

文章编号: 0258-7025(2005)04-0532-05

# 衍射光学元件-波分复用角色散特性分析

马 晶, 陈云亮, 谭立英, 王 骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 解复用器件是波分复用(WDM)系统中的关键性器件。在设计二元光学器件波分复用器件中,需要对二元光学器件的角色散进行分析。利用相位二元化方程对衍射光学元件(DOE)角色散及角色散温变特性进行了分析,最终得到衍射光学元件色散特性的表达式,并同时给出了角色散的温度变化特性。采用此理论结果确定杨-顾算法目标值,设计了用于波分复用的二元光学器件。利用菲涅耳衍射对器件角色散特性及角色散热特性进行了仿真,仿真结果验证了理论的正确性。

**关键词** 光通信; 二元光学; 角色散; 仿真

**中图分类号** TN929.13 **文献标识码** A

## Angular Dispersion Analysis of DOE-WDM

MA Jing, Chen Yun-liang, Tan Li-ying, Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Helongjiang 150001, China)

**Abstract** The multi-wavelength dividing element is a key element in wavelength division multiplexer (WDM) system. Phase-only diffractive optical element (PDOE) used as WDM element has many merits, such as easy coupling, polarization insensitivity, low cross-talk and simple structure. For the design of binary optical WDM element, the angular dispersion analysis is needed. Based on the phase binary equation, the angular dispersion and the thermal angular dispersion analysis are proposed in this paper. And the theoretical expressions of dispersion and thermal dispersion have been given after the analysis. Using the results of this theory, the destination value of Yang-Gu (Y-G) algorithm is selected, and the binary optical WDM element is also designed. The angular dispersion simulation based on Fresnel diffraction has been proceeded. The numerical simulation results validate the theoretical results.

**Key words** optical communication; binary optics; angular dispersion; simulation

## 1 引 言

由于卫星光通信相对于微波通信的优点<sup>[1]</sup>,它已成为星间通信链路的首选。纯相位衍射光学元件(PDOE)具有较传统光学元件更多的设计自由度和较轻的重量。随着对光学系统性能的要求进一步提高,传统的采用全折射元件的光学系统设计已开始过渡到采用衍/折射混合元件光学系统设计<sup>[2]</sup>。利用纯相位衍射光学元件实现谐波分离器件可以应用到密集波分复用系统中。纯相位衍射光学元件-波分复用(PDOE-WDM)所具有的偏振不敏感性、易于耦合和结构简单等显著优点使其较地面光纤通信系统所采用的波分复用器件更适用于卫星光通信的应用<sup>[3]</sup>,从而使卫星光通信的带宽资源优势得到充分发挥。

目前对多波长衍射光学元件(DOE)的设计多采用杨-顾优化算法在多波长情况下的推广算法<sup>[4,5]</sup>。在实际应用中,杨-顾优化算法的目标值的确定十分重要,不符合衍射规律的目标值的确定会导致算法的不收敛。衍射光学元件-波分复用(DOE-WDM)是利用衍射光学元件的角色散效应对入射多色光进行空间分离,在研究衍射光学元件角色散规律的基础上,根据色散规律确定算法目标值可以保证杨-顾算法的收敛。这正是本文所研究的工作。

## 2 理论分析

基于标量衍射理论,利用器件二元化方程分析最终得到了衍射光学元件色散特性的表达式,并同

收稿日期: 2004-03-03; 收到修改稿日期: 2004-06-14

作者简介: 马 晶(1956—),男,哈尔滨工业大学教授,主要从事卫星光通信、光学信息处理等相关方面的研究。

E-mail: majing@hit.edu.cn

时给出了角色散的温度变化特性。表达式统一表达了衍射光学元件线色散和角色散特性,利用色散特性表达式可以在多波长衍射光学元件优化设计中方便地确定目标值。角色散的温度变化特性可以为光学系统温度分析和补偿提供依据。

根据文献[6]所给出的结果,利用二元光学元件( $H_1$ )可同时实现分波和聚焦功能。纯相位二元光学元件将入射光聚焦到与光轴夹角为 $\theta$ 的焦平面上,并且对于其中一路波长 $\lambda_0$ ,二元光学器件在功能上等效于光楔加透镜功能,所以可以把透镜相位和光楔相位叠加作为 $H_1$ 的初始值。

在略去常数相位后,透镜加光楔的合成相位 $\phi$ 可以表示为

$$\phi = -\frac{\pi}{\lambda f}[(x - f\theta)^2 + y^2]. \quad (1)$$

对(1)式进行二元量化(用 $2\pi$ 截取),得到器件的二元化方程为

$$-\frac{\pi}{\lambda f}[(x - f\theta)^2 + y^2] = -2m\pi. \quad (2)$$

这里只考虑一维情况,不妨设其为 $x$ 轴。(2)式中取 $y = 0$ ,则

$$(x - f\theta)^2 = 2m\lambda f. \quad (3)$$

(3)式即为仅考虑一维情况下的二元化方程。其中 $x$ 代表各截取点坐标, $m$ 为截取点阶数, $f$ 为焦距。在各种情况下,包括温度变化、不同波长等情况,(3)式均能满足。因此对(3)式进行相应分析可求出不同情况下器件的变化规律。

为了求出不同入射波长情况下衍射光学元件的色散特性,并考虑到当波长变化时,各截取点坐标和截取级数不会变化,因此将(3)式中 $m, x$ 视为不变量,对其求微分,经过整理可得

$$d\theta = -\frac{1}{f} \left[ \left( \frac{m\lambda}{x - f\theta} + \theta \right) df + \frac{mf}{x - f\theta} d\lambda \right], \quad (4)$$

式中 $df$ 对应于轴上,即 $\theta = 0$ 时,焦距 $f$ 由于波长变化而发生的变化,也就是所说的线色散; $d\lambda$ 即波长变化。(3)式在任意 $\theta$ 值时均成立,为求得线色散变化不妨令 $\theta = 0$ ,有 $x^2 = 2m\lambda f$ ,对此结合(4)式经过推导得到线色散和角色散的微分和积分形式。

$$\begin{cases} df = -\frac{f}{\lambda} d\lambda, & f = \frac{\lambda_0}{\lambda} f_0, \\ d\theta = \frac{\theta}{\lambda} d\lambda, & \theta = \frac{\lambda}{\lambda_0} \theta_0, \end{cases} \quad (5)$$

(5)式即为衍射光学元件-波分复用的线色散和角色散表达式。从该式中可以看出无论是角色散还是线色散均与波长有关。线色散的表达式同文献[7,8]

所给出的衍射光学元件的色散表达式一致,这说明了理论的正确性。

从以上的推导过程中可以看出,(4)式将角色散和线色散联系起来,只要确定了两种色散之一,另一种色散也随之确定了。在这里只考虑由于相位函数二元化所引起的波长色散,而没有考虑材料色散的因素。由文献[9]分析结果,在适当的 $\theta_0$ 值和衍射光学元件条件下,可以忽略材料色散的影响。

同样,利用(3)式推导同一波长入射,不同温度下角色散的变化规律。温度变化时,由于横向热胀冷缩引起相同截取阶数截取点坐标变化,其衍射光也将随之产生变化。因此将(3)式中 $\lambda$ 和 $m$ 视为不变量,对其求微分,整理后有

$$f \cdot d\theta = dx - \left( \frac{x - f\theta}{2f} + \theta \right) \cdot df. \quad (6)$$

同样,(6)式中 $f$ 为轴上线色散,由(3)式令 $\theta = 0$ ,有 $x^2 = 2m\lambda f$ ,求微分有下式

$$dx = \frac{x}{2f} df, \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式有

$$d\theta = -\frac{\theta}{2f} df. \quad (8)$$

菲涅耳衍射透镜焦距热特性可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\frac{1}{\varphi_k} \frac{d\varphi_k}{dT} = -2\alpha, \quad (9)$$

其中 $\varphi_k = 1/f$ 为衍射透镜的光焦度, $\alpha$ 为材料的热胀系数。表1给出了几种材料的热胀系数。

表 1 热胀系数

Table 1 Thermal expansion coefficient

Material	BK7	Germanium	PMMA
$\alpha$	$7.10 \times 10^{-6}$	$58.0 \times 10^{-6}$	$67.9 \times 10^{-6}$

将 $\varphi_k = 1/f$ 代入(9)式可以得到焦距随温度变化规律为

$$df = 2\alpha f \cdot dT, \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式后可以得到衍射光学元件的角色散随温度的变化规律为

$$d\theta = -\alpha \cdot \theta \cdot dT, \quad (11)$$

解此微分方程,并考虑初始条件: $T = T_0$ 时, $\theta = \theta_0$ ,并且由于材料热胀系数充分小可以取一级近似。

$$\theta = \theta_0 \exp[\alpha(T_0 - T)] \approx \theta_0 + \theta_0 \alpha (T_0 - T). \quad (12)$$

### 3 衍射光学元件-波分复用设计

为验证理论结果,首先采用杨-顾算法设计同时实现分光和聚焦功能的衍射光学元件器件。其结构

参数如下确定。

衍射光学元件对输入高斯光束叠加纯相位变化后经衍射到输出平面,衍射光学元件衍射结构如图 1 所示。输入光束腰斑位置在  $X_1$  平面,输出光斑腰斑位置在  $X_2$  平面。输入波长为  $\lambda_{1,2,3,4}=800, 804, 808, 812 \text{ nm}$ ,量化台阶数为 16,采样点数为 256,考虑到利于加工等因素,取输入输出高斯光束束腰为  $761.79 \mu\text{m}$  和  $42.32 \mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>。

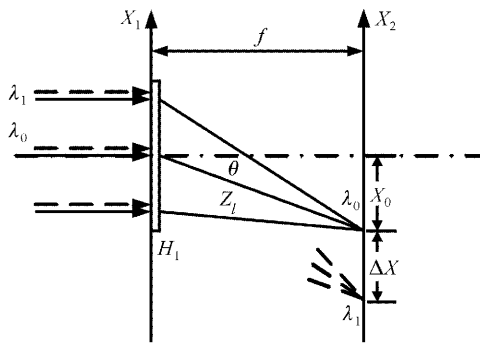


图 1 衍射光学元件-波分复用设计结构图  
Fig. 1 Diagram of DOE-WDM structure

根据高斯光束在自由空间中的传播规律有

$$w_2 = w_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda Z_l}{\pi w_1^2}\right)^2}, \quad (13)$$

其中  $w_1$  和  $w_2$  分别为输入输出光斑的半径,根据 (13) 式在确定输入输出束腰的情况下可以求得衍射距离为  $Z_l = 12.55 \text{ cm}$ 。

为保证光束进行有效的空间分离以降低串扰,取光束间隔为  $\Delta x = 3w_2$ ,根据 (5) 式有

$$\Delta\theta = \frac{\theta_0}{\lambda_0} \Delta\lambda \Rightarrow \frac{\Delta x}{Z_l} = \frac{x_0}{\lambda_0 Z_l} \Delta\lambda \Rightarrow x_0 = \frac{\Delta x}{\Delta\lambda} \lambda_0, \quad (14)$$

将  $\Delta\lambda = 4 \text{ nm}$ ,  $\Delta x = 3w_2$ ,  $w_2 = 42.43 \mu\text{m}$  代入 (14) 式,求得  $x_0 = 2.56 \text{ cm}$ 。由  $Z_l^2 = f^2 + x_0^2$  可以得到  $f = 12.28 \text{ cm}$ 。

同样,经过简单的计算可以得到各波长衍射峰位置,这样就可以得到目标光场的分布。利用所确定的目标值进行杨-顾优化衍射光学元件-波分复用设计,其设计所得到的相位剖面 and 输出光斑分布如图 2 所示。图中 Phase 为相位函数,  $N$  为光场采样点序号,  $P$  为相对光场振幅。

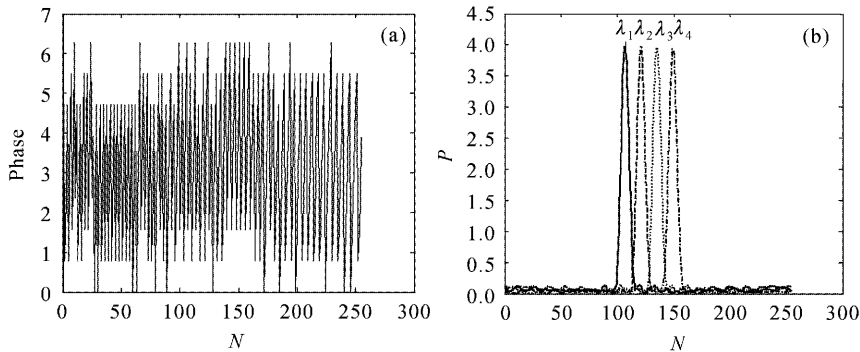


图 2  $x_0 = 2.56 \text{ cm}$  时衍射光学元件设计结果。(a) 衍射光学元件相位剖面;(b) 衍射场强度分布

Fig. 2 Design results of DOE, when  $x_0 = 2.56 \text{ cm}$ . (a) Phase profile of DOE; (b) Distribution of diffraction intensity

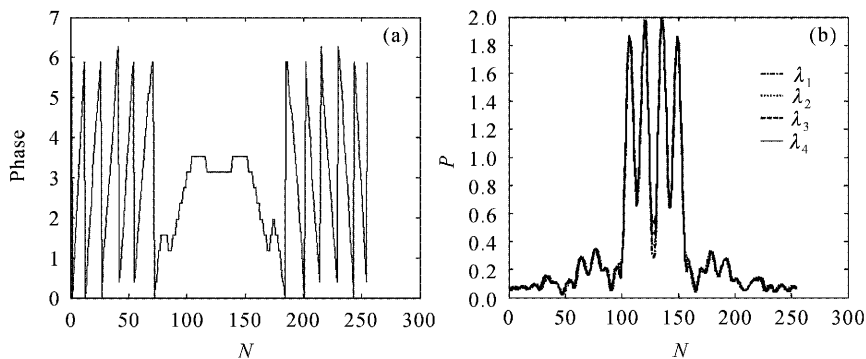


图 3  $x_0 = 0 \text{ cm}$  时衍射光学元件设计结果。(a) 衍射光学元件相位剖面;(b) 衍射场强度分布

Fig. 3 Design results of DOE, when  $x_0 = 0 \text{ cm}$ . (a) Phase profile of DOE; (b) Distribution of diffraction intensity

图 2 所给出的设计结果表示衍射光学元件对 4 路波长很好地实现了分光 and 聚焦功能。这是由于所

确定的目标光场分布与衍射光学元件的角色散特性相符合,从而保证了器件的功能要求是物理上可实

现的,所以算法收敛。

为了对比结果,将第 2 节给出的结构参数中  $x_0=0$ ,其余结构参数不变,同样进行杨-顾优化设计,设计结果如图 3 所示。图 3(b)所给出的输出光强分布中 4 种波长完全混合在一起,没有达到空间分离的结果。这是因为所确定的目标参数不合理,与衍射光学元件的角色散特性相矛盾,器件功能要求是物理上不可实现的,因此导致了算法的不收敛。

从设计结果可以知道,设计纯相位衍射光学元件-波分复用时,设计目标参数需要同衍射光学元件的色散特性相符合,以保证物理可实现性。如果设计目标参数与衍射光学元件色散特性不符合,器件的设计算法不会收敛。利用色散表达式(5)可以确定物理可实现的目标值。

#### 4 数值仿真结果及分析

对所设计的衍射光学元件-波分复用进行角色散

分析和热分析。仿真分析的方法为:角色散分析中,对不同输入光波长的高斯光束叠加上所设计的纯相位函数,然后进行菲涅耳衍射变换,记录衍射峰位置并分析其与波长的关系;热分析中,对同一输入波长下的高斯光束,根据热胀系数,计算输入平面的相位函数由于温度变化(热胀冷缩)所产生的新相位函数,对输入高斯光束叠加输入的相位函数,进行菲涅耳衍射分析,并记录其衍射峰位置,分析衍射峰与温度的关系。仿真结果中,衍射峰的位置代表了角色散特性。采用此方法对衍射光学元件在不同波长和温度下的衍射结果进行仿真,与物理过程是一致的。

图 4 给出了角色散特性的数值仿真结果,其波长范围为 780~830 nm。图 4(a)给出了输出光强随波长变化情况,可以看出衍射峰随波长变化呈线性变化,提取图 4(a)中的衍射峰位置并做出与之相对应的波长变化曲线,曲线在图 4(b)给出,图中同时给出了理论式(5)的结果。

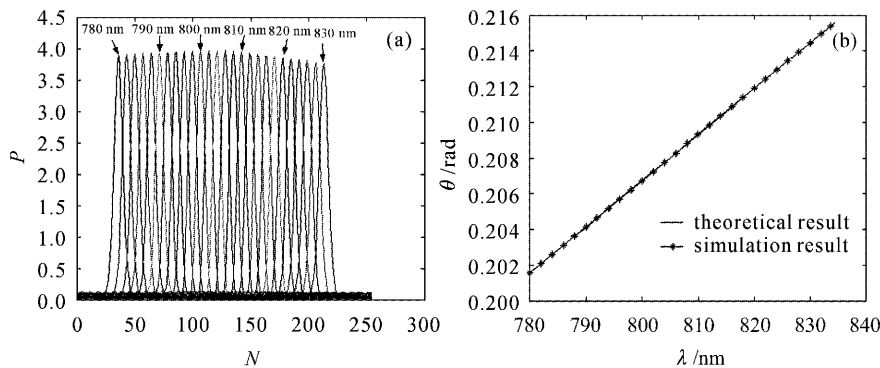


图 4 角色散特性仿真结果。(a)相对于波长的输出光强分布;(b)角色散特性

Fig. 4 Simulation results of angular dispersion. (a) Output intensity distribution related to wavelength; (b) Characteristics of optical angular dispersion

图 5 给出了衍射光学元件随温度变化情况,为了结果的明显性,取材料热膨胀系数为  $7.1 \times 10^{-5}$ ,

温度范围  $-70 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 5(a)给出了输出光强随温度变化所引起的衍射峰位置变化,可以看出衍射

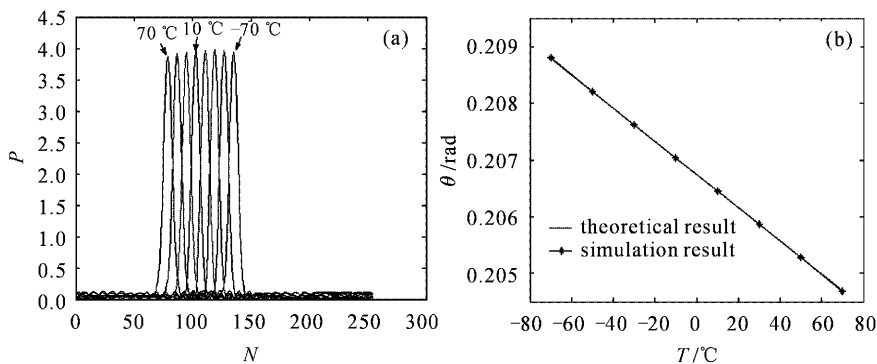


图 5 热角色散特性仿真结果。(a)输出光强相对于温度分布;(b)角色散热特性

Fig. 5 Simulation results of thermal dispersion. (a) Output intensity distribution related to temperature; (b) Thermal characteristics of angular dispersion

峰位置随温度相应漂移,同样提取图 5(a)中衍射峰位置并做出与之相对应的波长变化曲线,曲线在图 5(b)给出,图中同时给出了理论式(12)的结果。从图中可以看出,理论结果与仿真结果符合得很好。

## 5 结 论

根据本文角色散理论结果在衍射光学元件分波器件设计中确定设计目标值,可以保证器件参数的物理可实现性,从而保证了算法的收敛。对器件温度特性的分析结果给出了衍射光学元件角色散特性随温度变化的规律,此结果对于器件应用于大温变环境时光学系统的稳定性分析,以及对光学系统温变特性补偿具有重要的价值。

### 参 考 文 献

- Chen Yunliang, Ma Jing, Tan Liying *et al.*. Analysis of the effects of Gaussian beam on intersatellite optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl.):393~395  
陈云亮,马 晶,谭立英等. 高斯光束特性对卫星光通信的影响分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(增刊): 393~395
- Wang Qian, Xu Shiwen. Athermal design for visible diffractive-refractive hybrid optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1595~1598  
王 茜,许士文. 可见光折/衍射混合光学系统消热差设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1595~1598
- P. Blattner, H. P. Herzig, K. J. Weible *et al.*. Diffractive optics for compact space communication terminals [J]. *J. Mod. Opt.*, 1996, **43**(7): 1473~1484
- Ben-yuan Gu, Guo-zhen Yang, Bi-zhen Dong *et al.*. Diffractive-phase-element design that implements several optical functions [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2564~2570
- Bi-zhen Dong, Guo-qing Zhang, Guo-zhen Yang *et al.*. Design and fabrication of a diffractive phase element for wavelength demultiplexing and spatial focusing simultaneously[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(35): 6859~6864
- Wu Xiaoping. *The Study of the Application of Binary Optical in Density Wavelength Division Multiplexer Optical Communication Systems* [D]. Hangzhou: Docotor Desseration of Zhejiang Univ. 1996. 50~66  
吴小萍. 二元光学在密集波分复用系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 1996. 50~66
- Fen Baogen. Binary optical element and its application[J]. *J. Appl. Opt.*, 1994, **15**(1): 11~19  
冯包根. 二元光学元件及其应用[J]. *应用光学*, 1994, **15**(1): 11~19
- Cui Qingfeng. Relization of three-color achromats with binary optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 877~881  
崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差[J]. *光学学报*, 1994, **14**(8): 877~881
- Zhang Guoping, Ye Jiaxiong, Li Zaiguang. Dispersion analysis of diffractive lenses [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(2): 23~26  
张国平,叶嘉雄,李再光. 衍射透镜的色散分析[J]. *光电工程*, 1997, **24**(2): 23~26
- Carmina Londono, Willam T. Plummer, Perter P. Clark. Athermalization of a signal-component lens with diffractive optics[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(13): 2295~2302