

外腔反馈对半导体激光器振荡特性的影响^{*}

刘 崇 葛剑虹[†] 陈 军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2005 年 9 月 26 日收到 2005 年 12 月 23 日收到修改稿)

通过有效反射系数的引入,根据激光谐振腔的自再现条件和对腔内光子密度、载流子密度方程的求解,分析了外腔反馈对半导体激光器的阈值增益、振荡频率和输出功率等振荡特性的影响,并通过实验进行了验证.外腔反馈后,半导体激光器的阈值电流从 420mA 降为 370mA,输出功率的斜率效率获得了提高,理论计算的输出功率曲线与实验结果符合的很好.

关键词:半导体激光器,外腔反馈,振荡特性

PACC: 4255P, 4260D

1. 引 言

半导体激光器(缩写为 LD)以其优越的特性近年来在光通信、光存储和固体激光器抽运源等领域获得了广泛的应用.在其众多的应用中,外部的各种光学反馈会对其振荡特性产生重要的影响.一方面,由于 LD 腔外元件的后向反射,不可避免的产生光反馈注入到 LD 中,对 LD 输出的稳定性产生不利的影响,比如在各种光测量以及光通信等应用中产生的背景噪声和信息传输能力的减弱^[1];另一方面通过主动的调节腔外元件的反馈,又可以达到控制和改善 LD 输出特性的目的,所以近年来对外腔反馈式半导体激光器的研究逐渐成为了一个热点^[2-7],如通过 $\lambda/2$ 波片外腔同位相的弱反馈实现了 LD 激光的强度噪声压缩^[2],通过腔外平面镜和空间滤波器的共同反馈得到了单瓣近衍射极限的激光输出^[3]等.

无论是主动的或是被动的反馈,都会影响 LD 的阈值增益、振荡频率和输出功率等振荡特性.通过对这些特性的分析,可以更好的利用或避免外腔反馈的影响,以适应在不同场合中的应用.前期的文献^[6,8]中虽然分析了外腔反馈后 LD 阈值增益和腔内光学损耗的变化,但是对输出功率的变化未作详细的讨论.采用有效反射系数的方法^[6,8]来分析外腔

反馈条件下的半导体激光器,不仅表达式简洁明了,而且具有清晰的物理涵义.本文首先根据稳态条件求出了反馈后激光振荡的阈值增益和振荡频率的表达式,再由腔内光子数密度和载流子密度方程分析了外腔作用下的激光输出功率,最后与实验结果进行了对比.

2. 理论分析

2.1. 阈值增益和振荡频率

典型的外腔反馈半导体激光器的原理如图 1(a) 所示,其中 r_1 和 r_2 是 LD 两个端面的反射系数,外部光反馈的影响用一个反射系数为 r_3 的平面镜来等效.这样,外腔中光波的衍射损耗、各光学元件的反射损耗以及由激光输出引入的损耗等因素都可以反映在 r_3 中.引入有效反射系数的概念,可以将 r_2 - r_3 平面等效为一个反射系数为 r_{eff} 的平面,如图 1(b) 所示,其中 r_{eff} 由多光束干涉的公式给出^[8-10],即

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_2 + r_3 \exp(i\phi_1)}{1 + r_2 r_3 \exp(i\phi_1)}, \quad (1)$$

其中 $\phi_1 = \frac{1}{c} 2\omega nL$ 为光束在外腔往返一周的相位改变量, c 是真空中光速, ω 是激光振荡的角频率, nL 是外腔的光学长度.

^{*} 教育部留学回国人员科研启动基金(批准号 2004-527)资助的课题.

[†] E-mail: jianhong@zju.edu.cn

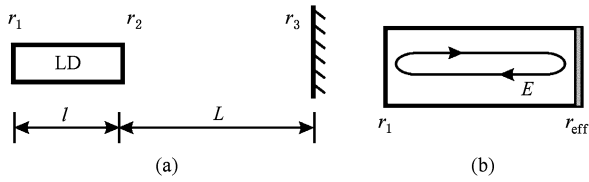


图 1 (a) 外腔反馈的半导体激光器的原理图 (b) 引入等效反射系数后的等效腔

设图 1(b) 所示的腔内任意位置处光场的复振幅为 E , 增益系数为 g , 在稳态振荡的条件下, 增益系数较小并近似等于阈值增益 g_{th} , 根据光束在腔内往返一周后其复振幅应满足自再现条件, 有下式成立, 即

$$E \exp[(g - \alpha) 2l] r_1 r_{eff} \exp(-i\phi_0) = E, \quad (2)$$

其中 α 是不包括输出耦合因素在内的损耗系数, ϕ_0 是光束在腔内往返一周的相位改变, 有 $\phi_0 = \frac{1}{c_g} 2\omega l$, c_g 是 LD 介质中的光速. 将 (1) 式改写为 $r_{eff} = \exp(G + i\phi)$, 式中 $G = \ln|r_{eff}|$, $\phi = \text{Arg}(r_{eff})$, 代入 (2) 式中, 由实部和虚部分别相等可以得到稳定振荡的增益条件 (或称阈值增益) 为

$$g_0 = g_{th} = \alpha + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_1} - \frac{1}{2l} G, \quad (3)$$

相位条件 (或称频率条件) 为

$$\phi_0 = \phi + m2\pi. \quad (4)$$

从增益条件和相位条件中可以看出, 引入有效反射系数的概念, 外腔的作用相当于附加了一个增益因子 G 和一个相位因子 ϕ . 如果没有外腔的反馈, 则 $r_3 = 0$, $G = \ln(r_2)$, $\phi = 0$, 上述条件转化为普通两镜谐振腔的公式.

2.2. 输出功率

没有外腔反馈的情况下, 设半导体激光器有源层体积为 V , 注入有源层的电流为 I , 在忽略自发辐射对光子密度的贡献的情况下, 有源层内光子数密度 S 和载流子密度 N 随时间 t 的变化关系为^[4,11]

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{IV} - \frac{N}{\tau} - A(N - N_{tr})S, \quad (5)$$

$$\frac{dS}{dt} = A(N - N_{tr})S\Gamma_a - \frac{S}{\tau_p}, \quad (6)$$

式中 τ 为有源层内载流子的寿命, e 为单位电荷, τ_p 是受到边界介质吸收、散射以及输出耦合等因素限制的光子寿命, N_{tr} 是半导体介质有源层对光无吸收

时的载流子密度, A 是常数, 包含 A 的这项为受激项, Γ_a 为约束因子.

注入电流恰好等于阈值的时候, 腔内光子数密度为零, 由 (5) 式得到阈值电流为

$$I_{th} = \frac{eV}{\tau} N_{th} \quad (7)$$

N_{th} 为阈值载流子密度. 当注入电流超过阈值以后, 载流子密度随注入电流的增加而上升缓慢, 如果忽略增益饱和效应对载流子密度的影响, 可以认为载流子密度保持在 N_{th} 上不变, 此时注入的电流将用来增加腔内光子密度. 故在稳定振荡的条件下, 有 $dN/dt = 0$, $dP/dt = 0$, $N = N_{th}$, 令 (5) 式和 (6) 式的左边等于零, 可以得到腔内光子数密度的稳态解, 即

$$S_0 = \tau_p \Gamma_a \left(\frac{I}{eV} - \frac{N_{th}}{\tau} \right), \quad (8)$$

腔内光功率与光子数密度的关系为

$$P_{int} = A_s S_0 h\nu c_g, \quad (9)$$

其中 A_s 为 LD 有源层截面面积, $h\nu$ 为单个光子的能量, 将 (7) (8) 式代入 (9) 式得到

$$P_{int} = \frac{1}{eV} A_s h\nu c_g \tau_p \Gamma_a (I - I_{th}), \quad (10)$$

腔内光子寿命可以表示为 $\tau_p = \frac{l}{\alpha' c_g} = \frac{l}{g_{th} c_g}$ ^[8], α' 是总损耗系数, 这样 (10) 式可以改写为

$$P_{int} = \frac{C}{g_{th}} (I - I_{th}), \quad (11)$$

其中 $C = \frac{1}{eV} A_s h\nu \Gamma_a l$ 是只与半导体激光器本身特性有关的常数.

外腔反馈的情况下, 设半导体激光器的两个表面的反射率分别为 R_1 和 R_2 , 外腔镜的反射率为 R_3 , 腔内光功率的传输如图 2 所示, 在 R_2 面左侧向左传输的光功率为 P_- , 在 LD 内部往返一周后得到了放大, 再次到达 R_2 面左侧时向右传输的光功率为 P_+ , 在 R_2 面右侧向右传输的光功率 P'_+ 在外腔内传播, 在平面镜 R_3 处部分功率被耦合输出为 P_{out} , 再次到达 R_2 面右侧时向左传输的光功率为 P'_- . 这样可以得到

$$\begin{aligned} P_- &= R_2 P_+ + (1 - R_2) P'_-, \\ P'_+ &= R_2 P'_- + (1 - R_2) P_+, \\ P'_- &= R_3 P'_+. \end{aligned} \quad (12)$$

稳态条件下, 增益系数不是很大, 可以近似认为 LD

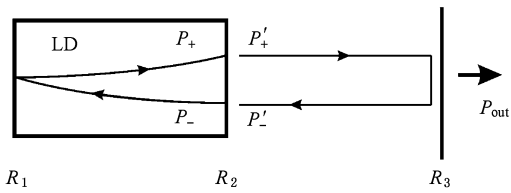


图 2 外腔反馈下半导体激光器内部光功率传输示意图

腔内光功率的放大是线性的,而且 $R_1 \approx 1$,这样腔内光功率近似为

$$P_{int} = P_+ + P_- \quad (13)$$

由式(11)(12)和(13)式得到外腔反馈条件下的输出光功率为

$$P_{out} = (1 - R_3)P'_+ \\ = \frac{(1 - R_2)(1 - R_3)}{1 + R_2 + R_3 - 3R_2R_3} \frac{C}{g_{th}} (I - I_{th}) \quad (14)$$

其中 g_{th} 由外腔条件下的阈值增益公式(3)给出.从(14)式可以看出,外腔反馈对输出功率的影响可以

分为两部分,其一由于阈值电流 I_{th} 和阈值增益 g_{th} 的降低,转化效率获得了提高;其二 R_3 的存在使得有效的输出耦合度降低,又降低了输出功率.

3. 实验结果及分析比较

测量外腔反馈条件下 LD 输出功率的实验装置如图 3 所示 ($p-n$ 结平面内),LD 输出光经过两个柱透镜 L1 和 L2 准直,透镜 L3 的前焦面与 L2 的后焦面重合.镀高反射膜的平面镜 M 放置在 L3 的后焦面上将部分光反射注入回 LD,棱镜 P(HR@812.8nm)放置在 L2 和 L3 的共同的焦平面上,既作为空间滤波器调整反馈注入光的模式,又作为输出耦合镜将腔内激光耦合输出.实验中所用 LD 的发光面积为 $100\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$,端面反射率分别为 $R_1 = 94\%$ 和 $R_2 = 10\%$,发射激光波长 $\lambda = 812.8\text{nm}$ (25°C),LD 腔长为 $l = 300\mu\text{m}$,外腔长度为 $L = 600\text{mm}$.

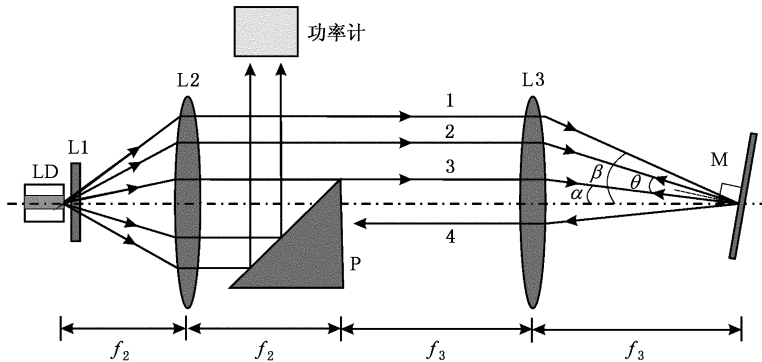


图 3 测量外腔反馈下的 LD 输出功率的实验装置图 其中 L1, L2 和 L3 是透镜, M 是平面镜, P 是棱镜,透镜 L2 和 L3 的焦距分别为 f_2 和 f_3

LD 输出的激光分为两部分,一部分被棱镜耦合输出,另一部分通过透镜 L3 会聚至平面镜 M 处,然后被反射回 LD 形成反馈.注意到在图 3 中到达 M 处的能量并不能完全被反馈注入回 LD,只有在平面镜 M 法线两侧 θ 角范围内(光线 2 和 3 之间)的能量才能被反馈回 LD,其他的光线如光线 1 经平面镜反射后(光线 4)被棱镜拦截而不能得到反馈.试验中可以通过调节平面镜的角度和棱镜的位置来控制反馈光的能量和模式.在外腔输出激光模式比较好的情况下测量了被棱镜耦合输出的能量和通过 L3 到达 M 处的能量比为 4:1.测量了图 3 中所示的角

度分别为 $\theta = 1^\circ, \alpha = 1^\circ, \beta = 3^\circ$,再考虑各光学元件的反射损耗,计算得到的等效的外腔反射率为 $R_3 = 4.5\%$.

实验中发现,由于外腔的反馈注入,LD 输出激光的阈值电流明显下降.图 4 中的空心圆点是没有外腔的情况下 LD 的输出功率曲线,其阈值电流为 420mA,实心圆点是外腔反馈情况下的输出功率,发现其阈值降为 370mA.将上述实验数据代入(14)式,并根据阈值附近有 $g_{th} \propto I_{th}$ 条件成立,得到外腔反馈下的输出功率曲线如图中虚线所示,可见理论计算与实验结果吻合得很好.

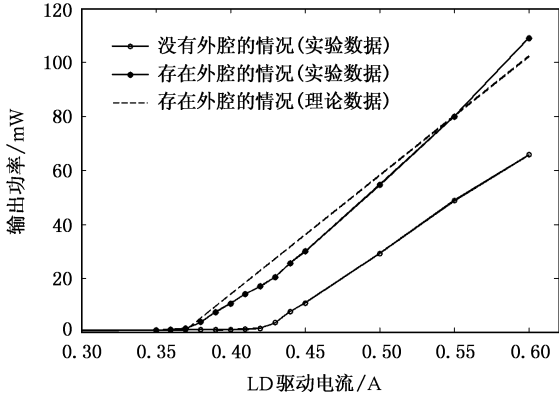


图 4 存在外腔和没有外腔条件下 LD 输出功率的实验数据和理论计算曲线

4. 结 论

通过有效反射系数的引入,由激光腔谐振的自再现条件和腔内光子密度、载流子密度方程,分析了外腔反馈对半导体激光器的阈值增益、输出频率和输出功率等振荡特性的影响.外腔的反馈作用相当于在自再现条件中增加了一个增益因子和一个相位因子,从而改变了激光器的振荡阈值和频率.对输出功率的影响可以分为两部分,一方面阈值电流和阈值增益的降低提高了转化效率,另一方面有效输出耦合度的降低又降低了输出功率.在实验验证中发现,外腔的反馈使 LD 的阈值电流从 420mA 降为 370mA,输出功率的斜率效率获得了提高.根据理论公式计算得到的输出功率曲线与实验结果符合的很好.

- [1] Acket G, Lenstra D, Den Boef A, Verbeek B 1984 *IEEE J. Quantum Electron.* **20** 1163
- [2] Dong R F, Zhang J X, Zhang T C, Zhang J, Xie C D, Peng K C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 462 (in Chinese) [董瑞芳、张俊香、张天才、张靖、谢常德、彭 堃 2001 物理学报 **50** 462]
- [3] Chen J, Wu X, Ge J H, Hermerschmidt A, Eichler H J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 525
- [4] Huang L Y, Luo X S, Fang J Q, Zhao Y B, Tang G N 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 543 (in Chinese) [黄良玉、罗晓曙、方锦清、赵益波、唐国宁 2005 物理学报 **54** 543]
- [5] Jia X H, Wu Z M, Lin X D, Bai X, Xia G Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3680 (in Chinese) [贾新鸿、吴正茂、林晓东、柏 熙、夏光琼 2005 物理学报 **54** 3680]
- [6] Liu C, Ge J H, Chen J 2004 *Chinese J. Laser* **31** 1413 (in Chinese) [刘 崇、葛剑虹、陈 军 2004 中国激光 **31** 1413]
- [7] Wang C L, Wu J, Lin J T 2003 *Chin. Phys.* **12** 1120
- [8] Osmundsen J H, Gade N 1983 *IEEE J. Quantum Electron.* **19** 465
- [9] Kakiuchida H, Ohtsubo J 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 2087
- [10] Ohtsubo J 2005 *Semiconductor Lasers Stability, Instability and Chaos* (Berlin: Springer) p60
- [11] Yariv A 1997 *Optical Electronics in Modern Communications* (New York: Oxford University) p582

Influence of external cavity feedback on the oscillating characteristics of a semiconductor laser^{*}

Liu Chong Ge Jian-Hong[†] Chen Jun

(*The State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China*)

(Received 26 September 2005 ; revised manuscript received 23 December 2005)

Abstract

Through the introduction of effective reflectivity , the influence of external optical feedback on the oscillating characteristics of a semiconductor laser is discussed , such as the threshold gain , laser frequency and output power , according to the self-consistency condition and the photon and carrier density ratio equation. In the experiment , the threshold current of a laser diode decreased from 420mA to 370mA with external cavity feedback and the slope efficiency increased. The output power obtained by theoretical simulation agrees well with the experiment results.

Keywords : semiconductor laser , external feedback , oscillating characteristics

PACC : 4255P , 4260D

^{*} Project supported by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars , State Education Ministry (Grant No. 2004-527).

[†] E-mail : jianhong@zju.edu.cn