

DOI:10.16136/j.joel.2022.12.0246

体布拉格光栅外腔半导体激光器温度特性研究

刘荣战*, 蒋 威, 宋 健

(武汉锐科光纤激光技术股份有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:使用 COMSOL 软件对体布拉格光栅(volume Bragg grating, VBG)外腔半导体激光器进行稳态热分析模拟仿真,研究 VBG 对半导体激光器的温度特性的影响。利用 15%、20% 两种 VBG 对 888 nm 半导体激光器进行外腔锁模,测试并分析外腔锁模条件下半导体激光器的输出特性和温度特性。结果表明,VBG 外腔结构能够改善半导体激光器的光谱特性,提高半导体激光器的工作温度。在 25 °C 条件下,当采用 15% 衍射效率的体光栅进行外腔锁模时,最大输出光功率为 10.7 W,输出波长稳定在 888 nm,光谱线宽为 0.3 nm。

关键词:半导体激光器; COMSOL; 热分析; 体布拉格光栅(VBG)

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)12-1263-08

Research on temperature characteristics of VBG external cavity semiconductor laser

LIU Rongzhan*, JIANG Wei, SONG Jian

(Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: COMSOL software is used to simulate the steady-state output of volume Bragg grating (VBG) external cavity semiconductor laser, and the influence of VBG on the temperature characteristics of semiconductor laser is studied. Two kinds of VBG (15% and 20%) are used to lock the mode of 888 nm semiconductor laser in external cavity. The output characteristics and temperature characteristics of semiconductor lasers under the condition of external cavity mode locking are tested and analyzed. The results show that the VBG external cavity structure can improve the spectral characteristics of the semiconductor laser and increase the operating temperature of the semiconductor laser. When the VBG with 15% diffraction efficiency is used for external cavity mode locking, the maximum output power is 10.7 W, the output wavelength is stable at 888 nm, and the spectral linewidth is 0.3 nm at 25 °C.

Key words: semiconductor laser; COMSOL; thermal analysis; volume Bragg grating (VBG)

1 引 言

大功率半导体激光器因其体积小、转换效率高且寿命长的特点,在激光通信、激光加工、医疗美容等领域有着广泛的应用^[1-5]。近年来,随着半导体激光器的发展,对半导体激光器提出了更高的要求,使其不仅要有较高的输出功率还要具备较好的光谱特性。一般地,自由运行的半导体激光器光谱宽度较宽并且中心波长会随着注入电流和温度的变化产生漂移,这严重制约了半导体激光器的应用前景^[6-9]。而使用体布拉格光栅(vol-

ume Bragg grating, VBG) 做为外腔结构的半导体激光器则是改善光谱特性的一种有效方法。薄报学等^[10]采用 VBG 外腔结构,实现了对宽条形高功率半导体激光器光谱特性的改善及稳定工作。朱洪波等^[11]基于反射式体布拉格光栅将出射光为 9XX nm 的 5 个波长间隔为 1.5 nm 的半导体激光器进行合束并实现了稳定输出。2017 年,德国弗劳恩霍夫激光技术研究所^[12]的研究人员通过体光栅对多个半导体激光器进行波长锁定,其锁模后的输出光功率大于 800 W 并进行切割,实验证明外腔系统的稳定性。JAMBUNATHAN 等^[13]

* E-mail: 374739613@qq.com

收稿日期: 2022-04-09 修订日期: 2022-04-21

利用体光栅对 968.7 nm 光纤耦合半导体激光器进行锁模,得到了约 0.35 nm 的线宽的输出光束。对于体光栅外腔半导体激光器,输出功率的提升和光谱特性的改善一直是研究的热点,但对其温度特性和可靠性也需要进行研究分析。本文利用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件对 VBG 外腔半导体激光器的温度特性进行模拟分析,并通过实验测试体布拉格光栅对半导体激光器输出特性和温度的影响。

2 实验模拟与分析

2.1 实验原理

VBG 是一种新型衍射光学元件,其具有良好的角度选择性和波长选择性。一般地,半导体激光器的出射光拥有较宽的光谱带宽,当出射光经过体光栅时,部分模式因不满足布拉格条件而直接经过体光栅透射出去,只有满足布拉格条件的模式会反馈回有源区内,形成外腔振荡,最终实现模式锁定。使用体光栅做为外腔输出镜的半导体激光器拥有单一的波长输出和较窄的光谱带宽。体光栅衍射波长由布拉格衍射方程决定^[14]:

$$|\cos\theta| = \frac{\lambda}{2\Lambda n}, \quad (1)$$

式中, θ 是入射到 VBG 的角度, λ 是反馈光波长, Λ 是

光栅周期, n 是 VBG 的平均折射率。可以看出,当出射光以满足体光栅布拉格条件的角度入射至光栅时,只有一个波长的光会被反馈回有源区。

2.2 模拟分析

模拟的半导体激光器条宽为 200 μm ,输出波长为 888 nm,为提高输出功率需要对腔面反射率进行优化设计。通过使用 TFCalc 膜系设计软件设计前后腔面膜层。前腔面采用 Al_2O_3 做为增透膜,后腔面采用 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 做为高反膜。表 1 为膜层设计所用材料的参数。

表 1 膜层材料参数

Tab. 1 Parameters of coating layer materials

Material	Heat conductivity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Refractive index
Al_2O_3	33	1.62
TiO_2	1.8	2.3
SiO_2	1.4	1.46

设计结果如图 1 所示。图 1 为 888 nm 半导体激光器前、后腔面膜透射曲线。其中,图 1(a)为前腔面镀膜曲线,中心波长 888 nm 的透射率达 98% 以上。图 1(b)为后腔面膜反射曲线,中心波长 888 nm 的反射率达到 99% 以上。

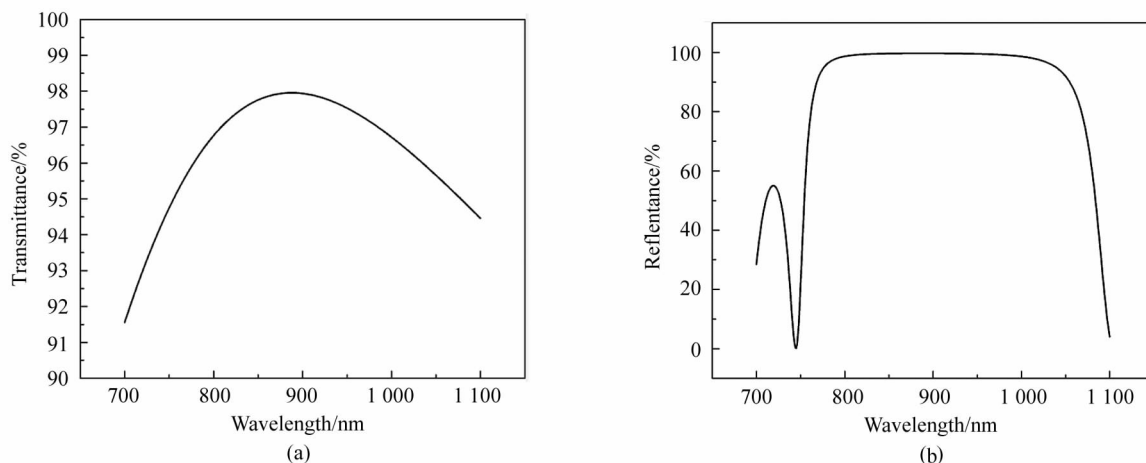


图 1 腔面镀膜曲线:(a) 前腔面;(b) 后腔面

Fig. 1 Coating curve of cavity surface:(a) Front face;(b) Rear face

通过使用 COMSOL 软件模拟 888 nm 半导体激光器的温度特性。为更好地模拟分析半导体激光器在稳态时的温度特性,对光源和封装结构做一下假设:

1) 半导体激光器有源区为唯一热源,且电光转

换效率为 50%,当输出光功率为 10 W 时,激光器产生的热功率也为 10 W。

2) 忽略对流换热以及辐射散热的影响,并且热沉底部温度设定恒定为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。模拟所用到的材料特性参数如表 2 所示。

表 2 激光器材料参数

Tab. 2 Parameters of laser materials

Various parts of the LD	Material	Size/(mm×mm×mm)	Heat conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Cu heat sink	Cu	30×15×5	398
AlN heat sink	AlN	4×5×0.3	180
Laser chip	GaAs	4×0.5×0.15	44
Solder layer	AuSn	4×0.5×0.003	57

模拟得到当激光器输出光功率达到 10 W 时,半导体激光器的温度分布如图 2 所示。

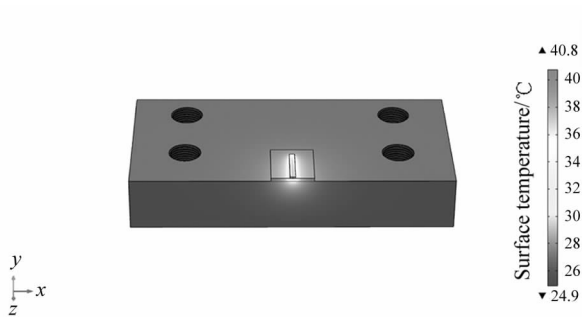


图 2 激光器输出光功率为 10 W 时的温度分布
Fig. 2 Temperature distribution of laser with 10 W optical power

图 3(a)为激光器输出 10 W 的光功率时芯片前腔面的温度分布曲线。由图可以看出:激光器的最高温度在有源区附近,前腔面有源区的温度分布近似呈二次函数的对称分布。在慢轴方向,温度沿有源区的中心向两侧逐渐降低。图 3(b)为光功率与激光器最高结温的变化关系,可以看出:随着光功率的增加,激光器的结温也随之增加,二者呈线性关系。当光功率升高 1 W,器件结温升高约 1.6 °C,最高结温为 40.8 °C。

分别采用 15%、20%两种衍射效率的体光栅对半导体激光器进行外腔锁模。利用 COMSOL 软件模拟在外腔锁模下的半导体激光器的温度特性。

图 4 为 VBG 外腔锁模下的半导体激光器温度

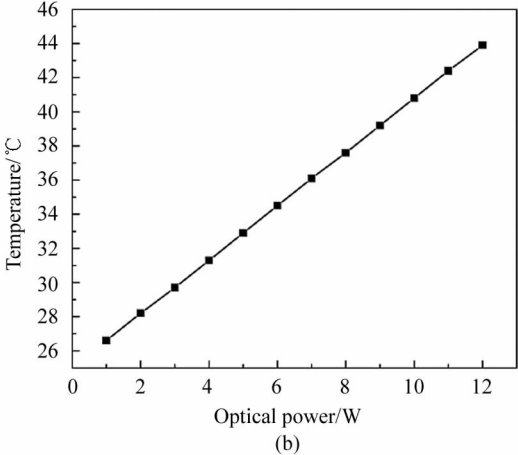
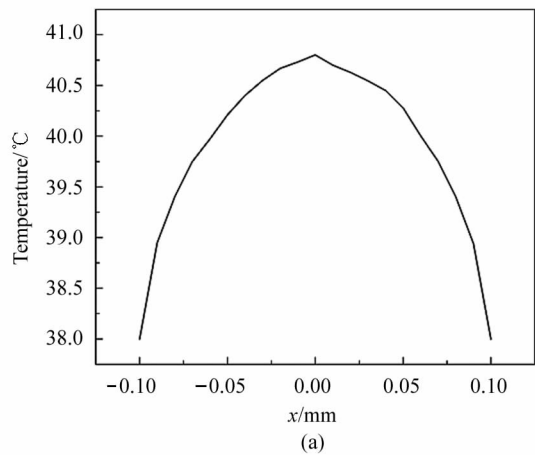


图 3 (a) 前腔面有源区沿慢轴方向的温度分布; (b) 激光器光功率与结温的关系

Fig. 3 (a) Temperature distribution in the active region of the front cavity along the slow axis;
(b) Relationship between laser optical power and junction temperature

分布图。可以看出:与图 2 相比,体光栅外腔结构的半导体激光器结温要比自由出射时的半导体激光器结温要高,因为 VBG 将满足布拉格条件的光能反馈回芯片,增大了腔内光子数密度,从而增加腔内吸收,导致芯片发光区温度升高。图 4 中(a)、(b)分别为使用衍射效率为 15%和 20%的体光栅为外腔输出镜的半导体激光器温度分布图,可以看出:使用 20%衍射效率的体光栅外腔半导体激光器的结温要比使

用 15%衍射效率的体光栅外腔半导体激光器的结温要高,因为高衍射效率的 VBG 将更多的能量反馈回芯片有源区,导致芯片的光吸收增大。

图 5(a)为自由出射半导体激光器输出 10 W 的光功率与 VBG 外腔半导体激光器输出 10 W 的光功率芯片前腔面的温度分布对比图,可以看出:体光栅外腔半导体激光器的前腔面温度分布同样近似呈二次函数的对称分布,温度由有源区向两侧递减降低。

图 5(b)为自由出射半导体激光器的光功率和体光栅外腔半导体激光器的光功率与最高结温的对比关系。可以看出:激光器结温随着光功率的增大而线性升高,使用 15%衍射效率的体光栅作为外腔输出

镜时,当光功率升高 1 W,体光栅外腔半导体激光器结温升高约 2.1℃,最高结温为 46.4℃;使用 20%衍射效率的体光栅作为外腔输出镜时,光功率升高 1 W,结温升高约 2.3℃,最高结温为

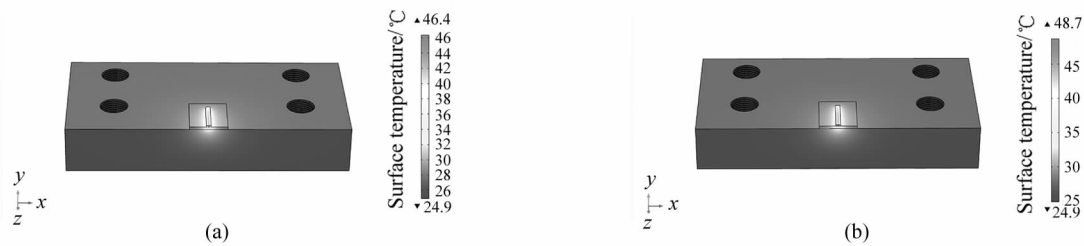


图 4 体布拉格光栅外腔半导体激光器输出 10 W 光功率时的温度分布:

(a) 衍射效率 15% 的体布拉格光栅; (b) 衍射效率 20% 的体布拉格光栅

Fig. 4 Temperature distribution of VBG external cavity semiconductor laser with 10 W optical power;
(a) VBG with diffraction efficiency of 15%; (b) VBG with diffraction efficiency of 20%

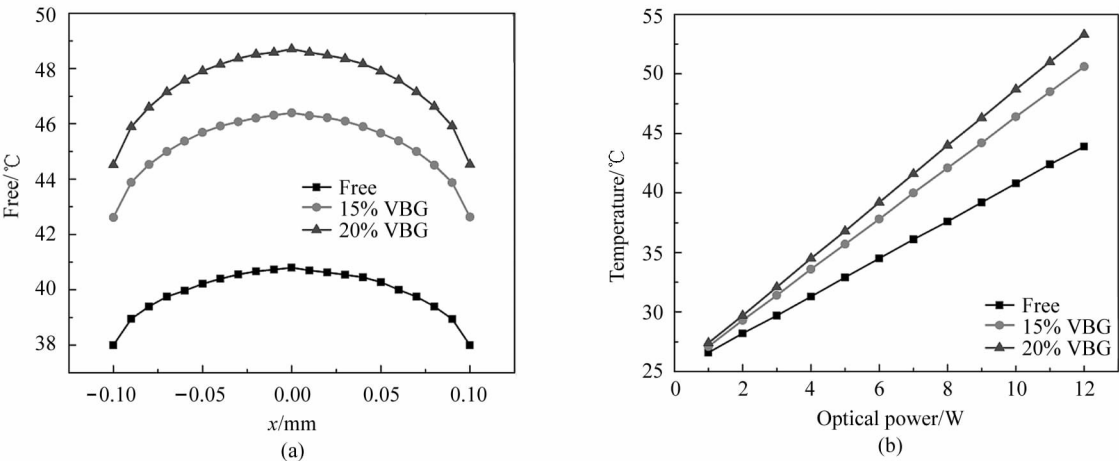


图 5 (a) 体光栅外腔激光器前腔面沿慢轴方向的温度分布; (b) 体光栅外腔激光器光功率与结温的关系

Fig. 5 (a) Temperature distribution of front cavity surface of VBG external cavity laser along slow axis;
(b) Relationship between optical power and junction temperature of VBG external cavity laser

48.7℃。

3 实验结果与讨论

3.1 实验原理

实验采用 200 μm 条宽、中心波长为 888 nm 的

半导体激光器,前腔面反射率约为 2%,后腔面反射率约为 99%。使用非球面快轴准直透镜和慢轴准直透镜对芯片的发散角进行准直,使得准直后快、慢轴的发散角在 1°以内。采用的体光栅的结构参数如表 3 所示。

表 3 体布拉格光栅参数

Tab.3 Parameters of VBG

Diffraction efficiency/%	Bragg wavelength/nm	Size/(mm×mm×mm)	Diffraction bandwidth/nm
15	888	3×2×1	0.3
20	888	3×2×1	0.3

如图 6 所示,将 COS(chip-on-submount)安装在铜热沉上,再将铜热沉安装在半导体制冷片(thermoelectric cooler, TEC)上,通过调节 TEC 的

温度来控制激光器的工作温度,通过调节电流源来控制激光器的工作电流。使用光功率计探测半导体激光器的出光功率,并用光谱仪分析光谱特性。为

了有较好的锁模质量^[15],将 VBG 放置在距离 SAC 约 2 mm 的位置。

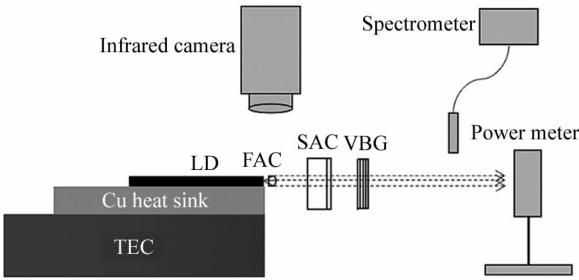


图 6 体布拉格光栅外腔半导体激光器实验装置图
Fig. 6 Experimental setup of VBG external cavity semiconductor laser

在 VBG 外腔半导体激光器出光时,因对半导体激光器的输出光进行了光束准直和模式调制,使得激光器前腔面的腔面温度变化很难探测到。在 VBG 外腔结构中,反馈光需再次经过快、慢轴准直透镜返回到芯片有源区才能实现外腔谐振,因此可以通过测试快、慢轴准直透镜温度的变化来研究 VBG 对半导体激光器温度的影响。本文采用红外探测器测量 VBG 外腔结构下的半导体激光器 FAC 温度。

3.2 实验结果

图 7 为 20 ℃ 条件下体光栅外腔半导体激光器的

光谱图,插图自由出射半导体激光器的光谱特性。可以看出,随着工作电流的增加,自由出射半导体激光器峰值波长发生漂移,波长随电流的变化量约为 0.3 nm/A。其原因是随着注入电流的增加,热效应使半导体材料的禁带宽度变小,导致峰值波长红移。同时自由出射时半导体激光器的半峰全宽较宽,约为 2.5 nm。其原因是因为宽条型半导体激光器的增益谱较宽,多种模式均满足光增益条件而得到增益,因此测量得到的带宽较宽。激光器的谐振结构是通过在芯片前、后腔面镀增透膜和高反膜形成的谐振腔,而谐振腔不具备有效的单纵模选择机制。

图 7(a)、(b)分别为 20 ℃ 条件下使用 15%、20% 衍射效率的 VBG 做为外腔输出镜的半导体激光器光谱。可以看出:随着工作电流的增加,峰值波长基本锁定在 VBG 的反射波长上,此时峰值波长随工作电流的增加,波长漂移量约为 9 pm/A,峰值波长的稳定性增加约 33 倍。与自由出射时相比,体光栅外腔锁模半导体激光器的光谱线宽更窄,约为 0.3 nm,且随着工作电流的增大没有出现明显的展宽。因为体光栅将满足布拉格条件的模式反馈回芯片有源区,增加该模式在半导体激光器内腔的光子数密度,使得该模式有利于在内腔与其他模式竞争,优先达到阈值出射,并抑制其他模式。

图 8 为 25 ℃ 条件下使用 15%、20% 衍射效率的

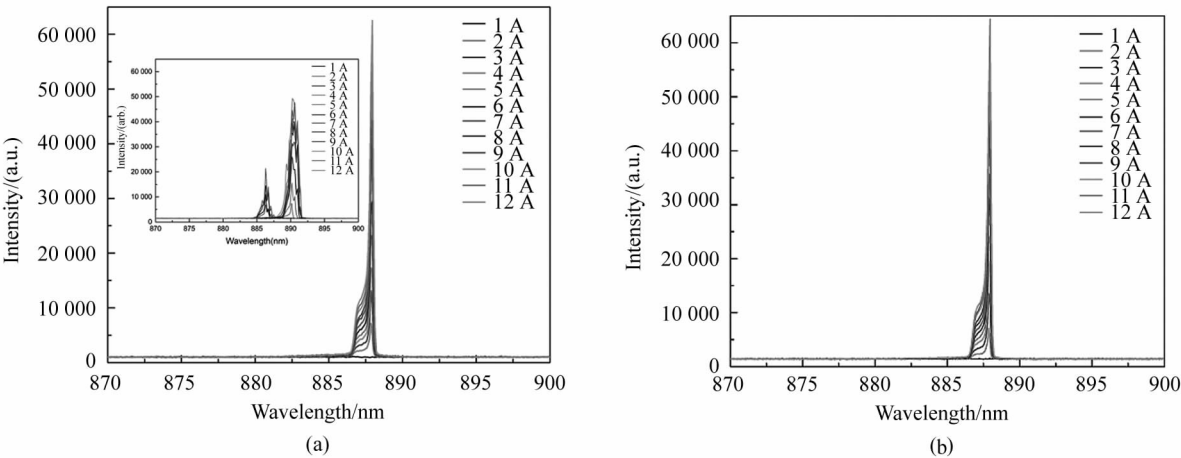


图 7 20 ℃ 条件下体光栅外腔半导体激光器的光谱特性:(a) 使用 15% 衍射效率的体光栅的输出光谱;
(b) 使用 20% 衍射效率的体光栅的输出光谱

Fig. 7 Spectral characteristics of volume grating external cavity semiconductor laser at 20 ℃ :
(a) Spectrum of VBG with 15% diffraction efficiency; (b) Spectrum of VBG with 20% diffraction efficiency

体光栅做为外腔输出镜的半导体激光器光谱,插图自由出射时的光谱。在 12 A 条件下自由出射激光器的中心波长由 20 ℃、12 A 条件下的

889.9 nm 红移至约 892.1 nm,可以看出:体光栅外腔仍能满足半导体激光器锁模性能的要求,输出波长随温度的变化速率约为 9 pm/℃,随着驱动电流的

增加,锁模光谱并未出现光谱展宽。

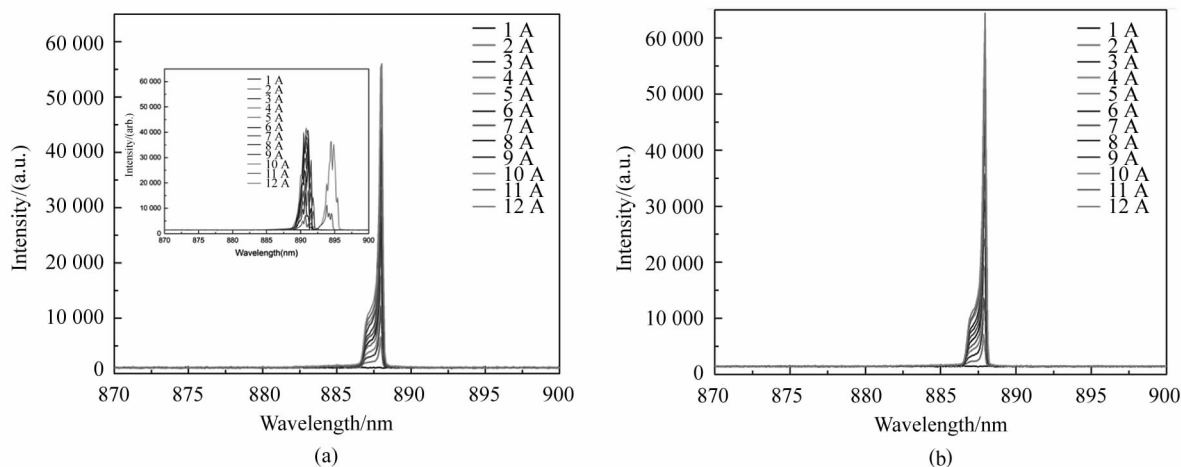


图 8 25 °C 条件下体光栅外腔半导体激光器的光谱特性:(a) 使用 15% 衍射效率的体光栅的输出光谱;
(b) 使用 20% 衍射效率的体光栅的输出光谱

Fig. 8 Spectral characteristics of volume grating external cavity semiconductor laser at 25 °C :

(a) Spectrum of VBG with 15% diffraction efficiency; (b) Spectrum of VBG with 20% diffraction efficiency

图 9 为 30 °C 条件下使用 15%、20% 衍射效率的体光栅锁模的半导体激光器光谱,插图为 30 °C 自由出射时的光谱图。在 12 A 条件下,自由出射激光器的中心波长约为 893.4 nm。由上述实验可以看出,

在 20—30 °C 范围内,分别采用 15%、20% 衍射效率的体光栅均有良好的锁模质量,反射波长均满足体光栅的衍射波长。

为研究体光栅对半导体激光器温度的影响,在

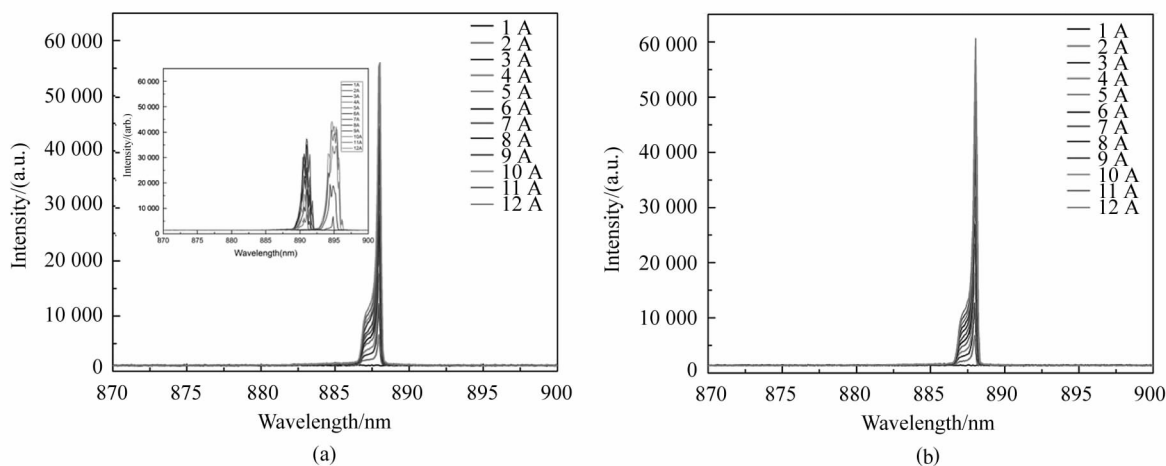


图 9 30 °C 条件下体光栅外腔半导体激光器的光谱特性:(a) 使用 15% 衍射效率的体光栅的输出光谱;
(b) 使用 20% 衍射效率的体光栅的输出光谱

Fig. 9 Spectral characteristics of volume grating external cavity semiconductor laser at 30 °C :

(a) Spectrum of VBG with 15% diffraction efficiency; (b) Spectrum of VBG with 20% diffraction efficiency

25 °C 条件下测试体光栅外腔半导体激光器的温度特性以及功率特性。图 10 为 25 °C 条件下使用 15%、20% 衍射效率的体光栅做为外腔输出镜的半导体激光器 $P-I$ 特性曲线。与自由出射时相比,体光栅外腔半导体激光器的斜率效率较低。在体光栅外腔结

构下,对于使用 15% 衍射效率的体光栅做为外腔的半导体激光器,斜率效率约为 1.01 W/A,对于使用 20% 衍射效率的体光栅做为外腔的半导体激光器,斜率效率约为 0.94 W/A。导致斜率效率下降的原因是:一是体光栅将反馈光反馈回芯片有源区内,会

造成光能在波导内的吸收损耗;二是体光栅不能将满足布拉格条件的模式全部反馈回有源区,存在衍射损耗;三是准直系统和体光栅对光能的吸收损耗。

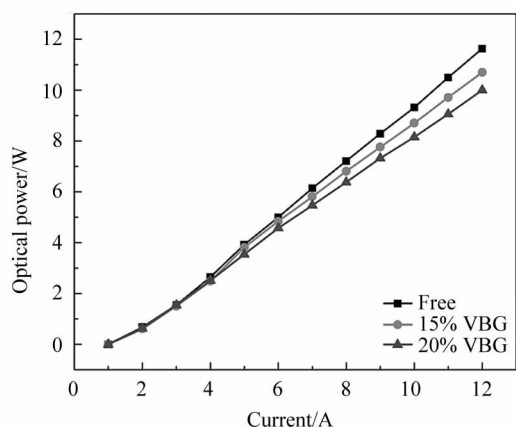


图10 25 °C条件下体布拉格光栅外腔结构的P-I特性

Fig. 10 P-I characteristics of VBG with external cavity structure at 25 °C

为研究体光栅外腔半导体激光器的温度特性,使用红外探测仪对外腔半导体激光器的FAC温度进行测试。图11为25 °C条件下体光栅外腔半导体激光器FAC温度随电流的变化关系。可以看出体光栅外腔半导体激光器的FAC温度要高于自由出射时FAC的温度。因为体光栅将满足布拉格条件的模式反馈回有源区,这部分光束增加了透镜对光能的吸收从而导致外腔系统温度有所升高,而系统温度的升高则会影响器件的寿命和可靠性。使用15%衍射效率的体光栅锁模,FAC温度随电流的变化量为1.53 °C/A;使用20%衍射效率的体光栅锁模,FAC温度随电流的变化量为1.89 °C/A。

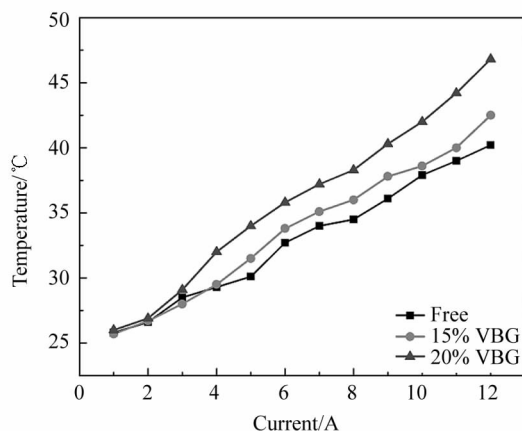


图11 25 °C条件下体布拉格光栅外腔结构的FAC温度

Fig. 11 FAC temperature in external cavity structure of VBG at 25 °C

与模拟结果相比,使用15%、20%衍射效率的体光栅做外腔输出镜时,实际的FAC温度在输出10 W光功率时为42.6 °C和46.8 °C,略低于模拟的46.4 °C和48.7 °C,其原因有两点:一是COMSOL软件是通过求解热传导偏微分方程得到前腔面温度的,而在实验中由于外腔系统的搭建,激光器腔面温度不能直接测试得出,从而采用测试FAC温度的变化量来评价体光栅外腔系统的温度特性。FAC的温度并非腔面真实温度,因此造成与模拟结果的差异。二是慢轴准直镜和VBG会吸收部分光能量,造成反馈光能量的衰减导致温度降低。

4 结论

本文采用15%、20%两种衍射效率的VBG进行半导体激光器外腔锁模,分析了不同衍射效率的VBG对半导体激光器温度特性的影响。使用COMSOL软件模拟了体光栅做为外腔输出镜时的半导体激光器温度特性以及结温分布。实验通过搭建体光栅外腔结构,在25 °C条件下,半导体激光器输出光谱稳定地锁定在888 nm,采用15%衍射效率的体光栅进行外腔锁模,得到输出功率为10.7 W,斜效率为1.01 W/A。随着工作电流的增加,锁模光谱未出现展宽,锁模光谱线宽为0.3 nm。由实验结果可知,随着输出光功率的增加,芯片发光区温度也会随之升高,导致可靠性降低。

参考文献:

- [1] WANG L J, PENG H Y, ZHANG J. Advance on high power diode laser coupling[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 517-534.
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- [2] ZHEN X G, LI T, LU P, et al. Analysis of temperature characteristics of 980 nm semiconductor laser facet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1102004.
郑晓刚, 李特, 芦鹏, 等. 980 nm 半导体激光器腔面温度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102004.
- [3] NEWBURGH G A, DUBINSKII M. A diode-pumped Nd: YVO₄ thin disk laser with a hetero-composite gain element and dual-face cooling[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(10): 4-9.
- [4] FERMAN M E, HARTL I. Ultrafast fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 868-874.
- [5] WENTSCH K S, WEICHEL T B, GÜNSTER S, et al. Yb: CaF₂ thin-disk laser[J]. Optics Express, 2014, 22(2):

- 1524-1532.
- [6] JIYENO P, HONG J S, HONG M N, et al. Design of red-emitting external cavity diode laser module for high-slope efficiency and narrow bandwidth[J]. Optical Engineering, 2015, 54(9): 096109.
- [7] BO L, YEHUDA B. Coherent addition of high power broad-area laser diodes with a compact VBG V-shaped external Talbot cavity[J]. Optics Communications, 2018, 414: 202-206.
- [8] FENG J S, YUAN X, XIONG B X, 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. 用于抽运铯蒸汽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.
- [9] ZHANG J W, NING Y Q, ZHANG X, et al. Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1002003.
张建伟, 宁永强, 张星, 等. 基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1002003.
- [10] BO B X, GAO X, QIAO Z L, et al. Characteristics of high power volume-Bragg-grating external cavity semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of 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.
- [11] ZHU H B, SHENG L F. Development and thermal management of kW-class high-power diode laser source based on the structure of two-stage combination[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 1502510.
- [12] WITTE U, SCHNEIDER F, HOLLY C, et al. kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on commercial pump modules[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 1008608.
- [13] JAMBUNATHAN V, HORACKOVA L, NAVRATIL P, et al. Cryogenic Yb:YAG laser pumped by VBG stabilized narrow band laser diode at 969 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(12): 1328-1331.
- [14] ZHU H B, LIN X C, ZHANG Y W, et al. kW-class fiber-coupled diode laser source based on dense spectral multiplexing of an ultra-narrow channel spacing[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 24723-24733.
- [15] LIU R Z, BO B X, YAO N, et al. Experimental research on volume-Bragg-grating external cavity red-light semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(11): 1401-1408.
刘荣战, 薄报学, 么娜, 等. 体布拉格光栅外腔红光半导体激光器实验研究[J]. 发光学报, 2019, 40(11): 1401-1408.

作者简介:

刘荣战 (1993—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事高功率半导体激光器方面的研究。