 20nm 本征 AlGaAs 势垒层之间是平面掺杂结

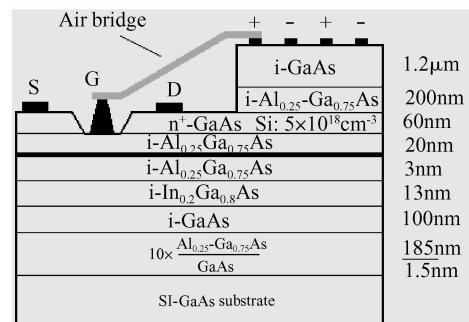


图 1 单片集成光接收机前端截面
Fig.1 Cross-section of monolithically integrated optical receiver front end

* 国家自然科学基金(批准号:60277008)和单片集成电路与模块国家级重点实验室基金(批准号:51491050105DZ0201)资助项目

† 通信作者. Email: j_shilong@163.com

2006-10-11 收到, 2006-11-28 定稿

构,60nm 的 n^+ GaAs 用以实现 PHEMT 源漏欧姆接触;最后是 200nm AlGaAs 隔离层和 1.2 μm 光吸收层.

如图 1 所示,放大器区的光探测器材料需要被除去以露出 PHEMT 表面层,小面积的光探测器区材料高出平面 1.4 μm ,由此带来台面工艺和平面工艺的兼容性问题,最显著的就是台面腐蚀均匀性和台阶高度控制的准确性,以及台面和平面共有工艺光刻条件的容差.基于现有常规 0.5 μm GaAs PHEMT 工艺,流片所得芯片如图 2 所示.

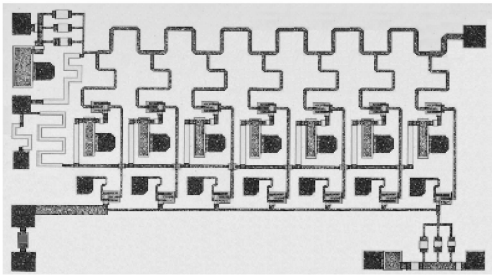


图 2 单片集成光接收机前端芯片照片

Fig. 2 Photograph of monolithically integrated optical receiver front end die

图 2 中左下角为金属-半导体-金属(MSM)光探测器,其余为分布放大器,二者通过空气桥互连.本次流片中空气桥的最小长度为 10 μm ,这对于两个芯片互连来说几乎是不可能实现的距离.

3 MSM 光探测器设计

MSM 光探测器可看作两个背靠背的肖特基二极管,其电流传输机制主要是热电子发射理论^[1],表面覆盖有介质起钝化或增透作用时,热电子发射电流包括金属-半导体、金属-介质界面以及介质内部的 Frenkel-Poole 热电子发射电流^[2].由于光探测器表面势垒层一般为禁带宽度较大的本征材料,所以隧道电流并不显著.

半导体内部电场如图 3 所示,光生电子、空穴沿着图中曲线运动,直至分别被正、负电极收集.光探测器正常工作时所加偏压应使正、负电极附近的耗尽区连通,即“穿通”(reach through)电压,光生载流子主要以漂移方式运动.由于电场随着材料深度增加而减弱,材料表面附近的载流子获得饱和速率的同时,深层载流子的速率则要低得多,尤其是空穴,这是造成脉冲响应展宽和“拖尾”现象的主要原因,它限制了光探测器带宽.这一方面可以增大偏压,使深层载流子获得较高速率,但是存在“内部增益”(internal gain)效应的限制^[3],这是一种噪声源.还可以减小光吸收层材料厚度,以消除低场光生

载流子的产生,但同时也降低了量子效率.

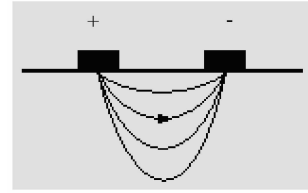


图 3 电场分布示意图

Fig. 3 Electric field distribution

MSM 光探测器脉冲响应由光生载流子渡越时间和电容 RC 时间常数决定.应用常规光学光刻工艺,电子渡越时间和 RC 时间常数可以达到同一数量级,但是空穴渡越时间则要大得多,因此 MSM 光探测器是渡越时间限制的器件.可以通过减小叉指电极间距来减小空穴渡越时间,但另一方面又导致了探测器电容的增加.而且,在探测器面积一定的情况下,间距减小意味着不透明电极数量的增多,降低了量子效率.MSM 光探测器电容可以通过保角变换计算^[4],主要由叉指电极宽度、间距、电极长度和数量决定,在电极指宽、间距之和一定的情况下,电极越窄,电容越小,但是增大了载流子渡越时间和电极电阻,不利于高频特性.

可见,MSM 光探测器设计存在噪声、带宽和量子效率的折中.基于这些因素,我们设计了光吸收层厚度为 1.2 μm ,光敏面积为 50 $\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$,叉指电极宽度和间距均为 1 μm 的光探测器.表面覆盖四分之一波长厚度的 SiN 介质作为增透和钝化层,如图 4 所示.实测得到 MSM 光探测器量子效率为 35%,暗电流和电容如图 5 所示.偏压小于 4V 时,暗电流小于 17nA;电容为 0.17pF 左右,包括探测器本征电容和探针垫电容,后者约为几十 fF.图中电容基本不随偏压变化,这是区别于 PIN 光探测器结电容的一个显著特点,而且电容值也只有相同光敏面积和厚度的 PIN 光探测器的 1/4~1/5,体现了 MSM 光探测器在此方面的优势.

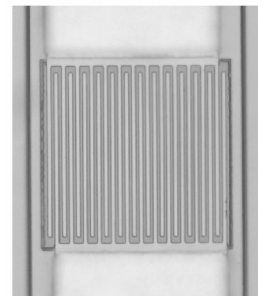


图 4 MSM PD 照片

Fig. 4 MSM PD photograph

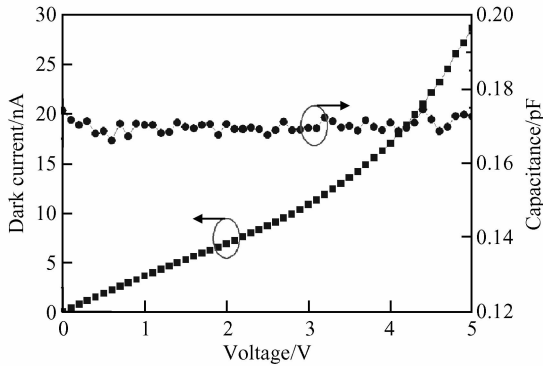


图5 MSM PD 暗电流和电容

Fig.5 Dark current and capacitance of MSM PD

4 分布放大器设计

分布放大器区别于传统宽带集总参数放大器的

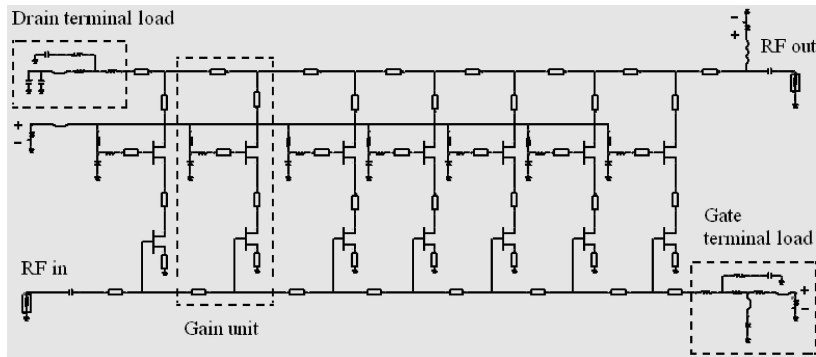


图6 分布放大器原理图

Fig.6 Schematic of distributed amplifier

传输线终端负载的作用在于吸收多余的信号, 由于栅传输线电容比漏传输线大得多, 对信号具有更高的灵敏度, 从栅线终端反射回来的信号极易引起增益和群延迟起伏, 尤其在低频端产生显著的过冲或下冲, 在时域中表现为眼图恶化. 所以, 终端负载需要精心设计, 关键位置的元件由于工艺偏差要能够进行调整, 如图2中栅、漏传输线终端分别并联有3个不等值的电阻以供选择.

分布放大器的噪声来源主要有三项: 栅线终端负载噪声、漏线终端负载噪声和晶体管噪声. 有文献报道, 仅把栅线终端负载阻抗从 50Ω 提高到 100Ω 就使放大器等效输入噪声电流密度减小了约 $1/4$ ^[8], 不过栅传输线特性阻抗也同时增大, 导致带宽的减小. 对于晶体管噪声, 最好的方案是采用 T 型栅技术以减小栅电容和电阻, 这有利于减小热噪声和电容耦合噪声. 此外, 对于一定的晶体管栅长, 存在一个优化的栅宽以获得良好的低噪声性能^[8].

本文电路设计采用 $0.5\mu\text{m}$ 栅长、 $100\mu\text{m}$ 栅宽的低噪声 PHEMT 管作为有源器件, 1.5V 漏源电压

突出特点在于, 将晶体管输入输出电容纳入人工传输线 (artificial transmission line) 结构, 克服了后者难以避免的宽带匹配问题, 使放大器可以工作在很低 (kHz) 到非常高的频率范围内, 带宽得到显著增大, 因此从 20 世纪 80 年代初开始获得了广泛应用^[5~7].

我们设计的分布放大器原理如图 6 所示, 包括 7 级 cascode 增益单元和栅、漏传输线终端负载. 相比传统分布放大器采用单个共源晶体管作为增益单元, cascode 结构可以在其输出端产生负阻以补偿漏传输线的高频损耗, 以此来进一步拓展带宽, 同时还具有高输入-输出隔离、高输出阻抗等优势. 不过存在由于过度补偿导致的放大器不稳定问题, 因此需要谨慎选择增益单元中的电阻、电容、微带线等元件, 在保持电路稳定的同时, 获得较高的增益-带宽积以及适度增益峰化.

下单管跨导、漏电流与栅源电压关系分别如图 7 中实线和虚线所示. 由在片测试小信号 S 参数转换得到的正向电流增益与频率的关系如图 8 所示, 可见 PHEMT 管截止频率 f_T 约 30GHz . 流片所得分布放大器芯片如图 2 所示. 在 3.5V (100mA) 和 -0.7V 直流偏置, 输入功率为 -30dB 下用安捷伦 8720ES 矢量网络分析仪测得的分布放大器小信号 S 参数曲线如图 9 所示. -3dB 带宽接近 20GHz , 小信号增益约为 12dB , 在 $50\text{MHz}\sim 16\text{GHz}$ 范围内, 输入输出驻波比均小于 2; 由 S 参数得到的跨阻增益为 $46\text{dB}\Omega$.

用安捷伦 8975A 噪声系数分析仪测得的结果如图 10 所示: 在 $0.25\sim 18\text{GHz}$ 范围内, 噪声系数最大、最小值分别为 6.5dB 和 3.03dB , 平均值为 4.28dB . 由于分布放大器在低频段的噪声系数主要取决于栅、漏传输线终端负载噪声功率, 高频段主要取决于晶体管的噪声功率, 且前两者随频率减小而增大, 后者随频率增加而快速增大, 所以噪声系数曲线呈两边高、中间低的马鞍状.

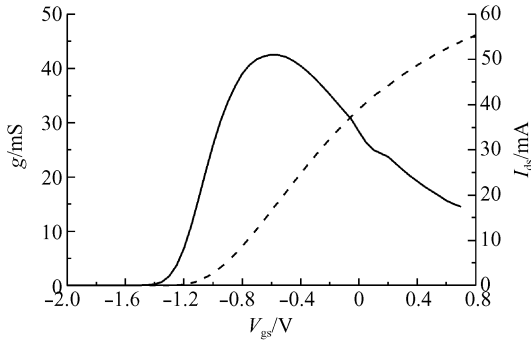


图 7 PHEMT 管跨导和漏电流

Fig. 7 Transconductance and drain current of PHEMT

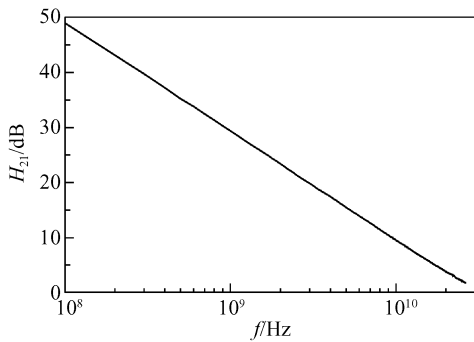


图 8 PHEMT 管正向电流增益

Fig. 8 Forward current gain of PHEMT

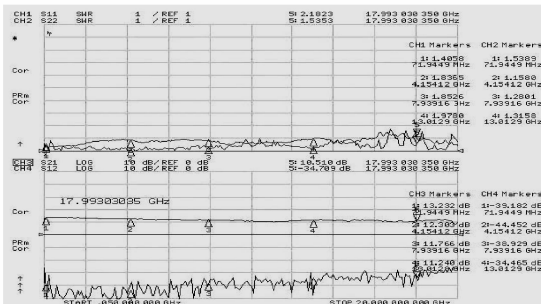


图 9 分布放大器小信号 S 参数

Fig. 9 Small signal S parameter of distributed amplifier

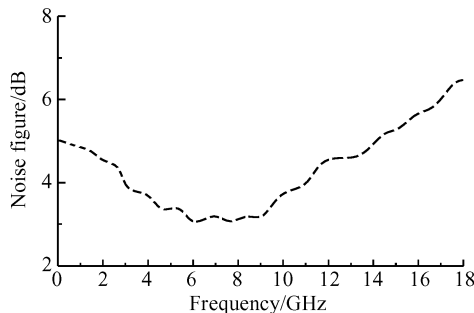


图 10 分布放大器噪声系数

Fig. 10 Noise figure of distributed amplifier

5 前端眼图测试

单片集成光接收机前端眼图测试方案及设备如图 11 所示,由 Advantest D3186 脉冲图形发生器给出两路信号:一路用于驱动激光器,另一路用于时钟

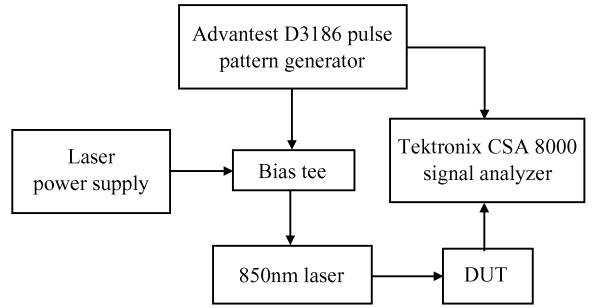
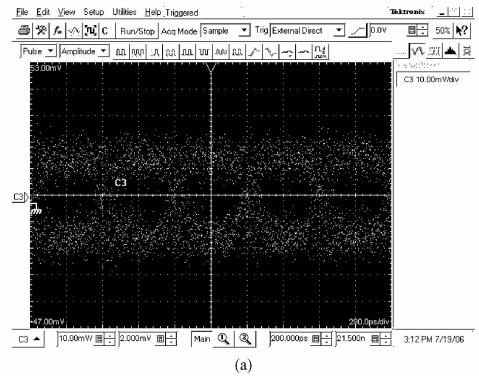


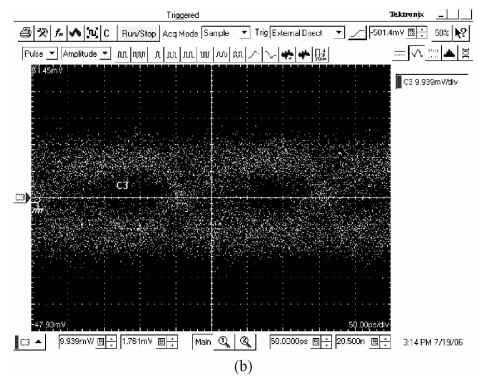
图 11 眼图测试原理框图

Fig. 11 Block graph for eye diagram measurement

同步.经过调制的 850nm 信号光经光纤耦合到光探测器光敏区,然后由分布放大器将光电流转变为放大的电压信号(跨阻增益),并输出到 Tektronix CSA 8000 信号分析仪,在同步信号控制下生成眼图.如图 12 所示,(a)和(b)分别为前端在 2.5 和



(a)



(b)

图 12 眼图测试结果 (a) 2.5Gb/s 输出眼图;(b) 5Gb/s 输出眼图

Fig. 12 Eye diagram measurement (a) 2.5Gb/s output eye diagram;(b) 5Gb/s output eye diagram

5Gb/s 非归零伪随机二进制序列信号作用下的输出眼图. 可见, 前端输出眼开明显(峰峰值为 20mV), 2. 5Gb/s 眼图对称性良好, 5Gb/s 眼图上升沿略有延长, 只是二者噪声略偏大, 可以在材料、电路、工艺方面针对噪声进行设计, 以进一步改善前端噪声性能.

6 结论

基于国内材料和工艺线成功研制了一种单片集成 850nm 光接收机前端. 光探测器和分布放大器均具有较好性能, 实测得到速率为 5Gb/s 的眼图, 尚未见到国内研制的同类器件有此速率的公开报道, 噪声性能尚需进一步完善.

致谢 本次设计在南京电子器件研究所砷化镓工程中心流片; 材料外延由中国科学院半导体研究所曾一平老师完成; 眼图测试由中国科学院半导体研究所祝宁华老师提供帮助, 在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] Sze S M, Coleman D J Jr, Loya A. Current transport in metal-semiconductor-metal (MSM) structures. *IEEE J Solid-State Circuits*, 1971, 14:1209
- [2] Xiang A, Wohlmuth W, Fay P, et al. Modeling of InGaAs MSM Photodetector for circuit-level simulation. *J Lightwave Technol*, 1996, 14(5):716
- [3] Ito M, Wada O. Low dark current GaAs metal-semiconductor-metal (MSM) photodiodes using WSi_x contacts. *IEEE J Quantum Electron*, 1986, QE-22:1073
- [4] Lim Y C, Moore R A. Properties of alternately charged coplanar parallel strips by conformal mappings. *IEEE Trans Electron Devices*, 1968, 15(3):173
- [5] Strid E W, Gleeson K R. A DC-12GHz monolithic GaAs FET distributed amplifier. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1982, 30(7):969
- [6] Beyer J B, Prasad S N, Becker R C, et al. MESFET distributed amplifier design guidelines. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1984, 32(3):268
- [7] Aguirre J, Plett C. 50-GHz SiGe HBT distributed amplifiers employing constant-k and m-derived filter sections. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2004, 52(5):1573
- [8] Freundorfer A P, Nguyen T L. Noise in distributed MESFET amplifiers. *IEEE J Solid-State Circuits*, 1996, 31(8):1100

5Gb/s Monolithically Integrated GaAs MSM/PHEMT 850nm Optical Receiver Front End*

Jiao Shilong^{1,2,†}, Chen Tangsheng², Qian Feng³, Feng Ou³, Jiang Youquan³,
Li Fuxiao³, Shao Kai³, and Ye Yutang¹

(1 School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(2 National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing 210016, China)

(3 Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: An 850nm monolithically integrated optical receiver front end is developed with a 0.5 μ m GaAs PHEMT process, which comprises a metal-semiconductor-metal (MSM) photodetector and a distributed amplifier. The photodetector has a photosensitive area and capacitance of 50 μ m \times 50 μ m and 0.17pF, respectively, as well as a dark current of less than 17nA under a bias of 4V. The distributed amplifier has a -3dB bandwidth close to 20GHz, with a transimpedance of 46dB Ω . In the range of 50MHz ~16GHz, both the input and output voltage standing wave ratio are less than 2. The measured noise figure varies from 3.03 to 6.5dB. The output eye diagrams for 2.5Gb/s and 5Gb/s NRZ pseudorandom binary sequence are also obtained.

Key words: metal-semiconductor-metal photodetector; distributed amplifier; optical receiver; eye diagram

EEACC: 4270

Article ID: 0253-4177(2007)04-0587-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60277008) and the National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules Foundation of China (No. 51491050105DZ0201)

† Corresponding author. Email: j_shilong@163.com

Received 11 October 2006, revised manuscript received 28 November 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics