

980 nm 大功率高阶光栅锥形半导体激光器

郎兴凯^{1,2}, 贾鹏^{1,2*}, 秦莉^{1,2}, 陈泳屹^{1,2}, 梁磊^{1,2}, 雷宇鑫^{1,2}, 宋悦^{1,2},
邱橙^{1,2}, 王玉冰^{1,2}, 宁永强^{1,2}, 王立军^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学 大珩学院, 北京 100049)

摘要: 为了获得高功率、窄线宽和近衍射极限输出的半导体激光器, 采用高阶光栅 (high order Bragg gratings, HOBGs) 和主控振荡功率放大器 (Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA) 结构, 成功研制出一种 980 nm 波段的 HOBGs-MOPA 半导体激光器。该激光器采用周期为 11.37 μm 的高阶光栅进行光模式选择, 通过锥角为 6° 的锥形波导将单模激光功率放大, 实现了输出功率 2.8 W, 3 dB 光谱线宽 31 pm, 光束质量因子 M^2 为 2.51 的窄线宽激光输出。

关键词: 半导体激光器; 大功率; 窄线宽; 高阶光栅
中图分类号: TN3 **文献标识码:** A

980 nm high-power tapered semiconductor laser with high order gratings

LANG Xing-Kai^{1,2}, JIA Peng^{1,2*}, QIN Li^{1,2}, CHEN Yong-Yi^{1,2}, LIANG Lei^{1,2}, LEI Yu-Xin^{1,2},
SONG Yue^{1,2}, QIU Cheng^{1,2}, WANG Yu-Bing^{1,2}, NING Yong-Qiang^{1,2}, WANG Li-Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to obtain high power, narrow line width and near diffraction limit output semiconductor laser diodes, the high order Bragg gratings (HOBGs) and master oscillator power-amplifier (MOPA) have been fabricated in the waveguide of HOBGs-MOPA laser diodes with an emission wavelength of 980 nm. The longitudinal mode of HOBGs-MOPA was selected by the HOBGs with a period of 11.37 μm . The single-mode optical power is amplified by a tapered waveguide with an angle of 6°. In this paper, we present a single mode laser diode with continuous wave power 2.8 W at a 3 dB line-width of 31 pm. The laser diode operates in a close to diffraction-limited optical mode ($M^2=2.51$, laterally).

Key words: semiconductor laser diode, high power, narrow line-width, high order Bragg gratings

PACS: 42.55.Px, 42.60.Jf, 78.20.Ci

引言

半导体激光器具有体积小、质量轻、寿命长等特点, 是光纤放大器、全固态激光器的主要泵浦光源, 广泛应用于光通信、激光加工、国防安全等领

域^[1-3]。随着人工智能技术的高速发展, 高功率、窄线宽半导体激光器逐渐在传感^[4]、扫描^[5-6]、探测^[7]等新兴领域体现出很高的应用价值。近年来, 国内外机构开展了大量的研究工作^[8-10], 在 2018 年, 德国

收稿日期: 2021-02-07, 修回日期: 2021-09-03

Received date: 2021-02-07, Revised date: 2021-09-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2018YFB0504600, 2017YFB0405100), 国家自然科学基金 (61904179, 62004194), 吉林省科技发展计划项目 (20200401062GX)

Foundation items: Supported by the National Science and Technology Major Project of China (2018YFB0504600, 2017YFB0405102), National Natural Science Foundation of China (61904179, 62004194), Science and Technology Development Project of Jilin Province (20200401062GX)

作者简介 (Biography): 郎兴凯 (1991-), 男, 辽宁营口人, 博士研究生, 主要研究领域为大功率边发射半导体激光器。E-mail: 358532389@qq.com
通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jiapeng@ciomp.ac.cn

FBH研究所采用将DBR光栅作为MO(Master Oscillator)的方法,研制出了一种波长为970 nm,输出功率为1.04 W,光谱宽度低于21 pm,光束质量因子 M^2 为1.6的高功率激光器^[8]。为了简化工艺流程,本文提出了一种单片集成的HOBGs-MOPA半导体激光器,通过将高阶光栅与锥形光放大结构相结合,提高器件的单纵模输出功率,并优化激光器的光束质量和线宽特性,从单管器件层面改善半导体激光器的光电特性。该技术有效地简化了制作工艺,降低制备成本,为高功率、窄线宽半导体激光器大规模生产提供了一种可行方法。

1 器件设计与制备

1.1 器件结构

HOBGs-MOPA 半导体激光器的器件结构如下图所示。如图1(a)所示,该器件的总腔长为4 mm,宽度为0.5 mm,包括0.88 mm的脊波导、0.12 mm的高阶光栅和3 mm的锥形光放大波导,为获得更高的输出功率,将光放大区的锥角设计为 6° ,对应的输出腔面宽度为 $320\ \mu\text{m}$ 。为获得单横模和单纵模的种子光,采用81阶的Bragg光栅作为纵模选择元件,光栅区长度为 $120\ \mu\text{m}$,结合宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 的脊形波导,可有效抑制波导中的高阶横模,确保锥形区的输入光为单频激光,经过功率放大后,实现高功率的窄线宽激光。图1(b)为激光器的外延层结构。

1.2 器件设计

为了使激光器获得窄线宽发射,本文使用商业软件COMSOL Multiphysics对高阶光栅的参数进行了仿真设计。在式(1-2)中,光栅结构的参数分别为周期 d_p 、沟槽宽度 d_g 、光栅深度 d_e 。光栅的周期 d_p 和沟槽宽度 d_g 分别由式(1)和(2)表示^[11],

$$d_p = \frac{m\lambda}{4n_{\text{eff,ave}}}, m = 2,4,6\cdots, \quad (1)$$

$$d_g = \frac{m_g\lambda}{4n_{\text{eff,g}}}, m_g = 1,3,5\cdots, \quad (2)$$

其中 m 和 m_g 为整数, λ 为增益光谱的中心波长, $n_{\text{eff,g}}$ 和 $n_{\text{eff,ave}}$ 分别为沟槽处材料的有效折射率和激光器整体材料的平均折射率。利用Comsol偏微分方程法,确定了激光器材料的有效折射率:无刻蚀部分为3.486 6, $1.1\ \mu\text{m}$ 刻蚀部分为3.485 6。根据方程(1)和(2),使用传输矩阵法设计了一种周期 d_p 为 $11.37\ \mu\text{m}$,沟槽宽度 d_g 为 $2.36\ \mu\text{m}$ 的高阶光栅结构。

为了得到高功率激光输出,HOBGs-MOPA中的

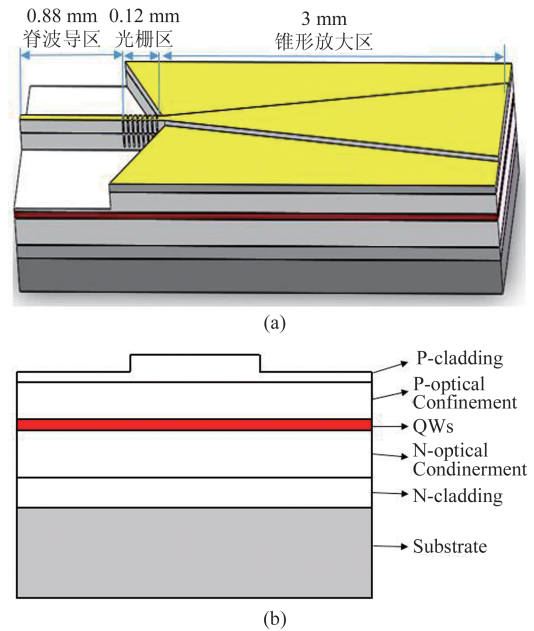


图1 (a)HOBGs-MOPA激光器结构图,(b)外延层结构

Fig. 1 (a)Schematic diagram of HOBGs MOPA semiconductor laser, (b) epitaxial layer structure of HOBGs MOPA semiconductor laser

高阶光栅区长度不能太长,因为高阶光栅区的高阶散射损耗会导致出光功率下降,然而过短的光栅长度会降低光子寿命以及窄线宽输出特性,综合考虑我们将高阶光栅的长度设计为 $120\ \mu\text{m}$ 。HOBGs-MOPA激光器中的光学模式的有效折射率跟光栅的刻蚀深度密切相关:刻蚀越深,光学模式的有效折射率越小,其有效折射率跟波导中的有效折射率差越大,损耗越高,更容易得到窄线宽的器件,但是光栅沟槽的刻蚀深度也不可以太深,刻蚀深度过深会导致高阶散射增强,使波导内光波的损耗增大,功率的损耗也将增大。计算了不同刻蚀深度下的反射、透射和损耗,如图2-4所示。如图3中,刻蚀深度的变化只影响反射的效率,过大的刻蚀深度会导致高阶散射增强,加剧波导中光波的损耗;光栅沟槽的刻蚀深度也不可以太小,过浅的光栅结构不能在长度为 $120\ \mu\text{m}$ 的情况下提供一个足够大的反馈。考虑到干法刻蚀工艺制备过程中可能会出现工艺误差导致刻蚀深度比理论值略大,结合上述因素综合分析,光栅沟槽的刻蚀深度 d_e 被设计为 $1.1\ \mu\text{m}$ 。此时,HOBGs的反射率可以达到4.3%,透射率为62%,损耗率为32%,如下图所示。

由图2可以看到这种高阶光栅结构在 $\lambda \approx 978\ \text{nm}$ 附近处提供一个强的反射光谱。从图4可以看到在 $\lambda \approx 978\ \text{nm}$ 附近的损耗达到最低,这意味着这种

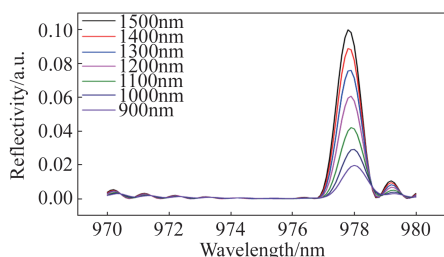


图2 不同刻蚀深度下HOBGs-MOPA激光器的反射光谱图
Fig. 2 Reflection spectrum of HOBGs MOPA laser at different etch depths

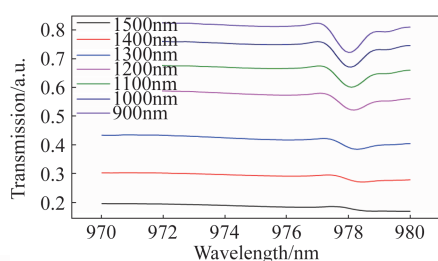


图3 不同刻蚀深度下HOBGs-MOPA激光器的透射光谱图
Fig. 3 Transmission spectrum of HOBGs MOPA laser at different etch depths

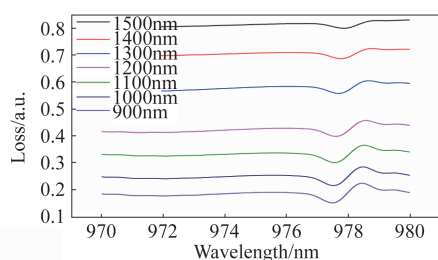


图4 不同刻蚀深度下HOBGs-MOPA激光器的损耗光谱图
Fig. 4 Loss spectrum of HOBGs MOPA laser at different etch depths

周期性结构可以通过增强 $\lambda \approx 978$ nm处的模式的反馈强度,从而降低这种模式的阈值条件,在模式竞争中抑制其他边模,在 $\lambda \approx 978$ nm处实现窄线宽光谱输出。

1.3 器件制备

该器件由超低铝组分不对称宽波导结构和双应变补偿铟镓砷(InGaAs)量子阱构成。利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)在砷化镓衬底上完成了外延层的生长制备。材料生长后,采用i-line光刻技术和ICP蚀刻技术构建了高阶布拉格光栅和脊形波导结构。81阶布拉格光栅的周期为 $11.37 \mu\text{m}$,脊形波导的台面高度为 $1.1 \mu\text{m}$ 。完成平面工艺后,将激光芯片解理并制备腔面膜(反射率为3%、99%的增透和高反腔面光学膜)进行封装测试。上述单

管芯片采用倒装焊的方式焊接在氮化铝陶瓷片上,之后将陶瓷片夹持在通水的底座上,在连续电流条件下进行光电特性测试。

2 实验结果与讨论

器件的测试工作均在连续波条件下进行,采用水冷散热方式,设定水冷温度为 20°C 。首先,使用综合参数测试仪对器件的功率-电流-电压特性进行表征。在光电特性测试中,输出功率、电流、电压等数值都是直接从综合测试仪中读取出来的。在连续注入电流条件下,使用了横河AQ6370C光谱分析仪、积分球及一根纤芯直径的 $8 \mu\text{m}$ 、分辨率为 0.02 nm 的单模光纤测试了HOBGs-MOPA激光器的光谱特性。采用快轴准直镜头、慢轴准直镜头和聚焦镜头准直后测量激光器输出光束的束腰宽度。在连续光输出下,高阶布拉格光栅MOPA器件的功率-电流-电压($P-I-V$)特性如下图所示。最大输入电流设置为 5 A 。

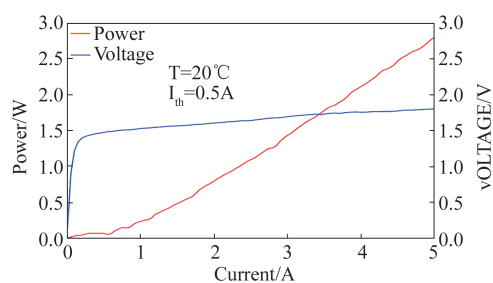


图5 HOBGs-MOPA激光器的光功率-电流-电压特性曲线图

Fig. 5 Light power-current-voltage curve graph of HOBGs MOPA laser

如图5所示,HOBGs-MOPA激光器的阈值电流为 0.85 A 。器件在 5 A 时可以达到最大输出功率为 2.8 W ,斜率效率约为 0.62 W/A ,在 1.75 W 的输出功率条件下,电光转换效率可达31%。

如图6所示,当电流从阈值增加到 5 A 时,在输出波长 982 nm 附近,测得最大SMSR大于 30 dB ,此时电流为 2.5 A 。在连续电流条件下,可以直接从光谱分析仪中得到HOBGs-MOPA器件 2.5 A 处的光谱图, 3 dB 谱线宽度为 31 pm 。

在注入电流为 2.5 A 时HOBGs-MOPA激光器的远场图如图7所示。利用光束质量分析设备对激光远场发散角进行表征,发现其慢轴远场发散角仅为 19.48° 。由于束腰在锥形结构器件轴向位置的不同,测量到的慢轴远场发散角大于实际值。从阈

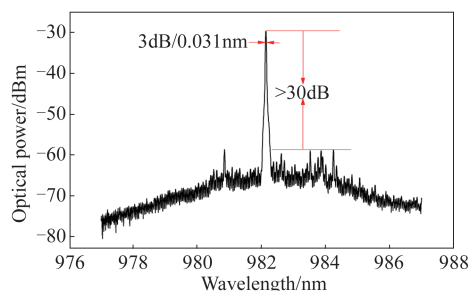


图6 2.5 A 电流条件下 HOBGs MOPA 激光器的光谱 SMSR 值

Fig. 6 Optical spectrum of HOBGs MOPA device at 2.5 A

值到 5 A 范围内,慢轴方向远场分布一直呈近高斯分布,远场发散角小于 19.48° ,光束质量因子 $M^2=2.51$ 。在注入电流为 5 A 时,HOBGs-MOPA 器件的慢轴远场分布如下图所示。

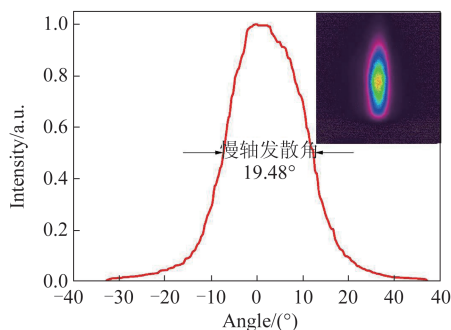


图7 HOBGs-MOPA 的慢轴远场分布图

Fig. 7 The lateral far field patterns of HOBGs-MOPA laser. The far-field spot is shown in the figure.

3 结论

本文利用高阶光栅和锥形波导的模式选择和光放大特性,研制出了一种高功率、窄线宽 HOBGs-MOPA 激光器。在注入电流为 5 A 时,其输出功率可达 2.8 W,最大斜率效率大于 0.62 W/A ,电光转换效率最高可达 31%。该器件从阈值到 2.5 A 保持单纵模输出,最大单纵模输出功率超过 1.25 W,高于文献报道的单纵模激光器^[12]。该器件的 3 dB 线宽为 31 pm, SMSR 大于 30 dB,横向远场发散角为 19.84° ,光束质量 $M^2=2.51$ 。基于高阶光栅选频和

锥形光放大技术,本文提供了一种低成本方法来实现在高功率、窄线宽的高光束质量激光器。

References

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(7): 1049-1056.
- [2] Greusard L, Costantini D. Near-field analysis of metallic DFB lasers at telecom wavelengths [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): 10422-10429.
- [3] Schulz W, Poprawe R. Manufacturing with novel high-power diode lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(4): 696-705.
- [4] Bayrakli I. Investigation of double-mode operation and fast fine tuning properties of a grating-coupled external cavity diode laser configuration [J]. *Opt and Laser Tech*, 2017, **87**: 7-10.
- [5] Nehrir A R, Repasky K S, Carlsten J L. Eye safe diode laser based micropulse differential absorption lidar (DIAL) for water vapor profiling in the lower troposphere [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, **28**(2): 131-147.
- [6] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, *et al.* Recent advances in ultrafast semiconductor disk lasers [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, **4**: 1-14.
- [7] Peng H, Wang Y. Dynamic time correlated single-photon counting laser ranging [J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, **14**(2): 129-132.
- [8] Tawfiq M, Wenzel H, Casa P D, *et al.* High-power sampled-grating-based master oscillator power amplifier system with 23.5 nm wavelength tuning around 970 nm [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(29): 8680-8685.
- [9] Hasler K H, Sumpf B, Adamiec P, *et al.* 5W DBR Tapered lasers emitting at 1 060 nm with a narrow spectral linewidth and a nearly diffraction limited beam quality [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1648-1650.
- [10] Vilera M, Pérez-Serrano A, Tijero J M G, *et al.* Emission characteristics of a 1.5 um all-semiconductor tapered master oscillator power amplifier [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(2): 150070 9.
- [11] Patchell J, O'Gorman J. Specifying the wavelength and temperature tuning range of a Fabry Perot laser containing refractive index perturbations [C]. *Proceedings-of-SPIE 2005*, Dublin, Ireland, 2005. doi:10.1117/12.611334.
- [12] Lei Y X, Chen Y Y, Gao F, *et al.* 996 nm high-power single-longitudinal-mode tapered gain-coupled distributed feedback laser diodes [J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(23): 6426-6432.