

液晶变焦透镜在 XR 近眼显示系统中的应用(特邀)

高堃*

歌尔电子有限公司, 美国 圣克拉拉 95054

摘要 探讨液晶(LC)技术在 XR 近眼显示系统中的应用。详述了如何通过控制光的偏振和波前来开发可变焦液晶透镜,这些透镜对改善 XR 应用中的用户体验具有潜在价值。还讨论了生产液晶透镜的挑战,特别是在优化透镜厚度和性能方面。

关键词 液晶; 可变焦液晶透镜; 光学成像; XR 近眼显示系统

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232754

Application of Liquid Crystal Zoom Lens in XR Near Eye Display System(Invited)

Gao Kun*

Goertek Electronics Co. Ltd., Santa Clara 95054, USA

Abstract The paper explores the use of liquid crystal (LC) technology in XR near-eye display systems. It elaborates on how LC materials, through controlled light polarization and wavefront manipulation, contribute to the development of varifocal LC lenses. These lenses are notable for their potential to improve user experience in XR applications. The document also discusses the challenges in manufacturing LC lenses, particularly in optimizing lens thickness and performance.

Key words liquid crystal; varifocal LC lens; optical imaging; XR near eye display system

1 引言

液晶(LC)技术已经广泛应用于日常生活的各个领域,包括家庭中的平板电视、手中的手机屏幕及办公桌上的电脑显示器。这些设备使用的液晶材料因具有双折射特性,能够在外界施加细微电压的情况下控制光线的偏振,从而调节光线的波前,以满足各种实际应用的需求。从广泛的应用层面来看,液晶调制主要分为三大类:第一类是强度调制,这主要用于信息显示领域;第二类是偏振调制,专门用于操作和控制偏振;第三类是相位调制,常用于波前控制、干涉测量和衍射光学元件的应用。

一般来说,人眼对亮度的变化极为敏感,这正是液晶技术大多应用于强度调制领域的原因。然而,相比之下,人眼几乎无法感知光的偏振和相位的变化。尽管如此,LC相位器件,特别是那些可调焦距的LC透镜,近年来已经吸引了业界的广泛关注。这些相位器件与强度和偏振调制器件相比,优势在于能更精确地控制光波的传播路径和波前形状,这在光学成像、光学

信息处理及精密测量等领域具有重要价值。例如,在光学成像方面,LC相位器件能够实现更高的图像分辨率和更优的图像质量。此外,它们体积小、质量轻、无须机械移动部件,这使得它们在便携式设备和精密仪器中的应用更加广泛和灵活。若将LC透镜替代传统的机械变焦镜头,如在手机和笔记本电脑中使用直径为5~15 mm的小口径LC透镜,或在视力矫正中使用直径为15~30 mm的较大口径LC透镜,如图1所示,这种技术将可能为XR消费电子市场带来颠覆性的变革。

2 技术原理与规格

2.1 可变焦电控液晶透镜

在电控可变焦液晶透镜的开发中,通常有两种方法可以用来产生所需的梯度折射率:第一种是利用非均匀电场作用于均匀的液晶层;第二种则是在均匀电场中使用非均匀液晶层。主要介绍第一种方法的技术背景,这也正是我们采用的技术路径。根据图2中的几何关系,简单估算出LC透镜的光程差(OPD)和屈

收稿日期: 2023-11-25; 修回日期: 2023-12-02; 录用日期: 2023-12-04; 网络首发日期: 2023-12-15

通信作者: *kun.gao@goertekusa.com

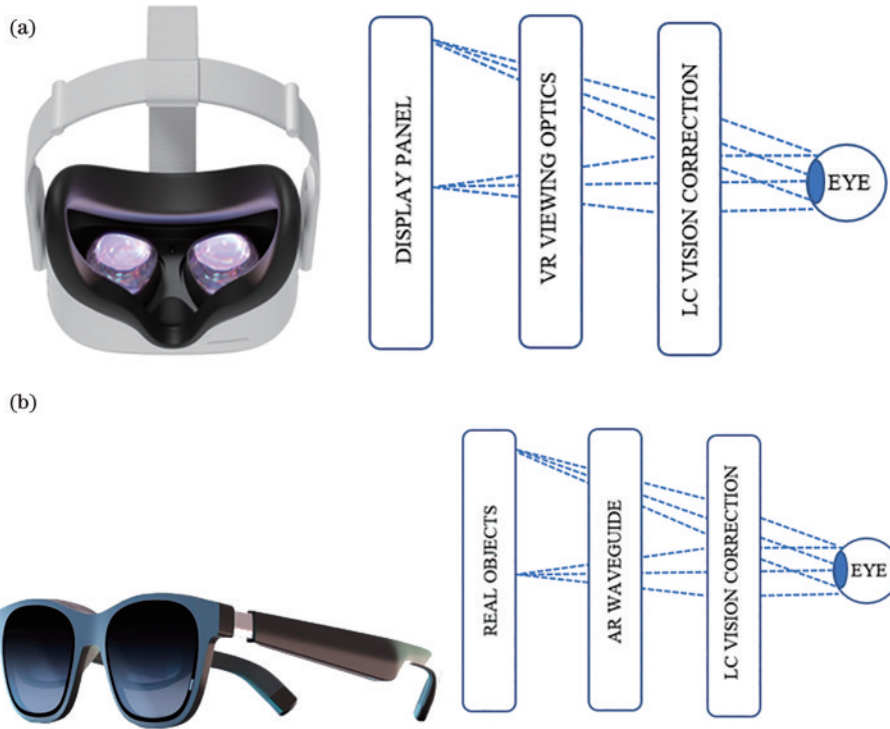


图 1 近眼显示(NED)系统中应用可变焦距 LC 镜片进行视力矫正^[1]。(a)虚拟现实(VR)系统;(b)增强现实(AR)系统
Fig. 1 Application of varifocal LC lenses for vision correction in the near eye display (NED) system^[1]. (a) VR system; (b) AR system

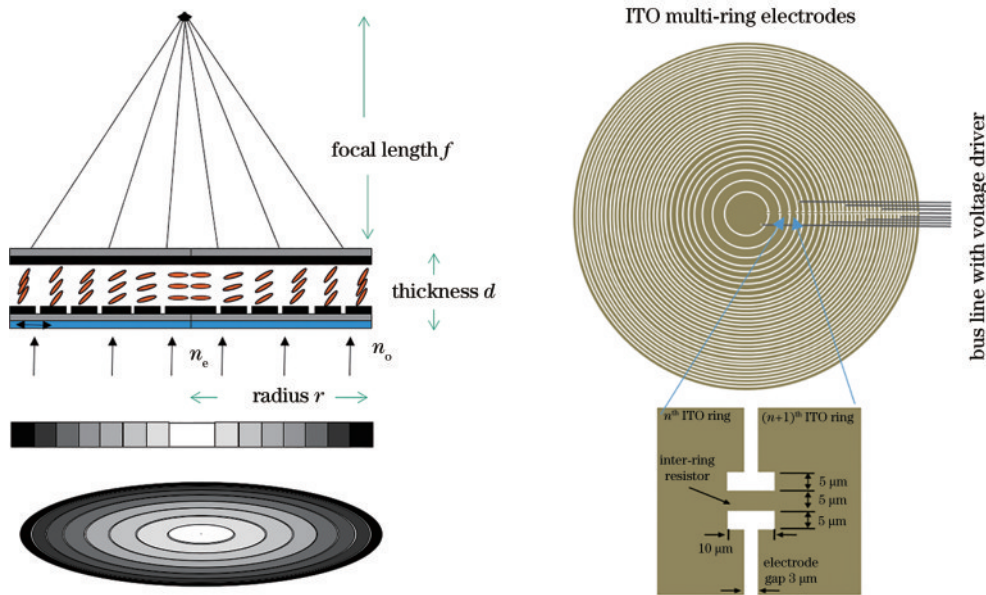


图 2 可变焦液晶透镜的工作原理和 ITO 设计
Fig. 2 Schematic of working principle of focus-tunable LC lens and its ITO design

光度(OP)。

$$V_{OPD} = \sqrt{r^2 + f^2} - f \sim \frac{r^2}{2f} = (n_e - n_o) \times d, \quad (1)$$

式中: $\Delta n = n_e - n_o$ 为液晶材料的双折射率。根据式(1),可以计算出屈光度的理论极限为 $2\Delta nd/r^2$ 。例如,对于直径为 30 mm 的 LC 透镜,在最优情况下,其屈光度最大可达约±1.0 屈光度(Diopter)。正如图 2 所展示的那样,通过对透明导电膜(ITO)施加设计电压,可以改变 LC 透镜各个部分 LC 分子的排列方向。这样,线偏

振光被有效地倾斜,使得输出波前能够在一个焦点上聚焦,其成像效果与传统的玻璃镜片相似。

此外,还附有美国肯特州立大学(Kent State University)液晶研究所开发的第一代、第二代、第三代 LC 透镜原型的图片(如图 3 所示)和规格(如表 1 所示)作为参考。这些 LC 透镜由 ITO 透明环形电极进行驱动。

第二代 LC 镜头的尺寸相较于第一代略有增大,但由于两者均未进行相位复位,单元厚度正好符合

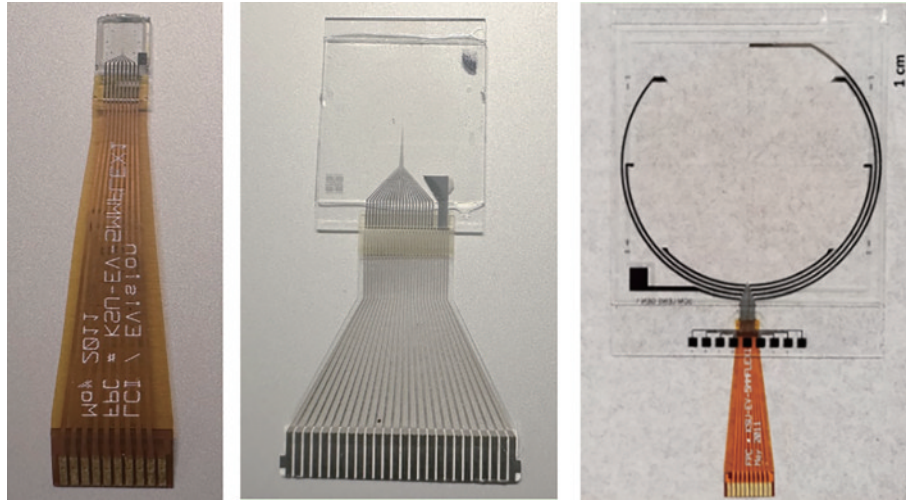


图 3 从左到右依次是 Kent/eVision 制作的第一代液晶透镜^[2]和第二代液晶透镜^[3], Kent/Meta 制作的第三代液晶透镜^[4]
 Fig. 3 LC Lenses made by Kent/eVision for the 1st generation^[2] and 2nd generation^[3], and by Kent/Meta for the 3rd generation^[4] from left to right, respectively

表 1 图 3 中液晶透镜的关键参数

Table 1 Key parameters used in the design of LC lenses in Fig. 3

Aperture /mm	Δn	Thickness / μm	Tunable OP in D
Small~2.4 (1st)	0.18	10	+/-2.5
Medium~4.7 (2nd)	0.22	12	+/-1
Large~50 (3rd)	0.18	12 (~336 $\mu\text{m}/$ 28 resets)	+/-0.2

OPD 的要求。第三代 LC 透镜也被称作菲涅耳型透镜,它将单元厚度调整至 12 μm ,并采用 28 个相位折叠,相当于 336 μm 的厚度。理论上,作为衍射元件的菲涅耳型 LC 透镜在补偿虚拟现实 (VR) 光学系统中的色差和响应速度方面都展现出了极大的潜力。

在液晶透镜的制造过程中会遇到多项技术挑战。主要的挑战之一是,过厚的透镜制造可能带来若干问题。首先,透镜内部的固有雾度会降低图像的对比度和清晰度;其次,为了补偿透镜的不足厚度而进行相位重置也是一项复杂且充满挑战的任务,这不仅需要精细的工程设计,还可能增加 ITO 图案化的复杂度和成本;此外,透镜厚度的增加可能导致边缘场效应,并且随着液晶层的加厚,透镜的响应时间会变慢,这在需要快速响应的应用中可能成为限制因素。在另一方面,

当液晶透镜的直径超过 30 mm 时,其光学调节性能会显著降低。为解决这个问题,我们设计了一种新型 LC 透镜。这种设计有效避免了由于透镜口径过大导致的光学性能下降和用户体验不佳的问题,这对 XR NED 应用的商业化和大规模生产极为重要。因此,平衡液晶透镜的厚度与性能需求显得至关重要。根据特定应用的需求合理设计透镜厚度,旨在确保既满足技术要求又能实现高效的性能输出。这一前沿技术将成为歌尔公司未来技术储备的重要部分,并将专属应用于我们的产品线,从而进一步加强我们在市场上的竞争力。

2.2 Pancharatnam-Berry (PB) 相位透镜

除了提到的可调焦 LC 透镜(通过改变施加的电压来实现调焦的有源透镜),还研究了另一种液晶聚合物制作的透镜,即 PB 透镜。PB 透镜的制作过程是:将两束具有相反圆偏振的相干激光以一定角度照射到光感材料(photoalignment materials)上形成基地,随后使用液晶聚合物薄膜通过多层旋涂 (spin coating) 制成具有成像功能的衍射光栅器件。具体的制备过程详见参考文献 [5-7]。图 4 展示了如何通过改变输入光圆偏振的旋向,来实现 PB 透镜聚焦和发散光学特性的过程。需要特别指出的是,PB 透镜与 LC 透镜不同,后

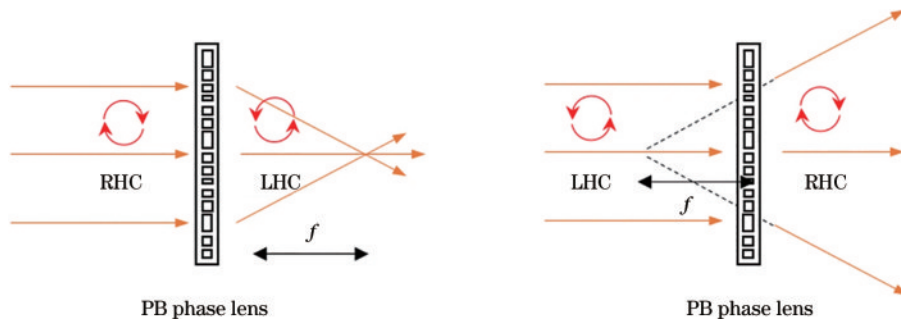


图 4 PB 相位透镜的工作原理
 Fig. 4 Schematic of working principle of PB phase lens

者能够进行连续的屈光度调节,相比之下,PB 透镜只具有一种特定的屈光度,它的聚焦或发散特性完全取

决于入射圆偏振光的旋性。对应于图 4 中实现图像放大和缩小的例子如图 5 所示。

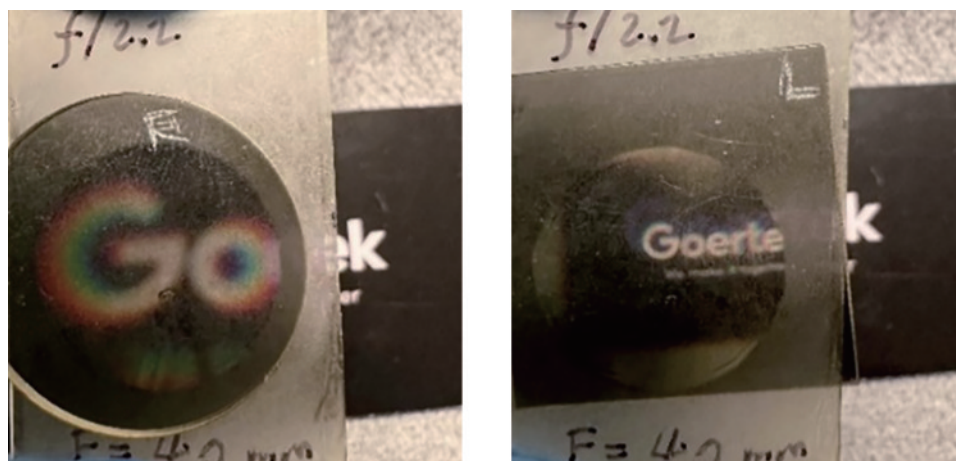


图 5 一种 PB 相位透镜(直径为 20 mm,屈光度为 $+/-25$ D),仅通过将圆偏振从右旋变为左旋来实现切换
Fig. 5 A quick demo of a PB phase lens (20 mm diameter and $+/-25$ Diopters) by switching the circular polarization from right-handed to left-handed only

3 总结和展望

目前,电压控制的可变焦 LC 透镜技术已相对成熟,适合于大规模生产。但它面临的技术挑战包括雾化现象、响应时间慢以及边缘场效应等问题。相较而言,PB 相位透镜提供了更广泛的屈光度调整范围,尤其适用于大口径透镜的应用。然而,PB 透镜的工作状态受到限制,对环境条件和材料质量的要求较高,目前还未大规模生产。这两种透镜各有优缺点,选择时需基于具体应用需求和生产条件进行综合考量。在视觉调节方面,这两种液晶透镜均能有效应对辐辏-调节冲突(VAC)问题。这种冲突通常发生在立体显示中,如 3D 电影或 VR 头盔,因为视差(眼睛为了聚焦而会聚或分散的角度)与调节(眼睛透镜的焦点调整)不同步,可能导致眼睛疲劳、恶心,甚至长期损害视力。自 2016 年以来,Meta 公司一直在致力于 PB 透镜的研发,目标是实现更紧凑、轻便的 VR 设计。通过结合 6 片 PB 透镜和电控液晶可调偏振片,可以实现不同屈光度的调节,从而缓解 VAC 问题^[8]。我们正在开发的液晶透镜设计旨在解决这类问题,为用户带来更自然和舒适的虚拟体验。由于篇幅限制,具体细节不在此详述。

参 考 文 献

[1] Gao K, Zhang Y, John D L E, et al. Liquid crystal for

vision correction: US18125560[P]. (2024-09-26) [2023-09-08].

- [2] Li L W, Bryant D, van Heugten T, et al. Near-diffraction-limited and low-haze electro-optical tunable liquid crystal lens with floating electrodes[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8371-8381.
- [3] Li L W, Bryant D, van Heugten T, et al. Near-diffraction-limited tunable liquid crystal lens with simplified design[J]. Optical Engineering, 2013, 52(3): 035007.
- [4] Bhowmick A K, Jamali A, Bryant D, et al. Large aperture 0 D-2.5 D tunable liquid crystal (LC) lens based on segmented phase profile for tunable focus application [J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12023: 1202303.
- [5] Gao K, Cheng H H, Bhowmik A K, et al. Thin-film Pancharatnam lens with low f -number and high quality[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26086-26094.
- [6] Gao K, Cheng H H, Bhowmik A, et al. Nonmechanical zoom lens based on the Pancharatnam phase effect[J]. Applied Optics, 2016, 55(5): 1145-1150.
- [7] Gao K, Cheng H H, Bos P, et al. Compact non-mechanical zoom lens having focal lengths dependent upon left-or right-handedness of circularly polarized light: US 10634881B2[P]. 2020-04-28.
- [8] ConnectOculus 6 - Half Dome updates: FRL explores more comfortable, compact VR prototypes for work[EB/OL]. [2023-09-08]. <https://www.resetera.com/threads/oculus-connect-6-half-dome-updates-frl-explores-more-comfortable-compact-vr-prototypes-for-work.143163/>.