

文章编号 1004-924X(2017)03-0603-08

# 角膜地形图仪中 Placido 盘 及投射照明系统的设计与实现

隋成华<sup>1\*</sup> 沃圣杰<sup>1</sup>, 徐丹阳<sup>1</sup>, 高楠<sup>2</sup>, 张玉民<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310023;

2. 浙江工业大学 计算机学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 为了实现检测角膜的表面形貌, 设计了基于 Placido 盘的角膜地形图仪投射照明系统。首先, 根据人眼的明视觉光谱光视效率、CCD 元件光谱响应曲线以及仪器对面光源照度与发光均匀性的要求, 进行了 LED 背光源设计。其次, 根据角膜地形图仪检测原理, 比较了球形和椭球形 Placido 盘的利弊, 在背光源照明下分析了这两种面型 Placido 盘的光照情况。分析显示, 椭球形 Placido 盘的最大辐照度优于球形盘。采用反向逆推法建立数学模型, 利用 Matlab 软件求解确定了盘上黑白条纹环的分布。最后, 根据上述设计参数进行了 Placido 盘加工, 搭建了投影照明实验装置, 并利用标准模型眼对所获得的投射照明系统进行检测。实验结果表明: 在主波长为 625 nm 的 AlGaInP 红色 LED 面光源照明的情况下, 采用所设计的 24 环椭球型 Placido 盘成像到 CCD 上的黑白条纹环满足等间隔均匀分布的要求, 检测精度可达到  $0.05 \text{ m}^{-1}$ , 较好地满足了角膜地形图仪对投射照明系统的高对比度、高精度的要求。

**关键词:** 角膜地形图仪; 投射照明系统; Placido 盘; LED 背光源

中图分类号: R770.4; TM923.02 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20172503.0603

## Design and implementation of Placido disk and projection lighting system for corneal topography

SUI Cheng-hua<sup>1\*</sup>, WO Sheng-jie<sup>1</sup>, XU Dan-yang<sup>1</sup>, GAO Nan<sup>2</sup>, ZHANG Yu-min<sup>1</sup>

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

2. College of Computer, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

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

**Abstract:** In order to detect the corneal surface topography, a projection lighting system of corneal topography was designed based on Placido disk. Firstly, LED backlight was designed according to the visual spectral luminous efficiency of human eyes, the spectral response curve of CCD element and requirements for illumination and uniformity of the light source opposite to the instrument. Secondly, based on detection principles of corneal topography, the advantages and disadvantages of spherical Placido disk were compared with those of ellipsoidal Placido disk. Lighting conditions of the two Placido disks were analyzed in the backlight illumination. The analysis shows that the maximum irradiance of ellipsoidal Placido disc is larger than the spherical one. The mathematical model of the ellipsoidal disc was established with inverse extrapolation, thus the distributions of black and white

收稿日期: 2016-09-19; 修订日期: 2016-10-23.

基金项目: 浙江省重大科技专项资助项目 (No. 2011C11048)

loops on the disk were determined by solution with Matlab software. Finally, a ellipsoidal Placido disk was processed in terms of the design parameters. Furthermore, the experimental devices of projection and lighting were set up and then detected with the standard model eyes. Experimental results show that in the illumination of AlGaInP red LED area light source with dominant wavelength of 625 nm, white and black loops on CCD projected from achievable 24-ring ellipsoidal Placido disk meets the requirement of uniform distribution with equal interval. The detection precision can reach  $0.05 \text{ m}^{-1}$ , meeting the requirements of high contrast and precision for projection lighting system of corneal topography.

**Key words:** corneal topography; projection lighting system; Placido disk; LED backlight

## 1 引言

角膜的屈光力约占整个眼屈光力的 75%<sup>[1]</sup>, 所以角膜表面形态的微小变化都将影响整个眼的屈光状态分布, 从而直接影响眼的视功能。详细了解角膜的表面形貌, 不仅能帮助理解角膜的病理及生理变化, 而且在一些以角膜地形变化为主的角膜病变(如圆锥角膜, 边缘角膜变性)的早期诊断、治疗及预后评价等方面都具有十分重要的意义<sup>[2-5]</sup>。角膜地形图仪作为现代眼科医学检测中重要的测量仪器, 能将角膜表面形貌通过数据或者图像的形式展出, 从而成为眼科医生测量角膜表面形貌及辅助角膜屈光手术治疗的有力手段。

目前, 高精度角膜地形图仪主要基于 Placido 盘法、立体三角光栅网格投影法、光学层析相干成像法及裂隙扫描法等原理, 其中 Placido 盘原理的应用最为广泛<sup>[6-7]</sup>。目前, 角膜地形图仪的核心技术掌握在欧美发达国家手中, 因此国内大型院所使用的角膜地形图设备都是从国外购买的, 价格十分昂贵, 在国内普及这种眼科检测设备十分困难。国内许多中小型医院资金短缺, 无力购买, 而国家标准则要求角膜接触镜验配的实体店应配有角膜地形图仪, 因此国内自主研发出一台与进口角膜地形图仪性能相当的仪器迫在眉睫。本文研制了一台基于 Placido 盘法原理的角膜地形图仪。根据角膜表面形貌重构算法设计椭圆形 Placido 盘及 24 环黑白条纹分布, 为保障 CCD 拍摄人眼角膜反射的 24 环黑白条纹清晰, 同时兼顾检查者眼睛的舒适度, 采用 625 nm 的 AlGaInP 红色 LED 作为照明光源, 确保光源形成漫反射。最终该角膜地形图仪的检测精度能够达到  $0.05 \text{ m}^{-1}$ , 满足检测要求。

## 2 角膜地形图仪检测原理

图 1 所示为基于 Placido 盘的角膜地形图仪投射照明系统原理图, 其中 Placido 盘由一系列黑白相间的同心圆环组成, 白色为透光部分, 黑色为不透光部分, 且中央开有一小孔, 可以放置成像元件。LED 背光源发出的光经漫反射后, 照亮一定距离外的眼球, 并将 Placido 盘上的黑白条纹投射到角膜上, 一般亚洲成年人的角膜水平径平均约为 11 mm, 垂直径平均约为 10 mm<sup>[8]</sup>, 经角膜反射后再通过透镜系统成像在 CCD 上。在角膜表面没有病变的情况下, 影像呈同心圆形, 且各个环之间的距离分布均匀。如果角膜表面形貌不正常, 则影像呈卵圆形, 环与环之间的距离不均匀。角膜表面曲率较小的部分, 相邻环在径向的间距较远; 角膜表面曲率较大的部分, 相邻环在径向的间距较小, 类似于地形学上的等高线测量法。通过分析图像上同心环的变形程度, 可以求得不同位置角膜曲率的变化, 从而进一步分析角膜各处的屈光度。

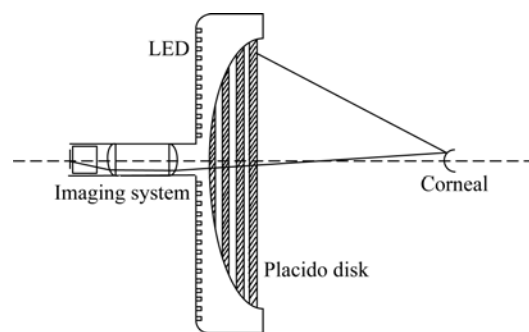


图 1 角膜地形图仪投射系统及其光路结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of projection system and light path of corneal topography

### 3 LED 背光源的选择

为满足 CCD 的成像要求,Placido 盘的后表面需要均匀照明,使得黑白同心圆环中白色透光条纹和黑色阻光条纹形成明暗相间、照度均匀的同心圆环,从而大大增强相邻条纹间的对比度,使图像采集时 Placido 盘上条纹更容易被观察,图像处理工作更容易进行,采集到的边缘采样点数据更加准确。

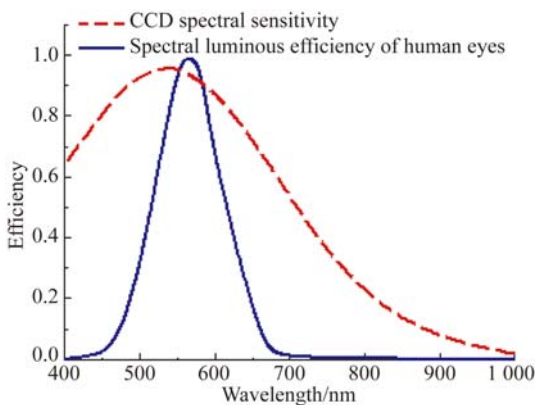


图 2 CCD 光谱敏感性 及人眼明视觉光谱光视效率曲线  
Fig. 2 CCD spectral sensitivity and spectral luminous efficiency of human eyes

如图 2 所示,SONY ICX424AL 型号 CCD 的光谱敏感特性及人眼明视觉光谱光视效率均在 550 nm 左右达到最高,不过绿光在正常眼屈光介质中仍拥有良好的穿透率,约为 80%<sup>[9]</sup>。因此,在保障视觉安全的基本要求下,LED 光源的波长不仅对角膜表面要有高的反射率,而且要有足够的发光强度。本文采用直径为 3 mm 的 AlGaInP 红色 LED 作为光源发光元件,它是四元系超高亮度 LED 的发光材料,其主波长为 625 nm,发光强度为 400 mcd,具有单色性良好、亮度高、发光效率高及寿命长等特点<sup>[10-11]</sup>,对于 CCD 有较高的光谱敏感性,同时在不伤害眼睛的情况下对角膜有高的反射率。但是单颗 LED 灯作为近朗伯体发光的光能输出较低、发散角较大,无法保证均匀性。

因此,本文参考一些国外同类产品的背光源设计,采用 60 颗 LED 灯,将它们排列成 3 组同心圆环,如图 3 所示,每组灯环的数量及角度分布如表 1 所示。初步做到光强均匀发散,同时在反光

罩上镀上一层漫反射材料(海洋光学公司的 Spectralon 型号热塑性反射材料,其反射率在 400~1 500 nm 波段高达 99%<sup>[12]</sup>),使光强进一步均匀化,最终发射的光为漫反射光。以盘中心为圆心,在每条间隔 45°的径向线上取两个点,加上圆心共计 17 个点,利用杭州博源光电有限公司生产的照度计对照明系统进行测量,结果如表 2 所示。从表中可以看出,照度最大相差为 74.3 lux,均匀性达到 86.1%。

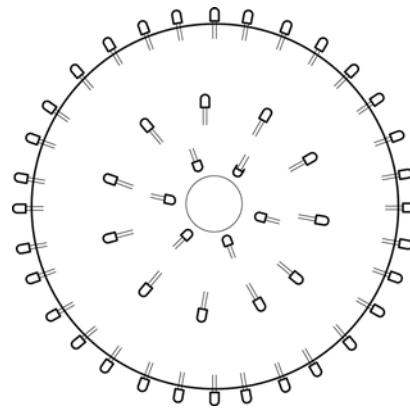


图 3 LED 灯分布示意图

Fig. 3 Distribution diagram of LED

表 1 LED 灯的分布参数

Tab. 1 Distribution parameters of LED lamps

环分布	LED 灯个数	半径/mm	相邻角度/(°)
内环	6	15	60.0
中环	14	35	25.7
外环	40	60	9.0

表 2 背光源照度测量结果

Tab. 2 Illumination distribution of backlight

编号	照度/lux	编号	照度/lux	编号	照度/lux
1	502.6	7	462.1	13	518.2
2	520.6	8	477.0	14	501.4
3	484.5	9	466.2	15	462.0
4	505.2	10	489.7	16	508.8
5	522.6	11	453.0	17	466.8
6	536.3	12	484.4		

## 4 Placido 盘的面型及条纹分布确定

### 4.1 Placido 盘面型确定

一般的 Placido 盘包括锥形、球形及椭球形。其中锥形同心圆环数目相对较多, 一般有 31 环, 环的排布相对较密, 测量数据点密集, 加工精度要求非常高; 球形加工相对简单, 但是测量角膜范围

小、精度不高且装置体积大; 椭球形同心圆环数目相对比较少, 一般有 22 环, 24 环和 25 环, 加工精度要求相对来说比较低, 且具有良好的测量精度。为了使 LED 背光源的光经过 Placido 盘后能均匀汇聚到眼角膜表面, 根据 Placido 盘面型的要求, 这里用 tracePro 软件模拟了相同光源产生的光经过椭球形 Placido 盘及球形 Placido 盘投射到角膜表面后的光强分布, 如图 4 所示,

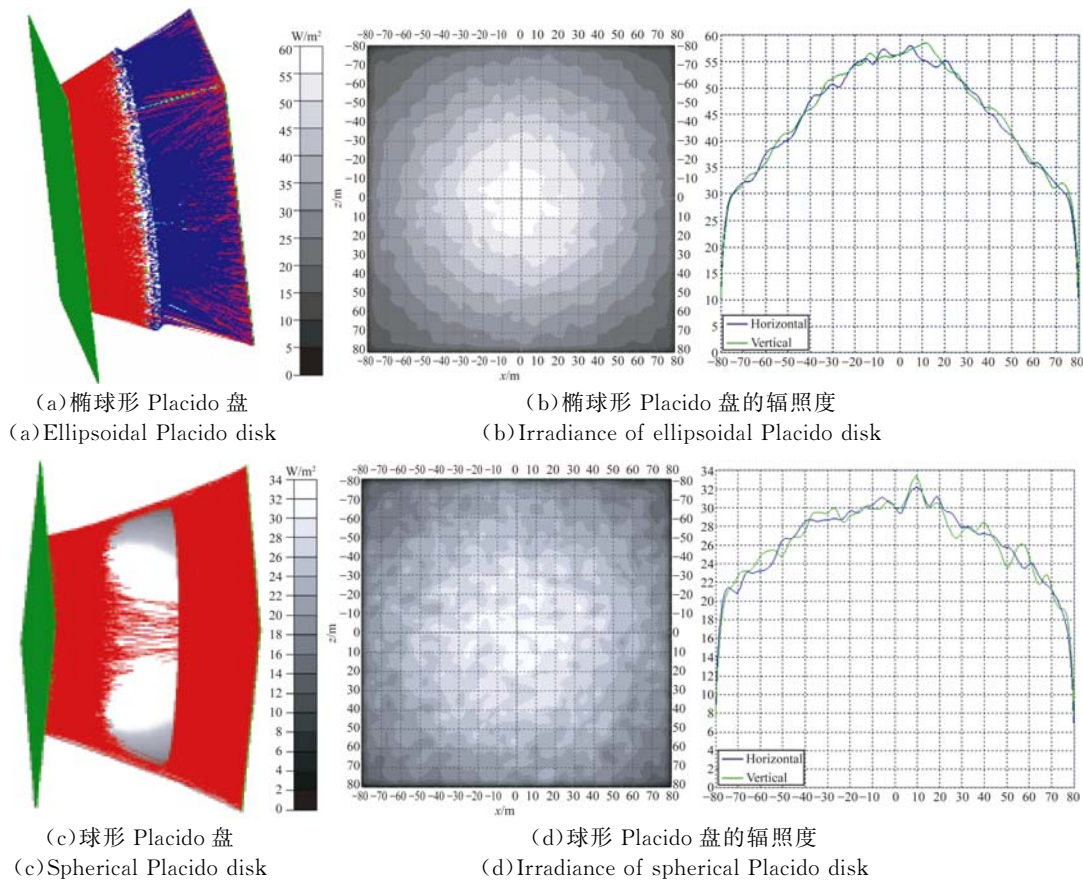


图 4 tracePro 软件模拟光经不同面型 Placido 盘后的光强分布

Fig. 4 Simulation of light intensity through Placido disk with different surface shapes by tracePro

由模拟结果可知, 在相同的光照条件下, 通过椭球形 Placido 盘后, 接收面中心的 (即角膜表面位置) 光照亮度更高且更均匀, 其最大辐射照度值为  $58.808 \text{ W/m}^2$ ; 而球形 Placido 盘的只有  $33.427 \text{ W/m}^2$ 。因此这里选用椭球形 Placido 盘, 这样有利于 CCD 面阵接收更多的光强, 增强图像亮度。

参考国内外一些专利及操作手册<sup>[12-14]</sup>, 本文采用 24 环椭球形 Placido 盘, 不仅可以实现高精度和高重复性, 而且可以降低加工成本。

### 4.2 Placido 盘环分布

如图 5 所示, 弧 BAC 为 Placido 盘的截面, A 为环上一点, B 为中心圆孔位置, C 为 Placido 盘端点, A 经角膜反射成像后的虚像点位于  $A'$ 。

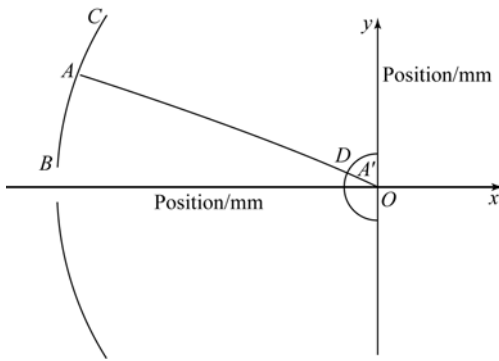


图 5 Placido 盘一次成像的数学模型

Fig. 5 Mathematical model of first image formation with Placido disk

根据球面镜成像原理可知:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = \frac{1}{f'} = \frac{2}{r}, (p < 0), \quad (1)$$

其中:  $p=AD$ , 为物距;  $q=DA'$ , 为像距;  $f'$  为球面镜焦距;  $r$  为球面镜半径。

设 A 点的坐标为  $(x, y)$ , 则物距为  $p=r-\sqrt{x^2+y^2}$ , 代入式(1)得:

$$\frac{1}{r-\sqrt{x^2+y^2}} - \frac{1}{q} = \frac{2}{r}, \quad (2)$$

解得:

$$q = \frac{r^2 - r\sqrt{x^2+y^2}}{2\sqrt{x^2+y^2} - r}. \quad (3)$$

设 A' 的坐标为  $(x_0, y_0)$ , 则:

$$x_0 = (r-q) \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} = \left( r - \frac{r^2 - r\sqrt{x^2+y^2}}{2\sqrt{x^2+y^2} - r} \right) \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}, \quad (4)$$

$$y_0 = (r-q) \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} = \left( r - \frac{r^2 - r\sqrt{x^2+y^2}}{2\sqrt{x^2+y^2} - r} \right) \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}. \quad (5)$$

在不考虑角膜表面反射系统畸变的情况下, 两式相比可得:

$$\frac{x_0}{y_0} = \frac{x}{y}. \quad (6)$$

由于  $(x, y)$  处于椭圆方程上, 满足:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (7)$$

联立式(6)、式(7)解得:

$$y = \frac{ab}{\left[ \frac{x_0}{y_0} b \right]^2 + a^2}, \quad (8)$$

$$x = \frac{ab}{\left[ \frac{x_0}{y_0} b \right]^2 + a^2} \cdot \frac{x_0}{y_0}. \quad (9)$$

根据球面镜成像原理, 椭圆上的每一个物点与像点一一对应, 通过式(2)可以确定像点的坐标, 同时, 只要确定像面上环的分布, 通过式(8)和式(9)可求得 Placido 盘上环的分布。

利用 Matlab 软件编程求解得到 Placido 盘截面经人眼角膜反射后成的虚像, 如图 6 所示。

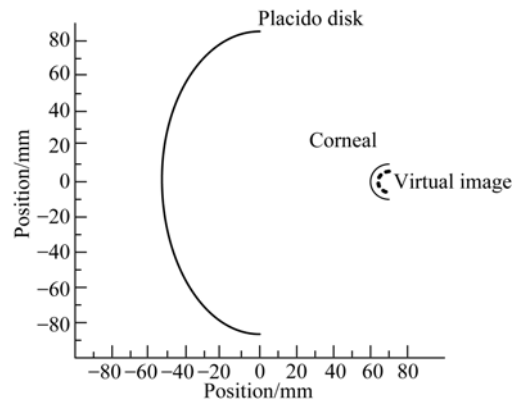


图 6 Matlab 软件求解虚像位置示意图

Fig. 6 Solution of virtual image by Matlab

根据几何光学, 在相机采集的角膜图像上, 各环的位置数据是角膜所成虚像的位置, 此虚像不在角膜表面上, 而位于角膜表面顶点后一段距离处, 可以将虚像投影到平面上, 并将投影得到的像均分成等间距的 23 份, 以此反向确定虚像上环的分布, 如图 7 所示。其中,  $B', C'$  为点 B, C 的像点, 设纵坐标分别为  $y'_B, y'_C$ , 则  $y'_C - y'_B$  为虚像在平面上投影的垂直距离, 设每一个环的宽度为  $\Delta d$ , 则:

$$\Delta d = \frac{y'_C - y'_B}{23}. \quad (10)$$

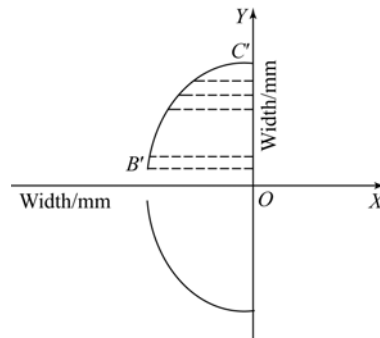


图 7 虚像投影示意图

Fig. 7 Schematic diagram of virtual image projection

每一个环的纵坐标为  $y'_B + \Delta d, y'_B + 2\Delta d \dots y'_B + 22\Delta d, y'_C$ , 将纵坐标代入式(4)和式(5), 即可得到  $(x_0, y_0)$ , 进而确定椭圆上的点  $(x, y)$ , 如图 8 所示。

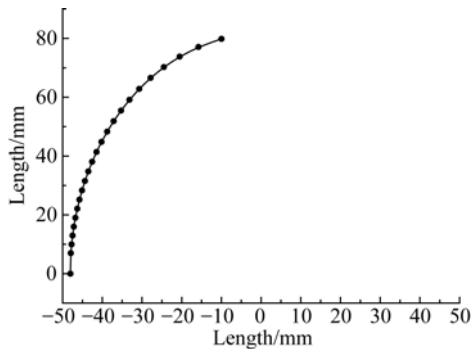


图 8 Placido 盘上环分布示意图

Fig. 8 Ring distribution in Placido disk

根据椭圆方程及环的分布, 利用绘图软件 Solidworks 将 Placido 盘等比例与等精度绘出, 如图 9 所示。

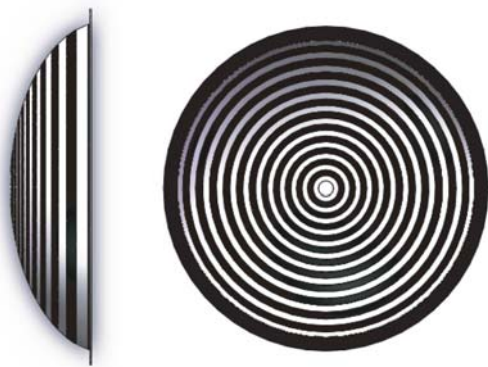


图 9 Solidworks 绘制的 Placido 盘

Fig. 9 Placido disk depicted by Solidworks

#### 4.3 Placido 盘加工工艺

Placido 盘的面型数据及环分布确定以后, 需要选择适当的加工工艺和加工方法进行加工生产。最终图像处理时要求分辨率达到亚像素, 因此 Placido 盘的加工精度要达到 0.01 mm。由于 Placido 盘不是平面面形, 且在内表面上具有多条黑白相间的同心圆环, 所以 Placido 盘的加工非常困难。

本文采用高透光材料 PMMA, 俗称亚克力, 通过高精度开模后注塑而成 Placido 盘。同时, 将椭球形 Placido 盘内表面使用电泳喷涂法喷上一层 UV 玻璃油墨, 然后在组合加工中心对其内表面进行切削加工。为提高图像上黑白圆环边缘的对比度, 应沿着垂直盘面法线的方向向内切割, 环槽厚度为 0.2 mm。

#### 5 实验测量与结果

将按照上述设计方法加工完成的投射照明系统放置在国外同类型的角膜地形图仪中, 在  $R=8$  的标准模拟眼下进行测试, 根据屈光度  $D$  与曲率半径  $R$  的关系式:

$$D \times R = 337.5. \quad (11)$$

理论上可得  $D=42.18$ 。图 10 所示是标准模拟眼的屈光度分布图, 图中不同颜色代表不同的屈光度。随机从图上抽取不同角度与半径处数据可得, 在  $163^\circ$  方向, 3 mm 处屈光度为  $42.18 \text{ m}^{-1}$ , 5 mm 处屈光度为  $42.19 \text{ m}^{-1}$ , 7 mm 处屈光度为  $42.18 \text{ m}^{-1}$ ; 在  $73^\circ$  方向, 3 mm 处屈光度为  $42.17 \text{ m}^{-1}$ , 5 mm 处屈光度为  $42.16 \text{ m}^{-1}$ , 7 mm 处屈光度为  $42.17 \text{ m}^{-1}$ 。同时另选 4 个不同方向, 分别为  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  和  $315^\circ$ , 半径分别 1, 2, 3 和 4 mm 的 16 个点, 屈光度分布如表 3 所示, 误差都在  $0.05 \text{ m}^{-1}$  内。



图 10 标准模拟眼屈光度分布

Fig. 10 Diopter distribution of standard model eye

表3 不同区域的屈光度分布

Tab.3 Diopter distribution in different areas ( $m^{-1}$ )

角度/( $^{\circ}$ )	半径			
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
45	42.17	42.20	42.20	42.19
135	42.18	42.18	42.18	42.18
225	42.17	42.20	42.19	42.19
315	42.18	42.18	42.17	42.18

图11所示是Placido盘上的黑白条纹经标准模拟眼反射后通过成像系统后显示的图像。将数据导出,其中24个环,每个环上有256个点,共计6144个数据点,每个点表示环上一点到中心点的距离。计算得到的环宽如表4所示,黑白条纹的最大环宽为0.208 mm,最小环宽为0.195 mm,平均值为0.202 mm,标准差为0.004 73,能够满足环等间距均匀分布的要求。



图11 标准模拟眼的环分布

Fig.11 Ring distribution of standard model eye

表4 标准模拟眼下的环宽表

Tab.4 Ring widths under standard model eye (mm)

环分布	环宽	环分布	环宽	环分布	环宽
1	0.195	9	0.200	17	0.202
2	0.204	10	0.208	18	0.206
3	0.195	11	0.199	19	0.206
4	0.203	12	0.207	20	0.207
5	0.198	13	0.200	21	0.204
6	0.207	14	0.201	22	0.205
7	0.199	15	0.206	23	0.206
8	0.204	16	0.208		

## 6 结 论

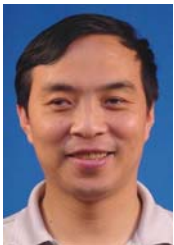
本文根据基于Placido盘的角膜地形图仪的结构及工作原理,对其投射照明系统的LED背光源、漫反射材料、Placido盘面型及环的分布进行了设计,并对其加工工艺与系统进行了实验研究。实验结果表明:在主波长为625 nm的AlGaInP红色LED面光源照明的情况下,通过椭球面型Placido盘成像到CCD上的黑白条纹环能满足等间隔均匀分布的要求,环宽平均值为0.202 mm,标准差为0.004 73。最终所获得的检测精度达到 $0.05 m^{-1}$ ,能够满足角膜地形图仪对投射照明系统的高对比度及高精度要求。

## 参考文献:

- [1] 周铭丽. 波前像差研究及其在眼科中的应用[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.  
ZHOU M L. *Research on Wavefront Aberration and Its Applications* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [2] 余锦华,李添捷. 正常角膜和圆锥角膜的特征提取[J]. 光学精密工程,2015,23(10): 2919-2926.  
YU J H, LI T J. Extracting features from normal corneas and keratoconus based on wavelet analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2919-2926. (in Chinese)
- [3] 郑浩,隋成华,王河林,等. 角膜地形图仪中调焦函数的选取及搜索方法[J]. 光学仪器,2013,35(3): 25-31.  
ZHENG H, SUI CH H, WANG H L, *et al.*. The selection of focusing function and searching method in corneal topography [J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(3): 25-31. (in Chinese)
- [4] 马徽冠,谢培英,唐球. 角膜地形图仪分析的数学模型分类及其在圆锥角膜中的意义[J]. 眼视光学,2008,10(6): 477-480.  
MA H G, XIE P Y, TANG Y. Classification of the mathematical model of corneal topography and its significance in the diagnosis of the keratoconus [J]. *Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology*, 2008, 10(6): 477-480. (in Chinese)
- [5] 张运海,沈建新,廖文和. 准分子激光矫正性近视散光的屈光机理及应用[J]. 光学精密工程,2003,11(3): 291-295.

- ZHANG Y H, SHEN J X, LIAO W H. Use of excimer to correct compound myopic astigmatism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3): 291-295. (in Chinese)
- [6] 孙延奎. 光学相干层析医学图像处理及其应用[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1086-1104.
- SUN Y K. Medical image processing techniques based on optics coherence tomography and their applications[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1086-1104. (in Chinese)
- [7] FARID, KARIMIAN, SEPEHR, FEIZI. Comparison of corneal topography measurements using Galilei, Orbscan, and Placido disk-based topographer systems [J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2011, 27(7): 502-508.
- [8] 刘祖国. 角膜地形图学[M]. 广东: 广东科技出版社, 2001.
- LIU Z G. *Corneal Topography* [M]. Guangdong: Guangdong Science and Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [9] 崔俊娜. 用于眼底治疗的全固态绿光激光器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- CUI J N. *Study of All Solid State Green Laser Used in the Treatment of Ocular Fundus* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [10] 韩军, 李建军, 邓军, 等. 高亮度 AlGaInP 红光发光二极管 [J]. *光电子·激光*, 2008, 19(2): 171-174.
- HAN J, LI J J, DENG J, *et al.*. High bright AlGaInP red light LED [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(2): 171-174. (in Chinese)
- [11] STREUBEL K, LINDER N, WIRTH R, *et al.*. High brightness AlGaInP light-emitting diodes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(2): 321-332.
- [12] BALL C P, LEVICK A P, WOOLLIAMS E R, *et al.*. Effect of polytetrafluoroethylene (PTFE) phase transition at 19 °C on the use of Spectralon as a reference standard for reflectance [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4806-4812.
- [13] CARBONARI K J. *Placido projector for corneal topography system*; US, 7611245 B2 [P], 2009-11-03.
- [14] GIANNOZZI F, SPADINI S. *LED light Placido disc projector for a corneal topography system*; US, 2015/0289758 A1 [P], 2015-10-15.

#### 作者简介:



隋成华(1956—),男,山东海阳人,教授,博士生导师,1988年于杭州大学获得硕士学位,1999年于浙江大学获得博士学位,主要从事新型光电信息处理系统的开发及应用。E-mail: suich@zjut.edu.cn



沃圣杰(1992—),男,浙江宁波人,硕士研究生,2015年于浙江工业大学获得学士学位,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: hzwosj@sina.com