

## CSP可见光半导体激光器及四层漏波导分析

崔捷 张兴德

(长春光学精密机械学院)

采用低温780℃液相外延制成了稳定单横模、单纵模工作的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  CSP可见光半导体激光器, 波长7500Å。并用微扰法计算和分析了四层漏波导结构。

CSP visible semiconductor laser and four layer leaky waveguide analysis

Cui Jie, Zhang Xingde

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics)

Abstract

Single transverse mode and single longitudinal-mode stabilized  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  CSP visible semiconductor laser is fabricated by means of liquid phase epitaxial method at the temperature of 780°C. The wavelength is 7500 Å. The four-layer leaky waveguide mechanism is analyzed by perturbation method also.

## 一、引言

可见光半导体激光器大多采用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料制成DH结构。为追求好的模式特性和光电特性, 在平行结平面方向采用许多新的限制结构, 如TS[1]、CSP[2]、VSIS[3]等。本文采用CSP结构制做可见光半导体激光器, 在刻有梯形沟道的n型GaAs衬底上生长四层DH结构。下限制层厚度合适时, 槽外光场泄漏到衬底里而被吸收, 槽内光场未泄漏, 从而槽内外产生有效折射率差, 因此横向形成自建折射率波导。这种激光器具有稳定的光场特性和良好的模式[5~6], 波导分析表明, 这种激光器具有较好的模式选择特性。

## 二、器件制做

CSP结构如图1所示。在n型GaAs衬底上刻蚀1~1.5μm深, 宽5~10μm的梯形沟道, 然后利用液相外延方法生长四层DH结构。

四层结构列表如下:

表 1

层		组 分	掺 杂	层 厚
1	n型下限制层	$Al_{0.6}Ga_{0.4}As$	Te, $1 \times 10^{18}$	$t < 0.4 \mu m$
2	有源层	$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	不掺杂	$d < 0.1 \mu m$
3	p型上限制层	$Al_{0.6}Ga_{0.4}As$	Zn, $1 \times 10^{19}$	$1.2 \sim 1.5 \mu m$
4	p型 $\Omega$ 接触层	GaAs	Zn, $7.5 \times 10^{19}$	$0.5 \mu m$

选择Te做n型掺杂剂, Zn做p型掺杂剂。这两种杂质分凝系数大,尤其在X值很高时也能获得高掺杂浓度。对CSP结构四层漏波导的分析表明,下限制层厚度槽外部分在 $0.4 \mu m$ 以下,有源层厚度在 $0.1 \mu m$ 以下,才能实现良好的增益机制。对液相外延而言,这种非平面薄层生长难度较大,因此采用低温 $780^\circ C$ 平衡冷却式液相外延,并采用小的降温速率 $0.5^\circ C/min$ 和短的生长时间。实验发现使 $Al_{1-x}Ga_{1-x}As$ 溶液稍微欠饱和并大幅度缩短生长时间可得到较满意的第一层,沟槽基本保持原状。同时发现非平面外延重复性与沟道的深度、宽度重复性关系极大,因此首先要保证衬底片子刻蚀沟道的重复性。

外延好的片子在一边用 $NH_4OH : H_2O_2 = 1 : 10$ 腐蚀GaAs外延层 $1 \sim 2 min$ ,用HF缓冲液腐蚀 $Al_{1-x}Ga_{1-x}As$ 外延层 $4 \sim 5 h$ 蚀出一条衬底上的沟道以便二次光刻对准。开出 $SiO_2$ 窗口后,闭管扩Zn $1 \sim 2 \mu m$ 深。然后真空蒸镀做 $\Omega$ 接触,解理成腔长 $250 \sim 300 \mu m$ 的管芯装管测试。



图 1 CSP结构示意图。1. n型下限制层; 2. 有源层; 3. p型上限制层; 4. p型 $\Omega$ 接触层; 5. 扩Zn; 6. p面 $\Omega$ 接触层Au-Zn; 7.  $SiO_2$ 膜; 8. n-GaAs衬底; 9. n面 $\Omega$ 接触层Au-Ge-Ni

### 三、测 试

#### 1. 发射特性

如图2所示是CSP可见光半导体激光器发射光谱。中心波长 $7530 \text{ \AA}$ ,工作电流为 $1.3 I_{th}$ 时仍为单纵模,工作电流达到 $2 I_{th}$ 时,多纵模出现。

图3是这种激光器远场光场分布,与结平面平行和垂直两方向上的光束发散角分别是 $\theta_{||} = 20^\circ$ ,  $\theta_{\perp} = 30^\circ$ 。实测发现CSP结构激光器横模较稳定,直到 $4 I_{th}$ 时仍以单横模工作。

#### 2. 光电特性

图4是CSP结构可见光半导体激光器的P-I特性曲线,无扭折现象,光场较稳定。

#### 3. 伏安特性

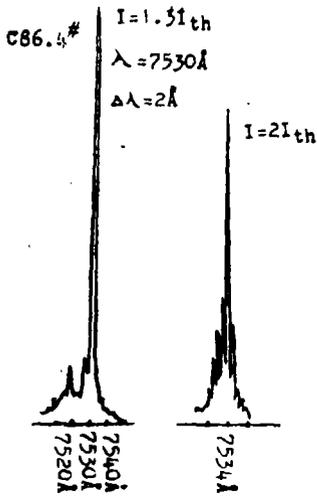


图2 CSP可见光激光器发射光谱

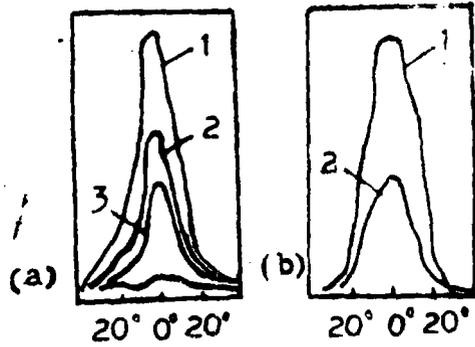


图3 远场光强分布。(a) C86.4.1,  $\theta_{\parallel} \approx 20^\circ$ , 1是 $4I_{th}$ , 2是 $3I_{th}$ , 3是 $2I_{th}$ ; (b) C86.4.1,  $\theta_{\perp} \approx 30^\circ$ , 1是 $4I_{th}$ , 2是 $2I_{th}$

CSP结构可见光半导体激光器正向导通电压一般为2V, 反向击穿电压一般为15V。在工作电流超过阈值时测得的串联电阻为 $1 \sim 2\Omega$ , 与文献报导的基本相符[3,4]。

#### 四、CSP结构四层漏波导分析

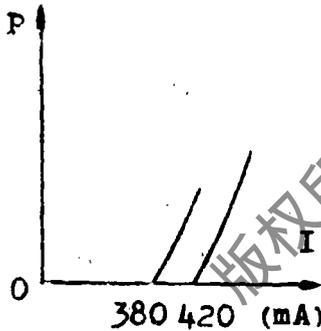


图4 CSP结构激光器光电特性

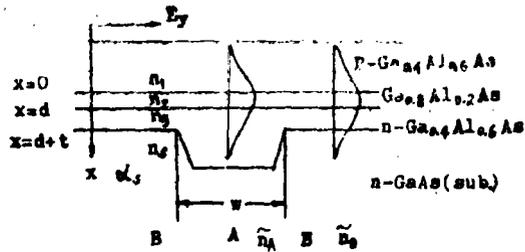


图5 CSP结构分析原理图

图5是CSP结构原理图, A区(沟道内)第一层足够厚,这一区域可视为三层平板波导; B区(沟道外)为四层漏波导。B区和A区的等效折射率差及等效损耗差为:

$$\Delta N = R_1 (\Delta\beta/k_0)$$

$$\Delta\alpha = -2\text{Im}(\Delta\beta)$$

$$\Delta\tilde{N} = n_B - n_A$$

其中,  $\Delta\beta$ 是四层漏波导的复传播常数与三层平板波导传播常数差。在 $\Delta\beta \ll \beta_0$ 的弱耦合情形利用微扰法得出[7],

$$\Delta\beta = 2k_3/\beta_0 \left[ \frac{B_{2,3} D_0 V^{-1}}{k_2^2} + \left(1 - \frac{k_3^2}{k_2^2}\right) \left(D_0 - \frac{2}{k_3}\right) + 4T_0 \right]$$

式中,  $k_1^2 = k_3^2 = \beta_x^2 - n_1^2 k_0^2$ ,  $k_2^2 = n_2^2 k_0^2 - \beta_x^2$ ,  $k_4^2 = \beta_x^2 - \bar{n}_1^2 k_0^2$ ,  $\beta_x^2 = (n_2^2 - n_3^2) \cdot k_0^2$  为常数;  $V = \frac{k_1 - k_4}{k_1 + k_4} \exp(-2k_1 t)$ ;  $D_s = d + \frac{2}{k_1}$ ;  $T_s = t + \frac{1}{k_4}$ ;

对波长  $7500 \text{ \AA}$ ,  $n_1 = n_3 = 3.4$ ,  $n_2 = 3.62$ ,  $\bar{n}_1 = 3.68 - 0.059681d$  代入公式求出  $\Delta\beta$ , 进而求出  $\Delta N$ ,  $\Delta\alpha$ 。

图 6 是等效折射率差与有源区层厚  $d$  的关系曲线, 从该曲线看出:

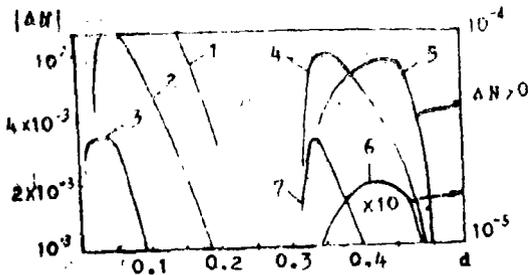


图 6  $\Delta N$  与  $d$  关系曲线。1.  $m=0$ ,  $t=0.1$ ;  
2.  $m=0$ ,  $t=0.2$ ; 3.  $m=0$ ,  $t=0.4$ ;  
4.  $m=1$ ,  $t=0.2$ ; 5.  $m=0$ ,  $t=0.2$ ;  
6.  $m=0$ ,  $t=0.4$ ; 7.  $m=1$ ,  $t=0.4$ 。

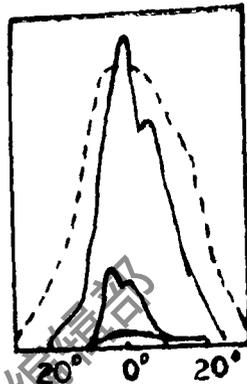


图 7 CSP 结构基模双峰。  
 $C86.4.7^2$

1. 在  $d = d_1 = 0.30 \mu\text{m}$  (三层平板波导一阶模截止宽度) 附近,  $\Delta N$  急剧变化, 并且符号开始改变。

2. 在  $d < d_1$  时,  $\Delta N < 0$ , 即 B 区等效折射率较 A 区的小, 侧向形成折射率波导, 并且  $|\Delta N|$  有一最大值。

3.  $d > d_1$  时, 对零阶模而言,  $\Delta N > 0$ , 侧向形成反折射率波导; 对一阶模,  $\Delta N < 0$ , 侧向为折射率波导, 这时将形成一阶模振荡, 因而此时远场图样将是双峰的, 即相当于  $E_{01}$  基模。文献[8]提到了这种现象。图 7 是实测得到的远场基模双峰图样。在平行结平面方向 (实线) 出现双峰, 而在垂直结平面方向 (虚线) 仍是单峰的。

4.  $|\Delta N|$  随  $t$  减小而增大, 即第一层越薄, 侧向波导对光限制越强。

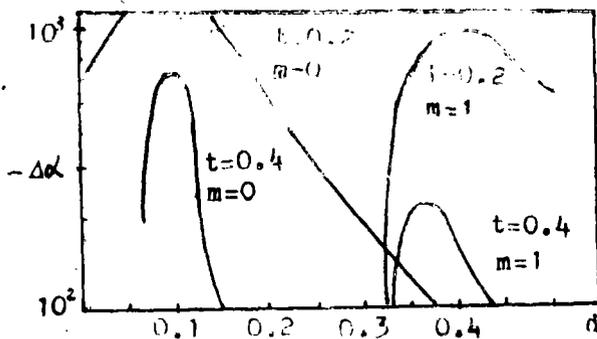


图 8 等效增益和有源区厚  $d$  的关系

图 8 是负等效损耗  $-\Delta\alpha \sim d$  关系曲线。与  $|\Delta N| \sim d$  曲线不同的是  $d > d_1$  时, 零阶模、一阶模同时存在, 但一阶模增益  $\Delta g = -\Delta\alpha$  较零阶模的强。

图 9 是  $2\Delta N k_0 / \Delta\alpha \sim d$  关系曲线。CSP 结构激光器存在两种导引机制, 即侧向折射率导引和增益导引。假设这两种导引的强度分别正比于  $|\Delta N|$  和  $\Delta g = -\Delta\alpha$ 。

由图9看出比值 $2\Delta n k_0 / \Delta \alpha$ 随 $d$ 、 $t$ 增大而减小，即一般情况下折射率导引占主导地位，当 $d$ 、 $t$ 过大时，增益导引占主导地位。

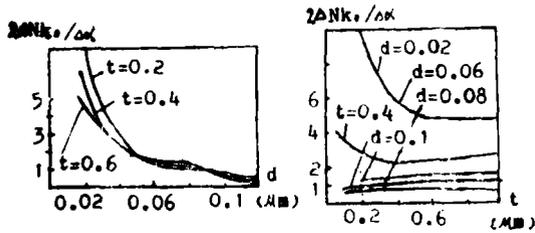


图9  $2\Delta n k_0 / \Delta \alpha$ 和 $d$ 、 $t$ 的关系

$10^{-3}$ 时，激光器输出稳定，P-I曲线不会出现扭折，据此，可以从图8确定合理的波导参数。

W. Streifer<sup>[9]</sup>和T. Kuroda<sup>[6]</sup>都曾利用微扰法分析过这种结构，但他们采用的微扰法公式不及本文采用的公式精确<sup>[7]</sup>，同时他们均未涉及一阶模。

本文只是粗略地讨论了衬底吸收对光场强度的影响，关于光场进入衬底时位相的变化、能量的侧向流动、等相面的弯曲以及阈值特性等将另文讨论。

## 五、结 束 语

采用低温780℃液相外延制做了氧化物隔离条形CSP激光器，波长7500Å，得到了以稳定单横模和单纵模工作的激光器件，P-I曲线无扭折。采用简便而又较精确的微扰法分析了四层漏波导结构，这种激光器在一般情况下以折射率导引为主，具有较好的模式选择性。

感谢长春光学精密机械学院陈铁民教授、任大翠付教授的指导帮助。

## 参 考 文 献

- [1] JaPan, J. A. P., 1980, Vol. 19, No. 8, P. 1505~1507.
- [2] APPL. Opt., 1979, Vol. 18, No. 11, P. 1812~1815.
- [3] 邓希敏等，《全国光通信器件学术讨论会论文集》，1985年，第429页。
- [4] A. P. L., 1985, Vol. 47, No. 7, P. 655~657.
- [5] IEEE J. Q. E., 1978, Vol. QE-14, No. 2, P. 89~94.
- [6] APPL. Opt., 1978, Vol. 17, No. 20, P. 3264~3267.
- [7] 张放明，《半导体学报》，1985年，第6卷，第5期，第536~543页。
- [8] A. P. L., 1977, Vol. 30, No. 12, P. 649~651.
- [9] IEEE J. Q. E., 1976, Vol. QE-12, No. 3, P. 177~182.

作者简介：崔捷，男，1962年12月生。理学硕士。从事半导体激光器研制和理论物理教学。

收稿日期：1987年11月6日。