

宽调谐范围光栅外腔窄线宽405 nm蓝紫光半导体激光器研究

李斌 高俊 赵俊 余安澜 王新兵 左都罗

华中科技大学光学与电子信息学院 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 自由运行的半导体激光器通常为多纵模光谱输出,谱线宽度较大,不能满足拉曼散射等对光源线宽有要求的应用。为得到稳定输出的窄线宽激光,通过使用反射式全息光栅,有效地窄化了405 nm波段激光二极管的谱线宽度。使用高分辨率单色仪检测了Littrow布局下光栅外腔半导体激光器的输出光谱,并通过输出功率和光谱特性研究了光栅外腔半导体激光器的阈值和调谐特性。实验发现,通过使用2400 l/mm和3600 l/mm刻线密度的反射式全息光栅,激光二极管的阈值电流由30.0 mA分别下降到19.7 mA和21.3 mA,谱线宽度也从自由运行时的1 nm左右下降到0.03 nm以内,在标称的工作电流范围内得到了窄线宽激光输出,并且分别实现了5.45 nm和5.33 nm宽度的波长调谐。这一结果有利于推动蓝紫光激光二极管的光谱应用。

关键词 激光器; 半导体激光器; 蓝紫光; 波长调谐; 窄线宽; 阈值电流

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1202003

Study on Broad Tuning Range and Narrow Line-Width 405 nm Blue-Violet Diode Laser with Grating External Cavity

Li Bin Gao Jun Zhao Jun Yu Anlan Wang Xinbing Zuo Duluo

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Free-running diode lasers can not satisfy the demands of spectroscopy applications such as Raman scattering which requires narrow line-width. In order to obtain narrow line-width laser at 405 nm band, external cavity with reflective holographic gratings for blue-violet laser diode (LD) is studied. The spectra of the blue-violet LD with a grating external cavity in Littrow configuration are measured by a high resolution monochromator, and the characteristics of threshold and tuning property are investigated through its output power and spectra. It is found that the threshold current of LD is reduced from 30.0 mA to 19.7 mA or 21.3 mA when the groove density of the grating is 2400 l/mm or 3600 l/mm respectively, and the line-width is suppressed within 0.03 nm in the full scope of injection currents while the line-width of the free running LD is approximately 1nm. Furthermore, tuning ranges of 5.45 nm and 5.33 nm are achieved. These results is helpful for the spectroscopy applications of blue-violet LD.

Key words lasers; diode laser; blue-violet light; wavelength tuning; narrow line-width; threshold current

OCIS codes 140.2020; 140.3600; 050.2770

1 引言

半导体激光器自出现以来,以其高效率、低成本等优点获得了广泛的关注和研究。近年来,随着半导体

收稿日期: 2015-06-30; 收到修改稿日期: 2015-08-27

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2012YQ16000702)

作者简介: 李斌(1987—),男,博士研究生,主要从事气体自发拉曼散射信号增强方法与实验等方面的研究。

E-mail: libin86211@163.com

导师简介: 左都罗(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事激光光谱、高功率激光技术、激光等离子体等方面的研究。

E-mail: zuoduluo@hust.edu.cn(通信联系人)

激光器功率、光束质量的提高以及光谱特性的改善,在工业加工^[1]、物质检测^[2]、精密光谱^[3]、气体分析与传感^[4]等众多领域获得了广泛的应用。

以自然解理面做输出面的半导体激光器在自由运行时输出谱线不稳定且线宽较大,难以满足对线宽有要求的应用,诸如激光器抽运光源^[5-6]、拉曼散射光源^[7]、数据存储^[8]等。为了得到窄线宽、波长稳定以及可调谐的半导体激光输出,研究人员采用光栅^[9-13]、宽带滤光片^[14]、共焦腔^[15]等不同的光反馈元件做了大量的研究工作。其中,Littrow 布局的光栅外腔激光器被广泛采用。在 Littrow 布局中光栅作为反馈元件将 1 级衍射光反馈回半导体激光器中,0 级光作为输出。Conroy 等^[9]报道了一种扩展腔紫光激光器,在 392 nm 得到了 3.5 mW 单频激光输出,并且连续调谐范围超过 6 GHz,粗调谐 2.7 nm。Hildebrandt 等^[10]报道了用于全息数据存储的 405 nm 外腔激光器,输出功率达到 80 mW。吕雪芹等^[11]研究了外腔紫光半导体激光器的调谐特性,波长调谐范围从 403.82 nm 到 408.29 nm。日亚公司的 Omori 研究小组^[12]报道了使用 GaN 基紫光激光二极管的可调谐光源。已有报道多针对外腔激光器的单一性能进行研究,对光栅反馈下激光二极管性能的综合评估报道较少。

国内关于可调谐光栅外腔半导体激光器的报道较多,但多数研究结果集中在近红外^[16-17]波段,其中陈少伟等^[11,18]近期报道过低电流工作时蓝紫光光栅外腔半导体激光器的调谐特性,分别获得了 4.47 nm 和 7 nm 的波长调谐范围,但输出功率仅达到毫瓦量级。针对拉曼散射对光源线宽的需要,在本课题组之前研究工作^[19]的基础上,选用不同刻线密度的反射式全息光栅作为光反馈元件,实验研究了 Littrow 布局下光栅外腔半导体激光器的输出功率、光谱、波长调谐、阈值电流以及稳定性等特性。通过对比实验结果发现,在两块刻线密度不同的光栅反馈下,均获得了窄线宽激光输出,输出功率分别达到了 32.4 mW 和 30.3 mW,波长调谐范围达到 5.48 nm 和 5.33 nm,并详细讨论了不同刻线密度光栅构成的外腔半导体激光器的阈值电流与光谱特性。

2 实验装置

图 1 给出了实验装置示意图,以及两种获得激光输出的激光束偏振方向与光栅刻线方向的关系。实验中使用的蓝紫光激光二极管(LD)(DL-405-0.10,RS Components),工作温度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,输出功率为 100 mW,标称中心波长为 405 nm,实验前未对输出端面作任何减反膜镀膜处理。LD 安装在带有半导体制冷器(TEC)制冷的安装座(LDM21,Thorlabs)上,电流由电流控制器(ITC102,Thorlabs)控制。非球面镜 L1(C671TME-405,Thorlabs)镀有 405 nm 增透膜,焦距和数值孔径分别为 4.01 mm 和 0.6。反射式全息光栅(GH25-24V,GH25-36U,Thorlabs)刻线密度分别为 2400 l/mm、3600 l/mm。高分辨率单色仪为 JobinYvon 公司的配备线阵探测器 Sygnature-PDA 的 THR1500(单色仪焦距为 1500 mm,使用单光程),功率计为 Gentec 的 XLP12-3S-H2-D0。

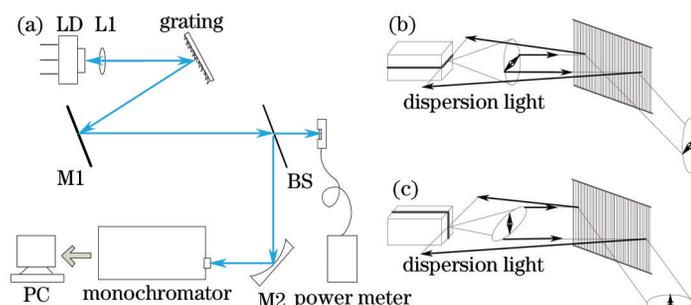


图 1 光栅外腔实验装置与光栅色散示意图。(a) 实验装置示意图;(b) ‘s’偏振入射的色散;(c) ‘p’偏振入射的色散

Fig.1 Schematic diagram of grating external cavity experiment setup and grating dispersion.

(a) Schematic diagram of experiment setup; (b) dispersion of ‘s’ polarization incident; (c) dispersion of ‘p’ polarization incident

由 LD 发出的光束经非球面镜准直后入射到光栅,经光栅色散,1 级衍射光作为反馈光返回到 LD 的有源区,0 级衍射光作为窄线宽激光输出。输出光经过分光镜分束,其中一束直接入射到功率计,另一束经圆形渐变密度滤光片衰减后进入单色仪,同时记录功率和光谱输出结果。单色仪在使用之前由低压放电汞灯在 404 nm 附近的 3 条谱线进行了标定,其中 404.66 nm 谱线的半峰全宽为 0.017 nm。

LD 及其安装座以及光栅均固定在自制的基板上,自制基板的结构与 Ricci 等^[20]的类似。非球面镜安装在三维精细调整架上,实现 LD 输出光束准直。光栅通过精密顶丝旋钮进行俯仰与转动调节,确保 1 级衍射

光精确反馈到 LD 有源区。经准直后得到长约 5 mm、宽约 2 mm 的近椭圆形光斑。

3 实验结果与讨论

实验首先对 LD 自由运行时的功率和输出光谱进行了测量,测试结果如图 2 所示。

图 2(a)、(b)分别给出了 LD 自由运行时的功率-电流($P-I$)特性和光谱特性。对比图 2(a)、(b)可以看出,LD 的阈值电流在 30 mA 附近。低于阈值电流时,自由运行的 LD 输出功率几乎为 0,此时光斑为微弱荧光,光谱为多纵模输出,纵模包络的半峰全宽约为 1.17 nm,该纵模包络基本呈现了 LD 的增益谱分布,LD 此时工作在自发辐射状态。在阈值电流附近,LD 的输出功率存在缓变过程,光谱输出的多纵模包络也在慢慢收窄,LD 工作在自发辐射向受激辐射转变的过程。超过阈值电流之后,LD 的输出功率随注入电流线性增长,注入电流为 100 mA 时输出功率为 95 mW,与标称功率相当。受激辐射发生后,随着注入电流的继续增大,相应的输出光谱中纵模数量也增多,并伴随中心波长的红移。

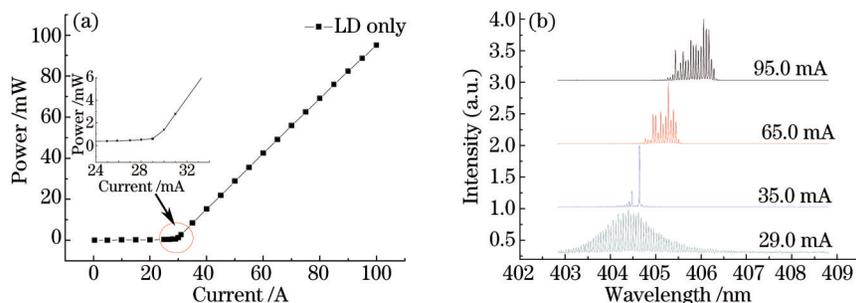


图 2 自由运行时 LD 的功率与光谱输出特性。(a) 输出功率; (b) 光谱输出特性

Fig.2 LD characteristics of output power and spectrum at free running state. (a) Output power;

(b) output spectrum characteristics

当入射到光栅上的光斑相同时,刻线密度较低的光栅分辨率较小,进而影响光栅外腔激光器的谱线宽度,此外,刻线密度较低的光栅还存在多级衍射,这也会降低光栅外腔激光器的输出功率^[18,21]。为压缩输出谱线宽度、提高输出功率,要求使用尽可能高刻线密度的光栅,并且只存在 0 级和 1 级衍射输出。由 Littrow 布局的光栅方程 $2d \sin \theta = m\lambda$,可得到光栅周期选择范围为 $\lambda/2 < d < \lambda/\sin \theta \approx 1.5\lambda$,由此可获得 405 nm 的激光波长,合适的光栅刻线密度范围为 1600~4800 l/mm。因此根据市场光栅产品的情况,选择刻线密度 2400 l/mm 和 3600 l/mm 的两种反射式全息光栅进行实验研究。由于 LD 输出光具有偏振特性,方向沿 p-n 结平面方向,并且光栅对不同偏振方向的入射光有不同的衍射效率,因此对于不同的入射偏振态,光栅可以提供不同的反馈量。在实验过程中发现,LD 在不同的反馈条件下不能都得到窄线宽的激光输出。实验中自行测量了光栅的 1 级和 0 级的衍射效率。测试时将准直后的激光入射到光栅上,使 1 级衍射光偏离入射光方向入射到功率计中,同时适当增大光栅与 LD 之间的距离以减小衍射光与 Littrow 角(2400 l/mm 和 3600 l/mm 光栅对 405 nm 的 Littrow 角分别为 29.08°和 46.80°)的偏离量,测量不同注入电流下 0 级与 1 级光的功率,最终计算得到光栅的平均衍射效率。表 1 给出了测试结果,表 1 中偏振方向垂直于光栅刻线方向的定义为 s 偏振,偏振方向平行于光栅刻线方向的定义为 p 偏振。这里的定义与文献[22]中图示的偏振方向的定义有所差异。

表 1 不同偏振下光栅的衍射效率

Table 1 Grating efficiency obtained at different incident polarizations

Polarization	's'		'p'	
	1st order	0 order	1st order	0 order
Grating				
2400 l/mm	~56.4%	~4.6%	~56.0%	~30.8%
3600 l/mm	~56.5%	~28.6%	~7.8%	~86.1%

在 's' 偏振入射下,即偏振方向与光栅刻线方向垂直时,2400 l/mm 光栅的损耗太大,除 0 级和 1 级衍射外没有其他级次的衍射光,并且 0 级输出较小,无法满足应用需要;在 'p' 偏振入射下,即偏振方向与光栅刻线方向平行时,3600 l/mm 光栅的 1 级反馈较小,并且 LD 输出端面没有另外镀制减反膜,导致无法得到窄线宽的激光。因此只给出了 2400 l/mm 光栅在 'p' 偏振入射和 3600 l/mm 光栅 's' 偏振入射时的实验结果,图 3 为

两种条件下光栅外腔激光器的功率和光谱输出情况。

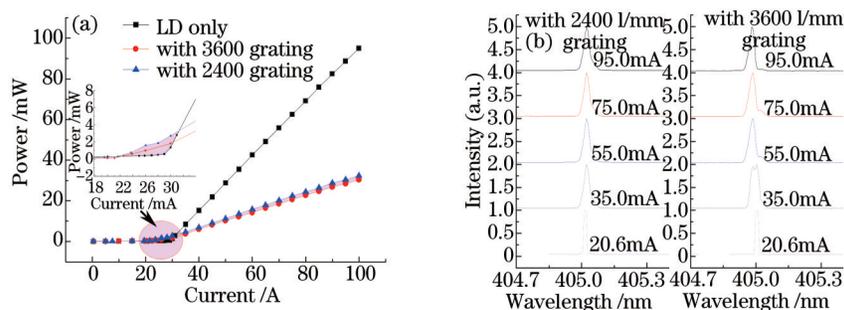


图3 两种光栅外腔半导体激光器的功率和光谱输出特性。(a) 外腔激光器输出功率以及LD自由运行时的输出功率；(b) 不同注入电流时,光栅外腔激光器的光谱输出特性

Fig.3 Characteristics of output power and spectrum of two grating external cavity diode laser. (a) Output power of external cavity diode laser and free running laser diode; (b) output spectrum of external cavity diode laser at different injection currents

由于光栅的色散作用,仅有线宽较窄的一部分光能返回到LD中,形成外部光反馈。LD光腔中自由竞争的模式在反馈光的影响下失去平衡,使激光器提前由自发辐射向受激辐射转变,这一提前的过程表现为 $P-I$ 特性曲线中阈值电流的下降,图3(a)中插图部分明显展示了这一特性。从加入光栅前后的功率输出对比可以发现,2400 l/mm和3600 l/mm反射式全息光栅分别使LD的阈值电流从30.0 mA下降到19.7 mA和21.3 mA,下降幅度分别为34.3%和29%。超过阈值电流之后,光栅外腔激光器的输出功率随注入电流呈线性变化关系,注入电流为100 mA时,外腔激光器的输出功率分别为32.4 mW和30.3 mW,功率效率分别为34.1%和31.9%。由于使用了较大数值孔径的非球面镜准直,这在增强反馈光收集效果的同时,也使反馈光与LD本征腔得到了较强的耦合,最终显著降低了LD的阈值电流。从功率输出曲线可以发现,与LD自由运行时的输出功率相比,光栅外腔半导体激光器的输出功率有较大幅度减小,斜率效率也有所下降。从表1中光栅的平均衍射效率可以看出,在得到窄线宽激光输出时,2400 l/mm和3600 l/mm光栅用于反馈的1级衍射光的功率约占激光器总功率的56%,而用于输出的0级衍射光只有30%左右,这是造成光栅外腔半导体激光器输出功率和斜率效率下降的主要原因,此外还有光栅吸收等引起的损耗。在保证有效光反馈量的前提下,使用1级衍射效率较低的光栅,可得到较高的0级衍射输出^[9-10],从而提高光栅外腔半导体激光器的输出功率和斜率效率。由于实验用的蓝紫光LD的输出功率在百毫瓦量级,所以外腔激光器较低的斜率效率在一定程度上制约了LD的使用效率。

图3(b)分别给出了两种光栅外腔半导体激光器在不同注入电流下的光谱输出情况,从谱线输出结果可以看出,从低电流到高电流,两种光栅构成的外腔激光器都得到了窄线宽输出,谱线宽度在0.03 nm左右。与文献[11]中的结果相比,本论文的工作在整个标称的工作电流区间都得到了线宽稳定在0.03nm左右的窄线宽激光输出。

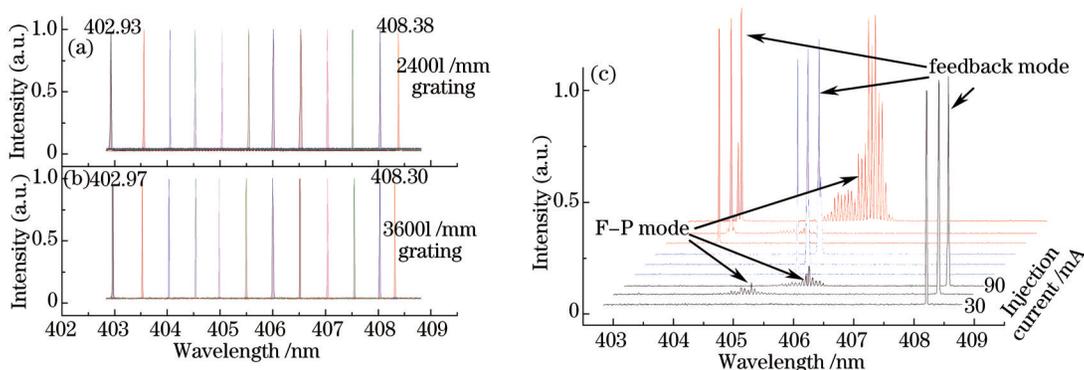


图4 光栅外腔半导体激光器的波长调谐范围。(a) 2400 l/mm; (b) 3600 l/mm; (c) 波长调谐中模式随注入电流的变化

Fig.4 Wavelength tuning range of grating external cavity diode laser. (a) 2400 l/mm; (b) 3600 l/mm; (c) relationship between modes and injection current during wavelength tuning

图4给出了光栅外腔半导体激光器的波长调谐结果。图4(a)和(b)图给出的分别是2400 l/mm和3600 l/mm光栅外腔激光器在30.0 mA注入电流时的波长调谐范围,在所有测试的电流中,注入电流为30.0 mA时光栅外腔激光器波长调谐范围最大,分别为5.45 nm和5.33 nm,图5(a)中给出了不同注入电流下波长调谐范围的详细结果。当注入电流为30.0 mA时,在波长调谐的过程中均得到窄线宽激光输出。此外,在波长调谐过程中发现,随着注入电流的增大,调谐波长越偏离中心增益区越难获得窄线宽输出,而且LD的本征模式表现出越来越强的竞争能力,即使调谐波长有较强的外部反馈,仍无法与高电流时的LD本征模式竞争,难以得到窄线宽的激光输出,在LD的输出端镀减反膜有可能改善边沿调谐波长的振荡特性。而在增益区的中心波长附近,尽管随着注入电流的升高会出现跳模以及模式竞争,但通过调节光栅的旋转与俯仰,都能够有效地抑制掉本征模式实现窄线宽激光输出,并能够使输出谱线稳定在初始激光波长。图4(c)描述了波长调谐过程中不同注入电流下的模式竞争情况。

图5总结了波长调谐范围随注入电流的变化以及LD阈值电流随激光波长的变化结果。

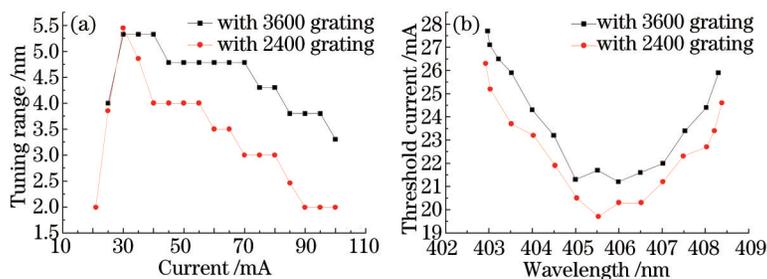


图5 光栅外腔激光器的阈值电流及调谐范围特性。(a) 波长调谐范围随注入电流的变化;(b) 阈值电流随激光波长的变化

Fig.5 Characteristics of threshold and tuning range of external cavity diode laser. (a) Relationship between tuning range and injection current; (b) relationship between threshold and lasing wavelength

实验研究发现,波长调谐范围随注入电流的改变有明显变化,其中波长调谐范围是指光栅外腔激光器获得窄线宽激光输出时的最大激光波长和最小激光波长的差值,在调谐范围内均能得到窄线宽激光输出。从图5(a)中可以看出在30.0 mA注入电流时两种光栅构成的外腔激光器的调谐范围最大,该电流恰好为自由运行的LD的阈值电流。而在LD自由运行的阈值电流两侧,波长调谐范围均随注入电流下降,并且低电流时调谐范围下降更迅速。在大于阈值电流时,光栅外腔激光器的调谐范围随注入电流的增加呈近似线性减小,这是因为随着注入电流的增大,LD本征腔的模式增强,并且增益相当的模式增多,使得LD本征模式与偏离增益区中心的光栅反馈模式之间的竞争逐渐增强。当电流增大到一定值后,偏离增益区中心较远的光栅反馈模式无法得到窄线宽输出,因此光栅外腔激光器的调谐范围在大于阈值之后,随着注入电流的增加近似线性减小。在记录的电流值中,除了在30.0 mA时2400 l/mm光栅外腔激光器调谐范围略大之外,总体来说,3600 l/mm光栅外腔激光器的调谐范围要比2400 l/mm光栅外腔激光器的大。而在改变激光波长观察阈值电流的过程中发现,2400 l/mm光栅外腔激光器的阈值电流总是比3600 l/mm光栅外腔激光器的阈值电流低,如图5(b)所示。造成两种光栅外腔激光器调谐范围和阈值电流差异的因素除了光栅反馈强度的略微不同之外,与光栅的色散差异也有关。由于实验在不同偏振入射条件下进行,并且光斑形状非圆对称,导致2400 l/mm光栅的色散能力是3600 l/mm光栅的1.3倍。两种光栅外腔激光器阈值电流随激光波长的变化关于中心波长基本呈对称分布,即在中心波长处阈值电流最低,随着偏离中心波长越远阈值电流越大。光栅外腔激光器在中心波长处的阈值电流较低,在偏离中心波长时阈值电流增大的这一特性,与LD在中心波长处增益较大,偏离中心波长时增益变小的特征是相对应的,这与图2(b)给出的谱线输出结果也是相符的。

最后,对不同刻线密度光栅构成的外腔激光器的光谱和功率的稳定性进行了测试。图6(a)、(b)给出的分别是2400 l/mm和3600 l/mm光栅外腔激光器测试结果。

实验中采样测试了注入电流为35.0、60.0、85.0 mA时光栅外腔激光器的光谱及功率稳定性情况。每组电流的测试时间为1 h,采样间隔为5 min。通过3 h的测试发现,尽管在不同注入电流时输出波长有微小波动,但在同一注入电流时光栅外腔半导体激光器的输出光谱和功率都达到了良好的稳定性,其中2400 l/mm光栅外腔半导体激光器的功率波动在0.6%左右,而3600 l/mm光栅外腔半导体激光器的功率波动为0.06%

左右。从图6(a)、(b)可以看出,随着注入电流的增大,光栅外腔半导体激光器的输出谱线有展宽现象。这是由于外腔光栅的作用是对半导体激光器的增益线型进行调制,激光振荡的阈值是一定的,注入电流提高,则阈值以上的调制后的增益宽度也增宽,使得振荡模式增多(由于外腔长度远大于自由振荡半导体激光器的腔长,复合腔纵模稠密,易多纵模振荡),谱线增宽。尽管测试时间比较短,但是从测试结果来看,这款自制的光栅外腔半导体激光器的稳定度可以达到相应的实验需要。

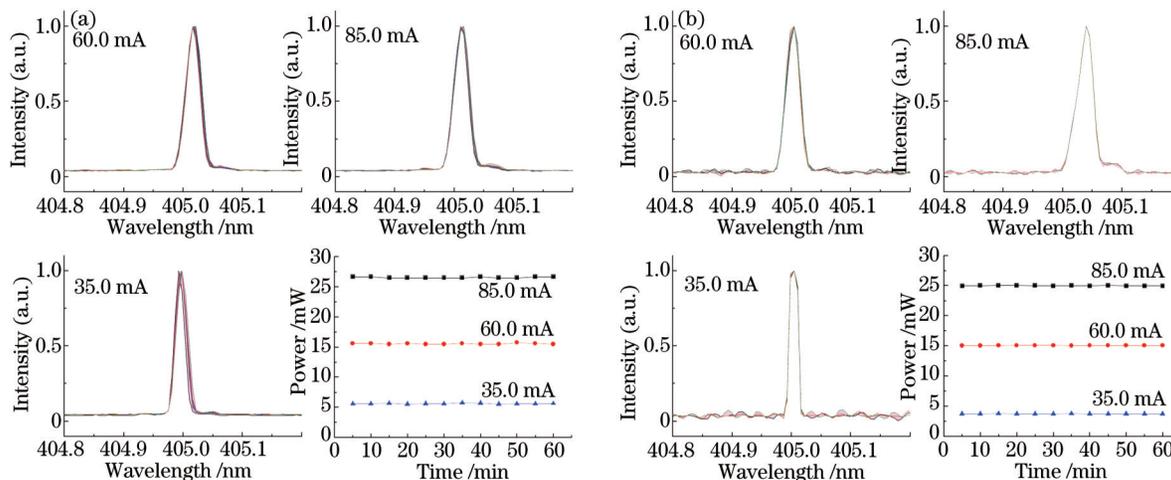


图6 光栅外腔半导体激光器不同注入电流时的输出光谱及功率的稳定性。(a) 2400 l/mm; (b) 3600 l/mm

Fig.6 Stability of output spectrum and power of grating external cavity diode laser at different injection currents.

(a) 2400 l/mm; (b) 3600 l/mm

4 结 论

实验研究对比了两种不同刻线密度的反射式全息光栅对LD阈值电流、调谐范围等参数的影响。通过使用2400 l/mm、3600 l/mm反射式全息光栅,有效地降低了LD的阈值电流,得到了窄线宽的光栅外腔激光输出,功率效率分别达到了34%、32%。本实验研究发现,在光栅外腔半导体激光器的阈值电流和输出功率方面,刻线密度较小、0级衍射效率较高的光栅效果更理想;而从波长调谐范围和功率输出稳定性来看,刻线密度较大的光栅得到的效果较好。

参 考 文 献

- 1 H Nasim, Y Jamil. Diode lasers: From laboratory to industry[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56: 211-222.
- 2 H Katarzyna, B Zbigniew, W Jacek, *et al.*. Blue laser diodes for trace matter detection[J]. Opt Appl, 2010, 40(3): 641-651.
- 3 H Nasim, Yasir Jamil. Recent advancements in spectroscopy using tunable diode lasers[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 043001.
- 4 X T Lou, G Somesfalean, B Chen, *et al.*. Simultaneous detection of multiple-gas species by correlation spectroscopy using a multimode diode laser[J]. Opt Lett, 2010, 35(11): 1749-1751.
- 5 Feng Jiansheng, Yuan Xiao, Xiong Baoxing, *et al.*. Wavelength stabilization and linewidth narrowing of laser diode for pumping Cs vapor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0514001.
- 6 封建胜, 袁 孝, 熊宝星, 等. 用于抽运铯蒸气激光器的半导体激光器波长稳定与线宽窄化研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0514001.
- 7 Meng Huicheng, Wu Deyong, Tan Hao, *et al.*. Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combing of grating-external cavity[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 03020031.
- 8 孟慧成, 武德勇, 谭 昊, 等. 窄光谱高亮度半导体激光器光栅-外腔光谱合束实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 03020031.
- 7 S Ohara, J Sato, M ENDO, *et al.*. Trace methane detection based on Raman spectroscopy using a high finesse optical resonator[J]. The Review of Laser Engineering, 2004, 32(3): 208-210.
- 8 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.
- 9 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): 185-188.

- 10 L Hildebrandt, 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.
- 11 Lv Xueqin, Chen Shaowei, Zhang Jiangyong, *et al.*. Tuning properties of external cavity violet semiconductor laser[J]. *Chin Phys Lett*, 2013, 30(7): 074204.
- 12 M Omori, N Mori, N Dejima, *et al.*. Tunable light source with GaN-based violet laser diode[C]. *SPIE*, 2013, 8625: A1-A8.
- 13 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Huang Wei, *et al.*. Laser diode with long external cavity of volume Bragg grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1102006.
李志永, 谭荣清, 黄 伟, 等. 长腔长体布拉格光栅外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1102006.
- 14 D J Thompson, R E Scholten. Narrow linewidth tunable external cavity diode laser using wide bandwidth filter[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(2): 023107.
- 15 K Hayasaka. Frequency stabilization of an extended-cavity violet diode laser by resonant optical feedback[J]. *Opt Commun*, 2002, 206(4): 401-409.
- 16 Wang Junzhen, Wang Yuefeng, Bai Huijun. A kind of narrow line width external cavity laser diode with wavelength stability and continuous tuning[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1202002.
王军阵, 汪岳峰, 白慧君. 一种波长稳定可调谐的窄线宽外腔激光二极管激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1202002.
- 17 Wei Fang, Chen Dijun, Xin Guofeng, *et al.*. A compact and rugged tunable external cavity diode laser with Littman-Metcalf configuration [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102012.
魏 芳, 陈迪俊, 辛国锋, 等. 紧凑坚固 Littman-Metcalf 型可调谐外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102012.
- 18 Chen Shaowei, Lü Xueqin, Zhang Jiangyong, *et al.*. Blue-violet broadly tunable grating-coupled external cavity semiconductor laser[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2013, 50(11): 111405.
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.
- 19 Li Bin, Tu Pin, Xu Yongyue, *et al.*. Narrow line-width diode laser with grating external cavity in 405 nm band[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2015, 52(3): 031404.
李 斌, 涂 嫫, 徐勇跃, 等. 405 nm 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.
- 20 L Ricci, M Weidemuller, T Esslinger, *et al.*. A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics[J]. *Opt Commun*, 1995, 117(5): 541-549.
- 21 Miao Liang. Research on High-Energy Optical Pumped Gas Terahertz Laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 37-41.
苗 亮. 高能量光泵太赫兹气体激光器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 37-41.
- 22 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]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(4): 488-493.

栏目编辑: 宋梅梅