

对达曼光栅进行二维扩展的矩形孔径光栅设计

谷 雨, 郑彩云, 虞 钢

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 介绍一种二元光学元件的设计方法。为了克服达曼光栅在二维设计上的局限性, 采取均匀采样的矩形孔径编码方式进行优化设计。结果表明: 与达曼光栅相比, 不仅可将总衍射效率提高 10% 以上, 还可得到更多样的二维设计图样, 只是输出点阵均匀度略低于达曼光栅。因此, 在均匀度要求不太高的高强光束变换中, 这种二值型位相光栅的设计方法对于设计二维衍射图样十分简便有效, 且其计算结果易于加工制作, 具有很高的应用价值。

关键词: 二元光学; 优化设计; 矩形孔径; 输出点阵

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-2743(2005)03-0023-02

Design for the pixellated grating in 2D expending of the Dammann grating

GU Yu, ZHENG Cai-yun, YU Gang

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A kind of design for binary optics element (BOE) is introduced. The even sampling coding schemes for pixellated grating method is adopted in optimizing design to overcome the disadvantage of Dammann grating in design 2D output patterns. The results indicate that, compared with the Dammann grating, the pixellated grating not only increase the diffractive efficiency more than 10%, but also be more adaptive in getting the diversiform of two-dimensional patterns. But the intensity distribution in output spots by pixellated grating is little worse than by Dammann grating. So for the transformation of high-power laser beam which demands in the uniformity is not very high, this kind of design for BOE is very convenient in 2D patterns design. And the calculated result is very easy to make the BOE. So the applied value is very high.

Key words: binary optics element; optimizing design; pixellated grating; output spots array

在许多工业加工中要求能够将聚焦于一点的高斯光束变换为多种形状的点阵分布^[1-5], 在设计制作这类器件方面, 二元光学尤其显示出传统光学无法比拟的优越性。本文讨论了二值位相光栅的设计方法, 并将其设计结果与达曼光栅进行了比较, 最后通过实验结果验证了此设计方法。

1 设计原理

通常应用衍射光学元件的光学系统的夫琅和费衍射在其观察平面上衍射图样的强度分布可表示为:

$$I(x, y) = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^2 |F\{t(x_0, y_0)\}|^2 \quad (1)$$

式中 $t(x_0, y_0)$ 为孔径透过率函数。为简化设计采取均匀采样矩形孔径的二值编码方式如下图所示, 其中图 1a 为均匀采样矩形孔径光栅, 而图 2 为在一维方向上设计的达曼型位相光栅, 对于图 2 中的情况 x 和 y 无法分解的情况, 假设一周复振幅透过率为 $t_0(x_0, y_0)$, 在忽略光栅的有限尺寸影响的条件下, 矩形孔径光栅的复振幅透过率 $t(x_0, y_0)$

可以表示为:

$$t(x_0, y_0) = t_0(x_0, y_0) * \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_0}{d}\right) * \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{y_0}{d}\right) \quad (2)$$

其中 d 为光栅的周期宽度, 利用卷积定理可求出光栅频谱

$$T(f_x, f_y) = T_0(f_x, f_y) \text{comb}(df_x) \text{comb}(df_y) \quad (3)$$

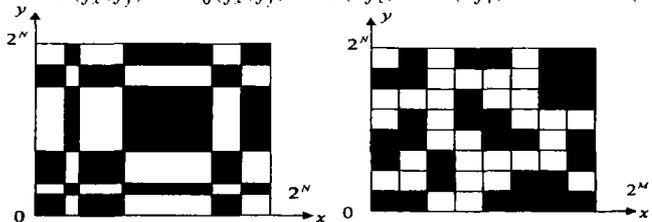


图 1 达曼型光栅编码原理 图 2 矩形孔径光栅编码原理

由梳状函数性质可知, 当且仅当 $x = m \frac{\lambda z}{d}$, $y = n \frac{\lambda z}{d}$, $m, n = 0, \pm 1, \dots$ 时 $T(f_x, f_y) \neq 0$, 且等于单个周期的频谱 $T_0(f_x, f_y)$, 考虑图 2 所示均匀采样矩形孔径光栅一个周期的位相分布, 使一个周期形成网格型孔径单元, 将每个矩形孔径单元的取值分为 0 (白色单元) 或者 1 (黑色单元), 以此来代表其位相分别取 ϕ_1 和 ϕ_2 , 设共有 L 个位相延迟为 ϕ_2 的单元, 且第 l 个单元距离原点最近的顶点坐标为 (x_l, y_l) , 根据傅立叶变换的线性定理有透过率函数 $t_0(x_0, y_0)$

$$t_0(x_0, y_0) = \left\{ \exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1) \right\} \times \prod_{l=1}^L \text{rect}\left(x_0 - \left(x_l + \frac{1}{2}\right), y_0 - \left(y_l + \frac{1}{2}\right)\right) + \exp(j\phi_1) \quad (4)$$

则对其输出平面的频谱分布, 有

$$T_0(f_x, f_y) = \left\{ \exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1) \right\} \text{sinc}(f_x) \text{sinc}(f_y) \times \prod_{l=1}^L \exp\left\{ -j2\pi \left[f_x \left(x_l + \frac{1}{2}\right) + f_y \left(y_l + \frac{1}{2}\right) \right] \right\} + \exp(j\phi_1) \delta(f_x, f_y) \quad (5)$$

此时将式(7)代入式(5)中可得对角对称的光强分布:

$$I_{0,0} = I(0,0) = \left(\frac{A}{\lambda z}\right)^2 \left| \exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1) \right|^2 L + \exp(j\phi_1) \quad I_{+m,+n} = I_{-m,-n} = \left(\frac{A}{\lambda z}\right)^2 \exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1) \quad I_{+m,-n} = I_{-m,+n} = \left(\frac{A}{\lambda z}\right)^2 \left| \exp(j\phi_2) - \exp(j\phi_1) \right|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{m}{d}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{n}{d}\right) \times \left| \prod_{l=1}^L \exp\left\{ -j2\pi \left[\frac{m}{d} \left(x_l + \frac{1}{2}\right) + \frac{n}{d} \left(y_l + \frac{1}{2}\right) \right] \right\} \right|^2 \quad (6)$$

2 设计方法和结果比较

光栅结构的优化设计实质上是要寻找一组坐标集, 使其满足衍射谱在我们要求的极次内光强均匀分布, 为评价二维优化过程及其结果, 特定义误差函数

$$E^2 = \alpha \left(I_{0,0} - I_0 \right)^2 + 2 \sum_{m,n=1}^N \left(I_{m,n} - I_m \right)^2 + (1-\alpha) \left(I_N - I_N \right)^2 \quad (7)$$

式中, $I_{m,n}$ 是各级强度分布的理论目标值, I_N 是各级能量之和, α 是在优化过程中所取假设的自由补偿系数, α 值在 $[0, 1]$ 范围内变换。误差函数的第一项衡量设计值 $I_{m,n}$ 与目标值的差异, 第二项则是衡量衍射效率。 α 值选取不同误差函数表达式中两项所占权重大小就不同, 设计时根据对光束均匀性及衍射效率所要求的大小选取一定的 α 值。近年来人们发展了很多种优化算法, 如误差递减法 (G-S 算法)、梯度寻法、输入-输出法、遗传算法以及模拟退火法, 可以根据输出要求灵活选取某种算法或几种方法的组合进行优化计算。相位角 $(\phi_2 - \phi_1)$ 也是一个独立的自由参数, 也可参与迭代过程, 但是相位角的改变只影响零级谱的强度, 而对零级以外的级次无影响, 对于大分束比的光栅, 相位的最佳值一般为 $\pi/2$ 。

下面以输出为 5×5 点阵的二元光学元件的设计为例, 来比较矩形孔径光栅和文献^[6]中的达曼光栅对于相同设计的优化结果。为便于比较, 在表 1 中分别列出利用矩形孔径光栅和达曼光栅设计得到的各级衍射效率和总衍射效率, 由表中列出的衍射效率值可定量看出, 矩形孔径光栅衍射效率最低点比达曼光栅高 0.06%, 而总衍射效率比达曼光栅要高 14.09%。达曼光栅一维的衍射效率一般最高只能达到 80% 左右, 扩展到二维便只有 $(80\%)^2 \approx 64\%$, 矩形孔径光栅的衍射效率经过多次迭代一般都可达到 70% 以上, 因此能量损失比达曼光栅要小得多。但由于矩形孔径光栅是从二维进行设计和计算的, 不仅其收敛速度因计算规模的大大增加而变

得较为缓慢,而且在迭代过程中,其评价函数由于要兼顾设计中的大量目标值,从而其效率分布很难达到达曼光栅的均匀度,尤其是在设计目标值的数目越多的情况下,均匀性越低,如在5×5输出点阵的设计中,达曼光栅只需在一维情况下,使总能量平均分配到5个点上,而矩形孔径光栅需要平均分配到5×5=25个点上。

矩形孔径光栅由于其采样是在二维方向上进行,不仅能够实现达曼光栅能够实现的设计,即x轴和y轴对称的点阵分布,更可以设计出达曼光栅无法实现的设计结果。为证明

这一点,我们特地选择了达曼光栅无法实现的环状点阵分布进行设计,为了粗略地模拟环状点阵,我们对于一个11×11的点阵L,以其中心点 $l_{6,6}$ 为圆心,以3为内径,6为外径,将任意点 $l_{m,n}$ 上的衍射效率按照

$$E_{m,n} = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{m=1}^{11} \sum_{n=1}^{11}} & 3 \leq \sqrt{(m-6)^2 + (n-6)^2} \leq 5 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

表1 矩形孔径光栅和达曼光栅的设计结果对比

SM(行) M(列)	矩形孔径光栅设计结果 $P_{m,n}(\%)$					达曼光栅设计结果 $P_{m,n}(\%)$				
	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
-2	3.02	3.16	3.00	2.75	2.89	2.393	2.395	2.395	2.395	2.393
-1	2.46	3.30	3.16	2.89	2.53	2.395	2.396	2.396	2.396	2.396
0	3.04	3.13	2.95	3.13	3.04	2.395	2.396	2.396	2.396	2.395
1	2.53	2.89	3.16	3.30	2.46	2.395	2.396	2.396	2.396	2.395
2	2.89	2.75	3.00	3.16	3.02	2.393	2.395	2.395	2.395	2.393
$P_{\Sigma}(\%)$	$P_{\Sigma} = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 P_{mm} = 73.61$					$P_{\Sigma} = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 P_{mm} = 59.52$				

分布,并将衍射效率平均分配到如图3a所示拟环状的灰色区域内。经过迭代计算得到输出与我们的设计目标相接近的设计结果如图3b所示,而得到此输出结果的表面位相分布如图3b所示,由图3b可以看出衍射效率基本集中在我们模拟的点上,其总衍射效率可达到70%以上。但此时设计的目标值数目(11×11=121)过于庞大,从而造成其均匀性更加难以得到保证。

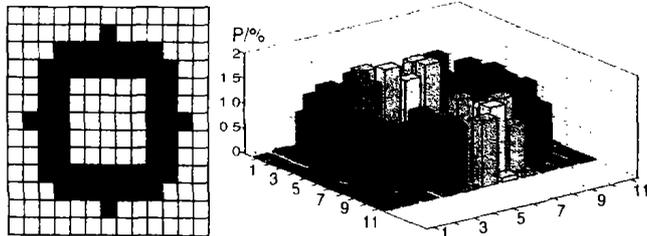


图3a 模拟环状点阵设计示意图 图3b 环状点阵的输出设计结果

3 实验方法及结果分析

在实验过程中,考虑到现有实验条件,我们采取的是较易于实现的湿法刻蚀,即将按照表面位相分布制得的模版,对表面涂有感光材料Gr的石英玻璃进行曝光后,再用酸溶液对其进行腐蚀。由于设计的是二台阶的位相型光栅,无需多次曝光的对准工艺,所以仅用湿法刻蚀即可基本满足我们的要求。为了保证腐蚀的均匀性,必须在溶液恒温且均匀的条件下进行腐蚀,因此我们采取水箱保证温度恒定在27℃,并在腐蚀过程中用磁力搅拌器以固定速度搅拌腐蚀溶液,这样在腐蚀过程中,不仅克服了由于酸和水的比重不同而造成的溶液的不均匀性,还将发生腐蚀部分的腐蚀物质及时带走,避免因其在元件表面堆积而对腐蚀产生影响。

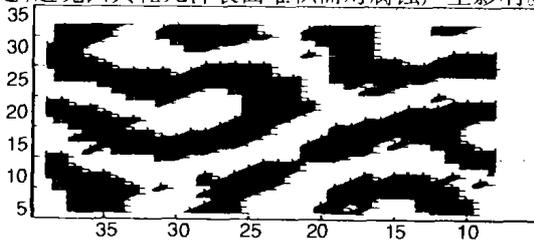


图4 环状点阵表面位相设计结果

如图5中所示,通过对不同腐蚀液腐蚀速度的实验曲线,可以看出,当酸浓度越浓,曲线越陡,腐蚀时间也难以控制,当酸浓度过稀时,由于氟磷酸和磷酸都挥发很快,腐蚀时间过长,又会造成溶液浓度的变化,使腐蚀曲线很难成线性变化,因此我们选取配比为浓度: $\text{HF}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O} = 1:10:40$ 进行刻蚀,对于我们计算腐蚀深度和腐蚀时间的关系较为方便,同时将腐蚀时间控制在4分钟以内,保证了其溶液浓度的变化很小,可以忽略不计。为验证此配比精度,在此配比浓度下进行重复实验,由于我们在刻蚀的过程中必须带Cr读数,其深度包含了Cr层的厚度,因此其初始深度(即曲线

与纵轴的交点坐标)略有不同,但斜率是基本相同的,即在单位时间内刻蚀的深度也是基本相同,在此溶液浓度下,我们可以根据深度要求精确算得刻蚀时间。

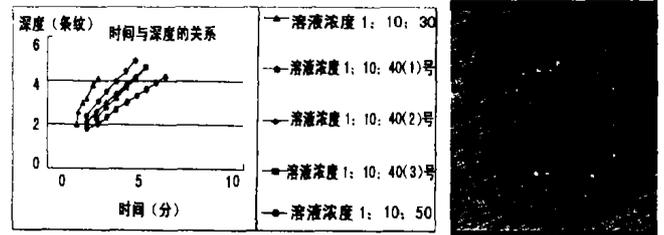


图5 腐蚀时间和深度的关系曲线 图6 环状点阵分布的实验结果

我们选取环状点阵分布的设计结果进行制作,将实际制得的元件用于大功率激光器(2000瓦)的二元光束变换,并用金相显微摄影仪将对金属的作用结果进行拍摄记录,图6即为环状点阵分布的作用结果。由图中我们可以明显看到其点阵分布形状与图3中模拟的基本相同,而且变换的激光束与金属的作用而产生的作用区域也可以很明显地看到外围是一个圆形,而内围则是一个方形,这也验证了我们的实验结果十分接近设计目标,但同时我们也可以看到其作用点的深浅度很不一致,这说明各点的能量分布很不均匀,其不均匀程度也明显大于图4中的设计结果,这是由于选取的湿法的加工误差较大,而加工误差对光束均匀性的影响远远超过对衍射效率的影响^[6],因此由于我们实验条件的限制及不可避免的人工操作的误差,使其图样的均匀度比设计结果看起来更低。

结论:这种编码方式虽然突破了一维局限性,但由于具有二台阶结构,均匀采样和将设计孔径简化为矩形等特点,在简化设计,计算和制作的同时也限制了设计结果,造成如无法使输出能量在设计的目标范围内均匀分布及衍射效率无法进一步提高等问题。不过,在对激光输出有变换要求的工业加工中,当采用大功率激光时,二台阶结构的光栅的承受能力优于多台阶的二元位相光栅,而且一般变换不必要求均匀度很高,所以此方法对于二维编码方式的进一步拓展也具有较高的价值。

参考文献

- [1] N. Streibl, K. - H. Brenner, A. Huang, J. Jahns, J. Jewell, A. W. Lohmann, D. A. B. Miller, M. Murolocca, M. E. Prise, and T. Sizer. Digital optics. Proc. IEEE77 1989, 1954 - 1969.
- [2] N. Streibl. Beam shaping with optical array generators[J]. Mod. Opt., 1989, 36:1559 - 1573.
- [3] Dammann H, Gortler K. High - efficiency in line multiple imaging by means of multiple phase holograms[J]. Opt. Commun., 1971, 3:312 - 315.
- [4] Gao Chun - lin, Yu Gang. Design of binary Gratings with specific intensity distribution of output[J]. China Opt, 2001, 28(4): 365 - 367.
- [5] Vasara A, et al. Binary surface - relief gratings for array illumination in digital optics[J]. Appl. Opt., 1992, 31(17): 3320 - 3336.
- [6] Jin Guofan, Yan Yinbai, Wu Mingxian. Binary Optics(二元光学)[M]. Beijing: Defense Industry Publishing Company, 1998, 62 - 63.