

文章编号: 1002-2082(2006)02-0089-03

# 计算机模拟双层矩形位相光栅的实时变分束特征

李幼平, 陆登波

(武汉工业学院 计算机与信息工程系, 武汉 430023)

**摘要:** 双层矩形光栅随入射角的不同可得到不同数目的光束。基于这一现象, 通过改变双层光栅的入射角, 并对其进行了优化就可得到效率高且光强分布均匀的光束。对利用双层矩形相位光栅实时变分束特征制作新型分束器的方法进行了理论探讨, 并对 2 束、3 束、4 束光分束分别进行了分析。通过计算机模拟, 从理论上求出了优化参数, 并对结果进行了讨论。理论分析表明, 通过对入射角进行优化可以得到衍射效率高且光强分布均匀的分束器。该研究为制作方便实用、造价低廉的分束器提供了理论基础。

**关键词:** 双层矩形相位光栅; 实时; 变分束; 计算机模拟

中图分类号: TP311

文献标志码: A

## Computer Simulation of real-time variational beam Feature of double-deck rectangle phase grating

LI You-ping, LU Deng-bo

(Department of Computer, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** The light which goes through a double-deck rectangle phase grating with different incidence angles can produce different numbers of beams. Based on the phenomenon, the beam which has high efficiency and uniform distributed light intensity can be obtained by changing and optimizing the grating's incidence angle. The method of making a new type of splitter by the real-time variational beam feature of the double-deck rectangle phase grating was investigated theoretically. Two, three or four beams produced by the method were analyzed respectively. Through the simulation with a computer, the optimizing parameters of incidence angle were theoretically derived and the result was discussed. Theoretical analysis shows that the splitter with high diffraction efficiency and uniform distributed light intensity can be designed by incidence angle optimization. The study provides a theoretical basis for making practical and cheap splitting device.

**Key words:** double-deck rectangle phase grating; real time; variation beam; computer simulation

## 引言

分束器是一种很重要的光学元件, 它在机器视觉取样、集成光学以及光纤通讯中有着重要作用。目前制造分束器的主要方法有复合全息法、

Damman 光栅法等, 但这些方法获得的分束器有一个共同点, 即每一个分束器只能分出一定的光束数, 也就是说, 每一给定的光束数都对应一独立的系统。这样就导致了造价高, 而且也不方便。

收稿日期: 2004-12-28; 修回日期: 2005-11-16

作者简介: 李幼平(1973—), 男, 湖北武汉人, 武汉工业学院讲师, 主要从事信息光学的研究。E-mail: jiss118@126.com

本文所讨论的是一种制造分束器的新方法。它能按照自己的需要(即所要求的光束数),只需要改变一参数(实时)而整个系统不用改变,就可得到自己所需要的结果。由于双层矩形光栅随入射角的不同可得到不同数目的光束,本文正是基于这一现象,通过改变双层光栅的入射角,并对其进行优化而得到高效率且光强均匀的光束。通过计算机模拟进行理论推导,并对结果进行了讨论。本文所述分束器的优点是,能够方便自如地得到自己所需要的光束,而且仅需一个系统,有一定的通用性。

### 1 光束分布的理论推导

在这里,考虑的是 2 个相同的周期性矩形位相光栅,中间夹一层介质,设介质的折射率为  $n$ ,厚度为  $l$ ,光栅的周期为  $d$ ,如图 1 所示。

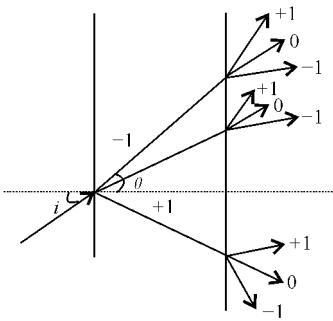


图 1 光线经过双层矩形位相光栅示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beam passing through the double-decked rectangular phase diffraction grating

设光束的入射角为  $i$ ,其衍射角为  $\theta$ ,则光束经过第 1 层光栅后的光强为

$$I' = I_0 \frac{\sin^2 \beta \sin^2 N\gamma}{\beta^2 \sin^2 \gamma}$$

式中,  $I_0$  代表入射光的光强;  $\beta = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda} b \sin \theta$ ;  $N$  = 总缝数;  $\gamma = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta$ ;  $d$  为光栅常数;  $b$  为缝宽,这里  $b = \frac{d}{2}$ ;  $\lambda$  为入射光的波长。

对初始光强归一化,则

$$I' = \frac{\sin^2 \beta \sin^2 N\lambda}{\beta^2 \sin^2 \gamma} \quad (1)$$

由光栅方程  $d(\sin \theta + n \sin i) = k\lambda$  ( $k$  为主极大级,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) 导出

$$\sin \theta = \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \quad (2)$$

式中,  $n$  为介质折射率。代入(1)式有

$$I' = \frac{\sin^2 \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \right]}{\left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \right]^2} \times \frac{\sin^2 \left[ \frac{N\pi d}{\lambda} \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \right]}{\sin^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} d \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \right]}$$

式中,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。同理,可求出光线经过第 2 层光栅后的光强  $I''$ ,这时光线的入射角变为  $\theta$ ;设衍射角为  $\alpha$ ,则光栅方程为

$$d(\sin \theta + n \sin \alpha) = k'\lambda \quad k' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$I'' = \frac{I' \sin^2 \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{k'\lambda}{dn} - \frac{\sin \theta}{n} \right) \right] \sin^2 \left[ \frac{N\pi d}{\lambda} \left( \frac{k'\lambda}{dn} - \frac{\sin \theta}{n} \right) \right]}{\left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{k'\lambda}{dn} - \frac{\sin \theta}{n} \right) \right]^2 \sin^2 \left[ \frac{\pi d}{\lambda} \left( \frac{k'\lambda}{dn} - \frac{\sin \theta}{n} \right) \right]}$$

考虑到光栅引起相位的变化,光线经过第 1 层光栅后的振幅变为

$$A' = \frac{\sin \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \right]}{\frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right)} \times \frac{\sin \left[ \frac{N\pi d}{\lambda} \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \right]}{\sin \left[ \frac{\pi}{\lambda} d \left( \frac{k\lambda}{d} - n \sin i \right) \right]} \times \exp \left[ -i(N-1) \frac{\delta}{2} \right]$$

设  $A_k$  为经过第 2 层光栅后的各级振幅

$$A_k = \frac{A' \sin \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{k' - k}{dn} \lambda - \sin i \right) \right]}{\frac{\pi b}{\lambda} \left[ \frac{(k' - k)\lambda}{nd} - \sin i \right]} \times \frac{\sin \left[ \frac{N\pi d}{\lambda} \left( \frac{k' - k}{dn} \lambda - \sin i \right) \right]}{\sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} \left( \frac{k' - k}{dn} \lambda - \sin i \right) \right]} \times \exp \left[ i(N-1) \frac{\delta}{2} \right]$$

式中,  $k$  为光线经过第 1 层光栅后的衍射级,  $k'$  为光线经过第 2 层光栅后的衍射级。

经过第 1 层光栅后,衍射光将要在宽度为  $l$  的介质中传输,在介质中第  $m$  级衍射光的传输因子  $H_m$  定义为

$$H_m = \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} nl \left[ 1 - \left( \frac{M\lambda}{nd} - \sin i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

式中,  $\lambda$  是入射光波长;  $n$  是介质折射率;  $d$  为光栅周期,则最终的衍射光分布可通过对整个 2 层矩形 SVHG 的传输做傅里叶变换而得到,即

$$\{A_n\} = f[t(x) \otimes pt(x)]$$

式中,  $t(x)$  为光栅透过率函数;  $\otimes$  代表卷积运算, 由卷积定理可得:  $\{A_n\} = \{A_m p_m\} \otimes \{A_j\}$ , 此式可简化<sup>[5]</sup>。

以下仅对感兴趣的级次进行变化。

2 束的情况 ( $\pm 1$  级):

$$A_{+1} = A_{+1} H_{+1} A_{+1,0} + A_0 H_0 A_{0,+1}$$

$$A_{-1} = A_0 H_0 A_{0,-1} + A_{-1} H_{-1} A_{-1,0}$$

3 束情况 ( $0, \pm 1$  级):

$$A_0 = A_{+1} H_{+1} A_{+1,-1} + A_0 H_0 A_{0,0} +$$

$$A_{-1} H_{-1} A_{-1,+1}$$

$$A_{-1} = A_0 H_0 A_{0,-1} + A_{-1} H_{-1} A_{-1,0}$$

$$A_{+1} = A_{+1} H_{+1} A_{+1,0} + A_0 H_0 A_{0,+1}$$

4 束情况 ( $\pm 1, \pm 2$ ):

$$A_{-1} = A_{+1} H_{+1} A_{+1,-2} + A_{-2} H_{-2} A_{-2,+1}$$

$$A_{+1} = A_{+2} H_{+2} A_{+2,-1} + A_{-1} H_{-1} A_{-1,+2}$$

$$A_{-2} = A_{-1} H_{-1} A_{-1,-1}$$

$$A_{+2} = A_{+1} H_{+1} A_{+1,-1}$$

## 2 定义评估函数并进行优化

为了制造尽可能好的分束器, 必须定义这个光学元件的物理特性。一个好的分束器应给出最大的可利用能量, 在  $p$  个有用的衍射级中, 每一级归一化的传输效率为

$$\eta_n = |A_n|^2$$

式中,  $A_n$  为第  $n$  级衍射光的振幅, 定义无反射这个有用级次的总能量  $E_T$  为

$$E_T = \sum_m \eta_m$$

一个好的分束器也必须同时将总的有用能量在  $p$  个级次中尽可能地平均分配, 故用  $p$  个级次的标准偏差来表示这一性能:

$$\sigma^2 = \sum_m (\eta_m - \frac{1}{p} \sum_k \eta_k)^2$$

至此可以定义一个优化过程中的评估函数, 它被定义为标准偏差与总能量比值的平方, 即

$$f(\theta) = \left[ \frac{\sum_m (|A_n|^2 - \frac{1}{p} \sum_k |A_k|^2)^2}{\sum_m |A_k|^2} \right]^2$$

由于  $f(\theta)$  其实是  $\sin \theta$  的函数, 设  $\sin \theta = x$ , 则  $f$  可简化为  $x$  的函数。通过对  $x$  参数进行优化, 即求出  $f(x)$  的最小值所对应的  $x$  值, 就可得到高性能分束器所需参数  $x$ 。

求  $f(x)$  的最小值的优化过程, 可采用黄金分割法。

## 3 理论计算结果及分析

理论计算结果及对应的优化参数见表 1。其中已知的参数为:  $\lambda = 0.618 \mu\text{m}$ ,  $l = 150 \mu\text{m}$ ,  $n = 1.5$ ,  $N = 10\,000$ 。

表 1 矩形 SVHG 的理论衍射效率

Table 1 Rectangular SVHG theory diffraction efficiency

角度/(°)	分束数	衍射级/%			总效率/%
		0	$\pm 1$	$\pm 2$	
13	2		45.2		90.4
49	3	20.3	35.4		91.1
33.38	4		19.6	21.6	82.4

在以上数据中, 由于仅仅只对一个参数进行了优化, 所以效率不是很高。另外用黄金分割法, 只能求仅有一个峰值的函数的最小值, 但从实际计算中得到的函数是一个多峰的, 我们把这个函数进行分割得到了现在的结果。因而, 此结果也不是特别的精确。如果能把其他参数再优化一些, 也许会得到更满意的结果。

## 4 结束语

本文从理论上证明了通过对入射角进行优化可得到高衍射效率且光强分布均匀的分束器, 从计算结果可以看出, 有些效率还不是很, 且光强均匀性也不太好, 这主要是因为还没有对其它参数进行优化, 但作为方便使用、造价低廉的分束器, 其它分束器则难以比拟, 因此具有现实可行性。

参考文献:

- [1] WANG Kuo-ping. Holography with surface plasmon coupled waveguide modes[J]. Appl Optics, 1995, 34(29):6666-6671.
- [2] ANDRE G, SONG L, ROGER A L. Multiple beam generation using a stratified volume holographic grating[J]. Appl Optics, 1995, 27(6):5582-5587.
- [3] MASANORI L, HIROYUKI A, KAZOU E. Holographic Fourier diffraction gratings with a high diffraction[J]. Appl Optics, 1992, 14(5):4051-4057.
- [4] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 126-131.
- [5] 蔡春平. 光纤折射率的依赖关系[J]. 应用光学, 2000, 21(5):13-18.