

光热敏折变玻璃的体布拉格光栅热特性理论研究

李志永^{1,2}, 谭荣清¹, 黄伟^{1,3}, 叶庆², 韩高策^{1,3}, 柯常军¹, 李辉^{1,3}

- (1. 中国科学院电子学研究所 高功率气体激光技术部, 北京 100190;
2. 解放军电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 光热敏折变(photo-thermo-refractive, PTR)玻璃材质的体布拉格光栅(volume Bragg grating, VBG)在外腔半导体激光器(laser diode, LD)光谱特性改善领域具有较为广泛的应用。基于有限元分析方法,研究了 LD 辐照高度、LD 功率和工作温度对 VBG 热分布的影响。在 LD 功率为 40 W 和工作温度为 25 °C 的工作条件下,辐照高度分别为 1.48、0.88 和 0.28 mm 时,VBG 的最高温升分别为 8.52、5.07、2.20 °C。辐照区域内的温度与工作温度的偏差随 LD 功率升高等比例变大。升高 VBG 工作温度,可以缩小辐照区域内的实际温度与工作温度的差距。结果表明,通过优化辐照高度和 LD 的工作参数,可以实现 VBG 工作区域较小的温度梯度分布。

关键词: 半导体激光器; 体布拉格光栅; 外腔; 窄线宽; 热特性

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0821001

Investigation on the thermal properties of volume Bragg grating in photo-thermo-refractive glass

Li Zhiyong^{1,2}, Tan Rongqing¹, Huang Wei^{1,3}, Ye Qing², Han Gaoce^{1,3}, Ke Changjun¹, Li Hui^{1,3}

- (1. Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Volume Bragg gratings (VBG) fabricated by photo-thermo-refractive glass are widely adopted in linewidth-narrowing of laser diode with external cavities. The model was based on finite element analyses. Through the model, thermal properties of the VBG were researched under conditions of different laser diode (LD) illuminating area, different laser power and different gratings' working temperature. When the LD power was 40 W and the working temperature was 25 °C, the increase of the maximal temperature are 8.52, 5.07 and 2.20 °C at the illuminated altitude of 1.48, 0.88 and 0.28 mm. The discrepancy between the temperatures of the illuminated area and the working temperature was linear to the LD power. By improving the VBG working temperature, the gap between the actual temperature and the working temperature can be reduced. According to the research, the uniformity of

收稿日期: 2016-12-13; 修订日期: 2017-01-24

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(SKL2014KF02; SKL2016KF02); 国家自然科学基金(61505212)

作者简介: 李志永(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事半导体激光器线宽压窄技术和碱金属蒸气激光器方面的研究。

Email: lizhiyong_1226@126.com

the VBG's temperature can be optimized by choosing illuminated area and LD driving conditions, which will be beneficial to acquire the LD with narrow linewidth.

Key words: laser diode; volume Bragg grating; external cavity; narrow linewidth; thermal properties

0 引言

基于 PTR 制作的 VBG 在 LD 线宽压窄和波长锁定方面具有广泛应用^[1-3]。2004 年, Volodin 等人^[4]使用 VBG 外腔实现了单管 LD 的光谱特性改善, 光谱宽度改善为自由运转时的 1/8。2006 年, Meng 等人^[5]基于 VBG 外腔获得了 7 GHz 的窄线宽半导体激光, 输出功率 13.5 W。2010 年, Glebov 等人^[6]利用基于 7 个 VBG 外腔的单巴条 LD 合束后耦合至光纤, 获得功率 250 W 线宽 10 GHz 的窄线宽半导体激光。

随着 VBG 外腔 LD 单个模块输出功率的增大, 激光功率密度、工作温度等参量对波长锁定特性的影响逐渐受到重视。VBG 对激光存在微弱吸收, 吸收系数为 $7.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。这种吸收特性使得高功率 VBG 外腔 LD 的光栅温度上升, 进而导致中心波长漂移。2011 年, 国防科技大学杨子宁等人^[7]实现的 80 W 单巴条窄线宽 LD, 在满功率运转且未对 VBG 冷却的情况下, VBG 温度由室温上升至 $59 \text{ }^\circ\text{C}$, 引起中心波长的漂移。2013 年, 中国科学院电子学研究所的李志永等人^[8]获得 200 W 窄线宽垂直叠阵 LD 时发现线宽压窄后的激光中心波长随激光器驱动电流的增大存在漂移, 漂移率为 0.011 nm/A 。

单一模块的厘米巴条 LD 的输出功率可达数十瓦, 在垂直方向和水平方向堆叠可以实现输出功率的比例放大, 是高功率 LD 的基本组成单元^[9]。因此, 文中对 VBG 单巴条 LD 的光栅进行热特性研究, 理论分析 VBG 在激光辐照时的温升特性, 试图为高功率 VBG 外腔 LD 的光栅温度控制提供理论参考和依据。

1 理论模型

在文中的模型中, VBG 置于 LD 的快轴准直镜后, 调节 VBG 的角度和距离, 使反馈光耦合进 LD 的增益区, 进而实现半导体激光光谱特性的改善。为

了与实验进行对照分析, 模型中使用的 VBG 参数及夹持方式与参考文献[10]中相同。光栅通光面积为 $15 \text{ mm} \times 1.75 \text{ mm}$, 厚 1.89 mm , 光栅置于铝制底座上, 在铝制底座内放置铂电阻检测温度, 并由铝制底座下方的半导体制冷片控制。铝制底座与光栅的底面和两个侧面紧贴, 实现对光栅的温度控制。

在研究 VBG 的热特性时, 对 VBG 的模型进行了如下假设: (1) 半导体激光在快慢轴方向均为平顶光束; (2) 光栅吸收的热量在光栅受照射区域内均匀分布; (3) 光栅底面温度与铝制底座温度相同, 且铝制底座为恒温源。理论模型示意图如图 1 所示。图中, δ 为激光宽度方向 (z 方向) 的中心线与底面的距离。面 A、B、C、D、E、F 分别对应光栅的底面、右侧面、顶面、左侧面、前端面、后端面。根据假设, 光栅受照射区域为 $W_x \times W_y \times T_z$, 在此区域内, 激光功率密度相同。

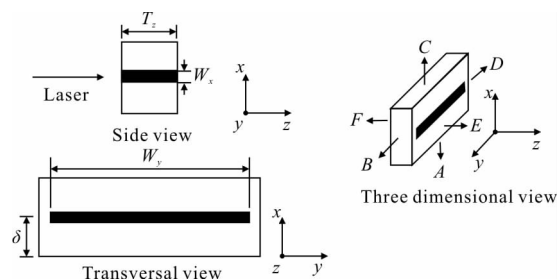


图 1 计算模型示意图(黑色部分表示激光照射区域)

Fig.1 Mathematical model in the simulations
(the area in black is illuminated)

实际上, 考虑到半导体激光的输出特性和 VBG 的吸收特性, 上述三项假设是较为合理的。高功率的厘米巴条 LD 由多个发光元组成, 每个发光元的半导体激光快轴方向为基模激光输出, 慢轴方向为多模激光输出。经过快轴准直镜对激光光束准直后, LD 的光斑束腰尺寸一般为 $0.2 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$, 快轴方向的光参量为 $1 \text{ mm} \times \text{mrad}$, 慢轴方向的光参量为 $400 \sim 500 \text{ mm} \times \text{mrad}$ ^[11]。因此, 在计算时, 可认为半导体激光慢轴方向为平顶光束; 虽然快轴方向为基模高斯光束, 但是光斑尺寸为 0.2 mm , VBG 的热导

率为 $1.114 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$, 光栅对近红外激光的吸收系数为 $7.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ [12], 1 mm 厚的 VBG 对光功率的吸收率为 0.18% , 吸收的功率较难在辐射区域造成温度梯度, 因此可以近似认为在照射区域内激光功率平均分布。同时, 由于微弱的吸收率, 在理论计算时, 可忽略半导体激光在沿光轴传播过程中的功率变化, 近似认为光栅吸收的热量在光栅受照射区域内均匀分布。另外, 光栅和铝制底座之间是物理接触, 为了提高导热性能, 一般涂有导热硅脂。因此, 认为光栅底面温度与铝制底座温度相同且铝制底座为恒温源的假设是较为合理的。

光栅热特性的理论分析通过有限元分析软件 ANSYS Workbench 14.0 实现。模型中, 材料特性及参量值如表 1 所示。在热分析时, 将光栅受照射区域视为内部发热体, 根据吸收系数计算某一激光功率密度下光栅吸收的功率。吸收的光功率转换为热量, 对光栅的热分布产生影响。在 ANSYS 中设置精细的网格划分, 对光栅的各个表面设置相应的载荷和约束, 进而实现对 VBG 热特性的分析。

表 1 模型中参量的选定和取值
Tab.1 Parameters in the models

Parameters	Value	References
Size(length×width×thickness)	15 mm×1.75 mm×1.89 mm	[10]
Absorption coefficient	$7.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	[12]
Heat conductivity	$1.114 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$	[12]
Heat convection coefficient	$5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$	[13]
Illuminating area ($W_x \times W_y \times T_z$)	$0.2 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 1.89 \text{ mm}$	
Environment temperature	25 °C	

2 激光辐照高度的影响

图 2 是 δ 为 $1.48, 0.88$ 和 0.28 mm 时, 入射激光功率 40 W 时的稳态温度分布。该温度分布是在铝制底座的温度(工作温度)为 25 °C 时获得的。通过计算得出, $\delta=1.148 \text{ mm}$ 时, VBG 的最高温度为 33.52 °C , $\delta=0.88 \text{ mm}$ 时, VBG 的最高温度为 30.07 °C , $\delta=0.28 \text{ mm}$ 时, VBG 的最高温度为 27.20 °C 。VBG 的中心波长随光栅温度的漂移率约为 $7 \text{ pm}/\text{°C}$ [14], 上述三种激光辐照高度引起的光栅中心波长漂移分别为

$59.64, 35.49, 15.4 \text{ pm}$ 。由以上分析可以看出, 与前者相比, $\delta=0.28 \text{ mm}$ 时, VBG 的温度上升较少, 对光栅温度的影响较低, 是 VBG 外腔 LD 激光辐照高度的优选方案。

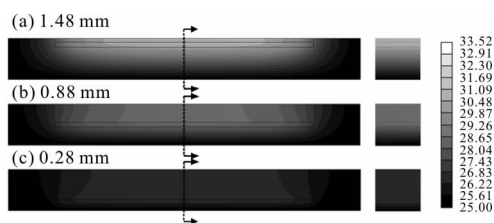


图 2 入射功率 40 W 时, 激光辐照高度对 VBG 前端面温度分布的影响

Fig.2 Effects of illuminating altitude on the temperature distributions of the VBG front face at incident power of 40 W

图 2 还给出了 $y-z$ 平面($x=0$)的温度分布图。从切面的温度分布可以看出, 沿 z 轴方向温度变化较小, 在讨论体光栅的热特性时, 使用前端面(F 面)的温度分布可以较为全面地反映光栅的热平衡状态, 因此, 以下讨论光栅温度分布时, 仅分析光栅 F 面的温度分布。

3 激光功率的影响

在光栅温度和环境温度相同时, 计算了 $\delta=0.28 \text{ mm}$ 时激光功率对光栅热特性的影响, 计算结果如图 3 所示。图 3 是激光辐照区域内沿 x 方向的相对温度稳态分布。图中所示温度为各个 x 位置处 $y-z$ 平面内的平均温度与环境温度(25 °C)的差值。计算时, 环境温度和光栅工作温度均为 25 °C 。计算结果表明, $20, 40$ 和 80 W 三种功率下, 光栅的最高温度和工作温度的差分别为 $1.10, 2.20, 4.39 \text{ °C}$, 对应的 VBG 中心波长漂移为 $7.70, 15.40, 30.73 \text{ pm}$ 。随着激光功率的升高, VBG 吸收的热量变大, 引起的温度梯度也相应变大。在参考文献[7]中, 其观察到激光器的驱动电流基本不影响 VBG 波长锁定后的光谱。这是由于参考文献[10]采用的光谱仪为海洋光学公司的 HR4000 光纤光谱仪, 分辨率为 20 pm 。在入射功率小于 40 W 时, VBG 的温度漂移小于 20 pm , 使用 HR4000 较难观察到光谱的变化。这一实验结果也验证了文中理论模型的有效性。

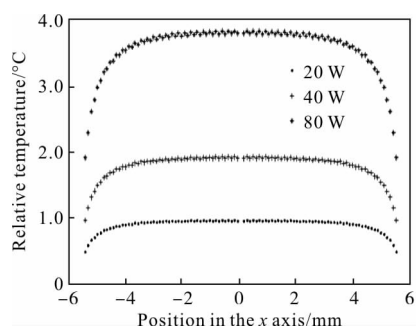


图 3 不同激光辐照功率下激光辐照区域内沿 x 方向稳态温度分布

Fig.3 Effects of illuminated power on the steady temperature distributions in the illuminated region along the x-axis direction

由图 3 可以看出, 温度的偏差随功率等比例变大。由于单巴条 LD 通常由数十个发光元组成, 其整体的光谱特性由各个发光元的光谱叠加决定。各发光元的光谱特性取决于 VBG 的反馈特性。因此, 功率上升引起的温度偏差将使得两侧发光元的中心波长较中心区域发光元的中心波长短, 加宽单巴条的整体光谱宽度, 影响 VBG 线宽压窄的效果。为了实现较窄光谱宽度的 VBG 外腔 LD, 一般应采用较低功率的 LD, 避免高功率下 VBG 温度梯度变大引起的谱线加宽效应。

4 光栅工作温度的影响

基于 PTR 玻璃制作的 VBG 工作温度可达 400 °C [14-15], 因此 VBG 外腔 LD 一般通过调节光栅的温度实现激光器的调谐。图 4 是 VBG 的工作温

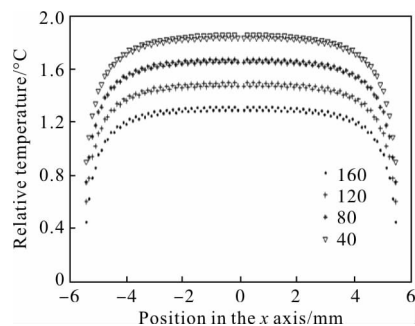


图 4 不同光栅工作温度下激光辐照区域内沿 x 方向稳态温度分布

Fig.4 Effects of grating working temperature on the steady temperature distributions in the illuminated region along the x-axis direction

度为 40、80、120 和 160 °C 时激光照射区在 x 轴方向的温度分布。图中所示的温度是 y-z 平面内的平均温度相对于工作温度的差值。在仿真中, LD 功率为 40 W。

由图可以看出: (1) 随着工作温度的升高, 最大平均温度和工作温度之间的偏差由 40 °C 时的 1.85 °C 减小至 160 °C 时的 1.31 °C; (2) 随着工作温度的升高, 最大平均温度和工作温度之间的偏差由 40 °C 时的 0.90 °C 减小至 160 °C 时的 0.45 °C。

上述计算结果表明, VBG 工作温度的升高, 能够提高激光辐照区域温度分布的均匀度, 缩小实际温度与工作温度的差距。VBG 的温度与反馈光的中心波长线性相关。因此, 从获得更好的半导体激光光谱的角度, 应选择较高 VBG 的工作温度, 使各个发光元输出窄线宽激光的中心波长保持较好的一致性。

5 结论

文中基于有限元分析软件 ANSYS Workbench 14.0 计算了 PTR 玻璃制作的 VBG 在不同工作条件下的热稳态温度分布。仿真结果与参考文献[10]的实验结果一致, 能够合理地解释实验中的现象。仿真结果表明, 为了获得窄线宽的半导体激光光谱, VBG 外腔半导体激光器的光栅压窄线宽时可采取以下措施: 辐照区域接近光栅底座; 选择较小功率的单巴条模块; 设定较高的 VBG 工作温度。计算结果将有助于更窄线宽 VBG 外腔半导体激光器的实现, 促进窄线宽半导体激光器在碱金属激光器泵浦领域的应用。

参考文献:

[1] Huang Wei, Tan Rongqing, Li Zhiyong. Theoretical investigation on threshold characteristics of diode side-pumped rubidium vapor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0206001. (in Chinese)
黄伟, 谭荣清, 李志永. LD 横向泵浦铷蒸气激光器阈值特性理论研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0206001.

[2] Mu Yining, Li Ping, Wang He. Comparison analysis of single-grating diffraction and double-grating diffraction angle detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1616-1620. (in Chinese)

- 母一宁, 李平, 王贺. 单光栅与双光栅衍射角度检测对比分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1616–1620.
- [3] Zhang Zhen, Ma Pengge, Wang Jinfeng, et al. Lateral force study on conditions under IR Bragg grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1841–1844. (in Chinese)
张臻, 马鹏阁, 王金凤, 等. 红外光谱条件下 Bragg 光栅的横向受力研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1841–1844.
- [4] Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, et al. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1891–1893.
- [5] Meng L S, Ntzaamov B, Madasamy P, et al. High power 7-GHz bandwidth external-cavity diode laser array and its use in optically pumping singlet delta oxygen [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10469–10474.
- [6] Glebov L, Podvyaznyy A, Venus G, et al. 250 W diode laser for low pressure Rb vapor pumping [C]//SPIE, 2010, 7583(9): 758313.
- [7] Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, et al. An 80-W laser diode array with 0.1 nm linewidth for rubidium vapor laser pumping [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28 (10): 104202.
- [8] Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, et al. Tunable and linewidth-reduce laser diode stack for rubidium laser pumping [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(11): 114201.
- [9] Ding Peng, Cao Yinhua, Qi Junfeng, et al. Collimation and focus characteristics of slow-axis beams of diode laser array [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2010, 36(3): 429–432. (in Chinese)
丁鹏, 曹银花, 祁俊峰, 等. 半导体激光阵列慢轴准直和聚焦特性 [J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(3): 429–432.
- [10] Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, et al. Laser diode array with narrow linewidth for rubidium vapor laser pumping [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25 (4): 875–878. (in Chinese)
李志永, 谭荣清, 徐程, 等. 用于铷蒸气激光泵浦的窄线宽阵列半导体激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 875–878.
- [11] Kohler B, Brand T, Haag M, et al. Wavelength stabilized high-power diode laser modules [C]//SPIE, 2009, 7198: 719810.
- [12] Waritanant T, Chung T Y. Influence of minute self-absorption of a volume bragg grating used as a laser mirror [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(3): 390–397.
- [13] Wang Hongyan, Yang Zining, Hua Weihong, et al. Volume Bragg grating temperature gradient effect on laser diode array and stack spectra narrowing [C]//SPIE, 2012, 8677: 86771F.
- [14] Ciapurin I V, Glebo L B, Smirnov V I. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass [C]//SPIE, 2005, 5742: 183–194.
- [15] Xiong Baoxing, Yuan Xiao, Zhang Xiang, et al. Characteristics on the photo-thermal-refractive glass and volume Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0816001. (in Chinese)
熊宝星, 袁孝, 张翔, 等. 光热敏折变玻璃及其布拉格体光栅特性研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0816001.