

405 nm 波段光栅外腔窄线宽蓝紫光半导体激光器

李斌 涂焱 徐勇跃 李哲 余安澜 王新兵 左都罗

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由于谱线较宽而无法如拉曼散射等对线宽有要求的应用需求,因此获得线宽较窄、波长稳定的半导体激光器十分必要。采用反射式全息光栅作为谱线窄化元件,研究了在 Littrow 布局下的 405 nm 外腔半导体激光器。反射式全息光栅的加入,使得光栅面和半导体激光器的输出面组成耦合外腔,这在很大程度上改善了 405 nm 半导体激光器的线宽性能。实验结果表明,通过加入 2400 line/mm 的反射式全息光栅形成外腔反馈,半导体激光器的阈值电流由 31 mA 下降到 22 mA,谱线宽度从自由运行时的 1 nm 减小到 0.03 nm 以下,实现了窄线宽输出,并且在工作电流为 100 mA 时,得到窄线宽半导体激光器的输出功率为 28 mW,为自由运行半导体激光器输出功率的 31.7%。此外,通过调节反馈光栅的角度,实现了较大电流范围的激光波长的连续调谐,最大调谐范围达 3.5 nm。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光栅外腔; 窄线宽

中图分类号 TN248; TN365

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.031404

Narrow Linewidth Diode Laser with Grating External Cavity in 405 nm Band

Li Bin Tu Pin Xu Yongyue Li Zhe Yu Anlan Wang Xinbing Zuo Duluo

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Free-running diode lasers cannot meet the demands for the line width in the applications due to their broad line width such as Raman scattering and so on. Therefore, it is quite necessary to develop diode lasers with narrow line width, steady wavelength. A reflective holographic grating is taken as a line width narrowing component, and a 405 nm diode laser with external cavity in Littrow configuration is studied. As the introduction of the reflective holographic grating, a coupled external cavity is built between the surface of the grating and the emitting surface of the diode laser, and it improved the line width performance of 450 nm diode laser to a large extent. The experiment results show that, by adding the 2400 line/mm reflective holographic grating, the threshold current of the diode laser is reduced from 31 mA to 22 mA, and line width is reduced from 1 nm to 0.03 nm of free-running, and narrow line width output is realized. A 28 mW output power of the narrow line width laser is got at 100 mA which is 31.7 percent to the power of the free-running diode laser. Besides, by changing the angle of the reflective holographic grating, continuous wavelength tuning of 3.5 nm is realized in a large tuning range of injection current.

Key words lasers; diode laser; grating external cavity; narrow linewidth; blue-violet light

OCIS codes 140.2020; 140.5960

1 引言

半导体激光器(LD)由于其体积小、效率高、成本低等优点而引起人们极大的兴趣,半导体激光器的研究和应用也扩展到了工业加工、光谱、气体传感等领域^[1-4]。但是,半导体激光器的增益介质为半导体材料,它的增益曲线有较大的宽度,这就导致采用法布里-珀罗谐振腔结构制作的半导体激光器激射谱线较宽。因此,半导体激光器的线宽较宽限制了它在原子物理与激光光谱等对光源单色性有限制的领域中的直接应

收稿日期: 2014-09-23; 收到修改稿日期: 2014-11-05; 网络出版日期: 2015-02-02

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)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

用。尽管蓝宝石激光器、染料激光器等能够满足这些应用要求,但其成本成为主要的限制因素。所以,研制低成本、窄线宽以及大功率的激光光源成为人们的研究热点之一。利用光栅外腔^[6]的方法可以较好地改善商用半导体激光器的性能,实现半导体激光器的稳频、线宽压窄以及波长调谐,这也为半导体激光器应用到原子物理^[6-7]、拉曼光谱^[8]、激光器抽运^[9]等领域提供了可能。

由于蓝紫光半导体激光器波长较短,使其在拉曼散射等对波长较为敏感的研究中具有较好的应用前景。目前光栅外腔半导体激光器的研究主要集中在近红外波段^[10],位于蓝紫光波段的研究相对较少。国内的陈少伟等^[11-12]对该波段蓝紫光宽带可调谐光栅外腔半导体激光器进行过相关报道,但其所研究的光栅可调谐光栅外腔半导体激光器输出功率小,无法满足拉曼散射等的相关应用。本文使用 Littrow 布局^[13-14],对 405 nm 波段半导体激光器进行了线宽压窄实验,并对光栅外腔半导体激光器的输出功率的大小和稳定性、谱线线宽以及调谐范围进行了研究。利用反射式全息光栅做反馈元件,有效降低了半导体激光器的阈值电流,获得了线宽小于 0.03 nm 的窄线宽输出,通过调节光栅角度,得到了 3.5 nm 的波长调谐范围。

2 实验装置

实验中光栅外腔半导体激光器使用的是 Littrow 布局,图 1 给出了实验装置示意图。半导体激光器(LD)安装在 Thorlabs 公司的 LDM21 安装座上。半导体激光器的出射光经镀有 405 nm 增透膜的非球面镜准直后入射到反射式全息光栅上,得到零级和其他级衍射光。通过光栅固定装置调整反射式全息光栅的俯仰与轴向角度,使一级衍射光反馈到半导体激光器的有源区,零级光作为光栅外腔半导体激光器的输出光。

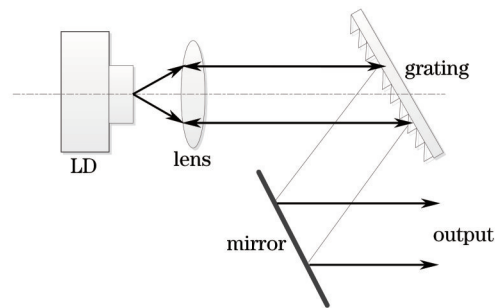


图 1 Littrow 布局光栅外腔半导体激光器示意图

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

实验中使用长春新产业公司生产的半导体激光器(型号 SLD-405-100)作为增益器件。半导体激光器出光面没有进行镀膜等任何处理,在自由运行状态下,其功率与光谱输出情况如图 2 所示。当输入电流为 30.0 mA 时,半导体激光器没有激光输出,增益谱带宽度为 5.0 nm。当电流增大到超过阈值电流后,谱线宽度显著变窄,得到多纵模激光输出。

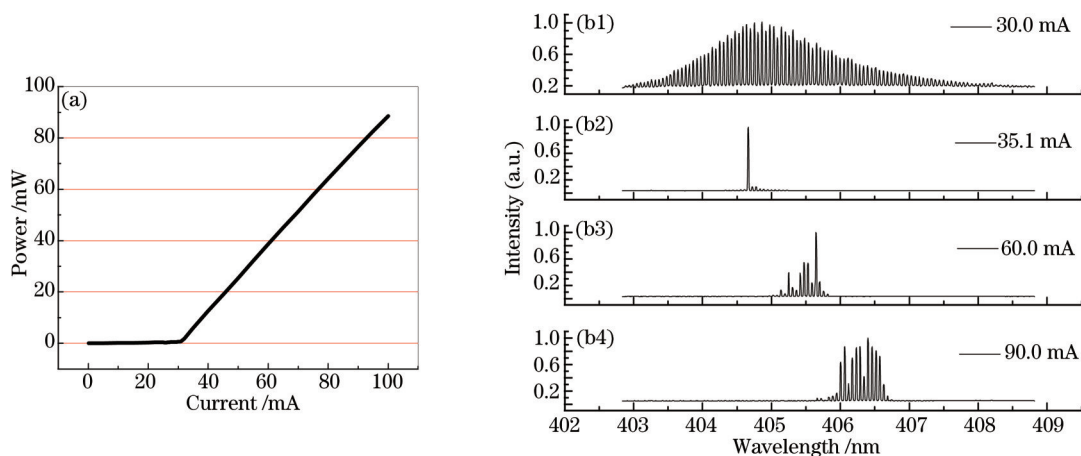


图 2 (a) 自由运行状态下半导体激光器的 $P-I$ 特性曲线; (b1)~(b4) 不同电流条件下的输出光谱

Fig.2 (a) $P-I$ characteristic curve of the free-running diode laser; (b1)~(b4) emission spectra at different currents

外腔半导体激光器线宽压窄实验中使用的非球面镜为 Thorlabs 公司的 405 nm 膜非球面镜(型号 C671TME-

405), 焦距为 4.01 mm, 数值孔径为 0.6, 半导体激光器输出光经非球面镜准直后获得近似椭圆光斑。光栅外腔的长度为 5 cm, 光栅采用 Thorlabs 公司的反射式全息光栅(型号 GH25-24V), 光栅的划线密度为 2400 lines/mm, 平均衍射效率为 55%。光谱特性通过 Horiba Jobin Yvon 公司的单色仪(型号 THR 1500)并使 Sygnature-PDA 阵列探测器工作在光谱仪模式, 测得低压放电汞灯的 404.66 nm 谱线宽度为 0.017 nm。

3 实验结果与讨论

首先测试了自由运行状态下半导体激光器的性能。图 2(a) 是半导体激光器注入电流在 0~100 mA 之间的 $P-I$ 特性曲线, 图(b1)~(b4) 是 30.0、35.1、60.0、90.0 mA 时半导体激光器的输出光谱。从 $P-I$ 特性曲线不难发现, 自由运行状态下, 半导体激光器的阈值电流在 31 mA 左右, 100 mA 注入电流时半导体激光器的输出功率在 90 mW 附近。半导体激光器的输出光谱显示, 在注入电流为 30.0 mA 时没有激光输出且输出光谱增益区宽度为 5 nm 左右, 增益区半峰全宽为 2.32 nm, 半导体激光器为多纵模工作; 当注入电流升高到 35.1 mA 时, 得到模式较少的纵模输出; 随着注入电流继续升高, 半导体激光器的输出模式增多而且输出激光的波长红移。由于该半导体激光器的中心增益区在 405 nm 附近, 所以当注入电流升到 35.1 mA 时, 先在 404.7 nm 得到激光输出。由于此时在阈值电流附近激光二极管的增益区较小, 因此激光输出模式较少; 随着注入电流的增大, 增益区内增益大于损耗的模式增多, 因此出现了激光的多纵模输出, 而且大波长方向的增益较强, 所以随着电流增大波长出现红移现象。

图 3 给出的是加入光栅外腔反馈后半导体的 $P-I$ 输出特性和光谱输出情况。图 3(a) 的 $P-I$ 特性曲线同时给出了半导体激光器自由运行和加入光栅外腔后的功率输出特性。数据显示加入光栅反馈后半导体的阈值电流从 31 mA 下降到 22 mA, 下降比例约为 29%。阈值电流的大幅降低表明, 反射式全息光栅的 1-级衍射光经非球面镜反馈回半导体激光器后, 形成了光栅外腔与内腔之间的较强耦合。在该反馈情况下得到的光栅外腔半导体激光器光谱输出如图 3(b1)~(b4) 所示, 可以看出, 22.0 mA 时已出现激光输出, 此时半导体激光器工作在阈值电流附近, 激光强度较小, 因此获得的光谱的噪声比例就比较大。随着注入电流继续升高, 光栅外腔半导体激光器的中心输出波长仍能稳定在 405.15 nm 附近; 但是输出的单模激光的半峰全宽从 0.017 nm 展宽到 0.027 nm。在 90 mA 时输出光谱出现了双模输出, 模式强度差异相差较大。光谱输出曲线可以证明, 光栅外腔能够较好地压窄线宽, 并且在低电流时的线宽压窄效果优于高电流时的线宽压窄效果, 原因在于随着工作电流升高出现的谱线展宽受限于半导体激光器的增益特性。

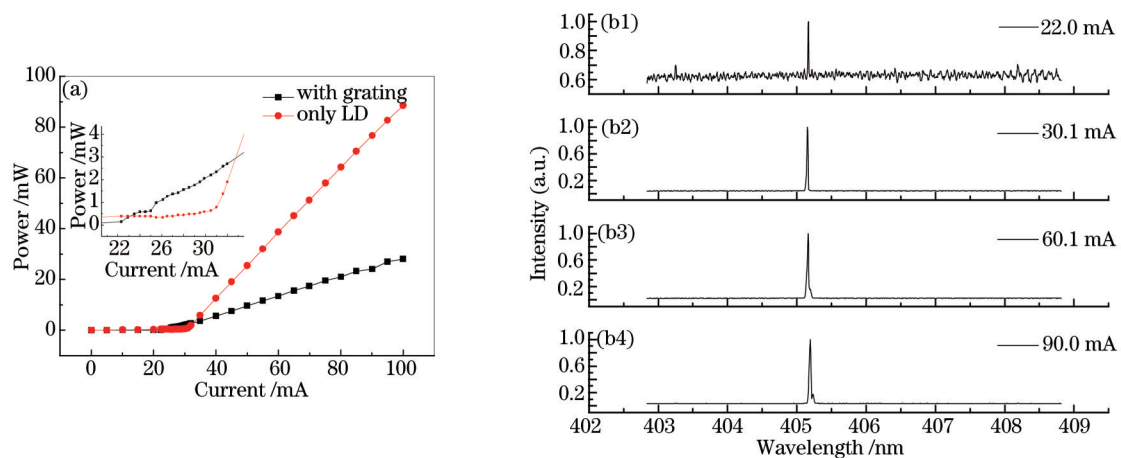


图 3 (a) 光栅外腔半导体激光器的 $P-I$ 输出特性; (b1)~(b4) 相应的光谱输出

Fig.3 (a) $P-I$ characteristic the grating external cavity diode laser; (b1)~(b4) corresponding emission spectra

实验中分别对 30.0、60.0、90.0 mA 时的光栅外腔半导体激光器的输出功率和光谱的稳定性进行了测量。图 4 给出了在 1 h 的测量时间内光栅外腔半导体激光器的功率与光谱输出稳定情况。通过对 3 个电流值处输出功率的测量发现, 光栅外腔半导体激光器的功率稳定度在 0.5% 以内。从光谱输出的稳定情况看, 在单个电流的测试时间内光栅外腔半导体激光器的光谱输出有波长漂移, 30.0、60.0、90.0 mA 时中心波长的漂移分别为 0.049、0.057、0.053 nm。此外, 从输出光谱还可以看出, 在三个多小时的测试时间内输出光的中

心波长随着注入电流的增大出现波长红移现象,波长总漂移量为0.11 nm。光栅外腔半导体激光器的波长漂移与自由运行状态下半导体激光器输出光谱类似,都是随着注入电流的增大而出现红移,不同的是光栅外腔半导体激光器的波长漂移量要小得多,并且得到了窄线宽光谱输出,这表明光栅外腔与半导体激光器耦合效果良好,能够较好地实现模式锁定,波长的微小漂移除了受半导体激光器的增益特性影响,还与半导体激光器温度控制器的稳定度有关。

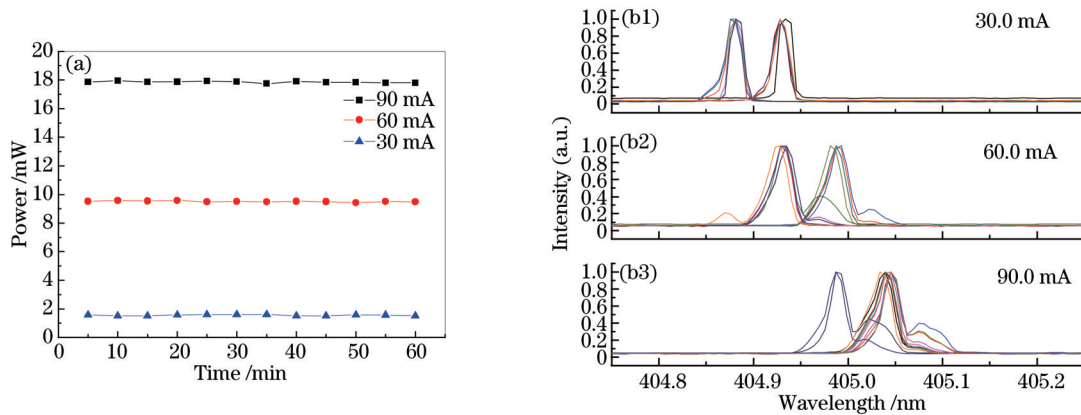


图4 (a) 光栅外腔半导体激光器功率; (b1)~(b3)光谱输出稳定性测量

Fig.4 (a) Measurement of power of the grating external cavity diode laser; (b1)~(b3) stabilities of emission spectra

最后对光栅外腔半导体激光器进行了波长调谐测试。通过手动调节光栅固定装置的顶丝旋钮改变反射式全息光栅的角度,实现了激光的可调谐输出。图5给出了光栅外腔半导体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35 mA时输出光谱的调谐结果。调谐结果显示,在注入电流为35 mA时,波长调谐范围最大为3.5 nm;在注入电流为25 mA时,波长调谐范围最小为1.98 nm。此外,在波长调谐的过程中发现,随着注入电流的升高,在长波长方向比短波长方向更容易获得窄线宽输出,而且在电流超过45 mA之后,还出现中心波长的多纵模输出,但强度相对较小。这是由于增大注入电流,增益中心出现红移,而且在电流较高时,调谐边缘的激光输出不能完全抑制中心波长输出。波长可调谐范围的变化也是对半导体激光器增益特性的反映,其中在25 mA时波长调谐范为最小。这是由于该电流在阈值电流附近,半导体激光器的增益谱线宽度相对较窄,所以调谐范围相应地要小。调谐范围在不同工作电流下有差异是因为不同的注入电流条件下半导体激光器的增益带宽存在差异,这与图2中给出的自由运行时半导体激光器的谱线输出相对应。实验中,激光在进入单色仪之前由衰减片进行强度衰减,由于衰减片衰减系数调节的差异,使得基底在总强度中占的比例出现差异。

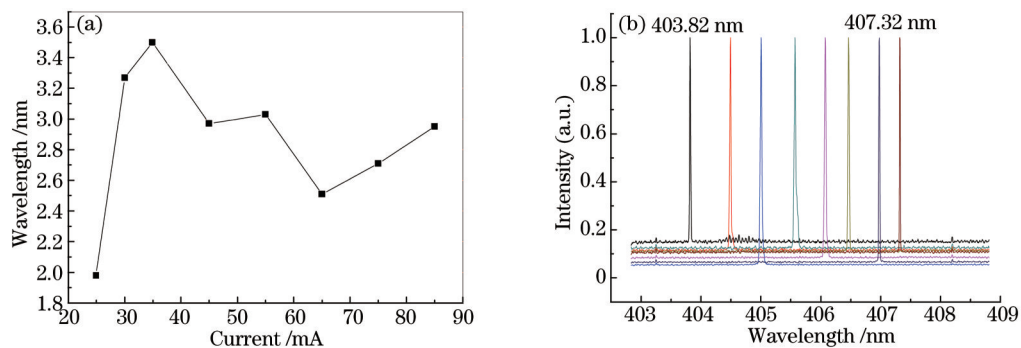


图5 (a) 波长调谐范围随注入电流的变化关系 (b) 归一化的光栅外腔半导体激光器输出光谱

Fig.5 (a) Relationship between wavelength tuning range and current (b) normalized emission spectra of the grating external cavity diode laser

图6给出的是光栅外腔半导体激光器不同激射波长对应的阈值电流。图中结果表明,激射波长在405.07 nm时的阈值电流最小为22 mA,最小激射波长为403.59 nm,最大激射波长为407.87 nm。在整个可以激射的波长范围内,存在一个最小的阈值电流,而且越到激射波长的边缘,激射的阈值电流越大。这一变化规律与半导体激光器增益谱线的大致呈相反趋势。这可以通过图2中自由运行的半导体激光器30.0 mA

输出光谱来解释,由于半导体激光器在边缘波长附近的增益较低,因此要想实现光栅外腔半导体激光器在边缘波长输出激光就需要提高注入电流,这就是在边缘波长的阈值注入电流高于中心波长处阈值注入电流的原因。

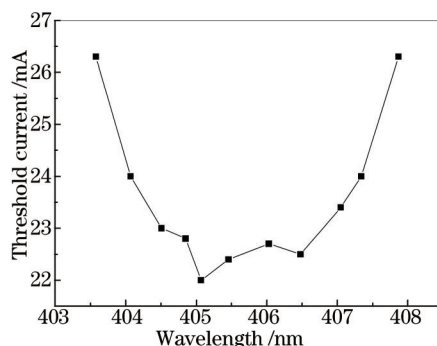


图6 光栅外腔半导体激光器阈值电流随激光波长的变化

Fig.6 Change of threshold current of the grating external cavity diode laser with lasing wavelength

4 结 论

设计了 Littrow 布局的 405 nm 波段光栅外腔半导体激光器,该光栅外腔半导体激光器结构简易,方便调整。通过对激光器多项参数的测试发现,光栅外腔较好地改善了半导体激光器的光谱输出特性,实现了 405 nm 波段半导体激光器的线宽压缩和波长调谐。实验中使用反射式全息光栅作为光反馈元件,使半导体激光器的阈值电流从 31 mA 降低到 22 mA,而且在较大的注入电流范围内得到了窄线宽输出,纵模线宽控制在 0.03 nm 以内。通过调节反射光栅的角度,得到的波长调谐范围为 3.5 nm。在注入电流为 100 mA 时得到的输出功率为 28.05 W,功率稳定度在测试时间内达到 0.5%。

参 考 文 献

- 1 Yao Zhenyu, Lü Xueqin, Zhang Baoping. Research progresses of GaN-Based grating external cavity semiconductor lasers[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2013, 50(10): 609–614, 622.
姚真瑜, 吕雪芹, 张宝平. GaN 基光栅外腔半导体激光器研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2013, 50(10): 609–614, 622.
- 2 Melanson J E, C A Lucy. Violet (405 nm) diode laser for laser induced fluorescence detection in capillary electrophoresis[J]. *The Analyst*, 125(6): 1049–1052.
- 3 Park J, S Kim. A simple and compact blue diode laser powered excitation source for fluorescence detection in capillary electrochromatographic microchip separation[J]. *Microchem J*, 2011, 99(1): 103–107.
- 4 Wang Zhuo, Min Kunlong, Bai Xuebing, *et al.*. Temperature control of semiconductor laser in gas sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(6): 43–46.
王 琢, 闵坤龙, 白雪冰, 等. 气体传感器中半导体激光器的温度控制[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(6): 43–46.
- 5 Jiang Pengfei, Zhao Weirui, Zhang Jingjuan, *et al.*. A narrow line width external-cavity semiconductor laser[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 160–161.
江鹏飞, 赵伟瑞, 张静娟, 等. 窄线宽的外腔半导体激光器[J]. *激光技术*, 2004, 28(2): 160–161.
- 6 Kazharsky O, Parkhomov S, Grachev A, *et al.*. Broad continuous frequency tuning of a diode laser with an external cavity[J]. *Opt Commun*, 1997, 137(1): 77–82.
- 7 Sandra S, Lars H, Joachim S, *et al.*. Compact tunable diode laser with diffraction limited 1 Watt for atom cooling and trapping[C]. *SPIE*, 2004, 5336: 17–25.
- 8 R Claps, J Sabbagzadeh, M Fink. Raman spectroscopy with a single-frequency, high-power, broad-area laser diode [J]. *Appl Spectrosc*, 1999, 53(5): 491–496.
- 9 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.
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.

- 10 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.
- 11 Chen Shaowei, Lü Xueqin, Zhang Jiangyong, *et al.*. Blue-violet broadly tunable grating-coupled external cavity semiconductor laser[J]. Laser & Optoelectronics 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.
- 12 Lü Xueqin, Chen Shaowei, Zhang Jiangyong, *et al.*. Tuning properties of external cavity violet semiconductor laser[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(7): 07204.
- 13 L Ricci, M Weidemüller, A Hemmerich, *et al.*. A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics[J]. Opt Commun, 1995, 117(5): 541-549.
- 14 A S Arnold, J S Wilson, M G Boshier. A simple extended-cavity diode laser[J]. Rev Scient Instrum, 1998, 79(3): 1236-1239.

栏目编辑: 张 雁