

利用严格模式理论分析光栅透镜的衍射特性*

唐雄贵 高福华 高峰 张怡霄 杜惊雷 郭永康

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘 要 光栅透镜因其独特的光学性能而具有广泛的应用。根据光栅透镜的线宽和间距微小渐变的特点,建立了光栅透镜的物理模型,并利用严格模式理论对其衍射特性进行分析。该方法物理概念清晰、公式简洁。对光栅透镜实现谐波分离、聚焦功能时的衍射效率与槽深关系的计算结果表明,其计算速度快、数值计算结果准确可靠。并对加工误差的影响进行了模拟计算,说明了在当前的微细加工的工艺水平条件下,能够制作出满足 ICF 系统要求的光栅透镜。实验上制作了尺寸为 $\phi 100$ mm 的大面积光栅透镜,其衍射效率的实验测试结果与理论计算结果一致。

关键词 衍射光学;严格模式理论;光栅透镜;光束取样

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

0 引言

衍射光栅具有线宽和间距不变的周期结构,而光栅透镜则是由一系列线宽和间距缓慢变化的弧线所组成,光栅透镜条纹的这种变化,使其同时具有衍射光栅的色散特性和透镜的聚焦特性,近年来,在高功率激光、光纤通讯、光谱学等领域有广泛的应用。1995 年 LLNL 实验室提出将光栅透镜用于惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)激光驱动器中光束诊断的取样元件^[1]。1999 年法国的 B. Touzet 等人提出将其用于 ICF 终端光学系统中,使其同时实现谐波分离、取样、聚焦三种功能,受到了广泛的关注^[2]。这是因为它将这三种功能集成于一体,减少了光学元件数量,从而可减少强激光通过系统的非线性相位延迟,提高了光学系统的整体性能,并降低了元件的制作费用。但是,ICF 系统对其所需光学元件的加工精度要求很高,而光栅透镜的尺寸大、条纹间距小,其特征尺寸与使用波长接近,且其宽度变化十分微小,必须对其结构参数和加工误差容限进行分析和优化,使用标量衍射理论进行计算分析时结果将不再准确,须寻求严格的电磁理论进行准确、快速的分析与设计。

基于严格电磁理论的方法主要有耦合波方法、严格模式理论、有限时域差分法、有限元法和边界元法等。有限时域差分法^[3]、有限元法^[4]和边界元法^[5]虽然能够对任意面形、任意折射率分布的非周期性光学元件进行数值计算模拟,但是其计算量大,尤其对于大尺寸衍射光栅,其数值计算时间将不堪忍受。耦合波方法^[6~8]和严格模式理论^[9,10]是目前

研究周期光栅衍射特性时使用最为广泛的方法,但不能简单地将其用于非周期性微光学结构。本文基于 ICF 所需光栅透镜的尺寸大、线宽渐变、特征尺寸小的特点,首先将光栅透镜划分成许多小分区,又因为其相邻线宽变化十分微小,可将每一分区看成为线宽间距不变的周期光栅,采用这种近似的物理模型,利用严格模式理论对其衍射特性进行分析,既保持了模式理论数值计算速度快的优点,又可获得满意的结果。

1 原理

如图 1(a),光栅透镜一般由一束平面波和一束球面波干涉曝光生成离轴全息抗蚀剂掩模,再通过

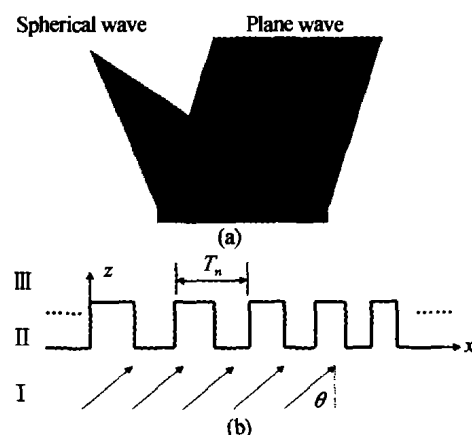


图 1 (a)离轴全息曝光原理;(b)光栅透镜部分截面图
Fig. 1 (a)Principle setup of off-axis holographic recording;
(b)Cross-section of part grating lens structure

离子束刻蚀制作而成,其刻线区由一系列的离轴同心环形二元台阶构成,在某一径向方向上其光栅区域的横截面如图 1(b),其第 $n-1$ 台阶与第 n 台阶间距为

$$T_n = \sqrt{z_0 \lambda} (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \quad (1)$$

其中 z_0 表示光栅透镜的焦距。对于面积大小为

*国家自然科学基金(10376019)资助课题

Tel: 028-85412983 Email: txgjly@sohu.com

收稿日期: 2004-04-26

50 mm×50 mm、焦距为 1 m, 聚焦光束中心偏离角为 15°的光栅透镜, 其环带数为 20450 条, 最小线宽为 2.254 μm, 由式(1)可得相邻线宽的变化小于 10⁻⁴ μm^[11]. 光栅透镜相邻条纹线宽的变化很小, 可将其刻线区域分成 J 个分区域, 并将每个分区域视作周期光栅, 其第 j 分区域的等效周期 T^j 的大小由光栅方程决定, 即

$$T^j = \lambda / (\sin \theta + \sin \theta^j) \quad (2)$$

式中 θ, θ^j 分别表示入射角和第 j 分区域 -1 级衍射光束的衍射角. 光栅透镜在某一级衍射效率 η 与所有分区域的对应级次的衍射效率 η_j 的关系为

$$\eta = \frac{1}{A_j} \sum_{j=1}^J \eta_j \Delta s_j \quad (3)$$

式中 η, η_j 分别表示整个光栅透镜和第 j 分区域的衍射效率, A 为整个光栅透镜的面积, Δs_j 为第 j 分区域的面积.

现简单分析第 j 个区域的等效周期为 T^j 的光栅的衍射效率. 波长为 λ 的平面波由 I 区入射到光栅, 入射角为 θ , 入射平面在 xz 平面内. 由于 TE 波和 TM 波没有互相耦合, 故将入射平面波分别表示为:

TE 波

$$\begin{cases} E_{inc} = e_y E_{y0} \exp [ik_0(\alpha_0 x + \gamma_0 z)], \\ (\alpha_0 = \sin \theta, \gamma_0 = \cos \theta, \sigma = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}) \\ H_{inc} = (e_x \alpha_0 - e_z \gamma_0) E_{y0} \cdot \\ \exp [ik_0(\alpha_0 x + \gamma_0 z)] / \sigma \quad (k_0 = 2\pi/\lambda) \end{cases} \quad (4)$$

TM 波

$$\begin{cases} E_{inc} = (e_x \alpha_0 - e_z \gamma_0) H_{y0} \exp [ik_0(\alpha_0 x + \gamma_0 z)] \\ H_{inc} = e_y H_{y0} \exp [ik_0(\alpha_0 x + \gamma_0 z)] / \sigma \end{cases} \quad (5)$$

将每一分层中的电磁场用傅里叶模级数展开为^[9]

$$[\sigma E; H]_l = \sum_m [E_{zm}, E_{ym}, E_{zm}; -H_{zm}, H_{ym}, H_{zm}]_l \exp \{ik_0[\alpha_m x + \gamma(z-z_l)]\} \quad (6)$$

式中 l 代表光栅水平分层号, m 代表傅里叶模编号. $\alpha_m = \alpha_0 + m\lambda/T^j$, $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$. 而 γ 是待求的未知量, 表征波矢量的 z 分量. 对于 TE 波, E_x, E_z 和 H_y 等于零; 而对于 TM 波, H_x, H_z 和 E_y 等于零. 由于电磁场 TE 波和 TM 波不互相耦合, 可分别单独求解其电磁基本模式场.

同理, 将对应每一分层的介电常数 $\epsilon(x)$ 展开为

$$\epsilon(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \epsilon_m \exp (i2\pi m x / T^j) \quad (7)$$

另外, 当在分层中的介电常数 $\epsilon(x)$ 在 x 方向为有限间断点的非连续函数时, 须采用“逆规则”傅里叶因式分解法以提高其收敛速度^[12]. 将式(6)、(7)代入麦克斯韦方程组中得到其矩阵方程组^[9]

TE 波

$$\{[\epsilon] - \alpha^2\} E_y = \gamma^2 E_y, H_x = \gamma E_y, H_z = \alpha E_y \quad (8)$$

TM 波

$$\{I - \alpha[\epsilon]^{-1}\alpha\} H_y = \gamma^2 [\epsilon^{-1}] H_y, E_x = \gamma[\epsilon^{-1}] H_y, E_z = [\epsilon]^{-1}\alpha H_y \quad (9)$$

式中, $[\epsilon]_n = (T)^{-1} \int \epsilon(x) \exp[-i2\pi(T)^{-1}(r-s)x] \cdot dx$, r, s 为整数. 通过求解该矩阵方程, 可得到其对应分层中的本征值 γ'_e, γ'_h 和本征矩阵 e'_e, h'_e , 该分层中的电磁场的通解等于这些模式场解的线性叠加, 即

TE 波

$$E_y^l = e'_e \exp(ik_0 \alpha x) \{ \exp [ik_0 \gamma'_e(z-z_l)] u_+^l + \exp [-ik_0 \gamma'_e(z-z_l)] d_+^l \} \quad (10)$$

TM 波

$$H_y^l = h'_e \exp(ik_0 \alpha x) \{ \exp [ik_0 \gamma'_h(z-z_l)] u_+^l + \exp [-ik_0 \gamma'_h(z-z_l)] d_+^l \} \quad (11)$$

电磁场 TE 波和 TM 波的其他分量可以通过式(8)、(9)的后面两个矩阵方程求解. 振幅系数列矩阵 u_+^l 和 d_+^l 由边界条件匹配确定, 在第 l 层下界面 z_l 处的边界条件

$$\begin{bmatrix} E_y^l \\ H_y^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_y^{l+1} \\ H_y^{l+1} \end{bmatrix} \quad (\text{在 } z=z_l \text{ 处}) \quad (12)$$

对式(10)、(11)中的振幅系数的列矩阵 u_+^l 和 d_+^l 的求解, 已有许多种递推算法可提高计算速度和稳定性, 其中 S-矩阵算法和反射透射系数阵算法(RTCM)算法因在数值计算方面的优点而应用甚为广泛, 本文采用后者, 该方法的详细分析请参见文献[9].

由于入射波已知, 各分层的反射透射系数阵已求出, 所以第 j 个区域光栅的反射、透射振幅系数阵已完全确定. 根据反射率和透射率的定义, 就可求出对应级次的衍射效率 η_j . 同理, 容易求出其他区域在焦点处的衍射效率, 然后利用式(3)得到整个光栅透镜的衍射效率.

2 数值模拟与实验

为了说明上述方法的正确性, 首先我们通过比较的方法予以检验. 文献[2]报道, 1999年, B. Touzet 等人为法国的 LMJ 系统成功制作出了大尺寸的光栅透镜, 以同时实现聚焦, 谐波分离与取样功能. 光栅透镜参量为: 尺寸 150 mm×150 mm, 厚度 10 mm, 焦距 2.4 m, 光栅槽深 700 nm, 数值孔径 1/16, 入射角为 25°, 使用波长 351 nm. 将光栅透镜均匀分成 300 个分区域, 利用本文所述方法对其 -1 级 TE 波和 TM 波的衍射效率进行数值模拟, 计算结果如图 2, 它与文献[2]所模拟结果一致, 这间接证明了本文方法在解决线宽渐变光栅问题时的有效

性与正确性. 另外,在数值模拟时把光栅区域分别分成 200、300、400 个分区域,其计算结果基本不变,这是由于光栅线宽变化非常缓慢所致.

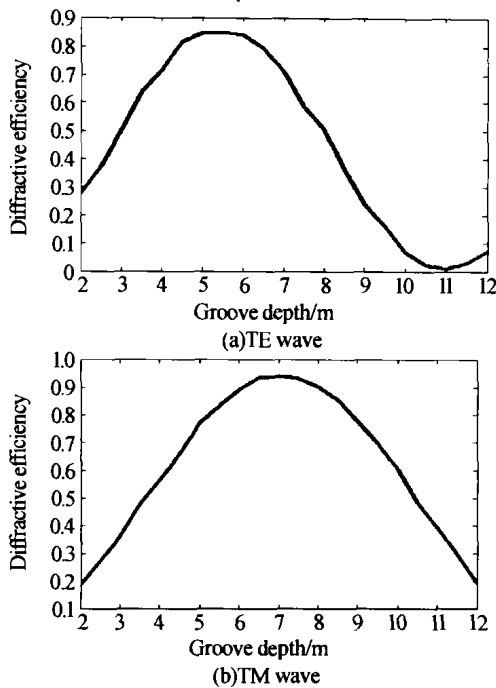


图 2 聚焦透射光栅衍射效率随光栅槽深的变化
Fig. 2 Diffractive efficiency of focus transmission grating with different groove depth

现在对光栅透镜用于 ICF 系统中的光束取样的取样效率进行分析. 假设其参量为: 尺寸 300 mm×300 mm, 焦距 1.0 m, 入射角为 0°, 取样光束中心偏离角为 15°, 光栅槽深为 40 nm, 光栅区占宽比为 0.5, 使用波长 351 nm. 利用本文的方法对其衍射效率进行了计算模拟, 得到其 -1 级的取样效率为 1.28%.

光栅透镜用作光束取样时其取样效率要受到加工误差的影响. 现在分析光栅槽深、占宽比、台阶边沿陡度误差对衍射效率的影响, 从而可根据取样效率的设计要求, 以确定制作误差的宽容度. 模拟计算结果如图 3, 其中图 3(a) 表明取样效率随光栅槽深的增加而缓慢增加, 且近似成线性关系发生变化, 这种线性关系对于其制作工艺是有利的; 图 3(b) 表明取样效率随占宽比先缓慢的增加、后缓慢降低; 图 3(c) 表明取样效率的大小基本不受光栅台阶边沿陡度的影响, 原因是由于此光栅槽深很浅, 其台阶边沿陡度的变化对光栅面形影响很小. 该数值模拟表明, 光栅槽深、占宽比、光栅台阶边沿陡度对光栅透镜的衍射效率的影响比较小, 尤其光栅台阶边沿陡度变化对其衍射效率的影响可忽略, 所以, 在当前的微细加工的工艺水平条件下, 能够制作出满足 ICF 系统要求的光栅透镜.

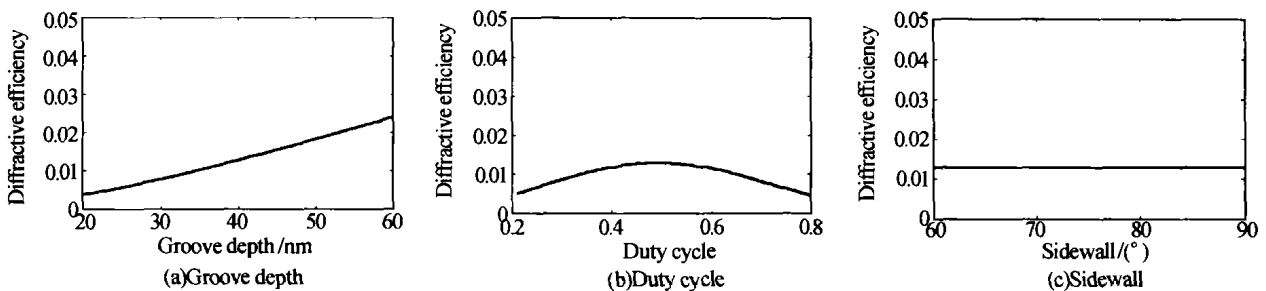


图 3 衍射效率与制作宽容度的关系
Fig. 3 Relationship between diffractive efficiency of sampling beam and fabrication error

我们采用光学全息曝光和反应离子刻蚀方法制作了尺寸 $\phi 100$ mm、用于光束取样的光栅透镜, 其原子力显微镜所测得的三维轮廓如图 4, 其光栅槽深约 58 nm. 用 He-Gd 激光($\lambda=441.6$ nm)作为入射光, 测量结果如下: 取样焦距 $f=2250$ mm, 取样角度 $\theta=13.5^\circ$, 取样效率 $\eta=1.9\%$. 采用本文方法进行数值计算, 其取样效率为 1.7%. 由此可见, 实

验测量结果与模拟结果是吻合的.

3 结论

光栅透镜同时具有衍射光栅的色散特性和透镜的聚焦特性, 在高功率激光、光纤通讯、光谱学等领域有广泛的应用, 是目前光栅领域的又一研究热点. 本文根据光栅透镜的线宽和间距微小渐变的特点, 建立了光栅透镜的物理模型, 然后利用严格模式理论对其衍射特性进行分析. 该方法物理概念清晰、公式简洁、计算速度快. 通过对文献[2]报道所制作出了大尺寸的光栅透镜的衍射效率的计算模拟, 间接验证了本文的方法的有效性和正确性. 对用于 ICF 系统中作光束取样时光栅透镜的衍射效率受加工误差的影响进行了数值模拟, 模拟结果表明, 在当前的微细加工的工艺水平条件下, 能够制作出满足 ICF 系统要求的光栅透镜. 利用光学全息和反应离

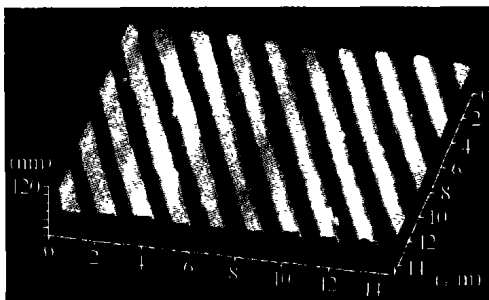


图 4 光栅透镜的原子力显微三维图
Fig. 4 3-D profile of grating lens with AFM

子刻蚀方法制作了尺寸为 $\phi 100$ mm 的大面积光栅透镜,其衍射效率的实验测试结果与理论计算结果一致.利用严格模式理论分析大尺寸光栅透镜的衍射特性,不仅有效推广了该方法的使用范围,而且为分析非周期光栅的衍射特性提供了一种新的途径.

清华大学精密仪器系李立峰教授与本文作者之一进行了讨论,提出了十分宝贵的意见,在此谨致谢意.

参考文献

- 1 Britten, Jerald A, Boyd, *et al.* Low-efficiency gratings for third-harmonic diagnostics applications. *SPIE*, 1995, **2633**:121~128
- 2 Touzet B, Flamand J, Thevenon A, *et al.* Focusing transmission grating for high energy lasers. *SPIE*, 1999, **3492**:426~436
- 3 Mirotznik M S, Prather D W, Mait J N, *et al.* Three-dimensional analysis of sub-wavelength diffractive optical elements with the finite-difference time-domain method. *Appl Opt*, 2000, **39**(17):2871~2880
- 4 Ohkawa Y, Tsuji Y, Koshiha M. Analysis of anisotropic dielectric grating diffraction using the finite-element method. *J Opt Soc Am A*, 1996, **13**(5):1006~1012
- 5 Prather D W. Design and application of sub-wavelength diffractive lenses for integration with infrared photo-detectors. *Opt Eng*, 1999, **38**(5):870~878
- 6 陈德伟, 王炜, 李永平. 用于 ICF 的分频光栅的耦合波分析. *光子学报*, 2002, **31**(4): 433~437
Chen D W, Wang W, Li Y P. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 433~437
- 7 杨春林, 许乔, 周礼书, 等. 用耦合波法分析平面镀膜分频光栅的特性. *光子学报*, 2004, **33**(6): 751~754
Yang C L, Xu Q, Zhou L S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 751~754
- 8 曹召良, 卢振武, 李凤有, 等. 亚波长介质光栅的制作误差分析. *光子学报*, 2004, **33**(1):76~80
Cao Z L, Lu Z W, Li F Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):76~80
- 9 唐雄贵, 傅克祥, 王植恒, 等. 任意各向异性介质光栅的严格模式理论分析. *光学学报*, 2002, **22**(7): 774~779
Tang X G, Fu K X, Wang Z H, *et al.* *Acta Optic Sinica*, 2002, **22**(7):774~779
- 10 Li Lifeng. Multilayer modal method for diffraction gratings of arbitrary profile, depth and permittivity. *J Opt Soc Am A*, 1993, **10**(12):2581~2591
- 11 Gao Fuhua, Zeng Yangsu, Xie Shiwei, *et al.* Fabrication of beam sampling gratings with electron-beam direct writing. *SPIE*, 2002, **4659**:413~419
- 12 Li Lifeng. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures. *J Opt Soc Am A*, 1996, **13**(9): 1870~1876

Analysis of Diffractive Properties of Grating Lens by Using Rigorous Model Theory

Tang Xiongui, Gao Fuhua, Gao Feng, Zhang Yixiao, Du Jinglei, Guo Yongkang

Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064

Received date:2004-04-26

Abstract Grating lenses have been widely applied to various optical system because of their special optical characteristics. Theoretically, the grating lens is subdivided into smaller sub-areas in this paper, and every sub-area is regarded as periodic micro-structure, according to lightly variance of adjacent linewidth. Rigorous modal theory is used for analyzing their diffractive properties in sequence, and finally total diffractive efficiency of grating lenses can be easily obtained. Numerical simulation is performed to calculate diffractive efficiency of grating lens, which is used for beam sampling and harmonic separation in high energy laser system. It shows that results computed by the method in this paper are accurate and valid. In addition, fabrication-process-tolerance effects on diffractive efficiency are also discussed. In experiment, a beam sampling grating with diameter 100 mm was fabricated, and its experimental diffractive efficiency is consistent with result calculated by the method in this paper.

Keywords Diffractive optics; Rigorous modal theory; Grating lenses; Beam sampling

Tang Xiongui was born in Shaoyang, Hunan Province, in 1974. He received the M. S. degree in optics from Physics Department of Sichuan University in 2002. Now he is a Ph. D. candidate in Physics Department, Sichuan University. His current interests include design and modeling of diffractive grating lithography for thick film photoresist.

