

短耦合腔半导体激光器单纵模工作特性*

周炳琨 王江林 张汉一
(清华大学无线电电子学系)

提 要

引入附加损耗参数以反映短耦合腔的影响并利用修正的多模速率方程对短耦合腔半导体激光器单纵模工作机理和特性进行了研究,结果表明:在半导体激光二极管表面镀增透膜将使单模特性得到很大改善。实验验证了理论分析。设计研制的新型器件在连续和150 MHz调制工作条件下,稳定单模输出的边模抑制比达到35~40 dB。

一、引 言

单频半导体激光器在高速率光纤通信,光纤传感和计量检测等领域有重要应用。为了得到这种器件,人们在改变器件结构和采取控制措施等方面做了大量工作,并取得了相当的成效^[1]。其中短耦合腔(short-coupled-cavity)半导体激光器由于结构简单,成本低廉,性能稳定而令人注目。

短耦合腔半导体激光器主要由激光二极管和一个外部反射镜组成,其间距(L)小于激光二极管的本征腔长(nl)。通常认为,激光二极管端面不应镀增透膜^[2],因而,先前的短耦合腔半导体激光器中的激光二极管表面约保持其自然反射率的32%^[3~4]。其主模和次模的功率之比(边模抑制比)通常仅达20~25 dB。本文在对短耦合腔半导体激光器单纵模工作机理进行分析的基础上提出:为了获得具有高边模抑制比的单模输出,在激光二极管表面镀以良好的增透膜是十分必要的,同时还应精确控制短耦合腔腔长。实验证明了这一结论。采用新的结构,在连续及调制工作下,短耦合腔半导体激光器单纵模输出的边模抑制比达到35~40 dB。

二、理 论

1. 短耦合腔引入的附加损耗

短耦合腔半导体激光器结构如图1所示,其光波场振荡阈值条件为^[7]

$$\exp[(g-\alpha)L] = \frac{1+r_2r_3\exp(i\phi_0)}{r\exp(i\phi_1)[r_2+r_3\exp(i\phi_0)]}, \quad (1)$$

其中, g 和 α 分别为激光二极管有源区的增益和损耗系数; $\phi_0=(4\pi L/\lambda)$, $\phi_1=(4\pi nl/\lambda)$; r_1 , r_2 为激光二极管端面对光场振幅的反射率; r_3 为短耦合腔外反射镜对光场振幅的有效反射率,它是经外反射镜反射回激光二极管有源区的光场振幅与从激光二极管端面辐射的

收稿日期:1985年7月10日;收到修改稿日期:1985年9月18日

* 本文梗概在CLEO'85会上宣读过。

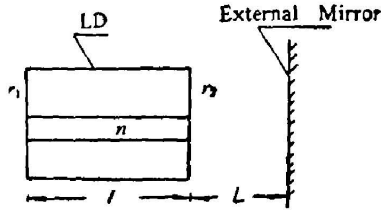


Fig. 1 Schematic of the SCC semiconductor laser

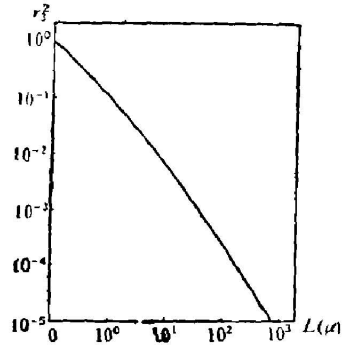


Fig. 2 Dependence of the effective reflection coefficient r_3 on external cavity length L

总光场振幅之比。由于激光二极管的有源区截面极小以及发射光束的发散角很大,通常 r_3 是极小的。假设激光二极管发射光束具有高斯型分布且光腰处于激光二极管端面上,则计算得到的 r_3 随短耦合腔腔长 L 的变化关系如图 2 所示,由图中可以看出, $L=100\mu\text{m}$ 时, r_3 的数值略大于 0.01。计算中还假定了外反射镜的反射率为 1。在以下的分析,试验中亦取其值为 1,以便得到较大的 r_3 。

引入反馈参数^[6]

$$z = \frac{1 + r_2 r_3 \exp(i\phi_0)}{1 + (r_2/r_3) \exp(i\phi_0)} = \exp(A + i\phi), \quad (2)$$

则阈值条件(1)可分为

相位条件:

$$\phi_1 + \phi = 2p\pi, \quad (3)$$

增益条件:

$$g = \alpha + (1/l) \ln(1/r_1 r_2) + (A/l), \quad (4)$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{[(r_3/r_2) - r_2 r_3] \sin \phi_0}{1 + r_3^2 + [r_2 r_3 + (r_3/r_2) \cos \phi_0]} \right\}, \quad (5)$$

$$A = \ln \frac{\sqrt{\{1 + r_3^2 + [(r_2 r_3) - (r_3/r_2)] \cos \phi_0\}^2 + \{[(r_3/r_2) - r_2 r_3] \sin \phi_0\}^2}}{1 + (r_3/r_2)^2 + 2(r_3/r_2) \cos \phi_0}, \quad (6)$$

其中, p 为整数, A 为光波场在复合腔内往返一周的附加损耗,它是由于存在短耦合腔而产生的,其值和 r_2 、 $r_3(L)$ 以及光波场在短耦合腔内往返一周的相位 ϕ_0 有关。

图 3 给出了计算得到的附加损耗 A 随光波长周期变化的曲线对于某些波长 $A > 0$, 表明短耦合腔使相应纵模的损耗及振荡阈值提高了;而对具有另外一些波长的纵模 $A < 0$, 表明短耦合腔降低了它们的损耗和振荡阈值。可见,短耦合腔造成了不同纵模间的损耗差。

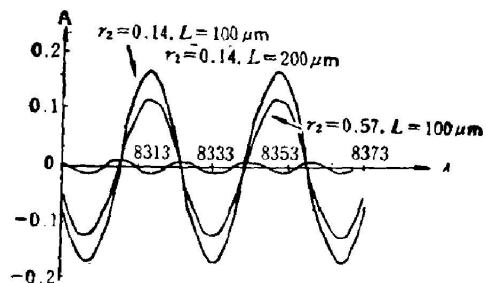


Fig. 3 Calculated additional loss versus wavelength for SCC semiconductor laser

2. 不同纵模间的附加损耗系数差

任意两个纵模间的附加损耗系数差可以表示为

$$\delta\alpha_{mn} = \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_n, \quad (7)$$

其中 $\Delta\alpha_m = (2A_m/2l)$, $\Delta\alpha_n = (2A_n/2l)$ 分别为 m 模和 n 模光强的附加损耗系数。设主模为 $m=0$, 并处于增益曲线中心位置且有最小的附加损耗, 则计算得到的主模与其相邻三个边模的附加损耗系数差 $\delta\alpha_{01}$, $\delta\alpha_{02}$, $\delta\alpha_{03}$ 和相对外腔长 (L/nl) 间的关系如图 4 所示。图 5 给出了激光二极管耦合端面反射率 r_2 不同时 $\delta\alpha_{01}$ 的变化。显然, 为了实现高边模抑制比的稳定单模输出, 主模与其他纵模间的附加损耗系数差越大越好。由计算可知。

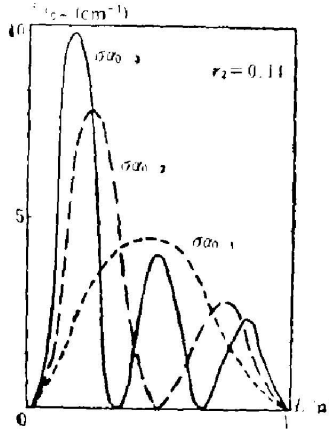


Fig. 4 Additional loss coefficient differences $\delta\alpha_{01}$, $\delta\alpha_{02}$ and $\delta\alpha_{03}$ as a function of the relative cavity length L/nl

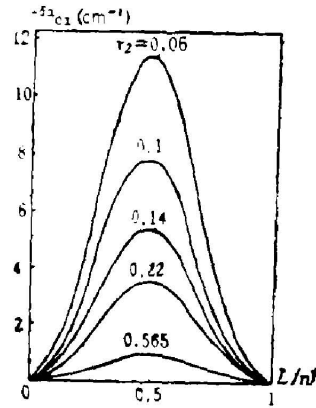


Fig. 5 The additional loss coefficient difference $\delta\alpha_{01}$ as a function of relative cavity length L/nl for different r_2 . The natural reflectivity of the LD facet is 0.565.

首先, 要求附加损耗 A 随波长 λ 的变化幅度尽可能大。其最大值发生在 $r_3 = r_2$ 处, 此时外反射镜与激光二极管端面组成了透过率为 1 的 F-P 标准具。由于通常 r_1 是很小的, 所以应当设法减小 r_2 以使 r_3 和 r_2 接近。图 5 清楚地表明, 随 r_2 减小 $\delta\alpha_{01}$ 增加的情况。

其次, 为了所有边模均能较好地抑制, 主模对几个主要邻模的附加损耗差应同时都具有较大值, 为此需要有一个合理的外腔长 L 。由图 4 表明, L 的数值选在 $[(1/6) - (1/3)]nl$ 附近比较合适。

此外, 腔长还须精确调整, 使短耦合腔引入的附加损耗最小值处于某一纵模波长处, 特别是希望能与增益曲线中心处的纵模重合, 这样该纵模既有最小损耗又有最大增益, 将具有更强的振荡优势。

3. 短耦合腔半导体激光器单模特性

为了清楚说明短耦合腔结构及其参数的影响, 我们进一步采用修正的多模速率方程分析短耦合腔激光器的单模振荡特性。引入附加损耗系数 $\Delta\alpha_m$, 稳态多模速率方程可以写为

$$(J/ed) - (N/\tau_s) - (c/n) \sum_m G_{dm} \cdot S_m = 0, \quad (8)$$

$$(\Gamma\beta_m N/\tau_s) + (c/n) (\Gamma G_{dm} - \alpha_m - \Delta\alpha_m) S_m = 0, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (9)$$

式中 N 为有源区内载流子密度, J 为注入电流密度; e 为电子电荷; d 为有源区厚度; τ_s 为载流子自发辐射复合寿命; Γ 为限制因子; S_m, G_{sm} 分别为第 m 模的光子密度和增益系数, β_m 为自发辐射耦合到 m 模的部分。 α_m 为无短耦合腔时 m 模的损耗系数

$$\alpha_m = \alpha_0 + (1/l) \ln(1/r_1 r_2), \tag{10}$$

α_0 是激光二极管内部吸收和散射等损耗系数, 在计算中还用到下列关系

$$\left. \begin{aligned} G_{sm} &= (\beta_0 \alpha d / \tau_s) (g_m N - N_0), \\ g_m &= [1 + (2\delta\lambda / \delta\lambda_p)^2 m^2]^{-1}, \quad \beta_m = \beta_0 g_m, \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

式中 β_0 为自发辐射系数, $\delta\lambda, \delta\lambda_p, \delta\lambda_s$ 分别是激光二极管的纵模间隔, 增益线宽和自发辐射线宽, N_0 为载流子填满准费米能级的密度。计算中取其 $\alpha_0 = 20 \text{ cm}^{-1}$, $\delta\lambda = 5 \text{ \AA}$, $\delta\lambda_p = 200 \text{ \AA}$, $\delta\lambda_s = 300 \text{ \AA}$, $d = 0.2 \text{ \mu m}$, $l = 200 \text{ \mu m}$, $n = 3.5$, $\tau_s = 2 \times 10^{-9} \text{ sec}$, $N_0 = 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\Gamma = 1$ 。计算结果如图 6~9 所示。

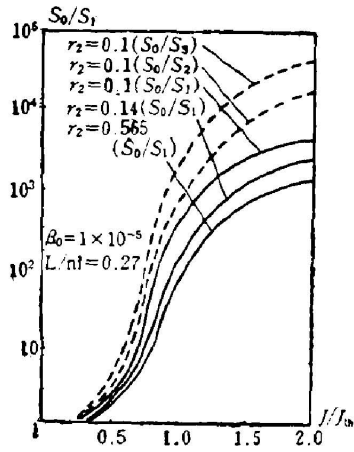


Fig. 6 Ratio S_0/S_1 as a function of J/J_{th} for various r_2 . The dashed lines represent S_0/S_2 and S_0/S_3

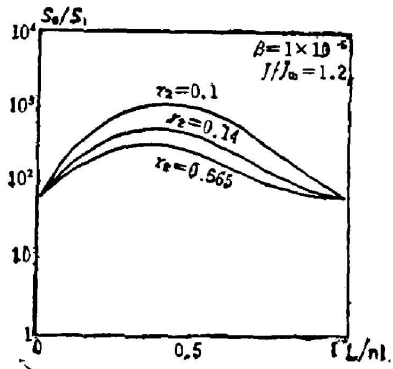


Fig. 7 Calculated ratio S_0/S_1 versus L/nl for various r_2

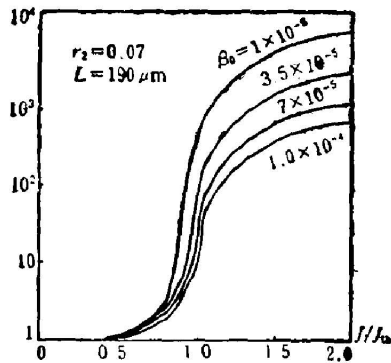


Fig. 8 Calculated S_0/S_1 versus J/J_{th} for various spontaneous emission factor B_0

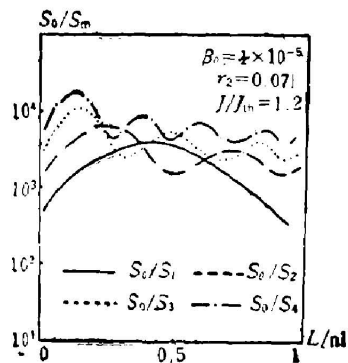


Fig. 9 Side-mode suppression S_0/S_m versus L/nl

图 6、图 7 分别给出了主模和最邻近边模的光子密度之比(即边模抑制比) (S_0/S_1) 在不同的 r_2 情况下随相对注入电流 (J/J_{th}) , 相对(短耦合腔)腔长 (L/nl) 的变化。图中虚线表明 (S_0/S_2) 、 (S_0/S_3) 的情况, 从中清楚看出, 随激光二极管端面反射率 r_2 减小, 边模抑制比大幅度增加。这和附加损耗差增加的分析相印证。图 8 反映了激光二极管自发发射系数 β_0 的影响, 显然, 器件自发发射系数越小则边模抑制比越高。计算表明, 当无外反馈时, β_0 较大的激光二极管器件是多纵模工作, 随着外反馈引入及工作电流增加将过渡到单纵模工作; 说明自发发射系数大是普通激光二极管多模工作的主要原因。图 9 表示 L 大约在 $[(1/6)-(1/3)]nl$ 范围内, 主模对邻近诸模均有较大抑制比, 这一结果与已报道过的实验相吻合^[4, 5]。

三、实 验

1. 实验装置

我们设计和制造了一个新型的短耦合腔半导体激光器。其特点是:

- (1) 激光二极管表面镀有增透膜;
- (2) 短耦合腔的腔长可以调节并采用压电陶瓷(PZT)精确调整;
- (3) 短耦合腔反射镜采用反射率接近 1 的多层介质膜;
- (4) 采用半导体致冷器控制整台器件温度波动在 0.01°C 范围内。

器件照片如图 10 所示, 体积约火柴盒大小, 其中选用的激光二极管为质子轰击条型异质结(DH)激光器*, 中心波长约 8200 \AA 。

短耦合腔半导体激光器的输出光谱采用 AQ1417B 光谱分析仪测量。分析率为 0.3 \AA 。

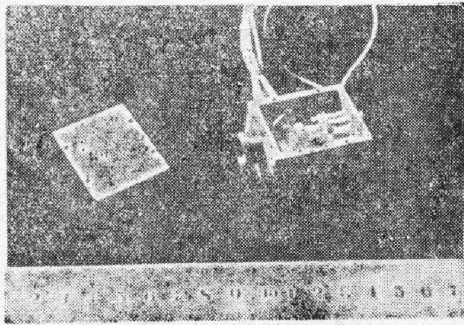


Fig. 10 The picture of a SCC semiconductor laser

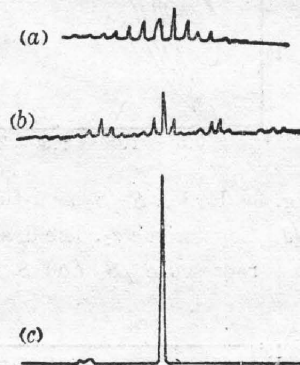


Fig. 11 Measured spectra of the SCCDL

- (a) Spectrum of a diode laser above threshold without external reflector;
- (b) Spectrum of the SCCDL near threshold;
- (c) Spectrum of the SCCDL above threshold; (5 time reduced scale)

2. 单模工作特性

图 11 为典型的短耦合腔半导体激光器输出光谱。其中 (a) 为无短耦合腔时, 单管激光二极管的多模谱, (b) 显示出在近阈值处激光二极管的多模谱被短耦合腔以 $\lambda/2L$ 的周期所调

* 中国科学院半导体研究所提供。

制。(c)为驱动电流超过阈值时短耦合腔激光器呈现的单模输出。

采用不镀增透膜的激光二极管构成的短耦合腔半导体激光器,单模输出最高的边模抑制比为 22 dB。而采用镀增透膜的激光二极管,最好的结果达到 35~40 dB,这些实验证实了上节的理论分析,表明在激光二极管表面镀增透膜对于短耦合腔半导体激光器是十分必要的。

实验还表明:为了得到理想单模,首先选择合适的腔长后,再通过改变压电陶瓷电压进行精确调整腔长 L 。当腔长 L 调整到使附加损耗最小点恰好与某一纵模重合,则该纵模振荡将对其他纵模有最大的抑制比,同时稳定性也最佳;而当腔长改变使附加损耗最小点落在两个纵模中间时,将出现两模剧烈竞争并同时振荡情况。图 12 给出了随压电陶瓷电压升高,腔长 L 连续变化,输出单模调谐情况。图中双线区域即对应两模同时存在情况。显然,在相当大的压电陶瓷电压范围内,输出保持稳定的单模。

图 13 为单模谱照片和主模谱照片,主模对邻近边模的强度比分别用线性(a)及 5 dB/div(b)的比例加以标示。AQ14178 光谱仪最大测量范围为 40 dB,图中所示边模抑制比为 39 dB,在 150 MHz 电流幅度调制下单模保持不变。

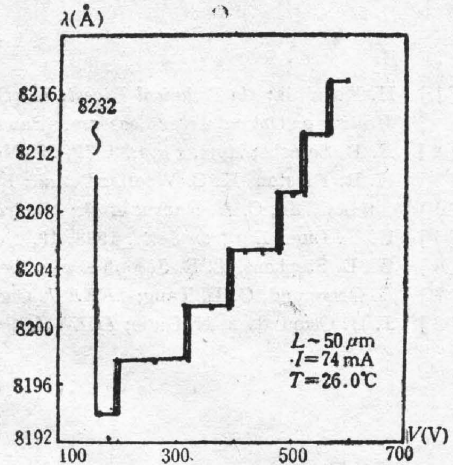
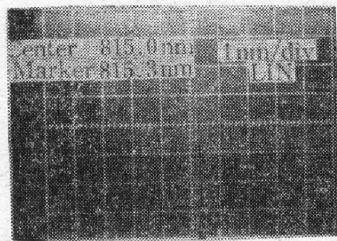
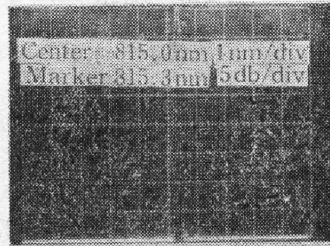


Fig. 12 Measured single-mode wavelength versus PZT voltage V



(a)



(b)

Fig. 13 SCCDL-single-mode photographs

$L=100\mu\text{m}, J/J_{\text{th}}=1.2$ Vertical scale: (a), Linear; (b) 5dB/a: V

四、结 论

对短耦合腔半导体激光器的选模机理和单模特性的研究表明,为了实现具有高边模抑制比的稳定单模输出,采用如下的技术措施是必要的和有效的:

- (1) 在激光二极管端面镀良好的增透膜;
- (2) 选择合理的短耦合腔腔长;
- (3) 精确调整腔长;
- (4) 选择具有低的自发发射系数的激光二极管。

实验结果与理论分析吻合。设计、制作了新的小型短耦合腔半导体激光器,其稳定单模

输出对边模抑制达到 35~40 dB, 在动态下亦保持不变。

谢澄同志参加了部分动态调制工作。作者对庄婉如、马朝华、高以智、许知止、姚敏玉、陈家骅、潘安培、吴群等同志的帮助表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Kogelnik; *in Technical Digest, The Conference on Optical Fiber Communication and International Topical Meeting on Optical Fiber Sensors*, (San Diego, January 1985), 10.
- [2] R. P. Salashe; *Appl. Phys.*, 1979, **20**, No. 1 (Sep), 1.
- [3] K. R. Preston, K. C. Woollard *et al.*; *Electron Lett.*, 1981, **17**, No. 24 (Dec), 931.
- [4] Chinlon Lin, C. A. Burrus *et al.*; *Electron Lett.*, 1983, **19**, No. 15 (Aug), 561.
- [5] K. Y. Lion; *Electron Lett.*, 1983, **19**, No. 19 (Oct), 750.
- [6] W. E. Stephens, T. R. Joseph *et al.*; *Electron Lett.*, 1984, **20**, No. 10 (May), 424.
- [7] A. Olssonand, C. L. Tang; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 8 (Aug), 1321.
- [8] J. H. Osmundsen, N. Gade; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 3 (Mar), 465.

Single longitudinal mode characteristics of short-coupled-cavity (SCC) semiconductor lasers

ZHOU BINGKUN, WANG JIANGLIN AND ZHANG HANYI

(Department of Radio Electronics, Tsinghua University, Beijing)

(Received 10 July 1985; revised 18 September 1985)

Abstract

By introducing an additional loss parameter for the description of SCC and developing a model of modified multimode rate equations, the mode selection mechanism and characteristics of SCC semiconductor lasers have been investigated theoretically. It is found that an antireflection coating on the end facet of a laser diode is necessary for high-quality single longitudinal mode operation. Based on the theoretical results, a new type of miniature SCC laser has been constructed and demonstrated. Single mode outputs with 35~40 dB side mode suppression ratio have been obtained under CW and 150 MHz modulation conditions.