

文章编号 1004-924X(2003)06-0572-04

二元位相型光栅分束器的改进设计方法

鲁建业^{1,2}, 马玉刚³, 申作春¹, 董蕴华¹, 高惠德¹, 马祖光¹

(1. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130023)

摘要:为改进传统分束光栅的设计中不考虑光栅的实际周期长度、光栅深度、基底厚度等因素对各透射级次光波振幅的影响,设计结果与实际制作光栅的分束效果相比差距较大的不足之处,基于矢量衍射理论,提出了光栅分束器的改进设计方法。改进前后的主要不同之处在于计算透过率函数时是否考虑光栅实际参数对入射光的影响。由于比传统方法的设计基础更严格,因而从与实验结果的对比情况看,改进方法提高了设计结果与实际情况的符合程度。

关键词:光栅分束器; 矢量衍射理论; 改进方法

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A

Improved design of splitters

LU Jian-ye^{1,2}, MA Yu-gang³, SHEN Zuo-chun¹, DONG Yun-hua¹, GAO Hui-de¹, MA Zu-guang¹

(1. *Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

2. *The State Key Lab of Applied Optics, Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*

3. *Institute of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)*

Abstract: An improved design of splitters has been proposed using the vector diffraction theory to narrow the gap between the design and the splitting effect due to the fact that the real period length, grating depth and substrate depth are not considered in the traditional splitter design. The major difference between the traditional design and the improved design lies in whether the effect of the real grating parameters on the incident beam is taken into consideration while the transmittance function is calculated. Experimental results show that, in comparison with the traditional design, the improved design is closer to reality.

Key words: grating beam splitter; vector diffraction theory; improved method

1 引言

在光纤通讯、光计算、图像处理等诸多领域,经常会遇到需要将单一信号的输入变成多个相同信号

输出的情况^[1-2]。近十几年来二元光学技术的迅速发展^[3-5],使人们逐步认识到二元位相型光学光栅分束器具有分束光强均匀性不受入射光波分布影响,分束效率较高并能产生任意排列点阵等优点,使得这类分束器件成为目前最有效的分束器件之一。

收稿日期:2003-04-15;修订日期:2003-10-17.

基金项目:哈尔滨工业大学校基金资助项目(No. HIT. 2003. 13)

通常这类光栅分束器的设计^[6-7]是假定光栅对入射光的调制作用仅限于改变其位相,直接写出振幅透过率函数,然后将其用傅里叶级数展开,得到各衍射级与光栅结构参数之间的关系,然后结合模拟退火或共轭梯度等优化算法得到光栅设计参数。这种设计方法的优点是思想明确,数学处理过程简单。但由于它是在标量衍射理论的框架下完成的,并不考虑光栅的实际周期长度、光栅深度、基底厚度等因素对各透射级次光波振幅的影响,因而设计结果与实际制作光栅的分束效果相比往往差距较大。这其中的原因除了元件制作的误差以外,设计方法局限性的影响是不容忽视的。

本文以矢量衍射理论^[8-9]为基础,提出对光栅分束器设计方法的改进措施。

2 改进的光栅分束器设计方法

针对 TE 波入射,以单台阶光栅为例说明改进的设计方法,对于 TM 入射波及多台阶光栅的情况可以同样处理。

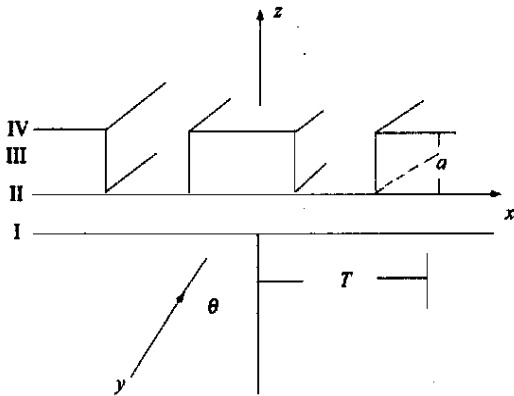


图 1 单台阶光栅结构示意图
Fig. 1 Scheme of the one-step grating

如图 1 所示的单台阶矩形光栅。整个系统的坐标选取如图 1 所示。其中 θ 为入射角, I、IV 区分别为入射层和透射层,其折射率为 1; II 区为基底, III 区为光栅层,其折射率 n 是坐标 x 的周期函数,用傅里叶级数可以表示为:

$$n(x) = \sum_j c_j \exp(i2j\pi x/d), \quad (1)$$

这里, c_j 代表折射率 n 的傅里叶展开系数。

I、II 和 III 区域的入射光波的电场分量形式可以直接写出来:

$$E_1(x, z) = \sum_j C_j \exp[i(k_{1,jx}x + k_{1,jz}z)] + \sum_j R_j \exp[i(k_{1,jx}x - k_{1,jz}z)], \quad (2)$$

$$E_2(x, z) = \sum_j D_j \exp[i(k_{2,jx}x + k_{2,jz}z)] + \sum_j F_j \exp[i(k_{2,jx}x - k_{2,jz}z)], \quad (3)$$

$$E_4(x, z) = \sum_j T_j \exp[i(k_{4,jx}x + k_{4,jz}z)]. \quad (4)$$

其中, C_j, R_j, T_j 分别代表第 j 次入射、反射及透射波电场振幅分量, D_j, F_j 代表基底(第 2 层)中沿 z 轴正向及反向传播光束的第 j 级次电场振幅分量, 并且有:

$$k_{l,jx} = k_0 n_l \sin \theta + 2j\pi/T, \quad (5)$$

$$k_{l,jz} = \begin{cases} (k_0^2 n_l^2 - k_{l,jx}^2)^{1/2} & |k_{l,jx}| < k_0 n_l \\ i(k_{l,jx}^2 - k_0^2 n_l^2)^{1/2} & |k_{l,jx}| > k_0 n_l \end{cases} \quad (6)$$

这里, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 是入射波在真空中的波长, T 代表光栅周期, θ 代表入射光与 z 轴正向的逆时针夹角, n_l 代表第 l 层的折射率($l = 1, 2, 4$)。

III 区的电场分量形式可以通过求解 Maxwell 方程组得到。对于 TE 偏振,由于入射波电场分量平行于光栅栅线方向(即图 1 中的 y 方向),可以由 Maxwell 方程组得到一个简单的入射波电场分量所要满足的波动方程:

$$\nabla^2 E + k^2 n^2(x) E = 0, \quad (7)$$

$n(x)$ 代表光栅层折射率。将式(1)代入式(7)并采用分离变量解法求解,可以得到一本征方程,求解该本征方程得到其本征矢量 w 及相应本征值 g 。这样 III 区域的电场分量形式:

$$E_3(x, y) = \sum_{jn} W_{jn} \exp(ik_{2,jx}x) \times \{ A_n \exp(ig_n y) + B_n \exp(-ig_n y) \}, \quad (8)$$

这里, $k_{2,jx} = k_0 n_2 \sin \theta + 2j\pi/T, A_n, B_n$ 是待定系数。

利用边界条件,即要求电场及磁场分量在各层交界处连续,求解(2、3、4、8)式构成的方程组,可以最终求出 III 区的第 j 级次透射波的振幅表达式 $T_j, (j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$,第 j 级次透射波的衍射效率可以表示为:

$$\eta_j = |T_j|^2 \times \text{Re} \left[\frac{k_{4,jz}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right], \quad (9)$$

很显然,透射波各衍射级次的效率与突变点的坐标、蚀刻深度、基底厚度等光栅参数都有联系,结合优化算法便可以求得满足分束比要求的光栅设计参数。

与传统设计方法相比,改进后的光栅分束器设计方法主要的不同之处在于计算透过率函数时考虑了实际光栅参数对入射光,包括对入射光位相、振幅等的影响。由于比传统方法使用的隐含假定条件少、设计基础更严格,从而提高了设计结果与实际情况的符合程度。

3 与实验结果的对比和讨论

分别应用传统标量光栅分束器设计方法和改

进的设计方法,针对基底厚度为 2 mm、周期长度 10 μm 、TE 偏振波入射的情况设计了 3 分束比的光栅(假定入射光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$),并按设计结果分别制作了光栅进行实验测量。传统方法及改进方法与实验结果的对比情况如表 1 所示。

从表中可以很明显地看到,虽然传统标量算法设计结果预言的分束效率高达 86.52%,与实际加工光栅的设计结果的测量值 82.95% 很接近,但实验测量的分束均匀度(12.69%)却远远高

表 1 两种设计方法的设计结果与实验的对比

Tab. 1 Comparison of two design methods results with experimental results

	传统方法设计结果 (理论)	按传统方法设计 的分束光栅的实验结果	改进方法的设计 结果(理论)	按改进方法设计 的分束光栅的实验结果
-1	28.85 %	30.47 %	26.29 %	26.54 %
0	28.83 %	21.32 %	26.46 %	24.73 %
+1	28.83 %	31.16 %	26.29 %	24.60 %
分束效率	86.52 %	82.95 %	79.04 %	75.87 %
分束不均匀度	0.02 %	12.69 %	0.44 %	4.71 %

于标量设计结果预言的 0.02%。相比之下,按照改进方法设计结果制作的光栅实测分束效率低一些(75.87%),但分束均匀度要好得多,达到 4.71%。同时改进方法的设计结果无论在分束效率还是分束均匀度方面都与实验测量结果符合得很好。可见除了光栅制作中不可避免受到制作精度影响之外,设计的理论基础的精确程度是不容忽视的重要原因。

由于传统的标量设计方法不考虑实际光栅的实际周期长度而将其规格化为 1,这样一种处理方式仅当光栅的最小特征尺寸和入射波长相比足够大的情况下和实际符合较好。在光栅分束器的一些应用中,比如多头激光划片机等,需要大分束比,这时可以要求光栅周期长度大一些;而对于其他的一些应用,比如激光耦合并束中使用的光栅分束器,对分束光间的夹角有一定要求,光栅周期长度不可能太大。如果仍采用传统标量设计方法,必定出现光栅最小特征尺寸不能严格满足远大于入射波波长的条件。可见改进的光栅分束器设计方法所得到的结果对实际光栅的制作加工的指导作用就变得更强大一些。

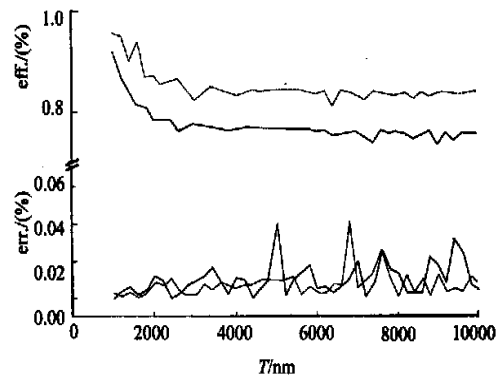


图 2 光栅周期变化的情况下, TM 偏振(实线)、TE 偏振(虚线)分束效率和分束均匀度的变化

Fig. 2 Splitter efficiency and RMS vary with grating period when illuminated by TE(solid line)/ TM(dash line) wave

图 2 给出的是假定光栅基底厚度无穷大时不同光栅周期情况下,改进设计方法的设计结果(假定分束比是 3,入射波长 632.8 nm)。图中实线代表 TE 波,虚线代表 TM 波。可以看到,当光栅周期较小时,分束效率很高,同时分束均匀度也比较低。随着光栅周期的加大,分束效率下降很快并逐渐趋于稳定值。但对于不同的入射波偏振状态,分束效率的差别始终比较大。另外在标量方

法设计当中还假定了基底厚度对分束效率和分束的均匀性是没有影响的,但从矢量分析的角度看,标量方法设计中的这些隐含假定并不严格。图3

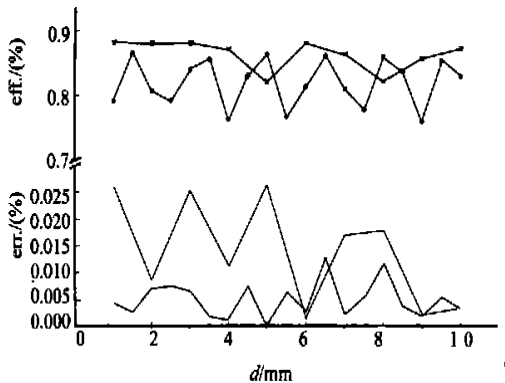


图3 在基底厚度变化的情况下, TM 偏振(实线)、TE 偏振(虚线)分束效率和分束均匀性的变化

Fig. 3 Splitter efficiency and RMS vary with grating substrate depth when illuminated by TE (solid line)/ TM (dash line) wave

给出的是入射波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 时分束效率和分束均匀性随着光栅基底厚度的变化情况。在不同的基底厚度情况下,光栅的分束效率和分束均匀性都不同,总的说来呈现出一种“周期”性的振荡(尤其是在 TE 波时,分束效率的波动幅度接近 10%)。这一情况在传统标量设计方法中并没有加以考虑的。

改进的光栅分束器的理论基础是 Maxwell 方程组。由于真实地反映了电磁波和光栅的相互作用,因而在不考虑元件制作误差时,其所预言的光栅分束器设计结果可以准确地反映真实的光栅分束情况。

4 结束语

针对传统标量光栅分束器设计中出现的设计预言与实际光栅测量结果之间存在较大差别的情况,提出光栅分束器的改进设计方法。通过与实验及传统设计方法的对比,改进后的光栅分束器设计结果与实验测量结果符合得很好。

参考文献:

- [1] FENG J H, CHIN G F, WU M X, *et al.* Multi-object recognition in a multi-channel joint transform correlator[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(1):82-84.
- [2] MCLAUGHLIN J L. Multiple-line laser writing apparatus and method[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(19):3569-3573.
- [3] 桑涛,翁志诚. 二元光学的优化设计[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(5):67-74.
SANG T, WEN G ZH CH. Binary optics design[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(5):67-74. (in Chinese)
- [4] 樊仲维. 光学系统中的二元光学元件[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(2):1-10.
FAN ZH W. Binary optical element in optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(2):1-10. (in Chinese)
- [5] 樊叔维. 任意槽形金属光栅衍射特性的矢量理论分析与计算[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(2):101-104.
FAN SH W. Vector theory analysis and numerical calculation for any shape profile metallic gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2):101-104. (in Chinese)
- [6] DAMMANN H, GORTLER K. High-efficiency in line multiple imaging by means of multiple phase holograms[J]. *Opt Comm*, 1971, 3:312-315.
- [7] WALKER S J, JAHNS J. Array generation with multilevel phase grating[J]. *J Opt Soc Am*, 1990, A7:1509-1513.
- [8] 傅克祥,王植恒,张大跃,等. 位相光栅衍射的矢量解法[J]. *光学学报*, 1997, 17(12):1652-1659.
FU K X, WANG ZH H, ZHANG D Y, *et al.* A vector analytical method of phase diffraction grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(12):1652-1659. (in Chinese)
- [9] KNOP K. Rigorous diffraction theory for transmission phase gratings with deep rectangular grooves[J]. *J Opt Soc Am*, 1978, 68(9):1206-1210.

作者简介:鲁建业(1969-),男,河南洛阳人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士后,主要研究方向为微光学、光谱学以及激光等离子体物理等。