

高稳定度光泵浦腔内倍频 488 nm 半导体薄片激光器

王 菲

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 设计了一种性能稳定、结构紧凑的光泵浦腔内倍频 488 nm 半导体薄片激光器。为获得光束质量好、输出性能稳定的 488 nm 激光器, 利用 808 nm LD 从顶面垂直泵浦半导体增益介质芯片获得 976 nm 基频光, 通过在腔内置入 I 类相位匹配的 LBO 晶体进行倍频获得 488 nm 激光输出。半导体增益介质芯片具有 13 量子阱和 808 nm/976 nm 双反射带反射镜, 其双面键合金刚石散热片。在泵浦功率为 9.2 W 时, 获得 111 mW 488 nm 激光输出, 光谱线宽为 1.3 nm, 光-光效率为 1.2%, 光束质量 M_x^2 、 M_y^2 分别为 1.03 和 1.02, 连续工作 3 h 激光输出功率不稳定性为 0.6%。

关键词: 激光器; 光泵浦半导体薄片激光器; 488 nm 激光器; 腔内倍频

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0606004

High stability 488 nm light generated by intra-cavity frequency doubling in optically pumped semiconductor disc lasers

Wang Fei

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A high stability and compact structure 488 nm light generated by intra-cavity frequency doubling in an optically pumped semiconductor disc laser was designed. In order to obtain a 488 nm laser with good beam quality and stable performance output, a semiconductor gain medium chip with 13 QWs and 808 nm/976 nm Double Band Mirror was pumped vertically by 808 nm LD on the top surface of the chip, and the chip with double diamond heat spreaders bonded on the both sides was introduced. 488 nm laser was generated by doubling frequency with I phase matched LBO crystals inserted in the cavity. 111 mW 488 nm laser with 1.3 nm spectral line width was obtained, the optical to optical efficiency was 1.2%, the beam quality of M_x^2 、 M_y^2 were 1.03 and 1.02 respectively, and the instability is less than 0.6% with continuously work for more than 3 h.

Key words: lasers; optically pumped semiconductor disc laser; 488 nm laser; intra-cavity frequency doubling

收稿日期: 2019-01-11; 修订日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61076039); 吉林省高校十三五科研规划(JJKH20170616KJ);
长春理工大学科技创新基金(XJLG-2017-12)

作者简介: 王菲(1977-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事先进固态光源理论、特性、技术及应用方面的研究。

Email: feewang@163.com

0 引言

488 nm 波段蓝光激光器在生物医学成像与检测、水下目标探测和光谱分析等领域^[1-4]得到了广泛的应用。氩离子激光器直接输出^[5]、半导体激光直接倍频^[6]、1 953 nm 激光四倍频^[7]、半导体泵浦固体激光和频^[8]及半导体薄片激光器腔内倍频^[9-10]是产生 488 nm 波段激光输出的有效手段。光泵浦半导体薄片激光器具有体积小、结构紧凑、光束质量好、稳定性高和输出功率高等突出优势^[11-14],通过在其腔内置入非线性光学晶体进行倍频获得 488 nm 波段激光输出已经成为应用的首选。现有的光泵浦腔内倍频 488 nm 波段半导体薄片激光器多采用泵浦光束斜入射方式^[10],在半导体增益介质表面的泵浦光斑呈椭圆状,泵浦光斑较大而导致泵浦功率密度变低,同时也破坏了输出光束的质量。有研究人员提出采用底面垂直泵浦方式^[15]来改善泵浦光斑分布,但泵浦光单次通过半导体增益介质芯片的量子阱有源区,造成量子阱有源区吸收的泵浦光有限,从而影响激光器的转换效率。

文中报道了一种顶面垂直泵浦的光泵浦半导体薄片激光器,采用平凹腔结构,通过在谐振腔内置入 I 类相位匹配的倍频晶体 LBO 进行倍频来获得 488 nm 波段激光输出。

1 光泵浦半导体薄片激光器设计

1.1 半导体增益介质设计与制备

如图 1 所示,半导体增益介质是由 GaAs 衬底、缓冲层、双反射带反射镜(DBM)、有源区、窗口层和帽层构成的 VECSEL 芯片。DBM 的排列形式为 (HL)^NH,其中 N 为 12, D 为 4,计算得出 DBM 结构在 808 nm 和 976 nm 处的反射率分别为 99.99% 和 99.96%。有源区采用 13 个周期的应变补偿 InGaAs 量子阱增益结构, $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 量子阱阱宽为 8 nm 厚度,在其两侧对称生长 18.6 nm 厚的 $\text{GaAs}_{0.93}\text{P}_{0.07}$ 补偿层来实现对量子阱的应变补偿,为保证量子阱位于驻波的波峰位置,每个周期均采用 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 垒区进行填充。

为了对 VECSEL 芯片进行有效的热管理,采用机械减薄和化学腐蚀减薄相结合的方式将 VECSEL

芯片的 GaAs 衬底减薄至 100 μm 。采用液体毛细键合方法在 VECSEL 芯片的上下表面分别键合厚度为 0.4 mm 的透明金刚石散热片, T-散热片上表面镀制 808 nm 和 976 nm 的增透膜,如图 2 所示。

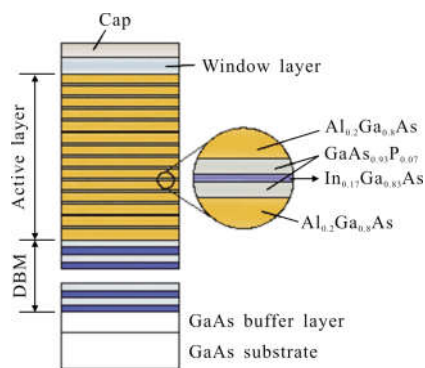


图 1 VECSEL 芯片结构示意图
Fig.1 Structure of VECSEL chip

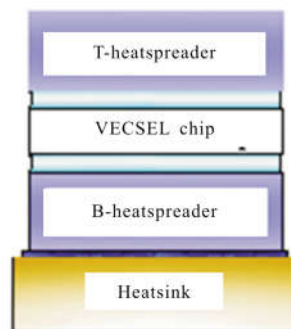


图 2 VECSEL 芯片封装结构

Fig.2 Packaging structure of VECSEL chip

1.2 光泵浦半导体薄片激光器谐振腔模型

如图 3 所示,光泵浦半导体薄片激光器的谐振腔等效为平凹腔,高反射镜为 DBM,输出镜为曲率半径 R 的凹面镜。谐振腔内单程光学传播矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

谐振腔的 G 参数为:

$$\begin{cases} G_1 = 1 - \frac{L}{R} \\ G_2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

对于一个稳定腔来说,需要满足:

$$G_1 G_2 = 1 - \frac{L}{R} \in (0, 1) \quad (3)$$

即有:

$$R > L \quad (4)$$

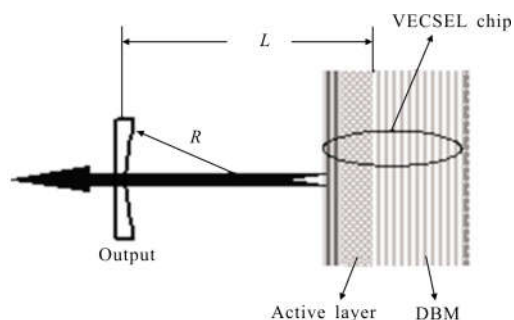


图 3 光泵浦半导体薄片激光器谐振腔模型

Fig.3 Resonator model of optically pumped semiconductor disc laser

2 实验

实验光路如图 4 所示,腔长为 180 mm, M_1 镜曲率半径 R 为 350 mm, 表面镀制对 488 nm 和 976 nm 波段高反射的膜层; M_2 镜为二向色镜, 其对 488 nm 和 808 nm 增透 ($45^\circ, T \geq 95\%$), 对 976 nm 高反射 ($45^\circ, R \geq 99.8\%$)。利用 I 类相位匹配的 LBO 晶体作为倍频晶体, 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×16 mm, LBO 晶体两端面镀制对 976 nm 和 488 nm 增透的光学薄膜。泵浦源为 808 nm 光纤输出的半导体激光器, 光纤输出最大功率为 9.2 W, 功率不稳定性为 0.5%, 经过透镜准直和聚焦后在 VECSEL 芯片表面的泵浦光斑约为 120 μm 。VECSEL 芯片、泵浦源及 LBO 晶体均通过 TEC 进行控温, 温度设置为 22 $^\circ\text{C}$, 温控精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

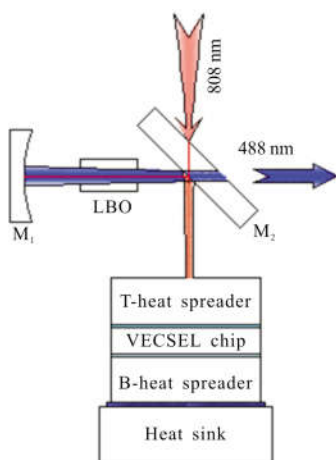


图 4 488 nm 激光器光路示意图

Fig.4 Schematic of the 488 nm laser

如图 5 所示, 采用功率计和光纤光谱仪对激光

器输出特性分别进行测量, 获得输出特性曲线如图 6 和图 7 所示。从图 6 中的输出功率特性曲线可以看出: 在泵浦功率 4.8 W 时达到 488 nm 激光器出光阈值, 随着泵浦功率加大, 输出 488 nm 激光的功率也在不断递增, 在 9.2 W 时获得了 111 mW、488 nm 激光输出, 光-光转换效率为 1.2%。通过连续监测 488 nm 激光的输出功率 3 h, 激光器输出功率不稳定性为 0.6%, 不稳定性主要影响因素来自泵浦源的功率不稳定性, 这也表明采用 VECSEL 芯片双面键合的热管理模式能够显著提高光泵浦半导体薄片激光器的功率稳定性。通过将图 4 所示光路中的 M_1 镜更换成 976 nm 激光器谐振腔的凹面输出镜, 曲率半径 R 仍为 350 mm, 对 976 nm 的透射率约为 4.2%, 测量的基频光 976 nm 激光输出功率如图 6 所示, 随着泵浦功率加大基频光功率逐渐增大, 泵浦功率达到 9.2 W 时基频光输出功率为 1.12 W。

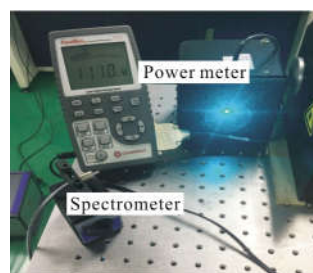


图 5 测量装置

Fig.5 Measuring setup

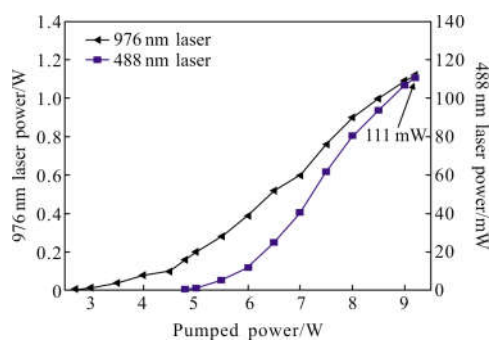


图 6 488 nm/976 nm 激光输出功率曲线

Fig.6 Power curves of the 488 nm/976 nm laser

采用荷兰 AVANTES 光纤光谱仪测量激光器的光谱曲线如图 7 所示, 峰值波长约为 488.4 nm, 光谱线宽为 1.3 nm。激光束的光场分布如图 8 所示, 光场分布圆对称近高斯分布, 经过美国 Spiricon 公司 M^2 -200 光束质量测量仪测量得出: 488 nm 激光的光束

质量 M_x^2 、 M_y^2 分别为 1.03 和 1.02。

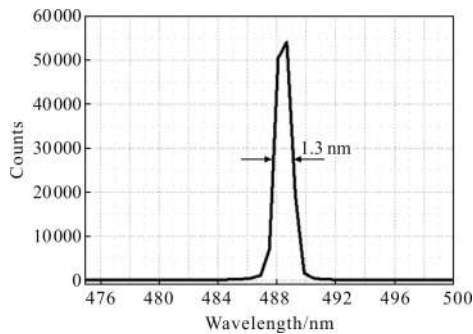


图 7 488 nm 激光器输出光谱曲线

Fig.7 Output spectral curve of the 488 nm laser

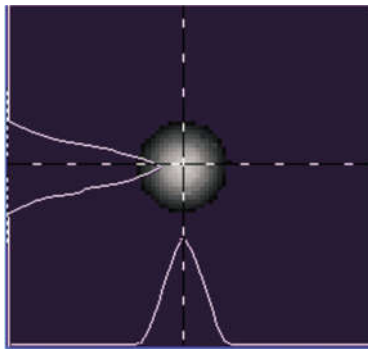


图 8 激光束的光场分布图

Fig.8 Distribution diagram of the laser beam

3 结论

文中报道了光泵浦腔内倍频 488 nm 半导体薄片激光器,激光器以 808 nm 光纤输出半导体激光器作为泵浦源,以具有 13 量子阱的半导体 VECSEL 芯片作为激光增益介质,采用垂直泵浦外腔式结构,通过在腔内置入 LBO 晶体进行倍频,获得 488 nm 激光输出。在泵浦功率为 9.2 W 时获得了 111 mW 圆对称近高斯分布 488 nm 激光输出,光-光转换效率为 1.2%,激光器输出功率不稳定性为 0.6%,光束质量 M_x^2 、 M_y^2 分别为 1.03 和 1.02。

参考文献:

[1] Tinguely Jean-Claude, Helle Øystein Ivar, Ahluwalia Balpreet Singh. Silicon nitride waveguide platform for fluorescence microscopy of living cells[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27678–27690.

[2] Xie Shaoyu, Zhao Yiqiang, Wang Jinhua, et al. Laser fuze anti-surf based on two-wavelength detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0406005. (in Chinese)
谢绍禹, 赵毅强, 王金花, 等. 双色探测激光引信抗海浪技术[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0406005.

[3] Li Chungyi, Lu Haihan, Tsai Wenshing, et al. 6 Gb/s PAM₄ UWOC system based on 488 nm LD with light injection and optoelectronic feedback techniques [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11598–11605.

[4] Duan Guoping, Chen Junling, Han Junhe, et al. Raman spectroscopic study of the crystallization of intrinsic amorphous silicon thin films with a 488 nm continuous-wave laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1657–1661. (in Chinese)
段国平, 陈俊岭, 韩俊鹤, 等. 488 nm 连续激光晶化本征非晶硅薄膜的喇曼光谱研究 [J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1657–1661.

[5] Ahmad Y Nooraldeen, Dhinaa A N, Palanisamy P K. Nonlinear optical properties of acid orange 10 dye by Z-scan technique using Ar⁺ laser [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2007, 16(3): 359–366.

[6] Braune M, Maiwald M, Eppich B, et al. Design and realization of a miniaturized DFB Diode laser-based SHG light wource with a 2 nm tunable emission at 488 nm [J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology*, 2017, 7(5): 720–725.

[7] Xu L, Liang S, Fu Q, et al. Highly efficient frequency doubling and quadrupling of a short-pulsed thulium fiber laser[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(4): 59.

[8] Wang Janguang, Li Yongliang, Tian Yinghua, et al. All-solid-state continuous-wave all-intracavity sum-frequency mixing Blue laser at 488 nm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7): 1669–1672. (in Chinese)
王君光, 李永亮, 田迎华, 等. 全固态腔内和频 488 nm 连续蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1669–1672.

[9] McInerney J G, Mooradian A, Lewis A, et al. High brightness 980 nm pump lasers based on the novalux extended cavity surface-emitting laser (NECSEL) concept [C]//SPIE, 2003, 4947: 240–251.

[10] Vasily Ostroumov, Christoph Simon, Heiko Schwarze, et al. 1 W 488 nm cw air cooled optically pumped semiconductor laser[C]//SPIE, 2008, 6871: 687118.

[11] Guina M, Rantamäki A, Härkänen A. Optically pumped VECSELs: review of technology and progress[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2017, 50(38): 383001.

- [12] Vafapour Z, Khurgin J B. Bandgap engineering and prospects for radiation-balanced vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12985.
- [13] Kahle H, Nechay K, Penttinen J P, et al. AlGaAs-based vertical-external-cavity surface-emitting laser exceeding 4 W of direct emission power in the 740–790 nm spectral range [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1578.
- [14] Qin Li, He Chunfeng, Li Jun, et al. Optimized structure designing of OPS-VECSEL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 81–84. (in Chinese)
秦莉, 何春风, 李军, 等. 光泵浦垂直外腔面发射激光器的结构优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S): 81–84.
- [15] Jun Ho Lee, Jun Youn Kim, Sang Moon Lee, et al. 9.1 W high-efficient continuous-wave end-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser[J]. *IEEE Photon Techn Lett*, 2006, 18(20): 2117–2119.