

基于 InP/InGaAs HBT 技术的单片集成长波长光接收 OEIC*

李献杰^{1,†} 赵永林¹ 蔡道民¹ 曾庆明¹ 蒲运章¹ 郭亚娜¹ 王志功²
王 蓉² 齐 鸣³ 陈晓杰³ 徐安怀³

(1 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

(2 东南大学射频与光电集成电路研究所, 南京 210096)

(3 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 采用 InP/InGaAs HBT 与 PIN 光探测器单片集成方案, 对光接收光电集成电路(OEIC)的外延材料结构和生长、电路设计、制作工艺和性能测试进行了研究. 基于自对准 InP/InGaAs HBT 工艺, 实现了 1.55 μm 波长单片集成光接收 OEIC. 发射极尺寸 2 μm × 8 μm 的 InP/InGaAs HBT 直流增益为 40, 截止频率和最高振荡频率分别为 45 和 54GHz; 集成 InGaAs PIN 光探测器在 -5V 下响应度为 0.45A/W@1.55 μm , 暗电流小于 10nA, -3dB 带宽达到 10.6GHz; 研制的 HBT/PIN 单片集成光接收 OEIC 在 2.5 和 3.0Gb/s 速率非归零 2²³-1 伪随机码传输工作时可以观察到张开的眼图, 灵敏度 ≤ -15.2dBm@BER = 10⁻⁹.

关键词: InP; InGaAs; HBT; PIN; 光接收; OEIC
EEACC: 2570

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)S0-0520-05

1 引言

随着光纤通信和光互连系统向宽带大容量方向的发展, PIN 结构光探测器与 InP 基异质结双极晶体管(HBT)前置放大器单片集成光接收前端成为光电集成电路(OEIC)领域研究热点之一. 由于 InP 基 HBT 技术在频率性能、集成度、阈值电压均匀性、电流驱动能力以及功耗和噪声特性等方面的综合优势, 特别是可以用其集电结结构来制作 PIN 光探测器, 从而在外延材料结构和制作工艺方面与现有 HBT 工艺体现出较好的兼容性, 使得近年来关于这方面的研究报道层出不穷^[1~4]. 目前国外实验室 -3dB 带宽最好结果已超过 50GHz, 其灵敏度和带宽指标已超过现有混合集成光接收前端的性能^[1,2]. Opto Speed, Vehidium, Vitessi 等公司都已经推出或正在推出自己的 10 和 40Gbit/s InP 基 HBT/PIN 光接收 OEIC 系列样品.

国内在金属-半导体-金属(MSM)结构光探测器(PD)与 InP 基高电子迁移率晶体管(HEMT)集成光接收 OEIC 方面开展了一些研究工作^[5,6], 但在

HBT/PIN PD 光接收 OEIC 研究方面, 实质性的研究进展报道很少. 本文报道了我们在 InP/InGaAs HBT 技术、HBT/PIN 光接收 OEIC 设计和制作等方面的研究结果, 采用 InP/InGaAs HBT 与 PIN 光探测器集成, 在国内首次实现了 1.55 μm 波长 HBT/PIN 光接收 OEIC, 在 2.5 和 3Gb/s 传输速率下获得了清晰的眼图.

2 光接收 OEIC 电路设计

HBT/PIN 光接收 OEIC 由 PIN 探测器和 HBT 跨阻放大器构成, 光纤输入的光信号由 PIN 光探测器转化为小电流信号, 然后由跨阻放大器将其放大并转换成电压信号输出. 从单片集成考虑, PIN 光探测器用 InP/InGaAs HBT 的集电结来实现. 电路的设计过程一般首先确定电路的基本拓扑结构, 然后以实测的 InP/InGaAs HBT 和 PIN 光探测器的直流参数和 S 参数为基础, 对电路的基本单元器件进行建模和参数提取, 最后用 ADS 模拟软件对电路拓扑进行分析, 确定各器件的偏置状态和电阻阻值, 完成电路模拟后根据版图设计规则, 设计出

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2001AA312040, 2002AA312040), 重点实验室基金(批准号: 51432070104ZK3401)和国家重大基础研究发展规划(批准号: 2003CB314901)资助项目

† 通信作者. Email: xianjie@tom.com

2006-12-10 收到, 2006-12-12 定稿

掩模版图.图1为HBT/PIN光接收OEIC的电路原理图,包括窗口直径为60μm的PIN光探测器和一个3级InP/InGaAs HBT跨阻放大器,其反馈电阻 $R_f = 800\Omega$,所有HBT的发射极尺寸均为 $2\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$.

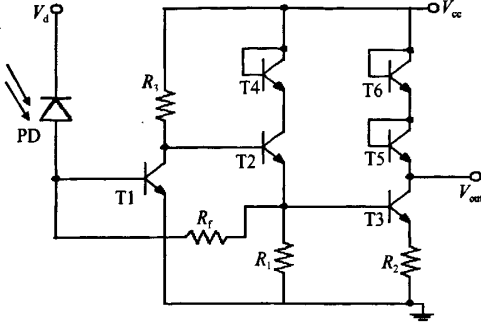


图1 PIN/HBT光接收OEIC原理图

Fig.1 Schematic of PIN/HBT photoreceiver OEIC

3 器件外延层结构与制作工艺

光接收OEIC外延层结构的设计一般基于InP/InGaAs HBT外延层结构,利用其InGaAs集电结 $p^+ - n^- - n^+$ 作为PIN光探测器,考虑兼顾HBT的高速性能和PIN光探测器的响应度性能对集电区结构进行优化,图2为InP/InGaAs HBT/PIN接收OEIC结构剖面示意图.从提高HBT高频性能角度考虑,希望其集电区轻掺杂InGaAs层薄一些,以减小载流子集电结耗尽区渡越时间,从而提高HBT截止频率 f_c ;而从提高PIN光探测器响应度角度,则希望作为吸收层的集电区InGaAs尽可能厚,掺杂浓度尽可能低,以实现1.55和1.31μm波长光信号的充分吸收,从而提高光探测器的响应度.综合两方面考虑,我们将集电区设计为本征非掺杂InGaAs,厚度为700nm;其他外延层结构与常规InGaAs/InP HBT结构相同.图3为优化后的HBT/PIN光接收外延层纵向结构示意图.用V90

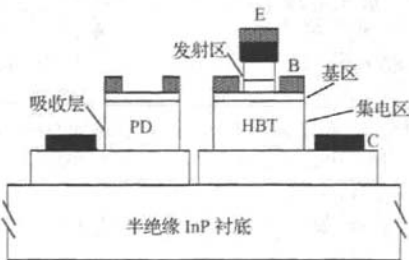


图2 PIN/HBT OEIC剖面结构示意图

Fig.2 Profile structure for PIN/HBT OEIC

气态源分子束外延(GS-MBE)系统在50mm掺 Fe^+ 半绝缘(100)InP衬底上外延生长,基区p型掺杂采用掺Be,为了抑制Be扩散,在55nm厚p型重掺杂InGaAs基区两侧插入10nm非掺杂InGaAs作为空间隔离层.

层	材料	厚度	掺杂	掺杂浓度
帽层1	InGaAs	200nm	n-Si	$2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
帽层2	InP	50nm	n-Si	$1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
发射区	InP	100nm	n-Si	$5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
隔离层	InGaAs	10nm	i	-
基区	InGaAs	55nm	p-Be	$3.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
隔离层	InGaAs	10nm	i	-
集电区	InGaAs	700nm	i	-
下集电区	InGaAs	400nm	n-Si	$1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$

掺 Fe^+ 半绝缘InP衬底

图3 PIN/HBT光接收OEIC外延层结构

Fig.3 Epitaxial structure for PIN/HBT OEIC

HBT/PIN OEIC工艺基本与常规自对准InP/InGaAs HBT工艺相同^[7].如图2所示,首先光刻发射极电极图形,电子束蒸发Ti/Pt/Au并剥离形成发射极欧姆接触电极;以发射极电极为掩膜,用 $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液选择腐蚀到InGaAs基区表面;光刻基极金属图形,电子束蒸发Pt/Ti/Pt/Au,剥离并退火形成自对准结构基极欧姆接触电极;用光刻胶掩蔽通过湿法化学腐蚀到下集电极InGaAs表面形成HBT BC结台面;光刻集电极电极图形,电子束蒸发Ti/Pt/Au剥离形成集电极欧姆接触电极;探测器台面和p型、n型欧姆接触电极与HBT BC台面、基极和集电极电极同步形成;PECVD淀积 SiO_2 ,钝化器件表面,同时作为金属布线隔离层和光探测器抗反射膜;溅射NiCr并剥离形成薄膜电阻($50\Omega/\square$);用反应离子刻蚀(RIE)打开电极互连孔;电镀 $2\mu\text{m}$ 厚Au形成金属互连.图4(a)为InP/InGaAs HBT发射极基极自对

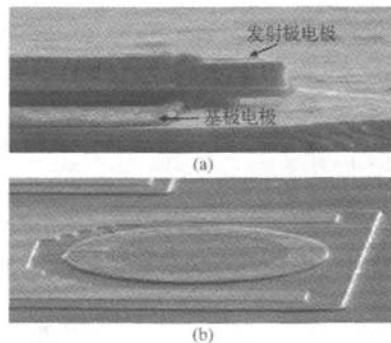


图4 (a) HBT自对准发射极结构;(b)集成光探测器SEM照片

Fig.4 (a)Self-aligned emitter structure of HBT;(b) SEM photograph of PD

准结构扫描电镜(SEM)照片;图 4(b)为集成 PIN 光探测器结构扫描电镜照片.图 5 为制作完成的 HBT/PIN 光接收 OEIC 芯片照片,图中左侧圆形部分为集成 PIN 光探测器.

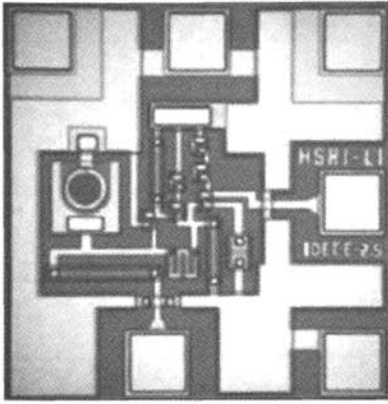


图 5 PIN/HBT 光接收 OEIC 芯片照片

Fig. 5 Photograph of PIN/HBT photoreceiver OEIC

4 器件性能与表征

4.1 InP/InGaAs HBT 性能

用 Keithely 4200 半导体参数分析仪和 HP 8510C 矢量网络分析仪对发射极尺寸为 $2\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ 的 InP/InGaAs HBT 的直流特性和高频特性进行了测试.由器件的直流 $I-V$ 特性曲线和 Gummel 曲线,可以得到直流增益约为 40,开启电压为 0.6V,集电极-发射极击穿电压 BV_{CEO} 约为 3V;集电极和基极电流理想因子 N_c 和 N_b 分别约为 1.12 和 1.43.由实测 S 参数计算出直流增益 H_{21} 和单边功率增益 GU.图 6 为在 $I_c = 10\text{mA}$, $V_{ce} = 1.5\text{V}$ 条件下,器件增益随频率变化的关系,外推得到器件的截止频率 f_c 和最高振荡频率 f_{max} 分别为 45 和 54GHz.

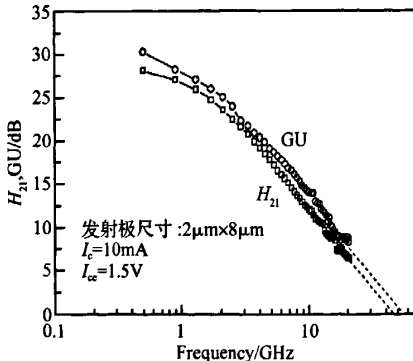


图 6 InP/InGaAs HBT 增益与频率关系曲线

Fig. 6 Gain versus frequency of InP/InGaAs HBT

4.2 集成 InGaAs PIN 光探测器性能

与常规分立器件 InGaAs 光探测器不同,集成 InGaAs PIN 光探测器由于要综合考虑探测器响应速度、响应度和 HBT 高频特性,其吸收层(HBT 集电区)InGaAs 厚度只有 700nm;同时其结构为 In-GaAs 同质结,没有 p 型宽带隙 InP 窗口层,故其响应度一般较低.为改善集成光探测器光吸收特性,我们对 HBT 工艺中介质钝化工艺进行了优化,用 760nm 厚 SiO_2 作为光探测器表面抗反膜.

用 1.55 μm 波长激光器光源、光功率计和 Keythely 6485 PA 表对集成 InGaAs 光探测器的响应度和暗电流特性进行了在片测试,光敏面直径为 $60\mu\text{m}$ 的器件响应度为 0.45A/W,在 -5V 偏置下暗电流小于 10nA.用光波测试系统对集成光探测器 -3V 偏压时的小信号频率响应特性进行了在片测试,图 7 为 PIN 光探测器的小信号频率响应曲线,可以看出其 -3dB 带宽可以达到 10.6GHz.

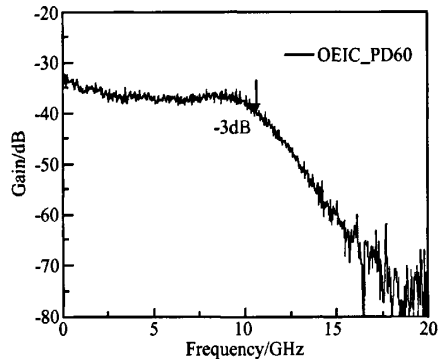


图 7 集成光探测器小信号频率响应曲线

Fig. 7 Small-signal gain-frequency characteristics of integrated photodetector

4.3 PIN/HBT 光接收 OEIC 性能

将 PIN/HBT 光接收 OEIC 芯片装在测试载体上,用锥形端面光纤通过微调架直接耦合进行传输特性测试和灵敏度测试.测试系统由 Advantest3186 码发生器、Advantest3286 误码仪、Tektronix CAS8000tx 通信信号分析仪、高速调制光源(波长 1550nm)和可调光衰减器构成.测试时首先调整高速调制光源,使之符合 OC-48/STM-4 要求;然后接入光接收 OEIC,通过示波器观察眼图并用误码仪监测误码.图 8 为调制信号非归零(NRZ) $2^{23} - 1$ 伪随机码在 2.5 和 3.0Gb/s 传输速率下的 OEIC 输出信号眼图,可以看出在 2.5Gb/s 速率时眼图清晰,张开度满足 OC-48 标准模板且有较大冗余;在 3Gb/s 传输速率时仍可观察到张开的眼图.对灵敏

度测试表明,在误码率 $BER = 10^{-9}$ 时, HBT/PIN 光接收 OEIC 的灵敏度 $\leq -15.2 \text{ dBm}$.

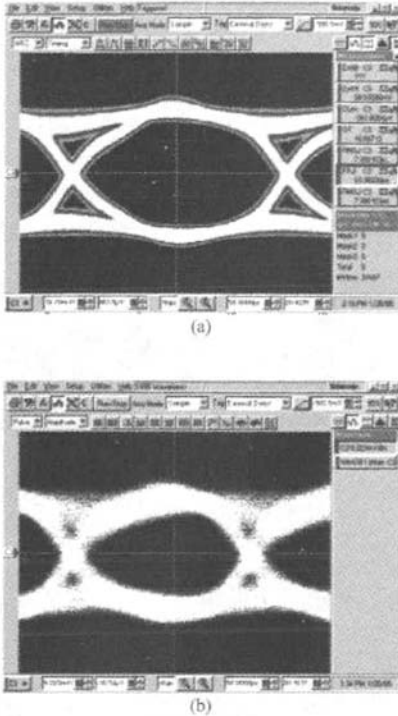


图 8 NRZ $2^{23} - 1$ 伪随机码 2.5Gb/s (a) 和 3.0Gb/s (b) 传输速率下 OEIC 的输出眼图

Fig. 8 OEIC eye diagrams for NRZ $2^{23} - 1$ pseudorandom code at 2.5Gb/s (a) and 3.0Gb/s (b)

5 结论

我们采用 InP/InGaAs HBT 与 PIN 光探测器单片集成方案,对外延层结构的设计和生长、HBT 和 PIN 光探测器优化设计、电路设计、OEIC 制作工艺和性能表征进行了研究.采用自对准结构的 InP/InGaAs HBT 的直流增益为 40,截止频率 f_c 和最高振荡频率 f_{max} 分别为 45 和 54 GHz; $1.55 \mu\text{m}$ 波长

集成 PIN 光探测器在 -5 V 下响应度为 0.45 A/W ,暗电流小于 10 nA , -3 dB 带宽达到 10.6 GHz ;研制的 HBT/PIN 单片集成光接收 OEIC 对非归零 $2^{23} - 1$ 伪随机码调制 $1.55 \mu\text{m}$ 波长光信号在 2.5 和 3.0 Gb/s 传输速率工作时可以观察到张开的眼图,灵敏度 $\leq -15.2 \text{ dBm}$ @ $BER = 10^{-9}$. 这是国内首次用 PIN-HBT 集成方式实现的单片集成长波长光接收 OEIC.

致谢 感谢中国电子科技集团公司第十三研究所李旭辉、魏爱新工程师和王国全研究员,中国科学院半导体研究所祝宁华、谢亮研究员在 OEIC 测试方面给予的热情帮助!

参考文献

- [1] Bitter M, Bauknecht R, Hunziker W, et al. Monolithically integrated 40Gb/s InP/InGaAs PIN/HBT optical receiver module. Proceedings of 11th Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 1999; 381
- [2] Huber D, Bitter M, Dülk M, et al. A 53GHz monolithically integrated InP/InGaAs PIN/HBT receiver OEIC with an electrical bandwidth of 63GHz. Proceedings of 12th International Conference on InP and Related Materials, 2000; 325
- [3] Mekonnen G G, Bach H G, Beling A, et al. 80Gb/s InP-based waveguide-integrated photoreceiver. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2005, 11; 356
- [4] Guutierrez-Aiken A L, Yang K, Zhang Z, et al. 16GHz bandwidth InAlAs-InGaAs monolithically integrated PIN/HBT photoreceiver. IEEE Photonics Technol Lett, 1995, 7; 1339
- [5] Ao J P, Liu W J, Zeng Q M, et al. Monolithically integrated long wavelength photoreceiver. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23; 67 (in Chinese) [敖金平, 刘伟吉, 曾庆明, 等. 单片集成长波长光接收机. 半导体光电, 2002, 23; 67]
- [6] Li Xianjie, Ao Jinping, Wang Rong, et al. An 850nm wavelength monolithic integrated photoreceiver with a single-power-supplied transimpedance amplifier based on GaAs PHEMT technology. IEEE 23th GaAs IC Symposium, Baltimore, MD, 2001; 65
- [7] Li Xianjie, Cai Daomin, Zhao Yonglin, et al. Design and process for self-aligned InP/InGaAs SHBT structure. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26; 136 (in Chinese) [李献杰, 蔡道民, 赵永林, 等. InP/InGaAs SHBT 器件自对准结构设计及工艺实现. 半导体学报, 2005, 26; 136]

Monolithically Integrated Long Wavelength Photoreceiver OEIC Based on InP/InGaAs HBT Technology*

Li Xianjie^{1,†}, Zhao Yonglin¹, Cai Daomin¹, Zeng Qingming¹, Pu Yunzhang¹, Guo Yana¹,
Wang Zhigong², Wang Rong², Qi Ming³, Chen Xiaojie³, and Xu Anhuai³

(1 *The 13th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China*)

(2 *Institute of RF & OE ICs, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

(3 *Shanghai Institute of Microsystem & Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

Abstract: The epitaxial structure and growth, circuit design, fabricating process and characterization are described for the photoreceiver OEIC based on InP/InGaAs HBT/PIN photodetector integration scheme. A 1.55 μm wavelength monolithically integrated photoreceiver OEIC is demonstrated with self-aligned InP/InGaAs HBT process. The InP/InGaAs HBT with a $2\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ emitter contact showed a DC gain of 40, a DC gain cutoff frequency of 45GHz and a maximum frequency of oscillation of 54GHz. The integrated InGaAs photodetector exhibited a responsivity of 0.45A/W at $\lambda = 1.55\mu\text{m}$, a dark current less than 10nA at a bias of -5V and a -3dB bandwidth of 10.6GHz. Clear and opening eye diagrams were obtained for a NRZ $2^{23} - 1$ pseudorandom code at both 2.5 and 3.0Gb/s. The sensitivity for a bit error ratio of $\text{BER} = 10^{-9}$ at 2.5Gb/s is less than -15.2dBm .

Key words: InP/InGaAs HBT; PIN; photoreceiver; OEIC

EEACC: 2570

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0520-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Nos. 2001AA312040, 2002AA312040), the National State Key Laboratory Funding (No. 51432070104ZK3401), and the National Key Basic Research Program of China (No. 2003CB314901)

† Corresponding author. Email: xianjie@tom.com

Received 10 December 2006, revised manuscript received 12 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics