

蓝紫光宽带可调谐光栅外腔半导体激光器

陈少伟¹ 吕雪芹^{2,4*} 张江勇³ 应磊莹³ 张保平³

¹ 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005

² 厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361005

³ 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005

⁴ 中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室, 北京 100083

摘要 利用闪耀光栅作为外腔光反馈元件, 研究 Littrow 结构的蓝紫光外腔半导体激光器。通过引入闪耀光栅, 在光栅面和半导体激光器后端面之间构成耦合外腔, 改善了中心波长位于 405.5 nm 的边发射半导体激光二极管的性能。研究表明, 在引入外腔反馈后, 半导体激光二极管的阈值电流降低了 27%, 说明外腔与内腔之间具有较高的耦合效率; 改变反馈元件光栅的转角, 实现了激射波长的宽带连续调谐, 调谐范围可达 7 nm。

关键词 激光器; 光栅外腔; 宽带调谐; 蓝紫光

中图分类号 TN248; TN365 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.111405

Blue-Violet Broadly Tunable Grating-Coupled External Cavity Semiconductor Laser

Chen Shaowei¹ Lü Xueqin^{2,4*} Zhang Jiangyong³ Ying Leiying³ Zhang Baoping³

¹ Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

² Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

³ Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

⁴ Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract Commercially available blue-violet edge-emitting semiconductor laser diode with a wavelength of 405.5 nm is characterized and then operated in an external cavity with a Littrow configuration in our laboratory. A resonant cavity is formed between the blazed grating and the rear facet of the laser diode, which improves the performance of the laser diode greatly. The results show that the threshold current of the semiconductor laser diode decreases by 27%, indicating high coupling efficiency between the external cavity and inner cavity. Besides, by changing the angle of the blazed grating, the total wavelength tuning range can reach up to 7 nm.

Key words lasers; grating-coupled external cavity; broadband tuning; blue-violet light

OCIS codes 140.3600; 140.5960; 140.3410

1 引言

半导体激光器自问世以来, 一直受到人们极大的关注, 在光通信^[1]、光学测量^[2]和光数据存储^[3]等方面得到广泛应用。但由于半导体有源介质的增益谱具有一定的宽度, 导致采用法布里-珀罗(F-P)谐振腔结构

收稿日期: 2013-07-16; **收到修改稿日期**: 2013-07-17; **网络出版日期**: 2013-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(91023048, 61106044, 61274052, 61306087)、福建省自然科学基金(2013J05096)、半导体材料科学重点实验室开放课题资助项目(KLSMS-1105)

作者简介: 陈少伟(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事可调谐外腔半导体激光器方面的研究。

E-mail: shaoweichen@foxmail.com

导师简介: 张保平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事宽禁带半导体材料与光电子器件等方面的研究。

E-mail: bzhang@xmu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xqlv@xmu.edu.cn

制作的边发射半导体激光器的激射线宽较宽。另外,同样由于增益材料的特性,边发射半导体激光器的激射波长可通过改变工作电流和温度^[4]进行调谐,但在这种方式下其调谐范围有限且频率稳定性差。因此,边发射半导体激光器的线宽和波长调谐参数限制了其在原子物理和激光光谱分析等精细光谱测量领域的直接应用。目前,尽管掺钛蓝宝石激光器、染料激光器等可满足这些应用要求,但是其高昂的价格使众多研究者望而却步。因此,发展低成本、窄线宽、宽调谐以及大功率的激光光源成为人们研究的热点之一。将光栅外腔(EC)选模技术应用到商用半导体激光器上,可以实现半导体激光器的频率稳定、线宽压窄和波长调谐,是一种改善输出光谱最方便、最经济、最有效的方法。除此之外,光栅外腔激光器在压缩激光器线宽的同时,可通过光栅角度的精密控制,实现激射波长的精细调谐,从而为原子分子吸收光谱、激光诱导荧光光谱等超精细光谱的测试提供了理想光源。

位于蓝紫光波段的外腔可调谐半导体激光器,发光波长短,是一种非常具有实用价值的新型光电子学光源,在超精细光谱分析^[5-6]、气体检测^[7-8]、数据存储^[9]等领域具有广泛的应用前景。然而,由于受限于增益材料和激光器制作工艺的发展,目前对于光栅外腔半导体激光器的研究主要集中在近红外波段,位于蓝紫光波段的外腔可调谐半导体激光器研究还较少。虽然国际上一些研究小组已经报道了相关的研究成果^[10-11],但是对其调谐性能的研究还不够深入。本文采用 Littrow 结构^[12-14],进行了蓝紫光波段半导体激光器的光栅外腔调谐实验,对输出光谱线宽、激射阈值电流和可调谐范围等进行了研究。利用闪耀光栅做反馈元件,降低了半导体激光器的激射阈值电流,实现了光谱特性较好的窄线宽激光输出,其线宽小于 0.2 nm。通过调整光栅角度,得到 7 nm 的波长可调谐范围。

2 实验

实验中采用的 Littrow 型光栅外腔可调谐半导体激光器的结构示意图如图 1 所示。作为增益器件的边发射半导体激光二极管(LD)被安装在带有热沉的散热基板上,其发光光束经镀有增透膜的非球面镜准直后,入射到闪耀光栅上,产生零级光和多级衍射光。通过调整闪耀光栅与入射光束的夹角,将一级衍射光反馈回半导体激光器有源区,零级光则作为输出光。由于闪耀光栅具有色散特性,因此当微调光栅闪耀平面法线和激光器输出光的夹角 θ 时,便可选择不同波长的光反馈回增益器件,从而获得不同波长的窄线宽激光输出,实现激射波长的调谐。Littrow 结构外腔激光器进行波长调谐时,输出光束的方向将随着光栅的转动而发生偏转,因此在零级光输出光路上加个平面反射镜,反射镜则通过联动装置和光栅一起固定在旋转平台上。当光栅逆时针转动 $\Delta\theta$ 角时,零级光在逆时针方向将偏转 $2\Delta\theta$ 角,由于所加的平面反射镜与光栅是联动的,平面反射镜也将转动 $\Delta\theta$ 角,正好可以补偿由于光栅转动引起的反射光的偏转,使得输出光方向不随光栅转动而发生变化^[13,15]。

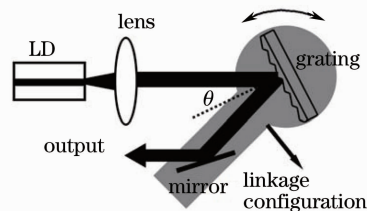


图 1 Littrow 型光栅外腔半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the external cavity semiconductor laser with Littrow configuration

实验中,采用索尼公司生产的半导体激光二极管(型号 SLD3232VF)作为增益器件,出光腔面未进行任何后处理,其在外腔反馈下的性能表征结果如图 2(a)所示。从图中可得到激光二极管的阈值电流为 25.1 mA。同时,还测试了激光器在不同驱动电流下的输出光谱,如图 2(b)所示。当输入电流为 5 mA 时,其光谱中心波长为 406.8 nm,半峰全宽为 11.4 nm。当电流加大至超过阈值电流后,产生激光输出,注入电流为 30 mA 时,激射中心波长位于 405.5 nm,线宽明显变窄至 0.4 nm。

外腔激光器调谐实验中所用的非球面镜的数值孔径为 0.5,焦距为 8 mm。经过非球面镜准直后的光斑近似为椭圆形,长轴和短轴长度分别为 4 mm 和 2 mm。整个外腔长度为 18 cm。闪耀光栅的刻线密度为

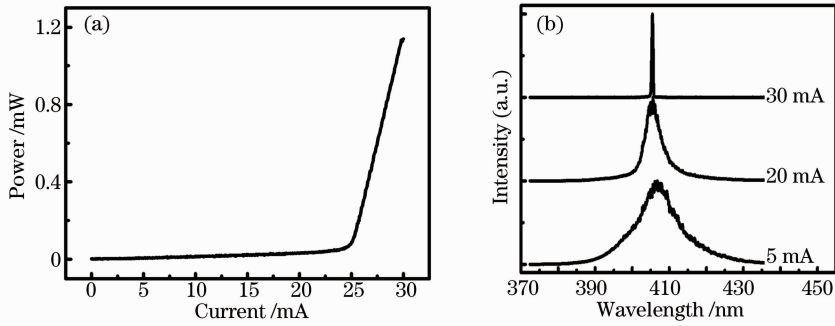


图2 (a) GaN 半导体激光二极管未加光栅反馈时的功率-电流特性曲线, (b) 不同驱动电流下的输出光谱图

Fig. 2 (a) Output power characteristic of free-running GaN-based semiconductor laser diode, (b) emission spectra at various injection currents

600 lines/mm, 闪耀波长为 500 nm, 其一级衍射效率为 65%。光谱特性通过光谱仪测试获得, 实验中所用光谱仪型号为 ACTON SpectraPro 2300i, 光谱分辨率为 0.1 nm。

3 结果和讨论

首先研究了外腔激光器在不同电流下的波长可调谐范围, 在 21, 22, 24, 25 mA 注入电流下的可调谐范围分别为 2.2, 3.4, 4.6, 6.3 nm, 如图 3 所示。从图中可以看出可调谐范围随着注入电流的增大而增大, 基本呈线性关系。但当电流注入水平大于内腔激射阈值电流时, 外腔反馈不能很好地抑制内腔激射模式 (F-P 模式), 其结果就是导致内外腔模式之间的相互竞争^[16], 使其可调谐范围变窄。图 4 所示为大电流下的发光光谱图, 从图中可以看出靠近内腔增益中心 (405.5 nm), 只存在一个激光激射模式。而在内腔增益中心的短波和长波边缘, 随着注入电流的增大, 内腔模式出现, 并逐渐占据主导地位。因此, 为了避免外腔激光器工作中内腔激射模式的竞争, 同时获得最宽的调谐带宽, 放入外腔中的半导体激光二极管的工作电流确定为 25.5 mA, 略高于自由运行半导体激光二极管的阈值。

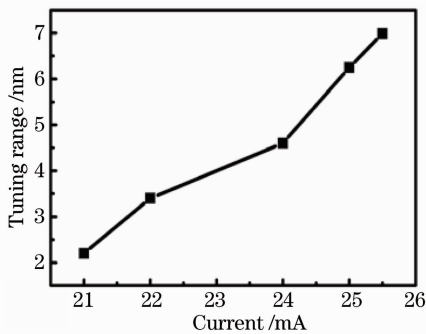


图3 外腔半导体激光器在不同注入电流下的波长调谐范围

Fig. 3 Tuning range of the external cavity semiconductor laser at different injection currents

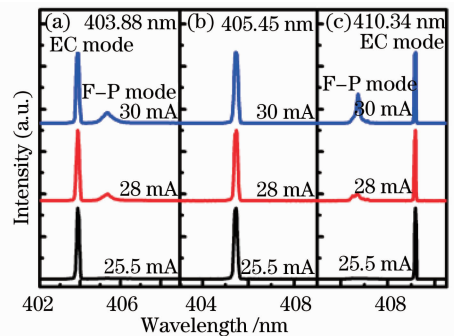


图4 不同外腔激射波长在不同电流下的发光光谱

Fig. 4 Emission spectra of different lasing wavelengths at different currents

图 5 所示为外腔激光器工作电流为 25.5 mA 时的归一化激光光谱图。通过旋转闪耀光栅的角度, 使 Littrow 角度 θ 从 6.95° 改变至 7.07° , 实现了激射波长的连续调谐, 波长调谐覆盖 403.3~410.3 nm, 调谐范围达到 7 nm。此调谐带宽值优于 Lonsdale 等^[17] 研究报道的镀有减反射膜的蓝紫光外腔半导体激光器的最大调谐范围 6.3 nm, 一方面与所选用的激光二极管具有较宽的增益带宽有关[这在图 2(b) 所示的光谱测试结果中得到了证实], 另一方面可能关联于外腔与内腔之间较高的耦合效率, 这将在下面关于外腔激光器激射阈值特征的分析中得到解释。

另外, 从图 5 中还可看出, 相比于内腔激射波长 405.5 nm, 外腔可调谐激光器在短波方向调谐范围为 2.2 nm, 长波方向调谐范围 4.8 nm。通过比较可以看出, 长波方向调谐范围较大。一般来讲, 外腔激光器的

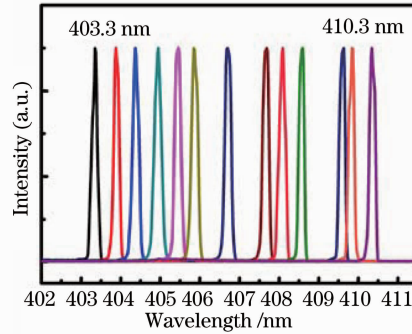


图5 光栅外腔半导体激光器调谐归一化激光谱图

Fig. 5 Normalized lasing spectra of grating-coupled external cavity semiconductor laser

调谐范围直接反映了增益器件的增益谱分布。实验中所用的半导体增益器件的有源区为 InGaN/GaN 量子阱结构,有研究表明其增益谱的分布呈现出不对称的特性^[18],在长波方向具有明显的扩展,这应该是造成外腔激光器在长波方向调谐范围较大的原因。由图中还可得到激光光谱的半峰全宽介于 0.1~0.2 nm 之间,线宽较宽,可能受限于外腔所使用的 600 lines/mm 光栅的分辨率。

图 6 所示为对所构建的光栅外腔半导体激光器在不同激光波长处的功率-电流($P-I$)特性测试结果。加入外腔反馈后,其阈值电流明显降低,405.5 nm 处可降至 18.4 mA,与未加外腔的半导体激光器阈值 25.1 mA 相比,降低了约 27%。对于光栅外腔激光器,由于引入了光栅做外部光反馈元件,在其反馈回激光二极管的一级衍射波长处,激光腔的损耗降低,因此,与自由运行激光二极管相比,其激光阈值相应减小。所以,与内腔激光阈值相比,外腔激光器阈值的降低幅度反映了外腔与内腔之间的耦合效率,外腔激光器阈值降低幅度越大,说明外腔与内腔之间的光耦合效率越高。本文中外腔激光器的阈值最大降低幅度达到 27%,表明外腔与内腔之间具有较强的耦合,这与选用了一级衍射效率较高的闪耀光栅和数值孔径较大的耦合透镜有关。如果在半导体激光器中与光栅耦合的出光端面蒸镀上减反射膜,将进一步增加反馈回激光器有源区的光总量,从而提高光栅和增益器件的耦合,进一步降低外腔激光器的激光阈值,并扩展外腔激光器的调谐带宽。从图 6 中还可看出,外腔激光器 $P-I$ 特性曲线上出现明显的非线性扭曲,这与图 4 所示的随着注入电流增大,内外腔之间的激光模式转变有关。

根据图 6 中的 $P-I$ 特性曲线数据,得到了外腔激光器的阈值电流和 25.5 mA 注入电流时的输出功率随调谐波长的变化关系,如图 7 所示。当外腔激光波长远离增益中心时,其所需的激光阈值电流随之升高,光输出功率则呈现出与此相反的规律,越远离增益中心,光输出功率越小,基本反映了材料增益谱的分布特征。从图中还可以看出激光阈值电流较低的输出波长具有较高的输出功率,因此要得到较高的输出功率,必须尽可能降低外腔激光器的激光阈值。另外,与自由运行的半导体激光二极管相比,外腔激光器的输出功率较

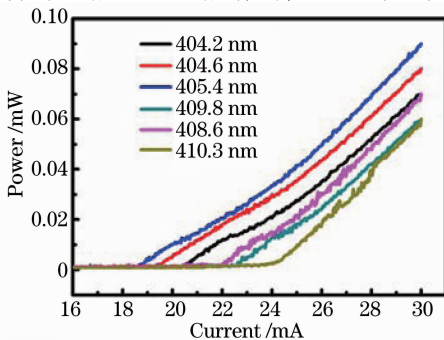


图6 光栅外腔半导体激光器不同激光波长处功率-电流特性曲线

Fig. 6 Output power characteristic of grating-coupled external cavity semiconductor laser at different lasing wavelengths

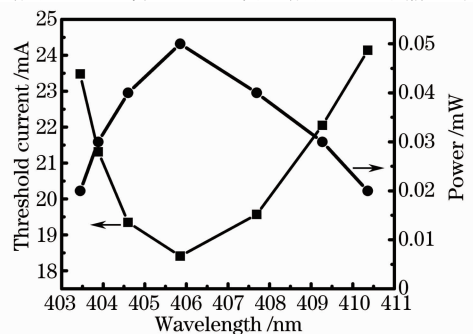


图7 光栅外腔半导体激光器阈值电流和 25.5 mA 注入电流下输出功率随激光波长的变化关系

Fig. 7 Threshold current and output power of grating-coupled external cavity semiconductor laser at 25.5 mA injection current as functions of lasing wavelength

小,主要原因在于采用 600 lines/mm 的光栅,除了一级和零级光输出以外,还有其他级次(-1, ±2, ±3, +4 级)的衍射光,造成了光的损失,导致其输出功率较小。因此,采用刻线密度较高的光栅作为反馈元件,可以避免高级次衍射光损失,从而获得较高的输出功率。

4 结 论

本文研制了 Littrow 结构的蓝紫光外腔半导体激光器。此外腔激光器结构简单,调整方便,能较好地改善商用半导体激光器的输出光谱特性,实现了 405 nm 波段半导体激光器的线宽压窄和激射波长的调谐。选用闪耀光栅提供外腔光反馈,成功地降低了半导体激光器的激射阈值电流。通过改变光栅的角度,得到了 7 nm 的可调谐波长范围。

参 考 文 献

- 1 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Optical frequency up-conversion by injection locking semiconductor laser with directly modulated baseband signal[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0205003.
郭精忠, 于晋龙, 王文睿, 等. 利用基带直调信号注入锁定半导体激光器产生全光上变频信号的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205003.
- 2 Liao Yanlin, Liu Ye, Cao Jie, *et al.*. A surface enhanced Raman scattering spectrum detection system based on fiber devices [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0715002.
廖艳林, 刘 晔, 曹 杰, 等. 一种基于光纤器件的表面增强拉曼散射光谱检测系统[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0715002.
- 3 Li Jianhua, Cao Liangcai, Tan Xiaodi, *et al.*. Transmission type of collinear volume holographic storage technology based on LiNbO₃ crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0409001.
李建华, 曹良才, 谭小地, 等. 基于 LiNbO₃ 晶体的透射式共光轴体全息存储技术[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0409001.
- 4 Li Jinyi, Du Zhenhui, Qi Rubin, *et al.*. Measurement of absorption spectra of CO₂ at 6320~6336 cm⁻¹ using temperature tuning technique[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0130004.
李金义, 杜振辉, 齐汝宾, 等. 温度调谐技术测量 CO₂ 在 6320~6336 cm⁻¹ 波段的吸收光谱[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0130004.
- 5 I S Burns, J Hult, C F Kaminski. Spectroscopic use of a novel blue diode laser in a wavelength region around 450 nm[J]. Appl Phys B, 2004, 79(4): 491-495.
- 6 L Hildebrant, R Knispel, S Stry, *et al.*. Antireflection-coated blue GaN laser diodes in an external cavity and Doppler-free indium absorption spectroscopy[J]. Appl Opt, 2003, 42(12): 2110-2118.
- 7 J Hult, I S Burns, C F Kaminski. High repetition-rate wavelength tuning of an external cavity diode laser for gas phase sensing[J]. Appl Phys B, 2005, 81(6): 757-760.
- 8 T N Anderson, R P Lucht, S Priyadarsan, *et al.*. In situ measurements of nitric oxide in coal-combustion exhaust using a sensor based on a widely tunable external-cavity GaN diode laser[J]. Appl Opt, 2007, 46(19): 3946-3957.
- 9 T Tanaka, K Takahashi, K Sako, *et al.*. Littrow-type external-cavity blue laser for holographic data storage[J]. Appl Opt, 2007, 46(17): 3583-3592.
- 10 R S Conroy, J J Hewett, G P T Lancaster, *et al.*. Characterisation of an extended cavity violet diode laser[J]. Opt Commun, 2000, 175(1-3): 185-188.
- 11 K Holc, Z Bielecki, J Wojtas, *et al.*. Blue laser diodes for trace matter detection[J]. Opt Appl, 2010, 40(3): 641-651.
- 12 A S Arnold, J S Wilson, M C Boshier. A simple extended-cavity diode laser[J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(3): 1236-1239.
- 13 C J Hawthorn, K P Weber, R E Scholten. Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam[J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72(12): 4477-4479.
- 14 Ch Schwedes, E Peik, J Von Zanthier, *et al.*. Narrow-bandwidth diode-laser-based blue and ultraviolet light source[J]. Appl Phys B, 2003, 76(2): 143-147.
- 15 J Hult, I S Burns, C F Kaminski. Wide-bandwidth mode-hop-free tuning of extended-cavity GaN diode lasers[J]. Appl Opt, 2005, 44(18): 3675-3685.
- 16 Lü Xueqin, Chen Shaowei, Zhang Jianguo, *et al.*. Tuning properties of external cavity violet semiconductor laser[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(7): 074204.
- 17 D J Lonsdale, A P Willis, T A King. Extended tuning and single-mode operation of an anti-reflection-coated InGaN violet laser diode in a Littrow cavity[J]. Meas Sci Technol, 2002, 13(4): 448-493.
- 18 Y K Song, M Kuball, A V Nurmikko, *et al.*. Gain characteristics of InGaN/GaN quantum well diode lasers[J]. Appl Phys Lett, 1998, 72(12): 1418-1420.