

InP 基长波长光发射 OEIC 材料的 MOCVD 生长

江 李¹ 林 涛¹ 韦 欣¹ 王国宏¹ 张广泽¹ 张洪波¹ 马晓宇¹ 李献杰²

(1 中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程中心, 北京 100083)

(2 河北半导体研究所, 石家庄 050051)

摘要: 为了生长制作器件所需的外延片,采用低压金属有机物化学气相沉积方法在半绝缘 InP 衬底上生长了 InP/InGaAs 异质结双极晶体管(HBT)结构、1.55 μm 多量子阱激光二极管以及两者集成的光发射光电集成电路材料结构.激光器结构的生长温度为 655 $^{\circ}\text{C}$,有源区为 5 个周期的 InGaAsP/InGaAsP 多量子阱(阱区 = 1.6 μm ,垒区 = 1.28 μm);HBT 结构则采用 550 $^{\circ}\text{C}$ 低温生长,其中基区采用 Zn 掺杂,掺杂浓度约为 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$.对生长的各种结构分别进行了 X 射线双晶衍射,光致发光谱和二次离子质谱仪的测试,结果表明所生长的材料结构已满足制作器件的要求.

关键词: 金属有机化学气相沉积; 光电集成电路; 异质结双极晶体管; 激光二极管; 磷化铟

EEACC: 2520D; 4200

中图分类号: TN304.055

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)02-0319-05

1 引言

光电集成电路(OEIC)是一种在同一芯片上实现光、电功能集成的新型集成结构,具有低成本、高性能、高可靠性等优点,因而在光纤通信系统领域有着广阔的应用前景^[1,2].光发射 OEIC 利用先进的材料生长技术和半导体工艺技术将激光器、调制器等光器件与相关的驱动电路、放大电路等电子电路集成在同一芯片上,完成某一特定功能或子系统功能.由于 OEIC 技术省略了单个器件和集成电路封装及互连所涉及的高昂的材料和人力成本,从而最大限度地减小了组件的成本和体积,同时还避免引线互连带来的寄生效应对组件工作速度的限制及不同器件和电路之间的微波匹配给系统设计造成的困扰.在过去的 20 多年里,研究者对此做了大量的工作,提出了多种集成结构的 OEIC:垂直集成结构^[3,4]、横向集成结构^[5]和平面集成结构^[6].虽然国外报道了多种结构的光发射 OEIC,但是由于受材

料生长技术和器件工艺技术的限制,国内 OEIC 技术的发展还处于初级阶段,目前仅限于激光器和 HBT 集成结构的研究,文献[7]报道的 1.25 Gb/s 光输出功率为 2dBm 的 1.55 μm InP 基光发射 OEIC 代表着我国目前光发射 OEIC 方面的最好研究水平^[7].

2 结构设计

为了获得性能更优越的器件,在前期工作的基础上^[7],对光发射 OEIC 的材料结构做了进一步设计优化,各外延层的具体参数如表 1 所述.该结构采用 1.55 μm MQW 激光器在下、InP/InGaAs HBT 在上的垂直集成方式,中间采用 100nm 的本征 InP 层作为隔离层.整个 OEIC 结构在半绝缘的 InP 衬底上采用 LP-MOCVD 法生长.

激光器仍采用前期结构,HBT 基区的掺杂浓度由原来的 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 提高到 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$,而厚度则由原来的 100nm 减小到 70nm,这主要是为了减

江 李 男,1980 年出生,硕士研究生,主要从事 III-V 族半导体材料生长研究.

2004-01-15 收到,2004-04-16 定稿

小基区宽度,从而提高 HBT 器件的频率性能.另外 HBT 发射区的 n -InP 和上盖帽层的 n^+ -InGaAs 的厚度均由原来的 100nm 提高到 120nm,这主要是从器件制作工艺方面考虑.

表 1 OEIC 外延片材料结构

Table 1 Material structure of OEIC wafer

Layer	Material	Doping / cm^{-3}	Thickness / nm	
HBT	Cap	n^+ -InGaAs	5×10^{18}	120
	Emitter	n^+ -InP	1×10^{19}	70
		n -InP	5×10^{17}	120
		i -InGaAs	undoped	10
	Base	p^+ -InGaAs	2×10^{19}	70
	Collector	n^- -InGaAs	2×10^{16}	450
Sub-collector	n^+ -InGaAs	5×10^{18}	500	
Isolate layer	InP	undoped	100	
Laser diode	p^+ -InGaAs	5×10^{18}	500	
	p -InP	2×10^{17}	1700	
	MQW	undoped	300	
	n -InP	2×10^{17}	1700	
	n^+ -InGaAs	2×10^{19}	500	
Substrate	Si-InP			

对于该光发射 OEIC 结构生长而言,其难点主要集中在 HBT 结构的生长.由于 Zn 的扩散系数较大,且在生长 HBT 结构过程中, n 型子集电极(sub-collector)生长时产生的非平衡族填隙型点缺陷会导致随后生长的基区(base)中 Zn 的非正常扩散^[8,9].当 Zn 扩散进入发射区会降低发射区的注入效率;扩散进入集电极会增加基区渡越时间,还会造成基区掺杂浓度降低,使得 HBT 的整个电学性能恶化;因此在 HBT 的生长中应尽量抑制 Zn 的扩散.另外由于集成的 OEIC 结构由 MQW LD 和 HBT 两大部分组成,为了评估集成结构生长工艺分别对 LD 和 HBT 结构的影响,在 InP 半绝缘衬底上分别进行了 HBT 结构、1.55 μm MQW LD 结构和二者集成的光发射 OEIC 结构生长实验.

3 材料生长

实验中采用 LP-MOCVD 外延技术进行材料生长,设备为 AIX200 R & D 系统,反应载气为 H_2 ,反应室的压力为 2000Pa.系统采用 IR 灯照加热方式,生长温度是由置于基座中心的热电偶探测. In 源为三甲基铟(TMIn),Ga 源为三甲基镓(TMGa)、三乙

基镓(TEGa),族源为 100% 的磷烷(PH_3)和 100% 的砷烷(AsH_3), p 型和 n 型掺杂剂分别为二乙基锌(DEZn)和 2% 的硅烷(SiH_4).在外延层生长之前,反应室中通入 PH_3 气体进行保护,采用掺铁半绝缘(100)面 InP 衬底.

3.1 InP/InGaAs HBT 结构生长

上面提到,在生长 HBT 的过程中,要尽可能抑制杂质 Zn 的扩散.低温可以减小 Zn 的扩散,因此选用低温时热分解更好的 TEGa 来代替常用的 TMGa,选择基区和发射区的生长温度为 550.但是在低温下, SiH_4 的掺入效率变差,使得发射区中的 n 型高掺杂 InP 层和盖帽层 InGaAs 的浓度提高变得困难.而改变 V/III 比可以改变 SiH_4 的掺入^[10],对此我们专门做过实验研究,通过调节 V/III 比,可以得到所需掺杂浓度的 InP 层和 InGaAs 层^[11].此外我们发现 Zn 的重掺杂会引起 InGaAs 晶格常数的改变,研究表明随着 Zn 掺杂浓度的增大,晶格失配变得严重,为此生长过程中应该对 TMIn、TEGa 源的 H_2 流量做适当微调^[12].对于下集电极中非平衡族填隙型点缺陷所导致的基区 Zn 原子的非正常扩散,Kurishima 等人曾报道在 HBT 生长中,下集电极生长完成后,适当停止生长一段时间可以使族填隙型点缺陷由非平衡态进入平衡状态,从而避免基区中 Zn 的非正常扩散^[8,9],对此我们专门生长了两种样品进行对比实验,其中样品 1 没有生长暂停,样品 2 有 16min 的生长暂停.

3.2 MQW 激光器结构生长

我们曾报道过 655 nm 下利用 LP-MOCVD 在 n 型 InP 衬底上生长的 1.55 μm MQW LD(多量子阱激光器),该类材料制成的 PBH(平面掩埋异质结)激光器有着很好的阈值特性和温度特性,器件阈值为 5mA,最高激射温度为 122^[13].由于 n 型 InP 衬底厚度约为 350 μm ,而本实验采用的半绝缘 InP 衬底的厚度为 450 μm ,衬底厚度的不同会导致外延生长时衬底表面温度的差异,因此要精细调节各实验参数以获取最优的实验结果.激光器结构如图 1 所示.

3.3 光发射 OEIC 结构生长

对所生长的 HBT 结构和 1.55 μm 激光器结构进行材料测试后,根据测试结果优化材料生长.生长

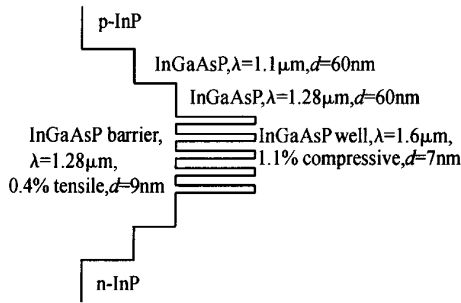


图 1 具有 5 个量子阱的多量子阱激光器结构
Fig. 1 MQW-LD with 5 wells

光发射 OEIC 结构时,由于激光器和 HBT 的生长温度不同,所选用的反应源也有所差异,因此必须控制好两者的过渡.另外为了方便器件制作,我们首先在 655 生长了 1.55 μm MQW LD 结构,再在其上生长一层 InP 隔离层,然后降温至 580 生长 HBT 结构的 collector 和 sub-collector 层,再降温至 550 生长完其余结构.

4 材料特性测试及结果分析

4.1 HBT 材料结构的测试结果及分析

在实验中,为了得到满足设计要求的 HBT 材料结构,首先对 HBT 的每一外延层进行了单独的生长,并对所得外延片进行 X 射线双晶衍射测试和电化学 C-V 测量,这里只列举出完整结构的测试结果.图 2 为 HBT 结构的 X 射线双晶衍射测试结果.从图中可以看出,HBT 结构中的 7 层外延层晶格失配都很小,衬底峰与外延层峰几乎重合,经模拟得到最大的失配为 284 ppm.经过腐蚀和 X 射线双晶衍射测试分析出它是 Zn 掺杂的 InGaAs 层,这一结果

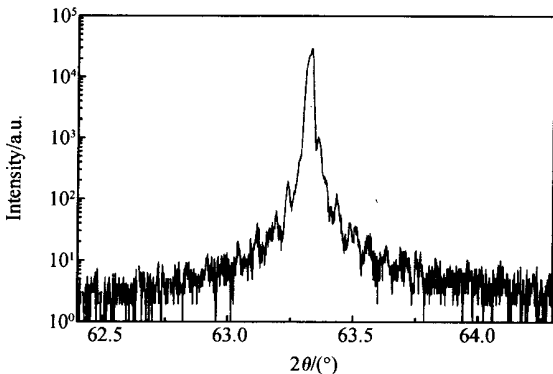


图 2 HBT 材料结构的 X 射线双晶衍射图
Fig. 2 X-ray rocking curve of HBT wafer

完全满足材料结构对晶格失配的要求.

为了测量 HBT 基区中的 p 型掺杂浓度是否达到设计要求,我们将基区以上的各层都腐蚀掉,然后进行电化学 C-V 测量.图 3 为测量结果,可以看出生长的 HBT 的基区掺杂浓度约为 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$.

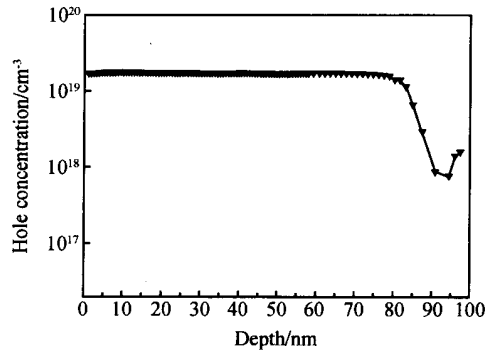


图 3 HBT 基区 C-V 测量结果
Fig. 3 C-V result of the base of HBT

为了评估基区中 Zn 的非正常扩散,我们对 3.1 中采用不同方法生长的两种 HBT 材料样品分别进行了 SIMS 测试.图 4 为没有生长暂停的 HBT 结构的 SIMS 结果,图 5 为下集电极生长完成后有 16min 生长暂停的 HBT 结构的 SIMS 结果.由两图可以看出,低温下生长的 HBT 中 Zn 扩散较小.此外,也可以看出生长过程中适当的生长暂停对基区的 Zn 扩散有一定的抑制作用,这主要是由于生长暂停使得 n^+ 子集电极产生的非平衡 族填隙型点缺陷有充分的时间达到热平衡态,从而避免了通过 kick-out 机制加重基区的 Zn 扩散^[8,9].

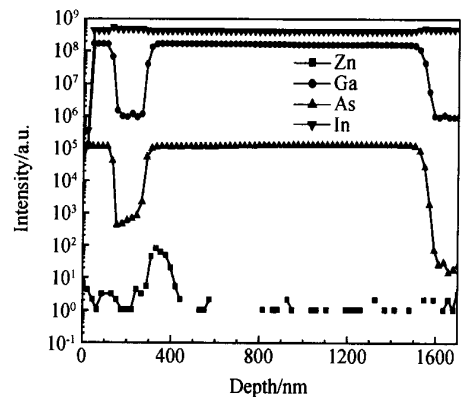


图 4 无生长暂停的 HBT 的 SIMS 结果
Fig. 4 SIMS result of HBT without growth interruption

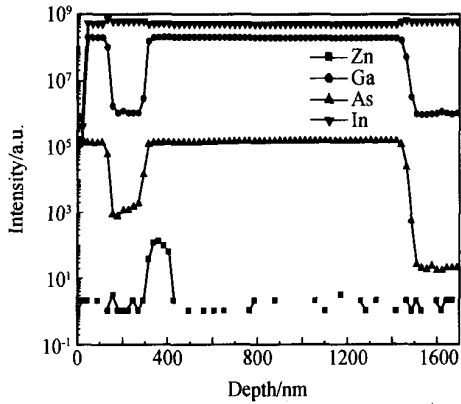


图 5 生长暂停的 HBT 的 SIMS 结果

Fig. 5 SIMS result of HBT with growth interruption

4.2 激光器材料结构的测试结果及分析

在激光器的生长实验中,我们首先单独生长每一外延层,并对其进行 X 射线双晶衍射测试和 PL 谱测试,单层外延层的参数均满足设计要求.图 6 为 1.55 μm 激光器外延片的 X 射线双晶衍射测试结果,其中零级衍射峰的晶格失配为 1819ppm,顶层 InGaAs 的失配为 -9.6×10^{-4} ,fringe 峰很明显,说明激光器外延片晶格质量满足要求,另外,激光器外延片的 PL 谱波长在 1530nm 左右.

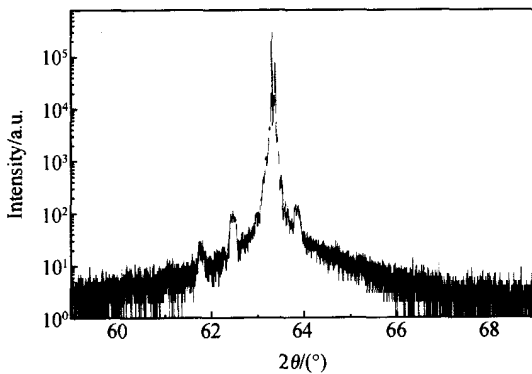


图 6 激光器外延片的 X 射线双晶衍射测试

Fig. 6 X-ray rocking curve of LD wafer

4.3 OEIC 材料结构的测试结果及分析

对于所生长的光发射 OEIC 材料,我们采用 X 射线双晶衍射仪对其晶格质量进行了测试,图 7 为测试结果.可以看出,整个结构除了激光器的零级衍射峰以外(1020 ppm),其他外延层失配均很小(其中最大为 -4.06×10^{-4}).外延片的 PL 谱波长为 1530nm 左右.

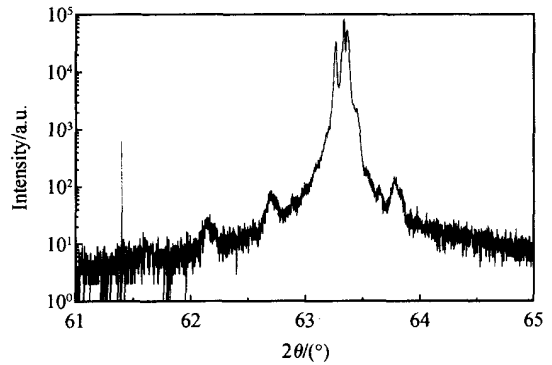


图 7 OEIC 外延片的 X 射线双晶衍射测试

Fig. 7 X-ray rocking curve of OEIC wafer

5 结论

利用 LP-MOCVD 在半绝缘 InP 衬底上分别生长了 InP/InGaAs HBT、1.55 μm 波长 MQW 激光器结构以及二者集成的光发射 OEIC 结构,对所生长的各类材料结构分别进行了 X 射线双晶衍射、电化学 C-V、PL 谱、SIMS 等特性测试.测试结果表明所生长的材料结构已满足制作器件的要求,可以进行器件的制作.

参考文献

- [1] Suzuki A, Kasahara K, Shikada M. InGaAsP/InP long wavelength optoelectronic integrated circuits (OEIC's) for high speed optical fiber communication systems. *J Lightwave Technol*, 1987, LT-5(10):1479
- [2] Horimatsu T, Sasaki M. OEIC technology and its application to subscriber loops. *J Lightwave Technol*, 1989, 7:1612
- [3] Liou K Y, Chandrasekhar S, Dentai A G, et al. A 5Gb/s Monolithically integrated lightwave transmitter with 1.5 μm MWQ laser and HBT driver circuits. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1991, 3(10):928
- [4] Lo Y H, Grabbe P, Iqbal M Z, et al. Multigigabit/s 1.5 μm /4-shifted DFB OEIC transmitter and its use in transmission experiments. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1990, 2(9):673
- [5] Shibata J, Nakao I, Sasai Y, et al. Monolithic integration of an InGaAsP/InP laser diode with heterojunction bipolar transistors. *Appl Phys Lett*, 1984, 45(3):191
- [6] Jiang Jianping. *Semiconductor laser*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000:281 (in Chinese) [江剑平. 半导体激光器. 北京:电子工业出版社, 2000:281]
- [7] Li Xianjie, Zeng Qingming, Xu Xiaochun, et al. A 1.25gbit/s InP-based vertical monolithic integration of a MQW laser diode and a HBT driver with a novel lateral buffer mesa. *Chinese Jour-*

- nal of Semiconductors, 2002, 23(5):468
- [8] Kobayashi T, Kurishima K. Suppression of abnormal Zn diffusion in InP/ InGaAs heterojunction bipolar transistor structures. Appl Phys Lett, 1993, 62(3):284
- [9] Kurishima K, Kobayashi T, Gösele U. Abnormal redistribution of Zn in InP/ InGaAs heterojunction bipolar transistor structures. Appl Phys Lett, 1992, 60(20):2496
- [10] Kamada M, Ishikawa H. Effect of / ratio on electronic and optical properties of GaInAs layers grown by MOCVD. J Cryst Growth, 1989, 94:849
- [11] Jiang Li, Lin Tao, Wei Xin, et al. Effects of / ratio on InGaAs and InP grown at low temperature by LP-MOCVD. J Cryst Growth, 2004, 260(1-2):23
- [12] Lin Tao, Jiang Li, Wei Xin, et al. Growth of heavily Zn-doped InGaAs at low temperature by LP-MOCVD. J Cryst Growth, 2004, 261(4):490
- [13] Ma Xiaoyu, Cao Qing, Wang Shutang, et al. High performance 1.55 μm InGaAsP/ InP strained layer quantum well laser diodes fabricated by MOCVD overgrowth method. Proceedings of SPIE, 1998, 3547:8

InP Based Long Wavelength Transmitter OEIC Structure Grown by MOCVD

Jiang Li¹, Lin Tao¹, Wei Xin¹, Wang Guohong¹, Zhang Guangze¹,
Zhang Hongbo¹, Ma Xiaoyu¹, and Li Xianjie²

(1 National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: HB Ts, 1.55 μm MQW-LDs, and related transmitter OEICs were grown on semiinsulated InP substrates by LP-MOCVD. LDs were grown at 655 with 5 wells in the active region, while HB Ts were grown at a lower temperature of 550. The bases of HB Ts were doped with Zn at a doping level of about $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$. Each wafer was subjected to X-ray double crystal diffraction test, electrochemical capacitance-voltage test, PL test and SIMS test. The results show that the so grown material structures meet the requirements to fabricate devices.

Key words: MOCVD; OEIC; HBT; LD; InP

EEACC: 2520D; 4200

Article ID: 0253-4177(2005)02-0319-05

Jiang Li male, was born in 1980, graduate student. He is engaged in the growth study of - semiconductor materials.

Received 15 January 2004, revised manuscript received 16 April 2004