

光热折变体光栅变波长读出特性及稳定性研究

万玉红^{1,2} 林琳^{1,2} 刘国庆^{1,2} 陶世荃^{1,2} 江竹青^{1,2} 王大勇^{1,2}

(¹ 北京工业大学 微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)
² 北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

摘要 光热折变体光栅是在光敏玻璃材料中利用光热折变效应记录的折射率型体全息光栅, 具有波长和角度选择性好、衍射效率高、热稳定性好和抗损伤阈值高等特点, 在激光器技术领域中具有独特的优势。在自行制备的光敏玻璃材料中, 用 325 nm 波长的紫外光曝光记录透射型体全息光栅, 基于变波长读出的原理设计实验, 对热显影后的光热折变体光栅在 532 nm 波长的激光照射下的衍射读出特性以及其在恒定光功率密度的激光照射下的稳定性进行了实验研究。研究结果表明, 热显影后的光热折变体光栅在激光辐照下具有光致饱和效应。根据实验结果定量计算出了光热折变体光栅的选择角和描述光致饱和效应的特征时间常数。

关键词 光栅; 体全息光栅; 光敏玻璃; 光热折变效应; 稳定性; 光致饱和效应

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0109001

Diffraction Readout Characteristics and Stability of Photo-Thermo-Refractive Volume Holographic Grating

Wan Yuhong^{1,2} Lin Lin^{1,2} Liu Guoqing² Tao Shiquan^{1,2}

Jiang Zhuqing^{1,2} Wang Dayong^{1,2}

(¹ Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
² College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The photo-thermo-refractive (PTR) volume grating is formed by PTR effect in photo-sensitive glass. PTR volume holographic grating has unique advantages for the applications of laser technologies owing to its excellent wavelength and angular selectivity, high diffraction efficiency, high thermal stability and high damage threshold. The diffraction characteristics and stability of the photo-thermo-refractive volume grating are investigated. A transmission hologram is recorded under 325 nm laser exposure in the PTR glass. According to the principle of variable wavelength readout, experimental setup is designed for readout of transmission photo-thermo-refractive volume grating. The angular selectivity and the stability under laser irradiation of the transmission PTR volume grating after thermal development are measured experimentally. The photo-saturation effect is observed and a characteristic time constant is acquired through by fitting the calculation and experimental results to describe the stability.

Key words gratings; volume holographic grating; photo-sensitive glass; photo-thermo-refractive effect; stability; photo saturation effect

OCIS codes 050.2770; 050.1970; 090.7330

1 引言

激光技术和光通信技术的飞速发展使得作为光谱滤波和空间角度滤波器件的衍射光学元件的需求量不断增加。具有良好的波长和角度选择性、高衍

射效率、高损伤阈值和优良的色散补偿等特点的体光栅器件在激光器系统设计^[1,2]、三维显示和成像^[3]、光通信等领域都有着重要应用。理想的记录材料是制备优良性能体全息光栅器件的关键。光热

收稿日期: 2012-06-26; **收到修改稿日期:** 2012-08-03

基金项目: 北京市人才强教深化计划中青骨干教师项目(006000543112518)和北京市教委项目—科技创新平台—自然科学基金研究基金(JX006111201001)资助课题。

作者简介: 万玉红(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高密度全息存储、体全息器件及其应用以及数字全息显微术及应用等方面的研究。E-mail: yhongw@bjut.edu.cn

折变玻璃就是一种良好的具有绝热性的全息记录材料。光热折变玻璃在紫外光照射下会产生热过程^[4]使玻璃内的微晶凝结进而导致玻璃折射率分布发生变化[即光热折变效应(PTR)效应]^[5],利用这一效应在光敏玻璃材料中记录位相型体全息光栅称为光热折变体光栅^[6]。PTR 玻璃材料的折射率随温度的变化非常小(dn/dT 约为 $5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$),在高强度激光的长时间辐照下,记录在材料内的体全息光栅性能也可以保持稳定。

从 20 世纪 90 年代开始,关于光热折变体全息光栅特性及其应用研究的焦点涉及材料的制备和基本性能的研究^[7~12]、光热折变体光栅的抗损伤阈值^[13]及其在激光器技术中作为窄带滤波^[14,15]、模式选择^[16,17]、角度滤波^[18]和光束合成^[19]元件等。Glebov^[9]实现了在不同厚度的光热折变玻璃中记录各种空间频率尺寸的体全息光栅,通过设计光栅的参数可使光热折变玻璃中透射型体光栅的角度选择性达到 0.1 mrad,反射型体光栅波长选择性达到亚纳米级。尽管对于光热折变玻璃的掺杂成分、掺杂比例以及抗损伤阈值等方面进行了广泛的研究,但是文献报道的研究手段多采用切变干涉仪等测量材料的折射率调制度^[20]。国内对于光热折变玻璃材料性能的研究,则主要采用 X 射线衍射分析和差热分析等手段检测微晶成分及样品的析晶放热过程,讨论不同配方的析晶特性^[10~12]。对于体全息光栅变波长读出的基本原理和实验设计研究尚未有详细的文献报道。对于光热折变体全息光栅激光辐照稳定性的测量,也只有定性的研究,表明其衍射效率基本不随照射光强和照射时间的变化而变化^[13]。

在自行制备的光敏玻璃材料中,本文通过紫外曝光记录体全息光栅,基于变波长读出的原理设计实验,对透射型光热折变体光栅的衍射读出特性以及恒定光功率密度的激光照射下的稳定性进行了实验研究,根据实验结果拟合出了经过热显影后光热折变体光栅的角度选择性曲线和 532 nm 激光辐照情形下的衍射效率随时间变化曲线,并由此建立数学模型,计算得出了描述激光辐照下光热折变体光栅的光致饱和效应的特征时间常数,对光热折变体全息光栅的衍射特性和激光辐照稳定性给出了定量的评价。

2 光热折变体全息光栅基本理论

光敏玻璃中记录的体光栅为折射率型体全息位相光栅,对其衍射效率的定量分析仍可采用 Kogelnik 耦合波理论。对于无吸收透射型位相体

光栅,衍射效率 η 描述为^[21]

$$\eta = \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2}}{1 + (\xi/\nu)^2}, \quad (1)$$

其中光栅的耦合强度(和布拉格失配参量 ξ 的表达形式为^[21]

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}}, \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\delta d}{2 \cos \theta_s}, \quad (3)$$

式中 θ_s, θ_r 分别为衍射光波和再现光波与 z 轴(光轴)的夹角, Δn 为材料的折射率调制度, d 为材料厚度, λ 为记录光波长, δ 为相位失配因子,并且写入和擦除过程中折射率调制 Δn 随时间变化具有指数特性^[21],写入过程

$$\Delta n(t_w) = \Delta n_{\text{sat}} [1 - \exp(-t_w/\tau_w)], \quad (4)$$

擦除过程

$$\Delta n(t_E) = \Delta n_0 \exp(-t_E/\tau_E), \quad (5)$$

式中 τ_w 和 τ_E 分别为光折变全息记录材料的写入时间常数和擦除时间常数,常用来描述光折变全息记录材料在写入过程中衍射效率达到饱和衍射效率的 $1/e$ 和经受光擦除等情形下折射率衰减到峰值衍射效率的 $1/e$ 时所需时间。对于光热折变体全息光栅而言,由于不存在擦除效应,所以(5)式需要根据实际情况,进行适当完善或者变形后才适用于评价光热折变体光栅的某种特性。

体全息光栅再现时,只有满足布拉格条件才能得到最高的衍射效率。再现照明光波入射角或波长对布拉格条件的偏离都会导致衍射效率迅速下降。体积全息图的这一特性称为对角度和波长的灵敏性,或者说选择性。光栅衍射效率随布拉格失配量的变化曲线称为选择性曲线,通常将对对应着选择性曲线主瓣全宽度的角度差定义为选择角,用 $\Delta\theta$ 表示[或者取选择性曲线的半峰全宽(FWHM)来评价角度选择性,用 $\Delta\theta_{\text{FWHM}}$ 表示]。对于水平角度选择性,如果再现光的波长与记录时的波长相同($\Delta\lambda = 0$),透射型体光栅的选择角可以写为^[21]

$$\Delta\theta = \frac{2(\pi^2 - \nu^2)^{1/2} \lambda_0}{\pi n d} \left| \frac{\cos \theta_s}{\sin 2\varphi} \right|, \quad (6)$$

式中衍射光波与 z 轴夹角 θ_s 等于记录时物光波与 z 轴的夹角 θ_2 , $2\varphi = \theta_1 - \theta_2$ 是记录时参物光之间的夹角, θ_1 为记录时参考光波与 z 轴夹角。当 $\theta_2 = -\theta_1$ 时,即两写入光束对称入射到记录材料,形成非倾斜光栅,则(6)式可表示为

$$\Delta\theta = \frac{(\pi^2 - \nu^2)^{1/2} \lambda_0}{\pi n d |\sin \theta_1|}. \quad (7)$$

以上的讨论中所有角度均为介质内的值。根据折射定律,可以测量的外部选择角 $\Delta\theta$ 外的值。

体全息光栅在读出过程中,再现照明光波的波长偏离和角度偏离对衍射效率的影响是等效的,可以用角度偏离来弥补波长偏离。利用体全息光栅的矢量圆,可以明确地分析这一特性。如果物光和参考光从同一侧对称入射到记录材料,干涉形成非倾斜透射型体光栅,记录时物光和参考光的波矢量用 k_s 和 k_r 表示;读出时入射光和衍射光的波矢 k_i 和 k_d 表示, θ_r 为记录光波矢量与光轴的夹角和 θ_i 为读出光波矢量与光轴的夹角,图 1 为体光栅写入和变波长读出过程中的矢量圆示意图。

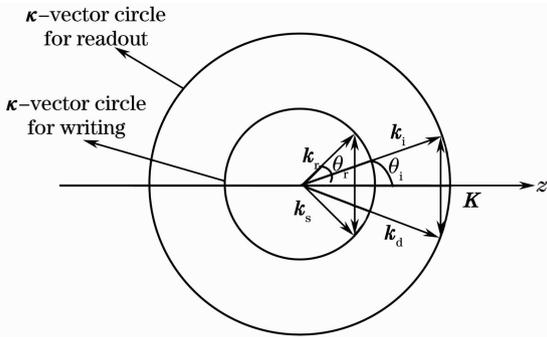


图 1 体全息光栅记录和变波长读出 k 矢量圆

Fig. 1 k -vector circle schematic diagram for recording and readout of volume holographic grating

写入光栅的矢量 K 与 k_r 、 k_s 组成等腰三角形,可得到如下关系式:

$$\sin \theta_r = \frac{K}{2k_r}. \quad (8)$$

再现时 k_i 、 k_d 与 K 也组成等腰三角形,得到

$$\sin \theta_i = \frac{K}{2k_i}. \quad (9)$$

(9)式中记录光 k_r 、 k_s 与读出光 k_i 和 k_d 的波矢具体表述为

$$k_r = k_s = \frac{2\pi}{\lambda_r} = \frac{2\pi n}{\lambda_{r0}}, \quad (10)$$

$$k_i = k_d = \frac{2\pi}{\lambda_i} = \frac{2\pi n}{\lambda_{i0}}, \quad (11)$$

式中 λ_r 、 λ_i 分别为记录光和读出光在介质中的波长, λ_{r0} 、 λ_{i0} 分别为记录光和读出光在真空中的波长, n 为光热折变玻璃的初始折射率。结合(8)~(11)式,可得到记录光入射角 θ_r 与读出光入射角 θ_i 之间的关系:

$$\frac{\sin \theta_r}{\lambda_{r0}} = \frac{\sin \theta_i}{\lambda_{i0}}, \quad (12)$$

式中 θ_r 、 θ_i 为在介质中的角度,将其换算为空气中的角度,可得记录光的入射角 θ_{r0} 为

$$\theta_{r0} = \arcsin\left(n \frac{\lambda_{r0}}{\lambda_{i0}} \sin \theta_i\right), \quad (13)$$

(13)式给出了记录光入射角度和记录光波长与再现照明光波长和入射角之间的关系,由此可以计算有关参数,为实验方案的设计提供指导。

根据上述理论基础,可以设计实验对光热折变玻璃材料的全息记录性能、衍射特性以及某种特定情形下的光栅稳定性进行实验研究,并给出定量的评价。

3 实验研究

课题组自行制备了光热折变玻璃材料,其主要成分及掺杂量如表 1 所示(其中 w 表示组分的质量分数),制成的光热折变玻璃尺寸 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$,光学质量良好,均匀无气泡,样品两面抛光后用于实验研究,图 2 为实验样品实物图。

表 1 光热折变玻璃组成成分

Table 1 Compositions of photo-thermo-refractive glass

Compositions	Mass fraction $w/\%$
SiO ₂	48.79
NaNO ₃	37.27
Al ₂ O ₃	2.70
ZnO	3.59
AlF ₃ ·3H ₂ O	2.87
NaF	2.62
KB _r	1.97
AgNO ₃	0.04
CeO ₂	0.02
SnCl ₂ ·2H ₂ O	0.05
Sb ₂ O ₃	0.10

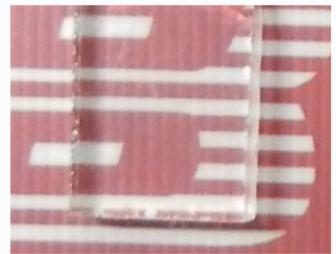


图 2 光热折变玻璃样品

Fig. 2 Sample of photo-thermo-refractive glass

通过阿贝折射率计测量样品对 587.56 nm 波长入射光的折射率为 1.49。使用 Agilent 8453 UV-Visible 光栅光谱仪对未曝光的光热折变玻璃的吸收谱进行测量,发现材料在 $200 \sim 350 \text{ nm}$ 范围内吸收均较强,在 325 nm 处材料的吸收比为 1.4,如图 3 所示。通过吸收谱的测量可知制成的光热折变玻璃可在紫外光照射下进行全息光栅的记录。

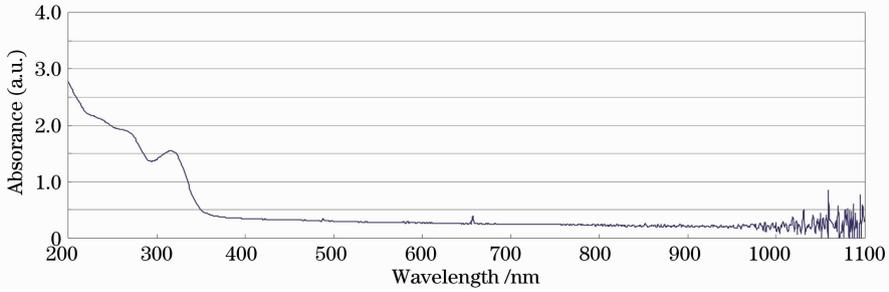


图 3 光热折变玻璃材料吸收谱(未曝光前)

Fig. 3 Absorption spectrum of photo-thermo-refractive glass (before unexposed)

根据双光束干涉记录体全息光栅和变波长读出的原理,用于研究的实验光路如图 4 所示,采用 325/442 nm 双波长输出的 He-Cd 激光器中的 325 nm 紫外光作为记录光源,从激光器发出的细光束经过紫外显微物镜进行扩束(BE)准直,再经紫外分光棱镜(BS)分为两束相干光。通过快门(SH)控制曝光时间,快门打开时,两相干光束在光热折变玻璃内发生干涉,形成体全息光栅。曝光后的材料采用离线加热方式进行显影。读出光源采用波长为 532 nm 的激光器,激光器发出的光经过转台上的反射镜及其后的透镜入射到光热折变体光栅上,实现对体光栅的读出,通过转台转动实现对光热折变体光栅角度选择性的测试。为了在实验中方便搭建光路,首先确定了读出时入射光与衍射光在空气中夹角为 90° ,根据(13)式及折射定律可以求出记录时物光与参考光空气中的夹角为 51.2° 。

实验中采用一束光功率密度为 74.5 mW/mm^2 ,另一束光功率密度为 138.3 mW/mm^2 即两相干光束的束比为 1:2,曝光时间 180 s 来记录非倾斜透射型光栅,曝光后光热折变玻璃材料经过 520°C 热显影 1.5 h。将显影后的光栅复位回原记录光路,用波长为 532 nm 的激光对光栅进行再现读出,再现照明光功率密度为 720 mW/mm^2 。实验测量得到的光热折变体光栅的角度选择性曲线如图 5 所示,其中图 5(a)

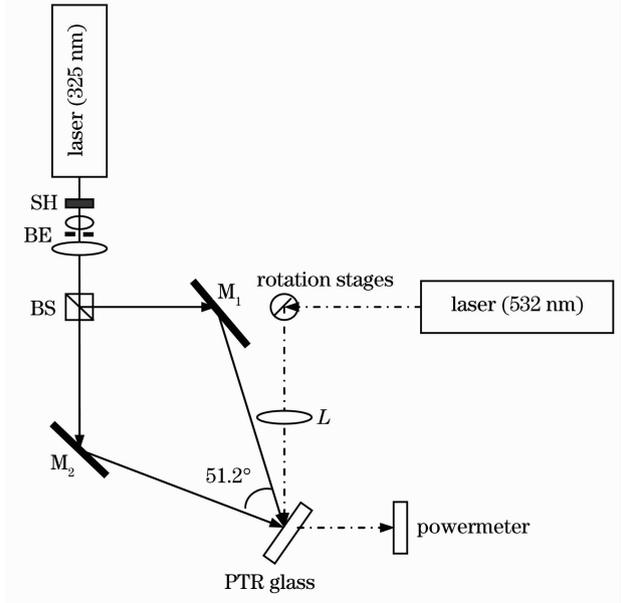


图 4 光热折变体光栅记录及读出光路示意图

Fig. 4 Schematic of the recording and read out for photo-thermo-refractive volumn grating

为正向扫描读出的曲线,图 5(b)为反向扫描读出的曲线,以证明衍射效率曲线的峰值偏移原点位置主要是由于运动控制的机械误差引起的。这里取衍射效率下降到最大值一半时的曲线宽度作为光栅的选择角,计算出光栅的选择角 $\Delta\theta_{\text{FWHM}} = 0.15^\circ$ 。

对于光热折变体光栅稳定性测试,研究采用了

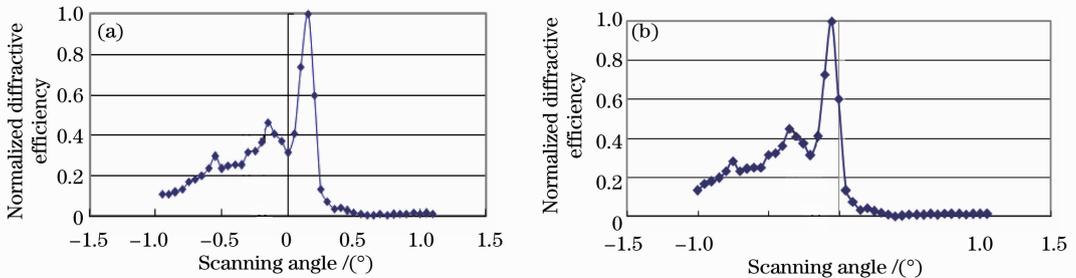


图 5 透射型光热折变体光栅角度选择性读出曲线。(a)正方向扫描读出;(b)负方向扫描读出

Fig. 5 Angular selectivity of transmission photo-thermo-refractive grating. (a) Scanning readout along the positive direction; (b) scanning readout along the negative direction

370 mW/mm² 光强的激光持续照射光热折变体光栅 472 min 内,多次采样,对采集到的衍射光斑强度随时间的变化进行比较,发现经热显影后的体光栅,在持续的激光照射下,衍射光斑的强度不仅没有减小,反而随着照射时间的增加而增加,直至达到饱和。为了定量地评价这种光照效应,建立了相应的数学模型,对实验数据和理论公式进行拟合。参考光折变晶体中体光栅的写入和擦除过程中折射率调制随时间变化具有指数特性[如(4)式和(5)式所

示],假定衍射光斑光强的变化规律满足

$$I(t) = I_0[C - \exp(-t/\tau_i)], \quad (14)$$

式中 I_0 为制作完成的光热折变体光栅在 $t = 0$ 时的初始衍射光强, C 为常数, τ_i 为持续光照作用导致衍射光斑强度达到稳定值的 $1/e$ 所需的时间,这里称为光致饱和的特征时间常数。根据(14)式对所得实验数据与理论公式进行拟合,得到结果如图 6 所示,由此可计算得到光热折变体光栅光致饱和时间 $\tau_i = 40$ min。

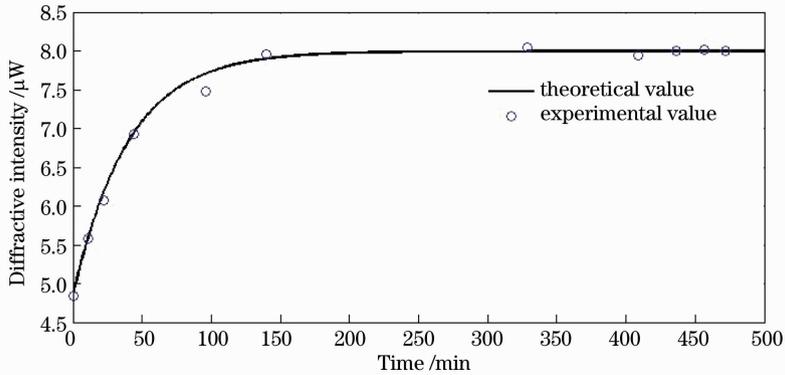


图 6 光栅衍射光强随激光辐照时间变化曲线

Fig. 6 Diffractive intensity of grating versus illuminating time of laser

4 结 论

光热折变玻璃是一种理想的体全息光栅记录材料,对于其体全息记录性能和衍射特性的深入研究有利于材料的优化制备和根据应用要求设计光栅的具体参数和特性。对课题组自行制备的光热折变玻璃材料在短波长记录,长波长读出情形下的衍射特性进行了理论分析和研究,并对其激光辐照的稳定性进行了定量的研究,给出了透射型光热折变体光栅的角度选择性曲线,并建立数学模型,计算出了实验中光热折变体光栅的光致饱和效应的特征时间常数。研究结果为建立新型光热折变玻璃材料的体全息记录性能评价方法和深入研究其有关特性及应用提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Zheng Guangwei, Tan Jichun, He Yanlan *et al.*. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by reflection volume phase gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1554~1559
- 郑光威, 谭吉春, 何焰蓝 等. 反射型体相位光栅对连续激光光束空间低通滤波[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1554~1559
- 2 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

- 3 Shen Wenmei, Jiang Zhuqing, Cheng Guofeng *et al.*. Depth resolution of 90° geometry volume holographic imaging system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(5): 050901
- 沈文梅, 江竹青, 程国锋 等. 90°邻面入射体全息成像系统的深度分辨率[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(5): 050901
- 4 S. D. Stookey. Photosensitive glass—a new photographic medium[J]. *Ind. Engng. Chem.*, 1949, **41**(4): 856~861
- 5 V. A. Borgman, L. B. Glebov, N. V. Nikonorov *et al.*. Photothermal refractive effect in silicate glasses[J]. *Sov. Phys. Dokl.*, 1989, **34**: 1011~1013
- 6 L. B. Glebov, N. V. Nikonorov, E. I. Panysheva *et al.*. Polychromic glasses—a new material for recording volume phase holograms[J]. *Sov. Phys. Dokl.*, 1990, **35**: 878~880
- 7 O. M. Efimov, L. B. Glebov, L. N. Glebova *et al.*. High-efficiency Bragg gratings in photothermorefractive glass [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(4): 619~627
- 8 L. B. Glebov, I. V. Ciapurin, L. N. Glebova *et al.*. Bragg gratings in a new photosensitive material-photo-thermo-refractive glass [C]. Monterey: Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, 2003. MD27
- 9 L. B. Glebov. Volume holographic elements in a photo-thermo-refractive glass [J]. *J. Holographic Speckle*, 2009, **5**(1): 77~84
- 10 Zhang Yu. Preparation and Characteristics of Photo-Thermo-Refractive Glass [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008. 8~10
- 张昱. 光致热敏折射率玻璃的制备及其特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. 8~10
- 11 Ren Qing, Lu Min, Zou Kuaiheng, Li Weinan *et al.*. Properties of photo-thermal-refractive glass [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(5): 857~861
- 任清, 陆敏, 邹快盛 等. PTR 微晶玻璃光热敏性能[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(5): 857~861

- 12 Xiong Baoxing, Yuan Xiao, Zhang Xiang *et al.*. Characteristics on the photo-thermal-refractive glass and volume Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0816001
熊宝星, 袁 孝, 张 翔 等. 光热敏折变玻璃及其布拉格体光栅特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0816001
- 13 I. V. Ciapurin, V. I. Smirnov, L. B. Glebov. Characterization of photo-thermo-refractive Bragg gratings in high-power IR laser beams [C]. Battimore; Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003. CThM27
- 14 J. Lumeau, V. Smirnov, L. Glebov. Tunable ultra-narrow band-pass filters based on volume Bragg grating [C]. Long Beach; Conference on Lasers and Electro-Optics, 2006. CWK1
- 15 A. V. Okishev, C. Dorrer, V. I. Smirnov *et al.*. Spectral filtering in a diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier using a volume Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8197~8202
- 16 N. Vorobiev, V. Smirnov, L. Glebov. Single-frequency-mode Q-switched Nd:YAG laser controlled by volume Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 9199
- 17 Hui Yongling, Li Qiang, Zhang Xiang *et al.*. Single frequency mode laser controlled by volume Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2805~2807
惠勇凌, 李 强, 张 翔 等. 基于体布拉格光栅选模的单纵模激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2805~2807
- 18 Xiang Zhang, Xiao Yuan, Shang Wu *et al.*. Two-dimensional angular filtering by volume Bragg gratings in photo thermo refractive glass [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(11): 2167~2169
- 19 in 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
- 20 O. M. Efimov, L. B. Glebov, H. P. Andre. Measurement of the induced refractive index in a photo thermo refractive glass by a liquid-cell shearing interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10): 1864~1871
- 21 Tao Shiquan, Jiang Zhuqing, Wang Dayong *et al.*. Holographic Optics Storage [M]. Beijing; Publishing House of Beijing University of Technology, 1998. 79~120
陶世荃, 王大勇, 江竹青 等. 光全息存储 [M]. 北京工业大学出版社, 1998. 79~120

栏目编辑: 何卓铭