

doi:10.3788/gzxb20134210.1208

谐衍射光学元件光谱随入射角漂移的现象研究

于登群^{1,2}, 曹剑中¹, 闫阿奇¹, 张建¹, 屈恩世¹, 王峰^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:基于二元光学元件的相位延迟表达式,推导出谐衍射光学元件在光束斜入射时的相位延迟表达式以及衍射效率表达式,定性分析了谐衍射光学元件衍射效率与光束入射角度的关系.分析表明:在可见光范围内,谐衍射光学元件的谐波长随入射角增大而向长波方向漂移,并且短波部分变化较较长波部分更为明显;对于单色光,随着入射角变化,出现不同衍射级次更替现象;对于普通衍射元件,随入射角增大波峰漂移速度远大于谐衍射元件衍射波峰速度;入射角对短波段的衍射效率影响更大.

关键词:谐衍射光学元件;入射角;衍射效率;波峰漂移

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)10-1208-4

Harmonic Diffractive Optical Element Wave Crest Drift with Incident Angles

YU Deng-qun^{1,2}, CAO Jian-zhong¹, YAN A-qi¹, ZHANG Jian¹, QU En-shi¹, WANG Feng^{1,2}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to phase shift method of binary optics, the phase delay expression and the diffraction efficiency of Harmonic Diffractive Optical Element (HDOE) at oblique incidence were derived. And the relationship between the diffraction efficiency and the beam incident angle was qualitatively analyzed. The results show that in the visible spectral range, resonant wavelength of HDOE becomes longer with incidence angle increasing, otherwise in the short-wave part wave crest drift more violently; with incident angle of monochromatic light increasing, the diffraction order sequence appears; with the incidence angle increasing, the wave crest of ordinary binary element drift much faster than HDOE; beam incidence angle has a greater impact on diffraction efficiency of short wave.

Key words: Harmonic Diffractive Optical Element (HDOE); Incident angle; Diffraction efficiency; Wave crest drift

0 引言

普通衍射光学元件的衍射效率随着成像光谱宽度的增加而大幅下降,而谐衍射光学元件则可以在较宽的成像光谱范围内具有多个衍射效率很高的峰值^[1].从 20 世纪 90 年代提出谐衍射元件至今,对这种元件的衍射特征的研究理论已经非常系统,其中包括几何光线理论、标量衍射理论、矢量衍射理论以

及等效介质理论等,并且相应有多种分析模型^[2-3].但是,对于含有谐衍射元件的折衍混合成像系统中,随入射角的变化出现的衍射光谱漂移的现象,仍未见文献对入射角与衍射效率关系进行定性分析与定量计算.

本文基于二元光学元件的相位延迟表达式,推导出谐衍射光学元件在光束斜入射时的相位延迟表达式以及衍射效率表达式,定性分析了谐衍射光学

基金项目:中科院西部之光基金(No. Y129271213)资助

第一作者:于登群(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为成像光学设计. Email: yudengqun@opt. cn

导师(通讯作者):曹剑中(1969-),男,研究员,硕士,主要研究方向为航天器视觉成像技术、航空光学遥感技术. Email: cjz@opt. ac. cn

收稿日期:2013-02-28;录用日期:2013-03-21

元件衍射效率与光束入射角度的关系. 从理论上解释了谐衍射光学元件的光谱漂移现象, 并确定谐衍射光学元件衍射波峰随入射角的变化规律, 这些规律可以作为衍射光学元件设计应用的参考.

1 谐衍射光学元件原理与设计

谐衍射光学元件具有多个可以同时达到衍射极大的谐波长, 并且各谐波长的入射光经过谐衍射表面微结构后具有相同光焦度, 即各自的衍射级次将汇聚于同一点(公共焦点). 因而, 谐衍射光学元件适用于多波段系统^[4-5].

谐衍射光学元件相邻环带间的光程差是设计波长 λ_0 的整数 m 倍, 即

$$[n(\lambda_0) - 1]d = m\lambda_0 \quad (1)$$

式中 d 为光栅刻蚀的最大高度, $n(\lambda)$ 为波长 λ 对应的折射率, m 为波长 λ_0 的衍射级次, $m\lambda_0 = m_i\lambda_i$, λ_i 为谐衍射波长, $m_i = m \pm 1, 2, 3 \dots$ 为对应的谐衍射级次^[6].

通常把衍射光学元件 m 级的衍射效率定义为 m 级衍射光的能量 E 与入射到衍射光学元件上的总能量 E_0 之比, 衍射光学元件 m 级衍射效率的基本公式为

$$\eta_m(\lambda) = E/E_0 = \sin^2 c^2 [m - \phi(\lambda)] \quad (2)$$

$$\phi(\lambda) = d[n(\lambda) - 1]/\lambda \quad (3)$$

式中, $\sin cx = \sin(\pi x)/\pi x$, $\phi(\lambda)$ 为衍射光学元件相邻周期的相位延迟. 为了便于计算, 在本文衍射效率的讨论中, 将忽略光栅表面的反射损失^[7].

选择 K9 玻璃作为单层衍射光学元件的基底, 在设计波长 d 谱线 ($0.5876 \mu\text{m}$) λ_d 处, 有 $n(\lambda_d) = 1.5168$, 取 $m=14$ 进行设计. 利用公式 $d_{\max} = m\lambda_d/[n(\lambda_d) - 1]$ 计算出设计的最大光栅刻蚀高度为 $16.0 \mu\text{m}$. 由式(2)可做出可见光范围内 ($0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$) 各谐波长相应的衍射效率曲线, 如图 1. 在

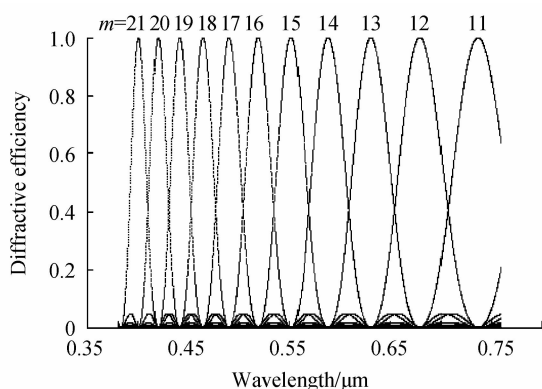


图 1 正入射情况下谐衍射光学元件各谐衍射级次的衍射效率

Fig. 1 The diffraction efficiency of all orders of HDOE when incident angle $\theta=0$

可见光范围内有 11 个光谱衍射极大, 可以用于相应的多波段光学系统.

2 光束斜入射时谐衍射光学元件的相位表达式

斜入射光线通过衍射光学元件相邻子周期时发生折射的情形如图 2. 图中 θ_1 为光线在谐衍射光学元件表面的入射角, θ_2 为光线出射角, l_1 为光线在空气中的光程, $n(\lambda)l_2$ 为光线在元件内部的光程, $n(\lambda)l_2 - l_1$ 即衍射光学元件产生的光程差^[7-10].

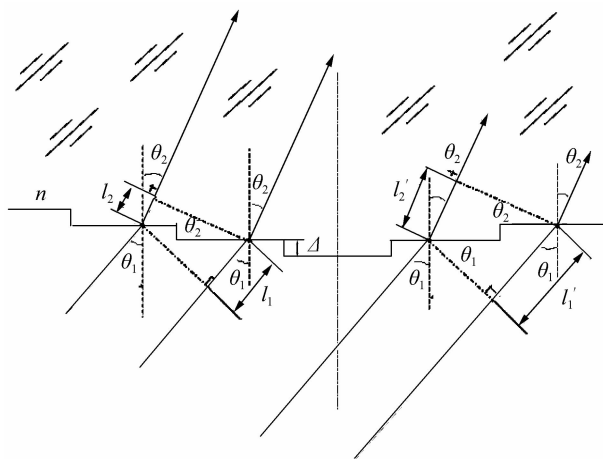


图 2 斜入射光线在谐衍射光学元件表面的折射

Fig. 2 Refraction of the slanted beam on surface of a single-layer binary optical element

当以波长 λ 为单位时, 衍射子结构产生的相位差可表示为

$$\varphi(\lambda) = \Delta[n(\lambda)l_2 - l_1]/\lambda = \Delta[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta]/\lambda \quad (4)$$

式中, θ 为光束入射到二元光学元件表面的入射角; Δ 为二元光学元件多级相位结构中每一级的台阶高度; N 为台阶数, 有 $d = N\Delta$; $\phi(\lambda)$ 为相邻衍射子周期的相位差, $\phi(\lambda)$ 为相邻衍射周期的相位差, 故有 $\varphi(\lambda) = N\phi(\lambda)$. 当 $N \rightarrow \infty$, 相位级数趋于无穷时, 衍射结构的子结构消失, 此时衍射光学元件具有连续面形结构, 则相邻衍射周期产生的相位差可表示为

$$\phi(\lambda) = N\varphi(\lambda) = d[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta]/\lambda \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)中, 得到谐衍射光学元件衍射效率与入射角关系的一般表达式, 即

$$\eta_m = \sin^2 \{m - d[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta]/\lambda\} \quad (6)$$

当入射角 $\theta=0$ 时, 式(6)变为

$$\eta_m = \sin^2 \{m - d[n(\lambda) - 1]/\lambda\} \quad (7)$$

式(7)即为通常使用的单层衍射光学元件的衍射效率表达式. 经推导, 光束以相同角度入射到相对光轴旋转对称的环带上产生的相位差是完全相同的.

3 谐衍射光学元件衍射效率与入射角关系

当光束从空气中以 θ 角入射到谐衍射光学元件上时,利用式(6)可得到在可见光范围内谐衍射光学元件衍射效率与入射角 θ 的关系,如图 3. 由图可知;当入射角 θ 从 0° 变化到 25° 时,各衍射峰值均向长波方向进行了漂移,并且在长波段处波峰变动较小,峰值移动了 0.5 个峰峰距;而在短波段处波峰变化较大,波峰向长波方向移动了一个峰峰距. 这一现象是谐衍射光学元件在多谱段光学系统中应用时应该主要考虑的.

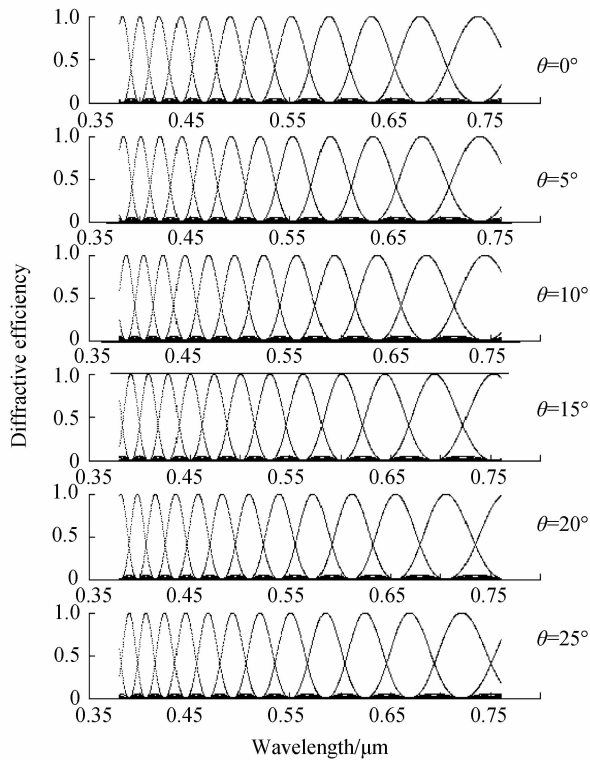


图 3 谐衍射光学元件谱波长随入射角的变化关系

Fig. 3 The effect of incident angle on diffraction efficiency of single-layer HDOE

当入射光波长与入射角度满足式(8)时,第 m 级衍射光即可以达到衍射极大.

$$m\lambda = d[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta] \quad (8)$$

对于氦氖激光器发出波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的激光,当入射角 θ 从 0° 变化到 25° 过程中,13 级衍射光的衍射效率从接近 100% 逐渐下降到趋于 0,而同时 14 级衍射光的衍射效率逐渐增长,如图 4. 因为谐衍射光学元件对同一波长光的焦距不同 $f_1\lambda_1 = f_2\lambda_2$, 所以系统成像位置将发生变化,并且中间过程会出现两个不清晰的像同时存在.

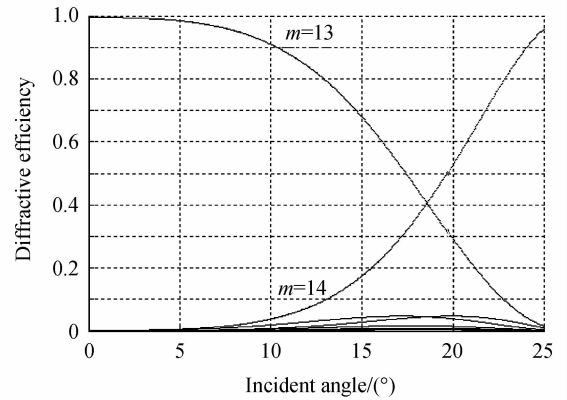


图 4 波长为 6328 nm 的光波 13 级与 14 级衍射光的衍射效率随入射角的变化关系

Fig. 4 The effect of incident angle on diffraction efficiency of 13th and 14th orders of He-Ne laser

当取 $m=1$ 进行设计时,即得到普通衍射光学元件,最大光栅刻蚀深度 $d=1.136 \mu\text{m}$,其衍射效率与入射角的关系如图 5. 随着入射角增大,衍射效率峰值迅速向长波方向漂移,短波部分衍射效率迅速下降,这将严重影响成像质量. 所以,普通衍射光学元件只适用于入射角较小、光谱较窄或对成像质量要求不高的光学系统^[11-14].

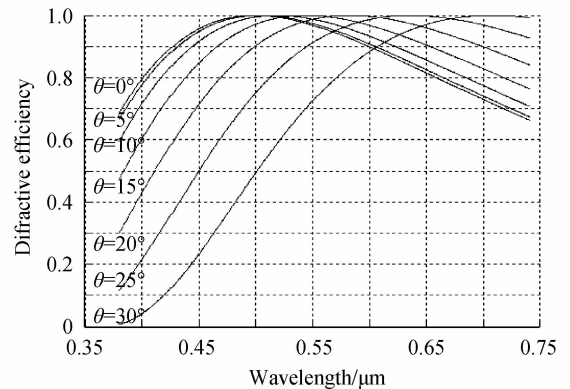


图 5 单层衍射光学元件的衍射效率随入射角变化关系

Fig. 5 The effect of incident angle on diffraction efficiency of single-layer BOE

4 结论

本文利用相位延迟表达式对衍射光学元件进行分析,推导出了光束斜入射时谐衍射光学元件的衍射效率表达式. 分析结果表明:在可见光范围内,谐衍射光学元件的谱波长随入射角增大而向长波方向漂移,并且短波部分变化较长波部分更为明显. 对于单色光,随着入射角变化,出现不同衍射级次更替现象. 对于普通衍射元件,随入射角增大波峰漂移速度远大于谐衍射元件衍射波峰速度. 入射角对短波段的衍射效率影响更大. 谐衍射光学元件的这种特性应该作为实际应用中的重要参考.

参考文献

- [1] SUN Ting, JIAO Ming-yin, ZHANG Yu-hong. Comparison analysis on the diffractive efficiency of single-layer and double-layer harmonic diffractive optical element[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 622-624.
孙婷, 焦明印, 张玉虹. 单层与双层衍射元件的衍射效率对比分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 622-624.
- [2] 娄迪. 谐衍射光学设计理论与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [3] ZENG Ji-yong, JIN Guo-fan, WANG Min-qiang, *et al.* PWC primary aberration expression of thin lens system including diffractive optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 96-100.
曾吉勇, 金国藩, 王民强, 等. 含衍射光学元件的薄透镜系统初级像差的PWC表示[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 96-100.
- [4] DONG Hui, CUI Qing-feng, PEI Xue-dan, *et al.* Imaging characteristics of multilayer diffractive optical elements[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 694-698.
董辉, 崔庆丰, 裴雪丹. 多层衍射光学元件成像特性的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 694-698.
- [5] XUE Chang-xi, CUI Qing-feng, YANG Liang-liang. Design and analysis of multi-layer diffractive optical elements with cauchy dispersion formula[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 1-5.
薛常喜, 崔庆丰, 杨亮亮. 基于柯西色散公式的多层衍射光学元件的设计和分折[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 1-5.
- [6] YANG Liang-liang, CUI Qing-feng, LIU Tao, *et al.* Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 1-6.
杨亮亮, 崔庆丰, 刘涛, 等. 衍射光学元件衍射效率的测量[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 1-6.
- [7] PEI Xue-dan, CUI Qing-feng, LENG Jia-kai. Effect of incident angle on diffraction efficiency of a two-layer diffractive optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 120-125.
裴雪丹, 崔庆丰, 冷家开. 入射角对双层衍射光学元件衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 120-125.
- [8] 王泰升. 修正折衍混合系统像质分析模型的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [9] 洪新华. 衍射光学系统消二级光谱的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [10] 马韬. 多层衍射光学元件设计理论及其在混合光学系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [11] QU En-shi, YANG Zheng, WANG Gang-feng, *et al.* Combinig binary optics with achromats to revise secondary spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2274-2278.
屈恩世, 杨正, 汪岗峰, 等. 利用二元光学和消色差复合透镜组合校正二级光谱[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2274-2278.
- [12] 张栋. 折衍混合望远系统的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [13] CUI Qing-feng. Desigh of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 12-16.
崔庆丰. 折衍混合成像光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(1): 12-16.
- [14] DU Guang-qing, XIE Yong-jun, ZHANG Xiao-lin, *et al.* Optical system design for the lightweight hybrid refractive-diffractive midwave infrared imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 843-846.
杜广庆, 谢永军, 张孝林, 等. 轻量化折衍混合中波红外热像仪光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 843-846.