

双波长高阶光栅分布布拉格反射半导体激光器的研究

贾 鹏^{1,2} 刘晓莉³ 陈泳屹¹ 秦 莉¹ 李秀山^{1,2} 张建伟¹ 刘 云¹ 宁永强¹ 王立军¹

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, 北京 100049

³焦作大学机电工程学院, 河南 焦作 454000

摘要 为了获得适用于非线性差频法产生太赫兹波的双波长半导体激光器,设计并利用普通光刻技术制备了一种双波长高阶光栅分布布拉格反射(DBR)激光器。这种DBR激光器是在条宽为100 μm的光波导上,制备了一组周期为9.5 μm,沟槽宽度为1.36 μm,光栅长度为100 μm的高阶光栅结构,实现高功率连续双波长激射,短波长光模式的边模抑制比大于35 dB,长波长光模式的边模抑制比为39 dB,光谱半峰全宽均为0.04 nm,双波长间隔大于0.58 nm,适用于光混频产生太赫兹波。注入电流1.2 A时,实现了单边88 mW的高功率激射。提出了一种可实现高功率双波长激光输出的高阶光栅DBR激光器结构,为双波长半导体激光器的大规模生产提供了一种新方法。

关键词 激光器;分布布拉格反射激光器;高阶光栅;双波长激射;太赫兹波

中图分类号 TN 248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802007

Study of Dual-Wavelength Distributed Bragg Reflection Semiconductor Laser with High Order Bragg Gratings

Jia Peng^{1,2} Liu Xiaoli³ Chen Yongyi^{1,2} Qin Li¹ Li Xiushan^{1,2} Zhang Jianwei^{1,2}

Liu Yun¹ Ning Yongqiang¹ Wang Lijun¹

¹State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaozuo University, Jiaozuo, Henan 454000, China

Abstract In order to obtain an optical beat source for THz generation, a dual-wavelength distributed Bragg reflection (DBR) semiconductor laser with high order Bragg gratings (HOBGs) is designed. The DBR laser is fabricated by ultraviolet lithography technology with strip width of 100 μm, grating period of 9.5 μm and grating groove width of 1.36 μm. High power continuous-wave dual-wavelength lasing is obtained at injection current from 0.9 A to 1.2 A and the side mode suppression ratios of short wavelength mode and long wavelength mode are larger than 35 dB and 39 dB, respectively. The 3 dB spectrum full width at half maximum of the two wavelength modes are both 0.04 nm. The wavelength difference of two lasing modes is larger than 0.58 nm, which is appropriate for an optical beat source for THz generation. When the injection current is 1.2 A, the output power of HOBGs DBR laser is up to 88 mW from one cavity facet. A kind of high power dual-wavelength HOBGs DBR laser is proposed, which provides a new solution for dual-wavelength semiconductor laser to mass production.

Key words lasers; distributed Bragg reflector laser; high order gratings; dual-wavelength lasing; terahertz wave

OCIS codes 140.5960; 050.2770

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61234004,61434005,61176045,61306086,61474118,61474010)、吉林省科技厅项目(20140101172JC,20130206006GX)

作者简介: 贾 鹏(1986—),男,博士研究生,主要从事高功率光栅耦合半导体激光器方面的研究。

E-mail: modou1986@163.com

导师简介: 秦 莉(1969—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事半导体激光技术及应用方面的研究。

E-mail: qinl@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

双波长半导体激光器相比于传统的双波长光纤激光器^[1-3],具有体积小、功率高、稳定双频激光输出、易于制备等优点。这些优点使得双波长半导体激光器在波分复用、太赫兹波光源、光学遥感等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景。其中利用非线性差频技术产生太赫兹波^[4-6]是双波长半导体激光器的重要应用方向。

近年来,多种双波长半导体激光器被国内外研究机构报道。Kim等^[7-8]利用双段式分布式反馈(DBF)激光器实现了边模抑制比大于30 dB,波长差值大于0.81 nm的双波长激光输出。通过在Y型波导的两个分支上引入分布布拉格反射(DBR)光栅结构,Price等^[9]制得了一种波长差值为10 nm,输出功率为50 mW的双波长Y型DBR激光器。采用复材料共振腔DBR激光器^[10],双波长垂直腔半导体激光器^[11-12]等方法获得双波长激光输出的研究成果也有报道。而这些双波长半导体激光器的制备都需要复杂且昂贵的电子束光刻技术及二次外延技术。这就制约了双波长半导体激光器的大规模生产应用。

本文通过分析高阶光栅对DBR激光器腔模的选择特性,设计了一种双波长高阶光栅DBR激光器,实现高功率稳定双波长激光,短波长光模式的边模抑制比大于35 dB,长波长光模式的边模抑制比为39 dB,3 dB光谱线宽都为0.04 nm,双波长间隔大于0.58 nm,适用于非线性差频法产生太赫兹波。注入电流1.2A时,实现了单边88 mW的高功率激励。

2 器件设计与制备

2.1 器件结构

高阶光栅DBR激光器件的结构图如图1所示。器件外延片是通过金属有机化合物气相沉积(MOCVD)技术生长在N型掺杂的GaAs衬底上,基本外延结构包括N型GaAs外延衬底,N型Al_{0.15}GaAs包层,N型Al_{0.08}GaAs光限制层,多量子阱(MQW)有源区,P型Al_{0.08}GaAs限制层,P型Al_{0.2}GaAs包层。有源区采用GaAs/InGaAs多量子阱结构。为了将光限制在波导层,两侧P型和N型光限制层和包层都采用渐变AlGaAs材料,材料中的Al组分从有源区位置开始向两侧呈现逐渐减小的趋势以便形成光波导结构。

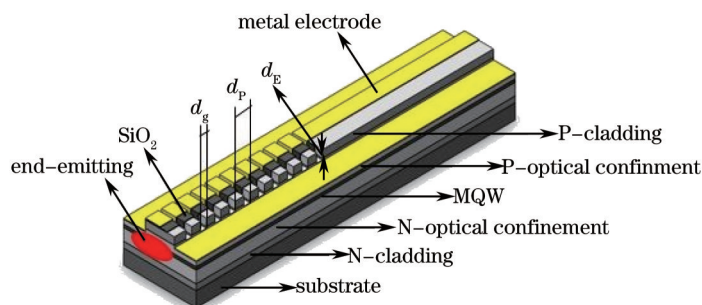


图1 高阶光栅DBR激光器件的结构图
Fig.1 Structure diagram of HOBGs DBR laser

2.2 器件设计

为了实现激光器的双波长激励,设计了一种高阶布拉格光栅结构,其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_g 。光栅的周期 d_p 和沟槽宽度 d_g 分别由(1)式和(2)式表示^[13]:

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

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

式中 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。

设计过程中,假设外延片结构的激励中心波长为960 nm。利用Comsol偏微分方程法^[14],确定了激光器材料的有效折射率为3.4867。将采用普通光刻技术制备高阶光栅结构,而普通光刻技术的最小工艺精度约为1 μm ,所以高阶光栅的沟槽结构宽度不能少于1 μm 。根据(1)式和(2)式,使用传输矩阵法设计了一种周期

d_p 为 $9.5 \mu\text{m}$, 沟槽宽度 d_g 为 $1.36 \mu\text{m}$ 的高阶光栅结构, 得到了反射率相近的双波长反射光谱, 如图 2 所示。为了得到高功率双波长激光输出, 这种高阶光栅的长度不能设计的太长, 因为高阶光栅结构的高阶散射损耗和无源光栅区的吸收损耗都会导致出光功率下降。因此, 将高阶光栅的长度设计为 $100 \mu\text{m}$ 。光栅沟槽的刻蚀深度 d_e 设计为 $1.2 \mu\text{m}$ 。因为光栅沟槽的刻蚀深度不可以太大, 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 $100 \mu\text{m}$ 的情况下提供一个足够大的反馈。

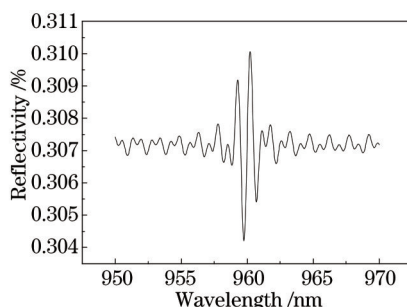


图 2 高阶光栅 DBR 激光器的反射光谱图

Fig.2 Reflection spectrum of HOBGs DBR laser

如图 2 所示, 这种高阶光栅结构可以分别在 $\lambda_1=959.34 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=960.24 \text{ nm}$ 处提供一个强的反射光谱。在 $\lambda_1=959.34 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=960.24 \text{ nm}$ 处的反射率分别为 30.9% 和 31%, 大于边模的 30.7%。这就意味着这种光栅结构可以通过增强 $\lambda_1=959.34 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=960.24 \text{ nm}$ 两个主模式的反馈强度, 从而降低这两种模式的阈值条件, 在模式竞争中抑制其他边模, 实现波长差值为 0.9 nm 的双波长激光。根据非线性差频理论^[15], 当激光器激射的双波长的频率差值 Δf 满足(3)式时, 这种双波长激光器就可以用于光混频产生太赫兹波:

$$0.1 \text{ THz} \leq \Delta f = \frac{c \cdot \Delta \lambda}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \leq 10 \text{ THz} \quad (3)$$

即当 960 nm 波段激光器的双波长差值 $\Delta \lambda$ 满足 $0.26 \text{ nm} \leq \Delta \lambda \leq 26 \text{ nm}$ 的条件时, 这种双波长激光器就可以用于光混频产生太赫兹波。

2.3 器件制备

高阶光栅 DBR 激光器的制备工艺, 是在普通宽条法布里-珀罗(FP)腔激光器的光波导上引入一组周期为 $9.5 \mu\text{m}$ 的光栅结构, 光栅区的长度为 $100 \mu\text{m}$ 。首先, 在外延片表面使用普通光刻技术和电感耦合等离子刻蚀技术制备出 $100 \mu\text{m}$ 宽条形波导。之后, 在宽条形波导上, 再次使用普通光刻技术和电感耦合等离子刻蚀技术制备出周期为 $9.5 \mu\text{m}$, 沟槽宽度为 $1.36 \mu\text{m}$ 的高阶光栅结构。最后, 使用 SiO_2 钝化技术将光栅区域钝化后, 利用磁控溅射金电极溅射技术在减薄后的外延片的 P 面和 N 面溅射接触电极, 就可以进行解理测试。

3 实验结果与讨论

为了得到器件的精确光谱, 采用了连续电流注入的方式进行测试。为了保证激光器件可以在一个室温环境下连续工作, 将腔长为 2 mm 、未镀膜面膜的 DBR 激光器件采用倒装焊的方式封装到 C-mount 热沉上, 并

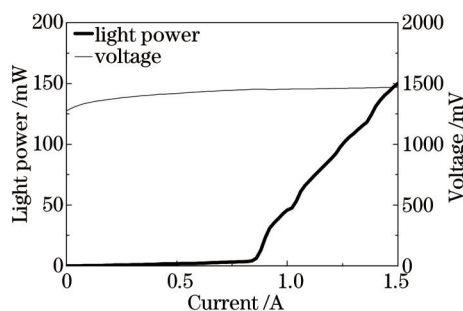


图 3 高阶光栅 DBR 激光器的光功率-电流-电压特性曲线图

Fig.3 Light power-current-voltage curve of HOBGs laser

外接了一台设定温度为 20 ℃ 的水冷设备。测试得到双波长 DBR 激光器的光功率-电流特性曲线如图 3 所示,该器件的阈值电流约为 840 mA,斜率效率约为 227.3 mW/A。由于高阶光栅的引入,会导致激光器件的阈值增大,出光功率减小。

在连续电流条件下,使用了横河 AQ6370C 分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪及一根纤芯直径 10 μm 的单模光纤测试了高阶光栅 DBR 激光器的光谱特性,如图 4 所示。在图 4(a)中,可以看到该器件在注入电流为 0.9~1.2 A 的条件下都会得到一个稳定的双波长激光输出。其中较短波长 λ_1 的 3 dB 光谱宽度始终保持在 0.04 nm 左右,边模抑制比大于 35 dB;较长波长 λ_2 的 3 dB 光谱宽度始终保持在 0.04 nm 左右,边模抑制比大于 39 dB。但是当注入电流达到 1.2 A 时,较短波长 λ_1 的边模强度突然增强,主模光谱展宽。随着注入电流继续加大, DBR 激光器的光谱特性开始劣化,双波长的主模光谱迅速展宽,边模抑制比不断减小,逐渐形成多纵模激射。这是因为随着注入电流加大, DBR 激光器的电注入区自热效应增强,使得器件内部的温度升高,尤其是有源区结温的升高将引起禁带宽度变窄,折射率增加,材料增益降低,输出波长向长波长方向漂移,即红移。而高阶光栅区没有电注入,其材料折射率增加的速度小于电注入区,导致光栅结构的布拉格波长的漂移速率小于电注入区波长漂移,最终电注入区的增益波长峰值与光栅的布拉格波长不匹配,由双波长激射转变为多波长激射。

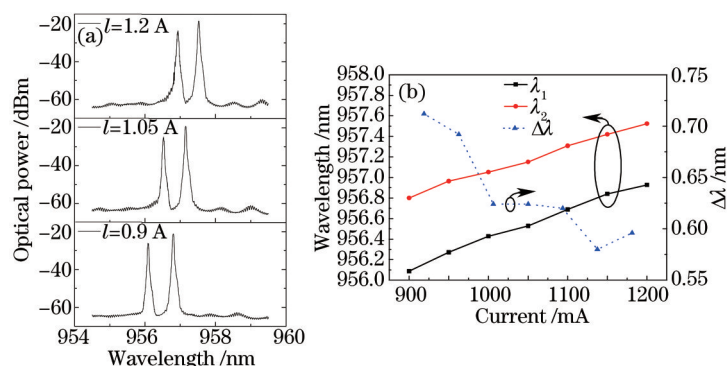


图 4 (a) 不同注入电流下高阶光栅 DBR 激光器的光谱图; (b) 短波长 λ_1 和长波长 λ_2 的中心波长及双波长差值 $\Delta\lambda$ 随注入电流变化曲线图

Fig.4 (a) Spectra of HOBGs laser at different injection currents; (b) curve of short wavelength mode λ_1 , long wavelength mode λ_2 and wavelength difference $\Delta\lambda$ versus injection current

如图 4(b)所示双波长的中心波长随着电流加大而加大,波长 λ_1 和 λ_2 不断红移,红移速率分别为 2.41 nm/A 和 2.8 nm/A,使得双波长的差值 $\Delta\lambda$ 由 0.712 nm 减小到 0.58 nm,但仍满足大于 0.26 nm 的条件。由于真实材料的折射率与理论折射率存在差异,以及光刻、刻蚀等工艺中引入的光栅结构参数变化,导致了所得到的高阶光栅 DBR 激光器的双波长差值 $\Delta\lambda$ 小于计算所得的 0.9 nm。

4 结 论

通过分析高阶光栅的反射特性,设计了一种适用于产生太赫兹波的双波长高阶光栅 DBR 激光器,实现了双波长激射,短波长边模抑制比大于 35 dB,长波长边模抑制比为 39 dB,3 dB 光谱线宽均为 0.04 nm,双波长间隔大于 0.58 nm,适用于光混频产生太赫兹波。注入电流为 1.2 A 时,实现了单边 88 mW 的高功率激射。这种高阶光栅 DBR 激光器件的制备只需要普通光技术即可实现,不需要复杂且昂贵的电子束光刻技术及二次外延技术。其制备工艺简单,成本较低,为大规模生产双波长半导体激光器提供了一种新方法。

参 考 文 献

- 1 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602013.
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602013.
- 2 Ding Yaqian, Qi Yunfeng, Liu Yuan, *et al.*. Study on polarization maintaining fiber power amplification characteristics of dual-wavelength fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302002.

- 丁亚茜, 漆云凤, 刘 源, 等. 双波长光纤激光器的保偏光纤功率放大特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302002.
- 3 Jia Qingsong, Wang Tianshu, Zhang Peng, *et al.*. Microwave signal generation based on dual-wavelength Brillouin fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0705001.
- 贾青松, 王天枢, 张 鹏, 等. 基于双波长布里渊光纤激光器的微波信号产生[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0705001.
- 4 Zhang Xicheng, Bradley Ferguson. Materials for terahertz science and technology[J]. Physics, 2003, 32(5): 286-293.
- 张希成, Bradley Ferguson. 太赫兹科学与技术研究回顾[J]. 物理, 2003, 32(5): 286-293.
- 5 Mu Kaijun, Zhang Zhenwei, Zhang Cunlin. Terahertz science and technology[J]. Journal of CAEIT, 2009, 4(3): 221-230.
- 牧凯军, 张振伟, 张存林. 太赫兹科学与技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 221-230.
- 6 Yang Qing, Huo Yujing, Duan Yusheng, *et al.*. Double-longitudinal-mode continuous-wave laser with ultra-large frequency difference used for narrowband terahertz-wave generation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514002.
- 杨 清, 霍玉晶, 段玉生, 等. 用于产生窄带太赫兹波的超大频差双纵模连续激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514002.
- 7 Kim I, Kim C, Li G, *et al.*. 180-Gb/s clock recovery using a multi-section gain-coupled distributed feedback laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005, CMZ1
- 8 Kim N, Shin J, Sim E, *et al.*. Monolithic dual-mode distributed feedback semiconductor laser for tunable continuous-wave terahertz generation[J]. Opt Express, 2009, 17(16): 13851.
- 9 Price R, Verma V, Tobin K, *et al.*. Y-branch surface-etched distributed Bragg reflector lasers at 850 nm for optical heterodyning[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2007, 19(20): 1610.
- 10 Cheng C, LingJuan Z, JiFang Q, *et al.*. Dual-wavelength distributed Bragg reflector semiconductor laser based on a composite resonant cavity[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(9): 094208.
- 11 Brunner M, Gulden K, Hovel R, *et al.*. Continuous-wave dual-wavelength lasing in a two-section vertical-cavity laser[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2000, 12(10): 1316.
- 12 Guan Baolu, Guo Xia, Zhang Jinglan, *et al.*. Characteristics of dual-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(1): 280.
- 关宝璐, 郭 霞, 张敬兰, 等. 双波长垂直腔面发射激光器及特性研究[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 280.
- 13 Gao Z, Wang L, He J J. Mode competition analysis in dual-wavelength coupled-cavity semiconductor laser[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(3): 432-441.
- 14 Su S T, Tang S F, Chen T C, *et al.*. Temperature-dependent VCSEL optical characteristics based on graded Al_xGa_{1-x}As/GaAs distributed Bragg reflectors: reflectivity and beam profile analyses[C]. SPIE, 2006: 61320L.
- 15 Yang Pengfei, Yao Jianquan, Bin Pibin, *et al.*. Source and characteristics of THz wave[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(2): 125-131.
- 杨鹏飞, 姚建铨, 邴丕彬, 等. 太赫兹波及其常用源[J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 125-131.

栏目编辑: 宋梅梅