

双波长可调外腔半导体激光器

白慧君,汪岳峰,王军阵,郭天华

(军械工程学院 电子与光学工程系,河北 石家庄 050003)

摘要:提出了一种基于体布拉格光栅(VBG)和横向啁啾体布拉格光栅(TCVBG)组合的双光栅外腔半导体激光器,该外腔半导体激光器采用反射率 15%的体光栅和反射率 17%的啁啾体布拉格光栅作为反馈元件和模式选择元件,实现特定波长的选择和调谐,实验研究了外腔激光器的功率-电流特性、光谱特性和波长调谐特性。实验结果表明:双光栅外腔半导体激光器最大输出功率为 1.96 W,斜率效率为 0.94 W/A,外腔效率达到 78%。输出光谱为双波长,一个波长为 808.6 nm,另一个波长连续可调,通过改变横向啁啾体光栅的位置,该波长可从 800 nm 调谐至 815 nm,可调范围达 15 nm,在整个可调范围内两个波长的谱线宽度(FWHM)均小于 0.3 nm。

关键词:双波长; 体布拉格光栅; 横向啁啾体布拉格光栅; 外腔半导体激光器; 波长可调谐
中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0906002

Tunable dual-wavelength external cavity semiconductor laser

Bai Huijun, Wang Yuefeng, Wang Junzhen, Guo Tianhua

(Electrics and Optics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: A double grating external cavity semiconductor laser based on a volume Bragg grating (VBG) and a transversely chirped volume Bragg grating (TCVBG) were reported. The external cavity semiconductor laser consisted of a VBG with the reflectivity of 15% and a TCVBG with the reflectivity of 17%, which function as feedback element and mode selection element to achieve specific wavelength selection and wavelength tuning. The power, spectral and wavelength tuning characteristics of external cavity laser semiconductor using VBG and TCVBG were demonstrated. The experimental results indicate that an output power of 1.96 W is obtained with the slop efficiency of 0.94 W/A, which corresponds to the efficiency of 78% compared to the output power in free-running LD. A dual-wavelength was achieved with the linewidth down to 0.3 nm, and one wavelength of 808.6 nm was stabilized, and by adjusting the position of the chirped volume Bragg grating in the transverse direction, another wavelength was tuned in a 15 nm wavelength tunable range from 800 nm to 815 nm.

Key words: dual-wavelength; volume Bragg grating; transversely chirped volume Bragg grating; external cavity semiconductor laser; wavelength tunable

收稿日期:2017-01-10; 修订日期:2017-02-20

基金项目:国家高技术发展计划

作者简介:白慧君(1986-),男,博士生,主要从事半导体激光线宽压窄方面的研究。Email: bhj06@sina.com

导师简介:汪岳峰(1963-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事固体激光技术方面的研究。Email: wyf_oec@sina.com

0 引言

双波长激光器在激光测距^[1]、成像系统^[2]、光谱分析^[3-4]、太赫兹波光源^[5-6]、位移检测^[7]等方面具有重要的科学价值和广阔的应用前景。半导体激光器产生双波长的有效途径有光束合成和外腔技术等,光束合成技术主要采用合成元件将两束不同波长的光束空间叠加^[8],合成后输出的光束为双波长,这种方法得到的双波长一般不可调谐;而外腔技术是采用衍射光学元件与半导体激光器构成外腔,将特定波长的光束反馈到激光器内腔中,经过模式竞争,形成双波长输出。构成外腔的元件主要有法布里-珀罗滤波器^[9]、光纤布拉格光栅^[10-11]、取样布拉格光栅^[12]等,但是这些激光器结构复杂,稳定性差。近年来,体布拉格光栅以其良好的热稳定性和高损伤阈值,取代光纤布拉格光栅,被应用于外腔半导体激光器中,在半导体激光器的波长稳定和线宽压窄^[13]中得到广泛应用。体光栅外腔精简了半导体激光外腔所需的光学元件,结构简单,稳定性好,有利于获得大功率的激光输出。S.A.Zolotobskaya 等^[14]采用了一对体光栅与半导体激光构成外腔的方法,两块体光栅分别反馈不同的波长进入半导体激光器内部,经过选模后,激光器输出双波长,中心波长分别为 972 nm、978 nm,最大输出功率为 1.75 W,每个波长的线宽在 0.8 nm 以下。李志永等^[15]研究了两块相同的体光栅组合压窄半导体激光线宽的方法,得到了 0.1 nm 的窄线宽输出,通过调节体光栅温度变化,可以实现波长调谐,获得了从 779.43~780.05 nm 最大波长间隔 0.62 nm 的双波长输出。

横向啁啾体布拉格光栅(TCVBG)的折射率调制周期沿啁啾方向呈线性变化,在光栅的不同横向位置上中心波长也呈线性变化,可以通过横向移动 TCVBG 实现对不同中心波长的衍射。TCVBG 作为选模元件,被广泛应用在二极管激光器、固体激光器和光纤激光器的线宽压窄和波长调谐等^[16-18]领域。

文中提出一种采用体布拉格光栅和横向啁啾体布拉格光栅组合的双光栅外腔半导体激光器,基于啁啾光栅的中心波长可调性,压窄波长的同时实现外腔波长调谐。实验研究了基于体光栅与 TCVBG

的双光栅外腔二极管激光器的线宽压窄特性和波长调谐特性。

1 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示,LD 为半导体激光器,采用了中国电子科技集团公司第十三研究所生产的 C-Mount 封装的半导体激光器单管,中心波长为 808 nm,输出功率 2.5 W。激光器出射端面镀有增透膜,其反射率小于 5%。采用直径为 120 μm 圆柱透镜对快轴光束进行准直,准直后 90% 的能量集中在 8 mrad 内。VBG 为美国 PD-LD 公司生产的体布拉格光栅,在波长 808 nm 处的衍射效率为 15%,尺寸为 15 mm×1.5 mm,厚 0.6 mm,谱选择宽度为 0.3 nm。TCVBG 为 PD-LD 公司生产的横向啁啾体布拉格光栅,其入射面尺寸为 12 mm×1.5 mm,厚度为 1.6 mm。啁啾中心波长从 799~817 nm 线性变化,波长啁啾系数为 1.5 nm/mm,峰值衍射效率为 17%,图 1 中箭头方向指示的是 TCVBG 的横向啁啾方向。测量仪器包括光谱仪和功率计。

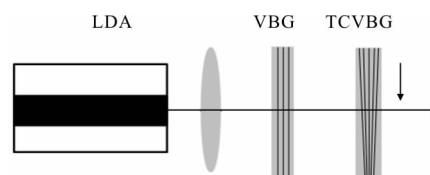


图 1 双光栅外腔半导体激光器实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup of external cavity semiconductor laser with dual-grating

半导体激光器出射光经过快轴准直后,进入 VBG 和 TCVBG 组合构成的双光栅外腔中,设 VBG 的布拉格波长为 λ_1 ,TCVBG 在光轴处反馈的波长为 λ_2 ,调节两块体光栅与激光器的距离,使波长 λ_1 和 λ_2 的损耗和阈值增益满足条件^[19]:

$$g_{\lambda_i} \times L = G_{th}(\lambda_i) = \delta_{\lambda_i}, i=1,2 \quad (1)$$

式中: g_{λ_i} 为 λ_i 的增益系数; L 为腔长; $G_{th}(\lambda_i)$ 为 λ_i 的阈值单程增益; δ_{λ_i} 为 λ_i 在腔内的单程损耗。VBG 和 TCVBG 分别对 λ_1 和 λ_2 提供强反馈,在双光栅外腔中增强了 λ_1 和 λ_2 两个模式的反馈强度,抑制其他边模,实现双光栅外腔激光器的双波长激光。实验中,调节体光栅与激光器的距离,使半导体激光器波长实现锁定,外腔长度调节范围为 0.5~10 cm,加入啁

啾体光栅后,调节啾体光栅与体光栅之间的距离,使激光器获得双波长输出,两块光栅之间的距离调节范围为 0.01~5 cm。当 TCVBG 沿着横向啾体方向移动位置时,啾体中心波长随着位置的改变而线性变化,忽略体光栅受激光照射发生热变形而引起的中心波长的改变,波长 λ_1 的反馈保持不变,则外腔激光器的出射波长 λ_1 保持不变,而波长 λ_2 实现调谐。

2 实验结果及分析

2.1 功率特性

采用 VBG 和 TCVBG 与激光器构成外腔前后,测试得到激光器的光功率-电流特性曲线如图 2 所示。激光器在自由运转时,驱动电流为 3.30 A 时,获得了功率 2.51 W 的激光输出,斜率效率 1.2 W/A。加入单个 VBG 和激光器构成外腔后,驱动电流为 3.30 A 时,体光栅外腔激光器获得了 2.21 W 的输出功率,斜率效率 1.06 W/A,外腔效率 88%。加入单个 TCVBG 与激光器构成外腔后,在驱动电流为 3.3 A 的情况下,啾体光栅外腔激光器输出功率为 2.19 W,斜率效率为 1.045 W/A,外腔效率达到 87%。加入 VBG 与 TCVBG 双光栅之后,驱动电流为 3.30 A 时,双光栅外腔激光器的输出功率为 1.96 W,斜率效率为 0.94 W/A,外腔效率达到 78%。双光栅外腔效率比体光栅外腔的低,主要是加入 TCVBG 后对出射光的反射和吸收造成外腔输出功率下降。

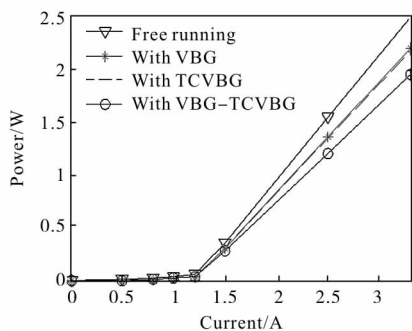


图 2 双光栅外腔半导体激光器的 P-I 特性
Fig.2 P-I characteristics of external cavity semiconductor laser with dual-grating

2.2 调谐特性

在连续电流条件下,采用分辨率<0.1 nm 的 Avaspec-3648 光纤光谱仪测试了双体光栅外腔半

导体激光器的光谱特性,如图 3 所示。

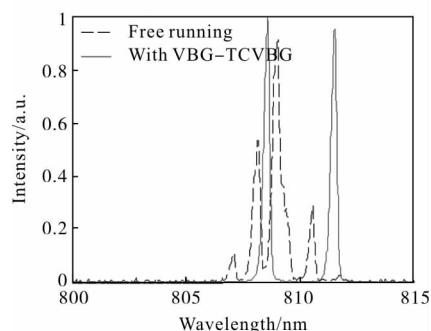
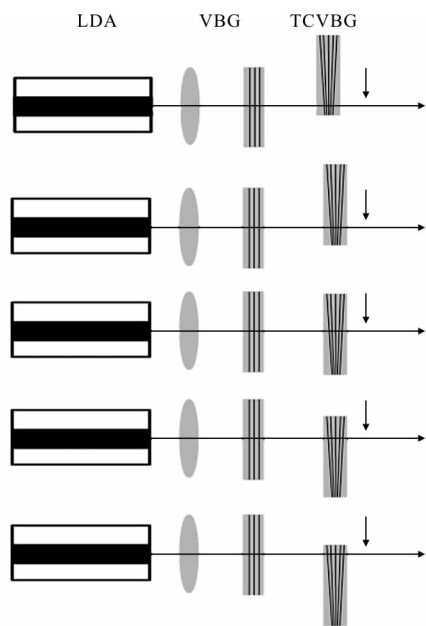


图 3 双光栅外腔半导体激光器的光谱曲线
Fig.3 Spectral curve of external cavity semiconductor laser with dual-grating

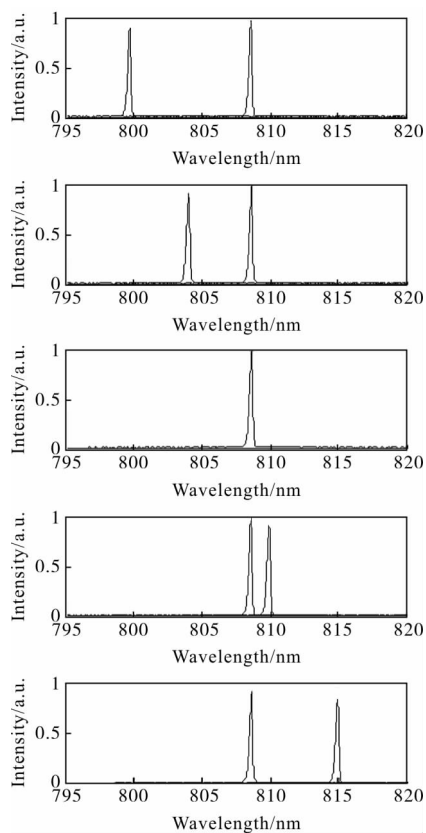
图 3 给出了二极管激光器的温度控制在 25 ℃,驱动电流为 3.0 A 时,双光栅外腔激光器的输出光谱特性。未加入双光栅时,激光器出射光谱具有多个峰值,中心波长由于温度变化漂移至 809.1 nm,光谱宽度大于 3.5 nm。加入 VBG 和 TCVBG 后,外腔激光器输出双波长,两个波长的峰值分别处在 808.6 nm 和 811.5 nm 处,且两个波长的光谱线宽均为 0.27 nm。当激光器温度分别为 25 ℃和 35 ℃时,外腔激光器的输出光谱均保持在 808.6 nm 和 811.5 nm 左右,线宽没有明显改变,波长稳定和光谱压窄作用明显。

图 4 给出了当驱动电流 3 A 时,TCVBG 沿着横向啾体方向移动时,双光栅外腔激光器的调谐光谱特性。图 4(a)为 TCVBG 在不同位置上的外腔激光器示意图,图 4(b)为对应位置的输出光谱特性曲线。从图中可以看出,TCVBG 从一端沿着横向啾体方向移动到另一端的过程中,啾体光栅与激光器的相对位置改变,激光器仍为双波长输出。峰值为 808.6 nm 的波长没有明显的改变,波长稳定性良好;另一个波长可以从 800 nm 调谐至 815 nm,可调范围达 15 nm。在啾体光栅移动过程中,两个激光波长的线宽(FWHM)都保持在 0.27 nm。当 VBG 与 TCVBG 的布拉格波长一致时,激光器得到单波长输出,中心波长为 808.6 nm,光谱线宽被压窄到 0.2 nm,这主要是由于 VBG 与 TCVBG 的布拉格波长一致时,增强了布拉格波长的反馈强度,光谱线宽变窄,外腔效率下降。整体来看,双光栅外腔激光器较好地实现了二极管激光器的窄光谱、宽范围调



(a) 啁啾光栅位置调节示意图

(a) Schematic of experimental setup of adjusting the position of TCVBG



(b) 外腔半导体激光器输出光谱图

(b) Output spectrogram of external cavity semiconductor laser

图 4 双光栅外腔半导体激光器的波长调谐特性

Fig.4 Wavelength tunable property of external cavity semiconductor laser with dual-grating

谐。双波长运行状态下,两个波长的相对强度不相等,这主要是啁啾体光栅与半导体激光器形成的外腔腔长大于体光栅外腔的长度,增加了可调谐波长对应模式在激光器内腔振荡的损耗,其峰值功率较 808.6 nm 波长的峰值功率低。

3 结 论

利用体布拉格光栅波长选择性和横向啁啾体光栅的布拉格波长沿着啁啾方向线性变化的特性,文中提出了一种基于体光栅和横向啁啾体光栅的双光栅外腔半导体激光器,实现了双波长激射和波长间隔的可调谐。该双光栅外腔半导体激光器在注入电流为 3.3 A 时,获得最大输出功率 1.96 W,斜率效率为 0.94 W/A,外腔效率 78%。输出光谱为双波长,其中一个波长稳定在 808.6 nm,另一个波长从 800~815 nm 连续可调谐,通过调节啁啾体光栅的横向位置实现另一个波长的连续调谐,可调范围达 15 nm。双波长间隔调节范围为-8.6~6.8 nm,最大波长间隔 8.6 nm;在整个可调范围内两个波长的谱线宽度 (FWHM) 均为 0.27 nm,当 VBG 与 TCVBG 的布拉格波长一致时,激光器得到单波长输出,中心波长为 808.6 nm,光谱线宽被压窄到 0.2 nm。实验结果表明:基于体光栅和啁啾体光栅的双体光栅外腔激光器能够输出双波长,波长间隔可调谐,且结构简单,调节方便,波长稳定性高,可实现波长的快速选择,能够应用于双波长测量和太赫兹波光源等领域。

参 考 文 献:

[1] Wan H, Cai W, Wang F, et al. High-quality monolayer graphene for bulk laser mode-locking near 2 μm[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(1): 1-8.

[2] Yang Xu, Zhang Yong, Yang Chenghua, et al. Improve quality of ghost imaging with multi-wavelength source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (3): 0314002. (in Chinese)

杨旭,张勇,杨成华,等.多波长光源提高关联成像的成像质量[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0314002.

[3] Li Lingling, Chen Haixiang, Chai Xinsheng, et al. Determination of hexavalent chromium content in leather by dual-wavelength visible spectrophotometry [J]. *China*

- Leather*, 2014, 43(11): 36–43. (in Chinese)
- 李玲玲, 陈海祥, 柴欣生, 等. 一种检测皮革中六价铬含量的双波长可见分光光度法 [J]. *中国皮革*, 2014, 43(11): 36–43.
- [4] Wang Xin, Wu Jinglin, Fan Xiangang, et al. Design of Roman spectroscopy measurement system based on shifted excitation method using two laser diodes with different wavelengths [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106005. (in Chinese)
- 王昕, 吴景林, 范贤光, 等. 双波长激光移频激发拉曼光谱测试系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0106005.
- [5] Yang S H, Watts R, Li X, et al. Tunable terahertz wave generation through a bimodal laser semiconductor and plasmonic photomixer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31206–31215.
- [6] Tian Jinrong, Liu Jinghui, Song Yanrong, et al. Advances and applications of dual-wavelength optical parametric oscillators[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 723–730. (in Chinese)
- 田金荣, 刘京徽, 宋晏蓉, 等. 双波长光参量振荡器的研究进展及应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(5): 723–730.
- [7] Chen Feng, Ye Xiongying, Wu Kang, et al. Displacement measurement method based on integrated grating interferometry with two-wavelength lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2433–2438. (in Chinese)
- 陈烽, 叶雄鹰, 伍康, 等. 双波长集成光栅干涉微位移测量方法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2433–2438.
- [8] Hao Mingming, Liu Yun, Wang Biao, et al. Design of optical system for semiconductor laser myringotomy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 247–255. (in Chinese)
- 郝明明, 刘云, 王彪, 等. 半导体激光鼓膜造孔术的光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 247–255.
- [9] Li Fan, Fallahi M, Hader J, et al. Linearly polarized dual-wavelength vertical external cavity surface emitting laser[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(18): 181124.
- [10] Wang Feng, Bi Weihong, Fu Xinghu, et al. Dual-wavelength Er^{3+} -doped photonic crystal fiber laser based on superimposed fiber gratings [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822001. (in Chinese)
- 王枫, 毕卫红, 付兴虎, 等. 基于重叠光栅的双波长掺铒光子晶体光纤激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0822001.
- [11] Rafailov E U, Cormack I G, Floreani F, et al. Tunable and multiple wavelengths-/temporal output from gain-switched semiconductor laser and a four Bragg-grating fiber [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(6): 861–862.
- [12] Lee K S, Kim C S, Patterson G, et al. Dual-wavelength external cavity laser with a sampled grating formed in a silica PLC waveguide for terahertz beat signal generation[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(2): 293–296.
- [13] Zheng Y, Kurita T, Sekine T, et al. Tunable continuous-wave dual-wavelength laser by external-cavity superluminescent semiconductor with a volume Bragg grating and a diffraction grating [J]. *Appl Phys Lett*, 2016, 109(14): 141107.
- [14] Zolotovskayaa S A, Daghestani N, Venus G B, et al. Stable dual-wavelength operation of InGaAs semiconductor lasers with volume Bragg gratings [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(17): 171113.
- [15] Li Zhiyong, Tan R, Xu C, et al. A novel external cavity with double volume Bragg gratings for rubidium laser pumping[C]//Photronics Asia. International Society for Optics and Photonics, 2012: 85510T.
- [16] Zei P, Valdas P, Laurell F. Efficient spectral control and tuning of a high power narrow-linewidth Yb-doped fiber laser using a transversely chirped volume Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4027–4035.
- [17] Nejbauer M, Karda T M, Stepanenko Y, et al. Spectral compression of femtosecond pulses using chirped volume Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2394–2397.
- [18] Zubko A E, Shashkov E V, Smirnov A V, et al. On the use of a chirped Bragg grating as a cavity mirror of a picosecond Nd: YAG laser [J]. *Quantum Electronics*, 2016, 46(2): 147–149.
- [19] Liu Y G, Dong X, Shum P, et al. Stable room-temperature multi-wavelength lasing realization in ordinary erbium-doped fiber loop lasers [J]. *Opti Express*, 2006, 14(20): 9293–9298.