

低阈值压缩双异质结构激光器的制造

杜国同 杨德林 肖建伟 高鼎三

(吉林大学) (重庆光电技术研究所) (吉 林 大 学)

1985年9月21日收到

本文介绍了我们研制的低阈值压缩双异质结构(CDH)激光器, 目前最低阈值 27.5mA (CW, 21°C, 腔长 $L = 125\mu\text{m}$)。本文还讨论了降低 CDH 激光器阈值的两个主要问题, 给出了描述 CDH 结构电流分布的粗略公式。

一、引言

半导体激光器实现室温连续激射以来的十几年间, 经过不断努力基本上解决了器件的寿命和可靠性, 使半导体激光器进入了实用化阶段。对于已经初步实现了商品化的通常条形激光器, 平行结平面的侧向波导机制是靠载流子的注入分布所引起的增益分布来实现的, 增益分布随着注入载流子的变化和激射时载流子的强烈复合而变化, 是一种不稳定的波导机制。这种波导机制的不稳定性, 常常引起近场光斑侧向移动和光功率-电流曲线发生扭曲(kink)。这给光纤耦合, 调制等实际应用带来了很大的障碍。

为了消除光功率-电流曲线的扭曲, 稳定光场, 近几年研制出许多具有侧向内建实折射率导引机制的激光器结构。如掩埋条形(BH)^[1], 沟道衬底窄条形(CNS)^[2], 沟道衬底平面条形(CSP)^[3], 阶梯衬底条形(TS)^[4], 压缩双异质结构(CDH)^[5]等。其中 CDH 结构, 有源区厚度变化较缓, 容易实现较稳定的基侧向横模振荡。在保证其横模振荡前提下, 允许接触电极做得宽一些($10\mu\text{m}$ 左右), 使用一次外延, 工艺简便, 是容易实现实用化的一种特性较好的结构。为此我们研制了 CDH 结构激光器, 并在如何降低阈值的问题上做了一些研究工作。初步研制出室温(21—29°C) 直流阈值为 29—50mA, 最低 27.5mA (21°C, 腔长 $125\mu\text{m}$) 的器件。这一结果已略优于文献[5]报道的结果。

二、工艺过程

CDH 激光器的结构如图 1 所示。衬底平面为(100)面, 向[011]方向偏 0.5—1° 角。外延前衬底沿 [011] 方向腐蚀一对倒梯形沟槽, 两槽的间距可为 25—40μm。用 SiO_2 、 Si_3N_4 、正性胶做掩膜均可, 腐蚀是用 1:8:8 ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$) 腐蚀液, 0°C 腐蚀 4—5 分钟, 得到 4—5μm 深的沟。去掉掩膜后, 衬底片要用 $\text{NaOH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 溶液 (8g NaOH 溶于 200ml H_2O 中加上 20ml H_2O_2 溶于 200ml H_2O 的溶液) 轻轻腐蚀一下, 再进行外延。外延生长的起始温度为 830—840°C。为防止两沟间小平台的肩角回熔过大, 第一层生长时要有 3—5°C 过冷, 同时采用较大的降温速率(1°C/分)以获得所需的各层

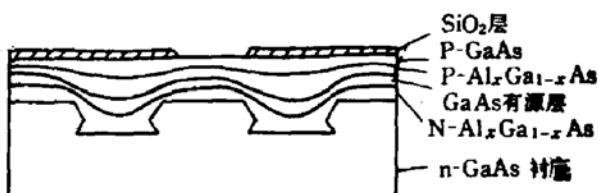


图1 CDH 激光器结构示意图

曲率。第一层 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚 $2\mu\text{m}$ 左右, N型掺 Sn, 杂质浓度控制在 $1-2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。第二层 GaAs 有源区不掺杂, 最厚处控制在 $0.1-0.2\mu\text{m}$ 。为了减少电流的侧向扩展, 第三层 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层厚度控制在 $1\mu\text{m}$ 左右, 第四层 GaAs 层厚度控制在 $0.2-0.5\mu\text{m}$ 。两层均掺 Ge, 杂质浓度均控制在 $1-2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。 x 值约为 $0.35\mu\text{m}$ 左右。外延片制备好后, 即可进行掩蔽扩散、欧姆接触、解理组装等通常工艺制作器件。由于在非平面衬底上进行液相外延的不均匀性要大一些, 激光器的腔长要求尽量短, 最好选取 $80-150\mu\text{m}$ 范围内。

三、CDH 激光器的一些特性

1. 伏安特性 CDH 激光器与通常的 $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 双异质结激光器一样, 正向导通电压为 $1.1-1.3$ 伏特, 反向击穿电压 $6-15$ 伏特。

2. 光电特性 在 8mW 以下测量表明, CDH 激光器 CW 工作的光功率-电流曲线呈良好线性, 如图 2 所示。外微分量子效率为 $30-50\%$ (双面)。

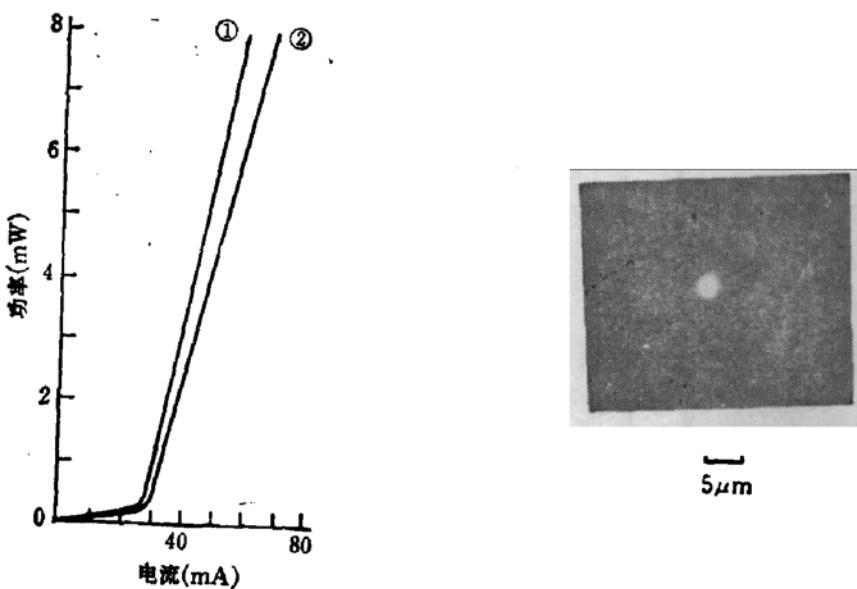


图2 CDH 激光器光功率-电流曲线

① 84-4-20-547# ② 84-6-20-1011#

图3 CDH 激光器近场光斑

3. 阈值特性 目前我们制得的 CDH 激光器室温($21-29^\circ\text{C}$)直流阈值为 $29-50\text{mA}$, 最低 27.5mA (21°C , $L = 125\mu\text{m}$)。这一结果已略优于文献[5]报道的结果。

4. 激射特性 我们研制的 CDH 激光器可以实现 5mW 左右的基横模和单纵模激射。图 3 为基横模振荡的近场光斑，近场半宽一般为 2.5—3.5 μm。图 4 为典型的 CDH 激光器光谱与其对应的光功率曲线。可以看出当输出功率超过 5mW 以上时，由于另一侧向横模的振荡，相对应的另一纵模也开始激射。我们还对所研制的 CDH 激光器的束腰位置进行了测量。典型的结果是束腰位置就在腔面上，表明了其导引机制是折射率导引机制。也有些器件束腰位置在腔内 10—20 μm 处，和我们制造的增益导引机制的氧化物条形激光器相比，氧化物条形激光器束腰位置在腔内 40—50 μm 处，说明这些 CDH 激光器主要是折射率导引机制，由于有源区变化较缓增益导引机制也起一定作用。我们研制的 CDH 激光器单模范围和文献 [5] 报道的背型波导 CDH 激光器大体相同。

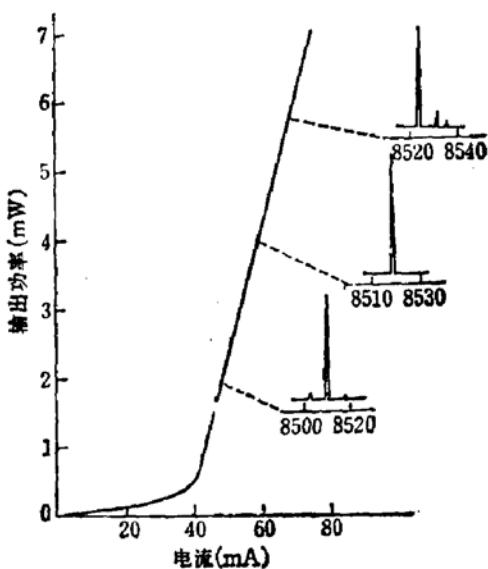


图 4 典型的 CDH 激光器光谱与其对应的光功率曲线

四、降低阈值的几个问题的讨论

如何降低这种结构激光器的阈值，我们觉得主要应注意以下两个问题。

1. 外延片的质量

外延片的质量是影响器件阈值的重要因素，尤其对于非平面衬底液相外延，不均匀性要大，因此如何提高非平面衬底液相外延片的质量是一个很重要的课题。在试验的前期，我们为了控制过冷度，在陪片和正式衬底片之间留出一个槽大小的空位。熔体在陪片上调整好过冷度后，在空位上停留一段时间。由于炉温的下降，在空位上的熔体产生了一定的过冷度，然后再推到正式衬底片上生长。这样过冷度控制较好，生长的外延片断面形状和各层曲率均合乎要求，图 5(a) 就是这种方法制备的外延片。但是最后测量管芯的阈值时，发现这样生长的外延片质量非常不均匀，同一外延片不同位置制备的器件阈值差别较大。考虑外延质量不好的原因主要有两个，一个是过冷生长表面张力大，尤其当 Al 含量较高时更为突出，这时表面浸润角较大容易形成不浸润的结果；二是如果氢气气氛中有微量氧存在，在陪片上平衡后又在空位上过冷的熔体容易被氧化。为了提高外延片质量，后

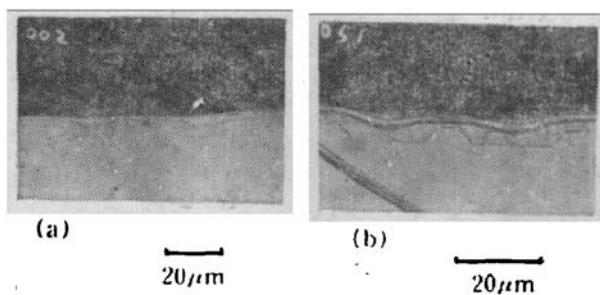


图 5 CDH 结构外延片断面照片. (a) 第一层有 3℃ 过冷度 (b) 第一层无过冷度

来取消了陪片和衬底片之间的空位，熔体在陪片上平衡后立即推到正式衬底上。这种生长当然也就没有过冷度了，因而小台阶肩角回熔较重。但实验发现这样生长的有源区厚度也有变化，图 5(b) 就是这种方法生长的外延片层次断面。所制成的器件模式稳定性也很好，图 2 中 ① 84-4-20-547[#] 激光器就是用这种方法外延生长的。我们还采用精确称源、用改进的挤压舟，不放陪片的外延方法进行过试验，也得到了质量较好的外延片。如图 2 中 ② 84-6-20-1011[#] 激光器就是用这种方法生长的。

2. 电流侧向扩展的控制

在氧化物隔离条形激光器中，影响阈值比较重要的一个因素就是电流的侧向扩展^[6]。而 CDH 结构有源区是生长在衬底小台阶上的，小台阶的 GaAs 电阻率要低于 (AlGa)As 外延层的电阻率。电流要选择电阻最小路径来流动，通过有源区的电流会向台面会聚，这一效应称之为电流集中效应。它起的作用与电流扩展效应相反，趋于降低激光器阈值的作用。对于 CDH 结构，电流扩展和电流集中效应两者对器件阈值影响的大小和两者之间的关系如何，是讨论 CDH 激光器阈值问题必须解决的课题。只有清楚的了解了这一问题，才能针对其结果采取适当措施来制备低阈值的 CDH 激光器。若解决这一问题是困难的，因为 CDH 结构有源区是弯曲的，有源区及最外两层厚度都是有变化的。因此，为了得到一个清晰的、明了的数学表达式，我们做了如下较大的简化处理和讨论。

为了抓住主要矛盾，考虑电流的扩展和集中效应，所以先不考虑有源区厚度变化对载流子浓度的影响，只考虑电流的侧向分布；同时也忽略有源区上面两层厚度变化的影响，并把衬底看成是金属性传导，即采用图 6 所示的模型。设台宽为 W ，台高为 d_0 ，当 $W \rightarrow$

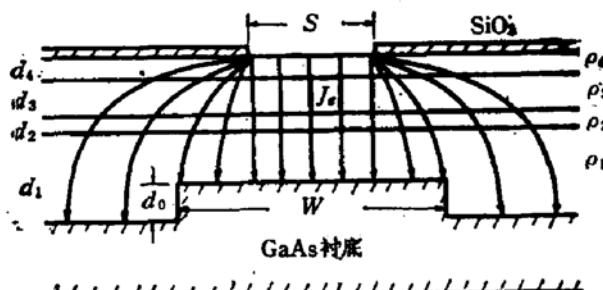


图 6 分析 CDH 结构电流分布的模型图

∞ 时该模型就转化为 Yonezu^[7] 和 Tsang^[8] 所描述的氧化物条形电流流动模型。他们把电流流动的二维问题简化为一维处理, 给出了如下的电流侧向分布公式:

$$\begin{cases} J_i(y) = J_e & |y| \leq \frac{S}{2} \\ J_i(y) = J_e \left(1 + \frac{|y| - \frac{S}{2}}{l_0} \right)^{-1} & |y| > \frac{S}{2} \end{cases} \quad (1)$$

或

$$\begin{cases} J_i(y) = J_e & |y| \leq \frac{S}{2} \\ J_i(y) = J_e \exp \left(- \frac{|y| - \frac{S}{2}}{l_0} \right), & |y| > \frac{S}{2} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$l_0 = \left(\frac{2}{\beta R_y J_e} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \frac{1}{R_y} = \frac{d_3}{P_3} + \frac{d_4}{P_4} \quad (3)$$

对于 CDH 结构 W 不是无限大, 但我们仍可以假定在 $|y| \leq \frac{W}{2}$ 处, 描述氧化物条形结构的电流分布公式(1)或(2)成立, 只要把条件由 $|y| > \frac{S}{2}$, 改为 $\frac{S}{2} < |y| \leq \frac{W}{2}$ 即可, 这样只须考虑 $|y| > \frac{W}{2}$ 区域的电流分布了。

现设在 $|y| > \frac{W}{2}$ 区域, p-n 结上某一 y 点处, 跨过 p-n 结的电流密度为 $J_i(y)$. 按二极管理论,

$$J_i(y) = J_s e^{\beta V_i(y)}, \quad (4)$$

如果衬底为平面的, 则此点的电流密度

$$J_{io}(y) = J_s e^{\beta V_{io}(y)} = J_s e^{-\frac{|y| - \frac{S}{2}}{l_0}}. \quad (5)$$

现设想由原来的平面衬底突然挖下一个深为 d_0 的槽, 槽处填充的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层的电阻率 ρ_1 较大, 就要产生压降。由于衬底为金属模型, 电流线在衬底附近要垂直于衬底。这样结电压变为:

$$V_i(y) = V_{io}(y) - \rho_1 d_0 J_i(y). \quad (6)$$

由于跨接 p-n 结两端结电压的减少, 引起流经 p-n 结电流的减少。电流 $J(y)$ 的减少, $V(y)$ 减少的量也变小了, 直至平衡, 这是一个自洽的过程。由(4)、(5)、(6)这一平衡条件可以用下式描述:

$$\begin{aligned} J_i(y) &= J_s e^{\beta(V_{io}(y) - \rho_1 d_0 J_i(y))} \\ &= J_s e^{-\frac{|y| - \frac{S}{2}}{l_0}} \cdot e^{-\beta \rho_1 d_0 J_i(y)}. \end{aligned} \quad (7)$$

同样也可以用

$$J_i(y) = J_c \left(1 + \frac{|y| - \frac{S}{2}}{l_0} \right)^{-2} e^{-\beta \rho_1 d_0 J_i(y)}. \quad (8)$$

当然这一模型和公式是相当粗略和近似的，如在公式的推导中 $V_{io}(y)$ 保持不变就是很粗略的近似，转为精确的描述还有待进一步探讨。我们用测量激光器荧光近场光强的方法，考查证实了这一描述 CDH 结构电流分布的公式虽然相当粗略，但给出了大体正确的结果（将另文给出）。有了这一简明的公式，就可以用来分析电流扩展和集中效应对阈值的影响了。图 7 就是用公式(1)和(8)计算的不同薄层电阻 R_s 阈值电流随台宽的变化曲线。计算时取 $J_{eth} = 1600 \text{ A/cm}^2$ 、 $S = 10 \mu\text{m}$ 、 $\rho_1 = 0.16 \Omega$ 、 $L = 250 \mu\text{m}$ 、台高 $d_0 = 4 \mu\text{m}$ 。

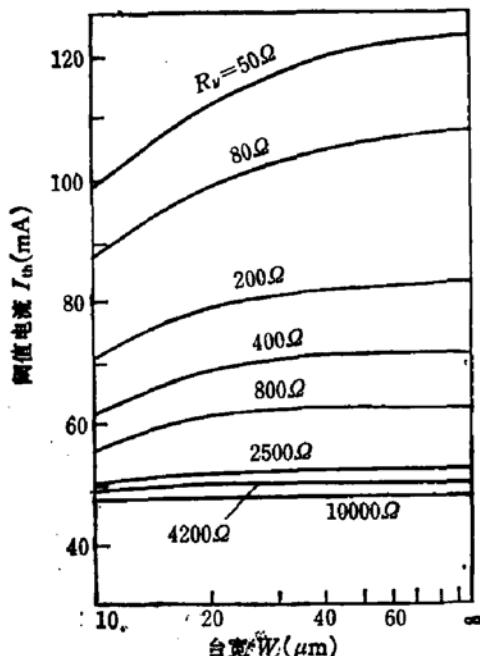


图 7 计算的 CDH 激光器阈值电流随台宽变化曲线

由图 7 可以看到：(a) 即使台宽较窄 $W = 10 \mu\text{m}$ ，电流集中效应较强的情况下， R_s 由 10000Ω 变为 50Ω 阈值仍由 45.8 mA ，增加到 98.2 mA ，几乎增加了两倍。这说明电流扩展效应对 CDH 结构阈值的影响还是个很重要的因素。(b) R_s 较小时，台宽变化对阈值的影响才表现得比较明显，也就是电流集中效应才起作用。 R_s 越大，电流集中效应越微弱。这说明电流集中效应是以电流扩展效应为前提的，集中是集扩展电流于中。电流扩展大，集中效应才明显表现出来；电流扩展小，集中效应也就小了；如果没有扩展效应，也就没有集中效应了。所以这一对矛盾中，电流扩展效应是主要矛盾方面。因此若制备低阈值的 CDH 激光器必须注意控制电流的扩展效应。如前所述我们通过控制最外两层的掺杂浓度和厚度，使 $R_s > 3000 \Omega$ ，这样就有效的控制了电流扩展效应，制得了阈值较低的 CDH 激光器。文献 [5] 中介绍由于 CDH 结构有电流集中效应，可以改善温度特性，提高 T_{o*} ，我们认为这要以牺牲阈值为条件。利用公式(1), (8)可以估算出不同 R_s

* T_o 应分为本征 T_o 和外部 T_o ，本征 T_o 才是真实反映 P-N 结上阈值电流温度关系。而通过旁路电流造成的 T_o 提高，只是提高了外部 T_o 。实际上牺牲了阈值电流，不应是器件改进的方向。

时, T_0 提高的程度, 这里不详细讨论了。

五、结语

总之, 若制备低阈值的CDH 激光器必须注意提高外延片的质量, 以减少腔内损耗。必须注意控制电流的侧向扩展。通过以上两个重要因素的控制, 我们制得了阈值为 29—50 mA, 最低 27.5mA 的 CDH 激光器, 并可单模工作到 5mW 左右。

吉林大学电子科学系的马晓宇、杨健、扈广荣、李正庭等, 重庆光电技术研究所的杨连生、胡恩志、罗恩银、胡思强、尹花琼等同志参加了实验工作, 在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] T. Tsukada, *J. Appl. Phys.*, **45**, 4899(1974).
- [2] P. A. Kirkby, *Electron. Lett.*, **15**, 824(1979).
- [3] K. Aiki, M. Nakamura, T. Kuroda, J. Umeda, R. Ito, N. Chinane and M. Maeda, *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 649(1977).
- [4] MASAR. WADA, *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 776(1981).
- [5] D. Botez, *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 2290(1981).
- [6] 杜国同, 全宝富, 邓希敏, 苗忠礼, 高鼎三, 半导体学报, **4**, 306(1983).
- [7] H. Yonezu, I. Sakuma, K. Kobayashi, T. Kamejima, M. Ueno and Y. Nannichi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **12**, 1585(1973).
- [8] W. T. Tsang, *J. Appl. Phys.*, **49**, 1031(1978).

Fabrication of Low Threshold Current Constricted Double-Heterojunction Lasers

Du Guotong

(Department of Electronics Science, Jilin University)

Yang Delin

(Chongqing Institute of Optoelectronics)

Xiao Jianwei and Gao Dingsan

(Department of Electronics Science, Jilin University)

Abstract

The constricted double-heterojunction lasers with low threshold current have been fabricated. At present the lowest threshold is 27.5 mA (CW, 21°C, cavity length $L=125 \mu\text{m}$). Two main problems for decreasing the threshold current—the quality of the epitaxial layers and the effects of current spreading are discussed, and the approximate formula of current profile for CDH structure is given.