

文章编号: 1672-8785(2018)12-0024-06

三层衍射光学元件斜入射 衍射效率特性研究

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: 正入射通常不能反映成像衍射光学元件的实际工作状态, 斜入射才是其普遍工作状态。建立了斜入射时三层衍射光学元件的衍射效率与入射角度关系的表达式。针对入射方向、两侧基底材料以及中间介质材料这三个影响因素, 分析了三层衍射光学元件的衍射效率随入射角度的变化关系。结果表明, 光线从正谐波衍射元件端入射时, 对应的衍射效率随入射角度增大下降得比较缓慢。组成三层衍射光学元件两侧谐波衍射元件基底材料的阿贝数差值越大, 衍射效率随入射角度增大下降得越缓慢。中间介质材料的选取由三层衍射光学元件工作时的入射角度范围决定。该分析方法和结论适用于可见光、红外等光学系统中的三层衍射光学元件。

关键词: 衍射光学; 三层衍射光学元件; 衍射效率; 斜入射

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.12.006

Study of Diffraction Efficiency of Triple-layer Diffractive Optical Elements with Oblique Incidence

YANG Liang-liang

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

Abstract: Normal incidence cannot fully reflect the working condition of diffractive optical elements (DOEs) for imaging. However, oblique incidence can reflect their general working condition. The relationship between the diffraction efficiency and the incident angle is established for triple-layer diffractive optical elements (TL-DOEs). For the three influencing factors, such as the determination of incident direction, the selection of the substrate materials on both sides and the selection of medium materials, the relationship between the diffraction efficiency and the incident angle is simulated and analyzed for TLDOEs. The results show that the diffraction efficiency decreases slowly with the increase of incident angle when the light is incident from the positive harmonic diffractive element (HDE). The larger of the difference of abbe number for the substrate materials of TLDOEs is, the more slowly of the corresponding diffraction efficiency decreases with the increase of incident angle. The selection of the medium material is decided by the incidence angle range of TLDOEs. The analysis

收稿日期: 2018-11-13

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, 主要研究方向为光学设计和聚光光伏系统设计。E-mail: yang_liangliang@163.com

method and conclusions are applicable to the visible or infrared TLDOEs.

Key words: diffractive optics; three-layer diffractive optical elements; diffraction efficiency; oblique incidence

0 引言

衍射光学元件由于具有特殊的消色差性质和非球面性质被广泛应用于可见光、红外等波段的成像光学系统中^[1-6]。衍射效率的大小决定了衍射光学元件的工作波段范围。当波长偏离设计波长时,单层衍射光学元件的衍射效率显著下降。多层衍射光学元件由基底材料不同的多个谐衍射元件组成,能以较高的衍射效率工作在较宽的波段范围。在宽波段成像光学系统中较多采用分离型双层衍射光学元件,其衍射效率随入射角度的增大下降较快^[7-8]。在分离型双层衍射光学元件的两种基底材料之间的空气间填充另一种光学材料,则形成三层衍射光学元件。

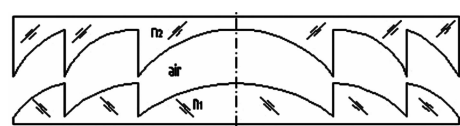
文献[9]讨论分析了中间介质材料的选择对衍射效率的影响。文献[10]在此基础上,给出了三层衍射光学元件在目镜系统中的应用。文献[11]分析了温度变化对三层衍射光学元件衍射效率的影响和特定基底材料的三层衍射光学元件的衍射效率随入射角度的变化关系。正入射不能反映成像衍射光学元件的实际工作状态,斜入射才是衍射光学元件的普遍工作状态。对于斜入射状态下工作的三层衍射光学元件,入射方向的选取、两侧基底材料的选择以及中间介质材料的选择都会影响其衍射效率的大小。本文从这三个方面出发,在满足衍射效率要求的前提下实现三层衍射光学元件的大角度

入射。

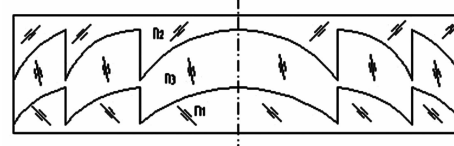
1 衍射效率的理论分析

最简单的多层衍射光学元件由两个谐衍射元件组成,中介质为空气,即如图 1(a)所示的分离型双层衍射光学元件^[11]。当分离型双层衍射光学元件的中介质由空气换为一种光学材料时,便形成了填充型三层衍射光学元件,如图 1(b)所示。多层衍射光学元件的位相延迟可以表示为^[12-13]

$$\phi(\lambda) = 2\pi \sum_{i=1}^N \frac{d_i [n_{ij}(\lambda) \cos \theta_{ij} - n_{it}(\lambda) \cos \theta_{it}]}{\lambda} \quad (1)$$



(a) 分离型双层衍射光学元件



(b) 填充型三层衍射光学元件

图 1 多层衍射光学元件的结构

式中, d_i 表示第 i 层谐衍射元件的微结构高度, N 表示谐衍射元件的个数, $n_{ij}(\lambda)$ 和 $n_{it}(\lambda)$ 分别为第 i 层谐衍射元件的入射和出射介质材料的折射率, θ_{ij} 和 θ_{it} 分别为第 i 层谐衍射元件的入射角度和出射角度。对于填充型三层衍射光学元件,斜入射时的位相延迟与入射角度的关系为

$$\phi(\lambda) = 2\pi \frac{d_1 [n_1(\lambda) \cos \theta - \sqrt{n_3^2(\lambda) - (n_1(\lambda) \sin \theta_1)^2}] + d_2 [\sqrt{n_2^2(\lambda) - (n_1(\lambda) \sin \theta_1)^2} - \sqrt{n_3^2(\lambda) - (n_1(\lambda) \sin \theta_1)^2}]}{\lambda} \quad (2)$$

式中, θ_1 表示第一层谐衍射元件的入射角度。

第 m 衍射级次的衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\phi(\lambda)}{2\pi} \right] \quad (3)$$

第 m 衍射级次的带宽积分平均衍射效率与入射角度的关系为

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_m(\lambda) &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda \\ &= \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \text{sinc}^2 \left[m - \frac{\phi(\lambda)}{2\pi} \right] d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\lambda_{\min}$ 和 $\lambda_{\max}$ 分别表示有限带宽波段范围内的两个极值波长,即最小和最大波长值。

2 三层衍射光学元件的衍射效率

用光学材料 N-FK5 ($n_d = 1.4875$, $\nu_d = 70$, 4058) 和 N-SF57 ($n_d = 1.8467$, $\nu_d = 23.7799$) 作为分离型双层衍射光学元件的基底材料, 在中间空气层填充光学塑料聚碳酸酯 (PC, $n_d = 1.5855$, $\nu_d = 29.9092$)^[14], 组成三层衍射光学元件。其工作波段为 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$, 一级衍射的带宽积分平均衍射效率在整个波段范围内高于 97.3%。根据带宽积分平均衍射效率最大值优化设计方法, 确定设计波长为 $0.435 \mu\text{m}$ 和 $0.598 \mu\text{m}$, 对应的衍射微结构高度分别为 $21.511 \mu\text{m}$ 和 $-10.339 \mu\text{m}$ ^[15]。微结构高度的正、负对应的谐衍射元件分别称为正、负谐衍射元件。下面针对入射方向、两侧基底材料以及中间介质材料对三层衍射光学元件衍射效率的影响进行分析。

2.1 入射方向的选取

对于图 1(b)所示的三层衍射光学元件, 图 2(a)和图 2(b)分别给出了从正、负谐衍射元件端入射时几个选定波长处的衍射效率随入射角度的变化, 选定的波长分别为波段范围内的两个极值波长 $0.4 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 、设计波长 $0.435 \mu\text{m}$ 和

$0.598 \mu\text{m}$, 以及中间任取的波长 $0.5 \mu\text{m}$ 。

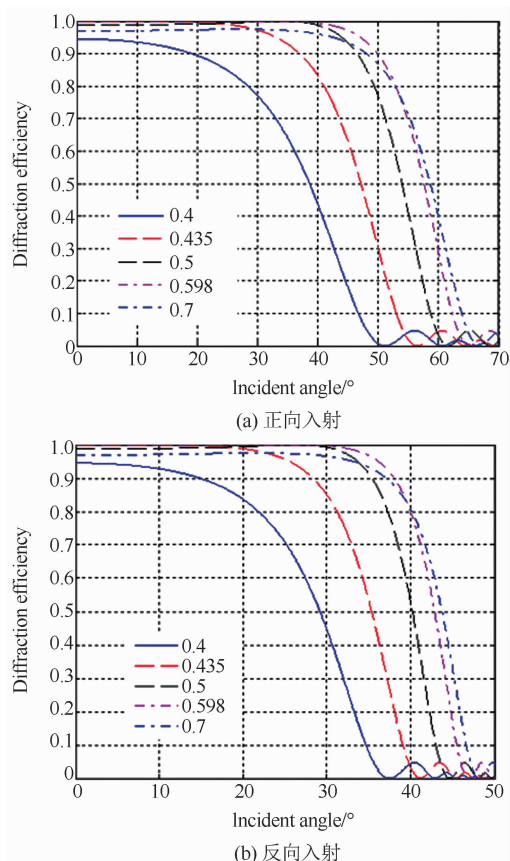


图 2 N-FK5/PC/N-SF57 的衍射效率与入射角度的关系

表 1 入射方向对衍射效率的影响

材料	$\lambda/\mu\text{m}$	positive			negative		
		99%	90%	0	99%	90%	0
N-FK5/PC/	0.435	25.20	37	56.49	19.65	28.37	41.20
N-SF57	0.598	41.56	49.90	64.52	32.33	38.06	46.98
N-ZK7/PC/	0.435	20.67	35.81	74.67*	19.06	32.76	63.14*
N-F2	0.595	20.18	34.85	70.72	18.74	32.15	61.54

注: * 表示当衍射效率下降到局部极小值时(3.25%)对应的入射角度大小

由图 2 和表 1 中可以看到, 从正谐衍射元件端入射时, 当衍射效率为 99% 时, 设计波长 $0.435 \mu\text{m}$ 和 $0.598 \mu\text{m}$ 处的入射角度分别为 25.20° 和 41.56° ; 当衍射效率为 90% 时, 入射角度分别为 37° 和 49.9° , 差值约为 13° 。从负谐衍射元件端入射时, 当衍射效率为 99% 时, $0.435 \mu\text{m}$ 和 $0.598 \mu\text{m}$ 处的入射角度分别为 19.65° 和 32.33° ; 当衍射效率为 90% 时, 入射角

度分别为 28.37° 和 38.06° , 差值约为 10° 。对比两种情况, 设计波长 $0.598 \mu\text{m}$ 对应的衍射效率随入射角度增大下降得比 $0.435 \mu\text{m}$ 对应的更缓慢。当三层衍射光学元件工作在大入射角度状态时, 光线应从正谐衍射元件端入射, 此时对应的衍射效率随入射角度增大下降得更缓慢。

2.2 两侧基底材料的选取

三层衍射光学元件由三个谐衍射元件组

成,可选择三种基底材料。分两种情形来分析,第一种情形:中间介质材料不变,通过选取不同的两侧谐衍射元件基底材料来比较斜入射时衍射效率的变化;第二种情形:两侧谐衍射元件基底材料选定,比较不同的中间介质材料对衍射效率的影响。

首先对第一种情形进行分析。中间填充的介质材料为 PC,改变两侧谐衍射元件基底材料,选取 N-ZK7($n_d=1.508469, \nu_d=61.1878$)/PC/N-F2($n_d=1.620053, \nu_d=36.4309$)分别为填充型三层衍射光学元件的基底材料。当带宽积分平均衍射效率取得最大值时确定设计波长,分别为 $0.435\ \mu\text{m}$ 和 $0.595\ \mu\text{m}$,对应的微结构高度分别为 $3.476\ \mu\text{m}$ 和 $-24.844\ \mu\text{m}$ 。由式(4)计算可知,在整个波段范围内的带宽积分平均衍射效率高于 97%。

图 3(a)和图 3(b)分别为从正、负谐衍射元件端入射的两种情况。从正谐衍射元件端入射情况下,当衍射效率为 99%时,设计波长 $0.435\ \mu\text{m}$ 和 $0.595\ \mu\text{m}$ 处的入射角度分别为 20.67° 和 20.18° ,见表 1;当衍射效率为 90%时,入射角度分别为 35.81° 和 34.85° 。从负谐衍射元件端入射情况下,当衍射效率为 99%时,设计波长 $0.435\ \mu\text{m}$ 和 $0.595\ \mu\text{m}$ 处的入射角度分别为 19.06° 和 18.74° ;当衍射效率为 90%时,入射角度分别为 32.76° 和 32.15° 。对比不同入射方向的实验结果,以 N-ZK7/PC/N-F2 为基底材料组成的密接型三层衍射光学元件,光线从正谐衍射元件端入射的衍射效率随入射角度的变化情况和从负谐衍射元件端入射时的基本一致。若设计要求衍射效率高于 90%,从正谐衍射元件端入射时可工作的入射角度范围稍大些。

与表 1 中的第一组由 N-FK5/PC/N-SF57 组成的三层衍射光学元件相比,无论是正向入射还是反向入射,第二组 N-ZK7/PC/N-F2 三层衍射光学元件的衍射效率下降为 0 时所对应的入射角度要大于第一组情况,但是第一组的衍射效率下降为 99%和 90%时对应的入射角度比第二组都要大些。所以,第一组三层衍射光学元件更

适用于衍射面入射角度比较大的成像光学系统。两侧基底材料的阿贝数差值越大,光束从正谐衍射元件端入射时三层衍射光学元件衍射效率随入射角度增大下降得越缓慢。

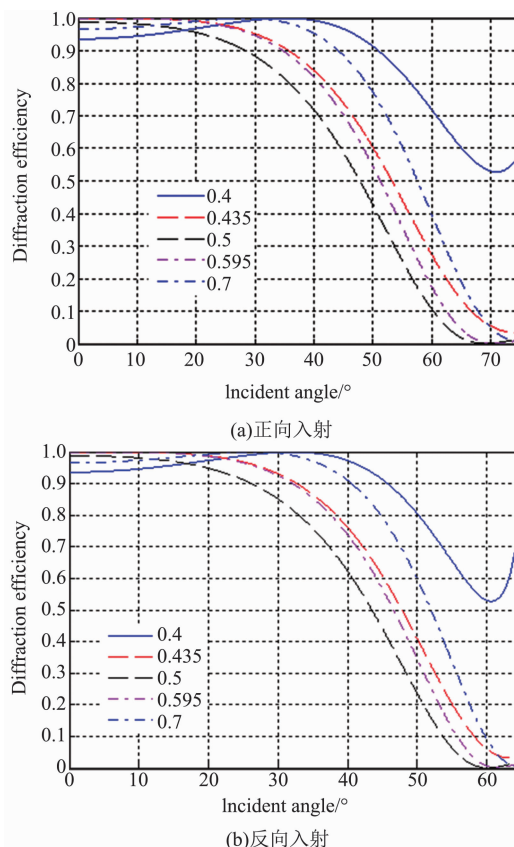


图 3 N-ZK7/PC/N-F2 的衍射效率与入射角度的关系

2.3 中间介质材料的选取

第一层和第三层谐衍射光学元件的基底材料分别为 N-FK5 和 N-SF57,分别选取 PS、SAN、TYPEA、PMMA 与 CR39 为中间介质材料,对应的三层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率和微结构高度见表 2。可以看出,介质材料的阿贝数越大,对应的三层衍射光学元件在整个波段范围内的带宽积分平均衍射效率的最小值就越低。

利用式(2)和(3)计算得到三层衍射光学元件的衍射效率和入射角度的变化关系曲线,如图 4(a)~(e)所示。随着入射角度的增大,衍射效率均呈逐渐下降趋势。当中间介质材料为 PS 时,随着入射角度的增大,设计波长 $0.605\ \mu\text{m}$ 对应的衍射效率下降得比 $0.440\ \mu\text{m}$

的缓慢。对于设计波长 $0.605\ \mu\text{m}$, 当入射角度为 33.47° 时, 对应的衍射效率为 99% ; 入射角度增大到 42.41° 时, 对应的衍射效率为 90% ; 入射角度为 61.02° 时, 对应的衍射效率下降为 0 , 见表 3。当中间介质材料为 SAN 时, 在设计波长 $0.605\ \mu\text{m}$ 处, 当入射角度分别为 28.08° 和 39.40° 时, 对应的衍射效率分别为 99% 和 90% 。对比 PS 介质, 对应的入射角度范围减小了 5.39° 和 3.01° 。当中间介质材料为 TYPEA 时, 在 $0.596\ \mu\text{m}$ 处, 当入射角度分别为 39.31° 和 62.20° 时, 对应的衍射效率分别为 99% 和 90% 。对比 PS 介质, 对应的入射角度范围提高了 5.84° 和 19.71° 。此时对应的三层衍射光学元件 N-FK5/TYEA/N-SF57 更适用于大角度入射成像光学系统中。当中间填充的介质材料为 PMMA 时, 在设计波长 $0.596\ \mu\text{m}$ 处, 伴随着入射角度的增大, 衍射效率先下降再增大, 然后下降至 0 。入射角度增大到 29.41° 时, 衍射效率首先下降为 99% ; 在 44.92° 时, 衍射效率下降为局部极小值 97.23% ; 然后又再次增大; 57.53° 时, 衍射效率上升为 100% ; 当入射角度为 59.84° 时, 衍射效率迅速下降为 99% 。当中间介质材料为 CR39, 衍射效率为 99% 时对应的入射角度在设计波长 $0.596\ \mu\text{m}$ 处为 40.90° ; 当衍射效率为 90% 时, 对应的入射角度为 48.92° 。对比 TYPEA 介质, 对应的入射角度范围减小了 13.28° 。所以, 对于在斜入射状态下工作的三层衍射光学元件, 要根据实际工作范围选择合适的中间介质材料。

表 2 中间介质材料的参数

材料	n_d	ν_d	d_1	d_2	$\bar{\eta}_{\min}$
PS	1.5905	30.8669	28.8234	-13.9103	98.31
SAN	1.5674	34.8123	41.9879	-14.1543	98.08
TYPEA	1.5151	41.5850	41.5466	-5.2507	97.08
PMMA	1.4918	57.4408	114.2778	-3.048	96.82
CR39	1.5039	62.1525	126.8797	-7.7845	95.53

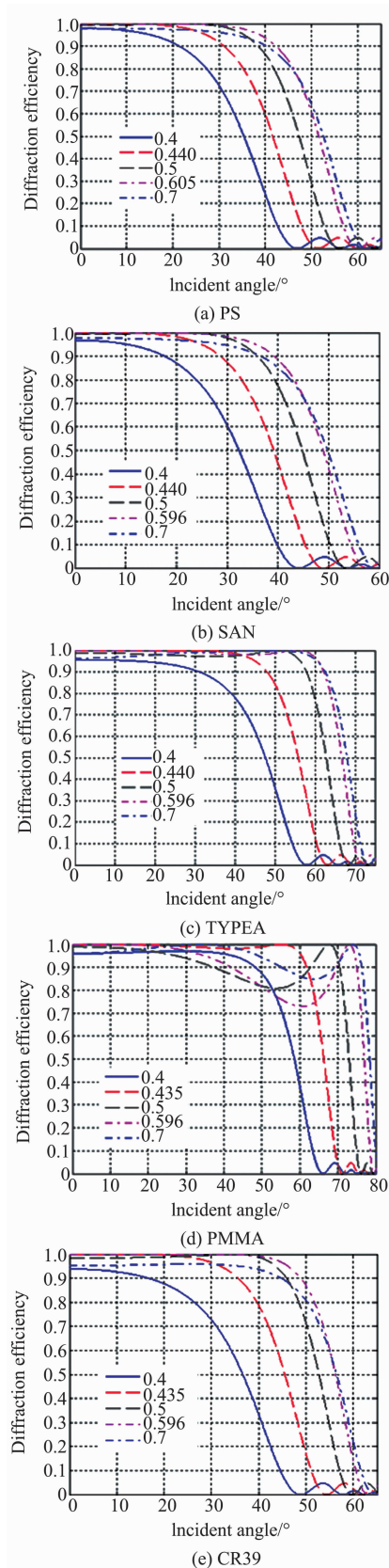


图 4 中间介质材料不同的三层衍射光学元件的衍射效率与入射角度的关系

表 3 不同中间介质材料对衍射效率的影响

材料	$\lambda/\mu\text{m}$	99%	90%	0
PS	0.440	20.75	31.14	52.62
	0.605	33.47	42.41	61.02
SAN	0.440	17.87	28.79	49.11
	0.605	28.08	39.40	57.64
TYPEA	0.435	31.17	48.06	63.19
	0.596	39.31	62.20	71.74
PMMA	0.435	31.65	61.83	71.18
	0.596	23.44	41.90	79.59
CR39	0.435	24.23	35.70	54.40
	0.596	40.90	48.92	63.11

3 结论

建立了三层衍射光学元件斜入射时衍射效率与入射角度之间关系的表达式。基于入射方向、两侧基底材料与中间介质材料的选择三个方面,分析了三层衍射光学元件斜入射时的衍射效率。结果表明:

(1)入射方向的选取对斜入射时三层衍射光学元件衍射效率的影响较大。当光线从正谐衍射元件端入射时,对应的衍射效率随入射角度增大而下降得比较缓慢。

(2)组成三层衍射光学元件的两侧基底材料的阿贝数差值越大,三层衍射光学元件的衍射效率随入射角度增大下降得越缓慢。

(3)中间介质材料的选取对斜入射时三层衍射光学元件衍射效率的影响较大,应根据实际工作的入射角度范围合理选择中间介质材料。该分析方法和结论不仅适用于可见光波段,也为红外波段中在大入射角度工作状态下的三层衍射光学元件的设计提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] Yoel A, Shmuel O, Naftali E. Design of a Diffractive Optical Element for Wide Spectral Bandwidth [J]. *Optics Letters*, 1998, **23**: 823–824.
- [2] 赵翔, 张鹏, 罗金平. 双层衍射光学元件在微光夜视物镜中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(11): 112203.
- [3] Li J S, Feng K. Optimization and Analysis of Multi-layer Diffractive Optical Elements in Visible Waveband [J]. *Optik*, 2014, **125**(14): 3596–3598.
- [4] 毛文峰, 张新, 曲贺盟, 等. 红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2014, **34**(10): 1022002.
- [5] 王孟军, 赵翠玲, 韩邦杰, 等. 基于谐衍射的共轴双波段红外光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(10): 2732–2736.
- [6] 杨亮亮. 双层衍射光学元件在 $0.4\sim 0.9\mu\text{m}$ 宽波段光学系统中的应用 [J]. *红外*, 2018, **39**(7): 25–28.
- [7] 孙婷, 张宣智, 常伟军, 等. 红外宽波段双层谐衍射光学系统的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(4): 951–954.
- [8] 杨亮亮. 衍射光学元件斜入射衍射效率的测量 [J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(1): 0117003.
- [9] 范长江, 赵亚辉, 应朝福, 等. 宽光谱大视场角的高衍射效率多层衍射元件[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0516001.
- [10] Zhan Y H, Fan C J, Ying C F, et al. Hybrid Diffractive-refractive 60° Field of View Eyepiece with Three-layer Diffractive Optical Element [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 266–270.
- [11] Mao S, Cui Q F, Piao M X, et al. High Diffraction Efficiency of Three-layer Diffractive Optics Designed for Wide Temperature Range and Large Incident Angle [J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(13): 3549–3554.
- [12] 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.
- [13] Zhao Y H, Fan C J, Ying C F, et al. The Investigation of Triple-layer Diffraction Optical Element with Wide Field of View and High Diffraction Efficiency [J]. *Optics Communications*, 2013, **295**(15): 104–107.
- [14] Bass M. Optical Society of America, Handbook of Optics [M]. Newyork: McGraw-Hill Companies, 1995.
- [15] Xue C X, Cui. Q F Design of Multilayer Diffractive Optical Elements with Polychromatic Integral Diffraction Efficiency [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(7): 986–988.