

文章编号: 0258-7025(2004)12-1413-04

外腔反馈半导体激光器的损耗和阈值特性研究

刘 崇, 葛剑虹, 陈 军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 通过对半导体激光器(LD)的损耗和阈值电流特性的分析,引入等效反射系数的概念,根据多光束干涉的原理,导出了在外腔反馈作用下 LD 的阈值电流公式。从等效反射系数的推导可以看出,外腔的反馈相当于增大了 LD 一个端面的反射率,减小了损耗,从而使 LD 激光振荡的阈值降低。该公式在外腔长度和激光波长可以比拟的情况下能够准确地分析反馈注入对阈值电流的影响,但是在外腔长度远大于激光波长情况下不再适用。针对实验中外腔长度较大的情况,使用光功率的分析简化了理论模型,得出了与实验结果相吻合的结论,即外腔反馈注入使 LD 出光阈值电流明显降低。

关键词 激光技术;半导体激光器;外腔反馈;阈值电流

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Investigation of Loss and Threshold Characteristics in the Laser Diode with External Feedback

LIU Chong, GE Jian-hong, CHEN Jun

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

Abstract Through the analysis of the loss and threshold characteristics of a laser diode (LD), the threshold current density of LD with external feedback is calculated, according to the theory of multi-beam interference and the definition of equivalent reflection factor. When the length of external cavity approximates to the wavelength of LD, the obtained equation can be used to analyze the influence of the external cavity to the threshold current accurately. When the length of external cavity is much longer than the wavelength of LD, it is out of work. Because in the experiment the external cavity is much longer than the wavelength, the theory model is simplified by analysis to the injected power. The threshold drive current will be reduced obviously for the external feedback. The theoretical results agree well with the experimental findings.

Key words laser technique; laser diode; external cavity feedback; threshold current

1 引 言

在半导体激光器(LD)的诸多应用中,外腔反馈注入对 LD 输出激光的特性有着重要的影响。一方面,它会带来不利的后果,如在光通信、光存储以及各种光测量等应用中产生背景噪音和信息传输能力的减弱^[1];但另一方面,它不仅可以实现 LD 波长连续可调谐的单模输出^[2~5],同时也是一种有效的改善 LD 输出激光光束质量的方法,如在文献[6]中通

过外腔注入获得了 LD 单瓣近衍射极限、窄光谱的输出。

虽然由于外腔反馈注入 LD 的输出特性倍受关注而成为一个研究热点^[7~10],但是其阈值电流特性作为 LD 的一个重要的基本特性却常常被忽略。通过对阈值电流的研究,不仅可以分析 LD 的损耗特性,还可以了解由外腔反馈注入光对 LD 内部的自发辐射以及载流子的产生和复合的影响^[11]。对于

收稿日期:2003-07-28;收到修改稿日期:2003-11-21

基金项目:国家自然科学基金(编号:60278038)资助项目。

作者简介:刘 崇(1978—),男,河南南阳人,浙江大学光电信息工程学系博士研究生,主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail:lch_worm@yahoo.com.cn

外腔作用下的 LD, 可以通过先分析单腔 LD 的阈值电流和损耗的关系, 然后引入等效反射系数, 导出在外腔反馈 LD 的阈值电流公式。在外腔长度远大于激光波长的情况下, 可以通过功率的计算简化理论模型, 获得与实验结果吻合的结论。

2 单腔 LD 的损耗和阈值电流

在没有外腔反馈注入时, LD 的两个解理面之间构成了法布里-珀罗 (F-P) 腔体, 两端面的反射率分别为 R_1 和 R_2 。当光波在腔体内传播时, 产生损耗的因素主要包括: 自由载流子对光的吸收损耗 α_{fc} , 衍射损耗 α_{dif} 和端面输出引入的损耗 $\alpha_T = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$ ^[12], 所以在有源区中光波的总损耗系数为

$$\alpha = \alpha_{fc} + \alpha_{dif} + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (1)$$

当激光的增益 G 等于总的损耗时, 所注入的电流密度就为阈值电流密度^[12]

$$J_{th} = \frac{8\pi n^2 e \omega \cdot \Delta\nu}{Z(T)\lambda^2 \eta} \left(\alpha_{fc} + \alpha_{dif} + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (2)$$

3 外腔作用下的等效反射系数和阈值电流

外腔反馈注入 LD 时, 其结构图可简化为图 1, LD 两端面的反射系数分别为 r_1 和 r_2 , 外腔的作用可以等效为反射系数为 r_3 的平面镜。这样, 外腔中光波的衍射损耗、各光学器件的反射损耗以及由激光输出引入的损耗都可以反映在 r_3 中。下面通过等效反射系数的引入, 导出外腔作用下 LD 的阈值电流公式。

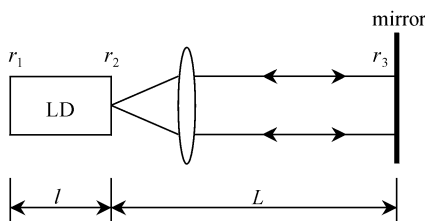


图 1 外腔反馈注入 LD 的等效谐振腔 (l 为 LD 的腔长, L 为外腔的长度)

Fig. 1 Equivalent resonator of LD with external feedback

l is the cavity length of LD and L is the external-cavity length

在图 1 中, 由于外腔的作用, 可以认为 r_2 - r_3 面

组成了一个 F-P 标准具, 使得入射光在 r_2, r_3 面上产生多次反射, 形成多光束干涉。设 r_2 面左侧入射光的复振幅为 A_i , 反射光的复振幅为 A_r , 由多光束干涉原理可以得到

$$A_r = \frac{r_2 + r_3 \exp(i\delta)}{1 + r_2 r_3 \exp(i\delta)} A_i \quad (3)$$

式中 $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nL \cos\theta$ 为多光束干涉时相邻两束光线的光程差。引入等效反射系数的概念, 取 $r_{eff} = A_r/A_i$, 则外腔注入反馈下的 LD 可以等效为一个端面反射率分别为 R_1 和 $R_{eff} = |r_{eff}|^2$ 的单腔 LD。将 R_{eff} 代入(2)式中的 R_2 可得外腔作用下的阈值电流密度

$$J_{th} = \frac{8\pi n^2 e \omega \cdot \Delta\nu}{Z(T)\lambda^2 \eta} \times \left\{ \alpha_{fc} + \alpha_{dif} + \frac{1}{2l} \ln \left[\frac{1}{R_1} \cdot \left| \frac{1 + r_2 r_3 \exp(i\delta)}{r_2 + r_3 \exp(i\delta)} \right|^2 \right] \right\} \quad (4)$$

对于 L 与激光波长 λ 可以比拟 (L 约为几十微米) 的情况, (4) 式可以精确地计算出由外腔长度所引起注入光相位的变化对阈值电流的影响^[10]。但是对于外腔长度远大于激光波长 (L 约为几百毫米) 的情况, (4) 式不再适用, 这时, 可以通过求解 R_2 面两侧的光功率来简化等效反射率的计算。

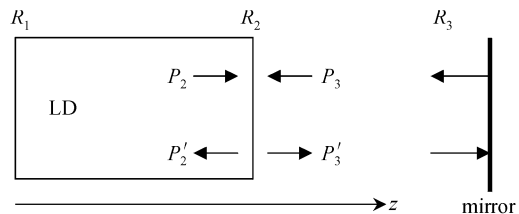


图 2 $L \gg \lambda$ 时等效反射率的计算 (R_2 和 R_1 为 LD 前后端面的反射率, R_3 为平面镜的反射率)

Fig. 2 Calculation of equivalent reflection factor when $L \gg \lambda$

R_2 and R_1 are the reflectivities of the front and back facets of LD, R_3 is the reflectivity of the mirror

如图 2, 在 R_2 面左侧沿 z 轴正向传输的光功率为 P_2 , 沿 z 轴负向传输的光功率为 P'_2 , 在 R_2 面右侧分别为 P_3 和 P'_3 , 这样可以得到

$$\begin{aligned} P'_2 &= R_2 P_2 + (1 - R_2) P_3 \\ P'_3 &= (1 - R_2) P_2 + R_2 P_3 \end{aligned} \quad (5)$$

考虑光波在外腔中的作用有 $P_3 = R_3 P'_3$, 代入(5)式中解得此时的等效反射率为

$$R_{eff} = \frac{P'_2}{P_2} = \frac{R_2 + R_3 - 2R_2 R_3}{1 - R_2 R_3} \quad (6)$$

以 R_{eff} 代替(2)式的 R_2 可得阈值电流密度为

$$J_{th} = \frac{8\pi^2 e \omega \cdot \Delta\nu}{Z(T)\lambda^2 \eta} \times \left[\alpha_{fc} + \alpha_{dif} + \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{1}{R_1} \cdot \frac{1 - R_2 R_3}{R_2 + R_3 - 2R_2 R_3} \right) \right] \quad (7)$$

4 实验结果

实验中所用的装置如图 3 所示,LD 的相关参数如下:发射激光波长 $\lambda = 812.8 \text{ nm}$ (25°C);端面反射率分别为 $R_1 = 94\%$, $R_2 = 10\%$;腔长为 $l = 300 \mu\text{m}$;外腔长度为 $L = 600 \text{ mm}$ 。在具体的计算过程中,由于往往难于单独确定各种内部损耗的大小,所以用 $\alpha_{int} = \alpha_{fc} + \alpha_{dif} = k_0 \sigma / (\epsilon_0 \omega l)^{[12]}$ 来表示损耗的总体作用,其典型值为 $\sim 30 \text{ cm}^{-1}$ 。实验中满足条件 $L \gg \lambda$,因此可用(7)式来计算阈值电流。下面首先分析实验装置中的反馈注入能量,求出 R_3 ,再将理论计算的结果与实验值进行比较。

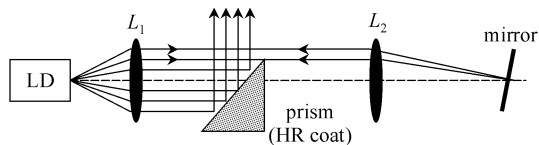


图 3 外腔反馈注入 LD 实验装置简图

Fig. 3 Experiment setup of LD with external feedback

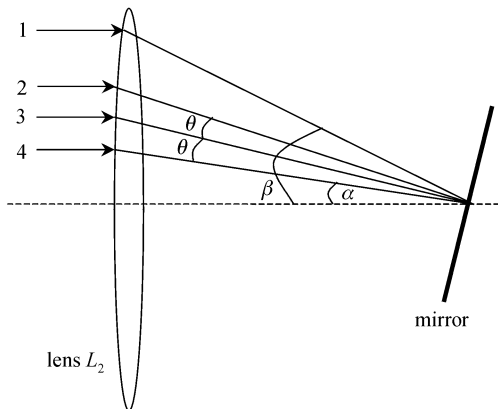


图 4 反馈注入光示意图

Fig. 4 Schematic diagram of external feedback beam

图 3 所示的装置中,棱镜使 LD 发出的光分为两部分,一部分作为输出,测得输出光能量占总能量的 80%;另一部分经平面镜 M 反射后反馈注入,其能量占总能量的 20%。注意到这 20%的能量并不能完全注入 LD,如图 4,光线 1 为 LD 发出的一条边缘光线,光线 4 为经过棱镜的边缘光线,实验中调节平面镜与光线 3 垂直,这样,只有 2,4 之间的光线

(光线 2,4 与光线 3 的夹角均为 θ) 才能注入 LD,这部分光正是所选择反馈注入的模式,而相应于其他模式的光在光线 1,2 之间,这些光线反射后被棱镜拦截而不被注入 LD,从而得到抑制。实验测得 $\theta = 0.5^\circ$, $\alpha = 1^\circ$, $\beta = 3^\circ$,这样,再考虑各光学元件的反射,计算得到实际注入光的能量为总能量的 4.5%。

图 5 给出了实验中外腔反馈注入前后 LD 阈值电流的变化,测得反馈注入前的阈值电流为 420 mA,注入后下降为 380 mA。取 $R_3 = 4.5\%$ 代入(7)式计算得反馈注入后的阈值电流为 387.5 mA,可见理论计算与实验结果符合得很好。

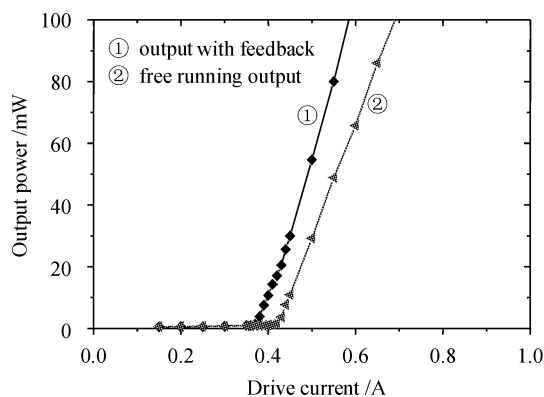


图 5 外腔反馈注入前后 LD 阈值电流的变化

Fig. 5 Threshold current reduction with external feedback

5 结 论

通过对外腔反馈型 LD 的损耗和阈值电流的分析,从等效反射系数的推导可以看出,外腔的反馈相当于增大了 LD 一个端面的反射率,使得由端面投射而引入的损耗减小,从而使 LD 激光振荡的阈值降低。当外腔长度和输出激光波长可以比拟时,等效反射系数的计算必须要考虑外腔引起注入光的相位变化,才能准确地分析其对阈值电流的影响;而当外腔长度远大于激光波长的时候,可以用光功率的反馈来简化等效反射系数的计算。从对实验装置的分析中可以看出,腔长远大于激光波长的时候,简化的理论计算与实验符合得很好。

参 考 文 献

- G. A. Acket, D. Lenstra, A. J. den Boef *et al.*. The influence of feedback intensity on longitudinal mode properties and optical noise index-guided semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(10):1163~1169
- Xia Guangqiong, Wu Zhengmao, Chen Jian-guo. Theoretical model of external cavity semiconductor lasers including the

- reflectivity distribution of fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):301~303
夏光琼,吴正茂,陈建国. 考虑光纤光栅反射率分布的外腔半导体激光器的理论模型[J]. 中国激光, 2002, **A29**(4):301~303
- 3 Zhou Kaiming, Ge Huang, An Guiren *et al.*. Tunable external cavity semiconductor laser with fiber Bragg grating as feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):113~115
周凯明,葛 璜,安贵仁等. 用光纤光栅作外反馈的可调谐外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2001, **A28**(2):113~115
- 4 Ma Junshan, Geng Jianxin, Qu Ronghui *et al.*. Experiment study on all-optical wavelength conversion based on gain saturation effect in a fiber Bragg grating external cavity LD [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6):549~552
马军山,耿健新,瞿荣辉等. 基于光纤光栅外腔半导体激光器增益饱和效应的全光波长转换实验研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(6):549~552
- 5 Zhang Jian, Chen Xuzong, Wang Yiqiu. Analysis on continuous tuning range of tunable diodes lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10):1220~1224
张 剑,陈徐宗,王义道. 外腔半导体激光器激光波长连续可调范围的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(10):1220~1224
- 6 Jianhong Ge, Jun Chen, A. Hermerschmidt *et al.*. Achieving single-lobed far-field patterns of broad area laser diode with external cavity feedback [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6):334~336
- 7 Ge Jianhong, A. Hermerschmidt, Chen Jun *et al.*. Beam quality improvement of broad area laser diode with external cavity feedback [C]. *SPIE*, 2002, **4913**:126~130
- 8 H. Kakiuchida, J. Ohtsubo. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(9):2087~2097
- 9 R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(3):347~355
- 10 J. H. Osmundsen, N. Gade. Influence of optical feedback on laser frequency spectrum and threshold conditions [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(3):465~469
- 11 S. Sivaprakasam, R. Singh. Gain change and threshold reduction of diode laser by injection locking [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **151**:253~256
- 12 Cai Borong, Chen Zheng, Liu Xu. *Semiconductor Lasers* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1995. 40~43, 57~59
蔡伯荣,陈 铮,刘 旭. 半导体激光器[M]. 北京:电子工业出版社, 1995. 40~43, 57~59