

光热敏折变玻璃及其布拉格体光栅特性研究

熊宝星 袁 孝 张 翔 封建胜 张桂菊 邹快盛*

(苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 采用高温二次化料的方法制备了一种 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Na}_2\text{O(F, Br)}$ 玻璃体系的光热敏折变 (PTR) 玻璃, 通过紫外曝光、透射率光谱、X 射线衍射 (XRD) 和差热分析等方法研究了其光热敏析晶机理。研究表明, PTR 玻璃的光敏区为 280~350 nm, 工作区为 400~2700 nm, 最佳成核温度和析晶温度分别为 490 °C 和 595 °C, 析晶组分为 NaF 晶体。采用双光束干涉方法与“两步法”的热处理工艺在 PTR 玻璃中制备了周期为 1000 mm^{-1} 的布拉格体光栅, 光栅的相对衍射效率达到 91%, 并验证了制备的布拉格体光栅具有角选择滤波能力。

关键词 材料; 布拉格体光栅; 光热敏折变; 析晶特性; 角选择滤波

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0816001

Characteristics on the Photo-Thermal-Refractive Glass and Volume Bragg Gratings

Xiong Baoxing Yuan Xiao Zhang Xiang Feng Jiansheng Zhang Guiju Zou Kuaisheng

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

Abstract A photo-thermo-refractive (PTR) glass based on $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Na}_2\text{O (F, Br)}$ glass system is prepared with a two-step melting process. The crystallization mechanism of PTR glass is studied by the transmittance spectrum, X-ray diffraction (XRD) and differential scanning calorimetry. It is demonstrated that the photosensitive spectrum of PTR glass is from 280 to 350 nm, the working spectrum is from 400 to 2700 nm, the optimum nucleation temperature is above 490 °C, the crystallization temperature is near 595 °C and the crystalline phase is NaF. Volume Bragg grating (VBG) with the spatial frequency of 1000 mm^{-1} is recorded in PTR glass with direct laser interference patterning and “two-step” heat treatment process. The prepared VBG has a relative diffractive efficiency up to 91% and the angular filtering ability.

Key words materials; volume Bragg grating; photo-thermo-refractive; crystallization properties; angular filtering

OCIS codes 050.7330; 160.5320; 230.1950; 140.3300

1 引 言

在激光系统的设计中使用衍射光学元件(全息布拉格光栅), 通常被认为是一种改善激光束质量、降低系统体积和重量的有效方法, 其中应用最广泛的就是布拉格体光栅 (VBG)。现阶段先进激光技术的研究应用中, VBG 在拍瓦脉冲的压缩与展宽、角选择近场滤波、半导体激光输出光谱稳定以及模

式选择^[1,2]中有着非常重要的应用。随着以 VBG 为代表的全息光学元件越来越多的应用, 也促使了高效、可靠的光敏记录介质的发展。已用的典型的全息记录材料有卤化银感光材料、重铬酸盐明胶、光致变色材料、光致聚合物材料、光折变晶体^[3~5]等。其中, 卤化银感光材料具有高的灵敏度, 但是衍射效率较低, 加工、显影处理程序较繁琐。用重铬酸盐明

收稿日期: 2012-02-12; 收到修改稿日期: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(91023009, 61108024)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(11176021, 11076021, 10876011)和江苏省高校自然科学研究项目(10KJA140045, 09KJB140008)资助课题。

作者简介: 熊宝星(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电材料方面的研究。E-mail: xiongb8151@163.com

导师简介: 袁 孝(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事纳米结构光学器件制备、光电材料与激光技术等方面的研究。E-mail: xyuan@suda.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zks@suda.edu.cn

胶制作的全息图具有很高的衍射效率,可达 90%以上,但感光灵敏度低,光谱响应范围窄。另外,此材料制成的全息图受环境的影响很大,在高温下很容易消像。光致聚合物材料可以克服上述材料的一些缺点,但是缺点是材料受环境(温度、湿度)影响较大,乳胶有收缩和膨胀现象,有待进一步提高性能。光折变晶体不耐高温,同时在使用其制备光栅时会记录上附加衍射图案。因此,寻求一种稳定性好、损伤阈值高、光敏性好的全息记录介质受到人们极大的关注。而作为一种新型的光敏材料,光热敏折变(PTR)玻璃在满足以上需求的同时,还拥有很好的光敏性、很强的结构稳定性和极高的损伤阈值^[6],这使得 PTR 玻璃成为目前最有效的全息记录材料。

PTR 玻璃是在传统的微晶玻璃体系中加入光敏因子和热敏因子,使其在紫外(UV)曝光和热处理之后发生相变,从而使得曝光区玻璃的折射率发生改变,实现相位型 VBG 的记录。PTR 玻璃最早是 Vavilov State Optical Institute 于 20 世纪 80 年代末在早期 Corning 公司光敏微晶玻璃的基础上研发而来的^[7]。美国 University of Central Florida 的 Glebov 等^[8,9]在此基础上已制备出性能更优异的 PTR 玻璃,并成功地用于 VBG 的制备。国内对 $\text{Li}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统光敏微晶玻璃的研究较多^[10~12],但是对以 NaF 为析晶相的 PTR 玻璃的研究报道很少^[13],尤其对于成功实现折射率调制,制备出 VBG 则未见报道。本实验制备出 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Na}_2\text{O(F,Br)}$ 玻璃体系的 PTR 玻璃,以 Ag_m^0 作为晶核剂,NaF 作为析晶晶相,通过紫外曝光和热处理,使得曝光区与未曝光区存在 $10^{-5}\sim 10^{-4}$ 的折射率差,制备了具有良好角选择性的 VBG。

2 实 验

2.1 玻璃样品准备

PTR 玻璃的组成: $73\text{SiO}_2\cdot 11\text{Na}_2\text{O}\cdot 7(\text{ZnO} + \text{Al}_2\text{O}_3)\cdot 3(\text{BaO} + \text{La}_2\text{O}_3)\cdot 5\text{NaF}\cdot 1\text{KBr}$ (物质的量分数,%) ,同时掺杂有 0.02SnO_2 、 $0.08\text{Sb}_2\text{O}_3$ 、 0.01AgNO_3 和 0.02CeO_2 (物质的量分数,%) 等组分。精确称量相当于 1.6 kg 玻璃样品的原料,所有原料的纯度均为 99.99%。为了避免发生初始分解、熔融反应的原材料对铂金坩埚产生损伤,从而引起铂金属粒子对 PTR 玻璃的污染,同时也为了避免初始化学反应期间被还原的银原子沉积到坩埚底部对铂金坩埚产生损伤,拟采用二次化料的方式进行 PTR 玻璃的制备。二次化料过程如下:1)将材料在

研钵中细细研磨,使其充分均匀混和,在 $1230\text{ }^\circ\text{C}$ 左右将原料加入到由硅碳棒加热的石英坩埚中,使混合料熔化成玻璃态;2)在 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右将玻璃态 PTR 玻璃熟料浇入尺寸为 $\Phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的铂金坩埚中,按照特定的工艺采用铂金叶浆搅拌以进行玻璃的澄清和均化,其间熔制温度为 $1380\text{ }^\circ\text{C}\sim 1420\text{ }^\circ\text{C}$,熔制时间为 6.5 h。在 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右将高温熔体浇铸到 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 的铜模具中,后转入退火炉中,在 $460\text{ }^\circ\text{C}$ 附近保温 6 h,最后以 $5\text{ }^\circ\text{C/h}$ 的降温速度冷却到室温。选择无气泡、无条纹的玻璃,切割加工成平行度为 $15'$,尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的片状样品,两大面抛光处理,其余面细磨,光洁度为 III 级,用于透射率、损伤阈值的测试及紫外曝光实验。

透射率的测量选用美国 Perkin-Elmer 公司的 Lambda950 紫外-可见光-近红外(UV-VIS-NIR)分光光度计。热膨胀的测量采用的是 NETZSCH DIL-402EP 型热膨胀仪,加热速度 $5\text{ }^\circ\text{C/min}$ 。差热分析(DSC)的测量采用 NETZSCH STA 409PC 综合热分析仪,加热速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/min}$ 。X 射线衍射(XRD)的测量采用 X'Pert-Pro MPD 型 X 射线衍射仪,光源为 $\text{CuK}\alpha$ 线, 2θ 角测量范围 $0^\circ\sim 80^\circ$ 。

PTR 玻璃的激光破坏阈值采用 $N\text{-on-}1$ 的方法^[6]。测量时采用单脉冲能量 1 J、重复频率 10 Hz、脉冲宽度 1 ns 和 10 ns 的激光器,激光束聚焦辐照 PTR 玻璃 M 个点,记录损伤点个数 N ,然后降低激光能量,重复前一步骤,得出在每个能量下的损伤几率为 $P=N/M$ 。以激光能量密度为横轴,以损伤几率为纵轴,拟合损伤几率与激光能量分布外推到零损伤几率,所对应的激光能量即为激光损伤阈值。

2.2 紫外曝光

采用 50 mW 的 325 nm He-Cd 激光器(Kimmon Electric Model IK3501R-G)进行曝光,曝光剂量为 12 J/cm^2 。均匀曝光是将光束滤波、扩束及准直后直接照射玻璃样品。VGB 的制作采用分振幅双光束干涉方法,实验光路如图 1 所示,光束经滤波、扩束及准直后分束,经平面镜反射以相同角度入射 PTR 玻璃样品,通过调整入射角度可以获得不同空间频率的干涉条纹,该干涉条纹直接曝光到 PTR 玻璃样品上,然后通过热处理即可获得所需的 VBG。

曝光后的 VBG 经“两步法”工艺热处理后,用波长 532 nm 的连续 YAG 倍频激光来研究记录在 PTR 玻璃中的 VBG 的衍射特性,用功率计(Coherent Labmax Top)记录入射光光强 I_1 、透射

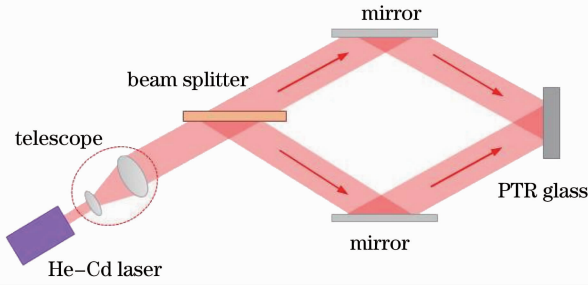


图1 VBG制备原理结构图

Fig.1 Schematic diagram of VBG preparation

光光强 I_T 、衍射光光强 I_D ，用 12 bit CCD(Thorlabs DCU 200)记录入射光、透射光和衍射光的图样。

为了加快离子移动，提高电子固化及离子扩散速度，样品曝光时要求温度处于 $320\text{ }^\circ\text{C}\sim 440\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3 晶化热处理工艺

PTR 玻璃的晶化热处理工艺采用“两步法”：1) 在较低的温度下核化，以形成足够数量的晶核；2) 升温至较高的温度下晶化，使晶体生长，达到一定的体积分数。通过测试热膨胀曲线，根据所得玻璃的转变温度(T_g)和软化温度(T_s)来确定核化温度；通过差热分析曲线放热峰温度确定晶化温度；晶粒的数量和大小则通过控制核化时间和晶化时间来确定。

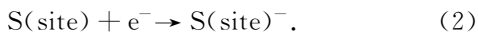
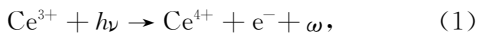
3 实验结果与分析

3.1 PTR 玻璃的光热敏机理分析

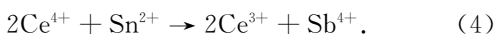
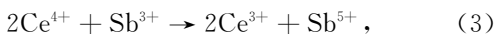
作为一种新型的感光材料，PTR 玻璃的光热敏折变是由于紫外曝光区域内出现大量光致诱导微晶而引起的。玻璃成分中， CeO_2 是光敏激活剂， Ce^{3+} 能吸收紫外光，自身被氧化并释放出一个电子。玻璃中的铈是以 Ce^{4+} 形式存在的，含有少量的 Ce^{3+} 。金属银颗粒作为晶核剂，为玻璃的析晶提供异相晶核。 SnO_2 和 Sb_2O_3 作为热还原剂，能促进晶核的生长并限制胶粒的大小。

光热敏第一阶段玻璃样品在近紫外光的照射下， Ce^{3+} 被氧化为 Ce^{4+} 释放出一个电子，释放的电子被银离子捕获，银离子变为 Ag^0 。

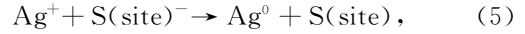
在光照过程中发生如下反应：



在加热的环境下($320\text{ }^\circ\text{C}\sim 440\text{ }^\circ\text{C}$)曝光，热还原剂也开始发挥作用，进一步为光敏过程提供足够的 Ce^{3+} ，保证光敏过程的继续进行，



第二阶段银原子在核化温度(T_g 附近)附近扩散、积聚形成微小的含银纳米集群(胶体银颗粒)。包括如下反应：



随后，这些胶体银颗粒诱导 NaF 初晶相的析出并长大。

上述过程可以通过 PTR 玻璃曝光前后及热处理前后的透射率曲线对比得出，如图 2 所示。图 2 实线为 PTR 玻璃在紫外及可见光区的原始透射率曲线，玻璃在 305 nm 波段的吸收归因于玻璃中的 Ce^{3+} 对紫外光的吸收。从图 2 中可以看出，对紫外光吸收的区域为 $250\sim 350\text{ nm}$ ，但考虑到 Ce^{3+} 离子对紫外光的有效吸收范围，PTR 玻璃的实际曝光区为 $280\sim 350\text{ nm}$ 。采用 325 nm 的 He-Cd 激光器对 PTR 原始玻璃进行 12 J/cm^2 剂量的均匀光照曝光后的玻璃透射率图如图 2 点划线所示， Ce^{3+} 离子对紫外光实现有效吸收，转化为典型的 Ce^{4+} 离子吸收光谱(380 nm 以下几乎全吸收)^[14]。在成核温度下处理的 PTR 玻璃的透射率曲线如图 2 虚线所示，成核后的 PTR 玻璃会在 412 nm 处有个吸收带，可归因于玻璃中分散的胶体银颗粒^[15]，从而使玻璃成棕黄色，如图 2 中样品所示。这些胶体银颗粒，形成曝光后在玻璃里面的“潜影”，在进一步热处理过程中，这些胶体银颗粒开始积聚，在随后的析晶过程中作为 NaF 晶体析出的晶核。因此，从图 2 可知，该 PTR 玻璃具有很好的光敏性。紫外曝光及热处理结束后，曝光玻璃的折射率相对于未曝光玻璃会减小，因此可以利用该玻璃进行区域曝光，使曝光区域和未曝光区域之间产生较大($1\times 10^{-4}\sim 5\times 10^{-4}$)的

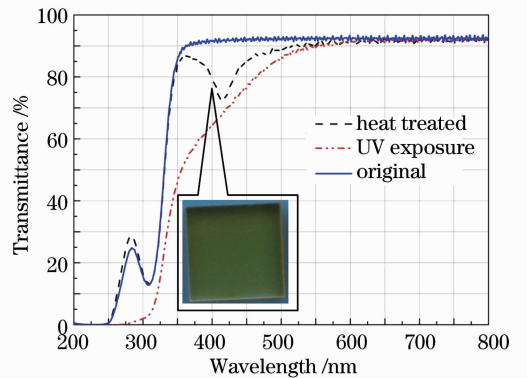


图2 PTR玻璃曝光及热处理后紫外-可见光区透射率光谱

Fig.2 UV-VIS transmission spectra of PTR glass after UV exposure and heat treatment

负折射率调制,利用该原理可以在该种 PTR 玻璃上制作 VBG。

3.2 PTR 玻璃的工作区及损伤阈值

原始 PTR 玻璃从紫外到近红外波长范围内的透射率如图 3 所示。从图 3 可知,该 PTR 玻璃在 400~2500 nm 为高透过区,透射率在 90% 左右,说明该 PTR 玻璃具有很宽的工作波段。

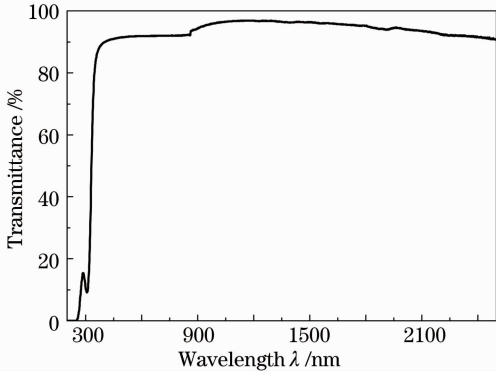


图 3 PTR 玻璃紫外到近红外波段透射率曲线
Fig. 3 UV-VIS-NIR transmission spectra of PTR glass

采用脉宽 1 ns 和 10 ns,单脉冲能量 1 J,重复频率 10 Hz 的 YAG 脉冲激光器对 PTR 玻璃的激光损伤阈值进行分析。PTR 玻璃损伤阈值可达 32~40 J/cm² (1064 nm, 10 ns) 和 8~10 J/cm² (1064 nm, 1 ns),说明制作的 PTR 玻璃具有高的损伤阈值。

3.3 PTR 玻璃的析晶特性

3.3.1 PTR 玻璃热膨胀分析

选取 $\Phi 5$ mm×50 mm 的原始 PTR 玻璃,对其热膨胀系数进行测量,测量的结果如图 4 所示。在 PTR 玻璃的热膨胀曲线上,PTR 玻璃在 440 °C 左右时可以发现结构调整,热膨胀加剧,过图 4 中第一个拐点处,作热膨胀曲线切线外延交点,两切线的交点就是

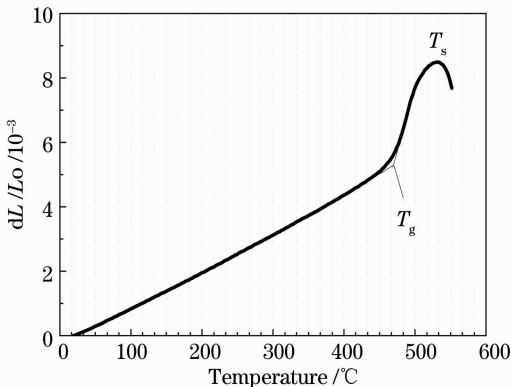


图 4 PTR 玻璃的热膨胀系数曲线

Fig. 4 Thermal expansion coefficient curve of PTR glass

PTR 玻璃的玻璃化转变温度 T_g ($T_g = 482$ °C),而热膨胀软化点 T_s 则由曲线的峰值温度点确定 ($T_s = 531$ °C)。根据 Glebov 等^[14]的研究,合适的成核温度一般介于对应玻璃粘度为 $10^{10} \sim 10^{13}$ P ($1P = 0.1$ N·s·m⁻²) 的温度范围之间,对于 PTR 玻璃,选择在 T_g 温度点左右^[16]。作为初步的近似估计,成核温度选择介于 T_g 和 T_s 之间。最佳成核温度需根据差热分析核化吸热峰和实验给出。

3.3.2 PTR 玻璃的差热分析

为了使曲线的特征放热峰值更明显,先将分析样品在 471 °C (T_g 附近)预处理 1~2 h。差热分析曲线如图 5 所示,随着玻璃温度的升高,在 490 °C 附近有一明显的吸热峰,说明该温度点下的 PTR 玻璃 Ag⁰ 聚集成核速度最快,与一般微晶玻璃的“最佳成核温度介于 T_g 和比它高 50 °C 左右的范围”的说法吻合^[17]。在这个范围内,玻璃内部结构发生变化,开始有大量微小的晶核生成。而在 595 °C 有明显的放热峰,此时析晶速度最快。在这个温度附近,玻璃中发生晶体长大。从图 5 中可以看出 PTR 玻璃在 550 °C 就开始缓慢地出现放热峰,所以在确定热处理工艺的时候,为了有效地控制析晶速度及晶粒大小,同时避免高温对玻璃形貌的破坏,除了控制热处理时间外,可以在 550 °C~595 °C 范围内选择合适的析晶温度 (T_c)。

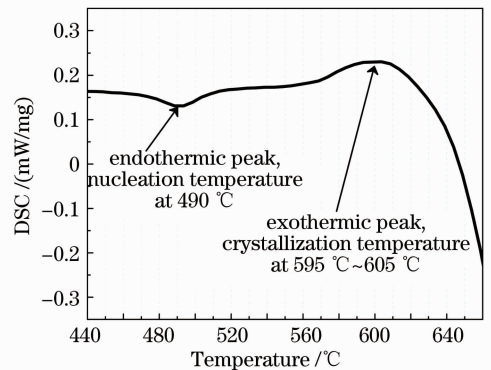


图 5 在 471 °C 预成核 2 h 后 PTR 玻璃的差热分析曲线

Fig. 5 DSC curve of PTR glass pre-nucleated at 471 °C for 2 h

3.3.3 PTR 玻璃的晶相分析

对在 490 °C 下成核 24 h,589 °C 下充分晶化 4 h 后的样品(如图 6 插图所示)进行 XRD 分析,得到如图 6 所示的 XRD 图谱。图中 20°~30° 范围内对应的是作为 PTR 玻璃基质的非晶态硅酸盐玻璃对 X 射线弥散所形成的峰包。在 39° 和 56° 处均有尖锐的衍射峰,而 70° 对应的衍射峰并不明显。与 NaF

衍射标准图谱对比可以证实 在 39° 、 56° 和 70° 所对应的衍射峰都是 NaF 晶体对应的衍射峰,证明析晶晶相主要为 NaF 微晶。

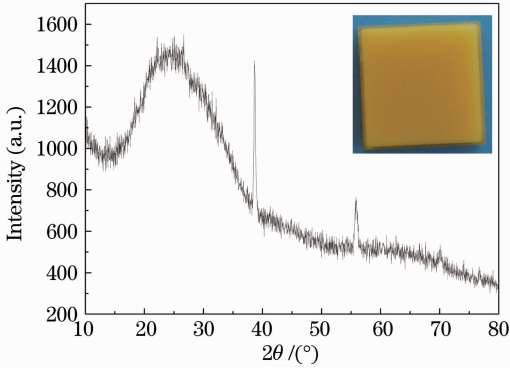


图 6 490 °C 核化 24 h 和 589 °C 晶化 4 h 后 PTR 玻璃的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of PTR glass with nucleation at 490 °C for 24 h and crystallization at 589 °C for 4 h

3.4 VBG 的衍射性能分析

在 PTR 玻璃内部记录 VBG 周期为 $1\ \mu\text{m}$, VBG 的成栅区域为整个 PTR 玻璃, VBG 中的折射率分布为沿长度方向的正弦函数, 而厚度以及宽度方向均匀分布。所制备的 VBG 布拉格角为 $\theta_B = 9.35^\circ$ (布拉格角确定方法: 将 VBG 放置在旋转平台上, 使准直光束的入射角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 连续变化, 衍射效率最强时对应的入射角便是布拉格角)。按照“两步法”热处理工艺, 这里选择核化温度 $490\ ^\circ\text{C}$ 下 24 h, 析晶温度 $589\ ^\circ\text{C}$ 下保温 2 h, 然后炉内自然降温退火。

热处理后的光栅样品经抛光打磨后, 测量出 VBG 入射光强 $I_1 = 68.1\ \mu\text{W}$, 透射光强 $I_T = 0.61\ \mu\text{W}$, 衍射光强 $I_D = 65\ \mu\text{W}$, 根据相对衍射效率公式^[9]

$$\eta_R = \frac{I_D}{I_D + I_T}. \quad (7)$$

所制备的 VBG 衍射效率为 91.4%, 损耗为 3.8%。

3.5 VBG 角选择近场空间滤波特性分析

根据耦合波理论可知, VBG 的衍射特性与入射角度有关, 当入射光束角度偏离布拉格角时, VBG 的衍射效率迅速降低, 即 VBG 具有极好的角度选择性。由傅里叶光学可知, 任意分布的光束可展开为一系列不同方向(入射角)传播的平面波的叠加, 不同传播方向的入射光对应着不同的空间频率。由于 VBG 具有良好的角度选择性, 中高频成分的光束发散角偏离布拉格角更加严重, 难以被 VBG 高效衍射, 衍射光束的中高频成分基本被滤除。因此, VBG 可用于角选择近场空间滤波。

为了验证制备的 VBG 的角度选择特性, 开展了角选择近场空间滤波原理性实验, 在入射光束中加入直径 1 mm 的铜丝来引入丰富的空间频率。由于引入了大量的中高频调制, 光束近场分布调制十分明显, 如图 7(a) 所示。经过制备的 VBG 角选择近场滤波后, 输出光束的近场均匀性获得极大的提高, 如图 7(b) 所示。验证了制备的 VBG 具有良好的角度选择近场空间滤波能力, 可应用于高功率激光近场光束质量的改善等。

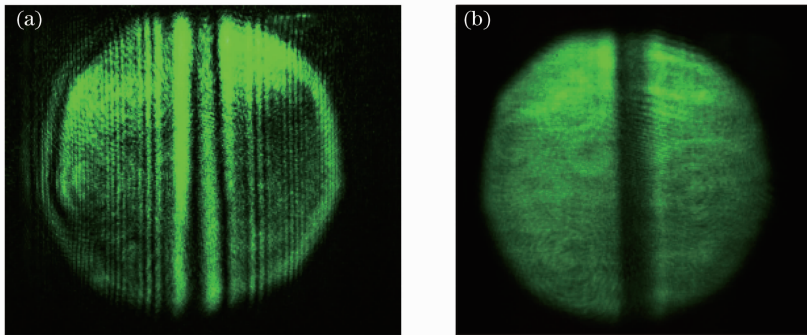


图 7 调制光束和滤波光束的近场分布。(a) 调制光束的近场分布; (b) 滤波光束的近场分布

Fig. 7 Near field distribution of the modulated beam and filtered beam. (a) Modulated beam; (b) filtered beam

4 结 论

制备出组成为 $73\text{SiO}_2 \cdot 11\text{Na}_2\text{O} \cdot 7(\text{ZnO} + \text{Al}_2\text{O}_3) \cdot 3(\text{BaO} + \text{La}_2\text{O}_3) \cdot 5\text{NaF} \cdot 1\text{KBr}$ (物质的量分数, %) , 同时掺有 0.02SnO_2 、 $0.08\text{Sb}_2\text{O}_3$ 、 0.01AgNO_3 和

0.02CeO_2 (物质的量分数, %) 的 PTR 玻璃。实验证明该 PTR 玻璃有良好的光热敏性, 光敏区为 $280 \sim 350\ \text{nm}$, 对 $400 \sim 2500\ \text{nm}$ 的光波则有很好的透过性。对 PTR 玻璃进行热分析后, 发现玻璃的转变温度

T_g 为 482 °C, 软化温度 T_s 为 531 °C, 而曝光后 PTR 玻璃的成核温度在 490 °C 附近, 最佳析晶温度在 595 °C 附近。基于 PTR 玻璃材料制备出了周期为 1 μm 的 VBG, 相对衍射效率可达 91%。将制备的光栅用于实际激光光束的角选择近场空间滤波, 有效滤除了光束中引入的中高频调制。下一步将进一步研究热处理温度及时间对晶核及晶体大小、数量和形态的影响, 通过建立合理的热处理工艺, 进一步优化基于 PTR 玻璃的 VBG 的性能。

参 考 文 献

- 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): 2167~6169
- 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
- Ren Yufen. A Study on Mechanism of Diffraction Efficiency of Dichromated Gelatin and Silver Halide Holographic Recording Materials[D]. Changsha: Central South University, 2005
任宇芬. 重铬酸盐明胶和卤化银全息记录材料衍射率机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005
- Ma Chunrong, Lang Hengyuan. Holographic recording materials of a new photopolymer system [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 1988, **8**(2): 75~79
马春荣, 郎恒元. 薪型光聚合体系的全息记录材料[J]. 北京工业学院学报, 1988, **8**(2): 75~79
- H. Bjelkhagen. New recording materials for holography [C]. Conference of Holography, Art and Design, 1998
- Leonid B. Glebov, Larissa N. Glebova, Vadim I. Smirnov *et al.*. Laser damage resistance of photo-thermo-refractive glass Bragg gratings [C]. Proceedings of Solid State and Diode Lasers Technical Review, 2004
- N. V. Nikonorov, E. I. Panyшева, I. V. Tunimanova *et al.*. Influence of glass composition on the refractive index change upon photothermoinduced crystallization [J]. *Glass Physics and Chemistry*, 2001, **27**(3): 241~248
- L. B. Glebov, V. I. Smirnov, C. M. Stickley *et al.*. New approach to robust optics for HEL systems [C]. *SPIE*, 2002, **4724**: 101~109
- Oleg M. Efimov, Leonid B. Glebov, Larissa N. Glebova *et al.*. High-efficiency Bragg gratings in photothermorefractive glass [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(4): 619~627
- You Mu, Zhao Wei, Cheng Guanghua *et al.*. Crystallization in PTR glass induced by irradiation of femtosecond lasers[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 40~42, 46
游牧, 赵卫, 程光华等. 光敏玻璃在飞秒激光作用下的析晶[J]. 激光技术, 2006, **30**(1): 40~42, 46
- Cheng Jinshu, Zhao Qian, Tang Liying. Low temperature heat treatment of $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ photoactive glass ceramic[J]. *J. Wuhan University of Technology*, 1997, **19**(1): 37~39
程金树, 赵前, 汤李缨. $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统光敏微晶玻璃的低温热处理[J]. 武汉工业大学学报, 1997, **19**(1): 37~39
- Li Lei, Xi Shuzhen. Studies of preparation and characteristics in photothermo sensitive microcrystal glasses [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(2): 29~35
李磊, 席淑珍. 光热敏微晶玻璃的制备及其特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, **6**(2): 29~35
- Ren Qing, Lu Min, Zou Kuaisheng *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 微晶玻璃的光热敏性能 [J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(5): 857~861
- L. B. Glebov. Photochromic and Photo-Thermo-Refractive (PTR) Glasses In M. Schwartz (ed.). Encyclopedia of Smart Materials Vol. 2 [M]. New York: Wiley, , 2002.770~780
- Nie Chunsheng, Zheng Yutong. Three main absorption bands of the photosensitive color glass [J]. *Special Glass*, 1986, **3**(4): 28~30
聂春生, 郑玉童. 彩色光敏玻璃的三组主要吸收带[J]. 特种玻璃, 1986, **3**(4): 28~30
- L. B. Glebov, L. Glebova. Swelling of photo-thermo-refractive glass resulted from thermal development[J]. *Glass Science and Technology*, 2002, **75**(C2): 294~297
- Cheng Jinshu, Zheng Weihong, Tang Liying *et al.*. Influence of heat-treatments on the microstructure and properties of MAS glass-ceramic[J]. *J. Wuhan University of Technology*, 2004, **26**(4): 29~32
程金树, 郑伟宏, 汤李缨等. 热处理制度对微晶玻璃结构和性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2004, **26**(4): 29~32

栏目编辑: 李文洁