

638 nm 光栅外腔窄线宽半导体激光器

刘 野^{1*}, 刘 宇¹, 肖辉东¹, 李洪玲¹, 曲大鹏¹, 郑 权^{1,2}

(1. 长春新产业光电技术有限公司, 吉林 长春 130021;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:本文采用反射式全息光栅作为外部反馈元件, 设计了 638 nm 光栅外腔窄线宽激光器。使用高分辨率的光谱分析仪检测了 Littrow 结构的外腔半导体激光器的输出光谱, 并进一步研究了该激光器的阈值和波长调谐特性。实验采用了 2400 l/mm 和 1800 l/mm 两种刻线密度的反射式全息光栅进行研究, 在 120 mA 的注入电流下, 采用刻线密度为 2400 l/mm 的光栅外腔激光器的输出功率是 45.2 mW, 将阈值电流由 60 mA 降至 51 mA, 下降幅度为 11%; 采用刻线密度为 1800 l/mm 的光栅外腔激光器的输出功率是 38.7 mW, 将阈值电流由 60 mA 降至 47 mA, 下降幅度为 24%, 光谱线宽均压窄至 3.5 pm, 且分别实现了 9.4 nm 和 10.5 nm 宽度的波长调谐。实验结果表明, 采用反射式全息光栅的 Littrow 结构用于半导体激光器, 极大地改善了半导体激光器的性能。

关键词: 半导体激光器; 全息光栅; Littrow 结构; 光谱线宽

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0249

638 nm narrow linewidth diode laser with a grating external cavity

LIU Ye^{1*}, LIU Yu¹, XIAO Hui-dong¹, LI Hong-ling¹, QU Da-peng¹, ZHENG Quan^{1,2}

(1. Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd, Changchun 130012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liuye@cnilaser.com

Abstract: In this paper, a narrow linewidth laser with an external grating cavity of 638 nm is described, wherein a reflection holographic grating was used as its external feedback element. The spectrum of the diode lasers with the grating external cavity arranged in a Littrow configuration were measured using a high-resolution monochromator and the characteristics of the threshold and tuning properties were investigated. In the experiment, reflection holographic gratings with 2400 l/mm and 1800 l/mm groove density were studied. At 120 mA injection current, the output power of the external cavity laser was 45.2 mW when the groove density was 2400 l/mm, and the threshold current of the LD was reduced from 60 mA to 51 mA and the descent rate was 11%. When the groove density was 1800 l/mm, the output power was 38.7 mW, the threshold

收稿日期: 2019-12-27; 修订日期: 2020-02-22

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20200401072GX)

Jilin Province Science and Technology Development Plan (No. 20200401072GX)

current of the LD was reduced from 60 mA to 47 mA, and the descent rate was 24%. Furthermore, the linewidths were suppressed to within 3.5 pm, and the tuning ranges were 9.4 nm and 10.5 nm in wavelength. The experimental results showed that the performance of semiconductor lasers was improved greatly using the Littrow configuration with a reflective holographic grating.

Key words: diode laser; holographic grating; littrow configuration; spectral linewidth

1 引言

半导体激光器(LD)因具有体积小、功率高、效率高、成本低等优势获得了广泛的关注、研究及应用^[1-3]。普通半导体激光器的增益曲线较宽,根源在于其增益介质是半导体材料,因此采用法布里-珀罗腔结构设计的普通半导体激光器发射谱线不稳定且线宽较大,难以满足对线宽高要求的应用。

近年来,市场对半导体激光器的参数指标要求逐渐增高,外腔半导体激光器在频率稳定性、可调谐性以及光谱纯度上的改善使其比普通半导体激光器有更广泛的应用,例如原子冷却^[4-5]、拉曼散射^[6-11]及痕量气体检测^[12-15]等高精度测量领域。采用外腔结构^[16-19]实现半导体激光器的波长稳定、线宽压窄和波长调谐,这是一种成本低且结构紧凑的高效方法。目前,国内外研究人员发布了许多有关光栅外腔半导体激光器方面的研究报道,采用 Littrow 结构^[20-21]制作激光器的研究甚多,该结构是采用光栅作为外部光反馈元件。HongW 等人报道了一种基于 Littrow 结构的可调谐半导体激光器,在 785 nm 上得到 13 nm 的有效调谐范围,输出功率为 4 mW^[22]。金杰等人报道了一种采用闪耀光栅作为反馈元件的 808 nm 外腔半导体激光器,将光谱线宽压窄为 0.06 nm,输出功率为 35.4 mW^[23]。李斌等人采用全息光栅作为反馈元件,研究了 405 nm 外腔半导体激光器,调谐范围为 3.5 nm,输出功率为 28 mW^[24]。然而,大多数研究是针对光栅外腔激光器的结构或单一性能展开的,关于该类型激光器参数综合性能的研究较少。

国内有关外腔半导体激光器的报道多为针对蓝紫光^[25]或近红外波段^[26-27]展开的研究,关于

600 nm 附近波段研究较少。本文针对 638 nm 波段开展光栅外腔半导体激光器的研究,选用反射式全息光栅,对激光器的输出功率、阈值电流、光谱线宽、波长调谐范围及波长稳定性等参数进行研究,将使用不同刻线密度全息光栅得到的实验结果进行了对比。选用 2400 l/mm 和 1800 l/mm 刻线密度的全息光栅进行实验,均能实现稳定的窄线宽激光输出,在 120 mA 工作电流下,分别实现了 9.4 nm 和 10.5 nm 宽度的波长调谐,激光器输出功率分别为 45.2 mW 和 38.7 mW。光栅外腔窄线宽半导体激光器的实验研究有利于推动其在光谱方向的应用。

2 实验结构

图 1 所示为本文实验装置图,实验中使用的 AlGaInP 红光激光二极管(LD)的标称中心波长为 638 nm,工作温度在 -10 ℃ 至 40 ℃,注入 120 mA 电流时,输出功率为 50.6 mW,实验前未对 LD 的输出端面做任何镀膜处理。LD 安装在带有 TEC 制冷器的热沉上,采用制冷器和温控器精确控温,实验过程中使温度恒定在室温(25 ℃)下。采用焦距为 4.02 mm、数值孔径为 0.6 的非球面透镜作为准直镜,其表面镀有增透膜,LD 输出光经准直后得到长约 3 mm、宽约 1 mm 的近似椭圆光斑。光栅外腔半导体激光器的外腔设计长度为 4 cm,选用的反射式全息光栅是由 Thorlabs 公司生产的型号为 GH25-24V 和 GH25-18V 光栅,刻线密度分别为 2400 l/mm 和 1800 l/mm。采用长春新产业光电技术有限公司的 Aurora 4000 系列高分辨率光谱仪,光谱仪光学分辨率为 0.1 nm (半峰全宽),功率计为 Coherent 的 PS19Q,分辨率为 0.01 mW。

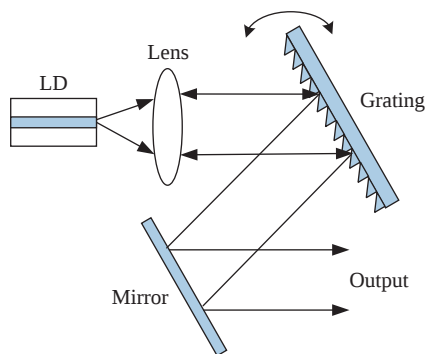


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

实验中半导体激光器采用 Littrow 结构。半导体激光器(LD)的出射光经非球面透镜准直,然后入射到反射式全息光栅发生衍射,通过固定装置上的自制二维调节架实现对全息光栅的俯仰与轴向角度的调节,从而得到 0 级及其他级衍射光,0 级衍射光作为输出光束,1 级衍射光反馈回 LD 的有源区。微调全息光栅的角度,从而改变半导体激光器的谐振波长。

3 实验结果与讨论

实验首先测量了 LD 自由运行时的功率和光谱特性,如图 2 所示。观察图 2(a) 自由运行的 LD 的 P-I 特性曲线可知,LD 的阈值电流在 60 mA 附近。图 2(b) 是电流分别为 60、90、120 mA 时半导体激光器的输出光谱。由图 2(a) 可知,当注入电流低于阈值时,自由运行的 LD 输出功率为 0,此时光斑为荧光,LD 工作在自发辐射状态。由图 2(b) 可知,当注入电流在阈值电流 60 mA 附近时,所测得的光谱为多纵模输出,纵模包络的半峰全宽约为 1.8 nm,说明此时半导体激光器的输出功率处于缓升阶段,且 LD 工作状态由自发辐射逐渐转变成受激辐射,此外,该纵模包络基本呈现了 LD 的增益谱分布,观察 30% 强度的光谱,LD 的波长约为 635~638 nm,这说明自由运行的 LD 波长调谐范围约为 3 nm。当注入电流继续升高时,测得光谱的纵模明显减少,LD 的输出功率也随注入电流呈线性增长,并且输出激光的中心波长发生红移。当注入电流为 120 mA 时,输出功率为 50.6 mW。

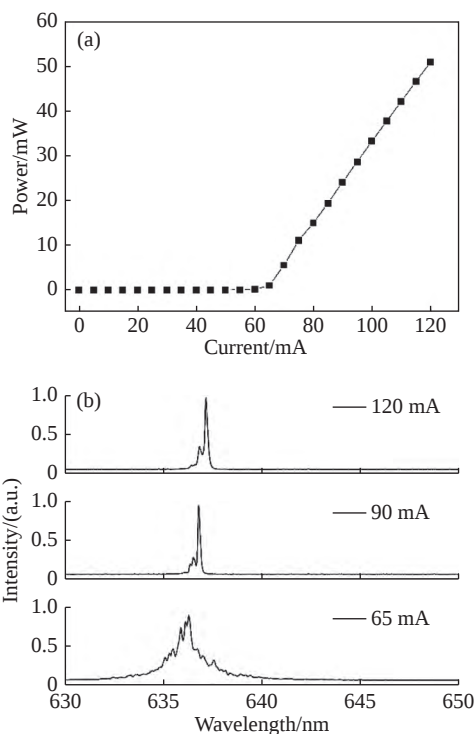


图2 (a)自由运行的 LD 的 P-I 特性曲线;(b)不同注入电流下的光谱特性

Fig. 2 (a) P-I characteristic curve of the free-running diode laser; (b) spectral characteristics at different currents

在 Littrow 结构的半导体激光器光斑大小不变的情况下,衍射光栅刻线密度越高,光栅的角色散越大,其分离 1 级衍射光中不同频率成分的能力也越强,这样才能使反馈回 LD 内腔其他频率的干扰进一步降低。其次,光栅刻线密度越高,光栅的反馈光谱越窄,0 级衍射光的光谱线宽也更窄。因此,为压窄光谱宽度和提高波长稳定性,应适当选择刻线密度较高的光栅,且光栅衍射级数仅为 0 级和 1 级。目前市场上常用的光栅参数为 1200、1800 和 2400 l/mm,本文选择刻线密度相对较高的 1800 l/mm 和 2400 l/mm 全息光栅进行实验研究。光栅 1 级光衍射效率受光偏振特性的影响较大,LD 的中心波长为 638 nm,将 Thorlabs 公司提供的光栅性能曲线作为参考,当偏振方向与光栅刻线方向平行时,即 p 偏振入射下,1800 l/mm 和 2400 l/mm 光栅衍射效率约为 25% 和 15%。当偏振方向与光栅刻线方向垂直时,即 s 偏振入射下,1800 l/mm 和 2400 l/mm 的光栅衍射效率约为 70% 和 80%,经光栅反馈回 LD 有源区的光功

率越大,输出线宽越窄,因此选择 s 偏振入射,以最大程度提高边模抑制比。

图 3 所示为光栅外腔半导体激光器的 P-I 特性曲线和光谱输出特性。图 3(a) 的 P-I 特性曲线同时展示了半导体激光器自由运行时和加 2400 l/mm、1800 l/mm 刻线密度光栅外腔后的功率输出特性。两种光栅分别将 LD 阈值电流由 60 mA 降至 51 mA 和 47 mA,分别降低了 15% 和 21.7%。由于在半导体激光器中引入了光栅作为外部光反馈元件,光栅将 1 级衍射光反馈回增益器件引起腔面损耗的降低,从而使激光器提前由自发辐射转变成受激辐射状态,因此,与自由运行的 LD 相比,阈值电流明显减小。本实验中阈值电流下降幅度明显,说明外腔反馈光与 LD 本征腔发生较强的耦合,这与选用了衍射效率较高的全息光栅和数值孔径较大的准直透镜有关。当注入电流超过阈值时,激光器的输出功率与电流呈线性关系,电流达到 120 mA 时,2400 l/mm 和 1800 l/mm 光栅外腔激光器输出功率分别是 45.2 mW 和 38.7 mW,功率下降比例是 11% 和 24%。P-I 曲线斜率也呈下降趋势,出现这一现象的主要原因是由于反射式全息光栅 1 级光衍射效率高,作为输出的 0 级衍射光效率较低导致的,其次光栅吸收造成的损耗也会降低输出功率。在注入电流升高的过程中,测量两种外腔半导体激光器的光谱输出特性,结果见图 3(b) 和图 3(c),可见,当注入电流达到并超过阈值时,均能得到良好的窄线宽激光输出,将线宽压窄至 3.5 pm,外腔反馈的引入有效压窄了激射线宽。从光谱波形来看,2400 l/mm 和 1800 l/mm 光栅在整个电流范围内,都能实现稳定的窄线宽激光输出,表明外腔结构具有很好的内腔模式抑制作用。

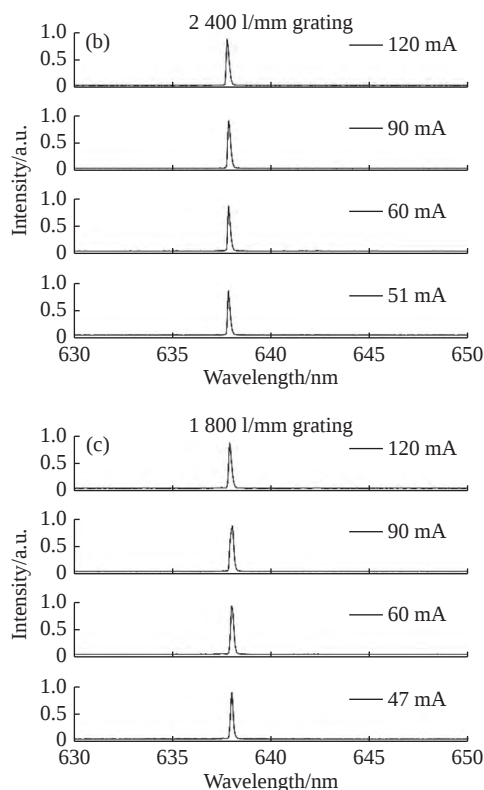
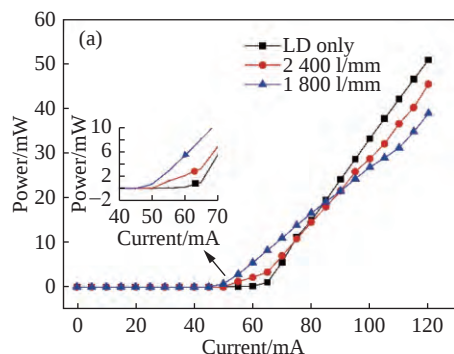


图 3 (a)光栅外腔半导体激光器的 P-I 特性曲线; (b)2400 l/mm 及 (c) 1800 l/mm 全息光栅外腔激光器在不同电流下的光谱特性

Fig. 3 (a) P-I characteristic curve of the grating external cavity diode laser; spectral characteristic of (b) 2400 l/mm and (c) 1800 l/mm holographic grating external cavity laser at different currents

通过二维调节架对全息光栅的角度进行微调,实现了输出激光的波长调谐,图 4 为光栅外腔激光器波长调谐范围随注入电流的变化情况以及注入电流为 70 mA 下的归一化光谱图。图 4(a) 给出了两种外腔激光器的调谐范围随注入电流的变化情况。由图 4(a) 可知,当注入电流值在阈值附近时,激光器波长的调谐范围最小。这是因为此时半导体激光器的增益谱线宽度相对较窄,故调谐范围相应减小,随着注入电流升高,波长调谐范围逐渐增大。其中,2400 l/mm 光栅外腔激光器在注入电流为 90 mA 时,波长调谐范围最大,为 9.473 nm,在 70~120 mA 电流下波长调谐范围均在 9 nm 左右;1800 l/mm 光栅外腔激光器在注入电流为 70 mA 时,波长调谐范围最大,为 10.502 nm,在 70~120 mA 电流波长调谐范围均在 10 nm 左右。总体来看,1800 l/mm 外腔激光器的波长调谐范围比 2400 l/mm

外腔激光器的略大。由图 4(b) 和图 4(c)可知,当注入电流为 70 mA 时,在波长调谐过程中均能得到稳定的窄线宽激光输出,采用 2400 l/mm 光栅的激光器波长调谐范围是 632.587~642.006 nm,1800 l/mm 光栅的则是 632.498~643.006 nm,对比半导体激光器内腔激射波长 638 nm,外腔激光器在短波方向的调谐范围约为 6 nm,在长波方向约为 4~5 nm,短波方向调谐范围略大。这种现象源于半导体增益器件有源区为量子阱结构,其增益谱分布呈现出不对称的特性,在短波方向具有明显的扩展。638 nm 波长自由运行的 LD 波长调谐范围约为 3 nm,而光栅外腔半导体激光器的波长调谐范围约为 9.5 nm,相比之下,采用光栅外腔结构能够明显增大 LD 的波长调谐范围。

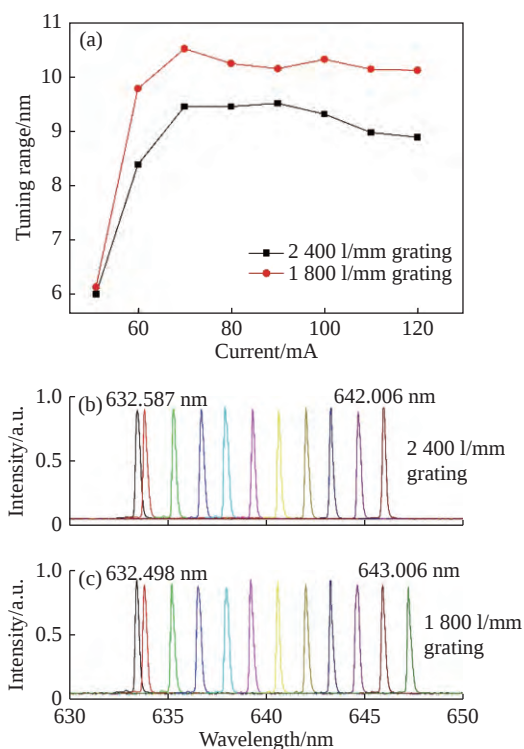


图4 (a)波长调谐范围随注入电流的变化情况;当注入电流为 70 mA 时(b)2400 l/mm 及(c)1800 l/mm 全息光栅外腔激光器归一化光谱图

Fig. 4 (a) Wavelength tuning range versus injection current; normalized emission spectra of (b) 2400 l/mm and (c) 1800 l/mm holographic grating external cavity lasers with injection current of 70 mA

图 5 为光栅外腔半导体激光器的阈值电流随激射波长的变化情况,图 6 为 120 mA 注入电流

下光栅外腔半导体激光器的输出功率随激射波长的变化情况。由图 5、图 6 可知,当外腔激射波长远离增益中心时,其所需的激射阈值电流随之升高,激光的输出功率则呈现与之相反的规律,离增益中心越远,输出功率越低。这个现象基本反映了半导体激光器增益谱的分布特性,即当激光器阈值电流越低时输出功率越高。由此可推断,若想获得更高的输出功率,需要尽可能减小激光器的阈值电流,此外,在 LD 的输出端面镀减返膜有可能进一步降低外腔半导体激光器的阈值电流。由图 5 可知:2400 l/mm 光栅外腔激光器在激射波长为 637.973 nm 时阈值电流最低,为 51 mA,1800 l/mm 光栅外腔激光器在激射波长为 638.002 nm 时阈值电流最低,为 47 mA,在 632~644 nm 区域,1800 l/mm 光栅外腔激光器的阈值电流始终低于 2400 l/mm 光栅外腔激光器的阈值电流,这与反射式全息光栅的色散能力有关。由图 6 可知,当注入电流均为 120 mA 时,要获得不同的激射波长,2400 l/mm 光栅外腔激光器的输出功率总是比 1800 l/mm 光栅外腔激光器的高。当入射到光栅上的光斑相同时,刻线密度更高的光栅更容易获得更高的输出功率。

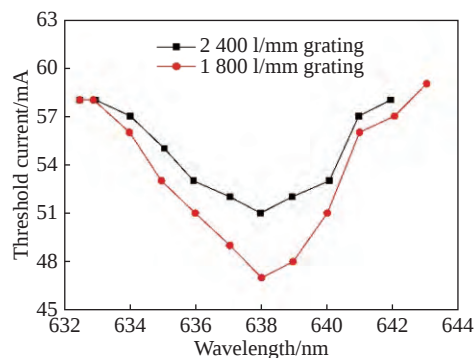


图5 两种不同刻线密度下光栅外腔半导体激光器阈值电流随激射波长的变化

Fig. 5 Threshold current versus lasing wavelength for grating external cavity diode laser with different line densities

实验对比了两种不同刻线密度的反射式全息光栅外腔激光器的各参数性能,如阈值电流、输出功率、光谱特性及波长调谐范围等。结果表明,采用 2400 l/mm 和 1800 l/mm 的全息光栅都

能较好地实现模式锁定,且得到稳定的窄线宽激光输出,光谱线宽小于 3.5 pm,有效降低了阈值电流,1800 l/mm 光栅外腔半导体激光器仅波长调谐范围略大,在输出功率和效率方面,2400 l/mm 光栅外腔半导体激光器更有优势。综上,0 级衍射效率高的 2400 l/mm 全息光栅是本实验的最佳选择。

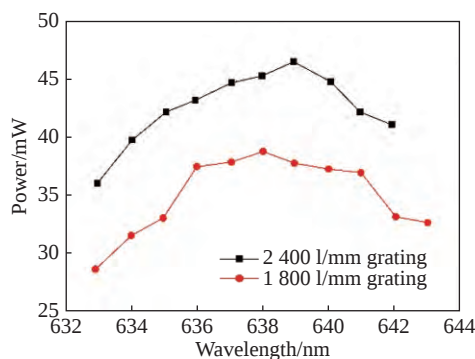


图 6 120 mA 注入电流下光栅外腔半导体激光器输出功率随激光波长的变化情况

Fig. 6 Output power of grating external cavity diode laser versus lasing wavelength with injection current of 120 mA

实验最后对 2400 l/mm 光栅外腔半导体激光器的功率和波长稳定性进行了测试。图 7 给出了在 1 h 内(采样间隔为 5 min),120 mA 注入电流、激光波长为 638.6 nm 时光栅外腔半导体激光器的功率稳定性情况,可见,外腔激光器的输出功率波动为 0.7%,表明激光器具有良好的功率稳定性。图 8 和图 9 是采用波长计(High Finesse)测得的光栅外腔激光器的激光光谱和相应的 1 小时波长稳定性测试结果。由图 8 可知,在 120 mA 注入电流下,外腔激光器的激光波长为 638.714 nm,激光器光谱线宽小于 3.5 pm,可见光栅外腔结构对光谱线宽的压窄效果十分理想。图 9 是波长稳定性测试结果,可见,外腔半导体激光器的波长有较小幅度的变化,光栅外腔激光器的波长稳定性和线宽稳定性结果均良好。从参数性能角度来看,2400 l/mm 全息光栅外腔结构的半导体激光器比普通半导体激光器性能提升较大,对比结果如表 1 所示。

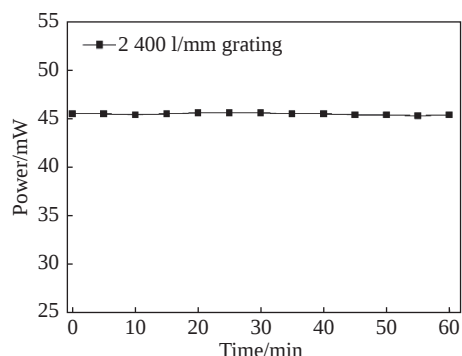


图 7 光栅外腔半导体激光器的输出功率稳定性测试结果

Fig. 7 Output power stability of the grating external cavity diode laser

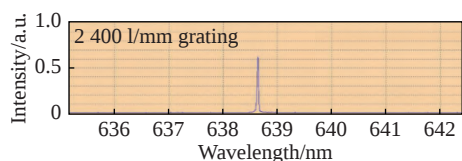


图 8 120 mA 注入电流下光栅外腔半导体激光器的输出光谱特性

Fig. 8 Spectral characteristic of the grating external cavity diode laser with injection current of 120 mA

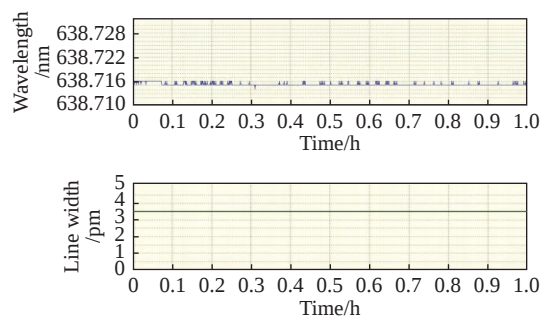


图 9 外腔激光器的波长及线宽稳定性测试结果

Fig. 9 Wavelength stability and line width stability of the external cavity laser

表 1 2400 l/mm 全息光栅外腔激光器与 638 nm 半导体激光器参数性能对比结果

Tab. 1 Performance comparison of 2400 l/mm holographic grating external cavity laser and 638 nm semiconductor laser

	Threshold current/ mA	Output power/ mW (120mA injection current)	Line width/ nm	Wavelength tuning range/ nm
Diode laser	60	50.6	1.8	3
Diode laser with grating external cavity	51	45.2	0.003 5	10

4 结 论

本文采用全息光栅作为外腔反馈元件,设计了 638 nm 外腔窄线宽半导体激光器。实验研究比较了两种不同刻线密度的反射式全息光栅对 AlGaInP 红光激光二极管各参数特性的影响,选用 2400 l/mm 和 1800 l/mm 两种光栅进行实验,都能实现良好的窄线宽激光输出,得到较宽的波长调谐范围,有效降低了 LD 的阈值电流,最终选择输出功率较高、参数性能更理想的 2400 l/mm 光

栅作为外腔反馈元件。由实验结果可知,2400 l/mm 光栅外腔结构能较好地改善半导体激光器的光谱特性,其可将 638 nm 红光激光二极管的光谱线宽压窄至 3.5 pm,波长调谐范围从 3 nm 增大至接近 10 nm,LD 阈值电流从 60 mA 降至 51 mA。当注入电流为 120 mA 时得到的输出功率为 45.2 mW,功率稳定性为 0.7%,此外,其还具有良好的波长和线宽稳定性。本实验证明了加入全息光栅外腔结构能显著提升 638 nm 半导体激光二极管的各方面性能。

参考文献:

- [1] LI F Q, YABLON J, VELTEN A, *et al.*. High-depth-resolution range imaging with multiple-wavelength superheterodyne interferometry using 1550-nm lasers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): H51-H56.
- [2] ELIA A, LUGARÀ P M, DI FRANCO C, *et al.*. Photoacoustic techniques for trace gas sensing based on semiconductor laser sources[J]. *Sensors*, 2009, 9(12): 9616-9628.
- [3] LANG X K, JIA P, CHEN Y Y, *et al.*. Advances in narrow linewidth diode lasers[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(6): 61401.
- [4] PABC EUF D, HASTIE J E. Tunable narrow linewidth AlGaInP semiconductor disk laser for Sr atom cooling applications[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(19): 4980-4984.
- [5] YANG X X, YIN Y N, LI X J, *et al.*. External cavity diode laser as a stable-frequency light source for application in laser cooling of molecules[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 071403.
- [6] 高颖,戴连奎,朱华东,等. 基于拉曼光谱的天然气主要组分定量分析[J]. *分析化学*, 2019, 47(1): 67-76.
GAO Y, DAI L K, ZHU H D, *et al.*. Quantitative analysis of main components of natural gas based on Raman spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(1): 67-76. (in Chinese)
- [7] 刘洋,张天舒,赵雪松,等. 高精度测温拉曼激光雷达光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1904-1909.
LIU Y, ZHANG T SH, ZHAO X S, *et al.*. Optical design and analysis of laser radar spectrometer with high accuracy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1904-1909. (in Chinese)
- [8] 刘庆省,郭金家,杨德旺,等. 小型高灵敏度水下拉曼光谱系统[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 8-13.
LIU Q X, GUO J J, YANG D W, *et al.*. A compact underwater Raman spectroscopy system with high sensitivity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 8-13. (in Chinese)
- [9] WANG W B, MAJOR A, PALIWAL J. Grating-stabilized external cavity diode lasers for Raman spectroscopy—a review[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2012, 47(2): 116-143.
- [10] 刘燕德,靳昱昱,王海阳. 基于拉曼光谱的三组分食用调和油快速定量检测[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2490-2496.
LIU Y D, JIN T T, WANG H Y. Rapid quantitative determination of components in ternary blended edible oil based on Raman spectroscopy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2490-2496. (in Chinese)
- [11] ZRIMSEK A B, CHIANG N, MATTEI M, *et al.*. Single-molecule chemistry with surface-and tip-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(11): 7583-7613.
- [12] PITTS W M. Carbon monoxide concentration measurements in fuel cell environments using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS): an assessment[R]. 2017.
- [13] CHOI D W, JEON M G, CHO G R, *et al.*. Performance improvements in temperature reconstructions of 2-D tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS)[J]. *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(1): 84-89.
- [14] 贾良权,祁亨年,胡文军,等. 种子呼吸CO₂浓度检测系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(6): 1397-1404.

- JIA L Q, QI H N, HU W J, *et al.*. CO₂ concentration detection system for seed respiration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(6): 1397-1404. (in Chinese)
- [15] 李春光, 董磊, 王一丁, 等. 基于TDLAS和ICL的紧凑中红外痕量气体探测系统[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1855-1861.
- LI CH G, DONG L, WANG Y D, *et al.*. Compact mid-infrared trace gas detection system based on TDLAS and ICL[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1855-1861. (in Chinese)
- [16] 龙睿, 王海龙, 成若海, 等. 外腔反馈对量子点激光器输出特性的影响[J]. *发光学报*, 2013, 34(4): 474-479.
- LONG R, WANG H L, CHENG R H, *et al.*. Influence of external cavity feedback on the output characteristics of quantum-dot lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(4): 474-479. (in Chinese)
- [17] 刘荣战, 薄报学, 么娜, 等. 体布拉格光栅外腔红光半导体激光器实验研究[J]. *发光学报*, 2019, 40(11): 1401-1408.
- LIU R ZH, BO B X, YAO N, *et al.*. Experimental research on volume-Bragg-grating external cavity red-light semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(11): 1401-1408. (in Chinese)
- [18] GUO H P, OLAMAX G T. Analysis of no mode-hop tuning of mirror-grating external-cavity diode laser[J]. *Optics Communications*, 2018, 421: 90-93.
- [19] 田景玉, 张俊, 彭航宇, 等. 用于碱金属蒸汽激光器泵浦的窄线宽780 nm半导体激光源[J]. *发光学报*, 2019, 40(9): 1123-1129.
- TIAN J Y, ZHANG J, PENG H Y, *et al.*. 780 nm diode laser source with narrow linewidth for alkali metal vapor laser pumping[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(9): 1123-1129. (in Chinese)
- [20] DING D, LV W L, LV X Q, *et al.*. Influence of grating parameters on the performance of a high-power blue external-cavity semiconductor laser[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1589-1593.
- [21] 郭海平, 万辰皓, 许成文, 等. 外腔半导体激光器动态模稳定性的研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(5): 706-710.
- GUO H P, WAN CH H, XU CH W, *et al.*. Study on dynamic mode stability of external cavity diode lasers[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 706-710. (in Chinese)
- [22] HONG W X. Design and characterization of a littrow configuration external cavity diode laser[EB/OL]. <http://web.mit.edu/RSI/compendium/edit2004/Final/hong-wenxian-caltech-both.pdf>.
- [23] 金杰, 郭曙光, 吕福云, 等. 外腔半导体激光器的实验研究[J]. *南开大学学报(自然科学)*, 2002, 35(4): 56-59.
- JIN J, GUO SH G, LU F Y, *et al.*. Study of external cavity semiconductor laser[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2002, 35(4): 56-59. (in Chinese)
- [24] 李斌, 涂斌, 徐勇跃, 等. 405nm波段光栅外腔窄线宽蓝紫光半导体激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 031404.
- LI B, TU P, XU Y Y, *et al.*. Narrow linewidth diode laser with grating external cavity in 405 nm band[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 031404. (in Chinese)
- [25] 陈少伟, 吕雪芹, 张江勇, 等. 蓝紫光宽带可调谐光栅外腔半导体激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 111405.
- CHEN SH W, LÜ X Q, ZHANG J Y, *et al.*. Blue-violet broadly tunable grating-coupled external cavity semiconductor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 111405. (in Chinese)
- [26] 荣春朝, 严进一, 龚谦. Littman结构的平移透镜外腔半导体激光器[J]. *激光杂志*, 2017, 38(6): 1-3.
- RONG CH CH, YAN J Y, GONG Q. Shift lens external cavity semiconductor lasers of Littman configuration[J]. *Laser Journal*, 2017, 38(6): 1-3. (in Chinese)
- [27] 周长帅, 王海龙, 龚谦, 等. 基于光栅相移效应的Littrow激光器的无跳模调谐[J]. *通信技术*, 2018, 51(5): 1045-1049.
- ZHOU CH SH, WANG H L, GONG Q, *et al.*. Mode-hop-free tuning of Littrow lasers based on grating phase-shift effect[J]. *Communications Technology*, 2018, 51(5): 1045-1049. (in Chinese)

作者简介:



刘 野(1990—), 女, 吉林长春人, 激光工程师, 2016年于吉林大学仪器科学与电气工程学院获得硕士学位, 现工作于长春新产业光电技术有限公司, 主要从事窄线宽半导体激光器的研究。E-mail: liuye@cnilaser.com