

文章编号: 0253-2239(2007)10-1821-6

体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性研究

辛国锋 程 灿 瞿荣辉 方祖捷 皮浩洋 陈高庭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 用体布拉格光栅(VBG)作为反馈元件与瓦级半导体激光器(LD)以及快轴准直柱透镜构成一个可以将半导体激光器的工作波长稳定在体布拉格光栅布拉格波长处的外腔激光器。测量了体布拉格光栅外腔激光器的波长稳定性与其工作电流、热汇温度、激光束准直装置等因素的关系。分析了波长稳定效果与半导体激光器增益谱特性、外腔结构参量等因素的关系。研究表明,在相同的工作电流、热汇温度下,当准直柱透镜直径为 0.4 mm 时的波长稳定效果较好;在此情况下,当热汇温度控制在 30 °C,工作电流从 0.5 A 增加到 1.5 A 的测量范围内,以及当工作电流固定在 1.5 A,热汇温度从 20 °C 增加到 35 °C 时,测得的光谱特性表明,半导体激光器的工作波长可以很好地稳定在体布拉格光栅的布拉格波长处。与该激光器在同样条件下自由运转的光谱比较,可以看到,自由运转激光波长与体布拉格光栅的布拉格波长差值小于 2.6 nm 情况下,可以获得很好的波长稳定效果。实验也表明,当该值大于 4.8 nm 时波长稳定效果变差。

关键词: 激光器; 半导体激光器; 体布拉格光栅; 外腔; 波长稳定

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Study of Spectral Characteristics of External-Cavity Semiconductor Laser a Volume Bragg Grating

Xin Guofeng Cheng Can Qu Ronghui Fang Zujie Pi Haoyang Chen Gaoting

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: An external-cavity semiconductor laser was built by using a semiconductor laser, collimating cylindrical column lens for fast axis beam and a volume Bragg grating (VBG) as a feedback element to get semiconductor lasers wavelength locked to the Bragg wavelength of the VBG. Its spectral characteristics varied with pump current, heat-sink temperature and different beam collimation optics were measured experimentally. The dependence of the spectral stabilization on gain spectrum of the laser and the parameters of the external cavity were analyzed. The results indicated that good wavelength stabilization could be obtained when a collimating cylindrical lens with diameter of 0.4 mm was used. In the case semiconductor lasers wavelength was measured to be locked at the Bragg wavelength of VBG in the driving current range from 0.5 A to 1.5 A when the heat-sink temperature kept at 30 °C, and in the temperature range between 20 °C and 25 °C when the driving current applied at 1.5 A. Compared with spectra of the semiconductor laser at free running, it means that wavelength stabilization can be obtained when difference between the VBG peak and the laser wavelength at free running is smaller than 2.6 nm. The experiment showed also that wavelength stabilization became degraded when the difference increased to larger than 4.8 nm.

Key words: lasers; semiconductor laser; volume Bragg grating; external cavity; wavelength stabilization

1 引 言

近几年来,大功率宽条半导体激光器(LD)在固体激光器抽运光源方面的应用迅速增长,大大促进了激光技术及其各种应用的发展。作为抽运源,首先要求半导体激光器的工作波长对准固体工作介质

的吸收谱线,这是全固化激光器稳定和高效工作的基础。然而半导体激光器光谱随温度和工作电流的变化比较大,光谱线宽比较宽。因此,稳定半导体激光器的发射波长、压缩其光谱线宽^[1,2],成为人们研究的一个重要课题。半导体激光器的许多直接应

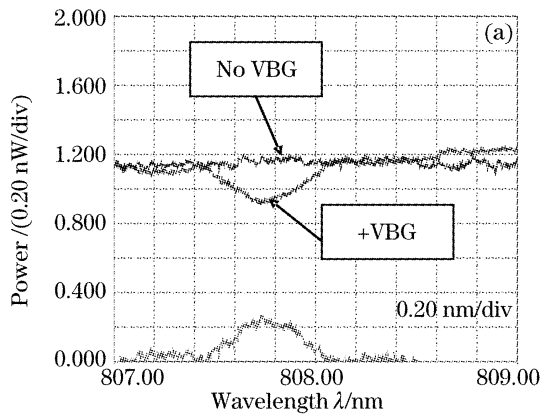
作者简介: 辛国锋(1975—),男,河北灵寿人,博士,主要从事半导体光电器件的设计、研制及特性分析等方面的研究。

E-mail: gfxin@siom.ac.cn

收稿日期: 2007-01-05; 收到修改稿日期: 2007-03-08

用,也面临着同样的课题。半导体激光器的光谱特性及其稳定技术已有多年的研究,其中大量工作是涉及通信和信息领域的应用,在半导体激光器单纵模、窄线宽和稳频运转方面取得了许多重要成果^[3]。但是一般输出功率不高,不适合在大功率宽面半导体激光器中采用。近年来,体布拉格光栅(VBG)被用于大功率半导体激光器的波长稳定和光谱压缩,取得了明显的效果^[1,2,4]。体布拉格光栅一般采用激光全息技术,在特种光敏玻璃的一个方向上制作折射率周期性调制^[5]。当光波沿着该方向传输时,如果满足布拉格衍射条件,就会发生选频反射。将其垂直于光束安置在半导体激光器芯片的外部,构成一个外腔。在外腔选频发射的作用下,激光器的输出波长就被稳定在这一布拉格波长上。

本文采用体布拉格光栅作为波长选择元件,实现了大功率宽面半导体激光器的波长稳定和带宽压缩。测量、分析了体布拉格光栅的反射谱特性;测量了不同工作电流、不同热汇温度下的波长稳定效果;结合半导体激光器增益谱随温度和工作电流变化机理,对波长稳定的工作范围进行了分析;讨论了外腔结构几个主要参量的设计和控制。



2 器件结构和实验装置

体布拉格光栅外腔激光器的结构如图 1 所示。在实验中,选用 C-Mount 封装、条宽为 150 μm 的商用半导体激光器,并用半导体致冷器 TEC 对其进行控温。针对半导体激光光束在平行和垂直于 p-n 结平面有很大的不对称性,实验中采用几种直径小于 1 mm 的柱面镜对快轴方向的发散光束进行压缩。

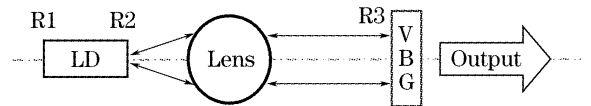


图 1 实验器件示意图

Fig.1 Experimental setup

体布拉格光栅是 Newport 公司的产品。其厚度为 0.62 mm,高度为 1.5 mm,长度 12 mm。测试了该光栅的透射特性,如图 2(a)和图 2(b)所示。图 2(a)中最下面的曲线为体布拉格光栅插入前后的透射功率之差。可见,该体布拉格光栅的峰值位于 807.8 nm,峰值光谱透射率 $T=80\%$,反射线宽(FWHM)为 0.4 nm。体布拉格光栅材料两端面镀了 800 nm 波段的减反膜,图 2(a)显示出,在反射带外的透射率良好。

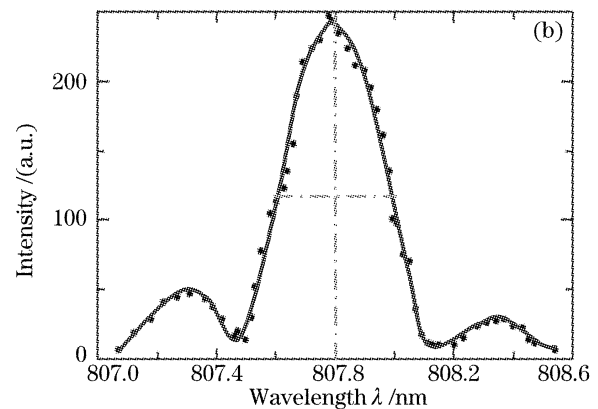


图 2 体布拉格光栅透射特性(a)及其透射谱测试及拟合曲线(b)

Fig.2 Transmission characteristics (a) and curve and measured transmission spectra (b) of the VBG

图 2(b)为根据图 2(a)计算的体布拉格光栅反射谱。可以看到,它具有典型的一维布拉格衍射光栅特征。在光波垂直于体布拉格光栅的情况下,光栅反射率的峰值波长满足条件: $\lambda_B = 2 \bar{n} \Lambda$,式中 Λ 为体内光栅的周期, \bar{n} 为光栅材料的平均折射率。由文献^[5]和一维布拉格光栅的基本理论,体布拉格光栅的反射谱可以描述为

$$R(\Delta\lambda) = \frac{\sinh^2(\sqrt{1 - \Delta\lambda^2/\mu^2} \pi t \delta n/\lambda)}{\cosh^2(\sqrt{1 - \Delta\lambda^2/\mu^2} \pi t \delta n/\lambda) - \Delta\lambda^2/\mu^2}, \quad |\Delta\lambda| \leq \mu \quad (1a)$$

$$R(\Delta\lambda) = \frac{\sin^2(\sqrt{\Delta\lambda^2/\mu^2 - 1} \pi t \delta n/\lambda)}{\Delta\lambda^2/\mu^2 - \cos^2(\sqrt{\Delta\lambda^2/\mu^2 - 1} \pi t \delta n/\lambda)}, \quad |\Delta\lambda| \geq \mu \quad (1b)$$

式中 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_B$, $\mu = \lambda_B \delta n / (2 \bar{n})$, δn 为光栅折射率的调制幅度, t 为光栅厚度。由(1a)式可得峰值光谱反射率为

$$R(0) = \tanh^2(\pi t \delta n / \lambda_B), \quad (2a)$$

由(1b)式可得反射谱主瓣两边第一个零点的位置为

$$\Delta\lambda_{\pm\pi} = \frac{\lambda_B}{2\bar{n}} \sqrt{\delta n^2 + \frac{\lambda_B^2}{t^2}} \approx \frac{\lambda_B^2}{2\bar{n}t}, \quad (2b)$$

最后一个约等式在 $\delta n \ll \lambda_B/t$ 的情况下成立。

将实验测得的峰值反射率 20% 代入(2a)式, 可得到光栅的折射率调制幅度为 $\delta n=0.0002$ 。图 2(b) 显示中心峰值两侧第一个零点间的谱宽为 $2\Delta\lambda_{\pi} = 0.65 \text{ nm}$ 。由(2b)式可以计算得到, 体布拉格光栅材料的折射率约为 1.62。根据这些实验参量, 计算了体布拉格光栅的理论反射光谱曲线, 如图 3 所示。

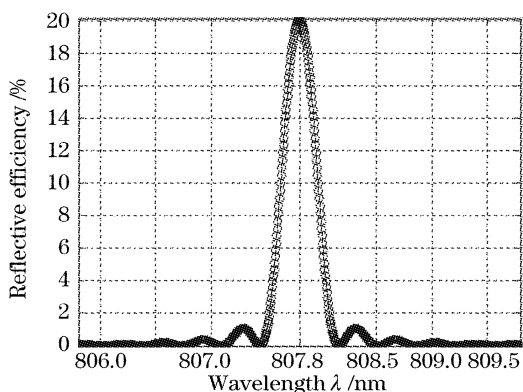


图 3 理论计算的体布拉格光栅反射谱

Fig. 3 Theoretical reflective spectrum of the volume Bragg grating

体布拉格光栅的光谱特性是光波入射角度的函数, 根据布拉格衍射条件, 反射峰值位置应满足条件: $2k\cos\theta = 2\pi/\bar{n}\Lambda$, 式中 k 为波矢。因此, 峰值反射率也是入射角度的函数。图 4 为根据测试参量计算的峰值波长下反射率随入射角变化的关系。可见在 $\pm 1^\circ$ 的角度内, 仍可保持有峰值幅度 70% 的反射率。在光束准直和体布拉格光栅方位调整的设计中, 应当考虑反射谱的这一空间特性。

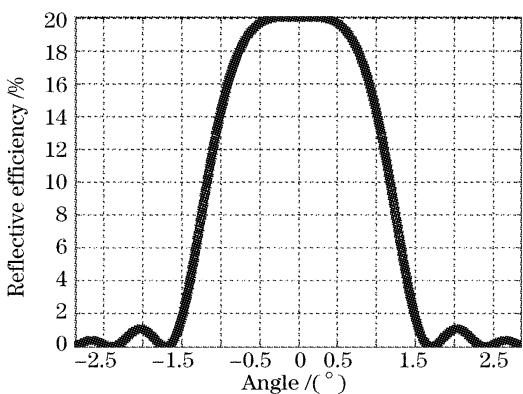


图 4 反射率与角度的关系

Fig. 4 Relationship of reflectance and angle

3 实验结果

实验用一个键合在 C-mount 上的宽条半导体激

光器, 经过一个柱面镜(大直径光纤)准直, 与具有上述特性的体布拉格光栅耦合, 构成一个外腔激光器。该器件在构成外腔前、后 P-I 曲线如图 5 所示, 加直径 0.4 mm 的柱面镜准直后输出功率为 1.08 W (1.5 A), 斜率效率为 0.97 W/A。构成体布拉格光栅外腔后, 输出功率为 0.997 W (1.5 A), 斜率效率为 0.89 W/A。虽然所采用的准直柱面镜尚未进行优化, 外腔的能量效率还是比较满意的。

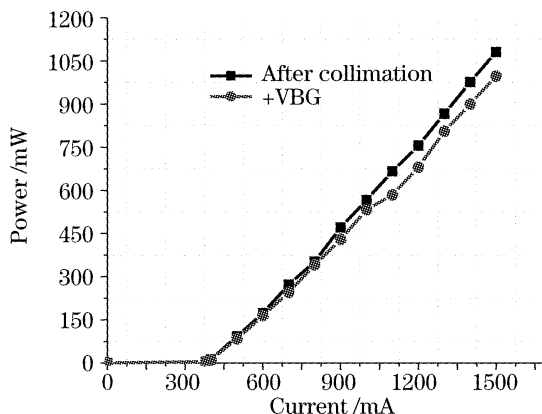


图 5 准直和加体布拉格光栅后的 P-I 特性曲线

Fig. 5 P-I curve after collimation and adding volume Bragg grating

3.1 不同工作电流下体布拉格光栅外腔半导体激光器的光谱特性

实验中 C-mount 控温在 30°C 。构成体布拉格光栅外腔前, 半导体激光器光谱随工作电流的变化如图 6 所示。当工作电流从 0.5 A 上升到 1.5 A 时, 波长从 805.0 nm 增加到 807.2 nm, 红移 2.2 nm。当加体布拉格光栅形成外腔后, 半导体激光器光谱随工作电流的变化如图 7 所示, 峰值波长稳定在体布拉格光栅的布拉格波长 807.8 nm 处。在其它热汇温度下, 如 25°C , 得到了同样的波长稳定效果。

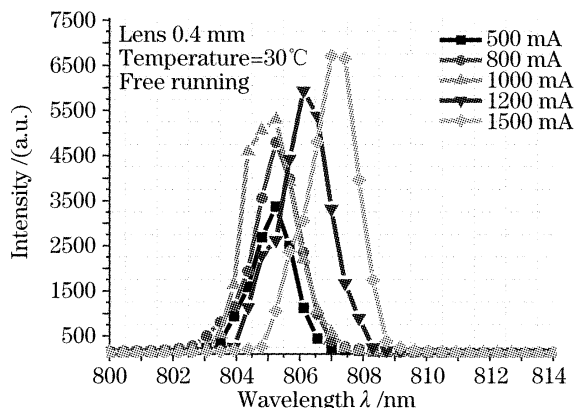


图 6 不同工作电流下管芯的光谱

Fig. 6 Spectra of the semiconductor laser at different operating current

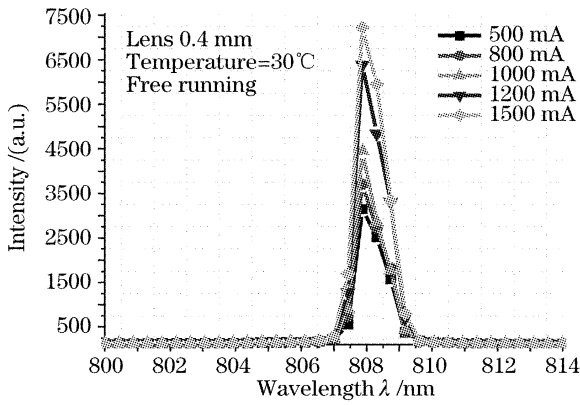


图 7 体布拉格光栅外腔半导体激光器的光谱

Fig. 7 Spectra of external-cavity semiconductor laser with the volume Bragg grating at different operating current

3.2 不同热汇温度下体布拉格光栅外腔半导体激光器的光谱特性

在一定的工作电流下,改变 C-mount 热汇温度,测量了体布拉格光栅的波长稳定效果。图 8、图 9 分别为 1.5 A 工作电流下,构成外腔前、后的光谱。当温度从 22 °C 上升到 35 °C 时,半导体激光器的峰值波长从 805 nm 增加到 808 nm,波长随温度

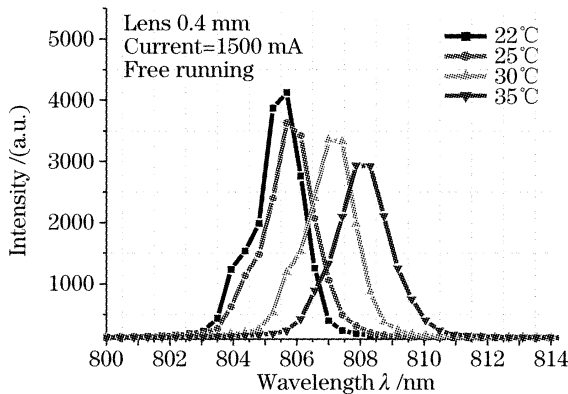


图 8 不同热汇温度下管芯的光谱

Fig. 8 Spectra of the semiconductor laser at different heat-sink temperature

的偏移率为 0.23 nm/ °C。图 9 的体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性表明,工作波长在体布拉格光栅的布拉格波长 807.8 nm 处,不随热汇温度的增加而变化,并显示出激光谱宽明显压缩。

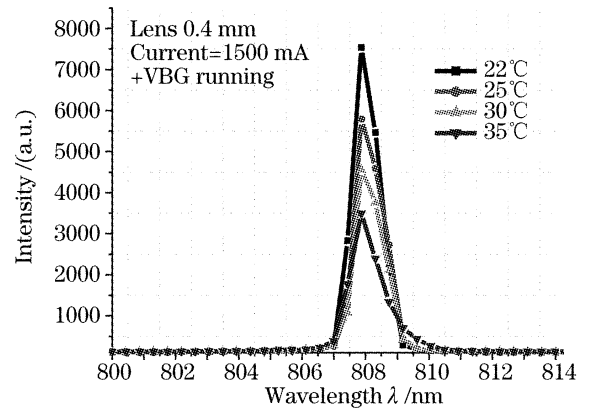


图 9 体布拉格光栅外腔半导体激光器的光谱

Fig. 9 Spectra of external-cavity semiconductor laser with the volume Bragg grating at different heat-sink temperature

3.3 准直性能的影响

实验中发现,体布拉格光栅的方位对于外腔半导体激光器的性能影响很大,必须仔细地进行调整。另一方面,柱面透镜的选择也有较大影响。采用 0.2 mm、0.4 mm 和 0.6 mm 不同直径的柱面透镜,比较了对体布拉格光栅外腔耦合性能的影响。实验表明当半导体激光器峰值波长接近体布拉格光栅布拉格波长时,用不同直径的柱面透镜都获得了良好的波长稳定效果。但是,波长稳定的工作范围有明显的差别。实验发现,在本文实验条件下,直径为 0.4 mm 柱面透镜的综合效果最好。图 10(a)、图 10(b)为采用 0.6 mm 和 0.2 mm 柱面透镜时的光谱特性。用 0.6 mm 柱面透镜时,在 0.5 A 工作电流下体布拉格光栅没有发生波长稳定效果;在 0.8 A 下稳频效果也不是很满意。这是由于在 0.6 mm 柱面透镜下

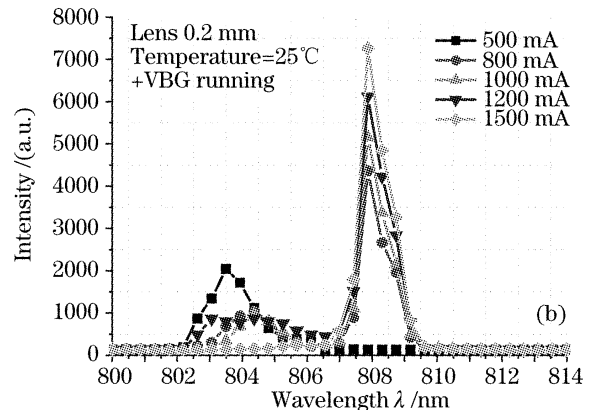
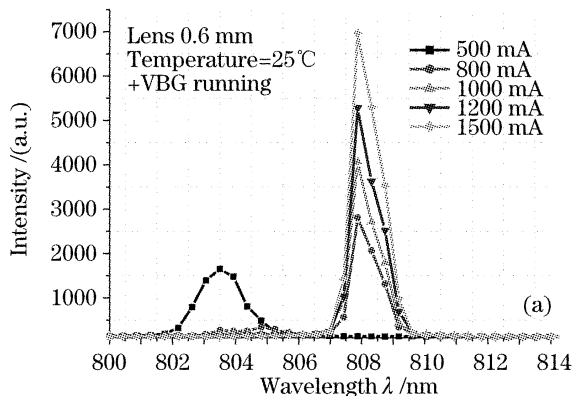


图 10 0.6 mm (a)和 0.2 mm (b)柱面透镜准直下的光谱特性

Fig. 10 Spectra of the volume Bragg grating external-cavity semiconductor laser with 0.6 mm (a) and 0.2 mm (b) collimated cylindrical lens

准直光斑不够理想,使返回腔内光的比例下降。在用 0.2 mm 柱面透镜时,体布拉格光栅的波长稳定效果更差。只有在 1.5 A 工作电流下,显示了体布拉格光栅的波长稳定效果。几何光学的简单分析表明,0.2 mm 的柱面透镜对于原始发散角很大的半导体激光器光束来说,曲率太大、孔径太小,耦合效率低,准直效果不好。

4 分析与讨论

从以上实验结果可见,在一定的工作条件下,体布拉格光栅的波长稳定效果是很好的。但是体布拉格光栅并不能在任何条件下都发挥同样的作用。它的波长稳定作用有一个工作条件范围。其中最重要的因素是体布拉格光栅反射光谱与半导体激光器增益谱及其变化范围的匹配。其次是要构成一个具有高耦合效率的外腔结构。半导体激光器的增益谱,及其与温度 T 和载流子浓度 N 的关系,可以表示为^[6]

$$G(\lambda, N, T) = A(T) \{ N_{th} [1 - (\lambda - \lambda_0)^2 / \delta\lambda^2] - N_0 \}, \quad (3)$$

其中 N_0 为透明载流子浓度, N_{th} 为阈值载流子浓度; $\delta\lambda$ 为增益谱宽,对于 808 nm 波段,大约为 15 nm 左右。微分增益系数 $A(T) = b - \xi(T - T_0)$, T_0 为阈值温度关系的特征温度。峰值波长也是温度的函数: $\lambda_p(T) = \lambda_0 + \sigma\Delta T$, 对于 808 nm 半导体激光器,系数 $\sigma \approx 0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。在阈值以上,有源区中的载流子浓度被箝位于阈值浓度,它将会随着温度而变化,但是不会直接随工作电流而变化。因此,温度是影响增益谱变化的主要因素。

图 1 所示外腔半导体激光器的前腔面由半导体激光器管芯的前腔面和体布拉格光栅构成。对于功率型器件,外腔纵模不需要关注,其等效反射率可以表示为^[7]

$$R_{eff}(\lambda) = \frac{R_2 + \eta_c R_{VBG}(\lambda)}{1 + \eta_c R_2 R_{VBG}(\lambda)}, \quad (4)$$

式中 η_c 是体布拉格光栅外腔的综合耦合效率; R_2 是管芯解理面(已镀减反膜)的反射率。显然, η_c 越高、 R_2 越小,体布拉格光栅的作用越明显。外腔半导体激光器的阈值以及效率决定于激光的阈值条件: $G = \alpha + l^{-1} \ln(R_1 R_{eff})^{-1/2}$, 其中 l 为半导体激光器的腔长。体布拉格光栅的波长稳定效果,实质上决定于腔面反馈的选频作用和增益谱之间的竞争。根据这些基本关系和实验结果,可以对体布拉格光栅外腔激光器的基本性能做进一步讨论。

4.1 增益谱匹配的要求

从半导体激光器的光谱随工作电流变化的特性可见,随着电流上升,半导体激光器的结温随着上升。对于图 6 图 7 所测试的半导体激光器,小电流下激光波长小于布拉格波长,与布拉格波长之差随电流上升而减小,因而将更加有利于稳定效果。图 6 和图 7 的结果表明,在激射波长与布拉格波长相差 3 nm 的情况下,体布拉格光栅提供的窄带反馈,足以压倒两波长位置之间的增益差。对于大功率宽面半导体激光器的实际应用来说,一般都是在接近额定工作电流的高功率状态下工作。因此重要的是根据管芯的工作波长设定热汇的温度,以保证半导体激光器在布拉格波长上稳定工作。图 11 显示了同一半导体激光器在 25 °C 时光谱随工作电流的变化。与图 7 的 30 °C 温度相比,可以看到在 0.5 A 电流下在 803 nm 处有一个小峰,属于内腔振荡的模式。同样地,图 8 和图 9 所示的光谱温度关系表明,随着温度上升,该半导体激光器的激光波长也更接近布拉格波长,有利于波长稳定运转。但是如果工作电

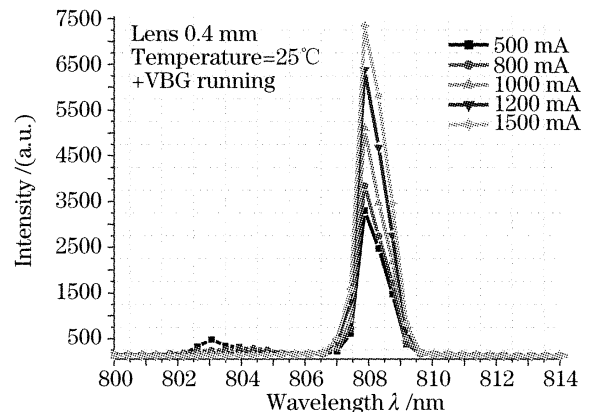


图 11 热汇温度 25 °C 时的光谱电流关系
Fig. 11 Relationship between spectra and current at heat-sink temperature 25 °C

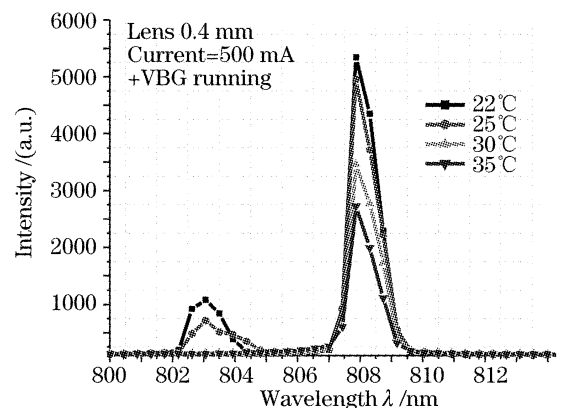


图 12 0.5 A 下不同热汇温度的光谱
Fig. 12 Spectra at 0.5 A operation current with different heat-sink temperature

流过小,结区温升较小。此时,当设定稳定温度为 22 °C 和 25 °C 时,在 803 nm 左右都显示有内腔模,如图 12 所示。这说明体布拉格光栅在 4.8 nm 波长差下波长稳定效果下降。

4.2 外腔结构设计的考虑

图 5 的 $P-I$ 特性表明,体布拉格光栅外腔对于半导体激光器阈值和外部微分效率的影响都不大(实验中发现体布拉格光栅外腔可以使其阈值从 0.4 A 降低到 0.38 A)。外腔等效反射率的大小很大程度上决定于耦合效率。这一耦合效率体现在一个有源器件的多个基本特性中,难以与器件的其他结构参量和物理参量分隔开来直接测量。已有不少理论分析工作,表明这一效率取决于柱面准直镜的设计和品质,也与器件的调试有密切的关系。本实验在三种直径的柱面镜下的测试结果表明,0.4 mm 直径的柱面镜可以获得较好的准直效果。但是在精细的设计和工艺方面还有进一步工作要做。另一方面,本实验只考虑了半导体激光器光束在快轴方向上的准直。实际上在平行于 p-n 结平面上,仍有大约 10° 左右的发散角。这一发散带来的损失,随外腔长度增大而增大。因此,应当尽可能地减小外腔长度。这与需要利用外腔压窄线宽的稳频应用有很大的差别。对大功率半导体激光器的应用来说,器件结构的简单、成本的降低相当重要,需要在性能和成本两者之间折中。

体布拉格光栅反射率的大小对于半导体激光器性能有很大关系。从波长稳定效果考虑,似乎峰值反射率越高越好。但是过高的反射率将使器件的输出功率和斜率效率下降。外部微分量子效率可表示为

$$\eta_d = \eta_{in} \frac{(1 - R_{eff}) \sqrt{R_1}}{(1 - R_{eff}) \sqrt{R_1} + (1 - R_1) \sqrt{R_{eff}}}, \quad (5)$$

式中 η_{in} 为管芯内量子效率。过高的等效反射率,将使(15)式的分子减小。理论分析和实践表明,考虑到耦合效率的因素,15%~20%的体布拉格光栅反射率是比较合适的。

5 结 论

用商品化体布拉格光栅和瓦级大功率宽条半导

体激光器构成体布拉格光栅外腔半导体激光器,实验研究了波长稳定的基本特性和主要技术要求。实验结果表明,体布拉格光栅外腔激光器的波长稳定范围与半导体激光器的准直效果有较大关系,当用 0.4 mm 直径的柱透镜准直,激射波长与体布拉格光栅的布拉格波长差值小于 2.6 nm 情况下,可以得到很好的波长稳定效果,若差值大于 4.8 nm 时波长稳定效果变差。本文的工作为进一步将体布拉格光栅应用于半导体激光器阵列提供了基本参量和技术要素。在半导体激光器 Bar 中,将需要考虑 Bar 条本身激射波长的不均匀性、键合后各发光单元偏离直线的情况,即所谓的“Smile”现象;需要考虑体布拉格光栅在高功率光束作用下可能发生温升的影响等问题。有关的研究工作正在进行中,将另文报道。

致谢 感谢上海光学精密机械研究所信息光学实验室封惠忠高级实验师等在实验中的配合和帮助。

参 考 文 献

- Leonid B. Glebov. Optimizing and stabilizing diode laser spectral parameters[J]. *Photonic Spectra*, 2005, (1): 90~94
- B. L. Volodin, S. V. Dolgy, E. D. Melnik *et al.*. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1891~1893
- Luo Ying, Cao Gendi, Geng Jianxin *et al.*. Longitudinal mode characteristics of an external-cavity semiconductor laser with fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 357~362 (in Chinese)
罗颖,曹根娣,耿健新等. 光纤光栅外腔半导体激光器纵模特性研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 357~362
- George Venus, Armen Sevian, Leonid Glebov. Spectral stabilization of high efficiency diode bars by external Bragg resonator[J]. *Venus-SSDLTR*, 2005. 1
- Igor V. Ciapurin, Leonid B. Glebov, Vadim I. Smirnov. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5742**: 183~194
- I. D. Henning, M. J. Adams, John V. Collins. Performance predictions from a new optical amplifier model[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **21**(6): 609~613
- Pan Zhongqi, Yang Jinqiang, Ye Yabin *et al.*. Programmable wide band wavelength tuning external-cavity semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 221~225 (in Chinese)
潘仲琦,杨今强,叶亚斌等. 程控宽带连续调谐外腔半导体激光器特性分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2): 221~225