

横向啁啾体布拉格光栅外腔二极管激光器 光谱特性研究

王军阵¹ 汪岳峰¹ 于新峰² 任永学³ 白慧君¹ 雷呈强¹

¹军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

²中国卫星海上测控部飞行器海上测量与控制联合实验室, 江苏 江阴 214431

³中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051

摘要 采用光束传输法分析了横向啁啾体布拉格光栅的衍射特性, 实验研究了横向啁啾体布拉格光栅外腔二极管激光器的功率特性、光谱特性和波长调谐特性, 数值计算和实验结果表明: 横向啁啾体布拉格光栅的峰值衍射效率随着入射光束在啁啾方向上尺寸的增大而降低, 光谱选择宽度随着入射光束在啁啾方向上尺寸的增大而增大; 当横向啁啾体布拉格光栅的啁啾方向与二极管激光器的快轴方向一致时, 外腔二极管激光器的外腔效率为85%, 在808.05 nm处的输出激光光谱宽度为0.27 nm; 当横向啁啾体布拉格光栅的啁啾方向与二极管激光器的慢轴方向一致时, 外腔二极管激光器的外腔效率为89%, 在808.05 nm处的输出激光光谱宽度为0.3 nm, 两种外腔激光器都较好地实现了约15 nm波长调谐范围, 且在整个调谐范围内输出功率波动范围分别小于1%(快轴方向一致)与1.5%(慢轴方向一致)。

关键词 光栅; 横向啁啾体布拉格光栅; 衍射特性; 外腔二极管激光器; 波长连续调谐

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0515002

Study of Spectral Characteristics of External Cavity Diode Laser Using Transversely Chirped Volume Bragg Grating

Wang Junzhen¹ Wang Yuefeng¹ Yu Xinfeng² Ren Yongxue³ Bai Huijun¹
Lei Chengqiang¹

¹Electrics and Optics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

²Joint Laboratory of Ocean-based Flight Vehicle Measurement and Control, China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China

³The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China

Abstract The diffraction characteristics of transversely chirped volume Bragg grating are analyzed using beam propagation method. The power, spectral and wavelength tuning characteristics of external cavity diode laser analyzed by laser using transversely chirped volume Bragg grating are demonstrated. The theoretical and experimental results indicate that the peak diffraction efficiency of transversely chirped volume Bragg grating decreases with increasing the size of the incident beam in chirped direction, the spectral width increases with increasing the size of the incident beam in chirped direction. When the chirped direction of the transversely chirped volume Bragg grating is consistent with the fast axis direction of diode laser, external cavity efficiency of external cavity diode laser is 85%, the spectral width of the output laser at 808.05 nm is 0.27 nm. When the chirped direction of the transversely chirped volume Bragg grating is consistent with the slow axis direction of diode laser, external cavity efficiency of external cavity diode laser is 89%, the spectral width of the output laser at 808.05 nm is 0.3 nm. Both of the external cavity diode lasers have a better way to achieve about 15 nm

收稿日期: 2014-11-17; 收到修改稿日期: 2014-12-22

作者简介: 王军阵(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事二极管激光技术方面的研究。E-mail: qwjzh@126.com

导师简介: 汪岳峰(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: yfwang_OEC@163.com

wavelength tunable range, and within the entire tuning range, the fluctuation range of output power are less than 1% (consistent with the fast axis direction) and 1.5% (consistent with the slow axis direction) respectively.

Key words gratings; transversely volume Bragg gratings; diffraction characteristics; external cavity diode laser; continuous wavelength tuning

OCIS codes 050.1590; 050.1950; 050.7330; 140.2020

1 引 言

自从美国佛罗里达中央大学 Efimov 等^[1]采用其发明的一种光热折变玻璃(PTR)制作了热稳定性好、损伤阈值高的体布拉格光栅(VBG)以来,体布拉格光栅作为波长选择元件,与传统的平面光栅相比,以其具有线性传输特性、分辨率高、损耗低、热稳定性好和损伤阈值高等诸多优点在二极管激光器和光纤激光器等高功率激光系统领域的应用得到了快速发展^[2-13]。Volodin 等^[14]提出了采用 VBG 外腔高功率二极管激光器实现二极管激光器的波长稳定及光谱压窄,并将光谱线宽压窄到了 0.2~0.4 nm。Kim 等^[15]等通过改变 VBG 的角度,在 Er/Yb 共掺光纤激光器中,成功地实现了输出激光从 1550 nm 到 1528 nm 的波长调谐。尽管调节入射光与 VBG 的角度可以实现对不同中心波长的衍射,但改变入射光的方向会影响 VBG 的衍射效率,进而影响可调谐范围和调谐范围内输出功率的稳定性等系统性能^[16]。一种新型的体布拉格光栅——横向啁啾体布拉格光栅(TCVBG)成功地应用于二极管激光器、固体激光器和光纤激光器的波长调谐等领域^[17-20]。与 VBG 相比,TCVBG 的折射率调制周期沿光栅的横向啁啾方向呈线性变化,这种折射率周期变化使得在光栅的不同横向位置上满足布拉格条件的中心波长也呈线性变化,可以通过简单的横向移动 TCVBG 实现对不同中心波长的衍射,而且,可以根据需要调整 TCVBG 的横向尺寸、折射率调制幅值和折射率调制周期等参数,得到不同波长范围、不同衍射效率和不同光谱选择宽度的衍射特性,这些优良特性,使得 TCVBG 在波长调谐的激光器等领域有着广阔的应用前景。

本文采用光束传输方法,分析了 TCVBG 的衍射特性,研究了入射光光束横向尺寸的变化对 TCVBG 的峰值衍射效率及光谱选择宽度的影响,并分析了 TCVBG 的啁啾特性;实验研究了 TCVBG 的啁啾方向分别与二极管激光器的快、慢轴方向一致时,输出激光的功率特性、光谱特性和波长调谐特性;通过理论分析与实验研究得到了一些区别于常规 VBG 的特有性质和实验结论,可为 TCVBG 更好地应用于实际提供理论及实验指导。

2 理论分析

TCVBG 的折射率分布示意图如图 1 所示,在图 1 中,TCVBG 的折射率调制周期 Λ 沿图示 x 方向呈线性变化,设 n_0 为 TCVBG 的背景折射率, θ 为对应的布拉格角,根据布拉格条件: $\lambda = 2n_0\Lambda \cos \theta$ 可知,布拉格波长 λ 沿 x 方向也呈线性变化,TCVBG 的周期可表示为 $\Lambda(x)$, $f(x)$ 为光栅的空间频率 [$f(x) = 1/\Lambda(x)$], 设光栅的厚度为 t , 光栅的折射率沿表面法线 z 方向的分布可表示为

$$n = n_0 + \Delta n \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{z} + \varphi), \quad (1)$$

式中 Δn 为折射率调制的振幅; \mathbf{k} 为光栅矢量,方向垂直于 TCVBG 的 $z=0$ 表平面,其大小为 $2\pi/\Lambda(x)$; φ 为余弦函数的相位。

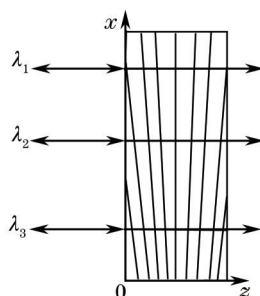


图 1 TCVBG 的衍射示意图

Fig.1 Diffraction scheme of transversely chirped volume Bragg grating

波长为 λ 的光束在 TCVBG 中的标量波动方程可以描述为^[21]

$$\nabla^2 E + k_0^2 \varepsilon E = 0, \quad (2)$$

式中 E 表示光束的电场强度; 波数 $k_0 = 2\pi/\lambda$; TCVBG 的介电常数可表示为

$$\varepsilon = [n_0 + \Delta n \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{z} + \varphi)]^2 \approx n_0^2 + 2n_0 \Delta n \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{z} + \varphi), \quad (3)$$

光束在 TCVBG 中传输的总的光场可表示为

$$E = A \exp(-ik_0 n_0 \mathbf{e}_A \mathbf{r}) + B \exp(-ik_0 n_0 \mathbf{e}_B \mathbf{r}), \quad (4)$$

式中 A 为入射光束的场振幅; B 为衍射光束的场振幅; \mathbf{e}_A 为入射光束的传输方向单位矢量; \mathbf{e}_B 为衍射光束的传输方向单位矢量, \mathbf{r} 表示 TCVBG 的法线方向。

光栅的布拉格条件也可表示为^[21]

$$\begin{cases} k_0 n_0 \mathbf{e}_A + \mathbf{k} = k_0 n_0 \mathbf{e}_B \\ k_0 n_0 \mathbf{e}_B - \mathbf{k} = k_0 n_0 \mathbf{e}_A \end{cases}, \quad (5)$$

设入射光束在自由空间中的波数 $k_0(\lambda)$ 与 TCVBG 中满足布拉格光栅条件的波数 $k(x, y)$ 之差表示为

$$\Delta k(x, y, \lambda) = k_0(\lambda) - k(x, y), \quad (6)$$

将(3)~(6)式代入(2)式并整理后得到如下偏微分方程组

$$\begin{cases} 2ik_0(\lambda)n_0 \frac{\partial A}{\partial z} = [k_0(\lambda)]^2 n_0 \Delta n B \exp[2i\Delta k(x, y, \lambda)n_0 z] \exp(i\varphi) \\ -2ik_0(\lambda)n_0 \frac{\partial B}{\partial z} = [k_0(\lambda)]^2 n_0 \Delta n A \exp[-2i\Delta k(x, y, \lambda)n_0 z] \exp(-i\varphi) \end{cases}, \quad (7)$$

求解(7)式应满足的初始条件为 $A(z=0) = A_{\text{input}}$, $B(z=L_0) = 0$, 使用有限差分法或龙格-库塔方法, 对(7)式进行迭代后可得到精确的数值解, 求出波长为 λ 的激光在某一点经过 TCVBG 后的场振幅 $B(z=0)$ 。布拉格条件下, 分别对偏离中心波长的不同波长进行迭代计算后, 可求出 TCVBG 上某一点的光谱衍射效率, 考虑入射光束的直径大小及其空间光强分布后, 总的功率反射比可由(8)式求出。

$$R = \int \left| \frac{B(x, y, 0)}{A(x, y, 0)} \right|^2 dx dy, \quad (8)$$

式中 $B(x, y, 0)$, $A(x, y, 0)$ 分别表示在 $z=0$ 平面上的衍射光场分布与入射光场分布。

3 TCVBG 衍射特性的数值计算及分析

利用(7)式和(8)式可计算出垂直照射在 TCVBG 上不同光束直径激光的衍射特性曲线, 设 TCVBG 的厚度为 0.69 mm, 背景折射率为 1.4891, 折射率调制系数为 1.65×10^{-4} , 波长啁啾系数为 1.5 nm/mm, 啁啾中心波长从 799 nm 到 817 nm 线性变化。图 2 给出了垂直照射在 TCVBG 上的光束横向尺寸 d 分别为 0.08、0.16 和 0.20 mm 时, TCVBG 的光谱衍射特性曲线, 从图 2 可以看出, TCVBG 的峰值衍射效率随着在啁啾方向上光束尺寸的增加而下降, 光谱选择宽度随着在啁啾方向上光束尺寸的增加而增大。当光束横向尺寸为 0.08 mm 时, 峰值衍射效率为 17.2%, 光谱选择半峰全宽(FWHM)为 0.3 nm, 与常规 VBG 的衍射特性几乎相同, 而当光束横向尺寸增大到 0.20 mm 时, 峰值衍射效率下降到了 14.3%, FWHM 增加到了 0.36 nm。图 3 给出了 TCVBG

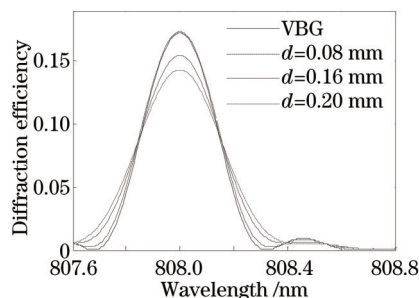


图 2 光束横向尺寸对 TCVBG 衍射效率的影响

Fig.2 Effects of different beam transversely size on diffraction efficiency of TCVBG

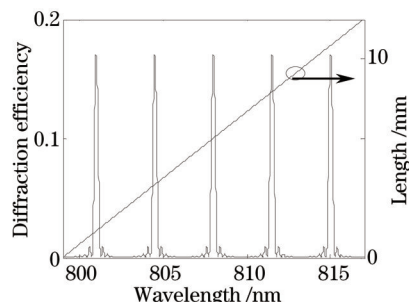


图 3 TCVBG 不同中心波长的衍射特性及其与横向位置的关系

Fig.3 Diffraction characteristic of TCVBG with different central wavelength and its relationship with transverse position

不同中心波长的光谱衍射特性及其与横向位置的关系,从图3中可以看出,不同的中心波长处几乎具有相同的峰值衍射效率和光谱选择宽度,且中心波长与光栅的横向位置呈线性关系。

4 实验装置及实验结果分析

实验采用C-Mount封装、条宽为200 μm的二极管激光器,激光器后端面镀有高反膜,前端镀有增透膜(透射率大于95%)用以减小内腔对波长锁定造成的不利影响,采用直径为120 μm的圆柱透镜将二极管激光器快轴方向的发散角压缩到8 mrad以内,使用半导体致冷器(TEC)控制二极管激光器的温度。采用的TCVBG是PD-LD公司的产品,其长度为12 mm,高度为1.5 mm,厚度为1.6 mm。啁啾中心波长从799~817 nm线性变化,波长啁啾系数为1.5 nm/mm,峰值衍射效率约为17%,光谱FWHM为0.3 nm。为了研究在啁啾方向上光束大小对TCVBG外腔二极管激光器输出特性的影响,实验对比研究了TCVBG的啁啾方向与同一个二极管激光器的快轴和慢轴方向一致时外腔二极管激光器的输出特性,实验装置示意图如图4所示。

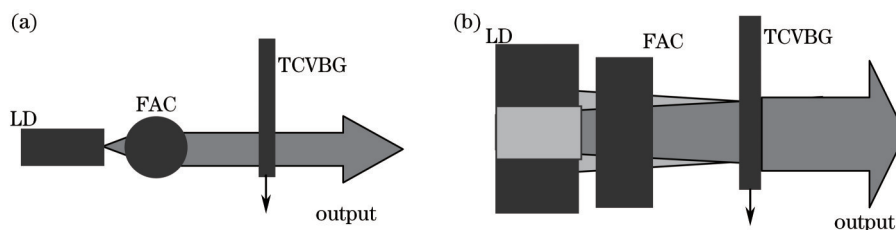


图4 实验装置示意图。(a) 啁啾方向与快轴方向一致;(b) 啁啾方向与慢轴方向一致

Fig.4 Schematic of experimental setup. (a) Chirped direction consistent with fast axis; (b) chirped direction consistent with slow axis

TCVBG的啁啾方向分别与二极管激光器的快慢轴方向一致时,外腔二极管激光器在中心波长为808 nm附近的功率-电流(P-I)曲线如图5所示,从图5中可以看出,未加入TCVBG时,驱动电流增加到3 A,激光器的最大输出功率为2.26 W,斜率效率为1.2 W/A;当加入TCVBG后,且其啁啾方向与二极管激光器的慢轴方向一致时,同样在驱动电流增加到3 A条件下,激光器的最大输出功率下降到2.01 W,斜率效率也下降到1.1 W/A,外腔效率约89%;当TCVBG的啁啾方向与二极管激光器的快轴方向一致,驱动电流增加到3 A时,激光的最大输出功率变为1.92 W,斜率效率为1.0 W/A,外腔效率约85%。

图6给出了二极管激光器的温度为25℃,驱动电流为3 A时,TCVBG的啁啾方向分别与二极管激光器的快慢轴方向一致时,外腔二极管激光器在中心波长为808.05nm处的输出光谱曲线,实验中采用的光谱仪型号为Avaspec-3648光纤光谱仪,光谱分辨率优于0.10 nm。从图6中可以看出,当TCVBG的啁啾方向与慢轴方向一致时,外腔二极管激光器的输出光谱的FWHM为0.3 nm,而当TCVBG的啁啾方向与快轴方向一致时,二极管激光器的输出光谱的FWHM被压窄到了0.27 nm。

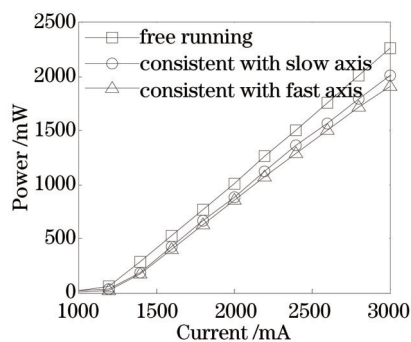


图5 TCVBG外腔二极管激光器的P-I特性
Fig.5 P-I characteristics of TCVBG external cavity laser diode

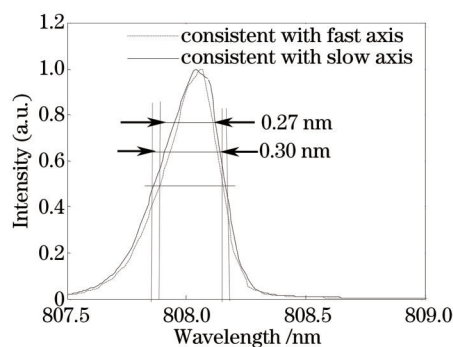


图6 啁啾方向分别与快慢轴方向一致时外腔二极管激光器的光谱曲线

Fig.6 Spectral of external cavity diode laser when the chirp direction is respectively consistent with the fast axis and slow axis

二极管激光器的温度为25℃,驱动电流为3 A时,TCVBG的啁啾方向分别与二极管激光器的快慢轴方向一致时,外腔二极管激光器的调谐光谱特性曲线如图7所示,从图7中可以看出,在两种外腔情况下,外腔

二极管激光器输出光谱的调谐范围均可以达到 15 nm,且光谱宽度都得到了有效压窄,实验测得在相同中心波长附近啾啾方向与快轴方向一致时的光谱宽度均小于与慢轴方向一致时的光谱宽度。当中心波长调谐至 815 nm 附近时,两种外腔光谱中都在 805 nm 附近出现了一个次级小峰值,这是由于当 TCVBG 的中心波长偏离二极管激光器自由运转波长较远时,内腔模式增强,外腔二极管激光器的波长稳定效果会随之变差,出现了不能完全被锁定的情况。实验表明,通过适当地升高二极管激光器的温度,两种外腔情况下的次级峰值均可以被消除,使 815 nm 附近的中心波长被完全锁定。整体来看,两种 TCVBG 外腔二极管激光器都可以较好地实现波长压窄及调谐效果。

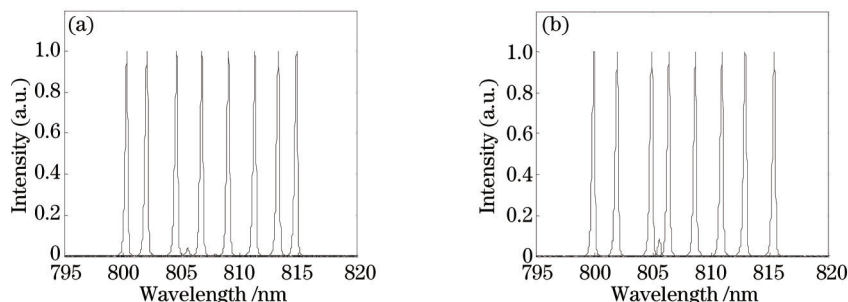


图 7 啾啾方向分别与(a)快轴和(b)慢轴方向一致时的波长调谐特性

Fig.7 Wavelength tunable characteristic of laser diode when the chirp direction is respectively consistent with the (a) fast axis and (b) slow axis

图 8 给出了当驱动电流为 3 A 时,随着 TCVBG 的横向移动,啾啾方向分别与二极管激光器的快轴方向和慢轴方向一致时,外腔二极管激光器在不同中心波长处输出功率的变化情况,当二极管激光器的快轴方向与啾啾方向一致时,在调谐范围内输出功率的波动范围小于 1%,当二极管激光器的慢轴方向与啾啾方向一致时,在调谐范围内输出功率的波动范围小于 1.5%,从图中可以看出,两种外腔二极管激光器在调谐范围内,都具有较为稳定的输出功率,且啾啾方向与快轴一致时的外腔二极管激光器的输出功率整体低于啾啾方向与慢轴一致时的输出功率。

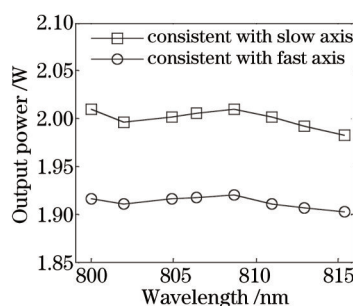


图 8 啾啾方向分别与快轴和慢轴方向一致时不同中心波长处的输出功率

Fig.8 Output power with regard to different wavelength when the chirped direction is respectively consistent with the fast axis and slow axis

由理论分析可知,TCVBG 的峰值衍射效率随着入射光束在啾啾方向上尺寸的增大而减小,光谱选择宽度随着入射光束在啾啾方向上尺寸的增大而增大。在实验中测得二极管激光器的输出光束经过快轴准直透镜准直后入射到 TCVBG 的快轴方向上的尺寸约为 0.08 mm,而二极管激光器的输出光束在慢轴方向上入射到 TCVBG 的可以被反馈回二极管激光器的尺寸约为 0.20 mm,采用啾啾方向分别与二极管激光器的快慢轴方向一致的外腔二极管激光器,啾啾方向与快轴方向一致时在啾啾方向上的光斑尺寸小于与慢轴方向一致时在啾啾方向上的光斑尺寸,导致了与快轴方向一致时的峰值衍射效率较大,其光谱选择宽度较小,峰值衍射效率的增加及光谱选择宽度的减小有利于更有效地抑制内腔模式,获得更窄的输出光谱。实验中与快轴方向一致时的输出光谱比与慢轴方向一致时的输出光谱窄化了 0.03 nm,但是,峰值衍射效率的增加及光谱选择宽度的减小造成了外腔效率下降 4%。最后值得指出的是输出激光的快轴与慢轴的发散角在两种外腔情况下均未得到改善。

5 结 论

理论分析了TCVBG的光谱衍射特性,研究发现,TCVBG的峰值衍射效率随着啁啾方向上光束尺寸的增大而减小,光谱选择宽度随着啁啾方向上光束尺寸的增大而增大。实验研究了TCVBG的啁啾方向分别与二极管激光器的快慢轴方向一致时外腔二极管激光器的功率特性、光谱特性和波长调谐特性,结果表明,TCVBG的啁啾方向与快轴方向一致时的外腔效率相比于和慢轴方向一致时减小了4%,输出激光的光谱宽度减小了0.03 nm,两种外腔情况的波长调谐特性几乎相同,均可以实现约15 nm的波长调谐范围。因此,采用TCVBG作为波长选择器件时,不仅要考虑其啁啾系数等参数对光谱衍射特性的影响,在实际应用时还应注意入射光束直径的大小对它的峰值衍射效率、光谱选择宽度甚至波长调谐特性的影响。

参 考 文 献

- 1 Efimov O M, Glebov L B, Glebova L N, *et al.*. High-efficiency Bragg gratings in photo thermo refractive glass[J]. Appl Opt, 1999, 38(4): 619-627.
- 2 Zhang Xiang, Gao Fan, Feng Jiansheng, *et al.*. Wavelength combining with volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glasses[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(3): 030901.
- 3 Yan Xiaoyuan, Yan Xiaona, Dai Ye, *et al.*. Generation of femtoscond double pulses by two-layer volume holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1205003.
闫晓媛, 阎晓娜, 戴 晔, 等. 利用双层体光栅产生飞秒双脉冲[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1205003.
- 4 Chen Huili, Yan Aimin, Hu Zhijuan, *et al.*. Diffraction properties of frequency chirped Gaussian pulse laser beams through volume gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0605001.
陈慧丽, 闫爱民, 胡志娟, 等. 频率啁啾高斯脉冲激光经体光栅的衍射特性[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0605001.
- 5 Wan Yuhong, Lin Lin, Liu Guoqing, *et al.*. Diffractive readout characteristics and stability of photo-thermo-refractive volume holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0109001.
万玉红, 林 琳, 刘国庆, 等. 光热折变体光栅变长读出特性及稳定性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0109001.
- 6 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.
- 7 Zheng Guangwei, Tan Jichun, Shen Benjian, *et al.*. Research on harmonic wave separation and beam sampling characteristics of superposed volume Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0305001.
郑光威, 谭吉春, 沈本剑, 等. 复用体布拉格光栅的谐波分离以及光束取样特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0305001.
- 8 Zheng Yujin, Kan Hirofumi. Effective bandwidth reduction for a high-power laser-diode array by an external-cavity technique[J]. Opt Lett, 2005, 30(18): 2424-2426.
- 9 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.
- 10 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): 0214002.
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): 0214002.
- 11 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.
- 12 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, *et al.*. Laser diode array with narrow linewidth for rubidium vapor laser pumping[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 875-878.
李志永, 谭荣清, 徐 程, 等. 用于铷蒸气激光泵浦的窄线宽阵列半导体激光器[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 875-878.
- 13 Shu H, Bass M. Modeling the reflection of a laser beam by a deformed highly reflective volume bragg grating[J]. Appl Opt, 2007, 46(15): 2930-2938.
- 14 Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, *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.
- 15 Kim J W, Jelger P, Sahu J K, *et al.*. High-power and wavelength-tunable operation of an Er/Yb fiber laser using a volume Bragg grating[J]. Opt Lett, 2008, 33(11): 1024–1026.
- 16 Hellstrom J E, Jacobsson B, Pasiskevicius V, *et al.*. Finite beams in reflective volume Bragg grating: theory and experiments[J]. IEEE J Quantum Elect, 2008, 44(1): 81–89.
- 17 Seger K, Jacobsson B, Pasiskevicius V, *et al.*. Tunable Yb: KYW laser using a transversely chirped volume Bragg grating[J]. Opt Express, 2009, 17(4): 2341–2347.
- 18 Jacobsson B, Pasiskevicius V, Laurell F, *et al.*. Tunable narrowband optical parametric oscillator using a transversely chirped Bragg grating[J]. Opt Lett, 2009, 34(4): 449–451.
- 19 Zeil Peter, Pasiskevicius Valdas, Laurell Fredrik. Efficient spectral control and tuning of a high power narrow-linewidth Yb-doped fiber laser using a transversely chirped volume Bragg grating[J]. Optics Express, 2013, 21(4): 4027–4035.
- 20 Chann B, Goyal A K, Fan T Y, *et al.*. Efficient, high-brightness wavelength-beam-combined commercial off-the-shelf diode stacks achieved by use of a wavelength-chirped volume Bragg grating[J]. Opt Lett, 2006, 31(9): 1253–1255.
- 21 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. Bell Syst Tech J, 1969, 48(9): 2909–2947.

栏目编辑: 刘丰瑞