双层 BOE 加工误差对衍射效率的影响分析

马泽斌,康福增,王 昊

(中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,陕西 西安 710119)

摘 要: 随着光学技术的发展,光、机、电一体化成为趋势,要求光学系统做到集成化、阵列化和小型化,二元光学元件由于它在光波变换上的卓越表现受到人们的青睐。双层二元光学元件在宽波段范围内的衍射效率非常高,但在加工时会产生很多种加工误差,比如:高度误差、周期误差、套刻误差等。文中基于标量衍射理论,对在加工中可能出现的高度误差、周期误差、套刻误差等误差以及其对衍射效率的影响进行充分分析,并进行 MATLAB 模拟。结果表明:异向高度误差对衍射效率的影响大于同向高度误差对衍射效率的影响,所以在加工时应该尽量避免异向高度误差。异向套刻误差对衍射效率的影响大于同向套刻误差对衍射效率的影响,所以在加工时应该避免异向套刻误差。相比高度误差和套刻误差,其他误差对衍射效率有着不同程度的影响。

关键词: 双层 BOE; 加工误差; 衍射效率

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0918001

Effect of fabrication errors of double-layer BOE on diffractive efficiency

Ma Zebin, Kang Fuzeng, Wang Hao

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi′an 710119, China)

Abstract: With the development of optical technology, optic-mechanical-electric technology becomes a trend. An integrated, arrayed and miniaturized optical system was required. Binary optical element is famous for its excellent performance in light-wave transformation. Double-layer binary optical element has high diffraction efficiency over wide wavelength range. However, in the fabrication of double layer BOE, many errors occurred, such as height error, periodic error, multi-mask fabrication error etc.A theoretical analysis of these errors was carried out based on scalar diffraction theory, and a MATLAB simulation was implemented. The simulation result indicated that the diffraction efficiency deteriorated if the height errors occurred in different direction rather than in the same direction. Therefore, height errors from different direction should be avoid in fabrication. If the multi-mask fabrication error is occurred from different direction, the diffraction efficiency will decrease more quickly than from the same direction, so multi-mask fabrication error from different direction should be avoid as much as possible. Compared to height error and multi-mask fabrication error, other four errors have varying degrees of impact on the diffraction efficiency.

Key words: double-layer BOE; fabrication errors; diffractive efficiency

收稿日期: 2016-01-10; **修订日期:** 2016-02-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030113)

作者简介: 马泽斌(1991-),男,硕士,主要从事衍射光学器件、光学设计的研究。Email: mazebin@cpt.cn

0 引 言

随着光学技术的发展，光、机、电一体化成为趋势，要求光学系统做到集成化、阵列化和小型化，而传统的光学元器件难以满足这样的要求。20 世纪 80 年代，美国率先提出“二元光学[1-5]”的概念。由于其在光波变换上的卓越表现和可以有效促进光学系统的小型化、阵列化和集成化，其概念一经提出，便受到了各国研究人员的关注。

对于通常使用的单层 BOE (Binary Optical Elements)元件，当波长偏离设计波长时，+1 级衍射效率明显下降，在短波段下降较快，长波端下降较慢。+2、+3、+4 级的衍射效率比较低，由此形成的杂散光降低了图像的对比度，从而严重影响像质。如果采用双层 BOE 结构，则可以极大地提高宽光谱范围内+1 级的衍射效率，从而提高像质。

但在实际的加工中，由于制作工艺的限制，会产生许多加工误差，导致实际产品的参数与设计指标不一致，降低了衍射效率，影响成像质量，所以对加工误差进行分析是十分必要的。双层 BOE 相比单层 BOE 增加了设计自由度，极大地提高了衍射效率，但同时也使误差分析更加复杂，如何对双层 BOE 的加工误差进行有效的分析对于将其应用到实际中是非常必要的。

之前虽然有人对单层 BOE 的加工误差进行分析，但并没有对双层 BOE 的加工误差进行过系统的分析。文中在前人的基础上对双层 BOE 在加工过程中可能会出现的高度误差、周期误差、环带面倾斜误差、套刻误差、中心对准误差、片层倾斜误差 6 种误差进行全面地分析，并用 Matlab 进行模拟，得出了不同加工误差对衍射效率的影响，这对实际加工具有重要的参考意义。

1 衍射效率

衍射效率是指在某个衍射级次上衍射光能量与全部透射光总能量之和的比值。衍射效率是评价衍射元件的重要指标，其中单层 BOE 的衍射效率[6-9]为：

$$\eta_m=\sin c^2\{m-\frac{d}{\lambda}[\sqrt{n^2(\lambda)-n_M^2(\lambda)\sin^2\theta}-n_M(\lambda)\cos\theta]\} \quad (1)$$

式中：m 为衍射级次；d 为浮雕结构的高度；λ 为入射波长；$n(\lambda)$ 为基底材料在不同入射波长下的折射率；$n_M(\lambda)$ 为传播介质在不同入射波长下的折射率；θ 为入射角。$\theta=0$，n_M 为空气时，公式(1)可以简化为：

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

式中：$d=\frac{\lambda_0}{n(\lambda)-1}$，$\lambda_0$ 为设计波长。于是可以推出：$\eta_m=\sin c^2\{m-\frac{\lambda_0}{\lambda}\}$。

经 Matlab 模拟可以得到当 $\theta=0$，n_M 为空气时，衍射效率如图 1 所示。

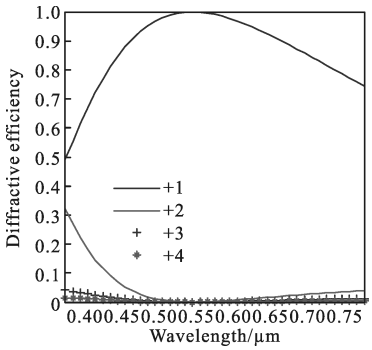

图 1 不同波长对单层 BOE 衍射效率的影响

Fig.1 Diffractive efficiency of single-layer BOE under different wavelengths

图 1 中曲线的走势变化代表衍射效率随着 m 变化而变化，即不同的衍射级次。可以看出在设计波长 0.55 μm 处衍射效率为 100%，当波长大于设计波长时，随着波长的增加，衍射效率下降缓慢，当波长小于设计波长时，随着波长的减少，衍射效率下降很快。虽然单层 BOE 可以在设计波长处达到 100%的衍射效率，但其在别的波段衍射效率较低，如果需要在宽光谱波段内使用，则需要采用别的方法提高整个波段内的衍射效率。在单层 BOE 中，从公式(2)可以看出，如果基底材料 $n(\lambda)$ 确定和设计波长 λ_0 确定，在 $m=1$ 和 $\theta=0$ 时，其衍射效率也随之确定。由于缺少足够的设计自由度，要想提高它的衍射效率是非常困难的。如果引进新的设计自由度，通过改变多个衍射微结构的高度并匹配不同色散的基底材料，可以使整个波段内多个入射波长都衍射到设计级次上，降低杂散光对系统性能的影响，从而设计出性能优越的衍射光学元件。

单层 BOE 的衍射效率是通过位相光栅进行推导的，同样可以推导出双层 BOE 的衍射效率为：

$$\eta_m=\sin c^2\{m-\frac{d_1[\sqrt{n_M^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}-n_1(\lambda)\cos\theta]+d_2[\sqrt{n_2^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}-\sqrt{n_M^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}]}{\lambda}\} \tag{3}$$

与单层 BOE 的衍射效率相比，上式引入了微结构 d_2 引起的相位差，d_2 为第二片衍射元件的浮雕高度，n_1 为第一片衍射元件的折射率，n_2 为第二片衍射元件的折射率，n_M 为两片之间介质的折射率，θ 为入射角。经过 Matlab 模拟可以得到双层 BOE 在正入射时的衍射效率随波长的变化为图 2 所示。

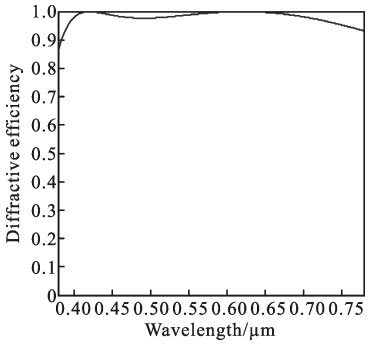

图 2 不同波长对双层 BOE 衍射效率的影响

Fig.2 Diffractive efficiency of double-layer BOE under different wavelengths

从图 2 中可以看出在 0.38~0.78 μm 波段内，双层 BOE 的衍射效率几乎都可以达到 90%以上。相比单层 BOE，双层 BOE 在两个设计波长处都可以达到 100%，极大地提高了衍射效率，如果将这种技术运用到照相机镜头中可以极大的提高像质。

2 误差分析

虽然双层 BOE 比单层 BOE 结构的衍射效率提高了很多，但其制作误差却比单层 BOE 结构复杂很多，下面将从高度误差、周期误差、环带面倾斜误差、套刻误差、中心对准误差、片层倾斜误差这六个方面对双层 BOE 进行误差分析。

2.1 台阶高度误差

所谓台阶高度误差[10-11]即为在实际加工中由于误差导致台阶纵向产生误差。假设存在微结构高度的加工误差 Δd_1 和 Δd_2，则实际的微结构高度为：

$$\begin{cases} d_1=d_{10}+\Delta d_1=d_{10}(1+\varepsilon_1) \\ d_2=d_{20}+\Delta d_2=d_{20}(1+\varepsilon_2) \end{cases} \tag{4}$$

其中：d_{10} 和 d_{20} 分别为两层的微结构理想高度；同向高度误差是指 ε_1 和 ε_2 的符号相同；异向高度误差是指 ε_1 和 ε_2 的符号相反。将公式(4)代入公式(3)可得：

$$\eta_m=\sin c^2\{m-\frac{d_{10}(1+\varepsilon_1)[\sqrt{n_M^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}-n_1(\lambda)\cos\theta]}{\lambda}+\frac{d_{20}(1+\varepsilon_2)[\sqrt{n_2^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}-\sqrt{n_M^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta}]}{\lambda}\} \tag{5}$$

在下面的分析中，均选用 PMMA 和 PC 作为双层 BOE 的基底材料，其设计波长为 λ_1=0.513 μm 和 λ_2=0.610 μm，m=1，θ=0。

首先，分别计算出在同向高度误差分别为+2%、−2%、+5%、−5%、+10%、−10%的情况下衍射效率和波长的关系。经过 Matlab 模拟如图 3 所示。

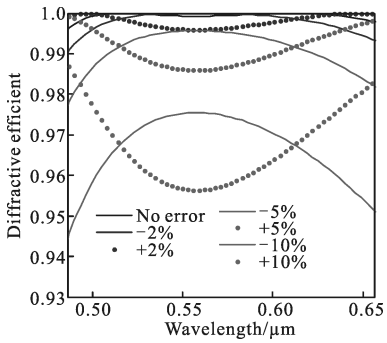

图 3 同向高度误差对衍射效率的影响

Fig.3 Diffractive efficiency of double-layer BOE under different height errors of the same direction

从图 3 中可以看出同向高度误差对衍射效率的影响较小，即使加工误差达到 10%，衍射效率也可以达到 94%以上。

接下来计算出异向高度误差分别为 0.2%、0.5%、1%的情况下，衍射效率和波长的关系，并用 Matlab 进行模拟如图 4 所示。

从图 4 中可以看出异向高度误差对衍射效率的影响非常明显，即使有 0.5%的误差衍射效率也会下降到 90%以下，所以在加工过程中应尽量避免这种情况。

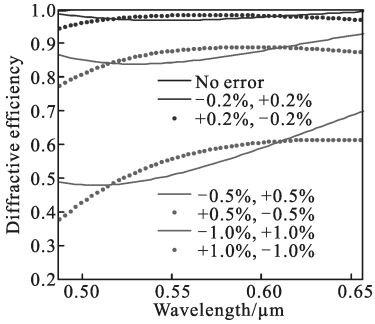

图 4 异向高度误差对衍射效率的影响

Fig.4 Diffractive efficiency of double-layer BOE under different height errors of the different directions

2.2 周期误差

周期误差[12]是指进行套刻时理论与实际加工周期宽度存在的误差。所以制作 BOE 时可能出现如图 5 所示的周期误差，其中 L_{10} 和 L_1 分别表示理论计算和实际加工的周期宽度，$\xi_1=(L_1-L_{10})/L_{10}$ 表示相对误差。

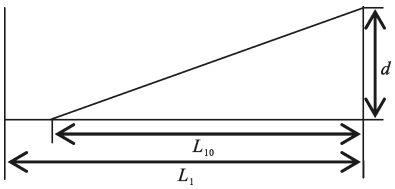

图 5 理论与实际加工周期宽度

Fig.5 Periodic length of theory and actual

则双层 BOE 的衍射效率可以表示为：

$$\eta=\eta_m \sin c^2\left(\frac{L_1-L_{10}}{L_{10}}\right)\sin c^2\left(\frac{L_2-L_{20}}{L_{20}}\right) \tag{6}$$

分别分析周期误差在 2%、5%、10%、12%时的衍射效率，经过 Matlab 模拟可得如图 6 所示。

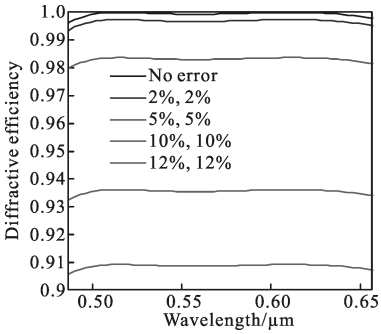

图 6 不同周期误差对衍射效率的影响

Fig.6 Diffractive efficiency of double-layer BOE under different periodic errors

从图 6 中可以看出，随着周期误差的增大，衍射效率下降的幅度并不是很大，即使有 12%的误差，衍射效率也在 90%以上。和同向高度误差相比，周期误差对衍射效率的影响稍微大一点。

2.3 环带面倾斜误差

对于基底面为平面基底的 BOE 来说，理论上应保证衍射面的环带过渡区域的表面与基底相互垂直，但是在衍射元件的实际加工中，通常会产生一些加工误差，使环带过渡区域偏离基地面型的法线方向，存在如图所示的倾斜误差，则双层 BOE 的衍射效率为：

$$\eta=\eta_m\left(1-\frac{g_1}{L_1}\right)^2\left(1-\frac{g_2}{L_2}\right)^2 \tag{7}$$

其中 g 为环带面倾斜在基底面上的投影，如图 7 所示。

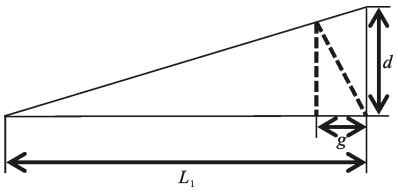

图 7 环带误差

Fig.7 Annulus error

分别计算在 g=2 μm 的情况下，L=20d、L=50d、L=100d、L=200d 时的衍射效率，经过 Matlab 模拟可得如图 8 所示。

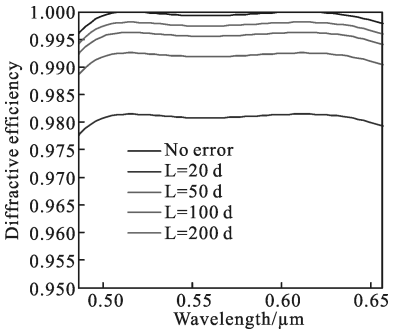

图 8 不同环带误差对衍射效率的影响

Fig.8 Diffractive efficiency of double-layer BOE under different annulus errors

从图 8 中可以看出，环带周期与浮雕高度比值越大，环带面倾斜对衍射效率的影响越小。总体来说，环带面倾斜误差对衍射效率的影响并不明显，因为即使 L=20d，衍射效率也在 97.5%以上。

2.4 套刻误差

所谓套刻误差[13-18]是指在制作 BOE 时，由于

制作工艺需要进行三次曝光，会造成两次对准误差，然而每次产生的误差并不一致，这导致了加工误差对 BOE 的影响很复杂。经过分析可以得知如图 9 所示经过两次套刻以后产生的 BOE 的台阶结构。

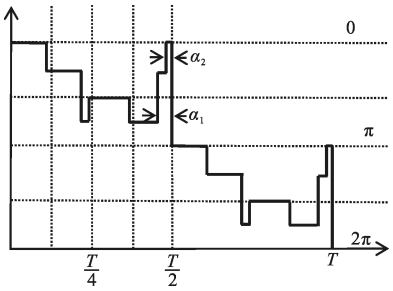

图 9 两次套刻后的八阶 BOE 台阶结构

Fig.9 8-step structure of BOE after fabricating twice

图中 a_1 和 a_2 分别为第一次和第二次的加工误差，如果两次误差的偏移方向相同则称为同向套刻误差。首先分析同向套刻误差。

根据图 9 的台阶结构，可以计算出透过率函数，再经傅里叶变换以后便可得到衍射效率随 a_1 和 a_2 的变化。经过 Matlab 模拟可以得出衍射效率和 a_1、a_2 的关系，如图 10 所示。

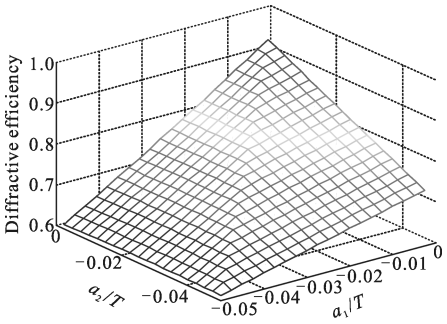

图 10 不同向套刻误差对衍射效率的影响

Fig.10 Diffractive efficiency of BOE under different mask fabrication errors of the same direction

图 10 中 a_1 为第一次套刻误差，可以看出第一次套刻误差对衍射效率的影响比较大。

当两次套刻误差方向相反时，可以得到如图 11 所示的台阶结构，同理，用 Matlab 进行模拟可得衍射效率和 a_1、a_2 的关系，如图 12 所示。

通过对比可以发现，当两次套刻方向相反时，对微结构的影响较大，在制作中应该尽量避免这种情况。

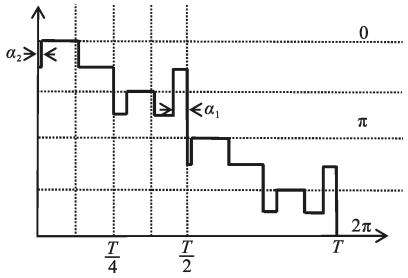

图 11 异向套刻误差后的八阶 BOE 台阶结构

Fig.11 8-step structure of BOE after fabricating twice from different directions

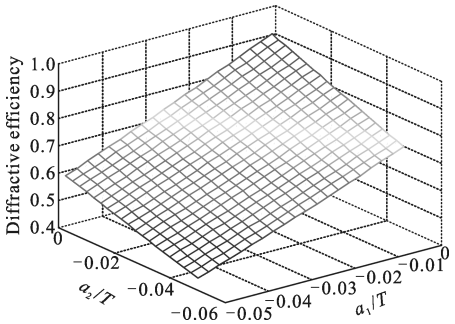

图 12 异向套刻误差对衍射效率的影响

Fig.12 Diffractive efficiency of BOE under different mask fabrication errors of the different directions

2.5 中心对准误差

所谓中心对准误差[19]是指双层 BOE 中两片透镜中心的对准出现偏差导致衍射效率的下降。在实际制作中，会用到八阶甚至十六阶的透镜，为简单起见，这里只考虑四阶的情况，但分析道理都一样。

可以画出两片层中心出现偏差的情况，如图 13 所示，并根据它进行衍射效率分析。

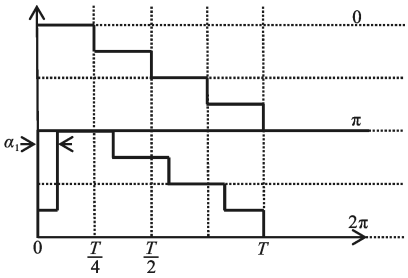

图 13 双层 BOE 的对准误差

Fig.13 Misalignment error of double-layer BOE

经 Matlab 模拟以后可知如图 14 所示衍射效率随对准误差的变化。

从图 14 中可以看出，误差越大，衍射效率越低。由于在对双层 BOE 进行装调的过程中，不可避免会

产生对准误差，在设计时应充分考虑对准误差对系统性能的影响。

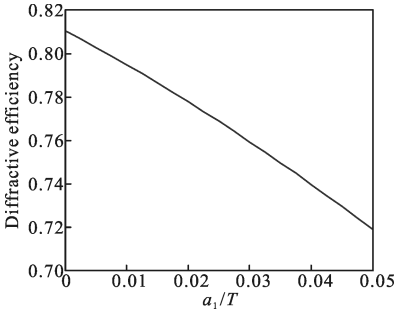

图 14 不同对准误差对衍射效率的影响

Fig.14 Diffractive efficiency of BOE under different misalignment errors

2.6 片层倾斜误差

在制作过程中，可能出现如图 15 所示的情况，即双层 BOE 在制作过程中两片层出现倾斜，即产生片层倾斜误差。

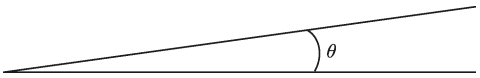

图 15 双层 BOE 中两片层产生 θ 的倾斜

Fig.15 Angle error between the two layers of the double-layer BOE

可以认为第一片正入射，第二片斜入射，据此可得倾斜角与衍射效率的关系为：

$$\eta_m=\sin c^2\{m-\frac{d_1[n_M(\lambda)-n_1(\lambda)]+d_2[\sqrt{n_2^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_1}-\sqrt{n_M^2(\lambda)-n_1^2(\lambda)\sin^2\theta_1}]}{\lambda}\} \tag{8}$$

通过 Matlab 模拟可得衍射效率随入射角 θ 的变化，如图 16 所示。

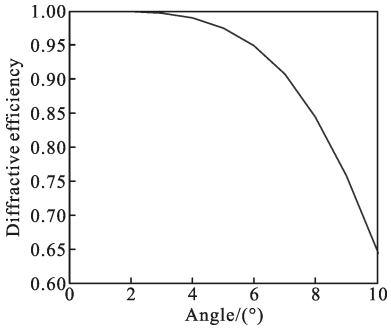

图 16 不同入射角对衍射效率的影响

Fig.16 Diffractive efficiency of BOE under different angle errors

从图 16 中可以看出，角度为 1°和 2°时几乎不影响衍射效率，在制作双层 BOE 时应尽量把片层倾斜误差控制在 2°以内。

3 结 论

分析双层 BOE 的加工误差对衍射效率的影响对于双层 BOE 的设计和加工是非常重要的，文中在前人的基础上对高度误差、周期误差等六种对双层 BOE 衍射效率影响较大的误差进行充分地分析，并对其进行 Matlab 模拟，得到一些可靠的结论：

(1) 套刻误差对衍射效率的影响最大，在进行设计时应该充分考虑套刻误差对系统的影响，留出合理的公差。考虑到异向套刻误差对衍射效率的影响非常大，在加工时应尽量避免异向套刻误差。

(2) 高度误差对衍射效率的影响也比较明显，尤其是异向高度误差，在加工的过程中允许出现少量同向高度误差，但应尽量避免异向高度误差。

(3) 周期误差和对准误差对衍射效率的影响也比较明显，其误差应该尽量分别控制在每个周期宽度的 5%和 1%以内。

(4) 环带面倾斜误差对衍射效率的影响很小，即使 $L=20d$，衍射效率也在 97.5%以上。

(5) 片层倾斜误差对衍射效率的影响很小，即使倾斜角为 2°，衍射效率也看不出明显的变化。

虽然前面详细地分析了各种误差单独存在的情况下对衍射效率的影响，并对每种情况进行了模拟，但在实际的加工制作中，需要考虑到双层 BOE 的多种误差同时存在的情况，在未来的工作中应该在这些方面进行分析，这样才能更有使用价值。

参考文献：

[1] Jin Guofan, Tan Qiaofeng. Binary optics [J]. ***Optoelectronic Technology and Information***, 2001, 14(5): 1-10. (in Chinese)
金国藩，谭峭峰. 二元光学[J]. 光电子技术与信息，2001, 14(5): 1-10.

[2] 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.

[3] Zhang Kangwei. Research on the diffraction efficiency of multi-layer diffractive optical elements [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
张康伟. 多层衍射光学元件衍射效率特性的研究. 长春：

长春理工大学, 2010.

[4] 娄迪. 谐衍射光学设计理论和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[5] Yang Liangliang. Studies on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements [D]. Changchun: Changchun University Of Science And Technology, 2013. (in Chinese)
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.

[6] Dale A, Buralli G, Michael Morris, et al. Optical performance of holographic kinoforms [J]. ***Applied Optics***, 1989, 28(5): 976-983.

[7] Sun Ting, Jiao Mingyin, Zhang Yuhong. 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. (in Chinese)
孙婷, 焦明印, 张玉虹. 单层与双层谐衍射元件的衍射效率分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 622-624.

[8] Bai Jian, Ma Tao, Shen Yibing, et al. Characteristic analysis of multi-layer diffractive elements [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2006, 35(22): 44-47. (in Chinese)
白剑, 马韬, 沈亦兵, 等. 多层衍射光学元件的特性分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(22): 44-47.

[9] Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai, et al. Design and diffraction efficiency of a multi-layer diffractive optical element [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2009, 38 (5): 1126-1131. (in Chinese)
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.

[10] Li Sitao, Ye Jiaxiong, Ruan Yu, et al. Fabrication and error analysis of binary optical elements [J]. ***Optoelectronic Technology and Information***, 2000, 13 (5): 24-29. (in Chinese)
李思涛, 叶嘉雄, 阮玉, 等. 二元光学元件的制作及其误差分析[J]. 光电子技术与信息, 2000, 13(5): 24-29.

[11] Adam J Caley, Markus Braun, Andrew J W, et al. Analysis of multimask fabrication errors for diffractive optical elements[J]. ***Applied Optics***, 2007, 46(12): 2180-2188.

[12] Yin Kewei. Research on stray light in diffractive optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
殷可为. 衍射光学系统杂散光研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.

[13] Sun Yanjun. Study on photolithography technology of eight-step binary optical elements. [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
孙艳军. 八阶二元光学器件的光刻技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.

[14] Ye Jun, Xu Qiao, Hou Xiyun, et al. Study of alignment error of 8-levels binary optics elementswith layer by layer analysis method [J]. ***Journal of Zhejiang University***, 1999, 33(2): 157-162. (in Chinese)
叶钧, 许乔, 侯西云, 等. 八台阶二元光学器件套刻误差的逐层分析法研究[J]. 浙江大学学报, 1999, 33(2): 157-162.

[15] Zheng Xuezhe, Yan Yingbai, Jin Guofan, et al. Effect of alignment error on binary optics elementefficiency[J]. ***Journal of Optoelectronics·Laser***, 1997, 8(4): 241-245. (in Chinese)
郑学哲, 严瑛白, 金国藩, 等. 对准误差对二元光学器件衍射效率的影响[J]. 光电子·激光, 1997, 8(4): 241-245.

[16] Yin Kewei, Huang Zhiqiang, Lin Wumei, et al. Analysis of effect oflateral fabrication errorsonbinary optical elements[J]. ***Opto-Electronic Engineering***, 2011, 38(9): 46-54. (in Chinese)
殷可为, 黄智强, 林妩媚, 等. 二元光学元件横向加工误差对衍射效率的影响[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 46-54.

[17] Li Hongjun, Zhao Jingli, Lu Zhenwu, et al. Linewidth error in fabrication of binary optical element [J]. ***Journal of Optoelectronics Laser***, 2000, 11(3): 279-297. (in Chinese)
李红军, 赵晶丽, 卢振武, 等. 二元光学元件制作过程中的线宽误差[J]. 光电子激光, 2000, 11(3): 279-297.

[18] Xu Ping, Zhang Xiaochun, Guo Lurong, et al. Fabrication errors analysis and simulation of binary optical element[J]. ***Acta Optica Sinica***, 1996, 16(6): 833-838. (in Chinese)
徐平, 张晓春, 郭履容, 等. 二元光学元件制作误差与模拟[J]. 光学学报, 1996, 16(6): 833-838.

[19] Yasuyuki Unno. Point-spread function for binary diffractive lenses fabricated with misaligned masks[J]. ***Applied Optics***, 1998, 37(16): 3401-3407.