

Littrow 型光栅外腔半导体激光器的输出特性分析

雷平顺^{1,2} 薛力芳² 何 军² 曾华林² 付跃刚¹ 周 燕²

(¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130021;)
(² 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 在讨论光栅外腔半导体激光器理论的基础上,对影响 Littrow 型光栅外腔半导体激光器输出功率和线宽压窄的各种因素进行了数值模拟分析。研制了单纵模高质量激光输出的 Littrow 型光栅外腔半导体激光器,在工作电流为 400 mA 时,连续输出功率达到 180 mW,线宽优于 1 MHz。

关键词 激光技术;外腔半导体激光器;输出功率;线宽压窄

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.031402

Output Characteristics of Littrow-Type Grating External Cavity Semiconductor Lasers

Lei Pingshun^{1,2} Xue Lifang² He Jun² Zeng Hualin² Fu Yuegang¹ Zhou Yan²

(¹ College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130021, China)
(² Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The theory of grating external cavity semiconductor lasers is discussed, and the influences of different factors on the output power and linewidth reduction of the Littrow-type external cavity semiconductor lasers are numerically simulated. The Littrow-type grating external cavity semiconductor laser is set up, and single longitudinal mode and highly-equality laser output is realized. The continuous output power is achieved with 180 mW at working current of 400 mA and the spectrum linewidth is less than 1 MHz.

Key words laser technique; external cavity diode laser; output power; linewidth reduction

OCIS codes 140.2020; 140.5960; 140.3570

1 引言

外腔半导体激光器因其具有结构紧凑、效率高、寿命长、光谱特性优良且波长可调谐等特点而受到广泛关注^[1~6]。对于激光器来说,功率和频率的稳定性是非常重要的技术指标。通常都是采取精密的机械结构、温控技术和稳频技术来实现激光的稳定输出。但是,对于外腔半导体激光器来说,如果器件的参数选择不当,多么精密的措施都无法输出稳定的激光。目前,外腔半导体激光器的输出功率一般在100 mW以下^[6,7],不能满足远距离振动测量的要求,且价格昂贵。本文提出了外腔半导体激光器研制过程中器件参数的选择方案,成功研制了高功率、窄线宽、稳定激光输出的外腔半导体激光器。

2 Littrow 型外腔半导体激光器

Littrow 型光栅外腔半导体激光器的结构^[6,7]如图 1 所示。半导体激光器产生的光束经准直透镜准直

收稿日期: 2010-08-20; **收到修改稿日期**: 2010-10-31

基金项目: 第二批中国博士后科学基金特别资助金(200902129)资助课题。

作者简介: 雷平顺(1980—), 硕士研究生, 主要从事外腔半导体激光器及光学设计等方面的研究。

E-mail: leipingshun@semi.ac.cn

导师简介: 周 燕(1972—), 副研究员, 主要从事光电成像及光电信号检测等方面的研究。E-mail: zhouyan@semi.ac.cn (通信联系人)

后,经闪耀光栅发生衍射,衍射产生的一级衍射光原路反馈回激光器有源区,光栅与激光二极管的反射端面构成了新的谐振腔,零级光作为激光输出。微调闪耀光栅的转角能使反馈光的中心波长发生变化,从而改变激光器的谐振波长。

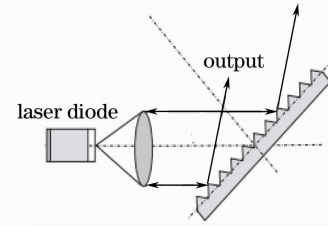


图1 Littrow型外腔半导体激光器结构示意图
Fig.1 Littrow type external cavity semiconductor diode

3 各种因素对 Littrow 外腔半导体激光器输出特性的影响

3.1 输出功率

图2为外腔半导体激光器的结构图,其中 R_1, R_2 和 R_3 分别为激光二极管两个端面的反射率和闪耀光栅的衍射效率, L_d 和 L_e 分别为激光器内、外腔的腔长。在稳态条件下,带外腔反馈的半导体激光器的输出功率可以从载流子密度速率方程推导而得^[5,6]:

$$P = \nu \frac{\Omega}{G_{th}} (I - I_{th}), \quad (1)$$

式中 ν 是由激光器器件参数决定的系数,表示为

$$\nu = \frac{\Gamma \epsilon h}{4\pi \tau_M q}, \quad (2)$$

式中 Γ 为制约因子; ϵ 为注入电流的转换效率; h 为普朗克常量; τ_M 是由反射损耗决定的光子寿命; q 为电荷常量。 Ω 和 G_{th} 分别为振荡频率和阈值增益,可以表示为

$$G_{th} = \Gamma_0 + \frac{2}{\tau_d} g(r_3, \tau_e, \Omega), \quad (3)$$

$$\Omega = \omega_N + \frac{1}{\tau_d} \phi(r_3, \tau_e, \Omega), \quad (4)$$

式中 $\Gamma_0 = \Gamma_w + \frac{2}{\tau_d} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right)$ 为不加外腔时的腔损, g 和 ϕ 可表示为

$$g(r_3, \tau_e, \Omega) = \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{1 + 2r_2 r_3 \cos(\Omega \tau_e) + (r_2 r_3)}{1 + 2r_3 / r_2 [\cos(\Omega \tau_e)] + (r_3 / r_2)^2} \right\}, \quad (5)$$

$$\phi(r_3, \tau_e, \omega) = \arctan \left\{ \frac{(r_2 r_3 - r_3 / r_2) \sin(\omega \tau_e)}{1 + r_3^2 + (r_2 r_3 - r_3 / r_2) \cos(\omega \tau_e)} \right\}. \quad (6)$$

式中 r_1, r_2, r_3 分别为激光器端面及光栅表面的振幅反射效率。

对上面各式综合利用 Matlab 和 Origin 数值分析软件,分析各种因素对光栅外腔半导体激光器输出功率的影响如图3所示。从图中可以看出,外腔半导体激光器的输出功率与激光二极管出射端的反射率 R_2 和外腔长度 L_e 成反比,与闪耀光栅衍射效率 R_3 成正比。当激光器各器件选定以后,唯一可以改变的是外腔长度。从图3(b)中可见当激光器的外腔长度大于55 mm时,腔长的微小变化对激光器的输出功率影响很小,从而降低了外腔长度对激光器输出功率稳定性的影响。

3.2 线宽压窄

光栅外腔半导体激光器可以有效地压窄线宽,主要表现在:1)加置外腔相当于大幅度的增大激光器的有效腔长,从而使线宽变窄;2)引入反馈,将增大受激辐射,从而抑制自发辐射,使激光线宽变窄。

外腔半导体激光器的线宽为^[5,8,9]:

$$\Delta \nu_l = \frac{\Delta \nu}{(1 + \sqrt{1 + \alpha^2 X \cos \Delta \phi})^2}, \quad (7)$$

式中 $\Delta \nu$ 为无外腔时激光器的线宽, α 为半导体激光器的线宽加宽因子, X 称为反馈因子,可表示为

$$X = \frac{1 - r_2^2}{r_2} r_3 \frac{\tau_e}{\tau_d}, \quad (8)$$

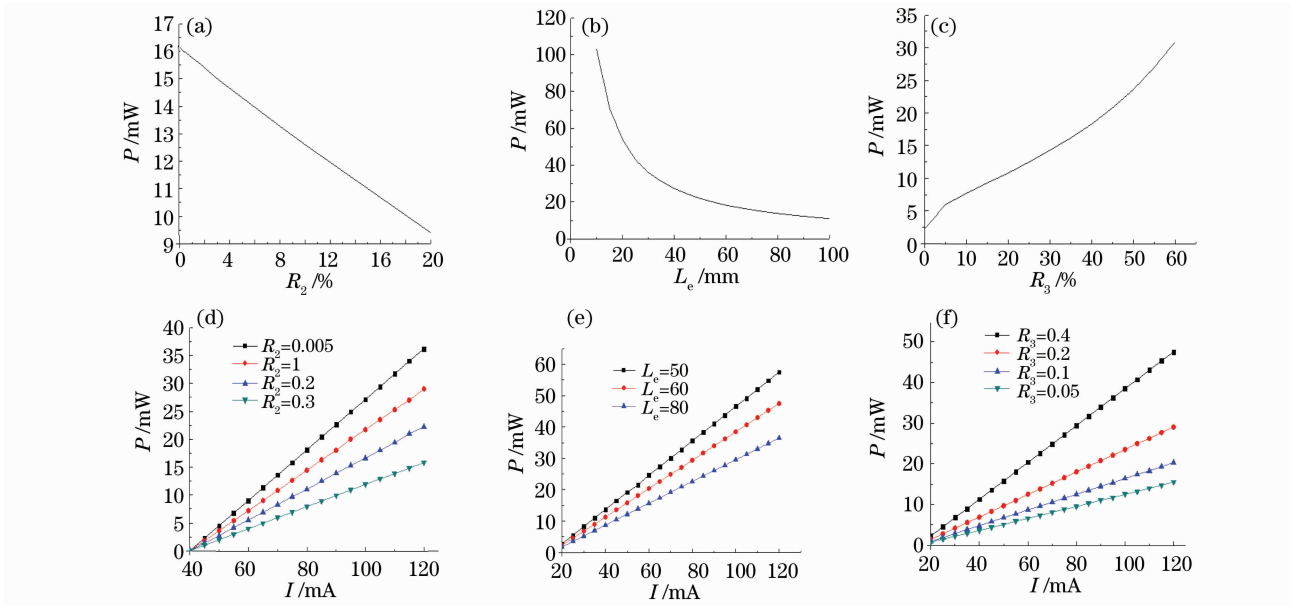


图3 各种因素对激光器输出功率的影响

Fig. 3 Influences of different factors on the output power

式中 τ_d 为光子在有源区内的渡越时间, τ_e 为光子在外腔内的渡越时间, $\Delta\phi = \phi_0 - \arctan \alpha$ 为外腔反馈元件上产生的相移。

在相位匹配条件下, 即 $\cos\Delta\phi = 1$ 时, 可得到最窄线宽

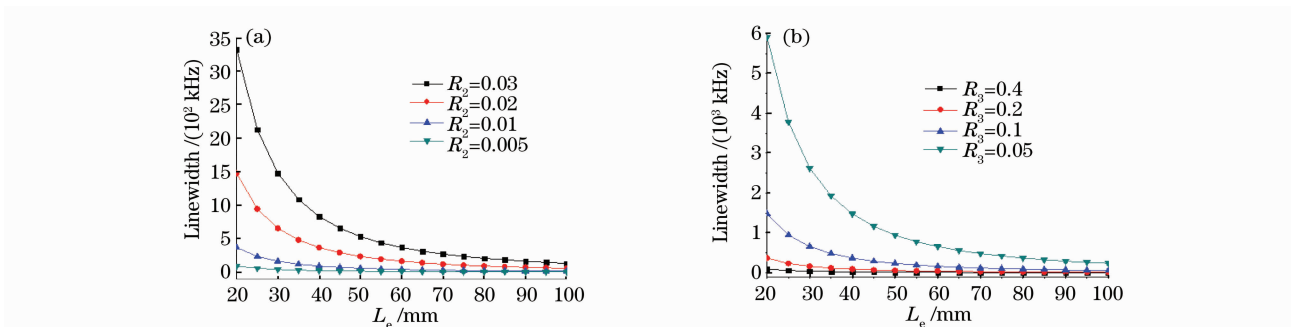
$$\Delta\nu_f = \frac{\Delta\nu}{(1 + \sqrt{1 + \alpha^2 X})^2}. \quad (9)$$

在一般情况下, (9) 式中的分母远大于 1, 因此可近似为

$$\Delta\nu_f = \frac{\Delta\nu}{(1 + \alpha^2) X^2} = \Delta\nu \frac{(nL_d)^2}{(1 + \alpha^2) r_3^2 L_e^2} \left(\frac{r_2}{1 - r_2^2} \right)^2. \quad (10)$$

由(10)式可知, 在其他各量保持不变的情况下, 外腔半导体激光器的线宽 $\Delta\nu_f$ 与光栅的一级衍射效率 R_3 (即 r_3^2) 成反比, 与外腔长度 L_e 的平方成反比, 因此增大 R_3 和外腔长度 L_e 都能有效地压窄线宽。由于外腔半导体激光器的外腔长度要比半导体激光器的本征腔长大得多, 因此从理论上讲, 激光的线宽可以被压窄几个数量级, 达到千赫兹水平。

图4为各种因素对外腔半导体激光器线宽压窄的影响, 从图中可以看到激光二极管出射端面的反射率越低、闪耀光栅衍射效率越高、对激光器压窄线宽越有利, 当外腔长度小于 55 mm 时, 线宽对外腔长度的变化特别敏感, 这对激光器稳频不利。当外腔长度大于 55 mm 时, 外腔长度对压窄线宽不明显。但是当外腔长度太长时, 由纵模间隔公式 $\Delta\lambda_c = \lambda^2 / [2(nL_d + L_e)]$ 可知, 纵模间隔会变小, 激光器容易发生跳模现象。

图4 R_2 (a), R_3 (b) 分别取不同值时, 腔长与线宽的关系Fig. 4 Relation between length of external-cavity and linewidth with different R_2 (a) and R_3

4 Littrow 型外腔半导体激光器的研制

根据上面的分析和项目要求,激光二极管选用海特光电有限责任公司生产的中心波长为 980 ± 5 nm,线宽小于 2 nm,阈值电流 165 mA,最大输出功率为 300 mW 的激光二极管。激光二极管发散角 $48^\circ \times 10^\circ$,输出光斑大小为 $50 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,有源区长度 $200 \mu\text{m}$,激光二极管出射端镀 99.5% 的增透膜。透镜选用 Thorlabs 公司生产的焦距为 5 mm ($NA=1$) 和 25 mm ($NA=0.8$) 的柱面镜分别对激光二极管的垂直和水平方向进行准直,准直后的光束准直度 $0.2 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$ (ZEMAX 仿真结果为 $0.158 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$),光斑大小 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。闪耀光栅选用 Thorlabs 公司生产的 1800 line/mm 闪耀光栅,设计波长为 500 nm,闪耀角 $26^\circ 44'$ 。该闪耀光栅中心波长 980 nm,其一级衍射效率约为 40%。并且闪耀光栅的一级衍射效率随着入射光波长的变化而比较平缓,这一点保证了激光器在调谐过程中的功率稳定性。外腔长度取 60 mm。

在工作温度为 23°C 时,对实验搭建的光栅外腔半导体激光器进行了测试: P - I 曲线如图 5 所示,激光器阈值电流显著降低(从 165 mA 降至 118 mA),连续输出功率达到 180 mW 以上。在工作电流 400 mA 时,用安立公司的 MS9710B 光纤光谱仪测得激光器加外腔前后的光谱曲线如图 6 所示,由于外腔有很好的选模作用,激光器单纵模输出。用相干公司的 Model 216 F-P 光谱分析仪测试线宽如图 7 所示,其线宽优于 1 MHz,在连续工作 6 h 时间内,通过示波器可以清楚地反映出激光器工作于稳定的单纵模状态。

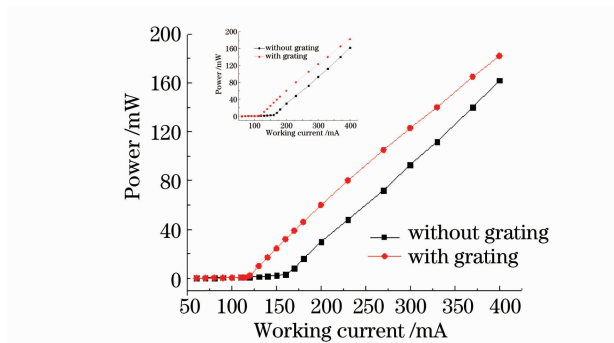


图 5 激光二极管加外腔前后的 P - I 曲线

Fig. 5 Output power current characteristics without grating and with grating

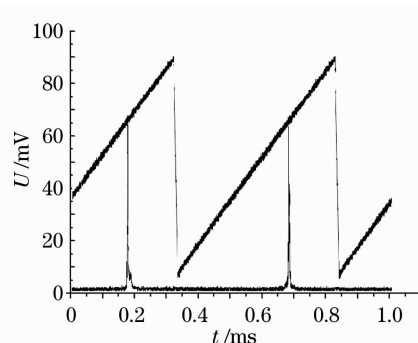


图 6 光谱分析仪测量激光器线宽

Fig. 6 Testing result of the spectrum analyser

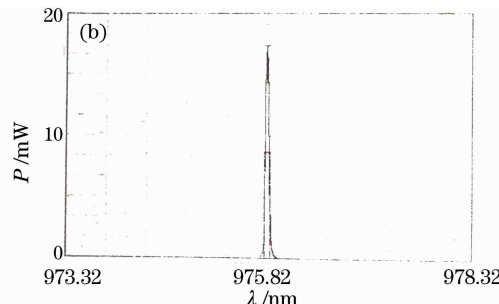
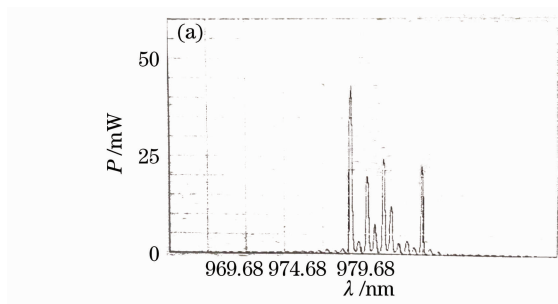


图 7 激光二极管加外腔前(a)后(b)的光谱曲线图

Fig. 7 Spectral curves without (a) and with (b) grating

5 结 论

通过对激光器输出功率和线宽压窄的数值模拟分析,成功研制了高功率、窄线宽的 Littrow 型外腔半导体激光器。配以精密的电流源和温控系统,实现了连续输出功率 180 mW,线宽优于 1 MHz 的激光输出。

参 考 文 献

- 1 Bob Shine. Tunable diode lasers stand up to research and commercial applications [J]. *Photonics Spectra*, 1999, **33**(1): 102~105
- 2 Ge Jianhong, Xiang Zhen, Liu Chong *et al.*. Investigation of beam quality of external cavity laser diodes [J]. *Chinese J.*

- Lasers*, 2006, **33**(12): 1061~1064
葛剑虹, 项震, 刘崇等. 外腔半导体激光器的空间模式特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1061~1064
- 3 Bo Baoxue, Gao Xin, Qiao Zhongliang *et al.*. Characteristics of high power volume-Bragg-grating external cavity semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 501~504
薄报学, 高欣, 乔忠良等. 大功率体光栅外腔半导体激光器的输出特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 501~504
- 4 Guan Hua, Huang Guilong, Xuang Xueren *et al.*. Construction of the tunable diode laser based on Littrow configuration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 33~36
管桦, 黄贵龙, 黄学人等. 基于 Littrow 结构的可调谐半导体激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 33~36
- 5 Jiang Pengfei. Study on the Spectral Characteristics of Grating External-Cavity Semiconductor Lasers [D]. Beijing: Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences, 2006
江鹏飞. 光栅外腔半导体激光器的光谱特性研究:[D]. 北京:中国科学院半导体研究所, 2006
- 6 B. Mroziewicz. External cavity wavelength tunable semiconductor laser-a review [J]. *Opto-Electronics Review*, 2008, **16**(4): 347~366
- 7 Li Liping, Xiong Guisheng, Chen Jingbiao. Commercialized series of external cavity diode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 54~57
李利平, 熊桂生, 陈景标. 首批系列化国产外腔半导体激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 54~57
- 8 Jiang Pengfei, Zhou Yan, Xie Fuzeng. Study of blaze grating feedback external-cavity semiconductor laser with narrow linewidth [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 869~878
江鹏飞, 周燕, 谢福增. 闪耀光栅外腔反馈压窄半导体激光器线宽技术的研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(6): 869~878
- 9 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Linewidth-narrowed, tunable laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 751~754
苏宙平, 楼祺洪, 董景星等. 激光二极管阵列的窄线宽、可调谐输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 751~754