

组织传导的热量损失:

$$Q_s = H_c(T_1 - T_2)/d \quad (13)$$

式中  $H_c$  是热导率, 等于  $1.2 \times 10^{-3}$  (瓦/厘米<sup>2</sup>·°C),  $d$  是光贯穿深度。

热扩散距离:

$$s = \sqrt{4H_a t} \quad (14)$$

式中  $t$  是热扩散距离为  $s$  所需时间,  $H_a$  是皮肤和组织的热扩散率, 取  $1.2 \times 10^{-3}$  厘米<sup>2</sup>/秒, 照射时间取 1 小时。代入上式得  $s \approx 4$  厘米, 即热传到皮下 4 厘米。反之若照射时间为 1 毫秒, 则  $s \approx 7$  微米, 极浅, 亦即脉冲激光引起的是定域热反应, 激光连续照射, 热才可能扩散。

## 参 考 文 献

- [1] 刘普和等编, “医学物理学”, 人民卫生出版社, 1981, 763~781 页。
- [2] L. O. Svaasand *et al.*; *Med. Phys.*, 1983, **10**, No. 1, 10.
- [3] A. J. Welch *et al.*; *IEEE BME*, 1980, **27**, No. 3, 161.
- [4] B. T. Volpe *et al.*; *Med. Phys.*, 1982, **9**, No. 4, 506.
- [5] Н. Ф. Гамалея; “Лазеры в клинической медицине”, Москва, Медицина, 1981, с. 45~46.

(中山医学院 刘普和 1983 年 11 月 23 日收稿)

# 单纵模条形半导体激光器中光功率- 电流特性扭折的机理

**Abstract:** The kinks in the light/current characteristics in a number of (GaAl) As-bombarded stripe lasers operating in single longitudinal mode are observed experimentally and investigated theoretically. Their mechanisms are shown to be the occurrence of the first order lateral mode, and that during their occurrence the lasers are still operating in a well-behaved single longitudinal mode.

半导体激光器的光功率-电流 ( $P-I$ ) 特性曲线中出现扭折, 限制了线性调制范围, 并可能出现各种不稳定性<sup>[1,2]</sup>。产生扭折的机理有多种多样, 例如由于侧向导有某种不对称性, 使基模光强分布随电流增加而引起侧向移动, 让更多的光强进入条外吸收区, 降低了微量子效率, 导致  $P-I$  特性出现扭折<sup>[3~6]</sup>; 波导机理发生变化, 例如由于空间烧孔而从增益波导转变为自聚焦波导时, 也使  $P-I$  曲线出现扭折<sup>[7,5]</sup>。本文观察到的是在达到阈值以后较大的电流范围内始终是单纵模工作的激光器, 其  $P-I$  特性出现扭折则主要是由于出现一阶侧向导所致<sup>[8]</sup>。

我们这批实现单纵模工作的激光器是由液相外延精心制作, 在同一外延片解理做成的。其有源层为  $P$  型掺硅补偿, 载流子浓度约为  $5 \times 10^{17}$  厘米<sup>-3</sup>, 厚度为  $0.2 \sim 0.3$  微米, 条宽为 13 微米。这些单纵模激光器的模式行为大致相似, 其  $P-I$  光特性也大致相似, 以 129# 管为例, 在注入电流  $I = 0.985I_{th}$  (对 129# 管阈值电流  $I_{th} = 130$  毫安) 时是多纵模的, 但稍微超

过阈值电流以后即变成单纵模工作, 其总光功率  $P$  随注入电流的变化在  $1.08I_{th}$  左右出现明显的扭折,

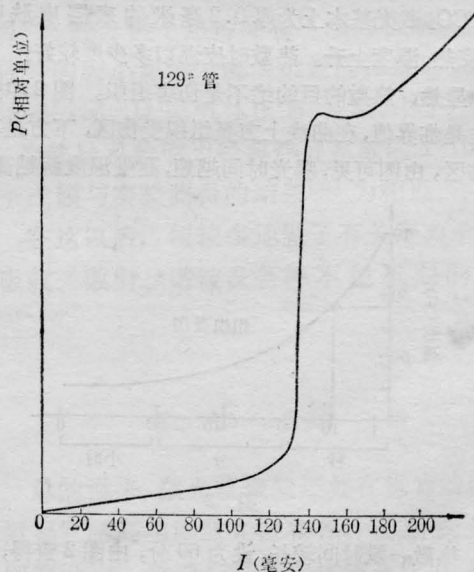
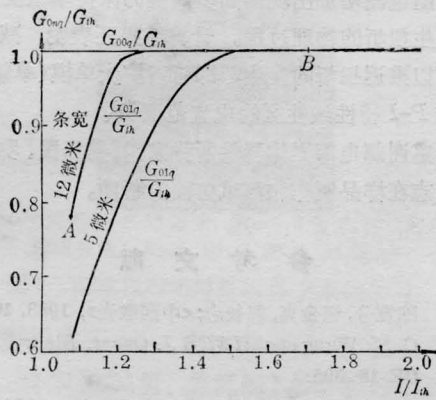
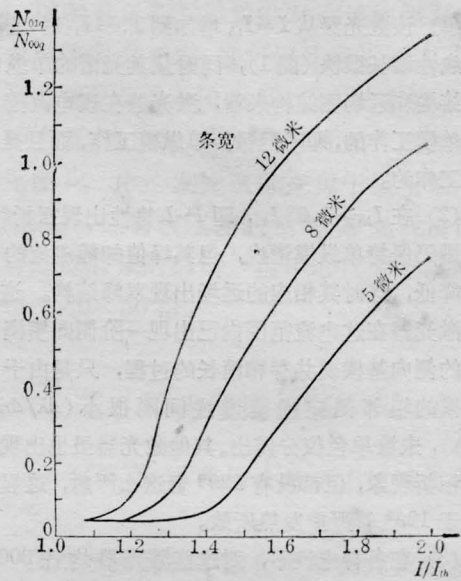


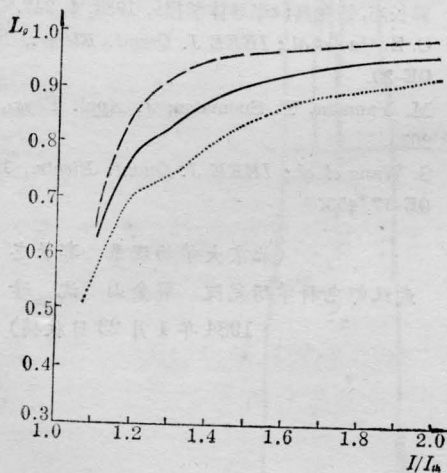
图 1 直流  $P-I$  特性曲线



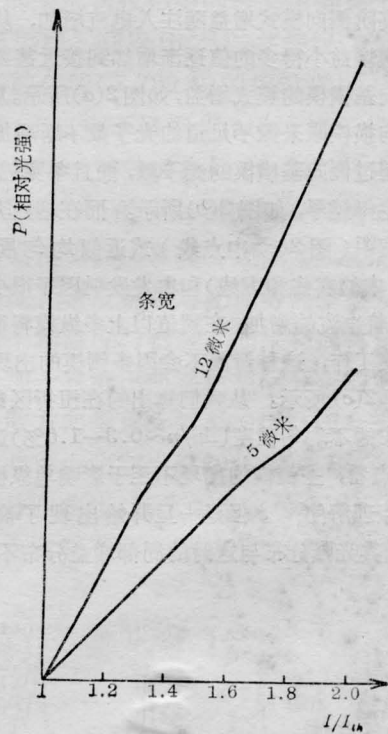
(a) 激励单纵模  $q$  的  $n$  ( $n=0, 1$ ) 阶侧向横模的模式增益  $G_{0nq}$  与阈值增益  $G_{th}$  之比和注入电流的关系,  $G_{0nq}$  的第 1 个下标 0 表示垂直基横模



(b)  $(0, 1, q)$  模的光子数  $N_{01q}$  与  $(0, 0, q)$  模的光子数  $N_{00q}$  的比值随注入电流的改变, 以条宽为参变量



(c) 考虑 (实线) 和不考虑 (虚线) 一阶侧向横模时, 以及不考虑三级非线性增益但考虑了一阶侧向横模 (点线) 时  $L_q-I/I_{th}$  曲线,  $L_q$  是激励单纵模  $q$  的光子数与总的发射光子数之比



(d)  $P-I$  曲线

如图 1 所示。可见:

(1) 该激光器从  $I=I_{th}$  增加到  $1.04I_{th}$  时, 总光功率线性增长很快(图 1), 同时从其光谱的单纵模谱线结构和远场图结构来看, 激光器在该电流范围内是单模工作的, 即不但保持单纵模工作, 而且是单横模工作的。

(2) 在  $I_{th} \geq 1.08I_{th}$ , 即  $P-I$  特性出现扭折时, 其光谱仍保持单纵模谱线, 但其峰值却随电流的增加而降低, 这时其相应的远场出现双峰结构。这表明该激光器在这电流范围内已出现一阶侧向横模与原来的侧向基横模共存和消长的过程, 只是由于同一纵模的相邻侧向横模谱线间隔很小 ( $4\lambda/\Delta n \leq 0.2\text{Å}$ ), 未被单色仪分辨出。其他激光器虽也出现类似的扭折现象, 但都没有 129# 管这么严重, 这显然是由于 129# 管严重发热所致。

(3) 在各种电流下, 对这些激光器均在  $300\text{Å}$  以上的波长范围内进行过扫描光谱测量, 从未发现有别的纵模系出现, 故不可能有多丝发射的情况存在<sup>[12]</sup>。

我们最近的理论工作<sup>[10]</sup>表明, 上述现象的产生是由于高阶侧向模式增益随注入电流增加, 从比侧向基横模增益小得多的值逐渐增加到接近甚至略为超过侧向基横模的模式增益, 如图 2(a) 所示。从而使一阶侧向横模原来微不足道的光子数不断增加到接近甚至超过侧向基横模的光子数, 而且条宽越宽, 这情况发生得越早, 如图 2(b) 所示。而在增益介质为均匀展宽<sup>[9]</sup>(图 2(c) 中点线) 或近似均匀展宽<sup>[11]</sup>(图 2(c) 中的实线和虚线) 和自发发射因子很少的条件下, 随着电流的增加, 在阈值以上多纵模将很快变为单纵模工作, 这种情况不会因多侧模的出现而改变, 如图 2(c) 所示。从我们算出的在扭折区载流子浓度分布的不均匀程度 ( $\Delta n/n \sim 0.3-1.5\%$ ) 远小于 10% 这点看, 多侧模的出现不至于影响单纵模工作也是可以理解的<sup>[12]</sup>。但是一旦开始出现了高阶横模, 由于其光强分布与这时的局部增益分布不匹配,

其模式增益较低, 图 2(a) A 点所示, 则总的微分子效率将逐渐减少, 如图 2(d) 所示; 直到通过空间烧孔改变载流子密度分布使其与高阶侧向横模的光场分布相匹配之后(如图 2(a) B 点所示), 其微分子效率才又回升, 如图 2(d) 所示。这就是上述单纵模激光器随电流增加出现侧向多横模仍保持单纵模工作但产生扭折的物理过程。计算结果还表明, 减小条宽可以推迟扭折的发生, 即可以扩大单模(单频)工作和  $P-I$  特性线性区的电流范围<sup>[10]</sup>。

感谢邮电部固体器件所张家谦、魏泽民、罗卓基等同志在样品制作和测试方面的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] 陈妮兮, 钮金真, 郭长志; 《中国激光》, 1983, **10**, 70.
- [2] C. M. Wang *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, **QE-18**, 595.
- [3] T. L. Paoli; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**, 770.
- [4] N. Chinone; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, 3237.
- [5] G. H. B. Thompson *et al.*; *IEEE J. on SSED*, 1978, **2**, 12.
- [6] R. Lang; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-15**, 718.
- [7] P. A. Kirkby *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**, 705.
- [8] J. Buus; *Electr. Lett.*, 1978, **14**, 127.
- [9] 郭长志, 钮金真; 《半导体学报》, 1983, **4**, 247.
- [10] C. Z. Guo *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1984, **QE-20**.
- [11] M. Yamada, Y. Suematsu; *J. Appl. Phys.*, **52**, 2653.
- [12] S. Wang *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, **QE-17**, 453.

(北京大学物理系 郭长志  
武汉邮电科学研究院 解金山 沈峰  
1984年1月23日收稿)