

双层矩形相位光栅的变分束特性*

汪国平 姚端正 熊贵光
(武汉大学物理系, 武汉 430072)

摘 要 报道双层矩形相位光栅的变分束特性。改变入射光照明方向, 由同一双层矩形相位光栅获得了光束数分别为 2、3、4 和 5, 总衍射效率高于 70% 的扇出光。

关键词 分束器, 变分束, 双层光栅。

1 引 言

分束器作为一种最简单的耦合光学元件, 已广泛应用于光存储、光纤通信、集成光学等领域。迄今为止, 已提出多种制作分束器的方法。其中最典型的方法有 Dammann 光栅法^[1, 2]、复合全息图法^[3]、以及近年提出的叠层体积全息光栅法^[4-6]。但无论由哪种方法制作的分束器, 都有一个共同的特点, 即每一个分束器只能扇出一种确定的输出光束数! 要获得不同数目的扇出光束, 必须使用不同的分束元件。

本文对由双层矩形相位光栅制作的分束器的变分束特性进行讨论。给出同一分束器在不同照明光入射角度下, 扇出光束数分别为 2、3、4 和 5 的计算机模拟结果, 为制作灵巧的光耦合元件提供一种新方法。

2 理 论

由傅里叶频谱分析可知, 经如图 1 所示的双层光栅衍射后的光场的离散频谱可以写成^[7]:

$$\{A_N\} = \{A_J P_J\} \otimes \{A_M\} \quad (1)$$

式中 A_N 、 A_J 和 A_M 分别为光栅 G_1 、 G_2 和双层光栅的 N 、 J 和 M 级衍射光的复振幅分布, \otimes 为卷积运算, P_J 为经第一层光栅 G_1 衍射的光在二光栅之间的介质缓冲层中的传播因子。考虑构成双层矩形光栅的各单个光栅为平面薄光栅, 因此, 忽略各光栅调制层的厚度, 有传播因子:

$$P_J = \exp \left\{ - \frac{i2\pi ml}{\lambda_0} \left[1 - \left(\frac{d \sin \theta - J\lambda_0}{dn} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

式中 λ_0 为读出光波长, n 为介质层折射率, l 为双层光栅的总厚度, d 为光栅周期, θ 为读出光入射角(见图 1 所示)。若令 $\theta = 0^\circ$, 即可得垂直照明光经光栅衍射后在均匀介质中的传播因

* 国家自然科学基金资助的课题。

收稿日期: 1998-03-27; 收到修改稿日期: 1998-09-07

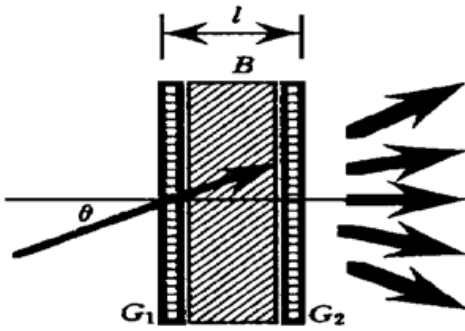


Fig. 1 Structure of double-layer rectangular phase gratings. G_1 and G_2 are the plane phase gratings, B is the medium buffer, l is the total thickness of the element, θ is the incident angle of the readout beam

子^[8]。

评价分束器性能的两个重要参数是分束器的总衍射效率(即各有效扇出光束的衍射效率之和)和各有效扇出光束之间的光强分布均匀性。要用这种双层矩形光栅制作分束器,就必须保证其总衍射效率具有最大值,以及各扇出光之间的光强分布起伏最小。由此可定义优化双层光栅的分束性能的评估函数^[4]:

$$f(n, l, d, \theta, \varphi, \lambda_0) = \left(\frac{\delta}{\eta}\right)^2 \quad (3)$$

式中 φ 为各光栅的调制强度(本文假设二光栅具有相同的调制强度)。 δ 和 η 分别为分束器的标准差和总衍射效率。通过优化 f 函数的特征参数,使 f 函数值为最小,便可获得衍射效率高、光强分布均匀的分束器。

本文目的,是要分析双层矩形光栅的变分束特性,即用同一分束器实现常规多分束器的功能。但不同的分束器往往对应于不同的最小函数值 f , 即光栅特征参数具有不同的值。而对于同一双层矩形光栅而言,光栅的特征参数 n 、 l 、 d 、和 φ 是随光栅的确定而确定不变的。因此,要得到不同的扇出光束数对应的 f 函数的最小值,只有在分束器读出过程中实时改变读出光波长 λ_0 和入射角 θ 。而分束器的基本功能之一,是将一束具有确定激光波长的入射光分裂成多束出射光。因此,在下面的讨论中,本文仍只对确定的入射光波长 λ_0 研究入射角度 θ 的变化与双层矩形光栅的扇出光束数之间的关系。而对于分束器在光存储、光纤通信等领域中的多波长耦合条件下的分束特性,将留待本文最后作简单的推论。

利用计算机辅助设计,可以方便地实现低空频矩形相位光栅的制作。这为制作由矩形相位光栅构成的双层光栅创造了良好的实验条件。因此,尽管平面正弦光栅同样可用于制作叠层光栅,但考虑到正弦光栅在实验制作上较困难,本文只限于讨论由矩形相位光栅构成的双层光栅的变分束特性。

对矩形相位光栅而言,各衍射级的复振幅分布具有如下形式:

$$\{A_k\} = \begin{cases} (1/2)[1 + \exp(i\varphi)], & k = 0 \\ (i/k\pi)[1 - \exp(i\varphi)], & k = \pm 1, \pm 3, \dots \\ 0 & k = \pm 2, \pm 4, \dots \end{cases} \quad (4)$$

式中 k 为光栅衍射级(分别对应于前后光栅的 J 和 M 衍射级), φ 为光栅调制强度。

将(1)式、(2)式和(4)式代入(3)式,选择一定的 n 、 l 、 d 、 φ 和 λ_0 值,然后优化扇出光束数和 θ 之间的关系,便可获得同一双层矩形相位光栅对应于不同读出光入射角 θ 条件下扇出的不同输出光束数。在进行优化运算过程中,假定二光栅之间的介质折射率为 1.5(此为一般光学玻璃的折射率),读出光波长为 $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ 。而对于 l 、 d 和 φ , 则根据文献[6]中所有常规分束器的参数随机取值。优化过程采用 Fibonacci 黄金搜索法^[9]。

3 结果及讨论

计算结果如表 1 所列。由表可见, 不同扇出光束条件下, 分束器的总衍射效率都在 70% 以上。当两光栅之间的介质层厚度为 $830.90 \mu\text{m}$, 光栅周期为 $28.24 \mu\text{m}$, 相应的空间频率为 35 l/mm , 光栅调制强度为 4,7809, 读出光入射角 $\theta = 69.34^\circ$ 时, 分束器可将一束入射光分裂成两束出射光, 总衍射效率为 79.36%。改变入射角度, 使 $\theta = 50.05^\circ$ 时, 扇出光束由两束变为 3 束, 总衍射效率可达 87.69%。即一个分束器相当于常规的两个分束器。若保持光栅空间频率和双层光栅总厚度不变, 而使光栅调制强度为 $\varphi = 4.414$, 则当读出光入射角度 θ 分别为 69.40° 、 50.05° 、 70.40° 、和 77.56° 时, 同一分束器可获得光束数分别为 2、3、4 和 5, 总衍射效率分别为 72.93%、82.48%、71.20% 和 83.04% 的扇出光束。这就是说, 一个分束器可实现常规四个分束器的功能。此外, 由上可见, 平面光栅的空间周期约为读出光波长的 45 倍, 这使得该分束器易于在实际应用中制作完成。因此, 本方法不论在理论上, 还是在实际应用中, 都有重要意义。

Table 1. Diffraction efficiencies of double-layer rectangular phase gratings used as beam splitters. $l = 830.90 \mu\text{m}$, $d = 28.28 \mu\text{m}$

φ	$\theta / (^\circ)$	number of beams	diffraction efficiencies/(%)								beam splitters
			diffraction orders								
			- 3	- 2	- 1	0	1	2	3		
4.780	69.34	2	0.02	3.56	40.02	4.38	39.34	1.02	2.87	79.36	
	50.05	3	0.07	2.56	31.79	24.43	31.47	0.97	1.60	87.69	
4.414	69.40	2	0.02	6.85	36.33	4.21	36.60	1.66	3.22	72.93	
	50.05	3	0.07	4.93	29.23	24.42	28.83	1.88	1.44	82.48	
	70.40	4	2.43	7.36	14.36	15.24	22.09	19.51	0.82	71.20	
	77.56	5	0.48	16.66	17.28	18.49	17.94	13.91	0.03	84.24	

表 2 给出了本文与目前流行的方法所获得分束器的衍射效率的比较结果。由表 1 和表 2

Table 2. Comparison of the diffraction efficiencies between the novel beam splitters and the others

number of beams	diffraction efficiencies/(%)	techniques and references
2	81	Dammann grating (Ref. 1)
	> 95	multiplex holograms (Ref. 3)
	86	stratified grating with sinus profile (Ref. 4)
	91	double-layer rectangular phase grating with $\theta = 0^\circ$ (Ref. 6)
	72.93	present work
3	86.5	Dammann grating (Ref. 1)
	95.2	stratified grating with sinus profile (Ref. 4)
	89.4	double-layer rectangular phase grating with $\theta = 0^\circ$ (Ref. 6)
	82.48	present work
4	67.6	Dammann grating (Ref. 1)
	> 95	multiplex holograms (Ref. 3)
	71.2	present work
5	77.2	Dammann grating (Ref. 1)
	87	multilevel Dammann grating (Ref. 2)
	84.24	present work

可见,这种双层矩形相位光栅制作的分束器虽然具有变分束特性,但扇出光束的总衍射效率和常规分束器相比,还有待于进一步提高。此外,各有效扇出光束之间的光强分布均匀性也未达到令人满意的程度。这主要是由于光栅特征参数在计算机模拟过程中只是随机取值而未经优化。若优化光栅特征参数 l , d 和 φ 等,则可望在光强分布均匀性和总衍射效率等性能上进一步提高。另外,由(3)式可知,固定光栅所有其它参数和读出光入射角,而在读出过程中改变入射光波长,同样可获得双层矩形相位光栅的变分束特性。因此,在读出过程中同时改变读出光波长及其入射角度,则可进一步改善分束器的性能。这在实时变角度、变波长复合全息光存储^[10]和多波长光通信等领域都具有重要应用价值。

参 考 文 献

- [1] Leger J R, Swanson G J, Veldkomp W B. Coherent laser addition using binary phase grating. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20): 4391~ 4399
- [2] Walker S J, Jahns J. Array generation with multilevel phase gratings. *J. Opt. Soc. Am.*, 1990, **A7**(8): 1509~ 1513
- [3] Kobolia H, Schmidt J, Sheridan J T *et al.*. Holographic optical beam splitters in dichromated gelatin. *J. Mod. Opt.*, 1992, **39**(4): 881~ 887
- [4] Granger A, Song L, Lessard R A. Multiple beam generation using a stratified volume holographic grating. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2534~ 2537
- [5] Wang K P. New method for the fabrication of stratified volume holographic gratings and its applications. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(29): 6666~ 6671
- [6] 汪国平, 邓见辽. 双层矩形相位光栅的分束特性. *光学学报*, 1996, **16**(7): 1008~ 1013
- [7] Song L, Lessard R A, Galarneau P. Diffraction efficiency of a thin amplitude-phase holographic grating: a convolution approach. *J. Mod. Opt.*, 1990, **37**(8): 1319~ 1328
- [8] 朱自强, 王仕明, 苏显渝. 现代光学教程. 成都: 四川大学出版社, 1990. 40
- [9] 归行茂, 李重华, 柴常智. 数学手册. 上海: 上海科学普及出版社, 1993. 637~ 638
- [10] Curtis K, Psaltis D. Cross talk for angle- and wavelength-multiplexed image phone holograms. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1774~ 1776

Variable Beams Produced by a Single Double-Layer Rectangular Phase Grating

Wang Guoping Yao Duanzheng Xiong Guigang

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

(Received 27 March 1998; revised 7 September 1998)

Abstract Computer simulation of the variable output beams produced by a single double-layer rectangular phase grating is presented. With a single element, 2, 3, 4 or 5 output beams with 72.93%, 82.48%, 71.20% or 83.04% of total diffraction efficiencies respectively can be obtained by tuning the read out angle of an incident beam. Methods for improving the optical properties of this element are discussed, and the potential applications in optical memory and optical communication are suggested.

Key words beam splitter, variable output beams, double-layer grating.