

文章编号: 1672-8785(2019)01-0011-05

双层衍射光学元件微结构高度的优化设计

杨亮亮

(盐城师范学院新能源与电子工程学院, 江苏 盐城 224007)

摘 要: 微结构高度是衍射光学元件的重要加工参数之一。基于双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率和微结构高度的关系, 分析并给出了微结构高度的优化设计方法。在满足光学系统性能要求的情况下, 通过适当地降低带宽积分平均衍射效率来减小微结构的高度。分别针对可见光、长波红外、红外双波段三种波段工作的双层衍射光学元件进行仿真分析。分析结果显示, 工作在长波红外波段的双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率减小 1.9%, 微结构高度能降低 55% 以上。该结论对于双层衍射光学元件的加工及应用有重要的意义。

关键词: 衍射光学; 衍射效率; 光学设计; 微结构高度

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.01.003

Optimal Design of the Microstructure Height for Double-layer Diffractive Optical Elements

YANG Liang-liang

(School of New Energy and Electronics, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

Abstract: The microstructure height is one of the important parameters of Diffractive Optical Elements (DOEs). On the basis of the relationship of Polychromatic Integral Diffraction Efficiency (PIDE) with the microstructure heights of Double-layer Diffractive Optical Elements (DLDOEs), the optimal design method was analyzed and presented. Under the premise of satisfying the performance requirements of the optical system, the reduction of the microstructure height can be realized by reducing PIDE. The DLDOEs operating in the visible light band, long-wave infrared band and two infrared bands were simulated and analyzed respectively. The analytical results showed that the microstructure height of the DLDOE operating in the long-wave infrared band could be reduced by more than 55% when its 1.9% PIDE was sacrificed with this method. This conclusion was of great significance to the fabrication and application of DLDOEs.

Key words: diffractive optics; diffraction efficiency; optical design; microstructure height

收稿日期: 2018-12-17

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(16KJD140001); 2018 年大学生创新创业训练计划项目(省级指导 201810324009X)

作者简介: 杨亮亮(1986-), 女, 江苏盐城人, 博士, 讲师, 主要从事光学设计、衍射光学、太阳能聚光镜等方面的研究。 E-mail: yang_liangliang@163.com

0 引言

衍射光学元件越来越多地被应用到传统成像光学系统中^[1-5]。它可以改善传统成像光学系统的成像质量,并简化其结构。这些有十分重要的意义。衍射效率是评价衍射光学元件以及含有衍射光学元件的折衍射混合光学系统的重要指标之一,它的大小决定了衍射光学元件在折衍射混合光学系统中应用的可行性与使用波段范围。

传统的单层衍射光学元件只能在设计波长处达到 100% 的衍射效率,随着波长逐渐偏离设计波长,衍射效率逐渐下降。多层衍射光学元件除了具有单层衍射光学元件的成像特点之外,还能在很宽的光谱范围内获得很高的衍射效率,偏离设计波长时衍射效率并不会明显下降^[6-8]。工作在成像光学系统中的衍射光学元件,主要采用单点金刚石车削工艺加工。在加工过程中不可避免地会引入一些加工误差,它会影响衍射光学元件的实际衍射效率。微结构高度是衍射光学元件加工的一个主要参数。多层衍射光学元件的微结构高度较大,这使得加工难度增大,导致实测的衍射效率较低^[9-11]。所以,如何减小微结构高度,对于衍射光学元件的加工有重要实际意义。

本文分析并给出了双层衍射光学元件的表

面微结构高度和带宽积分平均衍射效率的关系,以减小带宽积分平均衍射效率的方法来大幅度降低双层衍射光学元件的微结构高度。在红外波段光学系统中采用双层衍射光学元件,可以很大幅度地减少微结构高度。该方法可以用于指导双层衍射光学元件的实际加工。

1 双层衍射光学元件的设计

双层衍射光学元件是最简单的多层衍射光学元件,它由两种具有不同色散系数的谐衍射元件组成^[12-14]。如图 1 所示,双层衍射光学元件相当于两个单层衍射光学元件叠加在一起,但双层衍射光学元件和传统单层衍射光学元件的表面微结构高度却有很大的差异。

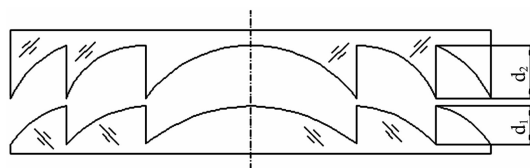


图 1 双层衍射光学元件的结构图

图 1 中,成像用分离型双层衍射光学元件的中间介质为空气。要实现双层衍射光学元件的第 m 衍射级次在设计波长处具有 100% 的衍射效率,需满足设计波长 λ_1 、 λ_2 处位相延迟为 2π 的整数倍这个条件。此时,分离型双层衍射光学元件的微结构高度分别为

$$\begin{cases} d_1 = \frac{\lambda_2 \times [1 - n_2(\lambda_1)] - \lambda_1 \times [1 - n_2(\lambda_2)]}{[n_1(\lambda_1) - 1] \times [n_2(\lambda_2) - 1] - [n_1(\lambda_2) - 1] \times [n_2(\lambda_1) - 1]} \\ d_2 = \frac{\lambda_2 \times [n_1(\lambda_2) - 1] - \lambda_1 \times [n_1(\lambda_1) - 1]}{[n_1(\lambda_1) - 1] \times [n_2(\lambda_2) - 1] - [n_1(\lambda_2) - 1] \times [n_2(\lambda_1) - 1]} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $n_i(\lambda_i)$ 是双层衍射光学元件中第 i 层谐衍射元件的基底材料在波长 λ_i 处的折射率, d_i 为第 i 层谐衍射元件的表面微结构高度。

从加工的难度考虑,微结构高度越小越易加工。从式(1)可以看出,如果两个材料的阿贝数非常接近,即材料的色散程度近似时,式(1)中的分母很小,这将导致微结构高度增大。所以在选择双层衍射光学元件的基底材料时,应注意两种材料的阿贝数差值,差值越大越

好。同时,由式(1)可知,当双层衍射光学元件的材料确定之后,就可以求得衍射光学元件的微结构高度,进一步可得到双层衍射光学元件第 m 衍射级次的衍射效率表达式:

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left(m - \frac{(n_1(\lambda) - 1) \times d_1 + (n_2(\lambda) - 1) \times d_2}{\lambda} \right) \quad (2)$$

双层衍射光学元件第 m 衍射级次带宽积分平均衍射效率为

$$\bar{\eta}_m = \frac{1}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \sin^2 \left(m - \frac{(n_1(\lambda) - 1) \times d_1 + (n_2(\lambda) - 1) \times d_2}{\lambda} \right) d\lambda \quad (3)$$

式中, λ_{min} 和 λ_{max} 分别表示波段范围内的最小波长值和最大波长值。

2 双层衍射光学元件在可见光波段的仿真分析

对于工作在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 可见光波段的双层衍射光学元件, 分别以聚甲基丙烯酸酯 (PMMA) 和聚苯乙烯 (PC) 为第一层和第二层谐衍射光学元件的基底材料。双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与微结构高度的关系曲线如图 2 所示, 横坐标为带宽积分平均衍射效率, 纵坐标分别为两个谐衍射光学元件的微结构高度。由图 2 可见, 当该双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率为 98.80% 时, 对应 PMMA 和 PC 的微结构高度分别为 $13.71 \mu\text{m}$ 和 $11.48 \mu\text{m}$ 。如果带宽积分平均衍射效率为 95%, 则满足系统的使用要求。与 98.80% 相比较, 衍射效率减小了 3.8%, 对应的微结构高度分别减小到 $5.75 \mu\text{m}$ 和 $4.81 \mu\text{m}$, 两个微结构高度都大概下降了 58%。

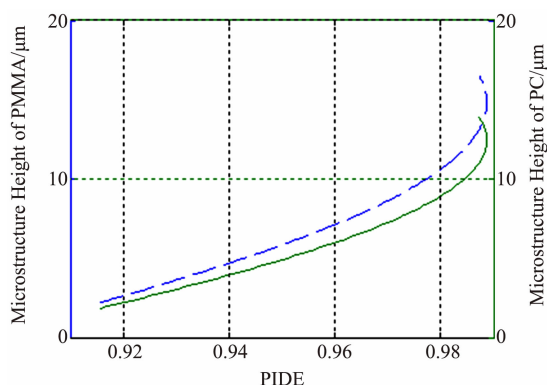


图 2 可见光波段的带宽积分平均衍射效率与微结构高度的关系

3 双层衍射光学元件在长波红外波段的仿真分析

对于工作在长波红外 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的双层衍射光学元件, 分别以 ZnSe 和 ZnS 为第一

层和第二层谐衍射光学元件的基底材料。双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与微结构高度之间的关系如图 3 所示。当该双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率为 99.90% 时, 对应 ZnSe 和 ZnS 的微结构高度分别为 $112.41 \mu\text{m}$ 和 $123.43 \mu\text{m}$ 。当带宽积分平均衍射效率为 99% 时, 对应的微结构高度分别为 $72.52 \mu\text{m}$ 和 $76.59 \mu\text{m}$ 。带宽积分平均衍射效率为 98% 即可满足系统的使用要求, 此时对应的微结构高度分别减小到 $50.41 \mu\text{m}$ 和 $50.75 \mu\text{m}$, 两个微结构高度分别减小了 55.16% 和 58.88%。可见, 带宽积分平均衍射效率从 99.90% 下降到 98%, 即减小 1.9% 时, 对应的两个微结构高度分别减小了 50% 以上, 下降明显。

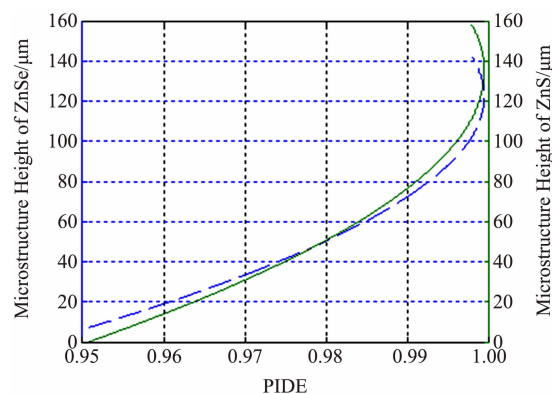


图 3 长波红外波段的带宽积分平均衍射效率与微结构高度的关系

4 双层衍射光学元件在红外双波段的仿真分析

对于工作在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 红外双波段的双层衍射光学元件, 分别以 ZnSe 和 ZnS 为第一层和第二层谐衍射光学元件的基底材料。双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与微结构高度之间的关系如图 4 所示。当该双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率为 97% 时, 对应 ZnSe 和 ZnS 的微结构高度分

别为 $158.56\ \mu\text{m}$ 和 $178.24\ \mu\text{m}$ 。当带宽积分平均衍射效率为 90% 时, 对应的微结构高度分别为 $114.74\ \mu\text{m}$ 和 $128.10\ \mu\text{m}$ 。如果带宽积分平均衍射效率 85% (从 97% 下降到 85%, 即减小了 12%) 可满足系统的使用要求, 则此时对应的微结构高度分别减小到 $94.67\ \mu\text{m}$ 和 $105.14\ \mu\text{m}$, 两个微结构高度都减小了 40% 以上。微结构高度的减小使得衍射光学元件的加工难度降低, 85% 的衍射效率对于批量生产的红外双波段光学系统而言是可以满足的。

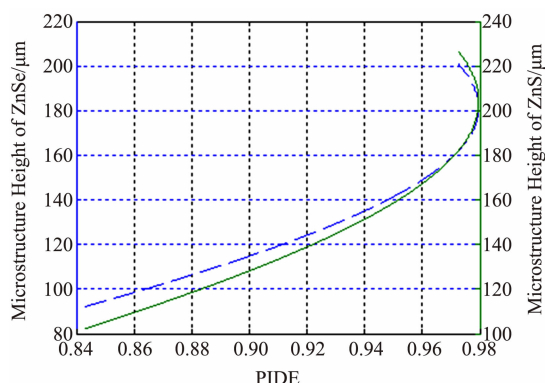


图 4 红外双波段的带宽积分平均衍射效率与微结构高度的关系

5 结论

由于双层衍射光学元件的微结构高度较大, 特别在红外波段, 实际中双层衍射光学元件的加工难度较大, 容易引入较大的加工误差, 导致实际衍射效率较低。本文基于双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率和微结构高度的关系, 提出了降低微结构高度的方法。在满足光学系统要求的情况下, 通过适当降低带宽积分平均衍射效率来减小微结构高度。

对于可见光波段的双层衍射光学元件, 带宽积分平均衍射效率减小 3.8% 时可实现对应的微结构高度下降约 58%。在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 长波红外波段, 带宽积分平均衍射效率减小 1.9% 时可实现对应的两个微结构高度分别减小 55.16% 和 58.88%。对于工作在红外双波段的双层衍射光学元件, 当带宽积分平均衍射效率从 97% 下降到 85%, 即减小了 12% 时, 两个微结构高度都下降了 40% 以上。综上可见,

如果带宽积分平均衍射效率少量下调能满足设计要求, 那么微结构高度便能大幅度减小, 从而降低了加工难度。本文所介绍的方法和得到的结论为衍射光学元件的应用及加工提供了理论依据。

参考文献

- [1] Swanson G J. Binary Optics Technology: The Theory and Design of Multi-level Diffractive Optical Elements [R]. MIT Lincoln Laboratory Technical Report, 1989.
- [2] Missig M D, Morris G M. Diffractive Optics Applied to Eyepiece Design [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(14): 2452-2461.
- [3] 裴雪丹, 崔庆丰, 冷家开, 等. 多层衍射光学元件设计原理与衍射效率的研究 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1126-1131.
- [4] 薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳, 等. 基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 1-5.
- [5] 常笑薇. 环境温度变化对双波段衍射光学元件衍射效率的影响 [J]. *北京交通大学学报*, 2016, **40**(6): 122-126.
- [6] 薛常喜, 崔庆丰, 杨亮亮, 等. 基于柯西色散公式的多层衍射光学元件的设计和分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 253-257.
- [7] 毛珊, 崔庆丰. 双层衍射元件加工误差对带宽积分平均衍射效率的影响 [J]. *光学学报*, 2016, **36**(1): 0105001.
- [8] 刘涛. 衍射光学元件的冷反射特性研究 [D]. 长春理工大学, 2013.
- [9] Yang H F, Xue C X. Influence of Passive Facet of Multilayer Diffractive Optical Elements [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(1): 2604-2609.
- [10] 赵丽东, 崔庆丰, 毛珊, 等. 衍射元件表面粗糙度对衍射效率的影响 [J]. *光子学报*, 2018, **47**(8): 154-159.
- [11] 杨亮亮. 多层衍射光学元件斜入射衍射效率的测量 [J]. *光学学报*, 2017, **37**(2): 0205003.
- [12] Faklis D, Morris G. M. Spectral Properties of Multi-order Diffractive Lenses [J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(14): 2462-2468.

- [13] Ma T, Shen Y B, Yang G G. Improving Diffraction Efficiency of DOE in Wide Waveband Application by Multilayer Micro-structure [J]. *Infrared*

and Laser Engineering, 2008, **37**(1):119-123.

- [14] 杨亮亮. 多层衍射光学元件衍射效率的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2013.

(上接第 10 页)

电吊舱系统的远距离侦察、目标搜索和跟踪应用。随着未来大面阵数字化焦平面探测器的成熟应用, 该研究将会在机载光电系统中具有广泛的应用前景。

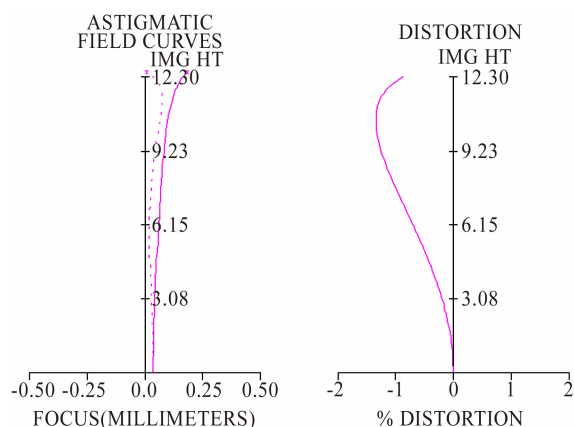


图 10 短焦场曲畸变

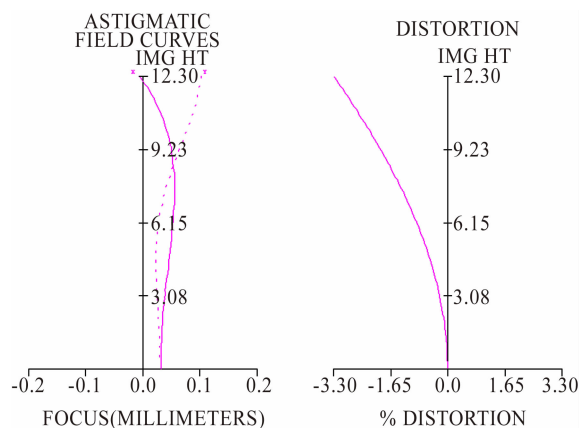


图 11 中焦场曲畸变

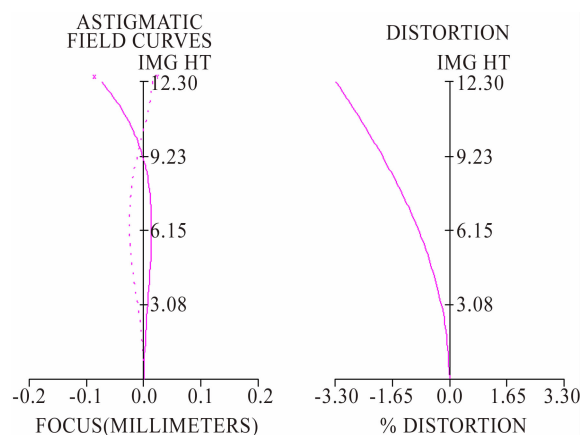


图 12 长焦场曲畸变

参考文献

- [1] 薛慧, 李常伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计 [J]. *红外与毫米波学报*, 2012, **31**(5): 421-424.
- [2] 王向军, 王敏. 适用于无人机小型吊舱的变焦控制系统设计 [J]. *光电工程*, 2013, **40**(1): 139-144.
- [3] 白丕绩, 赵俊, 韩福忠, 等. 数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(1): 0102003.
- [4] 吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术 [J]. *航空兵器*, 2017, **18**(6): 3-12.
- [5] 王之江. *实用光学技术手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.