

# 掩埋隧道结在长波长 VCSEL 结构中的应用\*

刘 成<sup>1,2</sup> 吴惠楨<sup>1,†</sup> 劳燕锋<sup>1</sup> 黄占超<sup>1</sup> 曹 萌<sup>1</sup>

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 采用气态源分子束外延技术在 InP (100) 衬底上分别生长了  $\delta$  掺杂的  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  和  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  两种隧道结结构, 用电化学  $C-V$  和  $I-V$  特性曲线表征了载流子浓度和电学特性, 发现  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  隧道结性能优于  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  隧道结. 在 InP (100) 衬底上生长了包含  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  掩埋隧道结和多量子阱有源层的  $1.3\mu\text{m}$  垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构, 测试得出其开启电压比普通的 pin 结 VCSEL 小, 室温下电致发光谱波长为  $1.29\mu\text{m}$ .

**关键词:** 隧道结; 垂直腔面发射激光器; 光电特性  
EEACC: 2530B; 4320J

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2006)S0-0309-05

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 有许多独特的优点, 如阈值电流低、单纵模工作、发散角度小、易于与光纤耦合、实现二维列阵和光电集成等, 在光纤通信、光存储、光信息处理等领域有着广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>.

在长波长 ( $1.3$  和  $1.55\mu\text{m}$ ) VCSEL 中, 器件的阈值电流、最高连续工作温度等关键指标受器件串联电阻影响很大. 由于 p 型限制层或 DBR 反射镜的电阻较大, 导致器件串联电阻较大且发热严重; 另外, 在此波段 p 型材料的价带内带间吸收 (IVBA) 严重, 不利于器件正常工作.

为了克服以上缺点, 近年来, 在长波长 VCSEL 结构中掩埋隧道结 (buried tunnel junction, BTJ) 被广泛采用<sup>[3~6]</sup>, 原 p 型一侧的限制层或 DBR 反射镜被 n 型材料代替, 其主要优点是通过减小器件的串联电阻从而减少了器件发热, 提高了电流注入的均匀性和减小了光学吸收损耗等. 掩埋隧道结所采用的材料体系包括 InGaAsP,  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$ ,  $p^+ - \text{InGa}(\text{Al})\text{As} - n^+ - \text{InGaAs}$  等, 如德国慕尼黑工业大学研制出的应用于  $1.55\mu\text{m}$  VCSEL 结构的  $p^+ - \text{InGa}(\text{Al})\text{As} - n^+ - \text{InGaAs}$  隧道结, 其面电阻率可达  $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^{2[7]}$ . 但由于 InGaAs 的禁带宽度较小 ( $0.75\text{eV}$ ), 且光学吸收损耗较大, 因而不能应用于  $1.3\mu\text{m}$  波段.

掩埋隧道结在 III-V 族半导体光电子器件中的应用, 在国内还很少报道, 为了考察不同隧道结的性能, 我们采用气态源分子束外延 (GSMBE) 技术在 InP (100) 衬底上分别生长了  $\delta$  掺杂的  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  和  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  两种隧道结结构, 并采用电化学  $C-V$  和  $I-V$  特性曲线表征了载流子浓度和电学特性, 发现  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  隧道结性能好于  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  隧道结. 随后采用气态源分子束外延技术在 InP (100) 衬底上生长了包含  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  掩埋隧道结和多量子阱有源层的  $1.3\mu\text{m}$  VCSEL 结构, 测试得出其开启电压较小, 室温下电致发光谱波长为  $1.29\mu\text{m}$ .

## 2 实验

本文所述的隧道结和 VCSEL 结构是采用气态源分子束外延方法生长的, 设备为 Thermo V90 气态源分子束外延系统, III 族元素 In, Ga, Al 为高纯固态源, V 族源为砷烷 ( $\text{AsH}_3$ ) 和磷烷 ( $\text{PH}_3$ ) 在高温 ( $1040^\circ\text{C}$ ) 下裂解生成的  $\text{As}_2$  和  $\text{P}_2$ , n 型和 p 型掺杂源分别为高纯 Si 和 Be, 衬底选用掺 Si 的 n 型 InP (100) 单晶片 ( $n_c = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ).

$p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  隧道结结构各外延层依次为:  $500\text{nm}$  n 型 InP 缓冲层 ( $n_c = 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ), 由  $20\text{nm}$   $\delta$  掺杂 Si 的 InP 层和  $10\text{nm}$   $\delta$  掺杂 Be 的 AlInAs 层构成的隧道结;  $200\text{nm}$  p 型 AlInAs 层 (空穴浓度  $p = 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ );  $100\text{nm}$  p 型 InP 层 ( $p = 5$

\* 国家重点基础研究发展计划资助项目 (批准号: 2003CB314903)

† 通信作者. Email: hzhu@mail.sim.ac.cn

2005-11-16 收到

$\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ); 50nm p 型 InGaAs 接触层 ( $p = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ).  $p^+$ -InP- $n^+$ -InP 隧道结结构与上述结构不同之处在于隧道结由 20nm  $\delta$  掺杂 Si 的 InP 层和 10nm  $\delta$  掺杂 Be 的 InP 层构成, 隧道结与接触层之间为 200nm p 型 InP 层 ( $p = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 其余各层相同.

外延生长后, 我们采用电化学 C-V 方法测试了两种隧道结结构的载流子浓度纵向分布. 首先采用  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 : \text{H}_2\text{O}_2$  溶液和  $\text{HCl} : \text{H}_3\text{PO}_4$  溶液将光刻后的外延片刻蚀出台面直径分别为  $20\mu\text{m}$  和  $50\mu\text{m}$  的台阶, 以外延层刻蚀完毕为准. 接着涂覆聚酰亚胺, 并通过光刻和显影使台面暴露出来, 使得器件表面基本水平. 在聚酰亚胺固化后用磁控溅射技术沉积 TiAu 形成了 p 面环型电极 (直径  $20\mu\text{m}$  台阶环型电极内径为  $10\mu\text{m}$ , 直径  $50\mu\text{m}$  台阶内径为  $30\mu\text{m}$ ). 然后在减薄至  $150\mu\text{m}$  的衬底背面热蒸发 AuGeNi 作为 n 面电极, 并在  $320^\circ\text{C}$  下进行了快速退火合金化. 制作完成的隧道结剖面结构如图 1 所示.

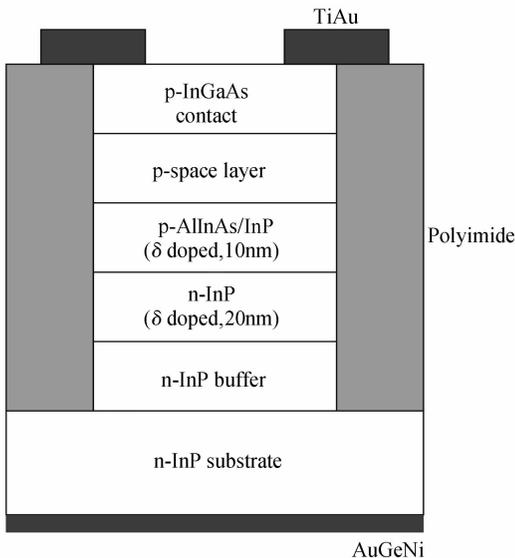


图 1 隧道结结构剖面图

Fig. 1 Schematic cross-section of tunnel junction structure

本文所采用的  $1.3\mu\text{m}$  VCSEL 结构各外延层依次为: 10 周期且每层光学厚度为  $1/4$  波长的 n 型 InP/InGaAsP DBR 结构; 光学长度为  $2\lambda$  的光学谐振腔, 光腔中包括 2 组 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱 (各 3 个) 和 1 个  $p^+$ -AllnAs- $n^+$ -InP 掩埋隧道结; 10 周期且每层光学厚度为  $1/4$  波长的 n 型 InP/InGaAsP DBR 结构. 此外延结构如图 2 所示. 外延生长后, 直接在外延片两侧热蒸发了 AuGeNi 作为电极, 并在  $320^\circ\text{C}$  下进行了快速退火合金化. 然后将其解理成大小约为  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  的单元.

|                                     |
|-------------------------------------|
| n-DBR $\times 10$                   |
| n-space layer<br>( $\lambda/4$ )    |
| n-InP<br>( $\delta$ doped, 20nm)    |
| p-AllnAs<br>( $\delta$ doped, 10nm) |
| p-space layer<br>( $3\lambda/4$ )   |
| InAsP/InGaAsP QW $\times 3$         |
| n-space layer<br>( $\lambda/2$ )    |
| InAsP/InGaAsP QW $\times 3$         |
| n-space layer<br>( $\lambda/2$ )    |
| n-DBR $\times 10$                   |
| n-InP substrate                     |

图 2 包含隧道结的 VCSEL 外延结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of the VCSEL employing tunnel junction

在以上工艺完成后, 采用半导体参数测试仪和傅里叶光谱仪对上述各结构的电学特性和光谱特性进行了测试.

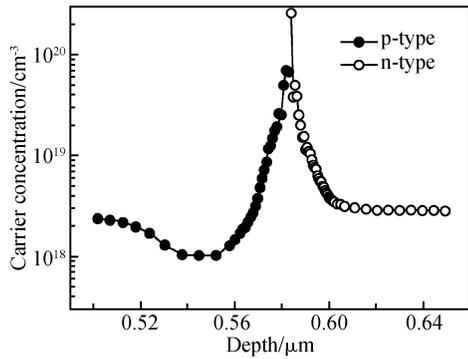
## 3 结果与讨论

### 3.1 隧道结结构的电化学 C-V 测量

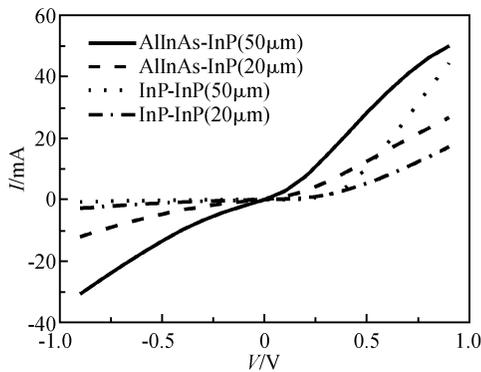
$\delta$  掺杂是使隧道结材料获得较高掺杂浓度的一种常用方法<sup>[7-9]</sup>. 在本实验中, p 型材料掺杂原子为 Be, n 型材料掺杂原子为 Si, 其掺杂原子面密度均大于  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , 两层掺杂原子层之间不掺杂的 InP 或 AllnAs 层的厚度为 2.5nm. 图 3 为  $p^+$ -AllnAs- $n^+$ -InP 隧道结的电化学 C-V 测试结果, 从图中可知隧道结附近的载流子浓度大于  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 但由于在隧道结界面处载流子浓度发生陡变, 且 AllnAs-InP 材料能带不连续, 造成测量时平带电压偏高, 不能准确地得出隧道结的载流子浓度分布.  $p^+$ -InP- $n^+$ -InP 隧道结亦有类似的电化学 C-V 测试结果. 为了更准确地表征隧道结材料的掺杂浓度, 我们在相同条件下外延生长了仅包含 p 型或 n 型  $\delta$  掺杂的材料, 经过测试得出 p 型 AllnAs 或 InP 材料的体掺杂浓度为  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , n 型 InP 材料的体掺杂浓度为  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 能够满足我们的要求.

### 3.2 隧道结结构的电学特性

图 4 所示为室温下测得的台面直径分别为 20

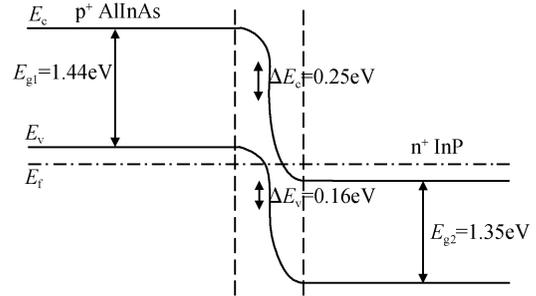
图3 p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-InP 隧道结的电化学 C-V 特性Fig. 3 Electrochemical C-V characteristics of p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-InP tunnel junction

和 50 μm 的两种隧道结结构的 *I-V* 曲线. 从图中可知, p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-InP 隧道结的电学性能要好于 p<sup>+</sup>-InP-n<sup>+</sup>-InP 隧道结. 前者的正向开启电压小于 0.1 V (仍存在正向开启电压的主要原因是 InGaAs/InP/AllnAs 异质结材料的能带不连续性), 后者的正向开启电压为 0.2~0.3 V; 在反向偏压下, 后者几乎截止, 而前者有较大的反向电流, 且 *I-V* 特性曲线的斜率与正向时基本相等. 两者均未观察到正向负阻特性.

图4 室温下隧道结结构的 *I-V* 特性Fig. 4 *I-V* characteristics of tunnel junction structures at room temperature

众所周知, 隧道结最常见的特性是正向负阻特性, 但采用 δ 掺杂技术制作的隧道结在室温下难以观察到正向负阻特性<sup>[7,8]</sup>, 其主要原因是室温下过剩电流较大, 另外采用 δ 掺杂时掺杂原子被限制在二维势阱中, 造成能带突变. 如果在低温下测量或将隧道结进行高温退火使掺杂原子扩散均匀将能够观察到正向负阻特性<sup>[8]</sup>. 但在长波长 VCSEL 中, 我们主要利用的是隧道结的反向特性. 如图 5 所示, 在重掺杂的隧道结中, 势垒区很薄, 由于量子力学的隧道效应, n 区导带的电子可能穿过禁带到 p 区价带, p 区价带电子也可能穿过禁带到 n 区导带, 从而产生

隧道电流. 加反向偏压时, p 区能带相对 n 区能带升高. 在结两边能量相同的量子态范围内, p 区价带中费米能级以下的量子态被电子占据, 而 n 区导带中费米能级以上有空的量子态. 因此, p 区中的价带电子穿过隧道的几率大大增加, 故反向电流也迅速增加. 可见, 在隧道结中, 即使反向电压很小时, 反向电流也是比较大的.

图5 p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-InP 隧道结能带图Fig. 5 Energy band diagram of p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-InP tunnel junction

下面对两种隧道结的隧穿特性进行讨论. 文献 [10,11] 给出了只考虑直接隧穿情况下三角势垒的隧穿几率公式:

$$T_t = \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}E_g^{3/2}}{3e\hbar\xi}\right) \quad (1)$$

其中

$$\xi = \frac{V}{W} = \frac{V}{\sqrt{\frac{2(n+p)V\epsilon}{enp}}} \quad (2)$$

式中  $m^*$  为电子有效质量;  $E_g$  为禁带宽度;  $\xi$  为电场强度;  $V$  为外加偏压;  $W$  为耗尽层厚度;  $n, p$  为构成隧道结的两种材料的掺杂浓度;  $\epsilon$  为介电常数.

从公式(1),(2)能够看出, 小的电子有效质量、禁带宽度和高掺杂浓度将会增大隧穿几率, 从而获得较好的隧道结性能. 由于公式(1),(2)不能直接应用于异质隧道结, 我们首先比较 p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-AllnAs 隧道结和 p<sup>+</sup>-InP-n<sup>+</sup>-InP 隧道结. 通过计算可知, 在 p 型材料掺杂浓度为  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , n 型材料掺杂浓度为  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的情况下, 当外加偏压为 0.1 V 时, p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-AllnAs 隧道结的隧穿几率是 p<sup>+</sup>-InP-n<sup>+</sup>-InP 隧道结的  $1.15 \times 10^4$  倍. 其原因是虽然 AllnAs 的禁带宽度 (1.44 eV) 略大于 InP (1.35 eV), 但 AllnAs 的电子有效质量 ( $0.05m_0$ ,  $m_0$  为电子静态质量) 小于 InP ( $0.08m_0$ ). 对于 p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-InP 隧道结, 如图 5 所示, 当工作在反向偏压时, 主要是 p 区中的价带电子隧穿到 n 区导带中, 其电子有效质量应为 AllnAs 的电子有效质量, 等效的三角势垒高度应介于 AllnAs 和 InP 的禁带宽度之间, 因此 p<sup>+</sup>-AllnAs-n<sup>+</sup>-

InP 隧道结的性能要好于  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{AlInAs}$  隧道结以及  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  隧道结. 以上结果与实验中所得出的  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  隧道结的电学性能好于  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  隧道结的情况相符合.

我们根据图 4 计算得出  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  隧道结反向工作时的微分串联电阻分别为  $22\Omega$  (直径  $50\mu\text{m}$  台阶) 和  $46\Omega$  (直径  $20\mu\text{m}$  台阶). 采用文献 [12] 中所述方法可估算出隧道结的面电阻率分别为  $4.27 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  和  $1.42 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 此值中包括 p 面接触电阻率和注入电流扩散所引起的电阻率. 由于 p-InGaAs 和 TiAu 的接触电阻率很小, 两者之间的差别主要原因在于我们采用的是环型电极, 直径  $50\mu\text{m}$  台阶的注入电流扩散比直径  $20\mu\text{m}$  台阶要严重得多. 若除去 p 面接触电阻率和注入电流扩散所引起的电阻率, 我们估计隧道结的实际面电阻率应小于等于  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

### 3.3 包含隧道结的 $1.3\mu\text{m}$ VCSEL 结构电学和光谱特性

图 6 所示为  $1.3\mu\text{m}$  VCSEL 结构的  $I-V$  特性, 其开启电压为  $1.0\text{V}$ , 比我们以前所制作的不含掩埋隧道结的  $1.3\mu\text{m}$  VCSEL 结构的开启电压 ( $4.2\text{V}$ ) 要小得多<sup>[13]</sup>. 当给 VCSEL 结构加正向偏压时, 掩埋隧道结处于反向偏压工作状态, 费米能级发生移动, p 区中的价带电子大量隧穿到 n 区导带中, 当反向偏压很小时就能产生较大的隧道电流. 另由于掩埋隧道结的引入, VCSEL 结构两侧均采用 n 型 InP/InGaAsP DBR 反射镜, 避免了采用 p 型 InP/InGaAsP DBR 反射镜时由于较大的价带不连续性所引起的较高的异质结势垒<sup>[14]</sup>. 因此采用掩埋隧道结有效地降低了 VCSEL 结构的开启电压.

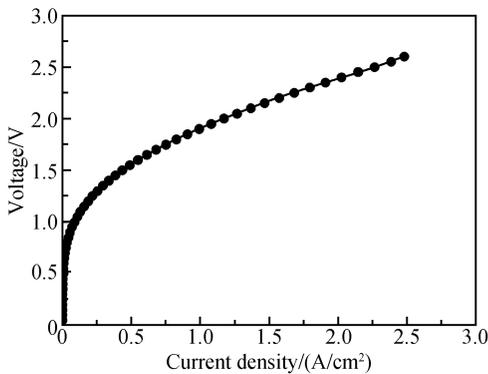


图 6 室温下 VCSEL 结构的  $I-V$  特性

Fig.6  $I-V$  characteristics of the VCSEL structure at room temperature

图 7 所示为当注入电流密度为  $5.8\text{A}/\text{cm}^2$  时, 室温下 VCSEL 结构的边发射电致发光 (EL) 谱. 其峰值波长为  $1.29\mu\text{m}$ , 半峰宽为  $30\text{meV}$ , 说明量子阱

有源层的光增益与设计值相符合. 处于反向偏压工作状态下的掩埋隧道结能够给量子阱提供足够的载流子, 使得量子阱能够发出较强的荧光.

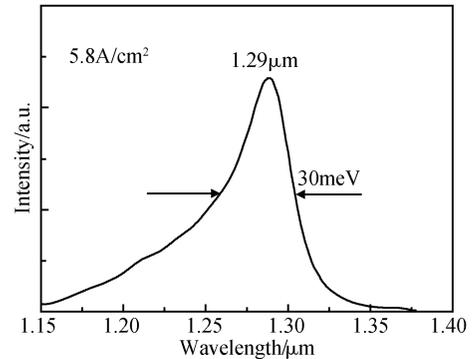


图 7 室温下 VCSEL 结构的边发射电致发光谱

Fig.7 Edge-emitting electroluminescence spectrum of the VCSEL structure at room temperature

## 4 结论

采用气态源分子束外延 (GSMBE) 技术在 InP (100) 衬底上分别生长了  $\delta$  掺杂的  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  和  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  两种隧道结结构, 并采用电化学  $C-V$  和  $I-V$  特性曲线表征了载流子浓度和电学特性, 发现  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  隧道结性能好于  $p^+ - \text{InP} - n^+ - \text{InP}$  隧道结, 其面电阻率应小于等于  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 随后采用气态源分子束外延技术在 (100)InP 衬底上生长了包含  $p^+ - \text{AlInAs} - n^+ - \text{InP}$  掩埋隧道结和多量子阱有源层的  $1.3\mu\text{m}$  垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构, 测试得出其开启电压较小, 室温下其电致发光光谱波长在  $1.29\mu\text{m}$ .

## 参考文献

- [1] Liu Ying, Du Guotong, Jiang Xiuying, et al. Room temperature cw novel vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers. Chinese Journal of Semiconductors, 1995, 16(12): 951 (in Chinese) [刘颖, 杜国同, 姜秀英, 等. 室温连续的新结构垂直腔面发射半导体激光器. 半导体学报, 1995, 16(12): 951]
- [2] Karim A, Björln S, Piprek J, et al. Long-wavelength vertical-cavity lasers and amplifiers. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2000, 6(6): 1244
- [3] Boucart J, Starck C, Gaborit F, et al. Metamorphic DBR and tunnel-junction injection: a CW RT monolithic long-wavelength VCSEL. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1999, 5(3): 520
- [4] Nakagawa S, Hall E, Almuneau G, et al.  $88^\circ\text{C}$ , continuous-wave operation of apertured, intracavity contacted,  $1.55\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting lasers. Appl Phys Lett, 2001, 78(10): 1337
- [5] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W, et al. High-power 1320-nm wafer-bonded VCSELs with tunnel junctions. IEEE Photonics Technol Lett, 2003, 15(11): 1495

- [6] Boehm G, Ortsiefer M, Shau R, et al. InP-based VCSEL technology covering the wavelength range from 1.3 to 2.0  $\mu\text{m}$ . *J Cryst Growth*, 2003, 251(1~4): 748
- [7] Ortsiefer M, Shau R, Boehm G, et al. Low-resistance InGa(Al)As tunnel junctions for long wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers. *Jpn J Appl Phys*, 2000, 39(4A): 1727
- [8] Ragay F W, Leys M R, Wolter J H. Application of  $\delta$ -doping in GaAs tunnel junctions. *Electron Lett*, 1994, 30(1): 86
- [9] Desalvo G C. Ultrathin delta doped GaAs and AlAs tunnel junctions as interdevice ohmic contacts. *J Appl Phys*, 1993, 74(6): 4207
- [10] Sze S M. *Physics of semiconductor devices*. New York: John Wiley & Sons, 1969
- [11] Zhu Cheng, Zhang Yonggang, Li Aizhen. Application of tunnel junction in tandem solar cells. *Chin J Rare Metals*, 2004, 28(3): 526 (in Chinese) [朱诚, 张永刚, 李爱珍. 隧道结在多结太阳能电池中的应用. *稀有金属*, 2004, 28(3): 526]
- [12] Arzberger M, Lohner M, Boehm G, et al. Low-resistivity p-side contacts for InP-based devices using buried InGaAs tunnel junction. *Electron Lett*, 2000, 36(1): 87
- [13] Liu Cheng, Wu Huizhen, Lao Yanfeng, et al. 1.3- $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting laser structure grown by GSMBE. *Journal of Functional Materials Devices*, 2005, 11(2): 173 (in Chinese) [刘成, 吴惠贞, 劳燕锋, 等. 气态源分子束外延 1.3- $\mu\text{m}$  VCSEL 器件结构. *功能材料与器件学报*, 2005, 11(2): 173]
- [14] Tong Cunzhu, Han Qin, Peng Hongling, et al. Analysis of series resistance of oxide-aperture confined vertical-cavity surface-emitting lasers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(7): 1459 (in Chinese) [佟存柱, 韩勤, 彭红玲, 等. 氧化限制型垂直腔面发射激光器串联电阻分析. *半导体学报*, 2005, 26(7): 1459]

## Application of Buried Tunnel Junction in Long-Wavelength VCSEL Structure\*

Liu Cheng<sup>1,2</sup>, Wu Huizhen<sup>1,†</sup>, Lao Yanfeng<sup>1</sup>, Huang Zhanchao<sup>1</sup>, and Cao Meng<sup>1</sup>

(1 *State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:**  $\delta$ -doped  $\text{p}^+ \text{-AlInAs-n}^+ \text{-InP}$  and  $\text{p}^+ \text{-InP-n}^+ \text{-InP}$  tunnel junction structures are grown by gas-source molecular-beam epitaxy (GSMBE) on InP(100) substrates. Distribution of carriers and electrical properties are characterized by electrochemical  $C$ - $V$  method and current-voltage characteristics. It is found that  $\text{p}^+ \text{-AlInAs-n}^+ \text{-InP}$  tunnel junction is superior to  $\text{p}^+ \text{-InP-n}^+ \text{-InP}$  tunnel junction. Then 1.3  $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) structure which employs  $\text{p}^+ \text{-AlInAs-n}^+ \text{-InP}$  buried tunnel junction and multiple quantum wells is grown on InP(100) substrates. The VCSEL structure demonstrates low threshold voltage. The gain peak position measured from electro-luminescence is at 1.29  $\mu\text{m}$  at room temperature.

**Key words:** tunnel junction; VCSEL; optoelectronic properties

**EEACC:** 2530B; 4320J

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0309-05

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB314903)

† Corresponding author. Email: hzww@mail.sim.ac.cn

Received 16 November 2005