

文章编号: 0258-7025(2003)02-0134-03

## 电子束直写制作低效取样光栅

高福华<sup>1</sup>, 曾阳素<sup>1</sup>, 谢世伟<sup>1</sup>, 郭永康<sup>1</sup>, 崔 铮<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学物理系, 四川 成都 610064; <sup>2</sup> 英国卢瑟福实验室)

**摘要** 低效取样光栅是激光取样技术的一种重要元件,它可以看成离轴的二相位的菲涅耳波带板。基于菲涅耳波带板的形成原理,对取样光栅的变周期环带结构进行了理论分析,推导出取样光栅的透过率函数。并在此基础上,采用电子束直写加工光栅掩模,制作取样光栅。该方法与一般的光学全息方法相比,具有设计灵活、重复性好、适于大批量生产等优点。

**关键词** 光学技术与仪器;低效取样光栅;电子束直写;菲涅耳波带板

**中图分类号** TH 741.6 **文献标识码** A

### Using E-beam Direct Writing Method to Fabricate Low-efficiency Beam Sampling Grating

GAO Fu-hua<sup>1</sup>, ZENG Yang-su<sup>1</sup>, XIE Shi-wei<sup>1</sup>, GUO Yong-kang<sup>1</sup>, CUI Zheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Physics Department of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)  
(<sup>2</sup>Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon OX11 0QX, U. K)

**Abstract** As one of the important optical technique in the field of laser sampling, low-efficiency beam sampling grating (BSG) is widely used in high power laser system. It is an off-axis, binary phase, Fresnel zone plate. In this paper, the principle of the variable period grating' formation process is analyzed perfectly and the transmissive function of the BSG is obtained. Based on the analysis, a new method is presented to fabricate the BSG with electron-beam direct writing. Compared with the holographic method, the new method is simpler, cheaper, and more efficient to manufacture elements on a large scale.

**Key words** optical technique and instrument; low-efficiency beam sampling grating; electron-beam direct writing; Fresnel zone plate

## 1 引言

在强激光系统中,激光参数诊断被称为系统总体集成实验的“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。系统诊断的主要对象有激光能量、功率、脉冲时间波形、空间分布、波前畸变等。根据不同的要求,需要采用合适的激光取样技术。低效取样光栅(BSG)是适用于整个波长范围的取样元件,它可应用于大口径光束的取样,在基本不影响主光

束的前提下,为激光能量、波前畸变的诊断提供取样光束。

低效取样光栅可看成一个离轴的二相位的菲涅耳全息波带板<sup>[1,2]</sup>,通过可变周期光栅的聚焦,从主光路中分离出取样光束,其衍射效率由光栅的深度决定。制作取样光栅的一般方法是用全息干涉曝光的办法在光致抗蚀剂上形成所需的光栅图案,再通过离子刻蚀或化学刻蚀的办法将图案传递到熔石英基片上<sup>[2,3]</sup>。此方法需要大面积、高质量全息平台,且每次制作都需要干涉曝光,操作复杂,重复性差,

收稿日期:2002-05-29;收到修改稿日期:2002-09-09

基金项目:国家 863 高技术 804 项目及光束控制重点实验室项目资助。

作者简介:高福华(1975—),男,四川大学物理系光学博士生,主要从事信息光学、微光学以及波前工程方面的研究。E-mail:mender\_gao@sohu.com

不适合大批量加工制作。

本文采用电子束直写的方法制作取样光栅,用计算机设计离轴的二相位菲涅耳波带板掩模数据,采用现今成熟的电子束直写技术加工掩模,借用集成电路生产工艺制作取样光栅。该方法设计灵活,操作简单,重复性好,适合大批量加工制作。

## 2 低效取样光栅的原理

低效取样光栅是一种位相型的变周期光栅,这种光栅结构能使取样光束从主光路中分离出来并聚焦,如图 1 所示。取样光栅的疏密程度决定了分离的角度,而它的取样效率由光栅深度唯一确定。

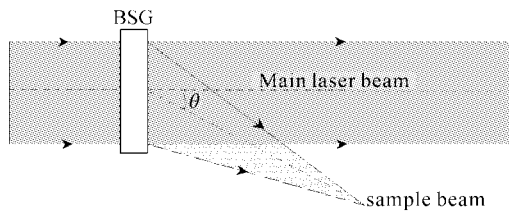


图 1 BSG 取样原理示意图

Fig. 1 Sampling principle of BSG

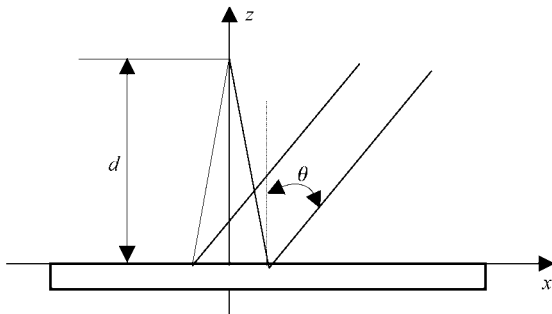


图 2 球面波与倾斜平面波干涉

Fig. 2 Interference between a spherical wave and a obliquely incident plane wave

取样光栅变周期的光栅结构,与离轴菲涅耳波带板结构相同,可以看成由平面波与球面波干涉形成,如图 2。

假设球面波中心距记录面距离为  $d$ ,平面波倾斜入射,与  $z$  轴成夹角  $\theta$ ,则在记录面上任意一点  $p(x, y)$  的干涉光强为

$$I(p) = I_0 + I_1 \cos \left\{ \frac{k}{2d} [(x + d \sin \theta)^2 + y^2] \right\} \quad (1)$$

其中波矢  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $I_0, I_1$  为光强常数。可知干涉图样是中心在  $(-d \sin \theta, 0)$  的一系列同心圆环。其  $m$  级亮环的半径为

$$\rho_m = \sqrt{2m\lambda d} \quad (2)$$

$m$  级暗环的半径为

$$\rho_m' = \sqrt{(2m+1)\lambda d} \quad (3)$$

其中  $m = 0, 1, 2, \dots$  随  $m$  的增加,亮暗环带的宽度越窄,环带越密。原点  $(0, 0)$  所在的环带级次为

$$m_0 = \text{int} \left( \frac{d \sin^2 \theta}{2\lambda} \right) \quad (4)$$

其中  $\text{int}(a)$  表示不小于  $a$  的最小整数。由(4)式可知,当  $d, \lambda$  一定时,分离角  $\theta$  越大,中心环带级次  $m_0$  越高,环带越密集。也就是说,环带的密集程度决定了光栅的取样分离角。将(1)式的强度分布转化为相位分布,即可得到取样光栅的透过率函数

$$t(x, y) = \exp \{ i\varphi \cos [(x + d \sin \theta)^2 + y^2] \} \quad (5)$$

其中  $\varphi$  为调制度参数,它与光栅的深度成正比。根据相位全息图的衍射效率公式,取样光栅的取样效率有如下关系<sup>[4]</sup>

$$\eta \propto |J_1(\varphi)|^2 \quad (6)$$

其中  $J_1$  表示一阶贝塞尔函数。因此,取样光栅的光栅深度决定其取样效率。

## 3 低效取样光栅的制作与实验结果

制作低效取样光栅需要完成两个图形传递过程,首先是将变周期的环带结构图形写在抗蚀剂上,其次是将抗蚀剂上的图形传递到石英基片上<sup>[5,6]</sup>。第二个传递过程通过干法或湿法化学蚀刻完成,不同的蚀刻方法形成不同的光栅槽形,例如采用反应离子蚀刻得到近矩形槽形,而采用离子束蚀刻得到近正弦形结构<sup>[1]</sup>。完成第一个传递过程有两种办法,一是采用光学全息曝光法,另一是掩模曝光法。

光学全息曝光将表面涂有抗蚀剂的石英基片置于球面波与平面波的干涉场中进行直接曝光,如图 3 所示。该方法能直接在抗蚀剂上形成理想的图

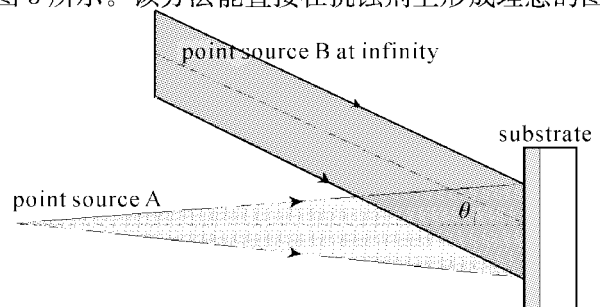


图 3 全息曝光制作 BSG

Fig. 3 Achieving the BSG pattern by exposing holographically

形,但它对光源和工作环境要求高,每次制作都需要干涉曝光,操作复杂,重复性差,不适合大批量加工制作。如果采用掩模曝光的方法,可以避免这些缺点,但一般集成电路工艺难以制作灰度连续变化的结构。因此,对取样光栅的连续光栅结构进行合理的近似,以便能采用掩模曝光这种简单实用的方法来制作BSG。

公式(5)中,取样光栅的相位是连续变化的,当参数 $\theta, d$ 比较大时,可以把连续余弦变化的相位近似看作二值变化的,这样透过率函数可表示为

$$t(x, y) = \begin{cases} \exp(i\varphi) & \rho_m' < \sqrt{(x + d\sin\theta)^2 + y^2} \leq \rho_m \\ 1 & \rho_m < \sqrt{(x + d\sin\theta)^2 + y^2} \leq \rho_{m+1}' \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\rho_m, \rho_m'$ 分别表示 $m$ 级亮环和暗环的半径,见公式(2),(3)。

公式(7)为数字化掩模设计提供了依据。根据不同的要求,只需调整参数 $\theta, d, \lambda$ ,就能设计合适的掩模数据,并采用电子束直写技术加工掩模<sup>[7,8]</sup>,借用集成电路生产工艺制作取样光栅。电子束直写加工掩模灵敏度高(线宽精度可以控制到100 nm以内),而且掩模一旦制作成功即可大批量生产光栅。

根据实验需要,采用计算机辅助设计的方法,得到所需的取样光栅掩模数据,并在英国卢瑟福实验室使用Leica EBML-300电子束直写系统加工铬板掩模,电子束能量为50 keV。掩模设计参数如下:图形区大小50 mm×50 mm,工作波长632.8 nm,焦距1000 mm,取样角度15°;掩模中心环带级次 $m_0 = 52929$ ,图形区共20450级环带,环带周期在2~3  $\mu\text{m}$ 之间。利用加工的铬板掩模,采取紫外接触曝光,离子束蚀刻的方法制作取样光栅,光栅深度90 nm,光栅周期2.5  $\mu\text{m}$ 。掩模的放大照片如图4,台阶仪测得光栅轮廓如图5。

用He-Ne激光器作光源,对取样光栅进行了验证性实验。实验结果如图6:取样效率2%±0.5%,焦距1000 mm±2 mm,分离角14.5°,可见与设计参数基本一致。

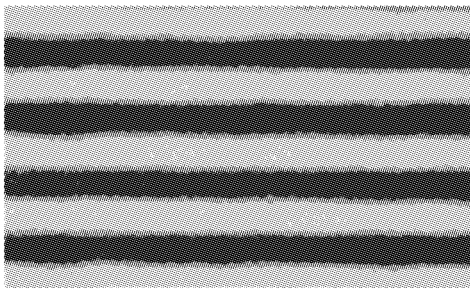


图4 电子束直写加工的BSG掩模

Fig. 4 Mask etched by EB direct writing

证性实验。实验结果如图6:取样效率2%±0.5%,焦距1000 mm±2 mm,分离角14.5°,可见与设计参数基本一致。

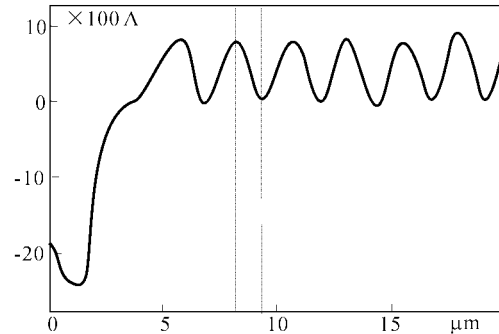


图5 BSG面型轮廓的测量结果

Fig. 5 Measurement of the BSG' profile

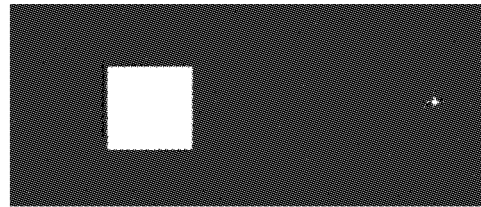


图6 BSG取样实验结果

Fig. 6 Result of sampling experiment using the BSG

## 参 考 文 献

- 1 T. H. Bett, I. C. Smith. Diffractive beam samplers for large aperture beam diagnostics [C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 445~452
- 2 J. A. Britter, R. D. Boyd. Low efficiency gratings for 3rd harmonic diagnostics application [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 121~128
- 3 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
- 4 Yu Meiwen. *Optical Holography and Information Processing* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1983 (in Chinese)
- 5 J. A. Britten, L. J. Summers. Multiscale, multifunction diffractive structure wet etched into fused silica for high-laser damage threshold applications [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(30): 7049~7054
- 6 S. Dixit, J. Britten, R. Hyde *et al.*. Fabrication and applications of large aperture diffractive optics [C]. *SPIE*, 2001, **4440**: 101~108
- 7 Chiou Tsann-Bim, Hahmann Peter. Evaluation of fine pattern definition with electron-beam direct writing lithography [C]. *SPIE*, 2000, **3997**: 646~657
- 8 Gao Feng, Zhu Jianhua, Huang Qizhong *et al.*. Computer-generated hologram fabricated by electron-beam direct-writing [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(6): 556~558 (in Chinese)