

复合外腔半导体激光器的阈值增益研究

田 镔 邹永刚 马晓辉 杨晶晶

长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 对一种复合外腔半导体激光器的阈值增益进行分析,引入等效反射率建立该复合外腔半导体激光器阈值增益系数和阈值电流密度公式。通过数值模拟分析研究了闪耀光栅一级衍射效率、分光板反射率及谐振腔输出端面反射率对阈值增益系数的影响。最后对该复合外腔结构进行了简要分析,探索了进一步优化的可能性。

关键词 激光器;复合外腔半导体激光器;阈值增益;等效反射率;闪耀光栅

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111404

Study on Threshold Gain of Composite External Cavity Semiconductor Laser

Tian Kun Zou Yonggang Ma Xiaohui Yang Jingjing

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The threshold gain of a composite external cavity semiconductor laser is analyzed. By introducing equivalent reflectivity, the formula of threshold gain coefficient and threshold current density of this composite external cavity semiconductor laser are established. By adopting numerical simulation, the influence of the first-order diffraction efficiency of blazed grating, beam splitter reflectivity and resonator output end reflectivity on the threshold gain is discussed and analyzed. Finally, this composite external cavity structure is analyzed and further optimization possibility is explored.

Key words lasers; composite external cavity semiconductor laser; threshold gain; equivalent reflectivity; blazed grating

OCIS codes 140.2020; 140.3410; 140.5960

1 引言

半导体激光器自1962年问世以来,以体积小、电激励、效率高、寿命长、亮度高等优点在材料加工、生物科学、自由空间通信等领域有着广泛应用。然而,边发射半导体激光器的法布里-珀罗(FP)腔结构决定了其出射激光具有多纵模、宽线宽、频率不可选择等特点,限制了该种半导体激光器在一些对单色性有较高要求的基础研究中的应用。为改善其输出光谱特性,人们做了很多探索。1980年,Lang等^[1]参考染料激光器的外腔反馈技术,探索了一种能够同时实现压窄线宽和调谐波长的外腔半导体激光器。之后,外腔半导体激光器以其许多独特优良的性能在很多应用领域得到了肯定,如高精度光谱测试^[2],大气检测^[3],大容量数据储存等。

目前,使用最广泛的两类外腔反馈输出镜为衍射光栅与体布拉格光栅^[4](VBG)。而在商用半导体激光器方面,光栅外腔(EC)选模技术可以使半导体激光器的频率稳定、线宽压窄和波长调谐,是一种改善输出光谱最方便、最经济、最有效的方法。光栅外腔激光器在压缩激光器线宽的同时,可通过光栅角度的精密控制,实现激射波长的精细调谐^[5]。

至今,光栅外腔半导体激光器的研究主要集中在近红外波段,位于蓝紫光波段的研究相对较少,国内的

收稿日期: 2015-05-11; 收到修改稿日期: 2015-06-01; 网络出版日期: 2015-09-24

作者简介: 田 镔(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术及应用方面的研究。

E-mail: springwulitk@sohu.cn

导师简介: 邹永刚(1982—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光电子技术及应用方面的研究。

E-mail: zouyg@cust.edu.cn(通信联系人)

陈少伟等^[5-6]对蓝紫光带宽可调谐光栅外腔半导体激光器进行过相关研究。另外在外腔结构方面,人们亦进行着不断探索,以提升半导体激光器的性能。中科院半导体所^[7]提出了一种窄线宽复合外腔半导体激光器结构,并通过实验证实了该结构对线宽有进一步压窄的作用。

通过对外腔半导体激光二极管(LD)阈值电流特性的研究将有助于进一步分析此种LD的损耗特性以及光反馈对LD内部的自发辐射和载流子的产生、复合的影响,因此对其阈值增益分析是非常必要的。

本文在分析单管LD损耗与阈值增益的关系的基础上,建立外腔系统等效理论模型,探索复合外腔半导体激光器的阈值增益和阈值电流公式,通过分析其中各项参数对阈值增益及阈值电流密度的影响以及该外腔半导体激光器的结构,探索了优化的可能性。

2 单管半导体激光器损耗及阈值电流密度

光波在解理面构成的FP腔内传播时,总损耗系数为

$$g'_{th} = \alpha_i + \alpha_d + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right). \quad (1)$$

阈值电流密度:

$$J_{th} = \frac{8\pi n^2 e \omega \cdot \Delta v}{Z(T) \lambda^2 \eta} \times \left[\alpha_i + \alpha_d + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right], \quad (2)$$

式中 R_1 和 R_2 为谐振腔两端面的反射率, L 为谐振腔的腔长, α_i 为自由载流子对光的吸收损耗, α_d 为衍射损耗, $\alpha_r = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$ 为端面输出产生的损耗^[8]。

3 复合外腔半导体激光器的等效反射率及阈值电流密度

复合外腔LD系统的结构如图1所示,激光在整个系统中的作用过程可分为三部分。第一部分:光对共焦腔的作用;第二部分:光在闪耀光栅与共焦腔间的作用;第三部分:光在谐振腔输出端面和在外腔间的作用。

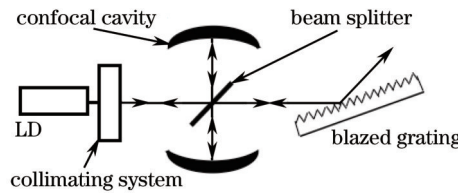


图1 复合外腔LD结构

Fig.1 Structure of composite external cavity LD

第一部分,激光束较细,作用过程中引用单位面积上的光功率即光强 I 进行分析。设初始时入射共焦腔的激光束光强为 I_0 , 共焦腔内分光板的反射率为 R 。则 $(1-R)I_0$ 的光透过分光板射向闪耀光栅, $R I_0$ 的光被分光板反射至上面的腔面再被反射向分光板(假设共焦腔镜片的反射率为100%), $R^2 I_0$ 的光被返回LD。光在共焦腔上下端面间来回传播被反射至闪耀光栅和LD,以此过程进行。极限求和得透射光栅的光强:

$$I_{SUM1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{R^2(1-R)[1 - (1-R)^{2n}]}{1 - (1-R)^2} I_0 + (1-R)I_0 = \frac{2-2R}{2-R} I_0. \quad (3)$$

此时该共焦腔可等效为光强透射率为 $\frac{2-2R}{2-R}$ 的透镜。

第二部分,外腔半导体激光器利用闪耀光栅的一级衍射光进行光反馈。设该光栅的一级衍射效率为 R_g , 则经光栅衍射反馈回共焦腔的光强可表示为 $I_1 = R_g I_{SUM1} = \left(\frac{2-2R}{2-R} \right) R_g I_0$, 记共焦腔透射率为 $T_{con} = \frac{2-2R}{2-R}$, 则反射率为 $R_{con} = \frac{R}{2-R}$, 则光栅与共焦腔可等效于两块反射率不同的平板。

因光栅与共焦腔距离远大于激光波长,可计算从共焦腔左侧透射的光强来计算共焦腔和光栅两者组成系统的等效反射率。在共焦腔左侧透过的叠加光强为

$$I_{\text{lift}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{I_1 T_{\text{con}} \left[1 - (R_{\text{con}} R_g)^n \right]}{1 - R_{\text{con}} R_g} = \frac{I_1 T_{\text{con}}}{1 - R_{\text{con}} R_g}. \quad (4)$$

从总系统的角度可以把共焦腔和光栅等效为一个平板。从共焦腔左侧返回LD光的光强总和 $I_{\text{lift-return}}$ 为光在共焦腔内作用时返回LD的光强 I'_{con} 加上光在光栅与共焦腔之间作用后透过共焦腔射向LD的光强 I_{lift} , 即:

$$I_{\text{lift-return}} = I'_{\text{con}} + I_{\text{lift}}, \quad (5)$$

式中

$$I'_{\text{con}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{R^2 I_0 \left\{ 1 - [(1-R)^{2n}] \right\}}{1 - (1-R)^2} = \frac{R I_0}{2-R}, \quad (6)$$

则

$$I_{\text{lift}} = \frac{2R - R^2 + 4R_g - 8RR_g + 3R^2 R_g}{(2-R)(2-R-RR_g)} I_0. \quad (7)$$

可知共焦腔与光栅等效成的平板反射率为

$$R_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{lift}}}{I_0} = \frac{2R - R^2 + 4R_g - 8RR_g + 3R^2 R_g}{(2-R)(2-R-RR_g)}. \quad (8)$$

第三部分, 该过程属于强反馈方式应考虑多次反射的效应^[9], 则返回谐振腔的光强总和为

$$I_0' = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{I_0 (1-R_2)^2 R_{\text{eff}} \left[1 - (R_2 R_{\text{eff}})^n \right]}{1 - R_2 R_{\text{eff}}} + I_0' R_2 = I_0' R_2 + \frac{I_0' (1-R_2)^2 R_{\text{eff}}}{1 - R_2 R_{\text{eff}}}. \quad (9)$$

由上式可得整个复合外腔半导体激光器系统等效输出端面的反射率为

$$R_{\text{eff}}' = \frac{I_0'}{I_0'} = \frac{R_2 + R_{\text{eff}} - 2R_2 R_{\text{eff}}}{1 - R_2 R_{\text{eff}}}. \quad (10)$$

由此即可表示出该复合外腔系统的阈值增益系数和阈值电流密度分别为

$$g_{\text{th}} = \alpha_i + \alpha_d + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}'} \right), \quad (11)$$

$$J_{\text{th}} = \frac{8\pi n^2 e \omega \cdot \Delta v}{Z(T) \lambda^2 \eta} \times \left[\alpha_i + \alpha_d + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}'} \right) \right]. \quad (12)$$

式中

$$R_{\text{eff}} = \frac{2R - R^2 + 4R_g - 8RR_g + 3R^2 R_g}{(2-R)(2-R-RR_g)}, \quad R_{\text{eff}}' = \frac{R_2 + R_{\text{eff}} - 2R_2 R_{\text{eff}}}{1 - R_2 R_{\text{eff}}},$$

式中 R 为分光板的反射率, R_g 为闪耀光栅的一级衍射效率。作差

$$R_{\text{eff}}' - R_2 = \frac{R_2 + R_{\text{eff}} - 2R_2 R_{\text{eff}}}{1 - R_2 R_{\text{eff}}} - R_2 = \frac{R_{\text{eff}} (1-R_2)^2}{1 - R_2 R_{\text{eff}}} > 0. \quad (13)$$

由(10)式可知在外腔只有光栅的情况下, 则外腔等效反射率为

$$R_{\text{eff}}'' = \frac{R_2 + R_g - 2R_2 R_g}{1 - R_2 R_g}. \quad (14)$$

作差

$$R_{\text{eff}}'' - R_{\text{eff}}'' = \frac{(R_2 - 1)^2 (R_{\text{eff}} - R_g)}{(1 - R_2 R_g)(1 - R_2 R_{\text{eff}})}. \quad (15)$$

而

$$R_{\text{eff}}'' - R_g = \frac{(2-R) \left[(R_g - R)^2 + R - R^2 \right]}{(2-R)(2-R-R_g) R_g} > 0, \quad (16)$$

所以

$$R'_{\text{eff}} - R'_{\text{eff}} > 0. \quad (17)$$

对(10)、(11)、(12)式进行数值模拟(图2中,定义 R 、 R_g 、 R_2 其中的两量为定量,另一为变量,获得变量与 R'_{eff} 的图像关系,取定量时三者依次分别可取0.5、0.2、0.33, $R_1 = 1$, $L = 8$ cm,图3中取值 $\alpha_i + \alpha_d = 0.6$),分析式中分光板反射率 R 、衍射光栅一级衍射效率 R_g 、谐振腔输出端面反射率 R_2 分别对系统外腔等效反射率 R'_{eff} 和阈值增益 g_{th} 的影响,如图2,3所示。

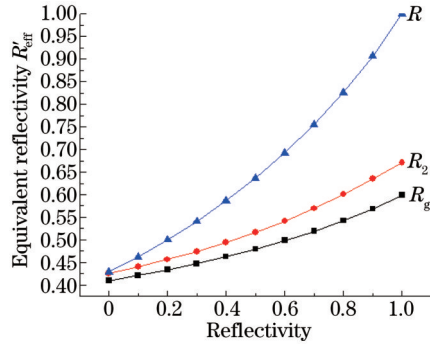


图2 R_2 、 R 、 R_g 与等效反射率 R'_{eff} 的关系

Fig.2 Relationships between R_2 , R , R_g with R'_{eff}

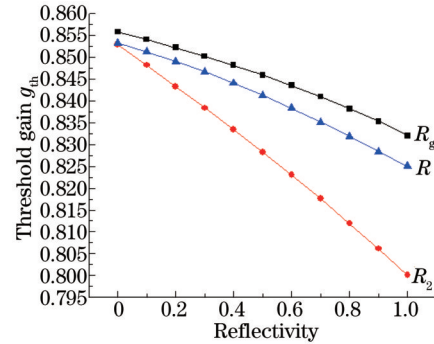


图3 R_2 、 R 、 R_g 与阈值增益 g_{th} 的关系

Fig.3 Relationships between R_2 , R , R_g with g_{th}

由(8)、(11)、(12)、(13)、(17)式及以上两图可以得出以下结论:

1) 对于单管半导体激光器,增加谐振腔长度 L 或一端镀高反膜都有利于减少光在谐振腔面的损耗、降低阈值增益系数及阈值电流密度。而复合外腔的引入等效地增加了端面的反射率 R_2 ,从而减小光在谐振腔面的损耗。

2) 对于外腔结构半导体激光器,基于选择反馈的效果,适当程度地提高分光板反射率 R 或闪耀光栅一级衍射效率 R_g 都可以提高外腔系统的等效反射率,降低阈值增益及阈值电流密度。

3) 相对于单一采用光栅作反馈元件的外腔来说,共焦腔及分光板的引入进一步提升了系统的等效反射率,在实现进一步降低阈值增益及阈值电流密度目标的同时由外腔半导体激光器线宽公式

$$\Delta\nu_f = \Delta\nu \frac{(nL_d)^2}{(1 + \alpha^2)r_3^2 L_c^2} \left[\frac{r_2}{1 - r_2^2} \right]^2 \quad (\Delta\nu_f \text{ 表示外腔半导体激光器的线宽, } r_2 \text{ 表示激光器输出端面的振幅反射率, } r_3^2 \text{ 表示光栅一级衍射效率, } L_c \text{ 表示外腔长度})^{[10]}$$

推知还会进一步地压窄线宽。

4 结构简析

文献报道所采用的Coherent公司的Model216光谱分析仪不能精确地测出已定条件下的线宽^[7],肯定了该复合外腔对线宽的进一步压窄的作用。并由线宽公式及结构特点可知共焦腔的引入提高外腔系统等效反射率的同时增加了外腔有效腔长。

在外腔激光器其他器件选定以后,唯一可改变的是外腔长度,外腔长度大于某一值时,腔长的微小变化对激光器的输出功率影响很小,降低了外腔长度对激光器输出功率稳定性的影响^[10]。但随着外腔长度增加,线宽压窄的同时,由纵模间隔公式 $\Delta\lambda = \lambda^2 / [2(nL_d + L_c)]$ 可知,纵模间隔也会缩小,激光器易发生跳模现象,为避免跳模和输出功率不稳的情况发生,就要求在精确调节外腔长度的同时提高温控设备的调节精度,优化半导体激光器结构及封装方案。

光栅外腔半导体激光器的机械稳定性主要通过光反馈和选模需要光栅的精确调节来实现,此外还需要准直系统的精确准直,这些都需要合理的机械设计、精密的机械加工以及其良好的装配调制来保证整个系统的机械稳定性^[11]。共焦腔以及反光板的引入对此提出了更高的要求。另外,复合外腔属于开放腔,曝露的激光束易受到外界空气湿度、温度的影响产生损耗,因此需要改进封装方法。

综合考虑各个影响复合外腔半导体激光器工作的因素,才能进一步优化该复合外腔激光器,实现控制线宽及纵模间隔、稳定输出功率的目的。

5 结 论

通过引入等效反射率建立该复合外腔半导体激光器的增益系数和阈值电流密度公式,并通过数值模拟,可知增大闪耀光栅一级衍射率可等效地起到增大输出端面反射率的作用,这和相关实验^[12]的结论是一致的;基于选择反馈效果,适当地提高分光板反射率或谐振腔一端镀高反膜可以降低阈值增益及阈值电流密度;共焦腔及分光板的引入相对于原外腔系统提高了输出端面等效反射率,实现了更大程度地降低阈值增益及阈值电流密度并进一步有效压窄线宽的目的,同时验证了文献[7]提出的该复合外腔结构对线宽的进一步压窄的作用的结论;提高相应的辅助设备精度、机械加工及装调水平,可使该复合外腔实现稳定的输出,达到进一步优化的目的。

参 考 文 献

- 1 R Lang, K Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- 2 Johan Hult, Lain S Burns, Clemens F Kaminski. Wide-bandwidth mode-hop-free tuning of extended cavity GaN diode lasers[J]. Appl Opt, 2005, 44(18): 3675-3685.
- 3 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208003.
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气检 CO_2 测仪[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208003.
- 4 Feng Jiansheng, Yuan Xiao, Xiong Baoxing, *et al.*. Wavelength stabilization and linewidth narrowing of laser diode for pumping Cs vapor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0514001.
封建胜, 袁 孝, 熊宝星, 等. 用于抽运铯蒸气激光器的半导体激光器波长稳定与线宽窄化研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0514001.
- 5 Chen Shaowei, Lü Xueqin, Zhang Jiangyong, *et al.*. Blue-violet broadly tunable grating-coupled external cavity semiconductor laser[J]. Laser&Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 111405.
陈少伟, 吕雪芹, 张江勇, 等. 蓝紫光宽带可调谐光栅外腔半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 111405.
- 6 Li Bin, Tu Pin, Xu Yongyue, *et al.*. Narrow linewidth diode laser with grating external cavity in 405 nm Band[J]. Laser&Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031404.
李 斌, 涂 嫻, 徐勇跃, 等. 405 nm 波段光栅外腔窄线宽蓝紫光半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031404.
- 7 Jiang Pengfei, Zhao Weirui, Zhang Jingjuan, *et al.*. A narrow linewidth external cavity semiconductor laser[J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 160-162.
江鹏飞, 赵伟瑞, 张静娟, 等. 窄线宽的外腔半导体激光器[J]. 激光技术, 2004, 28(2): 160-162.
- 8 Cai Borong, Chen Zheng, Liu Xu. Semiconductor Laser[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.
- 9 KaKiuchida Hiroshi, Junji Ohtsubo. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback[J]. IEEE J Quantum Electroic, 1994, 30(9): 2087-2097.
- 10 Lei Shunping, Xue Lifang, He Jun, *et al.*. Output characteristics of littrow-type grating external cavity semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(3): 031402.
雷顺平, 薛丽芳, 何 军, 等. Littrow 型光栅外腔半导体激光器的输出特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 031402.
- 11 Yao Zhenyu, Lü Xueqin, Zhang Baoping. Research progress of GaN-based grating external cavity semiconductor lasers [J]. Micronanoelectronic Technology, 2003, 50(10): 609-614.
姚真瑜, 吕雪芹, 张保平. GaN 基光栅外腔半导体激光器的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2003, 50(10): 609-614.
- 12 Liu Chong, Ge Jianhong, Chen Jun. Investigation of loss and threshold characteristics in the laser diode with external feedback[J]. Chinese J Lasers, 2004, 12(12): 1413-1415.
刘 崇, 葛剑虹, 陈 军. 外腔反馈半导体激光器的损耗和阈值特性研究[J]. 中国激光, 2004, 12(12): 1413-1415.

栏目编辑: 宋梅梅