

# 激光与光电子学进展

## 基于达曼波带片的多焦点人工晶体设计

李俊杰, 周常河, 贾伟, 陈昱达, 王奕涵, 刘炜程, 王津\*

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 511443

**摘要** 提出了一种多焦点人工晶体的设计方法,即将达曼波带片作为光学部刻入单焦点人工晶体表面。达曼波带片由一系列的同心圆环构成,是将达曼光栅的位相调制思想引入传统波带片而形成的一种实用光学元件。经过对衍射级次的调制,它能在聚焦透镜后方光场处产生一系列的轴向焦斑分布。通过结合不同数值孔径的聚焦透镜,焦斑的强度分布也会有一定比例的变化。通过理论模拟和实验验证,为多焦点人工晶体的制作提供了一种有效的设计方法。该多焦点人工晶体拥有五个焦点,能够同时提升白内障患者在不同距离视物时的视力,并为他们提供更加清晰细致的成像效果。

**关键词** 衍射; 达曼波带片; 人工晶体; 多焦点; 大焦深

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0733001

### Design of Multi-Focal Intraocular Lens Based on Dammann Zone Plate

Li Junjie, Zhou Changhe, Jia Wei, Chen Yuda, Wang Yihan, Liu Weicheng, Wang Jin\*

*Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China*

**Abstract** In this paper, a design method of multi-focal intraocular lens is proposed. Dammann zone plate, which consists of a series of concentric rings, is a practical optical element which introduces the phase modulation idea of Dammann grating into the traditional band plate. Through modulating the diffraction order, it can produce a series of axial focal spot distribution in the light field behind the focusing lens. Moreover, by combining the focusing lens with different numerical apertures, the intensity distribution of the focal spot will also change to a certain extent. Through theoretical simulation and experimental verification, it provides an effective design method for fabrication of multi-focus intraocular lens. The multi-focus intraocular lens has five focal points, which can improve cataract patients' vision at different distances simultaneously and provide them with clearer and more detailed images.

**Key words** diffraction; Dammann zone plate; intraocular lens; multi-focal; deep focal depth

## 1 引言

人眼成像过程中,晶状体和视网膜是最重要的部分。在晶状体的调节下,来自不同距离景物的入射光可以被聚焦在人眼的视网膜上,然后视神经向大脑传输信号,进而产生图像。然而,目前世界上许多人患有白内障,这是很多老年人和生活在高海

拔地区的人眼睛失焦的主要原因<sup>[1-2]</sup>。在医学上,早期轻度的白内障可以通过药物治疗来进行一定程度的控制和恢复,而针对处于晚期的白内障患者,最有效、最直接的治疗方式是通过眼部手术植入人工晶体<sup>[3]</sup>。

经过多年的研发设计,科学家成功研制出了多种人工晶体,包括折射、衍射、球面、非球面等类型,

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-06-24; 录用日期: 2021-06-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(21619343)、广州市科技计划项目(202007010001)

通信作者: \*wangjin@jnu.edu.cn

它们可以产生单个或者多个焦点<sup>[4-8]</sup>。医生通过手术将人工晶体植入患者的眼睛,代替已经浑浊病变的晶状体,从而使他们恢复正常的视力<sup>[9-10]</sup>。患者的视力也从单一距离视力恢复发展到长距离、中距离、近距离的同时矫正<sup>[11-12]</sup>。然而,当患者植入单焦点人工晶体后,由于其曲率是固定的,无法自动调焦,所以手术后患者一般只能恢复远视力,想要提升中距和近视力,如正常看电脑、阅读看报等,还需要额外佩戴眼镜<sup>[13]</sup>。多焦点人工晶体一般分为双焦点和三焦点两种类型:双焦点类型也会丢失某一距离视力的提升,给患者生活造成诸多不便;三焦点人工晶体基本实现了远距、中距和近视力的同时提升,但如果焦深较小,则远焦点到近焦点的过渡比较突兀猛烈,患者难以适应。因此,人工晶体在焦点个数和焦深方面仍需要进一步研究和完善。

在此背景下,本文提出了一种多焦点人工晶体的设计方法,即在传统的单焦点人工晶体表面,刻入达曼波带片光学部(数十个衍射环带),可以得到一款多焦点的人工晶体。基于达曼波带片的光学特性,该设计具有五个均匀的焦点以及较大的焦深,使其可以在不失去视野的情况下,同时在视网膜上形成远距离、中距离以及近距离物体的清晰图像<sup>[14-16]</sup>。本文所提出的多焦点人工晶体,其设计结构简单、易于制造,在未来治疗白内障方面有很广

阔的应用前景。

## 2 基本原理

### 2.1 达曼波带片的原理

本文提出了一种设计多焦点人工晶体的方法,即在传统的单焦点人工晶体中引入达曼波带片光学部,以此获得多焦点和大焦深的人工晶体。达曼波带片是将达曼光栅的位相调制思想引入菲涅耳波带片而形成的光学元件,由一系列的同心圆环构成。达曼光栅可以产生均匀性良好的一维或二维光斑阵列。理论上,也可以把传统的达曼波带片视为一维光栅<sup>[17]</sup>。因此,当像达曼光栅那样引入一定的相位调制时,达曼波带片可以在一定范围内产生一系列等强度的轴向焦斑分布,从而使普通的透镜成为一个轴向的多焦点系统。

由于达曼波带片具有相位二元 $(0, \pi)$ 结构,用相关的电子束光刻技术和刻蚀技术加工好成品后,也很容易通过压印复制继续批量制作。达曼波带片的平面结构示意图和聚焦光路如图 1 所示。图中  $R_1, R_2, \dots, R_{N-1}, R_N$  为达曼波带片的各环区半径,白色环带为 0 相位,黑色环带为  $\pi$  相位。图 1(b) 是添加了达曼波带片后典型的聚焦光路示意图,从左至右依次为均匀的平面波、达曼波带片、聚焦透镜。以聚焦透镜的几何焦点为圆心,建立以光轴方向为 Z 轴的坐标系 XYZ。

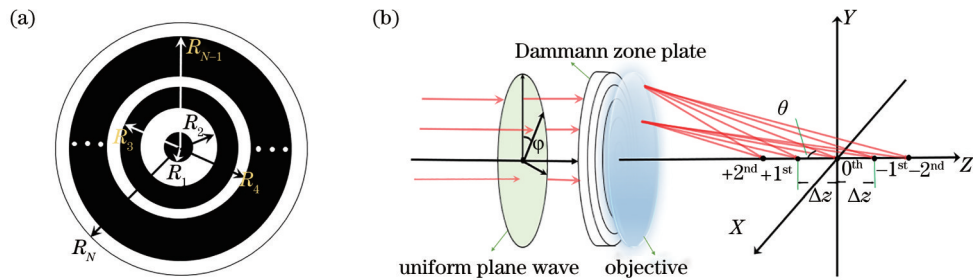


图 1 达曼波带片的平面结构示意图和聚焦光路。(a)达曼波带片平面结构图;(b)基于达曼波带片的多焦点系统

Fig. 1 Schematic of planar structure and focusing light path of Damann zone plate. (a) Planar structure of Damann zone plate; (b) multi-focal system based on Damann zone plate

在透镜后方,焦点附近的聚焦光场分布<sup>[14,18]</sup>

$E(o, \rho)$ 为

$$E(o, \rho) = 2 \int_0^1 t(r) J_0(\rho r) \exp(-ior^2/2) r dr, \quad (1)$$

式中: $t(r)$ 是达曼波带片的透过率函数; $J_0$ 是第一类零阶贝塞尔函数; $i = \sqrt{-1}$ ;  $r$ 为相对于入瞳的归一化径向坐标,  $r = R/L$ ,  $R$ 是径向坐标,  $L$ 是系统的入瞳半径; $o$ 和 $\rho$ 为定义的归一化变量,分别为

$$o = 2\pi NA^2 z / \lambda, \quad (2)$$

$$\rho = 2\pi NA \rho / \lambda, \quad (3)$$

式中: $NA$ 是聚焦透镜的数值孔径; $z$ 是光场的轴向坐标; $\rho$ 是光场径向坐标; $\lambda$ 是入射平面波的波长。

此时令  $\zeta = (r^2 - 0.5) / 4\pi$ , 轴向聚焦光场变为

$$E(o, 0) = 4\pi \int_{-\infty}^{+\infty} t(\zeta) \exp(-i2\pi o \zeta) d\zeta, \quad (4)$$

其中,

$$t(\zeta) = \begin{cases} t(r), & -\frac{1}{8\pi} < \zeta < \frac{1}{8\pi}, \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

$$t(r) = 2 \sum_{n=1}^{N_{\text{all}}-1} (-1)^n \text{circ}(r/r_n) + (-1)^{N_{\text{all}}} \text{circ}(r/r_{N_{\text{all}}}) \quad (6)$$

式中： $r_n$  是达曼波带片的归一化半径， $n = 0, 1, \dots, N_{\text{all}}$ ； $N_{\text{all}}$  是环区的总数，其中  $r_0 = 0$ ， $r_{N_{\text{all}}} = 1$ 。函数  $\text{circ}(r/r_n)$  表示为

$$\text{circ}(r/r_n) = \begin{cases} 1, & r \leq r_n \\ 0, & r > r_n \end{cases} \quad (7)$$

定义两个相邻焦点之间的距离为

$$\Delta z = \frac{V_q \lambda}{1 - \cos(\arcsin NA)}, \quad (8)$$

式中： $V_q$  是相对于径向坐标的平方的周期，即有效周期数。因此，两个相邻焦点之间的距离相等，并且可以通过周期参数的定义来实现焦深可控。

### 2.2 达曼波带片的理论模拟

定义  $1 \times 5$  达曼波带片可以产生 5 个轴向焦点，

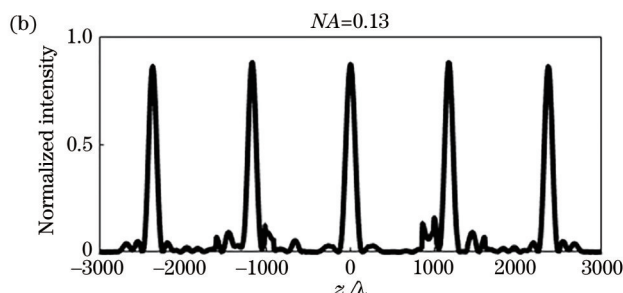
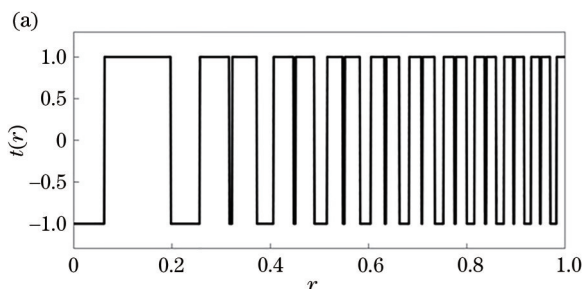


图 2  $1 \times 5$  达曼波带片。(a)  $1 \times 5$  达曼波带片的透过率函数；(b) 达曼波带片的轴向归一化强度分布

Fig. 2  $1 \times 5$  Dammann zone plate. (a) Transmission function of  $1 \times 5$  Dammann zone plate; (b) axial normalized intensity distribution of Dammann zone plate

通过模拟计算得出，均匀平面波通过  $1 \times 5$  的达曼波带片和聚焦透镜 ( $NA = 0.13$ ) 后，能得到 5 个均匀的轴向焦点。在上述条件下，所产生的 5 个轴向焦点之间的间距是相等的，且其强度也是基本相等的，如图 2(b) 所示。从焦点的数量和它们等光强的特点等方面来说，该设计具有较大的焦深，能使白内障患者术后的视力在不同距离视物下获得同等的提升。这表明达曼波带片在设计 and 制作多焦点人工晶体中能够发挥很好的应用价值，这为多焦点人工晶体的设计和制作提供了一种科学有效的思路。

### 2.3 达曼波带片的实验验证

为了验证达曼波带片的相关特性，利用紫外光

即结合聚焦透镜后，在聚焦光场处能够产生 5 个轴向的均匀焦点。人工晶体本身就是屈光性介质，具有一定的聚焦能力，相当于一个聚焦透镜。所以在传统的单焦点人工晶体表面刻入  $1 \times 5$  达曼波带片光学部，理论上能够得到一个可以生成 5 个焦点的多焦点人工晶体。

本文设计了一个 10 周期、 $1 \times 5$  的二元相位 ( $0, \pi$ ) 达曼波带片，即制备了 10 个周期的达曼波带片，10 个周期的相位分布是  $0$  和  $\pi$  交替的。经过计算， $1 \times 5$ ，周期数目为 10 的达曼波带片的归一化相位转折点为  $0, 0.0622, 0.1977, 0.2560, 0.3162, 0.3223, 0.3729, 0.4069, 0.4472, 0.4515, 0.4890, 0.5153, 0.5477, 0.5512, 0.5823, 0.6046, 0.6325, 0.6355, 0.6626, 0.6823, 0.7071, 0.7098, 0.7342, 0.7520, 0.7746, 0.7771, 0.7994, 0.8158, 0.8367, 0.8390, 0.8597, 0.8750, 0.8944, 0.8966, 0.9160, 0.9304, 0.9487, 0.9507, 0.9691, 0.9826, 1$ ，其透过率函数如图 2(a) 所示。

刻技术，在玻璃基底上制作了一个  $1 \times 5$ ，周期数目为 10 的达曼波带片样品，如图 3 所示。其中，它的

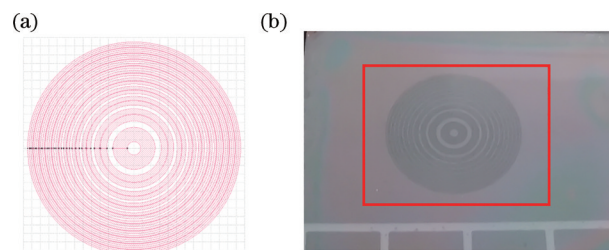


图 3 达曼波带片。(a) 达曼波带片设计图；(b) 达曼波带片样品图

Fig. 3 Dammann zone plate. (a) Design diagram of Dammann zone plate; (b) sample diagram of Dammann zone plate

通光孔径为 5 mm,各环区的半径依次为 155.50, 494.25, 640.00, 790.50, 805.75, 932.25, 1017.25, 1118.00, 1128.75, 1222.50, 1288.25, 1369.25, 1378.00, 1455.75, 1511.50, 1581.25, 1588.75, 1656.50, 1705.75, 1767.75, 1774.50, 1835.50, 1880.00, 1936.50, 1942.75, 1998.50, 2039.50, 2091.75, 2097.50, 2149.25, 2187.50, 2236.00, 2241.50, 2290.00, 2326.00, 2371.75, 2376.75, 2422.75, 2456.50, 2500.00  $\mu\text{m}$ 。上述设计的达曼波带片的特征尺寸为 5  $\mu\text{m}$ ,特征尺寸定义为所有归

一化半径的最小间隔。

搭建了相对应的光路系统对达曼波带片的聚焦光场进行探测。如图 4 所示, P 是偏振片, Q 为 1/4 波片, R 是反射镜,  $L_1$  和  $L_2$  组成了准直扩束系统,  $O_1$  是聚焦透镜,  $O_2$  是成像物镜。氦氖激光器发出的光经过偏振片和 1/4 波片后变成圆偏振光, 被准直扩束之后, 入射到达曼波带片和  $O_1$  组成的聚焦系统上,  $O_2$  将聚焦场放大成像, 最后利用 CCD 相机接收。其中, 成像物镜和 CCD 是安装在三维移动平台上的。

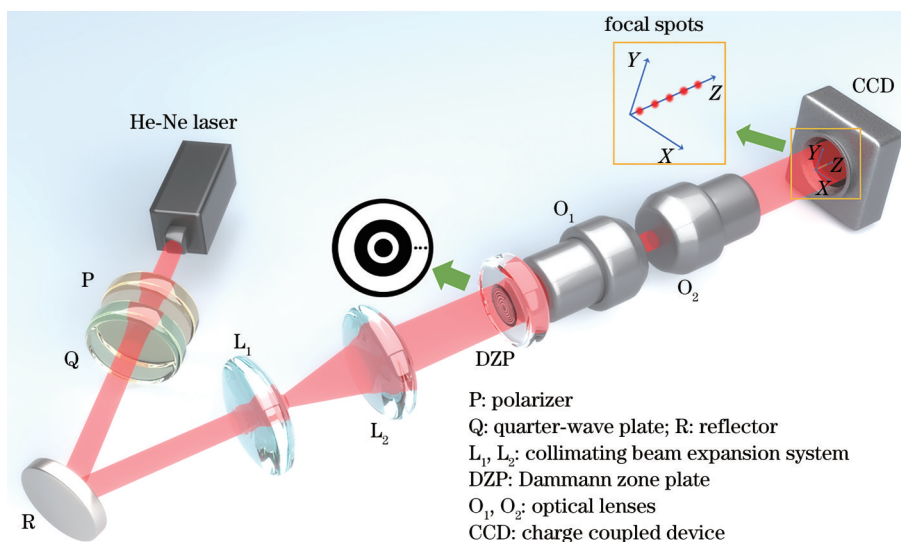


图 4 达曼波带片的实验验证光路

Fig. 4 Experimental verification optical path of Dammann zone plate

图 5 给出了实验测得的  $1 \times 5$  达曼波带片的聚焦光斑和其对应的强度灰度值。可以看出, 在其聚焦光场处的五个轴向焦点强度几乎相等。当然, 实验过程中不可避免会存在一定的误差, 所加工的样品存在一定的不足, 聚焦透镜也存在着像差等, 鉴于以上多种因素, 这五个焦点的均匀性还是处于比较好的范围, 这为上述达曼波带片的光学特性提供

了相应的验证。

聚焦系统的有效通光孔径是由聚焦透镜决定的。实验所选聚焦透镜的通光孔径为 4 mm, 数值孔径为 0.13。那么, 达曼波带片的有效周期数为  $V_q = 10 \times (4/5)^2 = 6.4$ 。根据 (8) 式, 轴向光斑间隔的理论值  $\Delta z$  约为 500  $\mu\text{m}$ , 即五个焦点的总焦深约达到了 2 mm。如果将达曼波带片的周期数全部利用, 那么总焦深将大于 2 mm, 这将使人工晶体从远焦点到近焦点的过渡更加平缓、焦深更长, 能够达到更加良好的视觉效果。

## 2.4 关于达曼波带片的进一步探讨

实际上, 上述归一化参数下的达曼波带片在低 NA 值的聚焦透镜后方聚焦光场处, 都能产生五个均匀、等光强和等间距的焦点。例如, 如图 6 所示, 当聚焦透镜 NA 值为 0.01 时, 其五个焦点的轴向归一化强度也是几乎相等的。

此外, 当聚焦透镜的数值孔径变得足够大时,

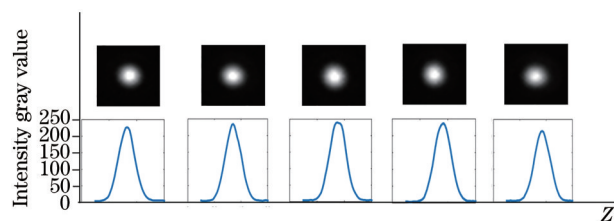


图 5 达曼波带片 ( $1 \times 5$ ) 的五个轴向聚焦光斑的横向二维光场强度分布

Fig. 5 Intensity distribution of transverse two-dimensional light field of five axial focal spots of Dammann zone plate ( $1 \times 5$ )

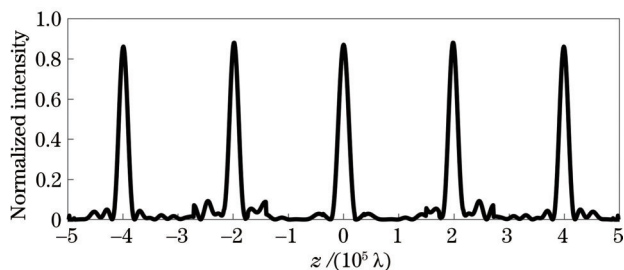


图 6 达曼波带片的轴向归一化强度分布

Fig. 6 Axial normalized intensity distribution of Damann zone plate

对于上述达曼波带片,其产生的能量分布将出现不同比例的变化。如图 7 所示,五个焦点的强度是不同的,中间的强度峰值最高,两侧的强度较弱。虽

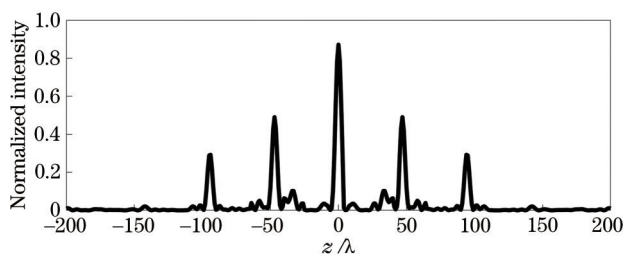


图 7 达曼波带片的轴向归一化强度分布

Fig. 7 Axial normalized intensity distribution of Damann zone plate

然此时失去了等光强的性质,但轴向焦点仍在很大程度上保持均匀,这种光强的不等比例调制仍然可以为人工晶体的设计和制作赋予实用价值。目前市场上很多类型的多焦点人工晶体都对收集到的光能进行了一定比例的调制,从而赋予它们不同的光强分布,以达到重点提升某个距离视力的目的。中间焦点的能量分布比例最大,这意味着白内障患者植入该情况下的基于达曼波带片的人工晶体后,中距离场景的聚焦能力最好,且其他距离的视力也会得到相应比例的提升。当然,此时的焦点之间的间隔依然是相等的,只是光强的分配比例有一定的变化。将光强进行不同比例再分配,这也是多焦点人工晶体中一种非常实用的类型。

作为二元光学器件,达曼波带片的归一化相位转折点数据精度越高,相关的光学加工效果越良好,不良光学现象的发生率也会降低,所设计样品的完整性也会更加接近理论值,聚焦效果越理想。反之,如果精度比较低,那么相应的焦点均匀性也会变差,甚至达到严重恶化的程度,失去多焦点的性质,从而大幅降低达曼波带片的性能以及其利用效率。作为其中的一个例子,利用上述  $1 \times 5$  达曼波带片模拟不同精度下轴向强度分布(聚焦透镜 NA 值均为 0.1)之间的对比如图 8 所示。

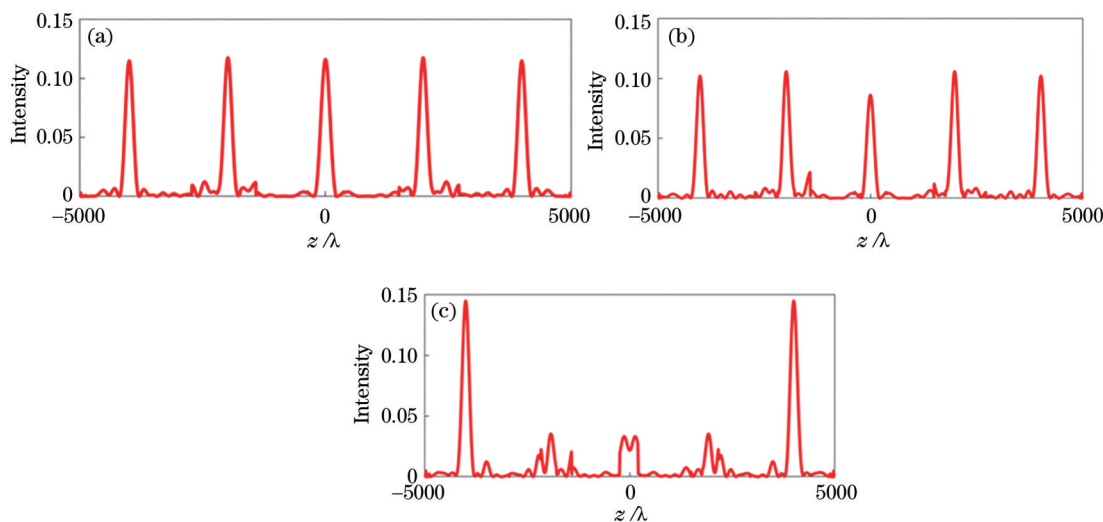


图 8 达曼波带片在不同精度下的轴向强度分布。(a)精度为 0.0001;(b)精度为 0.001;(c)精度为 0.01

Fig. 8 Axial intensity distributions of Damann zone plate with different precisions. (a) Precision is 0.0001;

(b) precision is 0.001; (c) precision is 0.01

### 3 基于达曼波带片的多焦点人工晶体

如上所述,达曼波带片是利用了达曼光栅的位相调制思想,在传统的波带片基础上制作而成的。

通过结合聚焦透镜,达曼波带片能够在透镜后场轴向方向上生成五个均匀的焦点,这些焦点之间是等间距的。鉴于达曼波带片的这些特质,在此提出了一种多焦点人工晶体的制作方法:在传统的单焦点

人工晶体表面刻入达曼波带片光学部,以此获得一款基于达曼波带片的多焦点人工晶体。如图 9 所示,这一多焦点人工晶体拥有均匀的五个焦点,使得成像更加细致。

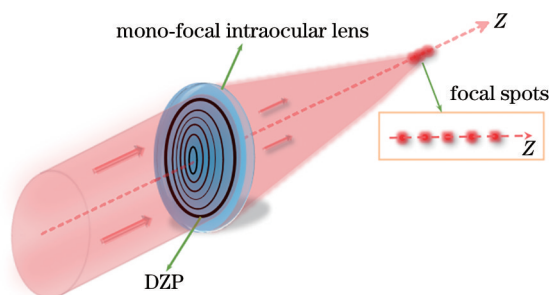


图 9 基于达曼波带片的多焦点人工晶体

Fig. 9 Multi-focal intraocular lens based on Damman zone plate

如今大部分衍射型多焦点人工晶体是基于光的衍射原理,于单焦点人工晶体表面刻入数十个拥有同心圆性质的环带而构建的,以此形成近和远焦点,所以大部分此类型的人工晶体仅仅拥有两个焦点。例如美国 3M 公司的 3M 人工晶体和瑞典法玛西亚公司的 Ceeon811 人工晶体等都是两个焦点的类型,这必然导致患者术后丢失某一距离的视力提升。基于达曼波带片的多焦点人工晶体的设计可以产生五个焦点,具有较大的焦深。当焦点强度分布一样时,患者术后在不同距离视物时的聚焦效果都将获得同等程度的提升;当焦点强度分布呈一定比例时,患者术后在不同距离视物时的聚焦效果能够获得不同程度的提升。另外,从远焦点到近焦点的过渡也更加平缓、焦深更长,患者能够更好地适应术后视力。

目前,单焦点人工晶体已经研究和发展的很多年,在成像理论和制作技术方面已经相当成熟。达曼波带片的研究也有很多进展,光刻和刻蚀等工艺技术也日新月异。这些原理和技术,在很大程度上为本文提出的多焦点人工晶体的设计方法提供了非常坚实的基础。

不同类型的人工晶体由不同的材料制作而成,包括聚甲基丙烯酸甲酯、玻璃、硅胶、水凝胶材料以及丙烯酸酯材料等。其中,聚甲基丙烯酸甲酯和玻璃等材料,一般用来生产硬性人工晶体,而水凝胶、丙烯酸酯等材料可以用来生产软性人工晶体。虽然这些材料的韧性、稳定性和抗压能力各不相同,但是当它们同处于低温下时,一般都能够转变成具

有一定硬度的状态,其抗压性也相应变高。此时,能够在低温下对这些材料制成的人工晶体进行光刻和刻蚀,将达曼波带片光学部刻入这些单焦点人工晶体的表面。此外,压印复制工艺技术、三维打印技术也可以很大程度上减少原本单焦点人工晶体的损伤,而且还能省略其他很多加工步骤。值得一提的是,制作人工晶体的材料要求其具有较好的生物相容性、良好的透光率以及较强的机械硬度,以方便加工和利用。

当然,达曼波带片光学部的设计和制作对人工晶体的性能有着一定的影响。多焦点人工晶体通过对表面衍射环带的设计,可以把一束光线分成多份,形成多个焦点,使它们分别对应远、中和近等不同的视距。在设计 and 制作过程中,达曼波带片衍射环带中心必须准确地位于人工晶体光学中心,这样才能保证光线在聚焦过程中,不会产生过多的其他杂乱的散射光线等问题,否则将会严重降低光能的利用效率和成像的清晰度,造成患者术后出现严重的不良反应。

一般而言,多焦点人工晶体的总长度、光学面直径以及有效光学直径并不是相等的,它们的光学面直径大约只占到了总长度的二分之一,而有效光学直径是更小于光学面直径的。人工晶体尺寸必须严格适合人眼,而达曼波带片的直径大小基本可以等同于人工晶体有效光学直径的大小。本文所设计的达曼波带片通光孔径为 5 mm,与大部分市面上的多焦点人工晶体的有效光学直径几乎相等,所以在刻入人工晶体表面后,衍射环能够全部得以应用,从而获得均匀的五个焦点。当然,现有光学加工技术也能够将达曼波带片光学部的尺寸做得更小,但是如果和光学面直径相差比较大,则会带来一定的杂散光,使得成像效果变差。如果衍射环的直径大于人工晶体光学面直径,那么达曼波带片光学部将在其有效周期内,获得五个均匀的焦点,但会使得焦深减小,光能利用效率降低。

## 4 结 论

本文提出了一种多焦点人工晶体的设计方法,即在传统的单焦点人工晶体表面刻入数十个同心圆环,即达曼波带片光学部。理论上,只要合理选择这两个结构参数,采用本文的人工晶体的设计方法将获得五个均匀的焦点,且拥有较大的焦深,让白内障患者术后眼球成像效果更加细致。此外,对

于同一结构的达曼波带片,可以选择具有不同数值孔径的聚焦透镜(初始单焦点人工晶体),获得不同的聚焦效果。通过模拟计算和实验验证,可以得到五个等强度的焦点,也可以得到五个不等强度的焦点,这两种不同的光强分布能使患者术后远距、中距、近视力获得不同程度的改善。由于达曼波带片光学部可以产生多个焦点,聚焦后具有较大的焦深,从远焦点到近焦点的过渡也更加平缓,且其加工方法简单,因此非常适合用于植入式人工晶体的设计和制作。

### 参 考 文 献

- [1] Alió J L, Vega-Estrada A, Plaza-Puche A B. Clinical outcomes with a new microincisional diffractive multifocal IOL[J]. *Eye and Vision*, 2015, 2: 2.
- [2] Chang D F. Comparative rotational stability of single-piece open-loop acrylic and plate-haptic silicone toric intraocular lenses[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2008, 34(11): 1842-1847.
- [3] Wang D Q, Yuan Q, Yin C J, et al. Intraocular lens model and its three-dimensional printing technology based on human eye data in China[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 213301.  
王丹琦, 袁群, 殷长俊, 等. 基于我国人眼数据的人工晶体模型及其三维打印技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 213301.
- [4] Gu J D, Liu Y J, Bian Y Y, et al. A dual-area aspheric diffractive intraocular lens for large corneal asphericity variation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1022001.  
谷健达, 刘永基, 边亚燕, 等. 适用于大范围角膜非球面系数的双区域非球面衍射型人工晶体[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1022001.
- [5] Patil M S, Nikose A S, Bharti S. Visual outcome and refractive status with monofocal toric intraocular lens implantation to correct astigmatism during cataract surgery[J]. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2020, 68(12): 3016-3019.
- [6] Modi S, Lehmann R, Maxwell A, et al. Visual and patient-reported outcomes of a diffractive trifocal intraocular lens compared with those of a monofocal intraocular lens[J]. *Ophthalmology*, 2021, 128(2): 197-207.
- [7] Cao J H, Zhu H X, Su Z P. Design of intraocular lens based on multifocal Freeform Fresnel surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082202.  
曹晶辉, 朱华新, 苏宙平. 基于多焦点自由曲面菲涅耳人工晶状体设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082202.
- [8] Kim M J, Zheleznyak L, MacRae S, et al. Objective evaluation of through-focus optical performance of presbyopia-correcting intraocular lenses using an optical bench system[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2011, 37(7): 1305-1312.
- [9] Charman W N. Developments in the correction of presbyopia I: spectacle and contact lenses[J]. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 2014, 34(1): 8-29.
- [10] Calladine D, Evans J R, Shah S, et al. Multifocal versus monofocal intraocular lenses after cataract extraction[J]. *Sao Paulo Medical Journal*, 2015, 133(1): 68.
- [11] Liu Z Q, Flores A, Wang M R, et al. Diffractive infrared lens with extended depth of focus[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(1): 018002.
- [12] Zlotnik A, Yaish S B, Yehezkel O, et al. Extended depth of focus contact lenses for presbyopia[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2219-2221.
- [13] Voskresenskaya A, Pozdeyeva N, Pashtaev N, et al. Initial results of trifocal diffractive IOL implantation [J]. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2010, 248(9): 1299-1306.
- [14] Zhou C H, Yu J J. Dammam zone plate: CN102062887A [P]. 2011-05-18.  
周常河, 余俊杰. 达曼波带片: CN102062887A [P]. 2011-05-18.
- [15] García J A, Bará S, García M G, et al. Imaging with extended focal depth by means of the refractive light sword optical element[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18371-18378.
- [16] Maxwell W A, Lane S S, Zhou F. Performance of presbyopia-correcting intraocular lenses in distance optical bench tests[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2009, 35(1): 166-171.
- [17] Yu J, Zhou C, Jia W, et al. Three-dimensional Dammann array[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): 1619-1630.
- [18] Leutenegger M, Rao R, Leitgeb R A, et al. Fast focus field calculations[J]. *Optics Express*, 2006, 14(23): 11277-11291.