72-76

第15卷 第1期
1996年2月

红外与毫米波学报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 15, No. 1
February, 1996

二元光学分束器的设计

郭 晴 王汝笠
（中国科学院上海技术物理研究所，青年光电工程研究中心，上海，200083）

A 摘要 系统地阐述了几种二元光学分束器的基本设计理论，比较其算法以及衍射效率和再现误差，并提供了设计实例.

关键词 二元光学，分束器，列阵生成. 衍射光学元件

0437.4

引言

二元光学分束器是一种纯位相衍射光学元件，它能够将一束激光转换成强度均匀的光束列阵，还具有多重成像、光互连、光耦合以及光束复合等功能. 随着光学信息处理、光通讯和光计算领域的深入研究，光学分束器的应用日益广泛. 二元光学分束器由于采用了计算机设计和超大规模集成电路制造工艺等新技术而格外引人注目. 人们提出了二元光学分束器的各种结构与算法，如以求解非线性方程组的方法设计的 Dammann 光栅，以模拟退火等非线性优化算法设计的相息光栅，基于 Talbot 自成像效应的 Talbot 分束光栅以及基于菲涅尔波带片近轴衍射理论的位相型菲涅尔透镜列阵等.

(14)

本文系统地讨论了二元光学分束器的基本设计理论，比较其算法以及分束性能，并提供了设计实例.

1 Dammann 光栅和相息光栅

二元光栅分束器是纯位相的周期结构，其复振幅透过率可描述为

$$g(x) = \sum_{n=0}^{N}\exp[2\pi i\frac{\varphi(n)}{L}]\mathrm{rect}[\frac{X-(X_{n+1}+X_n)/2}{X_{n+1}-X_n}], \tag{1}$$

式中，N 为光栅周期内的单元数，X_n 和 X_{n+1} 为第 n 个单元的起止点，$\varphi(n)$ 为第 n 个单元的位相系数，$\varphi(n)\in(0,L)$，L 为 2π 位相的量化级数. 决定光栅结构特征的基本参量是 X_n 和 $\varphi(n)$，合理地选择光栅各单元的位相系数 $\varphi(n)$ 和位相单元转变点 X_n，可以在衍射场获得均匀的强度列阵分布. 有两种基本方法实现等光强分束，即确定 $\varphi(n)$ 设计 X_n 的 Dammann 光栅和确定 X_n 设计 $\varphi(n)$ 的相息光栅.

衍射效率和再现误差是评价光栅性能的重要指标. 衍射效率定义为衍射光总强度与入射光总强度的比值，$1\times(2N+1)$ 级一维分束器的衍射效率为

本文1995年5月9日收到，修改稿1995年9月20日收到

$$\eta_1=(2N+1)|A_0|^2. \tag{2}$$

再现误差是实际衍射强度与目标衍射强度比较，定义为

$$\Delta E=(2N+1)\left[\frac{P_T(n)}{P_T}-\frac{P(n)}{P_N}\right], \tag{3}$$

其中 $P_T=\sum_{n=-N}^{N}P_T(n)$，$P_N=\sum_{n=-N}^{N}P_T(n)$．光栅分束器的设计以追求更高的衍射效率和最低的再现误差为最终目的.

分束比和压缩比也是二元光学分束器的性能参数．分束比是指一束入射光经分束后形式的光束数，压缩比是每一个束斑与相对应的分束器单元面积之比.

1.1　Dammann 光栅

在式(1)中，使 $L=2$，$\varphi(n)=0$ 或 1，并且 $\varphi(-n)=\varphi(n)$，$X_{-n}=X_n$，便得到 Dammann 光栅．这是一种二阶位相的对称结构．为使衍射图样中心区域$(2N+1)$级为等光强分布，必须满足各衍射级复振幅绝对值相等的条件，即

$$|A_{-N}|=\ldots=|A_{-1}|=|A_0|=|A_{+1}|=\ldots=|A_{-N}|. \tag{4}$$

式(4)基础解数为 2^{N-1}，通常选择衍射效率 η 较大且单元最小尺寸 $\Delta_{min}=|X_{n+1}-X_n|_{min}$ 不小于制作极限的一组解作为设计参数.

一维 Dammann 光栅和二维 Dammann 光栅的最大衍射效率分别为 60～80%和 36～60%．光栅周期内位相转变点数 N 为偶数时获得的衍射效率比 N 为奇数时略高．Dammann 光栅的一种发展形式是 $\varphi(n)$ 取任意值，这种设计有利于提高衍射效率[1]．Dammann 光栅可以是无再现误差的结构.

设计实例：一维 Dammann 光栅分束器．周期为 1mm，分束比为 1×5．该分束器的基础解有 $S_N=8$ 组，以寻根法求解非线性方程组(4)，得位相转变点 X_n、最小特征尺寸 Δ_{min} 和相应的衍射效率 η 为

N0.	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	Δmin	$\eta(\%)$
1	0.144	0.248	0.348	0.450	0.100	30.9
2	0.170	0.287	0.390	0.470	0.060	43.3
3	0.160	0.198	0.274	0.422	0.076	62.8
4	0.030	0.130	0.274	0.490	0.020	57.9
5	0.100	0.136	0.370	0.498	0.004	66.3
6	0.110	0.268	0.322	0.474	0.052	51.7
7	0.035	0.080	0.324	0.466	0.068	58.2
8	0.070	0.138	0.216	0.456	0.088	48.1

第五组的阶衍射效率最高 $\eta=66.3\%$，且最小特征尺寸 $\Delta_{min}=4.0\mu m$ 大于光刻极限，因而可选择该组作为 Dammann 光栅的结构尺寸.

1.2　相息光栅

相息光栅是每一周期中各单元的大小相同而位相呈连续或离散分布的衍射结构．对光

栅中各单元的位相值进行优化设计可以使其产生满足设计要求的衍射强度分布.复杂组合系统优化算法很多,在这里我们推荐常用的模拟退火法.通常以衍射强度定义评价函数:

$$M_f = \sum_{n=-N}^{N} [P_T(n) - P(n)]^2, \tag{5}$$

式中 $P_T(n)$ 分别为各级衍射强度的目标值和实际值.连续地改变 $\varphi(x)$,当评价函数 M_f 达到最小并且再现误差 ΔE 满足设计要求时,便完成设计.然后将连续的 $\varphi(x)$ 量化成 L 个离散的位相值,以便采用超大规模集成电路的工艺制作.

这种多位相级的相息光栅比 Dammann 光栅具有更高的衍射效率,一维相息光栅和二维相息光栅的衍射效率分别可达 80～96%和 64～92%[3].由于位相量化,相息光栅有再现误差.

Dammann 光栅和相息光栅可以实现高效率的等光强分束,但是设计过程较繁冗费时.例如,以模拟退火法设计一个 1×10,$L=30$ 的一维相息光栅,当 $\Delta E<2\%$ 时,需要 1000s,当 $\Delta E<10\%$ 时,需要 300s.特别是当要求的分束比较大时有可能得不到收敛解.Dammann 光栅和相息光栅的分束比一般小于 30,压缩比等于其周期数.

2 位相型菲涅尔透镜列阵器件

位相型菲涅尔透镜列阵分束器是基于菲涅尔波带片的近轴衍射理论设计的列阵器件,其基本图形是由一系列半径呈周期分布的同心圆构成的菲涅尔波带.当以波长为 λ 的单色平面光照射时,在中心轴上将产生多级衍射焦点,其焦距为

$$f_m = -r_p^2/2\lambda m, \tag{6}$$

式中 λ 为入射光波长,r_p 为菲涅尔波带半径周期,f_m 是第 m 级衍射形成的焦距.对菲涅尔波带片的各半径周期作 L 级次等位相量化,可得到多阶位相型菲涅尔透镜结构.在 $n=-1$ 级焦点具有最大衍射效率,即

$$\eta = \left[\frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L}\right]^2 \tag{7}$$

显然,位相型菲涅尔透镜的衍射效率随位相量化级次的增加而提高,$L=2,4,8$ 和 16 时对应的衍射效率分别是 $\eta=0.41, 0.81, 0.95$ 和 0.99.位相型菲涅尔透镜列阵分束是基于几何成像而非单纯利用衍射频谱,当入射为标准平面波时,理论上无再现误差.位相型菲涅尔透镜列阵分束的设计过程简单,多阶位相结构产生的衍射效率高,适用于大列阵的分束.分束比等于菲涅尔透镜单元数.压缩比受限于爱里斑,与透镜单元的波带数 N 有关,约为 $3.28N^2$.位相型菲涅尔透镜列阵分束器不需要附设傅里叶变换透镜.需要说明的是,对于相对孔径较大且量化级次较高的位相型菲涅尔透镜,其最小特征尺寸 Δ_{min} 将会很小,当 Δ_{min} 与入射光波长相当时,上述标准量理论设计方法是无效的,即当 Δ_{min} 小于制作设备的分辨率时,上述设计结果不能实现.

设计实例:对 $\lambda=0.6328\mu m$ 入射波长,设计分束间隔为 1mm,$f/\#=f/10$ 的位相型菲涅尔透镜列阵分束器.透镜单元取方形,边长 $a=1mm$,焦距 $f=14.14mm$,半径周期 $r_p^2=0.$

0179mm．第 k 个波带的半径为 $r_k=\sqrt{k}\,r_p$，单元透镜内的波带周期数为 $N=a^2/4r_p^2=13.966$．位相透镜的最小特征尺寸 $\Delta_{min}=[\sqrt{N}-\sqrt{(N-1)}]r_p/L=18.23/L(\mu m)$．当 $L=16$ 时，$\Delta_{min}=1.14\mu m$．我们目前的工艺条件难以实现这样的线宽，因此只能制作八阶结构，$L=8$，$\Delta_{min}=2.28\mu m$．该八阶位相型菲涅尔透镜列阵分束器的理论衍射效率为 95%．

3　Talbot 光栅分束器

当一周期物体（如光栅）被一束激光照明时，在其后在一系列确定的平面上将产生自身再现象，这就是 Talbot 效应．周期为 d 的位相光栅，当以波长为 λ 的单色平面波入射时，其 Talbot 成像位置在

$$Z=K+Z_T/n,\quad (K\text{ 为整数},n=1,2...) \tag{8}$$

式中，$Z_T=2d^2/\lambda$ 是 Talbot 距离，Z 是 Talbot 平面．上式隐含了两种像关系：一是在 $Z=KZ_T$ 平面，再现像是与原光栅完全一样的位相分布；二是在 $Z=(1/n)Z_T$ 平面，原位相光栅被转换成二元振幅分布．Talbot 光栅分束器正是利用第二种成像关系进行设计的．

二阶位相型 Talbot 分束光栅可以实现周期与占宽比不变的振幅分布，主要设计参数是位相占宽比 $a=w/d$、位相高度 φ 以及 Talbot 成像距离 Z．典型的有 $\varphi=\pi/2$，$a=1/2$ 的 Ronchi 光栅，在 $Z=1/2(K+1/2)Z_T$ 平面有振幅像，一维光栅和二维光栅的相对光强分别为 2 和 4；$\varphi=2\pi/3$，$a=1/3$ 的二元位相光栅，在 $Z=(K+1/3)Z_T$ 平面有振幅像，一维光栅和二维光栅的相对光强分别为 3 和 9[3]．

多位相型 Talbot 分束光栅一个周期内有 N 个（对于一维情形）间隔相等而位相值不等的位相单元，可以产生周期相同而占宽比等于 $1/N$（当 N 为奇数时）或 $1/2N$（当 N 为偶数时）振幅分布，设计参数有周期内的位相单元数 N、位相级数 L 和单元位相值 $\varphi(n)$．当 N 为奇数时，$L=(N+1)/2$，Talbot 平面在 $Z=(1/N)Z_T$；当 N 为偶数时，$L=N/2$，Talbot 平面在 $Z=(1/2N)Z_T$．多位相型 Talbot 分束光栅的位相值为

$$\varphi(n)=\pi n^2/N. \tag{9}$$

式中当 N 为奇数时，n 取整数之半；N 为偶数时，n 取整数，且 $n\in[-N/2,N/2-1]$．例如，要求产生占宽比为 $a=1/16$ 的一维振幅分布，则纯位相光栅的位相单元数为 $N=8$，位相级数为 $L=4$，单元位相值分别为 $\pi/8$、$\pi/2$、$9\pi/8$ 和 2π，Talbot 平面在 $Z=1/16Z_T$．Talbot 像还发生在某些高阶的 Talbot 平面上[4]．

一维位相型 Talbot 分束器的分束比等于光栅周期数，压缩比等于位相单元数．在近轴近似的条件下，当周期数很大时，位相型分束光栅的衍射效率可接近 100%．例如，位相占宽比 $a=1/4$、分束比为 128×128 的二阶 Talbot 光栅分束器，在 $Z=1/4Z_T$ 平面上产生 128×128 等光强列阵，衍射效率达 98.8%，仅在列阵的周边，由于边缘效应而有少量的能量损失．周期数较大时再现误差可以为零．

二阶位相型 Talbot 光栅分束器与二阶位相型菲涅尔透镜列阵有类似的成像关系．同一周期内前者的位相单元数为后者的 4 倍，最小特征尺寸相同．二阶位相型透镜列阵的衍射效

率为40.5%,而二阶位相型光栅分束器可接近100%.但是,当要求的分束比不太大时,Talbot光栅分束器的衍射效率下降,再现误差增大,多位相结构不能改善其衍射效率,仅使压缩比改变.二阶位型Talbot光栅分束器与二阶位相型菲涅尔透镜列阵分束器一样不需要附加傅里叶变换透镜.

4 结语

根据实际应用中的分束要求,可以选择各种二元光学分束器的设计方法.在计算机技术迅速发展的今天,设计不同用途的光学分束器已不成困难,关键在于工艺制作.随着高精度刻蚀与测试技术和设备的不断完善,二元光学分束器的性能将进一步提高.

参考文献

1 Krackhardt U, Streihl N. *Opt. Comm.*, 1989, **74**(12): 31
2 Turunen J, Vasara A, Westerholm J. *Opt. Eng.*, 1989, **28**(11): 1162
3 Adolf W L, James A T. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(29): 4337
4 Leger J R, Swanson G J. *Opt Lett.*, 1990, **15**(5): 288

DESIGN OF THE BINARY OPTICAL BEAM SPLITTER

Guo Qing Wang Ruli
(*Optoelectronic Engineering Research Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200083, *China*)

Abstract The basic design theories of several kinds of binary optical beam splitters were described. Comparisons among them in algorithm, diffraction efficiency and reconstruction error were made and some examples were given.

Key words binary optics, beam splitter, generation of arrays.