

文章编号:1004-4213(2010)08-1409-4

# 1 550 nm 波长 PNP 型 InGaAsP-InP 异质结晶体管 激光器材料设计与外延生长\*

段子刚,柴广跃

(深圳大学 教育部广东省光电子器件与系统重点实验室,广东 深圳 518060)

**摘要:**基于器件模拟仿真,设计了一种 PNP 型 1.5  $\mu\text{m}$  波长多量子阱 InGaAsP-InP 异质结晶体管激光器材料外延结构,并采用金属有机化学气相沉积外延生长.其中基区采用 N 型 Si 掺杂.因为扩散系数小,比较 P 型 Zn 掺杂具有较高的稳定性,因而较 NPN 结构外延材料容易获得高质量的光学有源区.由于 N 型欧姆接触比 P 型容易获得,基区掺杂浓度可以相对较低,有利于减小基区光损耗和载流子复合,从而获得较低的阈值电流和较高的输出光功率.所获得的外延材料呈现较高光-荧光谱峰值和 65.1 nm 较低半峰宽.测试结果显示了较高的外延片光学质量.

**关键词:**异质结;晶体管激光器;外延结构;掺杂扩散;量子阱退化

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103908.1409

## 0 引言

异质结双极晶体管激光器(Heterojunction Bipolar Transistor Laser, HBTL)是一种新型的半导体激光器件<sup>[1]</sup>.其主要特点包括:高于 40 GHz 直接调制带宽的理论预期;电压信号直接用于驱动调制,而无需电流转换;可以同时受控于电流信号和电压信号;同时输出光信号和电信号<sup>[2-4]</sup>;三端口外接方式提供多种应用功能.这些特性,尤其是高速特性,赋予其在高速光通信网络、光计算与光互联、光子集成等重要领域很高的应用预期,具有非常重要的研究价值,国际上受到高度重视.

因为 HBTL 的有源区(通常采用多量子阱(Multiple Quantum Wells, MQW)结构)置于基区,其光学特性主要决定于基区量子阱的载流子动力学,光学限制层能带结构等因素.为满足器件电子学的基本要求,所有电极必须具有良好的欧姆接触.因此,基极电极接触层必须高掺杂.对于 NPN 型结构,接触层的 P 型掺杂浓度要求高达  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .这是 HBTL 制作工艺的困难所在.比较激光二极管(Laser Diode, LD),LD 的外延材料最后外延的是 P 型电极接触层,而 NPN 型 HBTL 在基极接触层外延后,还要后续外延生长厚度远超过基区的发射区,生长的时间长(通常需要 1 h 左右).基于通信波段的激光器采用的是 III-V 族材料,P 型掺杂采用二

价的 Zn. Zn 重掺杂导致两个问题:1)需要采用 InGaAs 三元系材料作为 P 型重掺杂接触层(例如  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  浓度 Zn 掺杂  $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  接触层),四元系材料难以实现如此高浓度的掺杂;2)在后续的外延过程中,接触层中杂质 Zn 扩散严重. P 型接触层采用 InGaAs 三元系材料将因为窄带隙带来光吸收问题.如 LD 通常采用的  $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  的带隙为 0.746 eV,而 1.55  $\mu\text{m}$  有源区的带隙为 0.8 eV. P 型重掺杂接触层中的 Zn 扩散到有源区后诱导产生量子阱混合效应,导致量子阱严重退化,进而恶化 HBTL 的光学特性. LD 器件解决光吸收问题的途径是增加限制层的厚度,使有源区远离重掺杂接触层.这样,激光器的导模与窄带隙区空间上分离.由于 P 型重掺杂接触层是外延最后生长的,只是在后续的芯片工艺(如电极合金工艺等)中有可能造成 Zn 扩散.但是,由于芯片工艺中的温度(不高于 400  $^{\circ}\text{C}$ )较外延温度(630  $^{\circ}\text{C}$ 左右)低很多,P 型杂质扩散问题就大为缓解了.而且,即使存在扩散,由于限制层具有足够的厚度,量子阱也是安全的.然而,因为 HBTL 的性能要求,基区结构中的限制层的厚度较 LD 小一个数量级,接触层只能采用较有源区更宽带隙的四元系材料,NPN 型 HBTL 的基区重掺杂就成为非常严重的技术问题.所以,国际上目前的 HBTL 研究工作,1)基于量子效率考虑,一般不采用较 980 nm 更长的激射波长;2)难以实现较大的激射功率(远小于 mW 级).

在文献[5]中,作者报道了采用梯度掺杂等外延技术来缓解 NPN 型 HBTL 的 P 型杂质扩散问题的

\* 国家国际科技合作计划(2008DFA11010)资助

Tel:0755-26538550

Email:zgduan@szu.edu.cn

收稿日期:2010-04-23

修回日期:2010-06-28

工作.但是,在后续的芯片工艺中,因为刻蚀准确度要求高带来很大的工艺困难<sup>[5]</sup>.因为能带结构的限制,在NPN型HBTL外延结构中不能导入刻蚀阻挡层,基区刻蚀要求穿过量子阱而止于限制层,刻蚀容差小于10 nm,工艺上很难实现.另外,因为掺杂浓度很难达到 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 量级,基极电极欧姆接触仍然不理想.

针对这一问题,本文报道一种PNP型1550 nm波长HBTL外延材料的设计和金属有机化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)外延生长工作.因为空穴迁移率较电子迁移率小,PNP型HBT电流增益较NPN型HBTL小.但在光电集成中,PNP型HBT是NPN型HBTL电子学上的对补性器件.

## 1 设计

### 1.1 材料外延结构设计

PNP型1550 nm波长HBTL外延结构设计基于InP基InGaAsP应变多量子阱和InP/InGaAsP异质结,主要的设计考虑同于文献<sup>[5]</sup>.完整的外延结构如表1.

表1 完整外延结构

Table 1 Epitaxy structure of a 1550 nm NPN type HBTL based on InP

No	Layer	Composition	Thickness/ nm	Doping/ ( $\times 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
20	E Contact	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	200	Zn: 20
19	Cladding	InP	1700	Zn: 0.7 nb
18	Cladding	InP	100	Undoped
17	B Contact	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	50	Si: 3
16	Waveguide	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	40	Si: 1.5
15	Waveguide	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	10	Undoped
14	Well-3	$\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}_{0.78}\text{P}_{0.22}$	6	Undoped
13	Barrier	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	9	Undoped
12	Well-2	$\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}_{0.78}\text{P}_{0.22}$	6	Undoped
11	Barrier	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	9	Undoped
10	Well-1	$\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}_{0.78}\text{P}_{0.22}$	6	Undoped
9	Waveguide	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	10	Undoped
8	Waveguide	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	20	Si: 1
7	Collector	$\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.53}\text{P}_{0.47}$	50	Undoped
6	Collector	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ : $y=0 \rightarrow 0.53$	20	Undoped
5	Collector	InP	100	Undoped
4	Cladding	InP	1800	Zn: 0.7
3	C Contact	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	400	Zn: 20
2	Buffer	InP	1000	Zn: 0.7
1	Substrate	InP	-	Semi-insu

有源区由三个量子阱和两个量子垒构成.基区N型重掺杂接触层采用 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度Si掺杂.与Zn比较,Si扩散系数小4个数量级<sup>[6]</sup>,且其稳定

性较P型掺杂高,所以PNP型HBTL相对容易获得高质量的光学有源区.而且,因为N型欧姆接触较P型容易实现,基区掺杂浓度可以控制得较低( $2 \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ),有利于减小基区光损耗和载流子复合,从而获得较低的阈值电流和较高的输出功率.

### 1.2 器件仿真和材料结构验证

材料结构验证采用Crosslight软件公司的LASTIP激光器商用软件,通过器件仿真来完成.首先,基于一个长 $250 \mu\text{m}$ ,宽 $3 \mu\text{m}$ ,高 $1.8 \mu\text{m}$ ,前后腔面反射率分别为30%与90%实际的脊波导LD器件在室温下的典型实验结果来验证仿真所采用的物理模型和相关参量设置<sup>[5]</sup>.仿真物理模型包括<sup>[5]</sup>:用费米统计下的漂移-扩散模型描述载流子二维输运过程;用热电子发射理论描述异质结上的载流子输运过程<sup>[7]</sup>;多量子阱有源区线性势场分布与理想抛物线子能带假设;有效折射率方法用于波导和光学模式计算<sup>[8]</sup>;正常工作区假设下忽略离子撞击电离和齐纳隧道效应;忽略热效应;包括受激发射和自发射的辐射复合<sup>[9]</sup>;量子阱区域和其他外延层中的电子-空穴SRH复合寿命分别设为20 ns和100 ns;表面复合速率<sup>[9]</sup>俄歇复合速率<sup>[10]</sup>;杂质吸收和缺陷散射一并归纳为背景损耗<sup>[5]</sup>.

为验证材料结构的仿真采用的HBTL器件模型是一个宽 $3 \mu\text{m}$ ,波波长 $250 \mu\text{m}$ ,前后反射镜均为自然解理面的PNP型1550 nm脊波导器件,如图1.

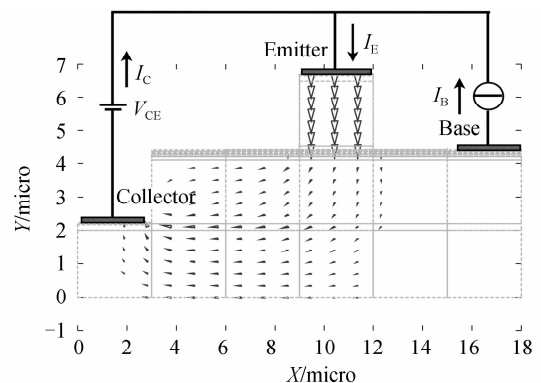


图1 器件横截面,偏置方式和电流分布示意图

Fig. 1 Cross section, the bias, and the current distribution sketch of the device

对输出光功率-基极电流和集电极电流-基极电流的仿真结果如图2. HBTL的阈值电流约为17 mA,微分斜率大约为 $0.38 \text{ mW/mA}$ ,表现出良好的激光器特性.晶体管的电流增益在阈值之前约为16,在激光器达到阈值之后由于受激辐射造成的电增益压缩效应迅速下降到小于1,原因是PNP型晶体管的输运载流子为空穴,其迁移率远小于NPN结构中的电子.

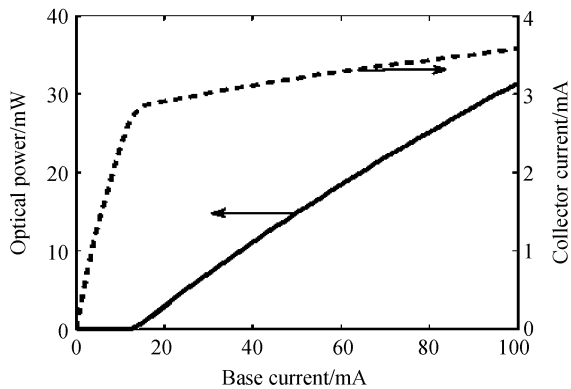


图2 模拟的输出光功率-基极电流曲线和集电极电流-基极电流曲线

Fig. 2 Curves of optical power vs. base current and the collector current vs. base current curves by the simulation

## 2 材料外延生长

材料外延生长在英国 TSSSEL (Thomas Swan Scientific Equipment Ltd) 公司的 CCS (Close Coupled Showerhead)  $3 \times 2$  英寸 MOCVD 设备上完成. 衬底片为 (100) 取向的 2 英寸 InP 片, 掺杂浓度为  $1 \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . 生长所采用的 III、V 族源分别为三甲基镓 (TMGa)、三甲基铟 (TMIn), 和砷烷 ( $\text{AsH}_3$ ) 与磷烷 ( $\text{PH}_3$ ). 硅烷 ( $\text{SiH}_4$ ) 和二甲基锌 ( $\text{Zn}(\text{CH}_3)_2$ ) 分别用作施主和受主杂质源. 生长压力为 100 Torr. 生长基座转速为 100 rpm (转/min).

外延材料特性通过光-荧光谱 (PL) 测试来评估. 测试系统由尼高力 (Nicolet) 公司的 NEXUS 670 FT-IR 型快速傅利叶变换光谱仪与 Coherent 公司的 Innova 30 型氦离子激光器 (波长 514 nm) 组成. 图 3 为测试结果.

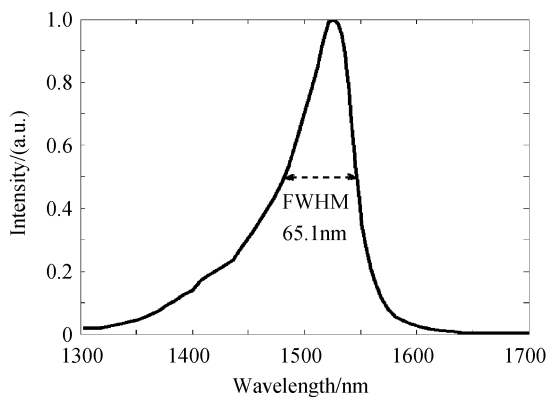


图3 测试 PL 谱

Fig. 3 PL spectrum by the detection

图 3 中所显示的测试结果明显优于文献 [5] 中的报道: 峰值增加 ( $1.0 \times 1.48 \text{ a.u.}$ ), 半峰宽

(FWHM) 压缩 ( $65.1 \times 75.2 \text{ nm}$ ), 蓝移减少 ( $1510 \times 1530 \text{ nm}$ ). 特别需要指出的是, 测试结果与本征有源材料的测试结果相当. 表明有源区几乎没有受到基区接触层高掺杂的影响.

由于载流子动力学原因, 相对于 NPN 型 HBTL, PNP 型 HBTL 的电流增益和高速特性理论上将受到一定程度的影响. PNP 型 HBTL 的物理特性还有待在该材料基础上器件化研究最终给出.

## 3 结论

基于器件仿真, 设计了 1 550 nm 波长 PNP 型 InGaAsP-InP 脊波导 HBTL 的外延材料结构. 仿真结果表明, 该材料结构能实现良好的激光器功能. 该材料结构采用 MOCVD 外延生长实现. 测试结果表明, 基区接触层 N 型 Si 重掺杂几乎没有对量子阱有源区带来影响. 相对于 NPN 型 HBTL, 重掺杂基区接触层中的 P 型杂质扩散造成的量子阱退化问题得到显著的改善.

### 参考文献

- [1] HOLONYAK N J, FENG M. The transistor lasers[J]. *IEEE Spectrum*, 2006, **43**(2): 50-55.
- [2] FARALI B, SHI Wei, PULFREY D L, *et al.* Analytical modeling of the transistor lasers[J]. *IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(3): 594-603.
- [3] FARALI B, SHI Wei, PULFREY D L, *et al.* Common-emitter and common-base small-signal operation of the transistor lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **93**(14): 143503-143505.
- [4] SHI Wei, CHROSDOWSKI L, FARALI B, *et al.* Numerical study of the optical saturation and voltage control of a transistor vertical cavity surface emitting laser [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2008, **20**(24): 2141-2143.
- [5] DUAN Zi-gang, SHI Wei, CHROSDOWSKI L, *et al.* Design and epitaxy of 1.5  $\mu\text{m}$  InGaAsP-InP MQW material for a transistor laser[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(2): 1501-1509.
- [6] SUGIYAMA H, YOKOYAMA H. Diffusion behavior of delta-doped Si in InAlAs/InP heterostructures [C]. GAAS, 2002: 23-27.
- [7] PIPEK J, ABRAHAM P, BOWERS J E, *et al.* Self-consistent analysis of high-temperature effect on strained-layer multiple quantum-well InGaAsP-InP lasers[J]. *IEEE J Quant Electron*, 2000, **36**(3): 366-374.
- [8] HADLEY G R, LEAR K L, WARREN M E, *et al.* Comprehensive numerical modeling of vertical cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1996, **32**(4): 607-616.
- [9] LI Z M. Physical models and numerical simulation of modern semiconductor lasers[C]. *SPIE*, 1997, **2994**: 698-708.
- [10] LIOU B T, YEN S H, YAO M W, *et al.* Numerical study for 1.55  $\mu\text{m}$  AlGaInAs/InP semiconductor lasers[C]. *SPIE*, 2006, **6368**: 636814.

## Design and Epitaxy of the Material for a 1 550 nm PNP InGaAsP-InP Heterojunction Bipolar Transistor Laser

DUAN Zi-gang, CHAI Guang-yue

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract:** Based on device simulation, an epitaxy structure with silicon doped base of a PNP InGaAsP-InP MQW transistor laser (HBTL) at 1 550 nm is designed and realized by MOCVD. Due to its much smaller diffusion coefficient and shorter diffusion length compared to the P dopant in the NPN HBTL, silicon as N dopant in the base perform with higher stability. Therefore, the active material with higher optical quality of PNP HBTL can be obtained easier than that of NPN HBTL. In addition, B type Ohmic contact can be realized easier than P type. The N doping density can be reduced compared to NPN HBTL benefiting to reducing both the optical loss and carrier recombination in the base. And therefore, both the lower threshold and higher stimulation power of the HBTL can be obtained. The result of PL spectrum measurement of the epitaxied material shows high peak intensity and as narrow as 65.1 nm FWHM which demonstrates good optical quality of the material.

**Key words:** Transistor laser; Epitaxy structure; Dopant diffusion; Quantum well degradation



**DUAN Zi-gang** was born in 1955. He obtained the Ph. D. from Huazhong University of Science and Technology in 1999. Now, he is engaged in the research of semiconductor optoelectronics and devices.