

体布拉格光栅反射率对外腔半导体激光阵列 输出光谱的影响

王 浩 袁 孝 张 翔 吴 尚

(苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 采用记录在光致热敏折射率玻璃中的反射型体布拉格光栅作为反馈元件构成外腔半导体激光阵列,对其输出光谱特性进行了实验研究,分析了快轴准直透镜的位置对外腔反馈耦合效率的影响。实验结果表明,在体布拉格光栅外腔反馈作用下,半导体激光阵列输出光谱中心波长得到锁定,同时输出线宽显著变窄。重点研究了体布拉格光栅的反射率对外腔反馈半导体激光阵列输出光谱特性以及激光器效率的影响。实验结果表明,体布拉格光栅反射率的增加可提高半导体激光阵列内腔模式的抑制效果,提高输出光谱对比度,减小输出光谱线宽。使用反射率为 30% 的体布拉格光栅,可将半导体激光阵列的输出波长锁定在 808 nm 附近,输出光谱线宽压缩至 0.18 nm。外腔半导体激光器的输出功率达 24.8 W,效率为 82.6%。

关键词 光栅;半导体激光阵列;波长稳定;体布拉格光栅;外腔激光器;线宽窄化

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0602004

Influence of Volume Bragg Grating Reflectivity on Spectrum of External Cavity Laser Diode Array

Wang Hao Yuan Xiao Zhang Xiang Wu Shang

(Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract The external cavity laser diode array (LDA) with volume Bragg grating (VBG) recorded in photo-thermo-refractive (PTR) glass as wavelength selected element is studied experimentally. The influence of fast-axis-collimation on coupling efficiency is studied. Experimental results indicate that the wavelength of the LDA is locked and the line-width is narrowed sharply under the effect of VBG external cavity. The influence of VBG reflectivity on spectral characteristics and efficiency of external cavity LDA is studied mainly. Experimental results show that the increase of VBG reflectivity can inhibit the intra-cavity mode effective and enhance the contrast of spectrum and narrow the line-width. Using the VBG with a reflectivity of 30%, an output power of 24.8 W is obtained with the linewidth down to 0.18 nm, which corresponds to the efficiency of 82.6% compared with the output power in free-running LDA.

Key words gratings; laser diode array; wavelength stabilization; volume Bragg grating; external cavity laser; line-width narrowing

OCIS codes 140.3290; 140.3295; 140.3425

1 引 言

半导体激光阵列(LDA)以其体积小、功率高、

成本低等优点广泛应用于光谱分析、军事、航空、通信等领域^[1~5]。然而,高功率 LDA 输出光谱线宽较

收稿日期: 2011-12-05; **收到修改稿日期**: 2012-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(91023009)、国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金(11176021,10876011,11076021)、江苏省高校自然科学基金(10KJA140045)和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 王 浩(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光与光子技术等方面的研究。

E-mail: ddosunking@163.com

导师简介: 袁 孝(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事先进激光技术与功能光学器件等方面的研究。

E-mail: xyuan@suda.edu.cn(通信联系人)

宽(3~5 nm),中心波长易受温度、电流的影响。这些缺点严重制约了其实际应用的范围。目前改善 LDA 的输出光谱特性的方法主要有注入锁定和外腔反馈两种。注入锁定方法复杂,且需要精密的控制^[6]。外腔反馈采用光纤光栅或闪耀光栅作为反馈元件。但是光纤光栅只能针对小功率的 LDA^[7,8];闪耀光栅外腔半导体激光器的效率低,最高效率仅 65%左右,且光栅表面容易发生热变形而导致效率进一步降低^[9]。近年来,反射型体布拉格光栅(VBG)被用于大功率 LDA 的波长稳定和光谱窄化,取得了突出的效果^[10,11]。记录在光致热敏折射率(PTR)玻璃中的 VBG 作为一种新型体衍射元件具有热稳定性好、线性传输特性、高分辨率、损伤阈值高等优点,在高功率激光系统中得到广泛应用^[12~14],并成为外腔反馈元件的首选^[15]。Zheng 等^[16]采用双光栅离轴外腔结构将光谱线宽压缩到 0.24 nm,输出功率 20 W,效率 87%,但没有讨论该系统的波长锁定效果。辛国锋等^[17]研究了不同工作电流和热汇温度对 VBG 外腔 LDA 输出光谱的波长稳定以及线宽窄化的影响,但是输出功率较低,也未对外腔激光器的效率作出讨论。

为了研究 VBG 的反射率以及外腔结构对外腔 LDA 输出光谱的影响,采用基于 PTR 玻璃的反射型 VBG 作为外腔反馈元件,分析优化了快轴准直系统,提高了系统的稳定性,实现了大功率 LDA 的

输出波长锁定和线宽窄化。使用三块反射率不同的 VBG 构成外腔,重点实验研究了 VBG 的反射率对外腔 LDA 输出光谱以及激光器效率的影响。计算分析了快轴准直透镜(FAC)的位置以及各元件的精密调节对准直系统的影响。实验结果表明,VBG 反射率的增加可有效抑制 LDA 的内腔模式,提高输出光谱对比度,同时获得更窄的输出光谱线宽,但是效率有所下降。

2 实验装置

VBG 外腔 LDA 的实验装置如图 1 所示。所用 LDA 有 59 个发光单元,发光面反射率为 4%,中心波长为 808 nm。采用半导体制冷(TEC)控温装置控制 LDA 的工作温度。

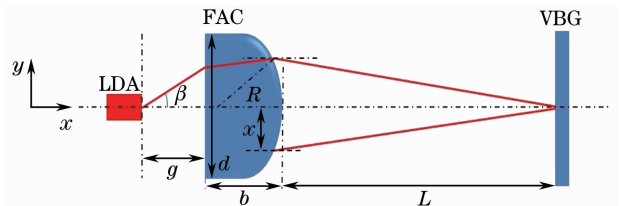


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

所用光谱仪型号为 Avaspec-3648-3-USB2,分辨率优于 0.1 nm。为研究 VBG 反射率对外腔 LDA 输出光谱的影响,实验中选取三块不同反射率的 VBG,均为 OptiGrate 公司产品,详细参数如表 1 所示。

表 1 VBG 参数

Table 1 Parameters of VBGs

	Central wavelength /mm	Length /mm	Width /mm	Thickness /mm	Reflectivity /%
VBG-I	807.9	24.0	6.0	1.4	15
VBG-II	808.0	12.0	1.5	0.75	20
VBG-III	808.0	12.0	1.5	0.92	30

研究发现 FAC 的准直效果对外腔 LDA 的输出光谱具有至关重要的影响。因此对准直系统进行分析与设计。

实验中 FAC 折射率为 1.82,有效焦距为 0.64 mm,尺寸为 1.5 mm×1.5 mm×12.0 mm。如图 1 所示,LDA 发光面距离 FAC 底面为 g ,FAC 曲面顶点距离 VBG 为 L ,LDA 出射光束发散角为 β 。LDA 出射光经体光栅外腔反馈后入射 FAC 曲面,入射点与光轴的距离为 x 。采用光线追迹的方法可以得到 VBG 反射光在 FAC 上的位置^[18]。当 $x < d/2$ 时,反射光束才能进入 LDA。

当 g 分别为 0.64、0.45、0.40、0.35、0.30 mm 时各反射光达到 FAC 时的位置如图 2 所示。当

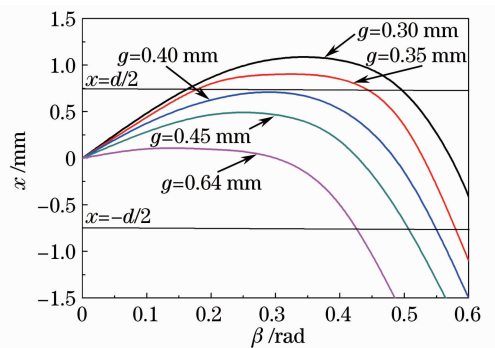


图 2 反射光线落在 FAC 的位置与发散角的关系
Fig. 2 Relationship between the location of reflected beam on FAC and divergence angle

$g = f = 0.64$ mm 时,虽然可以将发散角压缩至最

小,却不能获得最高的反馈耦合效率。当 $g = 0.40$ mm时可以将最多的光线反馈回 LDA,然而此时系统对 FAC 位置失调敏感较大,失调量超过 0.05 mm就会造成反馈光能量的急剧损失。当 $g = 0.45$ mm时,系统的敏感程度较小,也能保证足够的反馈光进入 LDA。实验中该方向上的仪器调节精度小于0.02 mm,低于 0.05 mm 的敏感度。

FAC 底面法线与光轴夹角为 $\pm 0.05^\circ$ 时反射光线的变化情况如图 3 所示,实线与虚线分别对应 $g = 0.45$ mm 及 $g = 0.64$ mm 时的情况。系统对于 FAC 倾角非常敏感,即使 0.05° 的失调便使光线几乎完全不能反馈回 LDA。同时,通过减小 g 可以降低对 FAC 倾角的敏感度。实验中该方向的调节精度小于 0.05° ,控制在 0.05° 的敏感度以内。

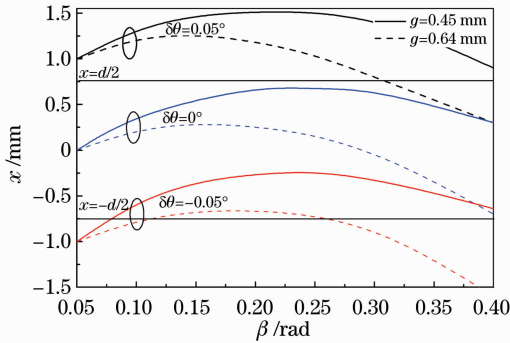


图 3 反射光线落在 FAC 的位置与 FAC 倾角的关系
Fig. 3 Relationship between the location of reflected beam on FAC and the tilt angle of FAC

当 VBG 光栅矢量与光轴夹角为 $\pm 0.5^\circ$ 时对体光栅衍射光的影响如图 4 所示,实线与虚线分别对应当 $g = 0.45$ mm 及 $g = 0.64$ mm 时的情况。失调量达 0.5° 时便会造成大量的反馈光损失。因此系统对于 VBG 倾角的失调十分敏感,而且调节 FAC 的位置无法减小敏感程度。实验中该方向的调节精度小于 0.05° ,低于 0.5° 的敏感度。

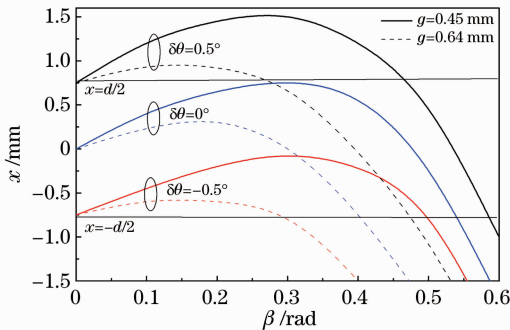


图 4 反射光线落在 FAC 的位置与 VBG 倾斜角的关系
Fig. 4 Relationship between the location of reflected beam on FAC and the tilt angle of VBG

综上所述,当 FAC 底面与 LDA 发光面距离为 0.45 mm时,外腔准直系统将会使尽可能多光线反馈进入 LDA,同时也极大地降低了系统对各个元件的失调敏感度。

3 实验结果

3.1 VBG 反射率对波长锁定的影响

为研究 VBG 反射率对外腔 LDA 输出光谱特性及外腔效率的影响,实验中测量了 VBG-I、VBG-II 和 VBG-III 构成外腔 LDA 后的波长稳定数据。如图 5 所示,LDA 自由运转时温度漂移约为 0.3 nm/ $^\circ\text{C}$ 。加入 VBG 构成外腔 LDA 后,峰值波长被稳定在 VBG 的布拉格波长附近,温漂系数小于 0.01 nm/ $^\circ\text{C}$ 。

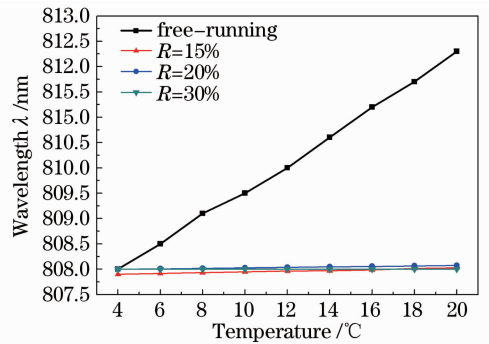


图 5 自由运转 LDA 与 VBG 外腔 LDA 峰值波长随温度变化曲线

Fig. 5 Dependence of central wavelength on temperature for the free running LDA and the VBG external-cavity LDA

实验中发现,在一定的工作条件下,VBG 外腔 LDA 的波长稳定效果十分明显,但是 VBG 并不能在任何条件下都发挥同样的作用。图 6 为三组 VBG 外腔 LDA 与自由运转 LDA 的输出光谱对比。当工作温度升高时,LDA 自由运转波长漂移至 809.5 nm,与 VBG 布拉格波长相差 1.5 nm,峰值波长虽然仍稳定在布拉格波长附近,但光谱中出现对应于 LDA 自由运转波长的峰值。如图 6 所示,同 VBG-III 外腔相比,VBG-I 与 VBG-II 外腔 LDA 的输出光谱在 809.5 nm 附近出现了“边模振荡”,其中 808.0 nm 的峰值对应于 VBG 的布拉格波长,即外腔模式;809.5 nm 的峰值对应于 LDA 自由运转波长,即内腔模式,对比度(外腔模式与内腔模式峰值强度之比)分别为 1.28 与 7.2。当 LDA 自由运转波长偏离 VBG 布拉格波长较远时,内腔模式持续增强,VBG 外腔的波长稳定效果变差。由图 6 可

知,反射率较高的 VBG-III 提供的窄带反馈,足以超过两波长位置之间的增益差,获得较好的波长稳定效果。因此较高反射率的 VBG 外腔 LDA 的输出光谱对比度更高,波长稳定效果更好。

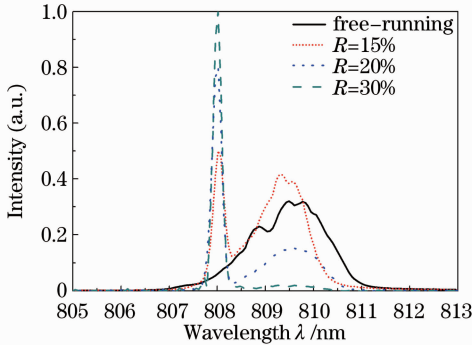


图 6 使用不同反射率的 VBG 所得到的波长稳定效果
Fig. 6 Wavelength stabilization of VBG external cavity LDA with different reflectivities of VBGs

3.2 VBG 反射率对线宽窄化的影响

由于 VBG 外腔结构的波长选择特性,可以选择性地增强 808 nm 附近的模式并抑制其他波长的模式,从而可以有效地压缩 LDA 出射光束的线宽。实验中抽运电流为 40 A,自由运转 LDA 的输出光谱线宽约为 1.9 nm,分别使用三块 VBG 构成外腔 LDA 得到线宽窄化的光谱如图 7 所示, VBG 外腔 LDA 的输出光谱中心波长被锁定在 808 nm,同时得到更窄的线宽。由图 7 可知, VBG 外腔 LDA 输出光谱的线宽随着 VBG 反射率的增加而变窄。

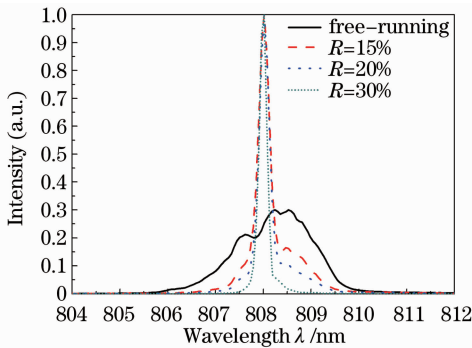


图 7 使用不同反射率的 VBG 外腔得到的线宽窄化效果
Fig. 7 Line-width narrowing of VBG external cavity LDA with different reflectivities of VBGs

提高 VBG 的反射率可以增强外腔系统所选择的 808 nm 的反馈光强度,从而更有效地抑制其他波长模式,获得更窄的输出线宽。表 2 给出了三块 VBG 在实验中所得到的线宽窄化数据,实验中测得的线宽分别为 0.28、0.24、0.18 nm。随着 VBG 反射率的提高,输出线宽被极大压缩。当 VBG 反射率

由 15% 提高到 30%,输出线宽由 0.28 nm 减小到 0.18 nm,线宽压缩比由 6.79 提高到 10.6。由此可见, VBG 反射率的提高不仅可以获得更窄的线宽,而且可以显著提高线宽窄化比,优化线宽窄化效果。

表 2 不同反射率的 VBG 外腔的线宽窄化数据
Table 2 Line-width narrowing of VBG external cavity LDA with different reflectivities of VBGs

	Reflectivity / %	FWHM / nm	Compression ratio
VBG-I	15	0.28	6.79
VBG-II	20	0.24	7.92
VBG-III	30	0.18	10.6

3.3 VBG 外腔 LDA 效率分析

VBG 外腔 LDA 的 $P-I$ 曲线如图 8 所示,随着 VBG 反射率的提高,外腔 LDA 的斜率效率逐渐下降。表 3 给出了不同反射率的 VBG 外腔的输出功率和效率比较(抽运电流为 40 A)。实验结果表明,随着反射率的增高虽然可以在更宽的范围内稳定波长并获得更窄的线宽,但同时会引起外腔 L1 效率的下降。当 VBG 反射率由 15% 提高到 30%,外腔 LDA 的效率由 92.9% 下降到 82.6%。外腔 LDA 效率的降低主要由于系统只对 LDA 的快轴进行了准直,慢轴方向仍然有 $8^\circ \sim 10^\circ$ 的发散角,造成了反馈光的损失。而随着 VBG 反射率的增加,该部分反馈光的损失增大,外腔 LDA 的效率降低。另外 FAC 未进行镀膜优化以及 LDA 本身存在的“Smile”现象,也会造成输出功率的下降。

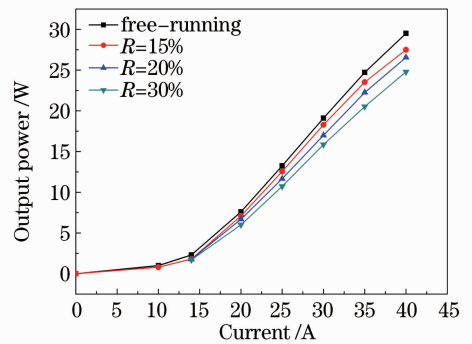


图 8 VBG 外腔 LDA 的 $P-I$ 特性
Fig. 8 $P-I$ characteristics of VBG external cavity LDA

VBG 反射率的大小对于 LDA 的性能有很大影响。实验结果表明,反射率较高的 VBG 有较好的波长稳定和线宽窄化效果。但是过高的反射率将使激光器的输出功率和斜率效率下降。LDA 外部微分子效率可表示为^[14]

$$\eta_d = \eta_{in} \frac{(1 - R_{eff}) \sqrt{R_1}}{(1 - R_{eff}) \sqrt{R_1} + (1 - R_1) \sqrt{R_{eff}}}, \quad (1)$$

式中 η_m 为管芯内量子效率。过高的 VBG 反射率将使式中的分子减小，造成激光器效率的下降。因此

应用中需要在光谱特性和激光器效率之间做最优选择。

表 3 不同反射率时 VBG 外腔的效率

Table 3 Efficiency of VBG external cavity LDA with different reflectivities of VBGs

	Reflectivity / %	Output power / W	Slope efficiency / (W/A)	Losses by VBG / %
VBG-I	15	27.5	1.06	7.1
VBG-II	20	26.6	1.02	9.9
VBG-III	30	24.8	0.95	17.4

4 结 论

用高功率 LDA、VBG 和 FAC 构成 VBG 外腔半导体激光阵列，实现了输出波长的锁定和光谱线宽的窄化。通过计算分析了 FAC 的位置以及各元件的精密调节对准直系统的影响。结果表明，当 FAC 底面距离 LDA 出光面 0.45 mm 时，既可以保证系统的准直效果又可以降低系统对元件位置失调的敏感度。使用三块反射率不同的商业化 VBG 产品，重点研究了 VBG 反射率对外腔反馈 LDA 输出光谱特性及外腔效率的影响。实验结果表明，VBG 反射率的增加可更有效地抑制外腔 LDA 的内腔模式，消除“边模振荡”现象，提高输出光谱对比度，同时获得更优秀的输出光谱线宽，但反射率的增加会导致外腔 LDA 效率的下降。使用反射率为 30% 的商业化 VBG，将 LDA 的输出波长锁定在 808 nm 附近，输出光谱线宽压缩至 0.18 nm。抽运电流为 40 A 时，外腔半导体激光器的输出功率达 24.8 W，效率为 82.6%。

参 考 文 献

- 1 B. Chann, R. K. Huang, L. J. Missaggia. Near-diffraction limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2104~2106
- 2 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581
张强, 姚建铨, 温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 577~581
- 3 Zhou Shouhuan, Jiang Dongsheng, Zhao Hong. Diode pumped high power, frequency doubling Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2): 97~99
周寿桓, 姜东升, 赵鸿. 二极管抽运的高功率、倍频 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(2): 97~99
- 4 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous wave 714 W fiber laser with China made large mode area double clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119~1120
周军, 楼祺洪, 朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- 5 H. Zhu, I. C. Ruset, F. W. Hersman. Spectrally narrowed external-cavity high-power stack of laser diode arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1342~1344
- 6 Y. Liu, H. K. Liu, Y. Braiman. Injection locking of individual lasers in an integrated high-power diode array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(6): 978~980

- 7 Wang Lili, Ren Jianhua, Zhao Tonggang *et al.*. Theoretical and experimental study on a fiber grating external cavity semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(4): 361~363, 394
王丽丽, 任建华, 赵同刚等. 光纤光栅外腔半导体激光器的理论及实验研究 [J]. *激光技术*, 2005, **29**(4): 361~363, 394
- 8 Li Songbai, Deng Tao, Wu Jiagui. Output characteristics of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041402
李松柏, 邓涛, 吴加贵. 光纤光栅外腔半导体激光器的输出特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041402
- 9 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
- 10 Yujin Zheng, Hirofumi Kan. Effective bandwidth reduction for a high-power laser-diode array by an external-cavity technique [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2424~2426
- 11 B. L. Volodin, S. V. Dolgy, E. D. Melnik *et al.*. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1891~1893
- 12 Bai Yangbo, Xiang Wanghua, Zu Peng *et al.*. Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102004
白扬博, 向望华, 祖鹏等. 基于体光栅的可调谐线型腔双波长掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102004
- 13 Yin Suqin, Zhang Bin. Analysis of the output characteristics of high-power fiber lasers after spectral beam combination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 115~121
阴素芹, 张彬. 高功率光纤激光器谱合成系统的输出特性分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 115~121
- 14 Shen Benjian, Zheng Guangwei, Tan Jichun *et al.*. Diffraction characteristic analysis of sinc-apodized reflective volume Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902003
沈本剑, 郑光威, 谭吉春等. Sinc 切趾反射体布拉格光栅衍射特性分析 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902003
- 15 Igor V. Ciapurin, Leonid B. Glebov, Vadim I. Smirnov. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass [C]. *SPIE*, 2005, **5742**: 183~194
- 16 Yujin Zheng, Hirofumi Kan. Effective bandwidth reduction for a high-power laser-diode array by an external-cavity technique [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2424~2426
- 17 Xin Guofeng, Cheng Can, Qu Ronghui *et al.*. Study of spectral characteristics of external-cavity semiconductor laser a volume Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1821~1826
辛国锋, 程灿, 瞿荣辉等. 体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1821~1826
- 18 Yang Hua, Yan Diyong, Chen Haibo *et al.*. Locating collimating lens positioned in an external cavity for phase-locking a diode laser array [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(1): 18~20
杨华, 严地勇, 陈海波等. 半导体激光阵列外腔锁相中准直透镜的位置选择 [J]. *激光杂志*, 2005, **26**(1): 18~20