

深扩 Zn 平面条形激光器的横模稳定性

吴 克 林

(中国科学院上海光机所)

提要: 实验发现扩 Zn 较深的平面条形激光器的横模比较稳定, 提出了一个解释深扩 Zn 平面条形激光器能获得稳定横模工作的简单等效线路模型。分析表明, 不掺杂作用层 $P-n-N$ 型深扩 Zn 平面条形激光器, 增益波导变窄是其横模稳定的主要原因。

Stability of the horizontal transverse mode of planar stripe lasers with deep Zn diffusion

Wu Keling

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: It has been found experimentally that the planar stripe lasers with deeper Zn diffusion have more stable horizontal transverse mode. A simple equivalent circuit model is proposed that can explain why the planar stripe lasers with deep Zn diffusion have stabilized horizontal transverse modes. It is shown analytically that the narrowing of gain-induced guide of planar stripe lasers with undoped active layer and deep Zn diffusion is responsible for the stabilization of the horizontal transverse modes.

我们知道, 普通 DH 条形激光器常常由于水平横模的畸变引起 $L-I$ 曲线的扭折^[1]。但是这可以通过减窄增益波导和在条作用区建立正内建折射率台阶(折射波导)得到改善。减窄增益波导一般用减窄条宽实现^[2,3], 在条作用区建立正内建折射率台阶可以通过结构设计^[4~6]和控制作用层杂质浓度的分布实现^[7,8]。

那么, 象图 1(b) 所示那样的不掺杂作用层深扩 Zn 平面条形激光器为什么能稳定横模, 改善 $L-I$ 曲线的线性呢? H. Yonezu 等^[9,10]认为是由于深扩 Zn 在条作用区建立

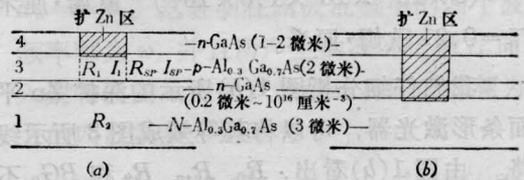


图 1 (a) 普通平面条形激光器; (b) 深扩 Zn 平面条形激光器

了正内建折射率台阶, 比起仅有增益波导的普通平面条形激光器来, 它增加了折射率波导, 所以它的横模比较稳定, $L-I$ 曲线的线性比较好。我们提出的等效线路模型则表

收稿日期: 1980年11月10日。

明, 图 1(b) 那样的不掺杂作用层深扩 Zn 平面条形激光增益波导的变窄是其横模稳定的主要原因, 而不是由于扩 Zn 建立了正内建折射率台阶。

一、等效线路模型

根据图 1(a) 所示的普通平面条形激光器, 考虑到它电流在第 3 层的横向扩展, 我们可以将其等效成图 2 所示的线路 (假设对称)。图中 R_0 为扩 Zn 区的体电阻和条区接触电阻之和; R_1 为扩 Zn 条下第 3 层的电阻; R_{sp} 为第 3 层的扩展电阻; R_2 为作用层以下的总电阻; I_t 为总的驱动电流; I_1 为流过 R_1 的电流, 对受激有贡献; I_{sp} 为扩展电流, 对受激无贡献, 显然 $I_t = I_1 + 2I_{sp}$ 。所以 I_1 越大越好; BG_2 代表作用区的 $p-n$ 结; BG_0 代表作用区外左右两边的 $p-n$ 结。 R_1 和 R_{sp} 由第 3 层的电阻率和厚度决定。在一般 DH 激光器中第 3 层 $P-Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 的空穴浓度是 $p \sim 3 \times 10^{17}$ 厘米⁻³。根据我们的测量并参考有关文献的数据^[11], 取这样浓度的 $P-Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 的空穴迁移率

$$\mu_p = 100 \text{ 厘米}^2/\text{伏} \cdot \text{秒}。$$

这样得到第 3 层的电阻率

$$\begin{aligned} \rho_3 &= \frac{1}{p\mu_p e} \\ &= (3 \times 10^{17} \times 10^2 \times 1.6 \times 10^{19})^{-1} \text{ 欧姆} \cdot \text{厘米} \\ &= 0.21 \text{ 欧姆} \cdot \text{厘米}。 \end{aligned}$$

我们仔细分析图 1(b) 所示的深扩 Zn 平面条形激光器, 可以将其等效成图 3 所示线路。由图 1(b) 看出, R_0 、 R_{sp} 、 R_2 和 BG_0 不受深扩 Zn 的影响, 因此原封不动地保留在图 3 中。然而, R_1 和 BG_2 受到了深扩 Zn 的影响, 从而改变了注入电流的分布状况。由于扩 Zn 部分的第 3 层的空穴浓度大大增加, 这时取其浓度 $p \sim 3 \times 10^{19}$ 厘米⁻³ 和迁移率 $\mu_p' = 50$ 厘米²/伏·秒是合理的。这样第 3 层扩 Zn 部分的电阻率

$$\begin{aligned} \rho_3' &= \frac{1}{p'\mu_p' e} \\ &= (3 \times 10^{19} \times 50 \times 1.6 \times 10^{19})^{-1} \text{ 欧姆} \cdot \text{厘米} \\ &= 0.0042 \text{ 欧姆} \cdot \text{厘米} = \frac{\rho_3}{50}。 \end{aligned}$$

所以图 3 中的 R_1' 小多了, 只有 R_1 的 $\frac{1}{50}$ 。

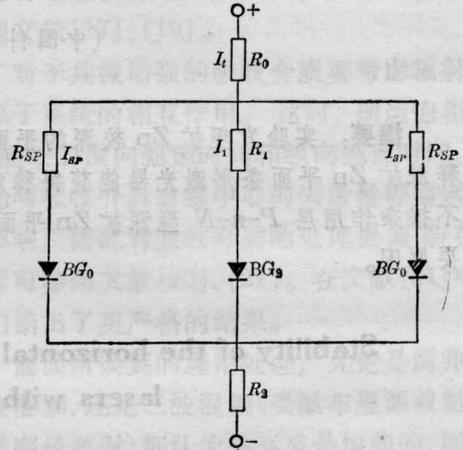


图 2 普通平面条形激光器的等效电路

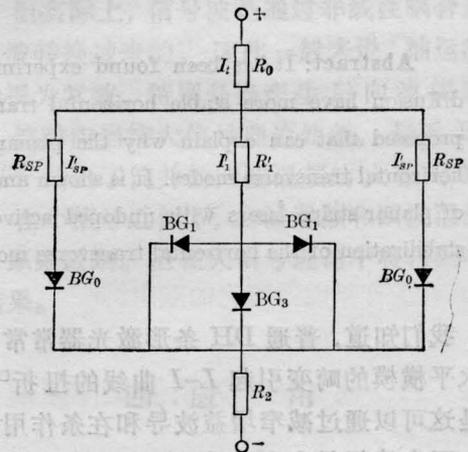


图 3 深扩 Zn 平面条形激光器的等效电路

现在再看看深扩 Zn 对 BG_2 的影响情况。我们对扩 Zn 前沿达第 1 层的情况进行分析, 因为扩 Zn 前沿在作用层的情况更有利。由图 1 看出: BG_2 是 $P-Al_{0.3}Ga_{0.7}As/n-GaAs$ 异质结, BG_1 是 $GaAs$ 同质结, BG_3 是 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 同质结。我们假定 $GaAs$ 同质, $P-Al_{0.3}Ga_{0.7}As/n-GaAs$ 异质结和

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 同质结的内建势分别为 V_1 、 V_2 和 V_3 ，显然 $V_1 < V_2 < V_3$ 。而 V_1 、 V_2 和 V_3 可由各自的 I - V 特性曲线得到。根据我们的测量，并参考有关文献^[12]的数据，分别取 $V_1=1.1$ 伏， $V_2=1.3$ 伏， $V_3=1.5$ 伏。这样三个 p - n 结在相同的正向偏置 V_a 下，电流分别为

$$J_1 = e \left[\frac{D_{n1} N_{n1}}{L_{n1}} + \frac{D_{p1} P_{p1}}{L_{p1}} \right] \times \exp\left(\frac{-eV_1}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] = J_{01} \exp\left(\frac{-eV_1}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$J_2 = e \left[\frac{D_{n2} N_{n2}}{L_{n2}} + \frac{D_{p2} P_{p2}}{L_{p2}} \right] \times \exp\left(\frac{-eV_2}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] = J_{02} \exp\left(\frac{-eV_2}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$J_3 = e \left[\frac{D_{n3} N_{n3}}{L_{n3}} + \frac{D_{p3} P_{p3}}{L_{p3}} \right] \times \exp\left(\frac{-eV_3}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] = J_{03} \exp\left(\frac{-eV_3}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

式中 $N_{n1} = N_{n2}$ ，是作用层的掺杂浓度 ($\sim 10^{16}$ 厘米⁻³)， P_{p1} 是扩 Zn 条作用区的空穴浓度 ($\sim 10^{19}$ 厘米⁻³)， P_{p2} 是第 3 层的掺杂浓度 (3×10^{17} 厘米⁻³)， N_{n3} 为第 1 层的掺杂浓度 ($\sim 3 \times 10^{17}$ 厘米⁻³)， P_{p3} 是由于深扩 Zn 第 1 层 N - $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 转变成 P - $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 部分的空穴浓度 ($\sim 10^{19}$ 厘米⁻³)。 D_{n1} 和 L_{n1} 是 GaAs 同质结中电子注入到 p 边时的扩散系数和扩散长度， D_{p1} 和 L_{p1} 是空穴注入到 n 边时的扩散系数和扩散长度； D_{n2} 和 L_{n2} 是 P - $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/n$ -GaAs 异质结中电子注入到 p 边时的扩散系数和扩散长度， D_{p2} 和 L_{p2} 是空穴注入到 n 边时的扩

散系数和扩散长度； D_{n3} 和 L_{n3} 是 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 同质结中电子注入到 p 边时的扩散系数和扩散长度， D_{p3} 和 L_{p3} 是空穴注入到 n 边时的扩散系数和扩散长度。 $e=1.6 \times 10^{-19}$ 库仑，是电子电荷， $k=1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/度，是玻尔兹曼常数， T 为绝对温度。令作用层厚度为 d (0.2 微米)，条宽为 s (~ 10 微米)，这样由 (1) 式和 (2) 式得到

$$\frac{2dJ_1}{SJ_2} = \frac{2dJ_{01}}{SJ_{02}} \exp\left(\frac{e(V_2 - V_1)}{kT}\right) \quad (4)$$

由前面所给的数据，(4) 式中的 $2dJ_{01}$ 和 SJ_{02} 相差不大。但是由 $V_2 - V_1 = 0.2$ 伏，和 $T = 300$ K 时的 $kT = 0.026$ 电子伏可知，

$$\exp\left[\frac{e(V_2 - V_1)}{kT}\right] \gg 1.$$

所以 $2dJ_1 \gg SJ_2$ 。当偏置较高时， J_3 也有些贡献。

上面的这些分析表明，深扩 Zn 后 R_1 变成了 R'_1 ， BG_2 变成了两个 BG_1 和 BG_3 后更有利于电流的流通，使驱动电流 I_t 更加集中扩 Zn 条区流过作用层，大大减小了电流的横向扩展，即 $I'_1 > I_1$ ， $I'_{sp} < I_{sp}$ 。从而使注入载流子的横向分布变窄。因为增益是与注入载流子浓度成线性关系的，即

$$g(x) = a n(x) - b,$$

其中 a 、 b 是常数，所以增益波导也变窄了。这样最终导致了横模的稳定，线性的改善。

图 4 所示是我们得到的扩 Zn 较深的平面条形激光器功率-电流曲线。说明这些器件的水平横模比较稳定，波导较强。目前这种器件在环境温度 25°C 时的寿命已超过 3×10^3 小时。图 5 是我们扩 Zn 较深的平面条形激光器的示意图，照片 1 和 2 分别为这种器件的红外透射情况及其相应的脉冲受激时的近场图样。我们看到的这个现象与 H. Yonezu 等^[9,10]报导的深扩 Zn 平面条形激光器比同样条宽 (~ 10 微米) 的普通平面条形激光器的横模稳定， L - I 曲线线性好的结果是一致的。

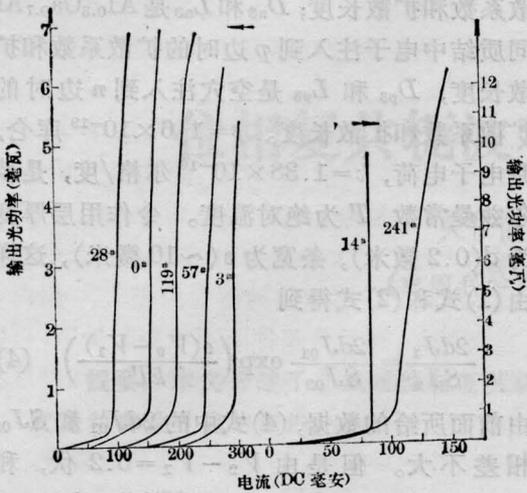


图4 扩Zn较深的平面条形激光器的光输出-电流(DC)曲线

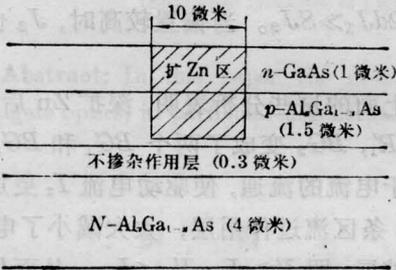
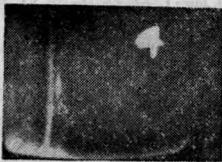


图5 扩Zn较深的平面条形激光器的截面图



照片1 扩Zn较深的平面条形激光器的红外透射情况



照片2 扩Zn较深的平面条形激光器的红外透射和脉冲受激近场图形

二、讨论

众所周知, GaAs 的折射率不仅与波长

和温度有关, 而且也与导电类型和载流子浓度有关。由 D. D. Sell 等^[13] 的测量知道, GaAs 的折射率随浓度的增加而减小。但是不同型 GaAs 之间折射率的高低要视具体情况而定, 不能一概而论。可见, 为了易于用扩 Zn 法在条作用区建立折射率波导, 作用层必须用重掺杂的 n -GaAs。但是当掺杂浓度 $> 3 \times 10^{18}$ 厘米⁻³ 时, 掺杂剂 Te 就要发生偏析, 产生晶体缺陷, 给器件性能造成不利影响。最近, M. Ueno 和 H. Yonezu^[14, 15] 分析了图 6 所示那样的重掺杂作用层深扩 Zn 平面条形激光器的波导机构后指出, 当重掺杂的 n -GaAs 作用层的电子浓度为 $1 \sim 3 \times 10^{18}$ 厘米⁻³, 并严格控制扩 Zn, 使条作用区的空穴浓度 $\leq 1 \times 10^{19}$ 厘米⁻³ 时, 可能在条作用区建立正内建折射率台阶。而当作用层的电子浓度 $n < 1 \times 10^{18}$ 厘米⁻³ 时, 用扩 Zn 法就不可能在条作用区建立正内建折射率台阶。由这些分析和 D. D. Sell^[13] 等的测量看出, 图 1(b) 所示那样的不掺杂作用层深扩 Zn 平面条形激光器不满足用扩 Zn 法在条作用区建立正内建折射率台阶的条件, 甚至可能相反, 建立的是负内建折射率台阶。由此更加说明, 图 1(b) 所示的不掺杂作用层深扩 Zn 平面条形激光器增益波导的变窄是其横模稳定的主要原因。而 H. Yonezu 等的由于深扩 Zn 在条作用区建立了折射率波导的解释是不能成立的。

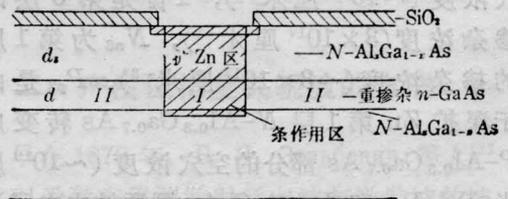


图6 重掺杂作用层 $N-n^+-N$ 型深扩 Zn 平面条形激光器

这里我们还要指出, 图 6 所示的重掺杂作用层 $N-n^+-N$ 型深扩 Zn 平面条形激光器比起图 1(a) 所示的普通平面条形激光器

来, 增益波导的变窄在稳定横模中的重要作用也是不容忽视的。因为作用区上面扩 Zn 区两边是高势垒的 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{p-n}$ 结, 而条作用区两边是低势垒 $GaAs_{p-n}$ 结。仍用前面的符号, 可将图 6 等效成图 7 所示线路。 R_0 为条区接触电阻。首先必须估计一下 R'_1 上的压降对 BG_1 偏置的影响。假设 $S=10$ 微米, 腔长 $L=300$ 微米, $d_3=1.5$ 微米, 则

$$R'_1 = \rho'_3 \cdot \frac{d_3}{SL} = 2.1 \times 10^{-2} \text{ 欧姆。}$$

在注入电流 150 毫安时, R'_1 上的压降

$$V'_1 = IR'_1 = 3.15 \times 10^{-3} \text{ 伏。}$$

所以, 基本上可以忽略 R'_1 上压降的影响, 而认为 BG_1 和 BG_3 的偏置电压相同。由前面的分析可知, 注入电流几乎全部由 BG_1 流过。而 10 微米宽的普通平面条形激光器中扩展电流要占到十分之几^[16]。所以, 作用区上面扩 Zn 区两边高势垒的 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{p-n}$ 结有效地阻止了电流的横向扩展。不仅如此, 它还阻止了载流子的横向扩散, 因此增益波导大大变窄了。这在稳定横模中是有重要作用的。然而 M. Ueno 和 H. Yonezu 却忽视

了这一点。

需要指出, 深扩 Zn 平面条形激光器的载流子主要由作用区两边的 $p-n$ 结注入, 所以要求条宽必须小于载流子扩散长度的两倍 (~ 10 微米), 否则近场图形将是两个斑。至于深扩 Zn 平面条形激光的扩 Zn 前沿在作用区内或紧靠作用区是否会影响器件的可靠性, 对此我们不能作出评论。

金志良同志提供了 $L-I$ 曲线, 单振国同志提供了红外透射照片, 杨姮彩先生和方祖捷同志审阅了全文并进行了有益的讨论, 第十四研究室的许多同志对本文提出了很好的建议。对此, 作者谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] R. Lang; *Jap. J. Appl. Phys.*, 1977, **16**, 205.
- [2] T. Kobayashi et al.; *Jap. J. Appl. Phys.*, 1977, **16**, 601.
- [3] C. Lindstrom et al.; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, 121.
- [4] T. Tsukada; *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**, 4899.
- [5] K. Aiki et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**, 649.
- [6] 吴克林, 张莲英; 《激光与红外》, 1978, No. 12, 22.
- [7] H. Namizaki; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **QE-11**, 427.
- [8] J. C. Bouley et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-15**, 767.
- [9] H. Yonezu et al.; *Jap. J. Appl. Phys.*, 1977, **16**, 209.
- [10] H. Yonezu et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**, 659.
- [11] H. S. Sommers, Jr., D. O. North; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, 4460.
- [12] 小林猛等; 《电子材料》, 1978, **17**, No. 3, 95.
- [13] D. D. Sell et al.; *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**, 2650.
- [14] M. Ueno, H. Yonezu; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-15**, 1189.
- [15] M. Ueno, H. Yonezu; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, 2361.
- [16] R. D. Burnham; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **QE-11**, 418.

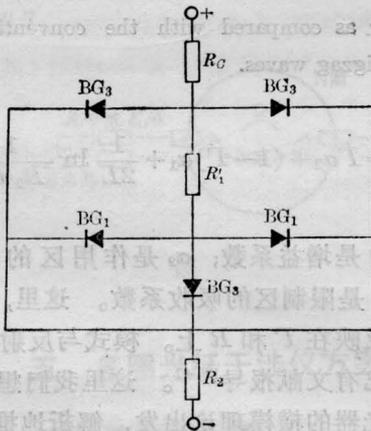


图 7 重掺杂作用层 $N-n^+-N$ 型深扩 Zn 平面条形激光器等效线路