基于光热敏折变玻璃的透射型体布拉格光栅 角度选择性研究

吴青晴 张 翔* 封建胜 吴 尚 张桂菊 邹快盛 袁 孝

(苏州大学现代光学技术研究所江苏省先进光学制造技术重点实验室,教育部/江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 采用 Kogelnik 耦合波理论讨论了透射型体布拉格光栅(TVBG)的角度选择特性;结合分波面双光束干涉法 和两步热处理法在光热敏折变玻璃中制备了周期为 1 μm 的 TVBG, TVBG 相对衍射效率可达 91.1%;利用发散光 束研究了 TVBG 的角度选择特性,验证了 TVBG 具有良好的角度选择特性,可以应用于角选择滤波,抑制中高频 调制,提高激光的近场均匀性。

关键词 光栅;光热敏折变玻璃;衍射效率;角度选择性;近场滤波

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1205001

Study on Angular Selectivity of Transmitting Volume Bragg Gratings in Photo-Thermo-Refractive Glass

Wu Qingqing Zhang Xiang Feng Jiansheng Wu Shang Zhang Guiju Zou Kuaisheng Yuan Xiao

(Institute of Modern Optical Technologies, Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province and Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract The angular selectivity of transmitting volume Bragg grating (TVBG) is analyzed based on Kogelnik's coupled-wave theory. The TVBG with a period of 1 μ m is prepared in photo-thermo-refractive (PTR) glass with wave-front splitting interference method and two-step heat treatment process. The diffraction efficiency of the TVBG is up to 91.1% The angular selectivity of the TVBG is studied by use of divergent laser beams. The experimental results show that the TVBG has a good selectivity and can be used in angular filtering, which can suppress the medium and high spatial frequency modulation and improve the near-field uniformity of laser beams.

Key words grating; photo-thermo-refractive glass; diffraction efficiency; angular selectivity; near-field filtering **OCIS codes** 050.7330; 160.5320; 230.1950; 140.3300

1 引 言

高强度先进激光系统光路中各类空间"高频噪音"(如光学材料缺陷、灰尘和光学元件的瑕疵等)、 衍射效应和各种非线性效应的综合影响,使得强激 光束近场均匀性的持续提高受到了极大的限制,特 别是激光束的中高频调制引起的光学非线性效应, 往往是导致元器件损伤的主要原因之一。基于傅里 叶光学中 4*f* 系统的传统真空空间滤波器可以在一 定程度上抑制衍射效应、快速非线性增长,改善光束 近场分布的不均匀性^[1]。但是,传统真空空间滤波 器需要大体积真空腔室来消除焦点处的击穿现象, 需要大的空间和非球面光学系统来克服像差。此外 小孔尺寸不能太小,否则光束在小孔边缘会产生等 离子体,造成"后向反射"^[2,3]甚至"堵孔效应"^[2,4],

收稿日期: 2012-05-30; 收到修改稿日期: 2012-07-03

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)、江苏省高校自然科学研究项目(10KJA140045,09KJB140008)、江苏省优势学科资助项目和国家 863高技术惯性约束聚变资助课题。

作者简介:吴青晴(1977—),女,本科,工程师,主要从事信息工程方面的研究。E-mail: wuqq@suda.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: flaming. zx@foxmail. com

严重威胁高功率激光装置的可靠性。

为了有效地解决高功率激光发展中存在的上述 问题,在光束近场进行滤波,消除中高频的影响,可以 有效地提高激光系统的可靠性,降低激光系统的复杂 性和规模。20世纪90年代,Ludman 等^[5,6]提出了非 空间滤波的概念,主要原理是基于厚布拉格体光栅良 好的角度选择性进行滤波,他们主要提出了如何设计 制备厚布拉格体光栅的方法,分析了新型滤波技术与 传统空间滤波器的优势,并利用发散光束对于厚光栅 的角度选择性进行了实验演示,Zheng 等^[7]也进行了 类似的研究工作。这些研究中采用的全息记录材 料[8~10](如卤化银感光材料、重铬酸盐明胶、光致聚合 物和光折变晶体等)由于诸多固有缺陷无法满足高功 率激光的应用需求。作为一种新型的光敏材料,光热 敏折变(PTR)微晶玻璃拥有很好的光敏性和很高的 破坏损伤阈值^[11],使得 PTR 玻璃成为目前最有效的 体布拉格光栅记录材料,美国佛罗里达中央大学已经 成功制备出用于半导体激光的光谱稳定技术研究[12] 和光束合成技术方面的体布拉格光栅[13]。此外,基 于PTR 玻璃的体布拉格光栅在超短脉冲激光的光束 控制领域中也具有重要的应用^[12,14,15]。

采用耦合波理论讨论透射型体布拉格光栅 (TVBG)的角度选择特性,分析光栅厚度对体布拉 格光栅衍射特性的影响;采用分波面双光束干涉法 在 PTR 玻璃中制备 TVBG,讨论了影响体布拉格 光栅制备的曝光干涉条纹稳定性等要求;研究了影 响体布拉格光栅的峰值衍射效率的因素;分析了发 散光束入射 TVBG 后的角度选择特性等。

2 理论分析

1969 年由 Kogelnik^[16]提出的耦合波理论是体 布拉格光栅较完善、常用的分析方法。该理论假设 仅有入射的"参考"光波 R 和出射"信号"光波 S 近 似的遵守布拉格条件。从麦克斯韦方程组出发,在 一系列简化条件下,得到耦合波方程:

$$\begin{cases} c_{R}R' + aR = -jkS \\ c_{S}S' + (a + j\Gamma)S = -jkR \end{cases},$$
(1)

式中 α 为平均吸收常数,k为耦合常数, Γ 为入射光 偏离布拉格条件时产生的移相量,R'和S'分别为入 射光和再现光的1阶导数, c_R 和 c_s 为倾斜因子,其 表达式为

$$\begin{cases} c_{\rm R} = \rho_z / \beta = \cos \theta \\ c_{\rm S} = \sigma_z / \beta = \cos \theta - K \cos \phi / \dot{\beta} \end{cases}$$
(2)

式中 β 为平均传播常数, ρ_z 和 σ_z 分别为矢量 ρ 和 σ 在

z方向(即光栅厚度方向)上的投影的大小,K为光 栅失量的大小,θ为ρ与z方向的夹角,♦为σ与z方 向的夹角,求出耦合波方程(1)式的通解,代入不同 的边界条件,即获得不同类型的体布拉格光栅衍射 效率公式^[7]。本文重点考虑无吸收无倾斜 TVBG, 其衍射效率表达式

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi n_1 d}{\lambda_b \cos \theta_b} \right), \tag{3}$$

式中*n*₁为折射率调制度,*d*为光栅厚度,λ_b为布拉格 波长,θ_b为布拉格角。

体布拉格光栅具有极强的角度选择或光谱选择 能力。当入射光束不满足布拉格条件时,体布拉格 光栅衍射会产生相位失配因子^[8]

$$\Gamma = \Delta \theta k_{\rm F} \cos(\Phi - \theta_{\rm b}) - \frac{\Delta \lambda k_{\rm F}^2}{4\pi n_0}, \qquad (4)$$

式中 Δθ 为介质中光束入射角与布拉格角的偏转 角,Δλ 为介质中光束波长与布拉波长的偏离量,k_F 是光栅矢量值,n₀ 是介质平均折射率。

当入射光以布拉格角入射体布拉格光栅,此时 衍射效率达到峰值,相位失配因子 $|\Gamma|$ 最小。当入 射光中心波长发生轻微漂移,则会对应于一个新的 布拉格角,以保证高的衍射效率。在实际的体布拉 格光栅应用中,一般考虑角度选择性能或者光谱选 择性能;而同时考虑角度选择和光谱选择,即 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda$ 同时增大是一个十分复杂的问题,也是目前体布 拉格光栅应用正在解决的问题之一。

体布拉格光栅的角选择特性采用零值全宽 (FWFZ)指标描述,FWFZ 定义为体布拉格光栅衍 射效率曲线中第一级衍射左右 0 值之间的宽度, FWFZ 越小,体布拉格光栅的角度选择能力越强。 图 1 为不同厚度的体布拉格光栅的角度选择特性,





其中体布拉格光栅周期为1μm、布拉格波长为 532 nm。当体布拉格光栅厚度为0.5 mm时,FWFZ 为3.46 mrad;随着体布拉格光栅厚度的逐渐增加,体 布拉格光栅的FWFZ 明显减小。当厚度为1 mm时, FWFZ 显著降低至1.73 mrad;当厚度为2 mm时, FWFZ 进一步降低至0.86 mrad;当厚度增加至5 mm 时,FWFZ 仅为0.35 mrad。可以看出随着厚度的逐 渐增大,体布拉格光栅的角选择能力不断增强。

体布拉格光栅对发散光束的角选择滤波如图 2 所示。当具有一定发散角的光束入射体布拉格光栅 时,可将入射光束视为不同传输方向的平面波的集 合。入射光束中不满足布拉格条件(即偏离布拉格 角入射)的成分将无法衍射,而是直接透射经过体布 拉格光栅;满足布拉格条件的成分则高效率衍射经 过体布拉格光栅。图2给出了具有一定发散角的平 顶光束以及入射在体布拉格光栅后的输出光束分布, 入射光束口径为20 mm×20 mm,发散角为2.5 mrad。 入射光束中不同发散角成分以不同的角度入射体布拉 格光栅,满足布拉格条件的成分衍射效率高,其余成分 衍射效率低甚至为0,输出光束呈 sinc 分布,如图2(b) 所示。



图 2 TVBG 对发散光束的角选择滤波作用。(a)入射光束;(b)经过体布拉格光栅后的衍射光束 Fig. 2 Angular-selective filtering with TVBG on a divergent beam. (a) Incident beam; (b) diffracted beam after volume Bragg grating

3 实验研究

3.1 体布拉格光栅的制备

体布拉格光栅采用分波面双光束干涉法制备, 实验光路如图 3 所示。将一束连续 325 nm He-Cd 激光扩束,通过软边光阑和空间滤波器获得均匀准 直光束;反射镜与光轴夹角为θ置于光束传输路径 中,将 PTR 玻璃样品置于透射光与反射光的交叠区 域。由于 PTR 玻璃良好的光敏特性,紫外激光的干 涉图样被记录在 PTR 玻璃样品中,完成体布拉格光 栅的曝光。通过控制反射镜与入射光束的夹角 θ, 即可获得不同周期的体布拉格光栅。PTR 玻璃的 晶化热处理工艺采用"两步法":1)在玻璃转变温度 (*T_g*)附近核化,以形成足够数量的晶核;2)升温至晶 化温度(550 ℃~595 ℃范围内),使晶体生长,达到一 定的体积分数。通过"两步法"热处理工艺,PTR 玻 璃曝光区的折射率发生改变,未曝光区的折射率不发 生变化,从而实现相位型体布拉格光栅的记录。



图 3 分波面双光束干涉法制备 TVBG 光路示意图 Fig. 3 Schematic diagram for fabricating TVBG by wave-front splitting interference method

在体布拉格光栅的制备过程中,干涉条纹的稳 定性严重影响体布拉格光栅的特性,如角度选择特 性、波长选择特性和峰值衍射效率等。在研究中测 量了干涉条纹的稳定性,通常将干涉条纹变化量降 低至每小时 2~3 μm。本文研究制备的体布拉格光 栅周期为 1 μm,由于曝光时间较短,该曝光光路稳 定性可以满足体布拉格光栅制备的需求,干涉条纹 移动量约为 50~75 nm。另一方面,体布拉格光栅 的有效厚度是影响体布拉格光栅的衍射特性(角度 选择特性、波长选择特性和峰值衍射效率)的又一重 要因素,在此研究了 325 nm 的紫外激光在 PTR 玻 璃中的穿透深度,如图 4 所示。可见,对于厚度几毫 米的体布拉格光栅,一定功率的 325 nm 紫外激光 完全可以满足体布拉格光栅的制备需求。



图 4 50 mW 325 nm 氦镉激光在 PTR 玻璃中的 穿透深度

Fig. 4 Penetrating depth of He-Cd laser (50 mW, λ =325 nm) in PTR glass

3.2 体布拉格光栅的衍射效率

本文采用记录在 PTR 微晶玻璃中的体布拉格 光栅,厚度为 3.03 mm、周期为 1 µm,其理论峰值衍 射效率为 96%,角度选择性可达 0.44 mrad,第一级 衍射旁瓣高度为 8.9%。实验采用连续 YAG 倍频 激光器,波长为 532 nm,输出功率为 2 W,线偏振 光;将激光器输出光束扩束到一定的尺寸,并与实验 光学系统匹配,然后经过软边光阑和传统空间滤波 器获得超高斯分布均匀准直光束。将体布拉格光栅 置于精密旋转平台,调节精度为 0.001°;慢慢转动 精密旋转平台,使目标光束光轴以布拉格角入射体 布拉格光栅;用功率计(Coherent Labmax Top)测 量入射光 I₁、透射光 I_T 以及衍射光 I_D 的强度,则被 测体布拉格光栅相对衍射效率为

$$\eta_{\rm R} = \frac{I_{\rm D}}{I_{\rm D} + I_{\rm T}}.$$
 (5)

实验中入射在体布拉格光栅上的光强 $I_{I} =$ 189.2 mW,经过体布拉格光栅的透射光强 $I_{T} =$ 15.3 mW,衍射光强 $I_{D} =$ 156.9 mW。根据(5)式, 体布拉格光栅衍射效率为 91.1%,损耗为 8.9%。 体布拉格光栅的衍射效率实验测量值与理论值存在 的偏差,主要由以下原因引起:1)实验测量中采用的 光束为准直超高斯光束,由于超高斯分布光束边缘 具有较丰富的空间频率成分,衍射光束中不满足布 拉格条件的成分直接透过体布拉格光栅,造成4%~ 6%的能量损耗,如图 5(b)所示;2)制备的体布拉格 光栅表面没有镀增透膜,造成光栅表面的菲涅耳反 射损耗。因此,实际测量的体布拉格光栅衍射效率 与理论计算值基本吻合。图 5(a)为超高斯分布光 束,图 5(b),(c)分别为入射体布拉格光栅后透射光 与衍射光的近场强度分布。



图 5 (a)超高斯分布光束和其入射体布拉格光栅后的(b)透射光与(c)衍射光的近场强度分布 Fig. 5 Near-field intensity distributions of (a) incident super-Gaussian beam, (b) transmitted beam and

(c) diffracted beam by TVBG

3.3 体布拉格光栅对发散光束的选择作用

将一束高稳定性连续 YAG 倍频激光扩束 到一定的尺寸,光束口径与实验光学系统的口径匹 配,然后经过软边光阑和空间滤波器,通过调节空间 滤波器以获得具有已知发散角的均匀目标光束,然 后以布拉格角入射体布拉格光栅。分别考察发散光 束传输 1、3、5 m 后经过体布拉格光栅的近场强度 分布。实验中入射光束原始口径为 10 mm×10 mm, 发散角约为 5 mrad,经过一定距离的传输,光束口径 远远大于体布拉格光栅口径(15 mm×15 mm),从而 使得体布拉格光栅的实际入射光束发散角减小,便于 考察体布拉格光栅对不同发散角光束的选择性差 异。采用12 bit CCD(Thorlabs DCU 200)记录不同 位置处的光束近场强度分布。

不同位置处的体布拉格光栅衍射光束近场强度 分布如图 6 所示。随着入射光束发散角的降低,体 布拉格光栅衍射光束中心亮纹宽度逐渐增大,两侧 衍射旁瓣数量减小,且每个衍射旁瓣宽度逐渐增大。



图 6 发散光束传输不同距离经 TVBG 衍射后输出光束的近场强度分布。(a) 1 m; (b) 3 m; (c) 5 m Fig. 6 Near-field intensity distributions of diffracted divergent beam by TVBG at different transmission

distances. (a) 1 m; (b) 3 m; (c) 5 m

本文进一步研究了发散光束经体布拉格光栅衍 射后输出光束的传输特性。将与光学系统匹配的目 标光束以布拉格角入射体布拉格光栅,考察衍射光 束传输1、3、5m时的光束近场强度分布。

体布拉格光栅的输出光束随着传输距离的增加,光束中心亮纹宽度几乎不发生变化,两侧衍射旁 瓣宽度与个数也几乎一致,如图7所示。可见,利用 体布拉格光栅优秀的角度选择特性,可以改善激光 束的发散角,这在激光测距、星地激光通信等领域具 有重要意义。根据傅里叶光学,任意分布的光束可 展开为不同传播方向平面波的叠加。由于体布拉格 光栅的角度选择特性,光束中不同的空间频率成分 经过光栅之后的衍射特性不同。中高频成分的光束 发散角偏离布拉格角更加严重,直接透射经过体布 拉格光栅,因此光束近场均匀性得到提高,如图 5(a) 和图 5(c)所示。



图 7 TVBG 输出光束传输不同距离后的近场强度分布。(a) 1 m; (b) 3 m; (c) 5 m Fig. 7 Near-field intensity distributions of diffracted laser beam by TVBG after transmitting different distances. (a) 1 m; (b) 3 m; (c) 5 m

4 结 论

采用 Kogelnik 耦合波理论讨论了 TVBG 的角度 选择特性;制备出了周期为 1 μm、厚度为 3.03 mm、 角度选择性为 0.44 mrad 的 TVBG,其峰值衍射效率 可达 91.1%;研究了超高斯光束经过体布拉格光栅的 输出特性,结果表明超高斯光束经过光栅的峰值衍 射效率明显降低;采用发散光研究了体布拉格光栅 的角度选择特性,随入射光发散角的降低,体布拉格 光栅的输出光束中心亮纹宽度增加,旁瓣个数减小。 该研究在新型激光器件和激光技术等应用研究方面 具有重要的实用价值。下一步将进一步研究基于体 布拉格光栅的空间滤波技术、腔内选模、光束衍射旁 瓣抑制技术以及体布拉格光栅的宽带特性等。

参考文献

1 J. T. Hunt, J. A. Glaze, W. W. Simmons *et al.*. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging [J]. Appl. Opt., 1978, 17(13): 2053~2057

- 2 J. S. Pearlman, J. P. Anthes. Closure of pinholes under intense laser radiation [J]. Appl. Opt., 1977, 16(8): 2328~2331
- 3 J. M. Auerbach, N. C. Holmes, J. T. Hunt *et al.*. Closure phenomena in pinholes irradiated by Nd laser pulses [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(14): 2495~2499
- 4 S. A. Dimakov, S. I. Zavgorodneva, L. V. Koval *et al.*. Investigation of the threshold of formation of a plasma screening radiation in a spatial filter [J]. Sov. J. Quantum Electron., 1989, **19**(6): 803~805
- 5 J. E. Ludman, J. Riccobono, N. Reinhand *et al.*. Nonspatial filter for laser beams [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, 26(12): 1093~1096
- 6 M. Henrion, J. Ludman, G. Sobolev *et al.*. Two-dimensional holographic nonspatial filtering for laser beams [C]. SPIE, 1998, 3417: 195~206
- 7 H. B. Zheng, Y. L. He, J. C. Tan *et al.*. Spatial filtering for high power laser beam by volume Bragg grating [C]. SPIE, 2009, 7506, 75062A-1
- 8 Ren Yufen. A Study on Mechanism of Diffraction Efficiency of Dichromated Gelatin and Silver Halide Holographic Recording Materials [D]. Changsha: Central South University, 2005. 任字芬. 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
- 9 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 业学院报, 1988, 8(2): 75~79

- 10 J. M. Kim, B. S. Choi, Y. S. Choi *et al.*. Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part 2. reflection holographic optical elements [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(8), 1522~1533
- 11 L. B. Glebov, L. N. Glebova, V. 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, poster-4
- 12 G. Venus, L. Glebov, V. Rotar *et al.*. Volume Bragg semiconductor lasers with near diffraction limited divergence[C]. *SPIE*, 2006, **6216**: 621602
- 13 I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, L. N. Glebova *et al.*. Incoherent combining of 100-W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating [C]. SPIE, 2003, 4974, 209~219
- 14 L. A. Siiman, J. Lumeau, L. Canioni *et al.*. Ultrashort laser pulse diffraction by transmitting volume Bragg gratings in photothermo-refractive glass [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34** (17): 2572~2574
- 15 K. Liao, M. Cheng, E. Flecher *et al.*. Large-aperture chirped volume Bragg grating based fiber CPA system [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 4876~4882
- 16 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. Bell System Technical Journal, 1969, **48**(9): 2909~2947 栏目编辑: 李文喆