

文章编号: 0258-7025(2006)11-1461-06

用于惯性约束聚变驱动器的 色分离光栅-光束采样光栅集成元件的制作

张怡霄, 高福华, 姚欣, 李剑峰, 郭永康

(四川大学物理系, 四川 成都 610064)

摘要 针对惯性约束聚变(ICF)驱动系统特别是其终端光学系统对元件数和元件厚度的限制要求,利用衍射光学元件(DOE)易于集成的优点,提出一种在石英基片的两面分别曝光制作色分离光栅(CSG)和光束采样光栅(BSG)的新方法,仅需一个石英片即可同时实现谐波分离和光束采样的功能。分别采用光学制版和电子束直写的方法制作了色分离光栅和光束采样光栅的掩模,并利用离子束刻蚀的方法加工了色分离光栅-光束采样光栅集成元件。结果表明,此集成元件的三倍频光能量利用率、色分离度以及采样效率等参数均与三倍频光通过色分离光栅、光束采样光栅分离元件时得到的结果相吻合,达到了惯性约束聚变激光驱动器终端光学系统的基本技术指标要求。

关键词 集成光学;衍射光学元件;惯性约束聚变驱动器;光束采样光栅;色分离光栅

中图分类号 TL 632+.1 文献标识码 A

Fabrication of the Combined Color Separation Grating and Beam Sampling Grating Element Applied in Inertial Confinement Fusion Driver

ZHANG Yi-xiao, GAO Fu-hua, YAO Xin, LI Jian-feng, GUO Yong-kang

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Aiming at the restriction of the number and the thickness of elements used in the inertial confinement fusion (ICF) system, especially in the final optics assembly, and utilizing the characteristic of easy integration of diffractive optical element (DOE), a new means to fabricate color separation grating (CSG) and beam sampling grating (BSG) on two surfaces of one fused-silica substrate with two-surface exposure method is presented. Thus the functions of harmonic wave separation and beam sampling are realized through one silica plate. The masks of CSG and BSG are fabricated by photolithograph and e-beam direct writing method, respectively, and the ion beam etching method is used in fabricating the combined CSG-BSG element. The experimental results show that the parameters such as energy utilization ratio, color separation ratio and sampling efficiency for 3ω harmonic wave are in accordance with those of separated CSG and BSG elements, which achieve the basic technical requirements of the final optics assembly of ICF driver.

Key words integrated optics; diffractive optical element; inertial confinement fusion driver; beam sampling grating; color separation grating

1 引言

惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器的终端光学系统除了需完成频率转换外,尚需实现谐波分离、光

束取样、光束匀化及聚焦等功能,而这些功能目前主要是通过衍射光学元件(DOE)来实现^[1~4],例如用色分离光栅(CSG)实现谐波分离,用光束采样光栅(BSG)实现光束取样,用相位板(KPP)实现光束匀

收稿日期:2006-02-23;收到修改稿日期:2006-04-29

基金项目:国家自然科学基金(10376019)资助项目。

作者简介:张怡霄(1975—),女,四川三台人,四川大学物理系博士研究生,讲师,主要从事信息光学和衍射光学元件方面的研究。E-mail:zyxscu@263.net

导师简介:郭永康(1938—),男,四川宜宾人,四川大学物理科学与技术学院教授,博士生导师,目前研究方向为衍射光学、光子技术。E-mail:guoyongkang@263.net

化等。由于惯性约束聚变驱动系统中的激光束具有非常高的能量和峰值功率,强激光束在通过光学元件时,会与元件介质相互作用产生自聚焦等非线性效应;此外,系统中使用的光学元件的总数量也很大,每增加一个反射面其反射损失的能量都相当大,例如美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)的终端光学系统中,单束激光能量可达18 kJ,此时0.1%的能量反射损失即达到18 J^[5]。因此,为了优化系统结构、减少能量损失以及避免激光感应损伤或自聚焦效应造成的损坏,惯性约束聚变驱动器要求尽量减少系统中特别是终端光学系统中的元件数量和元件厚度,从而减小反射损失以及非线性相位延迟。由于衍射光学元件具有易于集成的优点,可通过将终端光学系统中实现不同功能的衍射光学元件集成到一个元件上,来优化系统的结构和性能。1988年,美国里弗莫尔实验室提出采用多次曝光的方法将光束采样光栅和色分离光栅合成制作在一个石英基片上^[1],然而因光束采样光栅和色分离光栅在横向和纵向尺度上相差太大,采用多次曝光法制作时,需分别完成两个不兼容的工艺过程,加工制作复杂,而且制作过程中需进行多次曝光蚀刻,增大了对位误差。另外当刻蚀色分离光栅台阶时会造成原有光束采样光栅刻槽深度变浅槽形变坏。为此本文提出一种双面曝光制作色分离光栅和光束采样光栅的新方法。色分离光栅和光束采样光栅的掩模分别采用光学制版和电子束直写的方法制作,并采用离子束刻蚀制作了色分离光栅-光束采样光栅集成元件,并在实际的光学系统中对集成元件的谐波分离和光束采样性能进行了测量。

2 谐波分离及光束采样原理

2.1 色分离光栅谐波分离原理

在惯性约束聚变系统中,通常需要分离三种谐波:1053 nm (1ω 光), 527 nm (2ω 光) 和 351 nm (3ω 光)。惯性约束聚变物理实验对谐波分离的要求是:三种谐波通过分离器后,基频、二倍频光在进入靶腔之前从主光路中分离出去,三倍频光仍按原光路传播进入靶室^[6]。根据这个要求,色分离光栅设计为三台阶周期光栅,如图1所示。经色分离光栅后,三倍频光继续沿原光路传播,而绝大部分的基频和二倍频光将发生偏折,被闪耀到±1级以至更高的衍射级次上,只有极少部分的光继续沿原光路传播,从而实现三种谐波的空间分离,如图2

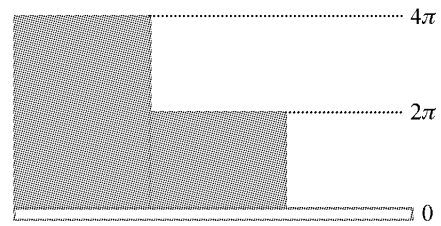


图1 谐波分离器在一个周期内的结构

Fig. 1 CSG steps in one period

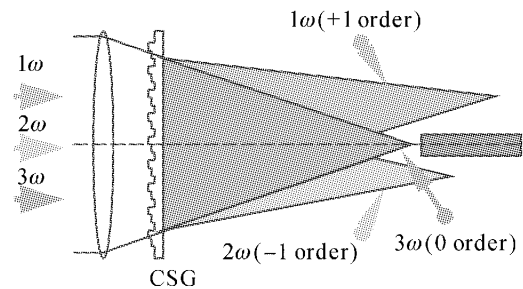


图2 谐波分离示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CSG

所示。

谐波分离技术应满足三倍频光的高能量利用率以及高“干净度”的要求,因此可以采用两个指标来衡量谐波分离的性能^[7]。

2.1.1 三倍频光能量利用效率

定义为三倍频光零级输出能量 I_3 与其输入总能量 I_{i3} 之比,也就是三倍频光的零级衍射效率

$$\Gamma_{3\omega} = \frac{I_3}{I_{i3}}. \quad (1)$$

2.1.2 色分离度

定义为基频光或二倍频光零级输出能量 I_i 与其各自输入总能量 I_{ii} 之比,即基频光和二倍频光的零级衍射效率

$$\gamma_i = \frac{I_i}{I_{ii}}, \quad (i = 1, 2), \quad (2)$$

从式(1),(2)可知, $\Gamma_{3\omega}$ 越大,色分离光栅三倍频光的能量利用效率越高; γ_i 越小,表明混入打靶光束中的基频光和二倍频光越少,谐波分离元件的分波效果越好,即输出三倍频光的干净度越好。

考虑到色分离光栅二元台阶的几何尺度(10~100 μm)远大于光波波长,可利用标量衍射理论计算出色分离光栅对三谐波的各级衍射效率的理论值。在理想情况下,色分离光栅对三倍频光能量利用率为 $\Gamma_{3\omega} = 100\%$,即对三倍频光表现为透明,色分离度为 $\gamma_1 = 0.32\%$, $\gamma_2 = 0.27\%$ 。

2.2 光束采样原理

在惯性约束聚变这样的大型激光系统中,激光

参数的在线诊断是整个装置总体集成实验的“眼睛”，它为每一个基准实验提供准确的实验数据，为各分系统提供激光参数测量结果，同时也为全面、仔细研究强激光系统的总体性能提供技术保证。目前在惯性约束聚变驱动器中，主要采用光束采样光栅来实现对 3ω 光的取样^[1,4,8,9]。

光束采样光栅的变周期光栅结构，与离轴全息波带片结构相同^[4]，它由平面波与球面波干涉形成，如图 3 所示。当平行光入射到这种变周期的光栅结构上时，能使取样光束从主光路中分离出来并聚焦，如图 4 所示。其透射率函数可表示为^[10]

$$t(x, y) = \exp\{i\varphi \cos[(x + f \sin\theta)^2 + y^2]\}, \quad (3)$$

其中 φ 为调制度参数，它与光栅的深度成正比； f 为取样焦距， θ 为取样角度。

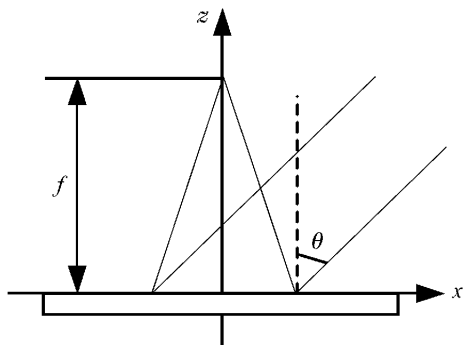


图 3 球面波与倾斜平面波的干涉

Fig. 3 Interference of a plane wave and a spherical wave

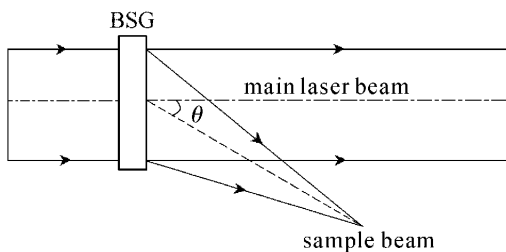


图 4 光束采样光栅取样原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the theory of BSG

3 色分离光栅和光束采样光栅的集成

3.1 双面曝光集成方法

本文提出采用双面曝光的方法，通过将两个元件的浮雕结构分别蚀刻在石英基片的两个表面来制作色分离光栅-光束采样光栅集成元件。对于色分离光栅，由于其光栅周期比较大，采用光学制版的方法制作掩模，通过掩模套刻来制作其台阶结构。而对于光束采样光栅，目前可以采用两种方法在抗蚀剂上得到其缓慢变化的周期光栅图案，一是掩模曝

光法，二是光学全息曝光法。相比之下，掩模曝光法具有设计灵活、重复性好、适于大批量生产等优点，因此我们采用它来制作光束采样光栅。另外，由于光束采样光栅条纹较窄且相邻条纹宽度变化太小 ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ nm 数量级)，一般的光学制版系统不能分辨，因此本文利用电子束直写来制作其掩模。

制作集成元件时，首先在石英基片的一面上利用离子束刻蚀生成色分离光栅，再在该石英基片的另一面上制作光束采样光栅。色分离光栅和光束采样光栅的条纹对准方法根据实际系统的需要设计，例如顺着光传输的方向看， 1ω 光向左边分离， 2ω 光向右边分离，则取样光束向下分离。

采用双面曝光法制作集成元件，避免了制作过程中的多次曝光，从而可减小由此引入的对位误差，同时也简化了加工工艺，减少了加工程序。由于两个元件是分两次做在石英基片的两个面上，对每个元件均采用的是目前较为成熟的加工工艺来制作，因此不存在工艺过程不兼容的问题，也不会对已制作好的元件造成破坏。此外，由于在同一个石英基片的两面分别制作两个衍射光学元件，因此对于每一个衍射光学元件而言，相当于基片厚度减半并减少了一个反射面，从而减少了激光通过这两个元件的总厚度和反射面数，可减小系统的反射损失以及激光感应损伤和非线性自聚焦效应造成的损伤，保证物理实验的正常进行。

3.2 集成元件设计

3.2.1 色分离光栅的设计

根据惯性约束聚变驱动器的要求，采用离子束刻蚀方法制作的色分离光栅的设计参数为：光栅周期 $d = 75 \mu\text{m}$ ，台阶深度 $h = 740 \text{ nm}$ 。采用光学制版方法加工的色分离光栅掩模图形如图 5 所示。

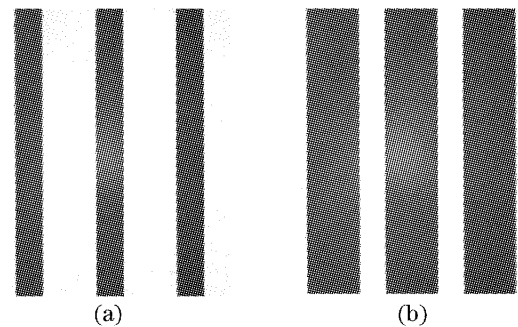


图 5 色分离光栅掩模图形显微照片

(a) 掩模 1; (b) 掩模 2

Fig. 5 Microscope photos of the masks used to fabricate CSG

(a) mask 1; (b) mask 2

3.2.2 光束采样光栅的设计

由于一般集成电路工艺难以制作灰度连续变化的结构,因此要采用掩模曝光法来制作光束采样光栅,就需要对取样光栅的连续光栅结构进行合理的近似。将公式(3)作二值化处理,即可得到光束采样光栅曝光掩模的图案分布表达式

$$t(x,y) = \begin{cases} 0 & \rho'_m < \sqrt{(x + f\sin\theta)^2 + y^2} \leq \rho_m \\ 1 & \rho_m < \sqrt{(x + f\sin\theta)^2 + y^2} \leq \rho'_{m+1} \end{cases}, \quad (4)$$

其中,1表示透光,0表示不透光; ρ_m, ρ'_m 分别为 m 级亮环和暗环的半径。根据不同的取样要求,只需调整式(4)中参数 θ 和 f ,就能设计合适的掩模数据,然后通过计算机控制电子束直写设备制作所需的曝光掩模。

根据实验需要,光束采样光栅的参数设计为:工作波长 $\lambda = 1053 \text{ nm}$,取样焦距 $f = 1000 \text{ mm}$,取样角度 $\theta = 15^\circ$,周期大小在 $2.2 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 之间缓慢变化。采用电子束直写系统加工的铬板掩模如图6所示,经测量图案线条宽度误差小于 100 nm 。

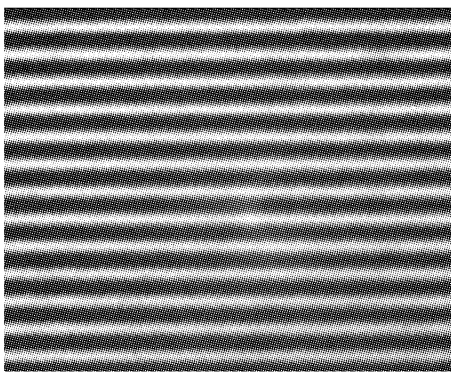


图6 电子束直写加工的光束采样光栅掩模显微照片
Fig. 6 Microscope photo of BSG mask fabricated by e-beam direct writing

4 实验结果

4.1 色分离光栅和光束采样光栅的制作

图7为用Alpha-Step 500型台阶仪测得的实际制作的色分离光栅台阶轮廓图。经测量,其周期为 $d = 79 \mu\text{m}$,台阶总深度为 $h_t = 1500 \text{ nm}$,每个台阶深度为 $h = 750 \text{ nm}$ 。在石英基片的另一面上制作的光束采样光栅轮廓如图8所示,经测量其光栅刻槽深度为 40 nm ,光栅周期为 $2.3 \mu\text{m}$ 。

由于电子束直写加工制作的掩模为二值化的掩模(二元掩模),因此最后得到的光束采样光栅轮廓应为矩形,而由于加工工艺带来的误差,实际刻蚀得

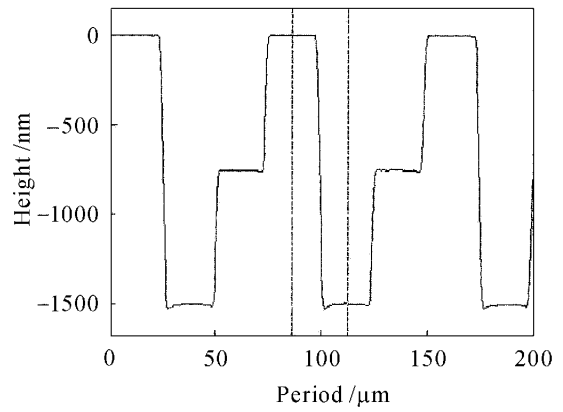


图7 色分离光栅台阶轮廓
Fig. 7 Measured CSG profile

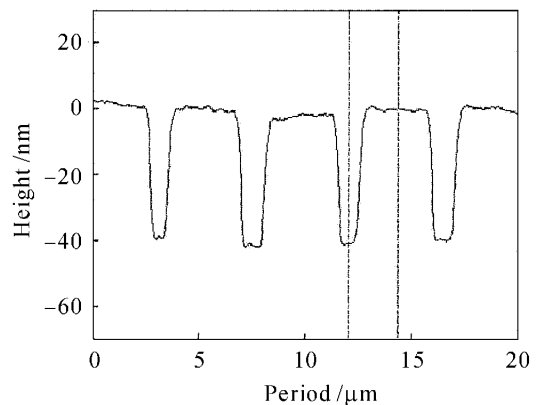


图8 光束采样光栅台阶轮廓
Fig. 8 Measured BSG profile

到的光束采样光栅轮廓近似为梯形。理论计算^[11]表明,由于槽深很浅,光栅轮廓为梯形槽的光束采样光栅,梯形倾角对+1级衍射光的衍射效率影响不大。

4.2 集成元件性能测量

使用中国工程物理研究院的三倍频激光系统对集成元件的谐波分离和取样效果进行了实验验证,测量光路如图9所示。激光束首先通过石英基片上刻有色分离光栅的一面,分离的三种谐波再经过刻有光束采样光栅的另一面实现对三倍频光的采样。测量时通过移动能量卡计2可测得集成元件色分离光栅各级的衍射效率和光束采样光栅的采样效率。

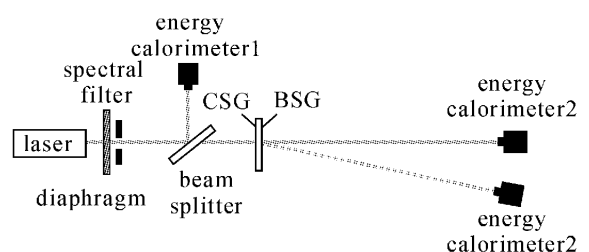


图9 测量光路
Fig. 9 Light path in experiment

受制作工艺的影响,实际制作的色分离光栅和光束采样光栅的周期和台阶深度与设计值之间存在一定的误差,其中色分离光栅深度误差对其衍射效率影响较大^[12],而光束采样光栅的刻槽深度对其采样效率影响最大。考虑到石英基片本身对三个波长的光有一定的透射率,我们对其进行了测量,得到三个波长光的透射率分别为: $T_{1\omega} = 90.9\%$, $T_{2\omega} = 90.8\%$, $T_{3\omega} = 90.5\%$ 。表 1,2 中的效率测量值均是以实测值作归一化处理后的数据。

4.2.1 色分离光栅参数测量

为了测量的方便,实际制作的集成元件中色分

离光栅的刻线区域大于光束采样光栅的刻线区域,因此可对激光束通过集成元件和仅通过色分离光栅的衍射效率等参数进行测量,从而得出集成后光束采样光栅对色分离光栅各项参数的影响。

1) 色分离光栅的衍射效率

集成元件色分离光栅对 3 个波长光的各级衍射效率如表 1 所示。可以看出,集成元件各衍射级次的能量分布与计算得到的预期值是一致的;集成光束采样光栅后,3 ω 光的零级衍射效率(即 3 ω 光能量利用率)下降了 2.9%,1 ω 和 2 ω 光的零级衍射效率(即色分离度)分别增加了 1.01% 和 0.1%。

表 1 集成元件色分离光栅及单独色分离光栅各级衍射效率的测量值和预期值

Table 1 Measured and expected diffraction efficiency of single CSG and CSG in combined element

Wavelength	Diffraction order	Measured diffraction efficiency of CSG in combined element / %	Measured diffraction efficiency of single CSG / %	Expected diffraction efficiency of single CSG / %
1053 nm	0	1.9	0.89	0.16
	-1	56.2	61.7	68.2
527 nm	0	2.2	2.1	0.06
	+1	54.1	58.4	68.3
351 nm	0	83.1	86	99.5

2) 色分离光栅的谐波分离角度

色分离光栅的谐波分离角度定义为二倍频光的 1 级衍射角,即 $\sin\varphi = \lambda_{527}/d$ 。实际制作的色分离光栅的周期为 79 μm ,可得其谐波分离角的预期值为 0.0067 rad(0.38°)。实验中实际测得的集成元件色分离光栅谐波分离角为 0.0065 rad(0.37°),与预期值吻合。当激光束仅通过色分离光栅时,测得的谐波分离角为 0.0068 rad(0.39°),与测得的集成元件的谐波分离角度相比变化很小。

4.2.2 光束采样光栅参数测量

因为光束采样光栅取样距离和取样角度都较大,它的周期变化很缓慢,因此在一定范围内可以将光束采样光栅近似看作等周期变化的光栅。此外,考虑到光束采样光栅的周期相对其工作波长仍然较大,因此仍可采用标量衍射理论对其进行分析^[12]。根据测得的实际制作的光束采样光栅刻槽深度和周期,可计算出采样效率的预期值,如表 2 所示。根据离轴波带片原理,光束采样光栅采样角度及采样焦距与其工作波长之间的关系为

$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{f_2}{f_1} \quad (5)$$

根据光束采样光栅的设计参数,可得此光束采

样光栅对 3 ω 光的采样角度和采样焦距的预期值,如表 2 所示,可以看出实际测得的采样角度和采样焦距均与预期值吻合。由于实际制作的光束采样光栅台阶轮廓是矩形而不是正弦形,存在很多高级次的衍射项,且实际加工的元件还有一定的加工误差,因此实际测得的+1 级项的采样效率比预期值偏低。

表 2 光束采样光栅各参数的测量值和预期值

Table 2 Measured and expected parameters of BSG

	Sample efficiency / %	Sample angle / rad	Sample focus length / m
Expected value	1.12	0.090	2.88
Measured value	0.42	0.085	2.85

4.2.3 结果分析

在惯性约束聚变终端光学系统中,激光束通过色分离光栅后,其 0 级衍射光(此时主要为 3 ω 光)作为光束采样光栅的入射光波。由于光束采样光栅的衍射损耗,3 ω 光在输出端的效率会有所降低。根据实际加工的光束采样光栅的参数,计算可得光束采样光栅对 3 ω 光的 0 级衍射效率预期值为 97.2%,则其衍射损耗为 2.8%,即集成光束采样光栅后,元件对 3 ω 光的 0 级衍射效率的预期值将比单独色分离

光栅的 0 级衍射效率下降 2.8%。由表 1 可知,集成光束采样光栅后 3ω 光的 0 级衍射效率实际下降了 2.9%,与计算值相吻合。本实验中,色分离光栅衍射效率的测量值与理论预期值之间尚存在差异,这主要是由于加工工艺条件的限制,使整个元件的蚀刻深度及蚀刻均匀性未能达到设计要求造成的。

与色分离光栅-光束采样光栅集成元件相比,分离元件色分离光栅和光束采样光栅的能量损耗主要来自于激光束经过两个未刻槽表面的反射损失和一个石英基片厚度的吸收损耗,即相当于激光束通过一个未刻槽的石英基片后的反射和吸收损失。由测得的基片透过率可得到 3ω 光经过一片石英基片后的反射吸收损耗为 $R = 9.5\%$,即对于分离元件色分离光栅和光束采样光栅而言,色分离光栅-光束采样光栅集成元件可以减少 9.5% 的能量损耗。

5 结 论

采用双面曝光的方法,制作了色分离光栅-光束采样光栅集成元件。实验数据表明,采用双面曝光法制作的色分离光栅-光束采样光栅集成元件,其各项性能参数均基本符合设计要求。实验数据与理论预期值之间的差异,主要受加工误差的影响,因此在元件制作时,尚需进一步改善加工工艺,提高加工精度。比较集成和未集成光束采样光栅时测得的色分离光栅衍射效率和谐波分离角度可以看出,集成光束采样光栅后,色分离光栅衍射效率的变化与激光通过分离元件时的变化一致,而谐波分离角度基本没有变化,同时光束采样光栅的各项性能参数也与设计值相吻合,说明采用双面曝光法制作色分离光栅-光束采样光栅集成元件是可行的,集成元件的性能满足惯性约束聚变驱动器的要求。

致谢 感谢中国科技大学国家同步辐射实验室、中国工程物理研究院以及四川大学分析测试中心为集成元件的加工制作、性能测量和石英基片透射率测量提供的帮助。

参 考 文 献

- 1 J. A. Britten, M. C. Rushford, L. Auyang *et al.*. Diffractive optics for the NIF [R]. UCRL-LR-105821-99-2, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1999. 125~134
- 2 T. H. Bett, R. M. Stevenson, M. R. Taghizadeh *et al.*. Diffractive optics development for application on high power solid state lasers [C]. *SPIE*, 1997, **2633**:129~140
- 3 S. N. Dixit, T. Parham, L. Auyang *et al.*. Large-aperture color-separation gratings for diverting unconverted light away from the national ignition facility target [R]. UCRL-LR-105821-98-1, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1998. 33~39
- 4 T. H. Bett, I. C. Smith. Diffractive beam samplers for large aperture beam diagnostics [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:445~452
- 5 James L. Hendrix, John Schweyen, Jeffrey Rowe *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems; examples from the NIF final optics assembly [R]. UCRL-JC-129754, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1998
- 6 Su Jingqin, Du Jinglei, Yao Jun *et al.*. Binary optical element for separating harmonic waves in ICF driver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3):405~409
栗敬钦,杜惊雷,姚 军等. 实现惯性约束聚变驱动器谐波分离的二元光学元件研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3):405~409
- 7 Gao Fuhua, Zeng Yangsu, Su Jingqin *et al.*. Study on tolerance of input wavefront aberration for color separation gratings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2):265~269
高福华,曾阳素,栗敬钦等. 色分离光栅对输入波前畸变宽容度的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2):265~269
- 8 J. A. Britten, S. M. Herman, L. J. Summers *et al.*. Manufacture, optical performance and laser damage characteristics of diffractive optics for the national ignition facility [C]. *SPIE*, 1999, **3578**:337~346
- 9 S. Dixit, J. Britten, R. Hyde *et al.*. Fabrication and application of large aperture diffractive optics [C]. *SPIE*, 2001, **4440**:101~108
- 10 Gao Fuhua, Zeng Yangsu, Xie Shiwei *et al.*. Using e-beam direct writing method to fabricate low-efficiency beam sampling grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):134~136
高福华,曾阳素,谢世伟等. 电子束直写制作低效取样光栅[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):134~136
- 11 Chai Liqun, Yang Liming, Xu Qiao. Vector theory analysis and numerical calculation for beam sampling grating used in ICF [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2):270~274
柴立群,杨李茗,许 乔. 用于 ICF 驱动器的取样光栅的矢量分析与计算[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2):270~274
- 12 Gao Fuhua, Cai Haitao, Su Jingqin *et al.*. Study on tolerance of fabrication errors for color separation gratings applied in ICF [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6):719~722
高福华,蔡海涛,栗敬钦等. 用于 ICF 激光驱动器的谐波分离器制作误差宽容度研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(6):719~722