

亚波长多台阶结构大角度激光分束器设计

陈 琪^{1,2} 李国俊¹ 方 亮¹ 周崇喜¹

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 分束角度是衍射型激光分束器件重要性能指标之一。目前对大角度衍射分束元件的研究局限于 Dammann 光栅, Dammann 光栅依靠周期内相位突变点对入射光波进行调制, 其分束均匀性对突变点精度非常敏感, 现有加工技术无法满足设计精度的要求。针对这一问题, 提出利用亚波长多台阶结构来实现大角度的激光分束, 给出了一个 1×16 , 入射光波长 $1.55 \mu\text{m}$, 衍射角 29° 的 16 台阶亚波长分束光栅设计实例。设计时利用标量理论获得一个多台阶结构作为初值, 经严格耦合波理论结合遗传算法进行矢量优化后衍射效率达到 89%, 均匀性误差为 4.53%。结果表明, 亚波长多台阶结构能够实现大角度、高衍射效率以及高均匀性的激光分束。

关键词 光栅; 亚波长; 多台阶结构; 大角度激光分束; 严格耦合波理论

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0205006

Design of Wide-Angle Laser Beam Splitter with Sub-Wavelength Multi-Level Structure

Chen Qi^{1,2} Li Guojun¹ Fang Liang¹ Zhou Chongxi¹

¹State Key Laboratory of Optical Technologies for Nano-Fabrication & Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Splitting angle is one of the significant performance parameters of diffractive laser beam splitter. Current study of wide-angle diffractive beam splitter mainly focuses on Dammann grating. Dammann grating relies on its periodic transition points to modulate the incident optical wave, however the inhomogeneity of outgoing beams is extremely sensitive to the precision of transition points, and the existing processing technology cannot meet the requirement of design accuracy. So, using a sub-wavelength multi-level structure to achieve wide-angle beam splitting is put forward and an actual design example of sub-wavelength 16 levels grating is given, whose incident wavelength is $1.55 \mu\text{m}$, beam splitting number is 16 and diffraction angle is 29° . Getting an initial structure by scalar diffraction theory and then applying rigorous coupled-wave analysis and genetic algorithm to do a vector optimization, finally the diffraction efficiency rises to 89%, inhomogeneity drops to 4.53%. The results indicates that sub-wavelength multi-level structure can achieve wide-angle beam splitting with high diffraction efficiency and homogeneity.

Key words gratings; sub-wavelength; multi-level structure; wide-angle laser beam splitting; rigorous coupled-wave analysis

OCIS codes 050.1940; 050.1950; 050.1960; 050.6624

1 引言

衍射光学元件(DOE)在光刻、光通信、数据处理、激光测量、激光雷达成像、光谱技术等领域有广泛的应用^[1-4]。激光分束器就是一种典型的衍射光学元件, 它将一束入射激光分为多束激光出射^[5]。对激光分束器,

收稿日期: 2015-09-07; 收到修改稿日期: 2015-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(61575200)

作者简介: 陈 琪(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事衍射分束器件方面的研究。E-mail: chenqichenjun@163.com

导师简介: 周崇喜(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事微纳光学激光光束整形变换方面的研究。

E-mail: cxzhou@ioe.ac.cn(通信联系人)

除了要求高衍射效率和良好的均匀性,有时还要求对入射激光进行大角度分束^[6]。根据光栅方程可知,光栅周期越小,衍射角越大,因此必须设计小周期的衍射器件,才能实现大角度分束。当衍射光学元件的最小特征尺寸下降到波长甚至亚波长量级时,用标量衍射理论设计将带来很大的误差。因此对小周期大角度分束的衍射光栅,需要考虑光波传输的矢量特性,采用矢量衍射理论进行设计^[7-8]。矢量分析方法包含有限元法、边界元法、严格耦合波理论(RCWA)、模式法及时域有限差分法,相对于其他几种矢量方法,严格耦合波理论计算量小,适用于分析周期性的光栅结构^[9-10]。

目前,一维相位分束光栅主要的面形结构有连续相位型、二值相位型和多台阶相位型。美国桑迪亚国立实验室提出了连续面形衍射分束光栅的数学优化模型,该数学模型基于传统的标量衍射理论,在小周期时误差较大。并且连续相位型分束光栅结构非常复杂,不利于加工^[11]。二值相位型分束光栅典型的结构形式为 Dammann 光栅^[12]。Dammann 光栅结构简单,参数少,易于设计,采用矢量的严格耦合波理论设计亚波长 Dammann 光栅,能够得到很高的衍射效率与均匀性,并实现大角度分束^[13]。但是 Dammann 光栅设计时往往将归一化相位突变点精度精确到小数点后五位,如果光栅周期为 50 μm,那么要保证小数点后 5 位的设计精度,需要将加工误差控制在 0.5 nm 以下,以目前的技术是无法做到的^[14]。相比连续相位型光栅,多台阶相位型光栅结构简单,易于加工;相比 Dammann 光栅,多台阶相位型光栅有更大的误差容限。因此本文提出用矢量的严格耦合波理论以及遗传算法(GS)设计亚波长多台阶光栅,来实现大角度激光分束。

2 基本原理

2.1 多台阶衍射分束光栅工作原理

多台阶衍射分束光栅一般由若干个相位单元构成,这些单元组成单台阶或多台阶结构,其工作机制是基于衍射和干涉原理,典型的光路如图 1 所示。入射光照射到多台阶衍射分束光栅上时,各个相位单元会产生明显的衍射作用,经过透镜会聚,各单元的衍射光在输出面上干涉,形成干涉图像。通过调制各个单元的相位,可以在输出面上获得需要的光强分布。

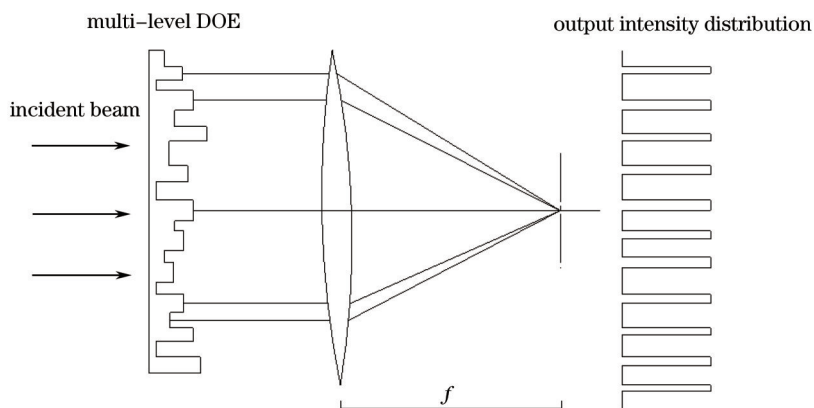


图 1 多台阶衍射分束光栅示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-level diffraction laser beam splitter

2.2 多台阶衍射分束光栅的标量设计理论

设计多台阶衍射分束光栅,其实是设计光栅的相位分布,然后将求得的相位台阶化得到多台阶结构。以图 2 所示的一维 8 台阶分束光栅为例,设光栅周期为 Λ ,光栅高度为 d ,光栅介质折射率为 n_2 ,空气介质折射率为 n_1 ,台阶数为 L ,周期内相位单元数为 N ,最小线宽 $d_x = \Lambda/N$ 。要对入射光产生最大为 2π 的相位调制,则台阶总高度 $d = \lambda/(n_2 - n_1)$, λ 为入射光波长。单层台阶高度 $d_1 = d/L$,代表 $\Delta\varphi = 2\pi/L$ 的相位调制。周期内 N 个相位单元的高度 $d_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 为单层台阶高度的 l_n 倍,其中 $0 \leq l_n \leq L$ 为整数,代表 N 个相位调制,整个周期对入射光产生的相位作用可用离散化函数 $\varphi(x)$ 表示为

$$\varphi(x) = \varphi_n = l_n \Delta\varphi, \quad (n-1)d_x < x < nd_x, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 x 为水平方向坐标,设入射前光场为 $E_1(x)$,经过多台阶分束光栅的相位调制作用后,出射光场为

$$E_2(x) = E_1(x) \exp[j\varphi(x)]. \quad (2)$$

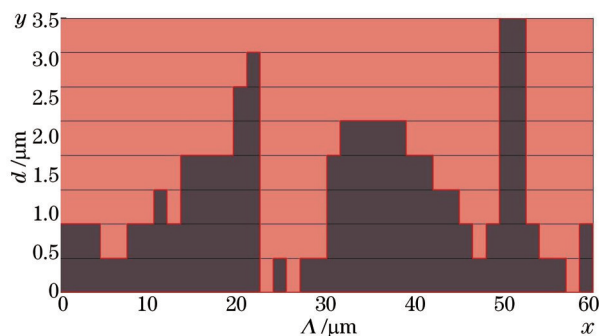


图2 8台阶分束光栅周期内结构分布

Fig.2 Structure distribution of eight levels laser beam splitter in a period

由菲涅耳衍射积分公式,可求得出射场经过 z 距离传输后的场分布^[15]为

$$E_{out}(x_{out}) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_2(x) \cdot \exp\left(\frac{jk}{2z}x^2\right) \cdot \exp\left(-\frac{jk}{z}x_{out}x\right) dx, \quad (3)$$

式中忽略了积分项前的复数因子, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢大小。

2.3 多台阶衍射分束光栅的严格耦合波设计理论

对图2所示多台阶光栅第1层在 x 方向做周期性展宽,一束TE偏振光以任意角度 θ 入射,入射波矢量所在平面与 xoy 平面夹角为 0° ,空气介质相对介电常数为 ε_1 ,光栅介质相对介电常数为 ε_2 。该光栅层相对介电常数可以用周期函数 $\varepsilon(x)$ 表示为

$$\varepsilon(x) = \begin{cases} \varepsilon_2, & x \in \text{dielectric} \\ \varepsilon_1, & x \in \text{air} \end{cases}, \quad (4)$$

对 $\varepsilon(x)$ 做傅里叶级数展开,即

$$\varepsilon(x) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} \varepsilon_h \exp(j2\pi hx/\Lambda), \quad (5)$$

式中 ε_h 为相对介电常数傅里叶展开时的第 h 级分量,则

$$\varepsilon_h = \frac{1}{\Lambda} \int_0^T \varepsilon(x) \exp(-j2\pi hx/\Lambda) dx. \quad (6)$$

入射电场 E_{in} 表示为

$$E_{in} = \exp[-jk n_1(x \sin \theta + y \cos \theta)], \quad (7)$$

则入射区电场 E_{inc} 和出射区电场 E_{out} 分别为

$$E_{inc} = E_{inc} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi}x - k_{1,yi}y)], \quad (8)$$

$$E_{out} = \sum_i T_i \exp\{-j[k_{xi}x - k_{2,yi}(y - d_i)]\}, \quad (9)$$

式中 R_i 是反射到入射区的 i 次反射波振幅, T_i 是透射到出射区的 i 次透射波振幅,

$$k_{xi} = k[n_1 \sin \theta - i(\lambda/\Lambda)], \quad (11)$$

$$k_{l,yi} = \begin{cases} +k[n_l^2 - (k_{xi}/k)^2]^{1/2}, & kn_l > k_{xi} \\ -jk[(k_{xi}/k) - n_l^2]^{1/2}, & k_{xi} > kn_l \end{cases}, \quad l = 1, 2. \quad (12)$$

在光栅区域,切向电场 E_g 和磁场 H_g 可做傅里叶级数展开,即

$$E_g = \sum_i S_i(y) \exp(-jk_{xi}x), \quad (13)$$

$$H_g = -j \left(\frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \sum_i U_i(y) \exp(-jk_{xi}x), \quad (14)$$

式中 ε_0 、 μ_0 是真空中介电常数和磁导率, S_i 、 U_i 是 i 级空间谐波场的归一化振幅矢量大小,将其代入麦克斯韦方程组,可以求得 S_i 、 U_i ,再将 S_i 、 U_i 代入光栅区域电磁场表达式,并根据边界 $y=0$ 处和 $y=d_i$ 处电磁场切向分量连续可得一组方程,解这个方程组即可求出各级出射光电场振幅^[16]。

3 设计与分析

以16台阶,1×16分束的亚波长大角度衍射分束光栅为例,详细介绍其设计过程。设计结果的优劣用衍射效率 η 与均匀性误差 ω 来评价^[17],即

$$\eta = \frac{I_{\text{need}}}{I_{\text{all}}}, \quad \omega = \frac{\max(I_{\text{need}}) - \min(I_{\text{need}})}{\max(I_{\text{need}}) + \min(I_{\text{need}})}, \quad (15)$$

式中 I_{need} 、 I_{all} 分别代表所需衍射级次光强以及所有衍射级次光强。

3.1 获取优化初值

多台阶分束光栅周期内相位单元数 N 通常取分束数的3倍以上,对本例1×16分束台阶光栅, N 取分束数的4倍,即 $N=64$ 。由于设计参数过多,直接用严格耦合波理论结合遗传算法进行优化难以得到好的结果。因此先用标量衍射理论设计一个初始结构,作为矢量优化的初值。设计采用相位恢复GS算法,入射光波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$,空气介质折射率 $n_1=1$,熔石英介质折射率 $n_2=1.444$ 。设计得到的衍射效率 $\eta=93.5\%$,均匀性误差 $\omega=6.5\%$ 。由于采用标量理论设计,该设计结果只在周期很大时具有很高的精度,当周期下降时,误差将会增大。分别取周期 $T_1=640 \mu\text{m}$,相邻衍射级角间距 $\theta'_0=0.139^\circ$,衍射角 $\theta_1=\theta'_0 \times 15=2.09^\circ$,周期内最小线宽 $d_{x1}=10 \mu\text{m}$;周期 $T_2=46 \mu\text{m}$,相邻衍射级角间距 $\theta'_2=1.93^\circ$,衍射角 $\theta_2=\theta'_2 \times 15=29^\circ$,周期内最小线宽 $d_{x2}=0.72 \mu\text{m}$ 。在这两个不同的周期条件下用严格耦合波理论对设计结果进行矢量验证,周期为 T_1 时,矢量验证衍射效率 $\eta_1=92.7\%$,均匀性误差 $\omega_1=8.0\%$,周期为 T_2 时,衍射效率 $\eta_2=85.5\%$,均匀性误差 $\omega_2=60\%$,结果如图3所示。

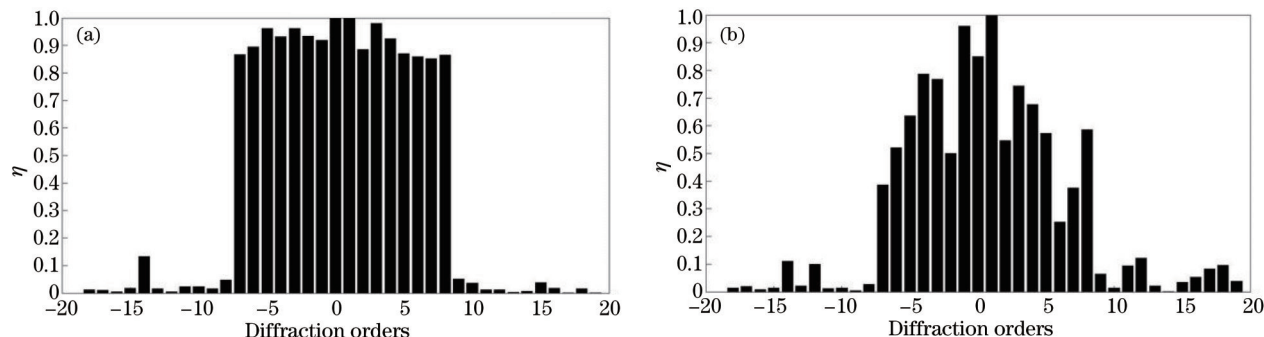


图3 不同周期下衍射效率分布。(a) $T=640 \mu\text{m}$; (b) $T=46 \mu\text{m}$

Fig.3 Diffraction efficiency distribution in different periods. (a) $T=640 \mu\text{m}$; (b) $T=46 \mu\text{m}$

可见,标量衍射理论只适用于光栅最小特征尺寸远远大于波长的情况。要设计亚波长多台阶结构的分束光栅,需要借助于矢量衍射理论。

3.2 矢量优化与建模仿真

基于二元光栅的严格耦合波理论分析法以及改进的透射矩阵法^[18-20],在Matlab数值计算软件上编写RCWA程序包,对多台阶结构分束光栅分层计算,可以得出任意多台阶结构分束光栅的衍射效率和均匀性误差。以3.1节中标量理论设计的结构为初始相位值,在 $T_2=46 \mu\text{m}$ 周期下用遗传算法调用RCWA程序进行数值优化。初始相位记为 p_0 ,遗传算法产生的初始群体记为 ν , ν 为包含多个相位个体的种群,实际用于计算的多台阶相位结构 p 为

$$p = p_0 + \kappa \cdot \nu, \quad (16)$$

式中 κ 为经验系数。在遗传算法中,每一代种群中个体遗传到下一代的概率与个体适应度大小成正比。因为分束光栅的要求是衍射效率高和光束均匀性误差小,所以定义目标函数为

$$f(\nu) = \alpha \cdot (1 - \eta) + \beta \cdot \omega, \quad (17)$$

式中 α 、 β 为加权系数。显然,目标函数值越小,个体相位越优,适应度越大。具体流程如图4所示。

优化后的多台阶结构计算衍射效率 $\eta_3=89\%$,均匀性误差 $\omega_3=4.53\%$,光栅结构如图5所示。

为进一步验证设计结果的准确性,用矢量计算软件GSolver对该光栅衍射情况进行仿真计算,得到衍射效率 $\eta_4=89\%$,均匀性误差 $\omega_4=4.57\%$ 。采用Matlab编程计算的结果与GSolver软件计算结果对比如图6所示。

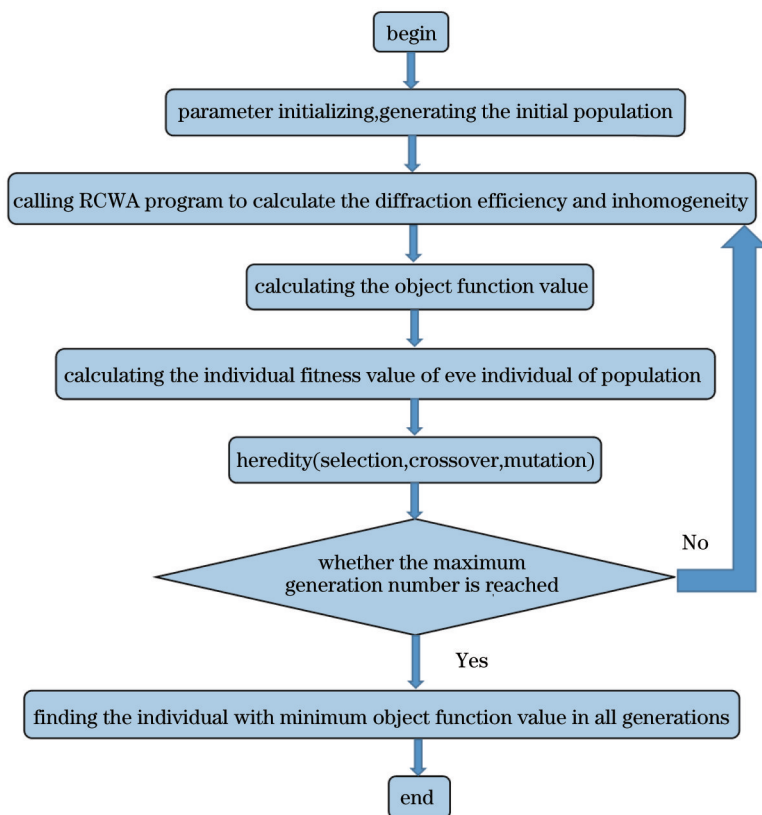


图4 遗传算法矢量优化流程图

Fig.4 Flow process diagram for vector optimization of genetic algorithm

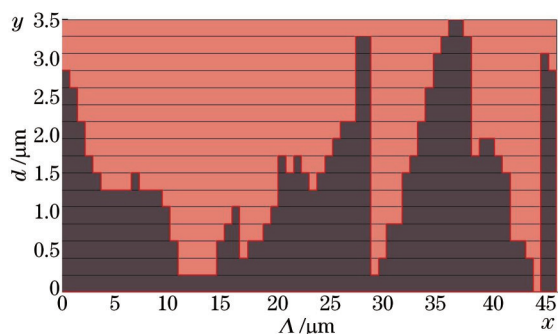


图5 矢量优化后的16台阶衍射分束光栅结构

Fig.5 Structure of 16 levels diffraction laser beam splitter after vector optimization

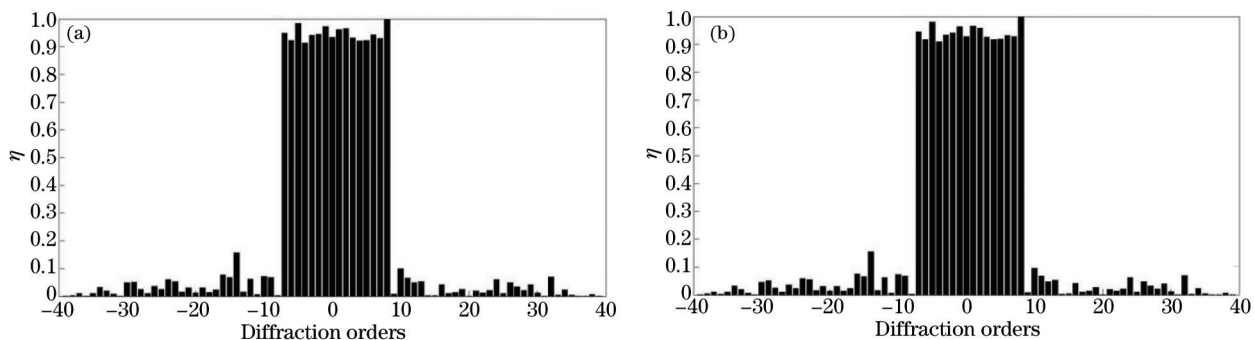


图6 Matlab 编程计算的衍射效率分布与GSolver 仿真计算的结果。(a) Matlab; (b) GSolver

Fig.6 Diffraction efficiency distribution calculated in Matlab and GSolver. (a) Matlab; (b) GSolver

从图中对比可以知道,设计的光栅结构在Matlab上编程计算得到的衍射分布情况与用GSolver软件仿真

计算的结果几乎一致,验证了设计的准确性。

3.3 设计结果分析

设计衍射光学元件时,一般只考虑输出面的光强分布,如图1所示,入射光经过输入平面上的衍射光学元件调制后,发生衍射并传播到达输出平面上。对标量衍射理论来说,是将多台阶光栅看作是一个无限薄的纯相位元件,它对入射激光只产生相位调制作用。设计的关键就是寻找最优的相位分布,使得在输出平面上的光强分布与预期的理想光强分布尽可能接近。从3.1节设计结果可以看出,用标量衍射理论设计的多台阶光栅结构,其最小线宽取 $10\ \mu\text{m}$,即6.45个波长时,与矢量的严格耦合波理论计算的结果非常接近,这说明当多台阶分束光栅的最小特征尺寸远远大于波长时,标量衍射理论具有很高的近似精度。一般认为光栅最小特征尺寸大于5个波长时,标量衍射理论可以看作是精确的。而当光栅最小特征尺寸下降到接近波长甚至达到亚波长量级时,标量衍射理论不再适用。同样的多台阶结构,其最小线宽取 $0.72\ \mu\text{m}$,即0.46个波长时,标量衍射理论计算的结果和矢量衍射理论计算的结果相差巨大。这是因为标量衍射理论忽略了光栅结构的厚度以及光波在光栅结构中传输时的矢量耦合作用。由于光波相互的耦合作用主要集中于单元的边界处,在单元较大时,标量近似的精确度较高,但当单元尺度趋近于波长时,光波相互的耦合作用就不能忽略,必须采用矢量理论设计。

严格耦合波理论是基于麦克斯韦方程组的严格矢量方法,计算精度仅仅与所取衍射级次的多少有关。将它与遗传算法结合,可以用来设计亚波长结构的衍射光学元件。由于遗传算法是一种优化算法,优化结果的好坏与初始值关系较大,当设计参数很多的时候,直接用遗传算法优化难以获得好的结果。虽然标量衍射理论设计的结构在亚波长尺度时误差很大,但可以用来作为遗传算法优化的初始结构,使优化更容易向好的方向收敛。设计结果表明,利用标量衍射理论设计的多台阶结构作为初值,采用矢量的严格耦合波理论与遗传算法进行优化,可以获得远远优于标量理论设计的结果。

4 结 论

基于严格耦合波理论与遗传算法设计的 1×16 分束的一维亚波长多台阶结构分束光栅,实现了大角度分束,并具备较高的衍射效率和良好的均匀性。对于二维分束光栅,一般先设计其一维结构,然后在正交方向展开^[4]。考虑分束数较少的情况时,例如 3×3 、 4×4 也可直接利用文中给出的方法设计。研究为亚波长大角度分束光栅的研究找到了新的思路,设计的衍射效率与均匀性虽然略低于亚波长Dammann光栅,但由于结构更加精细,具有更大的误差容限。经过对给出的 1×16 亚波长多台阶分束光栅做误差分析,发现当线宽误差控制在 $50\ \text{nm}$ 以内,台阶高度误差控制在 $30\ \text{nm}$ 以内时,分束光栅的衍射效率几乎不发生变化,且均匀性误差基本上都在 10% 以内变化。目前电子束光刻直写技术已经能对十几纳米的线宽精确刻蚀,可以满足加工精度的要求。在设计时同样考虑过8台阶结构,其衍射效率与均匀性有所下降。说明增加台阶阶数可以提高衍射效率与均匀性,但是会增加设计与加工的难度,设计时需要综合考虑。

参 考 文 献

- 1 Gong Hailong, Liu Zhihui, Li Guojun, *et al.*. Fidelity study of diffractive laser beam expander[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0902006.
龚海龙, 刘志辉, 李国俊, 等. 衍射型激光扩束器的保真度研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902006.
- 2 Song Qiang, Zhu Jing, Wang Jian, *et al.*. A mixed gradient algorithm for high performance DOE design in off-axis lithography illumination system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122005.
宋强, 朱菁, 王健, 等. 基于混合梯度下降的高性能光刻机离轴照明衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122005.
- 3 Mao Wenfeng, Zhang Xin, Qu Hemeng, *et al.*. Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022002.
毛文峰, 张新, 曲贺盟, 等. 红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022002.
- 4 Yuri V Miklyaev, Waleri Imgrunt, Vladimir S Pavelyev, *et al.*. Novel continuously shaped diffractive optical elements enable high efficiency beam shaping[C]. SPIE, 2010, 7640: 764024.
- 5 Y V Miklyaev, A Krasnaberski, M Ivanenko, *et al.*. Efficient diffractive optical elements from glass with continuous surface profiles[C]. SPIE, 2011, 7913: 79130B.

- 6 H Pang, S Yin, G Zheng, *et al.*. Design method of diffractive optical element with large diffraction angle[C]. SPIE, 2014, 9271: 92711M.
- 7 NPK Cotter, T W Preist, J R Sambles. Scattering-matrix approach to multilayer diffraction[J]. J Opt Soc Am, 1995, 12(5): 1097-1103.
- 8 M G Moharam, T K Gaylord. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings[J]. J Opt Soc Am A, 1982, 72(10): 1385-1392.
- 9 Jiang P L, Chu H, Hensch J, *et al.*. Forward solve algorithms for optical critical dimension metrology[C]. SPIE, 2008, 6922: 69221O.
- 10 Wang Zhongfei, Zhang Dawei, Wang Qi, *et al.*. Development trends of subwavelength metal gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 010002.
王中飞, 张大伟, 王 琦, 等. 亚波长金属光栅的发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 010002.
- 11 Louis A Romero, Fred M Dickey. Theory of optimal beam splitting by phase gratings. I. One-dimensional gratings[J]. J Opt Soc Am A, 2007, 24(8): 2280-2295.
- 12 Z Li, Zheng G, He P A, *et al.*. All silicon nanorod-based Dammann gratings[J]. Opt Lett, 2015, 40(18): 4285-4288.
- 13 Leng Yanbing, Dong Lianhe, Sun Yanjun. Study on 1×11 Dammann with sub-wavelength structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 812-817.
冷雁冰, 董连和, 孙艳军. 1×11 亚波长结构 Dammann 光栅的研制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 812-817.
- 14 Yang Jian. The Vector Diffraction Design and Parallel Direct Writing Production of Binary Optical Elements[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
杨 健. 二元光学元件矢量衍射设计与并行直写制作[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- 15 J W Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi, *et al.* Transl.. (3rd edition). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 60-61.
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等译. (第三版). 北京: 电子工业出版社, 2006: 60-61.
- 16 M G Moharam, T K Gaylord, E B Grann, *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- 17 Liu Zhihui, Yang Huan, Shi Zhendong, *et al.*. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102005.
刘志辉, 杨 欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102005.
- 18 M G Moharam, T K Gaylord, D A Pommet, *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1077-1086.
- 19 L Li. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures[J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(9): 1870-1876.
- 20 Nikolay M Lyndin, Olivier Parriaux, Alexander V Tishchenko. Modal analysis and suppression of the Fourier modal method instabilities in highly conductive gratings[J]. J Opt Soc Am A, 2007, 24(12): 3781-3788.

栏目编辑: 张 雁