

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

微结构压贴三棱镜色散的补偿

付明磊^{1,2*}, 张湘南¹, 乐孜纯^{1,2}, 维亚切斯拉夫·彼得罗夫^{2,3}

(1. 浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310023;

2. 浙江工业大学 义乌科学技术研究院, 浙江 义乌 322001;

3. 乌克兰国家科学院 信息记录研究所, 乌克兰 基辅 03113)

摘要:针对儿童斜视辅助治疗中使用的高度数压贴三棱镜在色散补偿能力方面的不足,提出一种采用衍射棱镜阵列对压贴三棱镜的折射棱镜阵列进行色散补偿的方法。介绍了衍射棱镜阵列和折射棱镜阵列组成的压贴三棱镜器件的结构及其色散补偿原理,对上述压贴三棱镜器件进行了仿真,并分析了它的色散补偿效果。理论分析表明:折射棱镜阵列单元宽度的最佳取值为600~800 μm;衍射棱镜阵列单元宽度的最佳取值为15~20 μm。软件仿真结果表明:由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制成的压贴三棱镜的光线透过率为95%,点列图中83%的点分布在Airy斑环内部。实验显示所提出的色散补偿方法可解决高度数压贴三棱镜的色散问题,具有较好的实用性。

关键词:压贴三棱镜;衍射棱镜阵列;色散补偿

中图分类号:O435;R777.41 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Compensation of chromatic aberrations for microstructure press-on prisms

FU Ming-lei^{1,2*}, ZHANG Xiang-nan¹, LE Zi-chun^{1,2}, PETROV Viacheslav^{2,3}

(1. College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Yiwu Institute of Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 322001, China;

3. Institute for Information Recording of NAS of Ukraine, Kiev 03113, Ukraine)

* Corresponding author, E-mail: fuml@zjut.edu.cn

Abstract: As high astigmatism press-on prisms have weak ability to compensate chromatic aberrations in the adjuvant therapies of children strabismus, a method to compensate the chromatic aberrations of press-on prisms was proposed by using a diffraction prism array. The press-on prism device was composed of a refraction prism array and a diffraction prism array. Both the device structure and the principle of chromatic aberration compensation were discussed. Then, the device was simulated and its aberration compensation ability was analyzed. Theoretical analysis shows that the optimal range of element width of the refraction prism array is 600 – 800 μm, while the optimal range of element width of diffraction prism array is 15 – 20 μm. Software simulation results show that the light transmittance of the press-on prisms made of polymethylmethacrylates (PMMA)

收稿日期:2015-05-28;修订日期:2015-06-22.

基金项目:浙江省公益性技术应用研究计划国际合作项目(No. 2015C34011)

is 95%, 83% of the spots in the diagram locates inside the Airy spot rings. It concludes that the proposed method is well practical and suitable for compensating the chromatic aberrations in high astigmatism press-on prisms.

Key words: press-on prism; diffraction prism array; chromatic aberration compensation

1 序 言

斜视是儿童眼疾病中比较常见的病症之一,发病率在2%左右^[1]。近年来,随着材料科学的发展与材料制作工艺的进步,压贴三棱镜开始应用于儿童斜视的辅助治疗^[2-5]。它由一组菲涅尔微结构三棱镜整齐排列组成,用于实现对入射光线的折射控制。与传统的玻璃三棱镜相比,压贴三棱镜具有结构轻巧,矫正准确度高等优点^[5-7]。但是,对于高度数压贴三棱镜(特别是矫正度数大于30棱镜度的压贴三棱镜),棱镜排列伴有的凹槽缺陷会引起折射光线的相位失配,出现较严重的色散现象,导致压贴三棱镜的成像质量降低^[6-7]。因此,如何对压贴三棱镜进行色散补偿成为影响压贴三棱镜进一步推广的关键因素。

目前,消除棱镜色散的方法比较多。一种方法是楔形镜与棱镜对组合系统产生负色散量以消除色散^[8-9]。但是这种方法并不适合于压贴三棱镜这种微结构光学系统。第二种方法是布儒斯特棱镜组色散补偿法^[10-11]。这种方法通过使用特殊的布儒斯特棱镜进行正色散和负色散的相互补偿。但是由于布儒斯特棱镜的特殊性,这种方法只能实现一种角度的色散。第三种方法是棱镜对的色散补偿法^[12-15]。它利用棱镜对的负色散效应来进行色散补偿,但是其补偿能力有限。

笔者与乌克兰国家科学院信息记录研究所的维亚切斯拉夫·彼得罗夫教授合作,采用微结构衍射棱镜阵列对压贴三棱镜的折射单元进行色散补偿。本文提出的微结构压贴三棱镜光学系统能很好地补偿光线的位移和色散。利用几何光学软件对该光学系统进行了性能模拟,结果表明所提出的色散补偿方法有效地提高了压贴三棱镜的性能。

2 器件结构与色散补偿原理

2.1 器件结构

采用衍射棱镜阵列进行色散补偿的压贴三棱镜包含了两组微棱镜,如图1所示。整个光学结构相当于一个光学补偿器,既能通过棱镜的折射原理实现光线位移,又能利用二元光学元件的衍射性能进行色散补偿^[16-18]。图1中, W 和 D 分别表示折射棱镜阵列的宽度和深度, B 和 H 分别表示衍射棱镜阵列的宽度和深度。

两组微棱镜的设计模型均来自于菲涅尔透镜结构。微棱镜材料主要选用聚甲基丙烯酸酯(PMMA)。与传统的玻璃棱镜相比,该材料的光线透过率可以达到99%左右,重量也相对较轻;并且在强衍射情况下不会出现白光,因此有利于增强视敏度。一般可采用金刚石切割工艺法来制作这种微结构压贴三棱镜,即通过改变切割参数从而切出不同宽度和深度的三角形微结构。

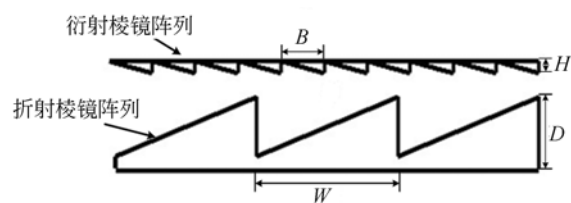


图1 采用衍射棱镜阵列的压贴三棱镜结构

Fig.1 Structure of press-on prism with diffraction lens array

2.2 色散补偿原理

在图1所示的器件结构中,衍射棱镜阵列相当于一个二元光学衍射面,通过二元光学衍射面特殊的色散补偿功能可对折射棱镜阵列进行色散补偿。如图2所示,两种不同波长 λ_1 和 λ_2 的光程差为^[16-17]:

$$\Delta = \frac{m(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_0} \Phi(\lambda_0) + BD - BC. \quad (1)$$

式中: m 表示衍射级次, λ_0 表示中心波长, $\Phi(\lambda)$

表示相位调制函数。由式(1)可知,可以通过改变二元衍射面的相位调制函数 $\Phi(\lambda)$ 来减少波长 λ_1 和 λ_2 的光程差,从而达到降低色散的目的。

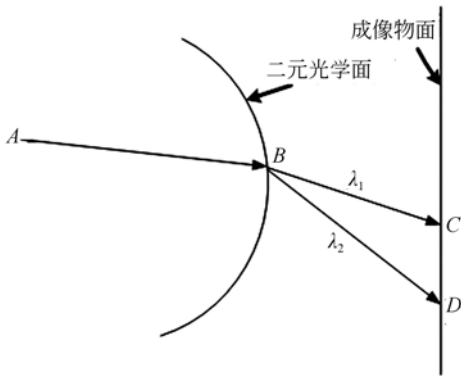


图 2 二元光学衍射面折衍光线传播示意图

Fig. 2 Refractive-diffractive optical path on binary optical diffraction plane

本文利用微积分的思想计算相位调制函数 $\Phi(\lambda)$ 的表达式^[19-21]。首先把衍射棱镜阵列的三角形斜边量化成一些非常小的矩形,如图 3 所示,这样就可以计算出相邻光线的相位差^[9]。再利用积分的方法求出总的相位。衍射棱镜阵列的相位调制函数为:

$$\varphi(\lambda) = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - n_1(\lambda) \cos \theta_1}{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)}, \quad (2)$$

式中: $n_1(\lambda)$, $n_1(\lambda_0)$ 和 $n_2(\lambda)$, $n_2(\lambda_0)$ 分别表示在空气中的折射率和在材料中的折射率, θ_1 表示入射角度。

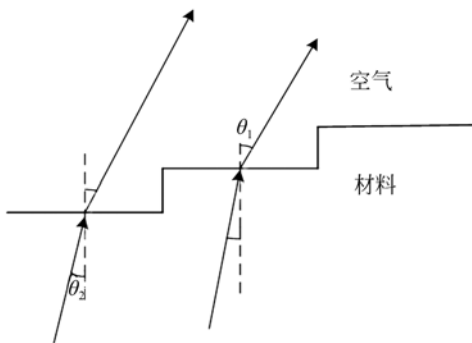


图 3 相位调制函数的计算过程

Fig. 3 Calculation of phase modulation function

式(1)中 $BD-BC$ 在折射棱镜组(在锯齿形外面)和衍射棱镜组(在锯齿形里面)的表达形式不

同。单个棱镜的光线传播过程如图 4 和图 5 所示。根据图 4 和图 5 可以计算 $BD-BC$ 的值。依据折射定理 $n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta'$, n_2 为光线在材料中的折射率, θ' 为折射角。图 4 光线的光程差为:

$$\Delta_1 = \frac{L - a \times \tan \theta}{\cos[\arcsin(\frac{n_2 \sin \theta}{n_1}) - \theta]} - \frac{L - a \times \tan \theta}{\cos[\arcsin(\frac{n'_2 \sin \theta}{n'_1}) - \theta]}, \quad (3)$$

式中: n_1 和 n_2 表示波长(BD 段)为 λ_1 的光线在材料和空气中的折射率, n'_1 和 n'_2 表示波长(BC 段)为 λ_0 的光线在材料和空气中的折射率, L 表示第一组棱镜到第二组棱镜的距离, a 表示入射光线到角度为 θ 顶点的距离。

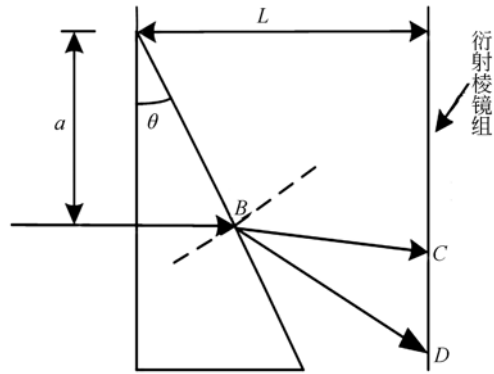


图 4 折射棱镜入射光线示意图

Fig. 4 Incident light through refraction prism

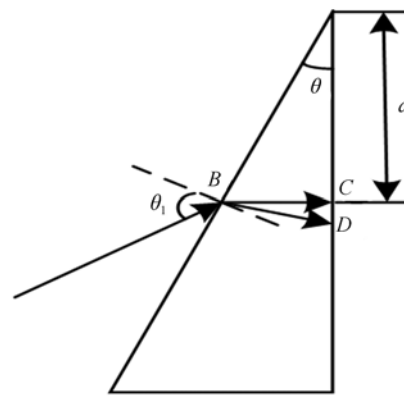


图 5 衍射棱镜光线示意图

Fig. 5 Incident light through diffraction prism

同理可得图 5 的光程差为:

$$\Delta_2 = \frac{\text{atan } \theta}{\cos[\theta - \sin^{-1}(\frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2})]} - \text{atan } \theta, (4)$$

式中: θ 表示直角三角形的顶角角度, n_1 和 n_2 分别表示空气和材料的折射率。这样结合式(1),通过改变相位调制函数和角度,可以得到最优的光程差,实现消除色散的最佳效果。

数值计算得到折射棱镜阵列 W 参数的最佳取值为 $600 \sim 800 \mu\text{m}$, 衍射棱镜阵列 B 参数的最佳取值为 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 。

2.3 色散补偿能力分析

本文用可见光谱区折射角随波长的变化量 $\Delta\varphi$ 表示衍射棱镜阵列的色散补偿能力。偏折角与折射棱镜阵列深度 D 和折射率 n 的数值关系为^[7]:

$$\frac{1}{D} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \varphi}} (5)$$

取波长为 546 nm 的绿光作为可见光光谱的中心波长,对于矫正度数为 30 棱镜度的折射棱镜阵列, B 取 $20.7 \mu\text{m}$, H 取 $1.1 \mu\text{m}$, n 取 1.492 。图6表示上述参数条件下,无衍射棱镜阵列(曲线1)和有衍射棱镜阵列(曲线2)两种情况下偏折角随波长的变化情况。对于无衍射棱镜阵列的情况, $\Delta\varphi$ 为 0.916° ;而采用无衍射棱镜阵列后, $\Delta\varphi$ 降低到 0.286° 。

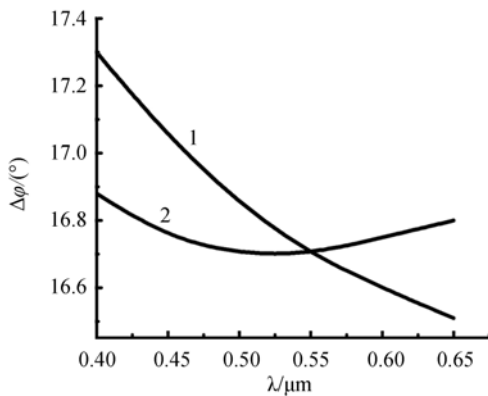


图6 折射角随波长的变化情况

Fig. 6 Variation of refraction angle with wavelength

3 仿真实验与结果分析

3.1 器件仿真模型

在几何光学设计软件中设计人眼模型与压贴

三棱镜的组合结构,以分析压贴三棱镜的实际应用效果,包括微结构成像及其像差校正的效果。所采用的器件仿真模型如图7所示。

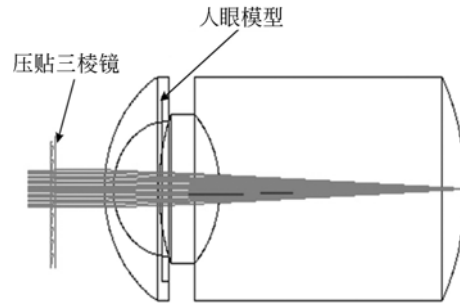


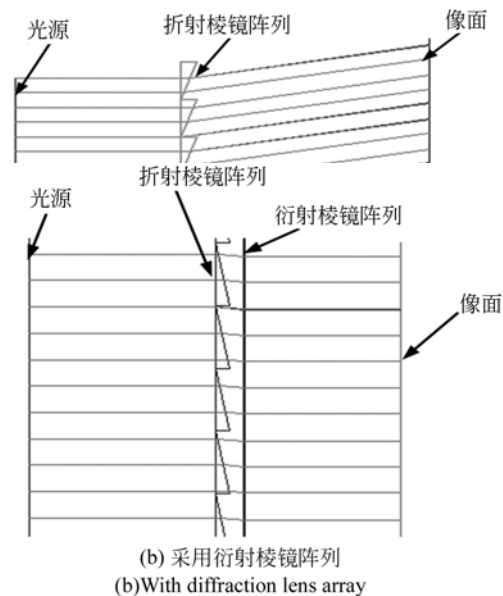
图7 器件仿真模型

Fig. 7 Simulation model of device

图7中所用的压贴三棱镜的尺寸为 $W = 720 \mu\text{m}$, $D = 120 \mu\text{m}$; $B = 18 \mu\text{m}$, $H = 3 \mu\text{m}$ 。微结构压贴三棱镜的功能就是实现图像位移,光线位移与材料的折射率和直角三角短直角边所对应的角度有关。角度越大,偏移程度越大,所用材料的折射率越大,光线偏转的程度也越大。

3.2 色散补偿效果

仿真过程中在该范围内选取一组数据进行了分析。图8(a)是没有衍射棱镜阵列的光线传播示意图,从中可以观察到明显的色散现象。图8(b)是采用了衍射棱镜阵列的光线传播示意图,



(b) 采用衍射棱镜阵列
(b) With diffraction lens array

图8 色散补偿效果仿真

Fig. 8 Simulation of dispersion compensation effect

从中可以观察到色散明显减少并且光线发生了位移。

3.3 像差分析

像差分析可以通过点列图(Spot diagram)、光扇图(Ray Fan)和图像模拟仿真效果进行评估。首先,通过仿真软件计算得到光学系统的光线透过率在 95% 左右。仿真结果如图 9 所示,非常适合人眼对光线亮度的要求。

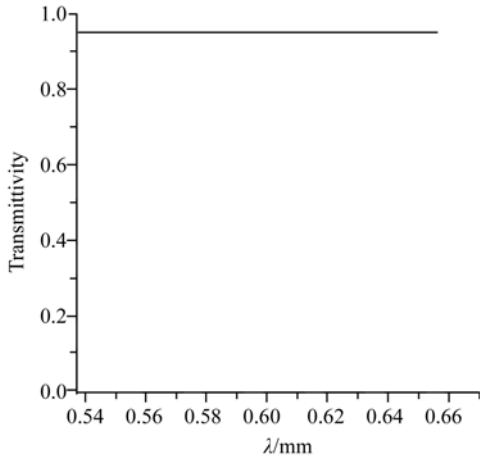


图 9 光线透过率与波长的关系

Fig. 9 Transmittivity as a function of wavelength

光扇图适用于描述光学系统的综合误差。图 10 中光线差(EX,EY)仅一点处有偏移,其归一化的偏移量为 0.7,在其它位置的光线差几乎为 0。

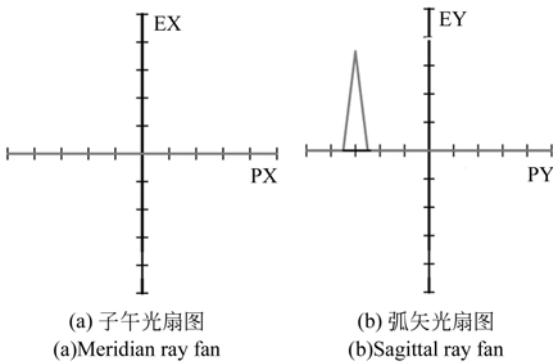


图 10 光扇图
Fig. 10 Ray fans

点列图用于显示光学系统在 IMA 面上的成像。如图 11 所示:Airy 斑环的半径为 $5.941 \mu\text{m}$, 并且其均方根半径为 $4.367 \mu\text{m}$,GEO RADIUS 为 $7.135 \mu\text{m}$ 。通过计算可知有 83% 左右的点分布在 Airy 斑环内部,说明系统的像差较小。

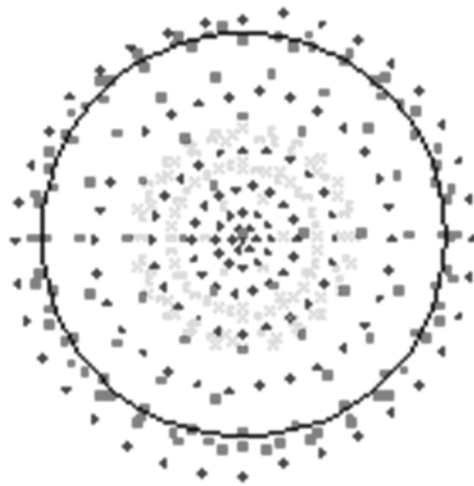


图 11 点列图
Fig. 11 Spot diagram

通过几何光学设计软件的图片仿真功能可以直观地观察光学系统的成像效果。对比分析图 12 中 3 张图片的像质差异可知,对于没有采用衍射棱镜阵列进行色散补偿的光学系统,图片严重失真,并出现图像离散化;而对于采用衍射棱镜阵列进行色散补偿的光学系统,图片较原始图片清

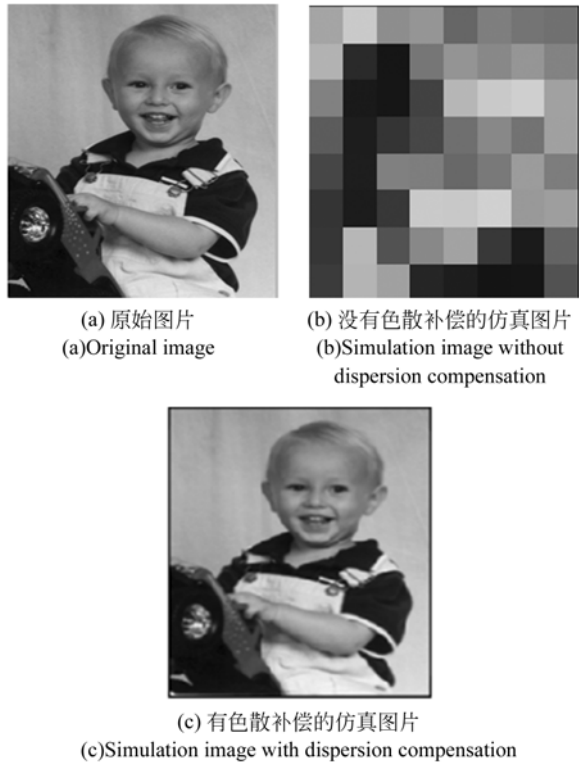


图 12 图片仿真效果
Fig. 12 Image simulation results

晰度的差异很小,不会影响人眼对事物的观察效果。

4 结 论

本文提出了一种利用衍射棱镜阵列对高度数压贴三棱镜进行色散补偿的方法。首先详细地阐述了由折射棱镜和衍射棱镜组成的两元器件结构

及其色散补偿原理。理论分析结果表明:压贴三棱镜中折射棱镜阵列宽度 W 的最佳取值为 $600 \sim 800 \mu\text{m}$,衍射棱镜阵列宽度 B 的最佳取值为 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 。仿真结果表明:衍射棱镜阵列能够有效地对折射单元进行色散补偿,并且有效地降低光学系统的像差。本方法有望应用于高度数压贴三棱镜中,用来提高使用者的视敏度。

参考文献:

- [1] 李敬伟. 综合治疗 V 征斜视效果的临床分析[J]. 河北医药, 2011, 33(14): 2151-2152.
LI J W. Clinical analysis of comprehensive treatment effect of V sign strabismus[J]. *Hebei Pharmaceutical*, 2011, 33(14): 2151-2152. (in Chinese)
- [2] 刘丹, 王小娟, 曹蔚凤. 3M 压贴三棱镜在斜视矫正中的应用[J]. 中国校医, 2014, 28(12): 938-940.
LIU D, WANG X J, CAO W F. 3M press-on prism in use of orthopia [J]. *Chinese Journal of School Doctor*, 2014, 28(12): 938-940. (in Chinese)
- [3] 刘丽丽, 于刚, 吴倩, 等. 压贴三棱镜观察眼位法及可调整缝线用于先天性外斜视手术治疗的一年效果[J]. 眼科, 2014(1): 57-60.
LIU L L, YU G, WU Q, et al.. Press-on prism observe position of eye and adjustable suture use for apriority exotropia operative treatment effect in one year [J]. *Ophthalmology*, 2014(1): 57-60. (in Chinese)
- [4] HALLER T, FURR B A. Fresnel prism use among orthoptists[J]. *American Orthoptic Journal*, 2014, 64(1): 71-75.
- [5] 李巧娟, 甘晓玲. 压贴三棱镜在共同性内斜视的应用[J]. 中国斜视与小儿眼科杂志, 2010, 18(3): 101-103.
LI Q X, GAN X L. Press-on prism in the application of convinent esotropia [J] *Chinese Journal of Strabismus and Pediatric Ophthalmology*, 2010, 18(3): 101-103. (in Chinese)
- [6] 王小兵. 压贴镜片的原理与特点[J]. 眼科, 2013(1): 70.
WANG X B. The theory and tait of press-on prism [J]. *Ophthalmology*, 2013(1): 70. (in Chinese)
- [7] PETROV V, KRYUCHYN A, ANTONOV E, et al.. Optical phenomena in micro-prism diagnostic set KK-42 [J]. *SPIE*, 2011, 8011: 80119A.
- [8] 杨盛谊, 李港, 陈檬. 楔形镜与棱镜对系统负色散量的分析[J]. 激光杂志, 1998(4): 31-34.
YANG SH Y, LI G, CHEN M. Wedge-shape prism and prism array system of negative dispersion quantitative analyze [J]. *Laser Journal*, 1998(4): 31-34. (in Chinese)
- [9] 罗震岳. 光学色散补偿薄膜的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
LUO ZH Y. *Optical Dispersion Compensation Film studies* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [10] 冯选旗, 冯雪红, 周景会, 等. 布儒斯特棱镜在紫外及飞秒激光器腔型设计中的应用[C]. 陕西省物理学会 2008 年学术年会. 西安: 陕西省物理学会 2008 年学术年会论文集, 2008: 4-7.
FEN X Q, FEN X H, ZHOU J H, et al.. Application of Brewster prisms in design of ultraviolet and femtosecond laser cavity [C]. *Shanxi Institute of Physics in 2008 Academic Conference. Xi'an: Shanxi Institute of Physics in 2008 Academic Conference Collected Papers*, 2008: 4-7. (in Chinese)
- [11] 马万里, 陈良尧, 周仕明, 等. 消色差的 1/4 波长延迟器的几何光学设计[J]. 光子学报, 2001, 30(2): 236-239.
MA W L, CHEN L R, ZHOU SH M, et al.. Achromatic a quarter wavelength delayer geometrical optics design [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(2): 236-239. (in Chinese)
- [12] 黄祝明, 张国平. 衍射透镜的色散分析[J]. 武汉化工学院学报, 2002(2): 89-91.
HUANG ZH M, ZHANG G P. Disperation analysis of diffractive lenses [J]. *Journal of Wuhan Institute of Chemical Industry*, 2012(2): 89-91. (in Chinese)
- [13] 吴萍. 显微成像中棱镜色散补偿与散斑类共聚焦研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
WU P. *Microscopic Imaging of Prism Dispersion Compensation and Speckle Confocal Study* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] 苏娟, 冯国英, 邹其徽, 等. 用于色散补偿的反射型

- 棱栅的色散分析[J]. 物理学报, 2013, 62(1):167-172.
- SU J, FENG G Y, ZUO Q H, *et al.*. Dispersion analysis of reflection grism-pair applied to dispersion compensation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(1): 167-172. (in Chinese)
- [15] 王宁, 陆雨田, 孔勇, 等. 棱镜对色散补偿系统的时域 ABCD 矩阵分析方法[J]. 光子学报, 2004, 33(9): 1040-1043.
- WANG N, LU Y T, KONG Y, *et al.*. Prism temporal ABCD matrix analysis method of the dispersion compensation system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(9):1040-1043. (in Chinese)
- [16] 金国藩, 严琰白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- JIN G F, YAN Y B, WU M X. *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [17] 王方, 朱启华, 王道, 等. 复合型二元光学器件补偿色散和相位畸变研究[J]. 中国激光, 2006, 33(10):1334-1338.
- WANG F, ZHU Q H, WANG X, *et al.*. Compound binary optics compensation dispersion and phase distortion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(10):1334-1338. (in Chinese)
- [18] 李俊昌. 菲涅耳衍射变换及其在二元光学设计中的应用[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2004, 29(4):221-225.
- LI J CH. Fresnel diffraction transform and its application in the design of binary optics [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology: Technology*, 2004, 29(4):221-225. (in Chinese)
- [19] 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2011.
- YAN SH H. *Design of Diffractive Micro-optics* [M]. Changsha: National Defence Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 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.
- YANG L L. *Compound Binary Optics Compensation Dispersion and Phase Distortion* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [21] 翁永超. 新型二元光学元件光束整形特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- WEN Y CH. *The Study of Beam Shaping Properties of the Novel Binary Optical Elements* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

作者简介:



付明磊(1981-), 男, 天津蓟县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2004年, 2007年, 2010年于浙江工业大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事微结构光学器件及其信息处理技术方面的研究。E-mail: fuml@zjut.edu.cn



乐孜纯(1965-), 女, 浙江杭州人, 博士, 教授, 博士生导师, 1987年于浙江大学获得学士学位, 1997年于中国科学院长春光机所获得博士学位, 主要从事微结构光学器件及其信息处理技术方面的研究。E-mail: lzc@zjut.edu.cn



张湘南(1991-), 男, 湖南新邵人, 硕士研究生, 2014年于湖南文理学院获得学士学位, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: zxn@zjut.edu.cn



维亚切斯拉夫·彼得罗夫(1940-), 男, 乌克兰基辅人, 博士, 教授, 乌克兰国家科学院院士, 1962年于哈尔科夫理工学院获得学士学位, 1967年于苏联乌克兰科学院控制研究所获得博士学位, 主要从事光学信息记录、光电子材料、超材料领域的研究。E-mail: petrov@ipri.kiev.ua