

基于反射式 Bragg 体光栅的密集光谱合束 数值模拟研究

余俊宏^{1,2} 郭林辉^{1,2} 孟慧成^{1,2,3} 谭昊^{1,2} 高松信^{1,2} 武德勇^{1,2}

¹中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999; ³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 基于反射式布拉格(Bragg)体光栅(VBG)的密集光谱合束是实现半导体激光器光纤耦合向高亮度发展的重要手段,建立了同时考虑发散角、光谱带宽、Bragg 波长偏移量和 Bragg 角度偏移量的反射式 VBG 衍射效率计算模型。基于新建立的计算模型,提出了半导体激光器(DL)光纤耦合模块双波长合束的反射式 VBG 参数优化方法。结果表明:在优化选择的 VBG 参数下,DL 光纤耦合模块双波长合束在满足入射光束(衍射效率大于 90%的发散角 14 mrad,半峰全宽为 0.3 nm)中心波长偏移小于 ± 0.49 nm,入射角度相对于 Bragg 角偏移小于 ± 16 mrad 的条件下,可达到大于 98.7%的合束效率。

关键词 激光光学; 半导体激光器; 反射式 Bragg 体光栅; 光纤耦合; 密集光谱合束

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1115001

Numerical Simulation Study on Dense Spectral Combining Based on Reflection Volume Bragg Grating

Yu Junhong^{1,2} Guo Linhui^{1,2} Meng Huicheng^{1,2,3} Tan Hao^{1,2}
Gao Songxin^{1,2} Wu Deyong^{1,2}

¹Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China

²Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China

³Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088

Abstract Dense spectral combining (DSC) based on reflection volume Bragg grating (VBG) is an important method to improve brightness of fiber-coupled diode laser modular. Accounting for laser divergence, spectral bandwidth, wavelength and angle shifts from ideal Bragg condition, a diffraction efficiency model of reflection VBG is presented. Based on the new numerical model of diffraction efficiency, design principles and technical approach for DSC of two channels by reflection volume Bragg grating are investigated. The results show if wavelength shift is less than ± 0.49 nm and angle shift is less than ± 16 mrad from ideal Bragg condition, the DSC combining efficiencies are over 98.7% when the spectral full width at half-maximum (FWHM) is 0.3 nm, and the divergence angle with over 90% energy is 14 mrad.

Key words laser optics; diode laser; reflection volume Bragg grating; fiber coupling; dense spectral combining

OCIS codes 050.1950; 050.1960; 140.3480

1 引 言

由于半导体激光器(DL)光纤耦合模块具有光电光效率高、高功率、可靠性高等优点,近年来在材料加工、医疗、固体和光纤激光器抽运方面应用需求大

量提升。波长合束是进一步提升 DL 光纤耦合输出亮度和功率的重要手段,为了使波长合束后 DL 光纤耦合模块输出波长匹配光纤激光器吸收带宽(在 975 nm 处 Yb 掺杂吸收峰宽约为 7 nm)^[1],要求波

收稿日期: 2014-05-07; 收到修改稿日期: 2014-06-24

基金项目: 中国工程物理研究院光纤激光器项目(9091004A)

作者简介: 余俊宏(1988—),男,硕士,主要从事二极管激光器光束整形技术方面的研究。tiago22@163.com

长合束器件在密集光谱(入射波长间隔小于3 nm)条件下,实现不同波长的选择性透射和反射。

目前主要有三种手段实现密集光谱合束:截止薄膜滤光片(TTF)、透射式布拉格(Bragg)体光栅(VBG)和反射式 VBG。截止薄膜滤光片由于截止深度和截止宽度的要求,对厚度和材料折射率的要求误差精度小于 0.01%^[2],工艺复杂且制作成本昂贵;透射式 VBG 由于材料吸收产生热效应引起衍射效率降低,在多波长合束情况下合束效率较低;反射式 VBG 可以制成复合式 VBG(MVBG),能在多波长合束时实现单波长透射,同时其余波长全部反射,有效抑制了材料吸收引起的热效应,节省了光学系统空间,是实现密集光谱合束的最优选择。

以往基于反射式 VBG 波长合束的数值模拟文献中,均只考虑了光束发散角和光谱宽度之一对衍射效率的影响^[3-4],或对光束发散角和光谱宽度对衍射效率的影响分开讨论^[5],本文将建立新的衍射效率计算模型,同时考虑激光光束的发散角、光谱带宽、Bragg 波长偏移量和角度偏移量对 Bragg 入射波长下的峰值衍射效率的影响,并基于 DL 光纤耦合密集光谱合束的应用背景,提出了双波长合束的 VBG 参数优化方法。

2 反射式 Bragg 体光栅模型

采用反射式 VBG 进行密集光谱合束时,主要有四个因素减小 Bragg 入射波长下的峰值衍射效率:激光光束的发散角、光谱带宽、Bragg 波长偏移量和 Bragg 角度偏移量。计算反射式 VBG 的最大容忍 Bragg 波长偏移量和角度偏移量、最小化发散角和光谱宽度对衍射效率的影响,是设计高效率反射式 VBG 合束的关键。

理想状态下(不考虑入射光束的光谱宽度和发散角),Bragg 波长偏移量为 $\Delta\lambda$ 、Bragg 角度偏移量为 $\Delta\theta$ 情况下,反射式 VBG 的衍射效率可由 Kogelnik 耦合波理论^[6]描述:

$$\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta) = \left[1 + \frac{1 - (\xi/\varphi)^2}{\sinh^2 \sqrt{\varphi^2 - \xi^2}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中 $\xi = \frac{2\pi dn_{av}}{f} \left[\Delta\theta \sqrt{1 - \left(\frac{f\lambda_0}{2n_{av}} \right)^2} + \frac{f\Delta\lambda}{2n_{av}} \right]$, 为失相参数, $\varphi = \frac{2\pi dn_{av} \Delta n}{\lambda_0^2 f}$, 为附加相位, n_{av} 为 VBG 的平均折射率, f 为空间频率, d 为 VBG 厚度, Δn 为折射率调制量。在考虑激光光束发散角和光谱宽度的情况下,反射式 VBG 的衍射效率可由(2)式计算:

$$\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b) = \frac{\int \eta(\Delta\lambda, \Delta\theta + b) \times G(\Delta\theta, b) db}{\int G(\Delta\theta, b) d\theta}, \quad \eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b, \omega) = \frac{\int \eta(\Delta\lambda + \omega, \Delta\theta, b) \times G(\Delta\lambda, \omega) d\omega}{\int G(\Delta\lambda, \omega) d\lambda}, \quad (2)$$

式中 b 为激光光束的发散角、 ω 为光谱宽度、 $G(\Delta\theta, b)$ 为 Bragg 角度偏移为 $\Delta\theta$ 和光束发散角为 b 时的高斯光束强度、 $G(\Delta\lambda, \omega)$ 为 Bragg 波长偏移为 $\Delta\lambda$ 和光谱宽度为 ω 时的高斯光束强度。 $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b, \omega)$ 的数值计算过

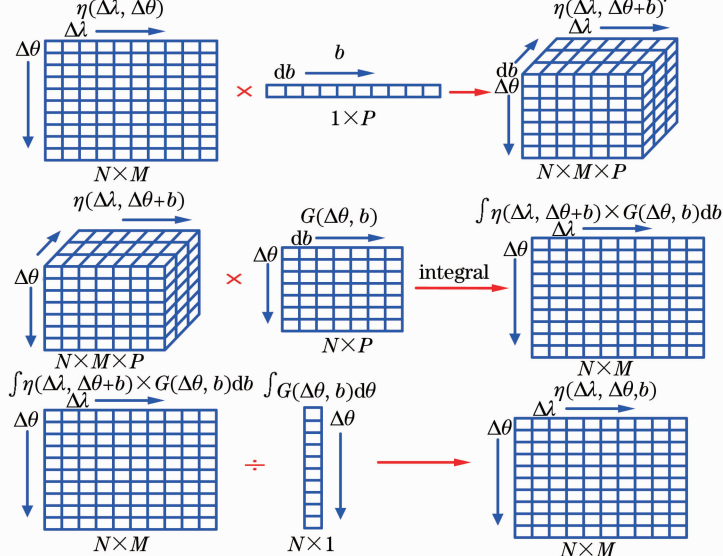


图 1 考虑发散角的数值解法

Fig. 1 Numerical convolution in angle space

程如图 1 所示,其计算思路如下:根据(1)式先计算出令人感兴趣的 Bragg 波长偏移和角度偏移范围内的衍射效率 $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta)$,同时将发散角 b 分配为均匀分布的 p 个积分点;接着计算不同发散角积分点下每一个 Bragg 波长和角度偏移量的衍射效率 $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta+b)$,同时求出光束发散角为 b 时,不同 Bragg 波长和角度偏移量下的高斯强度分布;最后对光束发散角为 b 时,不同 Bragg 波长和角度偏移量下的高斯强度分布进行归一化处理,求得 $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b)$ 。对于光谱宽度 ω ,利用求得的 $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b)$ 重复上面的步骤即可求得四个因素影响下的 Bragg 峰值衍射效率 $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b, \omega)$ 。

图 2 为采用新建立的 VBG 衍射效率模型计算的激光光束的发散角、光谱带宽、Bragg 波长偏移量

和角度偏移量对 Bragg 入射波长下的峰值衍射效率的影响,采用的 VBG 厚度为 2 mm、空间频率为 2000 mm^{-1} 、折射率调制量为 3×10^{-4} 。图 2(a) 为不同 Bragg 波长偏移量和角度偏移量的衍射效率等高线投影图;图 2(b) 代表当发散角为 0.2 mrad 时,不同 Bragg 波长偏移量和角度偏移量的衍射效率等高线投影图;图 2(c) 代表当光谱宽度为 0.1 nm 时,不同 Bragg 波长偏移量和角度偏移量的衍射效率等高线投影图;图 2(d) 代表当光谱宽度为 0.1 nm 和发散角为 0.2 mrad 时,不同 Bragg 波长偏移量和角度偏移量的衍射效率等高线投影图。从图中可以看出入射光束的发散角和光谱宽度会引起 VBG 的角度和波长容忍能力下降,同时降低峰值衍射效率。

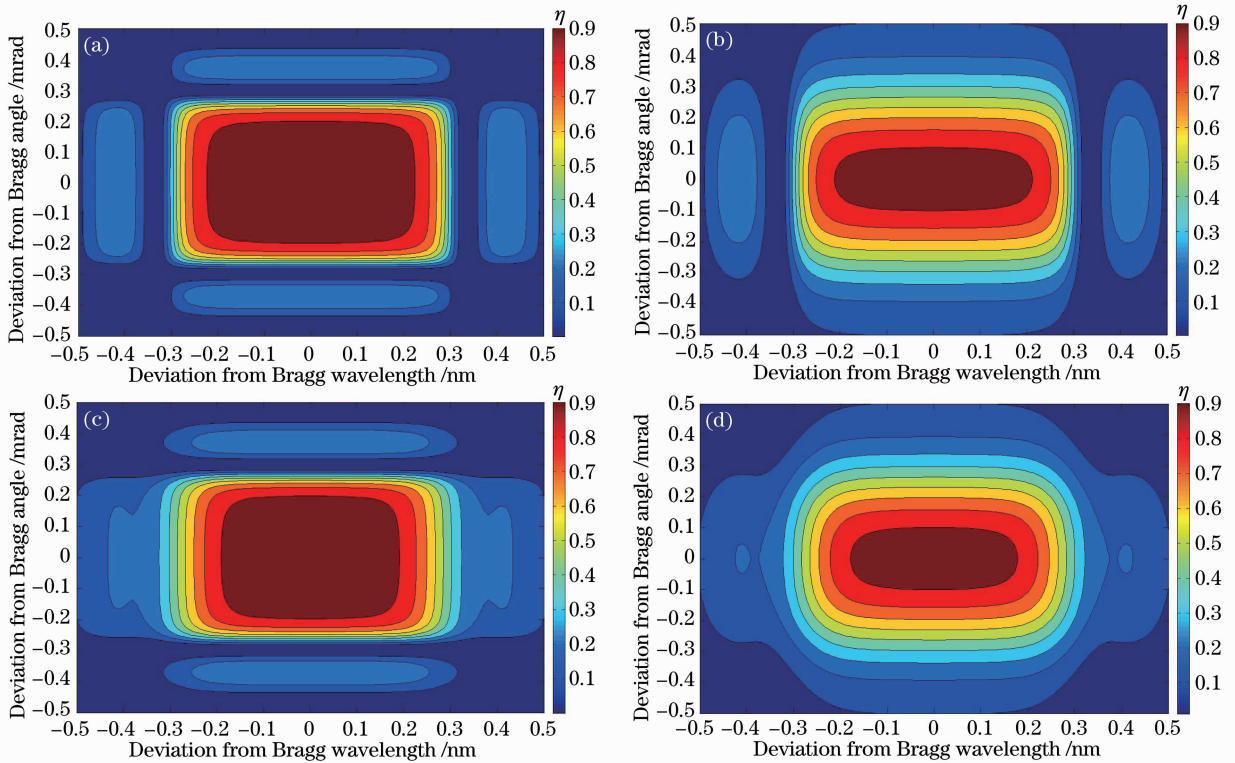


图 2 四个变量下的衍射效率模型。(a) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta)$; (b) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b)$; (c) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, \omega)$; (d) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b, \omega)$

Fig. 2 Modeling of VBG diffraction efficiency versus four parameters. (a) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta)$; (b) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b)$; (c) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, \omega)$; (d) $\eta(\Delta\lambda, \Delta\theta, b, \omega)$

3 密集光谱合束的反射式 Bragg 体光栅参数优化

结合本文的实际应用背景,设计高效率密集光谱合束的反射式 VBG 关键在于实现有限发散角(能量大于 90% 的发散角为 14 mrad)和光谱宽度(半峰全宽为 0.3 nm)条件下,入射光束在 Bragg 波长 $\lambda_B = 973 \text{ nm}$ 达到尽可能高的衍射效率,同时透射

光束在 $\lambda_T = 975 \text{ nm}$ 处达到尽可能高的透射效率(即衍射效率要尽可能的小),其合束原理如图 3 所示。在两束光束入射功率相等的情况下,运用新建立的 VBG 衍射效率模型,可以将问题简化:在有限发散角和光谱宽度情况下,选择合适的 VBG 参数(厚度 d , 空间频率 f , 折射率调制量 Δn),使得 973 nm 的入射光束衍射效率无限接近 1,同时满足在 $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$ 处衍射效率足够小。

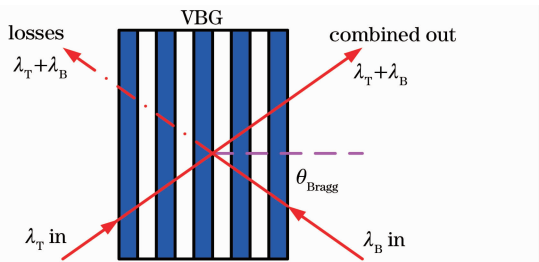


图3 密集光谱合束的反射式 VBG 模型

Fig. 3 Dense spectral combining using reflecting VBG

由(2)式可知,在新建立的衍射效率模型中获得衍射效率足够大和足够小情况下,VBG 各参数的数值解将会非常困难;为了简化运算量和增加运算的可行性,先利用(1)式计算出不考虑发散角和光谱宽度情况下的 VBG 参数选择,再运用新建立的衍射效率模型对 VBG 参数选择进行修正,最后实现高效率密集光谱合束的反射式 VBG 的参数优化。由于反射式 VBG 材料吸收引起的热效应会造成衍射效率的下降,为了弱化热效应的影响,VBG 厚度应小于 10 mm^[7],本文取 VBG 的厚度为 4 mm。理想状态下,当入射光束 λ_B 完全满足 Bragg 条件(即不存在波长和角度偏移),衍射效率(1)式可简化为

$$\eta = \tanh^2 \left(\frac{2\pi d n_{av} \Delta n}{\lambda_B^2 f} \right). \quad (3)$$

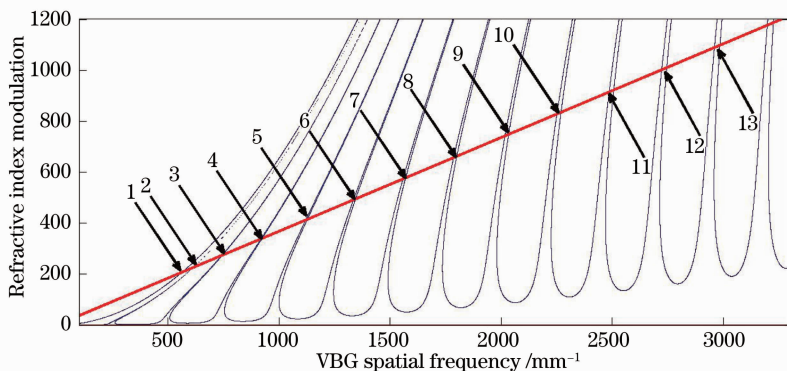


图4 理想状态下 VBG 参数选择

Fig. 4 Choice of VBG parameters in ideal state

该 VBG 参数条件下,完全满足 Bragg 条件(即不存在波长和角度偏移)时,973 nm 入射光束(FWHM 为 0.3 nm,发散角为 14 mrad)的衍射效率随着光谱 FWHM 和发散角的变化如图 5 所示。从图 5 中可以看出该 VBG 参数下,只要满足光谱 FWHM 小于 0.57 nm,同时发散角小于 21 mrad 就能保持衍射效率大于 96.5%,符合 DL 光纤耦合密集光谱合束的光束入射条件(发散角为 14 mrad,

令 $\eta = 1 - \epsilon$ (其中 ϵ 为极小量),由(3)式可得关于空间频率 f 和折射率调制量 Δn 的函数表达式:

$$F(f, \Delta n) = \frac{\operatorname{artanh} \sqrt{1 - \epsilon} \lambda_B^2 f - \Delta n}{2\pi d n_{av}} = 0. \quad (4)$$

同时要满足在 $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$ 处衍射效率足够小,由(1)式可得:

$$F(f, \Delta n) = \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \sinh^2 \left\{ \left[\left(\frac{2\pi n_{av} d \Delta n}{\lambda_B^2 f} \right)^2 - \left(\frac{\pi f d \Delta \lambda}{\lambda_B} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} + \left(\frac{\lambda_B f^2 \Delta \lambda}{2 n_{av} \Delta n} \right)^2 - 1 = 0. \quad (5)$$

根据(4)式和(5)式,空间频率 f 关于折射率调制量 Δn 的变化曲线如图 4 所示。图中交点代表理想情况下,入射光束 λ_B(973 nm) 衍射效率接近 100%,同时入射光束 λ_T(975 nm) 衍射效率几乎为 0 情况下的空间频率 f 和折射率调制量 Δn 的取值。根据目前反射式 VBG 空间频率、折射率调制量所能做到的范围,将图 4 中交点处的值代入(2)式中进行优化,最后在图 4 的点 13 附近得出有限发散角为 14 mrad 和光谱半峰全宽(FWHM)为 0.3 nm 条件下,973 nm 和 975 nm 入射光束光谱合束的反射式 VBG 优化参数选择:厚度 d 为 4 mm、空间频率 f 为 3062 mm⁻¹、折射率调制量 Δn 为 1.023×10^{-3} 。

FWHM 为 0.3 nm)。图 6 计算了 973 nm 和 975 nm 光束合束时(FWHM 为 0.3 nm,发散角为 14 mrad),采用优化的 VBG 参数,合束效率随着 Bragg 波长偏移量和角度偏移量的变化趋势。只要满足入射光束中心波长偏移小于 ±0.49 nm,衍射效率入射角度相对于 Bragg 角偏移小于 ±16 mrad,可达到大于 98.7% 的理论合束效率。

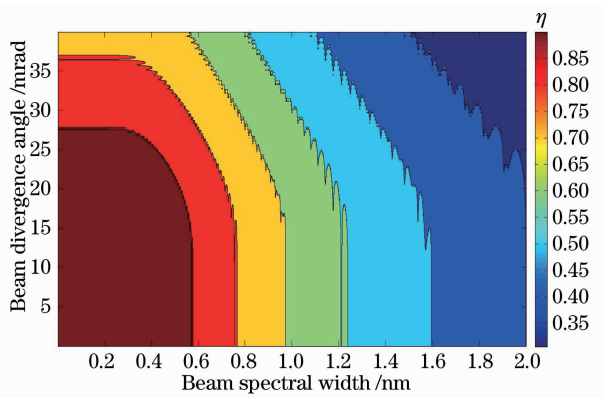


图 5 不同光谱宽度和发散角下的衍射效率

Fig. 5 Diffraction efficiencies with different spectral widths and beam divergence angles

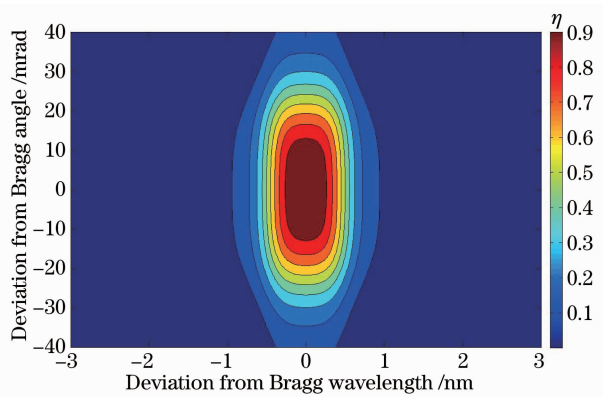


图 6 Bragg 波长和角度偏移对合束效率的影响

Fig. 6 Combined efficiency versus deviations from Bragg wavelength and angle

4 结 论

建立了同时考虑发散角、光谱带宽、Bragg 波长偏移量和 Bragg 角度偏移量的反射式 VBG 衍射效率计算模型。基于 DL 光纤耦合密集光谱合束的应用背景,在已知发散角和光谱宽度的条件下提出了一种实现高合束效率的 VBG 参数优化选择方法。采用该方法进行 VBG 参数优化,可实现 DL 光纤

耦合双波长合束效率超过 98.7%,为 DL 光纤耦合的双波长和多波长密集光谱合束提供了理论依据,研究结果表明在有限的光谱宽度和较大发散角下,采用反射式 VBG 实现高效率多波长的密集光谱合束是可行的。

参 考 文 献

- 1 Song Rui, Hou Jing, Wang Yanbin, *et al.*. Ytterbium-doped fiber laser passively mode-locked by a semiconductor saturable absorber mirror in linear cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102007.
宋 锐,侯 静,王彦斌,等. 线形腔半导体可饱和吸收镜被动锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102007.
- 2 Yu Xiujian, Zhang Min, Wang Liwei, *et al.*. Characteristics of long-period optical fiber grating with high refractive index nm-thick film overlay[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2665–2672.
于秀娟,张 敏,王利威,等. 镀高折射率纳米膜的长周期光纤光栅特性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2665–2672.
- 3 Pu Shibing, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Numerical analysis of spectral beam combining by volume Bragg grating[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 721–724.
蒲世兵,姜宗福,许晓军. 基于体布拉格光栅的光谱合成的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 721–724.
- 4 Yi Yingyan, Li Min, Hu Changkai. Simulation study on spectrum beam combining based on reflection volume Bragg grating[C]. SPIE, 2012, 8333: 83330D.
- 5 Derrek R Drachenberg, Oleksiy Andrusyak, George Venus, *et al.*. Ultimate efficiency of spectral beam combining by volume Bragg gratings[J]. Appl Opt, 2013, 52(30): 7233–7242.
- 6 H Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. Bell Syst Technol J, 1969, 48(9): 2909–2945.
- 7 Zhou Minchao, Jiang Xianfeng, Zhang Lifang, *et al.*. Optical performance of high power laser diode stack[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202004.
周旻超,江先锋,张丽芳,等. 大功率半导体激光器叠阵的光学性能[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202004.
- 8 Zhang Jun, Shan Xiaonan, Liu Yun, *et al.*. Kilowatt-output high beam quality diode laser linear array coupling source[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202010.
张 俊,单肖楠,刘 云,等. 千瓦级光束质量半导体激光光线阵合束光源[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202010.
- 9 Zhang Jun, Peng Hangyu, Liu Yun, *et al.*. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402011.
张 俊,彭航宇,刘 云,等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402011.

栏目编辑: 王晓琪