

外色散腔半导体激光器的单模运转

张汉一 姚敏玉 许知止 周炳琨
(清华大学无线电系)

提 要

本文对外色散腔半导体激光器单模工作条件及机理进行了理论分析和实验研究。采用将多纵模输出的半导体激光二极管置于外色散腔内,不论二极管表面镀不镀增透膜,都实现了室温连续稳定单纵模运转。激光线宽小于 50MHz,调谐范围 200Å,单模功率大于无外腔时的多模输出功率,可达 3mW。

利用光栅等元件构成外部反馈,可以使多纵模半导体激光器稳定在单纵模运转,并可在几百 Å 范围内调谐^[1,2],同时,一些其它激光性能也将得到改善。这样的单频可调谐激光器在光纤通信、光纤测试及光谱分析等领域有重要应用价值。又因为外腔半导体激光器也是探索半导体激光机理^[3],实现锁模^[4]和激光传感^[5]的有效途径和良好手段,并可与集成光学相结合。因此受到广泛重视。

一、实验研究

1. 实验装置

外色散腔半导体激光器及其选模调谐测量装置结构见图 1,它由闪耀光栅(6001/mm 原刻光栅),准直透镜为 $N \cdot A = 0.65$, 40× 的显微物镜,半导体激光二极管*(P-N 结正向注入质子轰击条形 GaAlAs-GaAs DH 激光器)组成。单管工作时输出多模,中心波长约 8300 Å。激光二极管靠近光栅一端的解理面镀 ZrO_2 或 Al_2O_3 增透膜($\lambda/4$)或保护膜($\lambda/2$),另一端为输出端,未镀膜。采用半导体致冷器对激光器进行温度控制。观测调谐范围及原二极管模(本征腔模)抑制情况时采用 2m 光栅摄谱仪,观测外腔模间相互抑制情况及所选单模线宽采用球面共焦扫描干涉仪,其分辨线宽为 50 MHz。

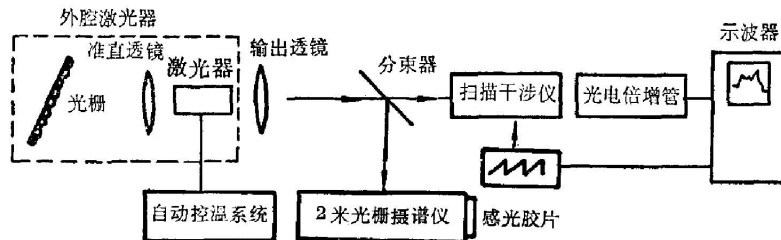


图 1 外腔半导体激光器及其选模调谐特性测量装置示意图

Fig. 1 Experimental arrangement for measuring the characteristics of selecting mode and tuning

收稿日期: 1983年6月10日; 收到修改稿日期: 1983年10月3日

* 中国科学院半导体所生产

2. 单本征腔模的选择

先后试用二十多只性能不同的激光二极管进行了实验。其结果如图 2 所示,在图 2(a)、(b)和(c)照片中, I 为无外腔时本征腔模频率谱, II 为外腔下调谐选模情况。图 2(a)表明工作电流为阈电流 1.2 倍时, 镀膜透膜激光二极管改变光栅放置角度调谐范围可达 200 \AA ; 图 2(b)系镀膜激光二极管, 调谐范围为 120 \AA ; 图 2(c)显示了无外腔时, 多横模输出的激光二极管在外腔工作时抑制了高阶横模, 实现了单本征腔模的稳定输出。实验结果表明: 只要精确调整外腔结构, 不论激光二极管 $P-I$ 特性是否有扭折, 外微分量子效率高或低, 激光器表面是否镀膜透膜, 均可在外色散腔下实现稳定的单本征腔模输出。

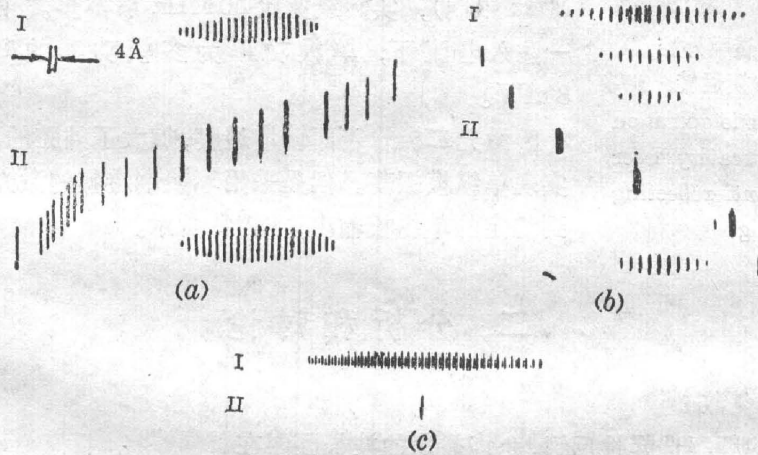


图 2 摄谱仪拍摄外色散腔选模调谐照片

I—无外腔时谱线; II—有外腔选模及调谐情况

Fig. 2 The photographs of selected mode and tuning range with the external dispersive cavity by spectrograph

(I—The spectrum without external cavity;

II—The selected modes and tunable range with external cavity)

但是, 当采用扫描干涉仪对所选单本征腔模进一步观测时, 发现在很多情况下摄谱仪显示的单本征腔模并非单模, 而是由一群密集的谱线组成, 其总宽度约为零点几埃, 各线之间间隔为 $C/2(L+n_1l)$, 其中, L 为光栅至靠近的二极管端面距离, l 为本征腔长, n_1 为半导体介质折射率, 说明这是一组由外腔长决定的外腔纵模群。随着注入电流增加, 外腔模个数增加, 从而激光输出的总线宽增加, 如图 3(a)、(b)所示。

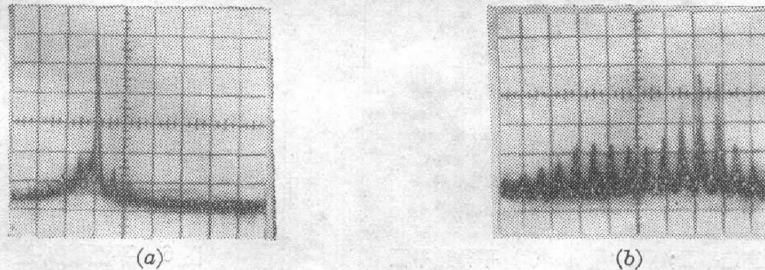


图 3 随注入电流增加, 外腔模数目增多

Fig. 3 The number of external cavity modes increases as the injection current increases

(a) Low current; (b) High current

3. 单纵模控制

为了实现单纵模振荡, 必须在上述所选的一组外腔纵模群中, 增强某一纵模的竞争能力, 并抑制掉其它模。实验采取的具体措施包括: (a) 外色散腔的精确调整; (b) 保证良好的机械和温度稳定性; (c) 选择均匀性较好的激光二极管; (d) 加大外腔的反馈率; (e) 选择合理的结构参数和工作条件, 加大各纵模间的增益损耗差等。这样可使一批多纵模激光二极管在外色散腔条件下实现了单纵模输出。线宽测量为 50 MHz (因受仪器分辨率 50 MHz 限制), 实际线宽比 50 MHz 小得多。在阈值附近同一注入电流下, 单模功率为多模功率的 1~10 倍, 可达 3 mW。

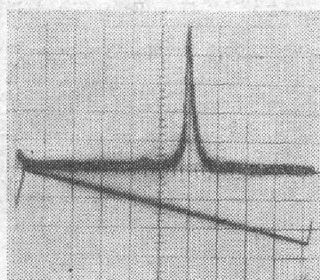


图 4 未镀增透膜外腔激光器的单模运转

Fig. 4 Single mode operation for the external cavity laser diode without anti-reflecting coating

激光二极管表面镀增透膜, 加大了外腔的反馈率, 有助于实现单纵模振荡。但是采用不镀增透膜的激光二极管也可得到稳定的单纵模输出, 如图 4 所示。

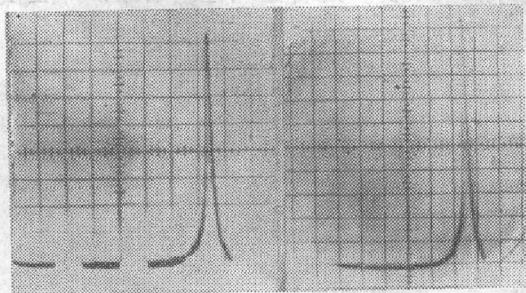
二、分析和讨论

1. 光栅的色散

由于光栅的频率选择性反馈, 允许振荡的波长限制在

$$\delta\lambda \leq \frac{d \cos \theta \cdot w}{kf} \quad (1)$$

范围内, 式中 d 为光栅常数, θ 为反射光与光栅法线的夹角, w 为激光二极管有源区尺寸, k 为闪耀级次, f 为透镜焦距。按照 (1) 式计算当光栅刻槽平行或垂直于二极管结平面时, $\delta\lambda$ 分别为 3.2 \AA 及 160 \AA 。前者小于二极管本征腔模间隔 ($\sim 4 \text{ \AA}$), 因此在光栅反馈频率范围内仅允许一个本征腔模存在; 后者远大于本征腔模间隔, 可允许几十个本征腔模同时反馈回有源区形成振荡。但实验表明, 在这两种情况下激光输出均为单长腔膜 (如图 5 所示), 两者的差别仅在于光栅刻槽垂直结平面时激光阈值低。这是由于激光二极管发射电矢量位于结平面方向的偏振光^[6], 而电矢量垂直于光栅刻槽时闪耀效率高。



(a) 垂直结平面; (b) 平行结平面

图 5 光栅刻槽与结平面间位置对选模的影响

Fig. 5 Dependence of the mode-selection on the position of groove with facet

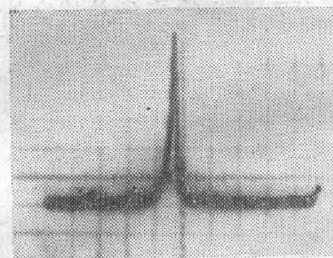


图 6 平面镜外腔单模振荡

Fig. 6 Single mode operation for the external mirror cavity

用平面镜代替光栅, 尽管没有频率选择性反馈作用, 仍然可以得到单纵模振荡, 如图 6 所示。这一结果表明, 光栅色散不是单纵模工作的决定条件。

2. 复合腔的谐振效应

外腔纵模群的产生是由于复合腔光波场谐振效应造成的^[7]。忽略透镜表面的反射, 外腔激光器光波场的阈值增益为

$$\left. \begin{aligned} g_t &= \exp(\gamma - \alpha)l = \frac{1 + r_1 r_2 \exp i\phi_0}{r_1 \exp i\phi_1 (r_2 + r_3 \exp i\phi_0)}, \\ \phi_0 &= 2k_0 L = 4\pi L/n_0 \lambda, \quad \phi_1 = 4\pi l/n_1 \lambda, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 n_0 为空气折射率, γ 、 α 分别为介质的增益系数和吸收系数, r_1 、 r_2 和 r_3 分别为二极管两端面和光栅上光振幅反射系数。于是得到光强的阈值增益为

$$G_t = g_t g_t^* \quad (3)$$

我们计算了 r_2 、 r_3 取不同数值时 G_t 随频率 ν 的变化规律, 在 $L \gg l$ 时, 某一本征腔模 $\nu_q = q \cdot c/2n_1 l$, 附近阈值增益变化情况示于图 7(计算中取 $r_1 = r_2 = 0.565$, $r_3 = 0$ 及 $r_3 = 0.2$, $L = 10$ cm, $l = 280$ μ m)。由图中可见, 当存在外反馈时($r_3 > 0$), 在 ν_q 周围出现了一群低阈值点, 其间隔为 $c/2(n_1 l + L)$, 当注入电流产生增益 G^0 (如图中虚线所示)时, 将要在 ν_q 附近出现一群间隔为 $c/2(n_1 l + L)$ 的纵模振荡, 即外腔纵模群。注入电流越大, 满足振荡条件的低阈值点越多, 振荡的纵模数目就越多, 激光谱线变宽。计算分析结果与实验十分吻合。

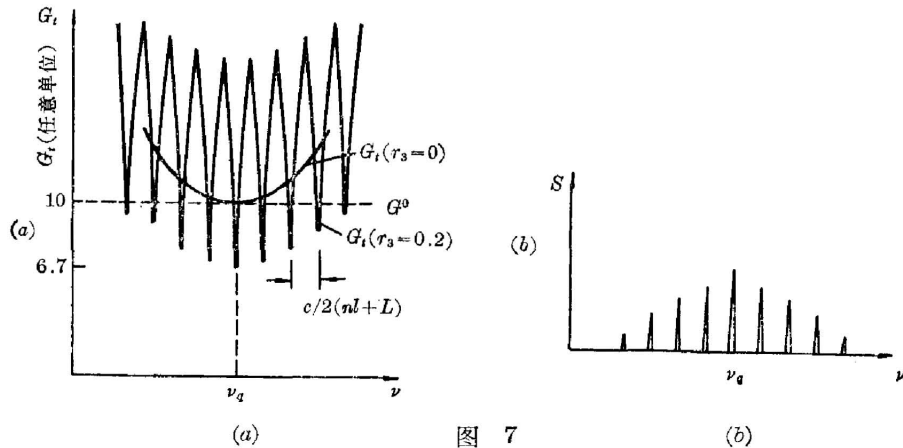


图 7 (a) 复合腔 $G_t \sim \nu$ 曲线; (b) 相应的振荡纵模分布

Fig. 7 (a) $G_t \sim \nu$ curve for the compound cavity; (b) The distribution of resonant longitudinal modes

3. 光谱增益展宽特性

我们用稳态多模速率方程对外腔半导体激光器模间抑制情况作了分析。在假设激光有源区内载流子和光子分布均匀等前提下速率方程为^[8,9]

$$(dn/dt) = (J/ed) - (n/\tau_s) - \sum_{\mu} a(g_{\mu}n - N_0)S_{\mu} = 0, \quad (4)$$

$$(dS_{\mu}/dt) = a(g_{\mu}n - N_0)S_{\mu} - (S_{\mu}/\tau_p) + (\rho_{\mu}S_{\mu}/\tau_p) + (\beta_{\mu}n/\tau_s) = 0, \quad (5)$$

其中, n 为有源区载流子密度, S_{μ} 为第 μ 个模的光子密度, μ 为纵模序数(设中心模 $\mu = 0$), J 为注入电流密度, e 为电子电荷, d 为有源区厚度, τ_s 为载流子寿命, a 为增益常数, g_{μ} 为

增益线型函数, N_0 为增益刚好为正时的载流子密度, τ_p 为光子寿命, β_μ 为耦合到第 μ 个纵模中的自发辐射系数, ρ_μ 为第 μ 个纵模的反馈率。

和无外腔时相比, 这里引入了一个特殊量 ρ_μ 标志外反馈的强弱。假设半导体激光器光谱增益曲线是均匀展宽^[10], 方程的数值解如图 8 及图 9 所示。图 8 为所选中心模 S_0 和相邻本征腔模 S_1 的光强之比以及 S_0 和总光强 $\sum_\mu S_\mu$ 之比(计算中取 $\rho_\mu=0$, $\beta_0=3.5 \times 10^{-5}$, $\tau_p=1.5 \times 10^{-12}$ s, $\alpha=0.27 \times 10^{-12}$ m³·s⁻¹, $\delta\lambda_w=5.25$ Å)。图 9 为所选 S_0 与相邻共腔模 S'_1 及总光强 $\sum_\mu S'_\mu$ 的比较(计算中取 $\rho_0=\rho_1$, $\beta_0=3.5 \times 10^{-5}$, $\tau_p=5.8 \times 10^{-12}$ s, $\alpha=1.125 \times 10^{-12}$ m³·s⁻¹, $\delta\lambda_w=0.04$ Å)。

计算结果表明: 随着外反馈的引入, 所选中心模 S_0 大大超过相邻本征腔模 S_1 , 也大大超过相邻外腔模 S'_1 。即外反馈有利于振荡模对邻模的抑制, 造成单模工作。而且, 反馈越强, 抑制效果越好, 越易出单模。

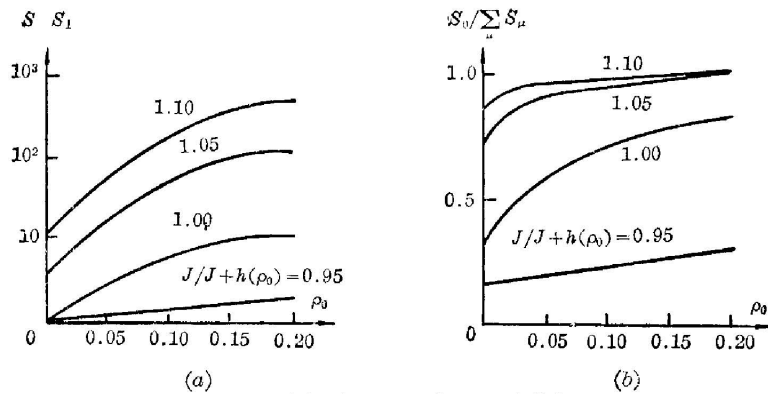


图 8 本征腔模的速率方程数值解

(a) $(S_0/S_1) \sim \rho_0$ 关系曲线;

(b) $(S_0/\sum_\mu S'_\mu) \sim \rho_0$ 关系曲线

Fig. 8 The numerical solutions of the ratio equations of eigen cavity mode

(a) $(S_0/S_1) \sim \rho_0$ curve; (b) $(S_0/\sum_\mu S_\mu) \sim \rho_0$ curve

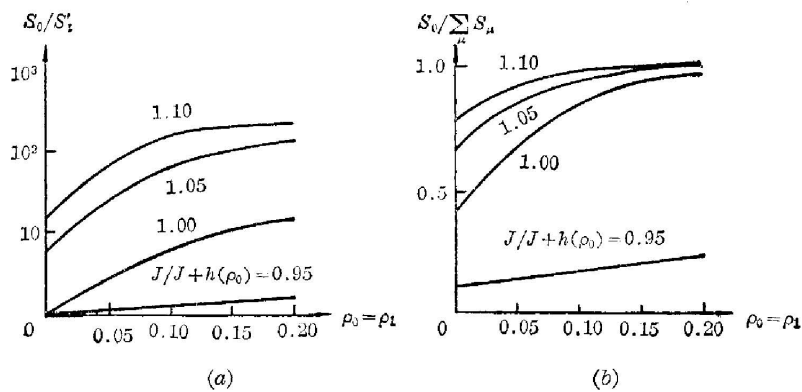


图 9 长腔模的速率方程数值解

(a) $(S_0/S'_1) \sim \rho_0 (= \rho_1)$ 关系曲线;

(b) $(S_1/\sum_\mu S'_\mu) \sim \rho_0 (= \rho_1)$ 关系曲线

Fig. 9 The numerical solutions of the ratio equations of the external cavity mode

(a) $(S_0/S'_1) \sim \rho_0 (= \rho_1)$ curve; (b) $(S_0/\sum_\mu S_\mu) \sim \rho_0 (= \rho_1)$ curve

三、讨 论

速率方程的计算分析和实验研究一致表明,外腔的引入造成了激光二极管的单模振荡。实验得到单模输出功率比在相同电流下无外腔时多模总功率大,计算分析得到反馈率大于 10% 时, $S_0/\sum_{\mu} S_{\mu} \approx 1$ 。这些结果说明,半导体激光介质的光谱增益曲线是均匀展宽的;均匀展宽是造成外腔单模工作的本质原因。

增益谱线均匀展宽,即使在无外腔时也应导致单模工作,理论计算得到的图 8 和图 9 清楚地表明了这一点,当反馈率 $\rho_0=0$ 时,工作电流大于阈值时,仍有 $S_0/S_1 > 1$ 。然而,实际上激光二极管单管工作时却是多模输出,存在外腔时也可能产生外腔纵模群,这说明,实际半导体激光二极管内部存在着导致多模工作的不均匀因素。有关的解释有:动态涨落^[3];空间烧孔^[4];较强的自发辐射放大阻碍了非激励态向激励态的快速过渡;有源区存在波纹、暗线、点缺陷;镜面缺损或有角度偏差;丝状发光^[4];以及有源区材料组份或载流子浓度不均匀等。因此外色散腔下能否实现单纵模工作的关键就在于能否克服这些不均匀因素的影响。

上述理论分析和实验结果说明:利用外色散腔可以使线宽为几十埃的多模激光二极管稳定在某一单本征腔模处振荡,线宽压缩到零点几埃;其输出频率可在增益线宽内方便地调谐。在长外腔情况下,所选模往往由一群外腔模组成,但靠精确调整,实行良好的机械稳定和温度控制以及提高某一外腔模的竞争能力等办法,可以有效地抑制其它邻近的外腔模,实现真正的单纵模输出,从而使激光线宽压缩到 50 MHz (10^{-3} Å) 以下。这样的单频可调谐激光器具有重要的应用价值。

参加本工作的还有李春茂及李艳和两位同志。在工作过程中,得到庄婉如、马朝华、赵明德、苏德龙、李宁、袁树忠、吴振华、邹云生、李荫垣、霍玉晶等同志帮助,特此致以衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] R. Wyatt, W. J. Devlin; *Electron. Lett.*, 1983, **19**, No. 3 (Feb), 110.
- [2] M. W. Fleming, A. Mooradian; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 1 (Jan), 44.
- [3] R. P. Salathe; *Appl. Phys.*, 1979, **20**, No. 1 (Sep), 1.
- [4] H. A. Haus, Ping-tong Ho; *IEEE J. Q. E.*, 1979, **QE-15**, No. 11 (Nov), 1253.
- [5] T. G. Giollorenzi *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1982, **QE-18**, No. 4 (Apr), 457.
- [6] T. Ikegami; *IEEE J. Q. E.*, 1972, **QE-8**, No. 6 (Jun), 470.
- [7] A. Olsson, G. L. Tang; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 8 (Aug), 1321.
- [8] H. Kressel *et al.*; *«Semiconductor Laser and Heterojunction LEDs»* (Academic Press, Inc., London, 1977), 556.
- [9] M. Ito *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1980, **QE-16**, No. 1 (Jan), 70.
- [10] S. Roab *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **28**, No. 2 (Feb), 213.
- [11] W. Streifer *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1977, **QE-13**, No. 6 (Jun), 403.

Single longitudinal mode operation of semiconductor laser with external dispersive cavity

ZHANG HANYI YAO MINYU XU ZHIZHI AND ZHOU BINGKUN

(Qinghua University Department of Radio Electronics, Beijing)

(Received 10 June 1983; revised 3 October 1983)

Abstract

Mechanism and condition of single longitudinal mode operation of the semiconductor lasers with external dispersive cavity have been investigated theoretically and experimentally. Using multimode laser diodes with uncoating facet as well as coating facet, stable single longitudinal mode is obtained under room temperature CW operation. Its linewidth is less than 10^{-3} Å (50 MHz) and the tunable range is 200 Å. Single mode output power is more than the total power output of multimode with our external cavity up to 3 mW.