

文章编号:1007-2780(2026)05-0649-10

基于广义斯涅尔定律的偏置电极液晶透镜

李 钊, 张宝龙, 李 丹*, 刘永坤, 王 浩
(天津科技大学 电子信息与自动化学院, 天津 300457)

摘要:复合介电层液晶透镜通过加长电极的方式增强中心电场强度,使得边缘折射率分布偏离理想抛物线模型。通常须约束有效孔径来改善聚焦效果,从而导致透镜通光量损失。为了优化全孔径范围内的折射率分布,本文基于广义斯涅尔定律提出了一种具有偏置电极结构的液晶透镜。该透镜通过在边缘电极之间引入内环偏置电极与中心偏置电极,实现了对液晶层内梯度电场的有效调控。仿真结果表明,在低驱动电压($V_1=4\text{ V}$ 、 $V_2=2.8\text{ V}$ 、 $V_3=2\text{ V}$)下,优化后透镜的折射率分布与理想抛物线模型高度吻合。通过 Zemax 光学性能分析,该透镜在可见光波段下可以实现 85.73% 的通光效率,较复合介电层液晶透镜提升约 38.89%。同时,公差分析表明,将光刻套刻引起的电极横向偏移控制在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内,透镜仍能保持良好的光束汇聚质量,该结论为实际器件制备的工艺公差分配提供了依据。

关键词:液晶透镜;偏置电极;广义斯涅尔定律;通光效率

中图分类号:O753.2;O436 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2026-0056 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2026-0056

Liquid crystal lens with biased-electrode based on generalized Snell's law

LI Zhao, ZHANG Baolong, LI Dan*, LIU Yongkun, WANG Hao

(School of Electronics and Automation, Tianjin University of Science and Technology,
Tianjin 300457, China)

Abstract: In liquid crystal(LC) lenses with composite dielectric layers, electrode extension is used to enhance the central electric field. However, this extension often makes the peripheral refractive index of the lens deviate from the ideal parabolic model. Consequently, the effective aperture is constricted to improve focusing quality, resulting in a loss of optical throughput. To optimize the refractive index distribution across the entire aperture, a biased-electrode LC lens based on the generalized Snell's law is proposed. An inner-ring and a central biased electrode are added between the peripheral electrode. The structure effectively modulates the gradient electric field in the LC layer. Simulation results demonstrate that at $V_1=4\text{ V}$, $V_2=2.8\text{ V}$, and $V_3=2\text{ V}$, the refractive index profile of the lens closely matches the ideal parabolic model. Optical simulations in Zemax demonstrate that the proposed lens achieves a light transmission of 85.73% across the visible spectrum. This design improves the transmission by 38.89% compared to the conventional LC lens with composite dielectric layers. Meanwhile, tolerance analysis reveals that the lens maintains excellent beam focusing quality when the lateral offset of the lithography-aligned bias electrode is kept within $0.5\text{ }\mu\text{m}$. This conclusion provides a basis for process tolerance

收稿日期:2026-03-30;修订日期:2026-04-15.

*通信联系人, E-mail: lidan@tust.edu.cn

allocation in practical device fabrication.

Key words: liquid crystal lens; biased electrode; generalized Snell's law; light transmission

1 引言

随着透镜成像技术的不断发展,传统透镜因焦距固定且调节受限、体积大、集成化难度高等缺点,面临小型化的挑战。相比之下,液晶透镜以其优异的双折射特性^[1-4],可以实现平面紧凑化设计。其工作原理是通过施加电压在液晶层内产生梯度电场^[5],形成符合抛物线型的折射率分布^[6-9],进而达到聚焦效果。

2006年, Ren等^[10]采用球形电极结构,通过改变电极与液晶层之间的间距,在液晶层内产生梯度电场,从而获得抛物线型折射率分布。但该结构需要使用曲面玻璃作为基板,这导致器件体积较大且加工复杂。2008年, Ye等^[11]通过在圆孔电极与液晶层之间引入液态甘油薄膜,利用薄膜的平滑电场作用优化折射率分布曲线,该结构减小了透镜体积,实现了小型化设计。然而液态甘油薄膜的导电性质容易发生改变,进而影响透镜的性能稳定。2011年, Lin等^[12]利用一层固态的聚合物薄膜代替液态的弱导电薄膜,实现了抛物线型折射率分布,使透镜运行更加稳定。但是固态薄膜的引入易导致驱动电压偏高,不利于其在低功耗设备中的应用。2016年, Hsu等^[13]通过添加浮置电极的方式,有效降低驱动电压,拓宽了调焦范围,但是其液晶层厚度为125 μm,容易导致透镜响应缓慢。2019年, Wang等^[14]利用复合介电层来调控电场分布,降低液晶层厚度为30 μm,实现了透镜的快速响应,但因驱动电极长度过长,导致透镜边缘区域电场强度变化缓慢,边缘折射率无法遵循抛物线型分布,须约束透镜有效孔径来达到一个较好的聚焦效果。2023年, 冯文斌等^[15]提出了一种同心圆电极结构,依靠电极均匀的间距设计,仅需在两端施加两个低驱动电压,即可产生全孔径范围内的折射率分布,但是其电极间距为5 μm,容易产生横向电场串扰,从而引发光学性能的波动。2025年, 王凯等^[16]通过改变电极的倾斜角度,使梯度电场向中心延伸,避免了高密度电极间的横向干扰,实现了抛物线折射率分布,提升了透镜的性能。

为了改善透镜区域内的电场,增大透镜有效孔径,实现在全透镜范围内的抛物线型折射率分布,本文提出了一种偏置电极结构的液晶透镜。该透镜通过边缘电极、内环偏置电极和中心偏置电极在空间上的相互作用,实现对电场的有效调控,最终使折射率分布与理想抛物线模型高度吻合。这种结构不仅优化了透镜的有效孔径,还实现了低电压下的焦距调控。Zemax仿真结果表明,偏置电极结构的液晶透镜在可见光范围内可以实现更高的通光效率。此外,公差分析表明,当光刻套刻中的电极横向偏移量控制在0.5 μm以内时,透镜依然能保持良好的光束汇聚质量。

2 广义斯涅尔定律与理想透镜折射率分布

区别于传统的斯涅尔定律,2011年, Capasso等^[17]对斯涅尔定律进行扩展,提出了广义斯涅尔定律。该定律的核心是将光的折射和反射规律推广到非均匀介质、各向异性介质界面,揭示了界面相位梯度对光传播方向的调控机制^[18-20],公式如式(1)所示:

$$\sin \theta_t n_t - \sin \theta_i n_i = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\varphi}{dr}, \quad (1)$$

式中: n_t 和 n_i 为出射介质和入射介质的折射率, θ_t 和 θ_i 为光线出射和入射角度, $\frac{d\varphi}{dr}$ 为相位梯度。

根据广义斯涅尔定律公式,若使光线正入射后聚焦于一点,透镜在半径 r 处需要提供的理想附加相位分布^[16]应满足:

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{r^2 + f^2} - f), \quad (2)$$

式中: $\frac{2\pi}{\lambda}$ 为单位波矢, f 为焦距。

结合等光程原理^[21-22],液晶透镜主要是利用向列相液晶的电控双折射效应来提供上述相位延迟。对于厚度为 d 的液晶层,其中心最大折射率为 $n_{\max}$,边缘折射率为 $n(r)$,则液晶层在半径 r 处提供的相位差可表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [n_{\max} - n(r)]d. \quad (3)$$

使液晶层提供的相位差等于理想聚焦所需的附加相位,由此可以推导出理想透镜的折射率分布,如式(4)所示:

$$n(r) = n_{\max} - \frac{r^2}{2df}. \quad (4)$$

由式(4)可以得出,液晶透镜若要达到聚焦效果,折射率需要满足抛物线分布。

3 偏置电极液晶透镜结构

为了实现折射率抛物线分布,设计了偏置电极结构的液晶透镜,如图1所示。该透镜采用层

状复合结构,自上而下依次由玻璃基板、ITO接地电极、PI取向层、液晶层(厚度为 d_{LC})、PI取向层、介电层 D_1 与介电层 D_2 (厚度分别为 d_1, d_2)、ITO电极(边缘电极与偏置电极)及玻璃基板构成。通过引入双层介电结构,不仅能有效平滑电极边缘的电场突变,优化相位剖面,还能使液晶层内的电位分布更为线性。定义介电层 D_1 与下PI取向层之间界面为界面1,介电层 D_1 与介电层 D_2 之间界面为界面2,介电层 D_2 与下玻璃基板之间界面为界面3。为实现梯度电场的精细调控,驱动电极采取分布线方案:边缘电极(V_1)、内环偏置电极(V_{2n})与中心偏置电极(V_{2n+1})在透镜中心两侧呈轴对称分布, P_1, P_{2n}, P_{2n+1} 仅代表当 V_1, V_{2n}, V_{2n+1} 在界面2时的位置。

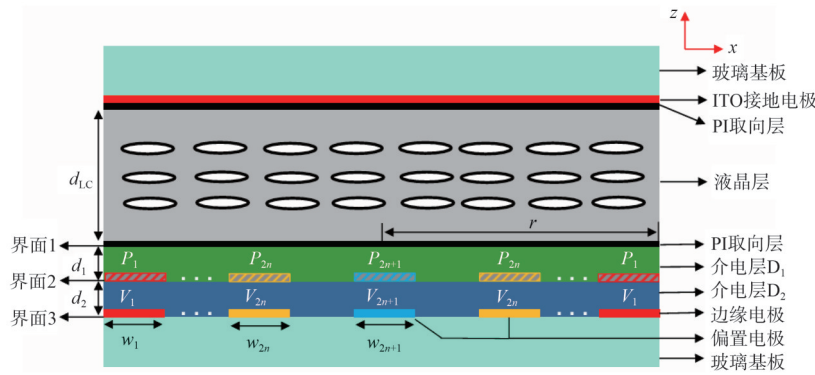


图1 偏置电极结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the biased-electrode structure

在数值模拟过程中,液晶材料选用Merck公司的E7型向列相液晶,其在室温下的各项物理参数设定如下:弹性系数 $K_{11}=16.7$ pN, $K_{22}=7.3$ pN, $K_{33}=18.1$ pN;介电常数 $\epsilon_{\parallel}=18, \epsilon_{\perp}=6.6$;折射率 $n_e=1.741, n_o=1.517, \Delta n=0.224$;旋转黏度 $\gamma=29$ mPa·s。液晶层厚度 $d_{LC}=30$ μm ;半径 $r=130$ μm ;玻璃基板厚度 300 μm ;边缘电极宽度 $w_1=10$ μm ;偏置电极和中心电极宽度 $w_{2n}=w_{2n+1}=15$ μm ;PI取向层与ITO电极的厚度均设定为 0.04 μm ;介电层1和介电层2都采用 SiO_2 透明材料,其介电常数为 3.8 ,介电层厚度 $d_1=d_2=5$ μm 。

为了对比,引入复合介电层液晶透镜模型,其透镜结构如图2所示。

复合介电层透镜同样选用E7型向列相液晶,

液晶参数与上述一致。液晶层厚度 $d'_{LC}=30$ μm ,半径 $r'=130$ μm ,玻璃基板厚度为 300 μm 。ITO驱动电极宽度 $w'_2=60$ μm ,PI取向层与ITO电极的厚度均设定为 0.04 μm ;介电层 ϵ_1 厚度 $d'_1=15$ μm ,其介电常数为 50 ;介电层 ϵ_2 厚度 $d'_2=13$ μm ,宽度 $w'_1=200$ μm ,其介电常数为 3.8 。

本文采用专业液晶模拟软件Techwiz LCD 2D (Sanayi System Company, Ltd., Korea) 进行电场与指向矢分布的数值计算。考虑到器件结构的轴对称性,将偏置电极透镜和复合介电层透镜的边界条件设置为“Neumann”条件,以准确表征中心对称结构处的电场分布;液晶分子与PI取向层接触面的锚定条件设为“Fixed”,以稳定初始排列;设定初始预倾角为 2° ,引入微小预倾角的目的是打破电场作用下分子的对称性平衡,引导液晶分子在外加电压下实现一致性

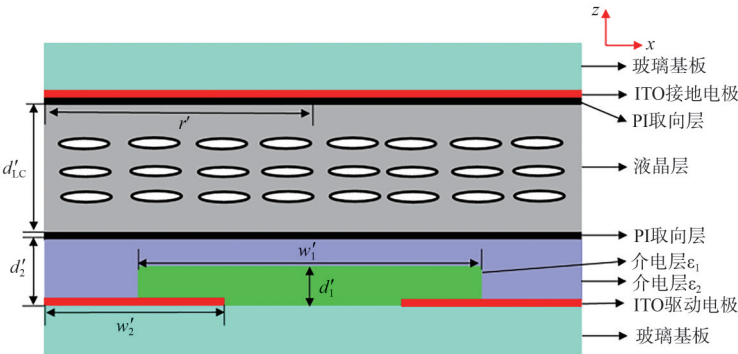


图2 复合介电层透镜结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the composite dielectric layer lens structure

偏转,从而有效避免因分子排列错乱导致缺陷线产生。

4 透镜的折射率分布

当电极位于界面1时,电极与液晶层直接接触,此时液晶分子由于缺乏介电层的平滑相位作用,电极边缘产生的强电场容易导致明显的相位突变,所以本文只对电极在界面2和界面3时的情况进行研究。

4.1 中心偏置电极

为了避免共平面电极间的相互干扰,采取非共平面设计,透镜结构如图3所示。将边缘电极 V_1 置于界面2以获得更强的边缘场强,将中心电极 V_3 置于界面3以调节中心电位,两者共同作用,进行电场的分配扩散。

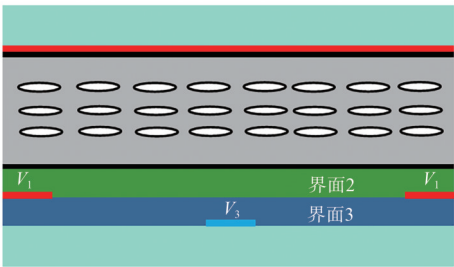


图3 中心偏置电极结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the center-biased electrode structure

通过固定中心电极 $V_3=2\text{ V}$,调节边缘电极 V_1 ,其拟合结果对比见表1。结果表明,当 V_1 升高至 8 V 时,系统的折射率分布呈最佳拟合状态,决定系数 $R^2=0.9946$,其折射率分布如图4所示。

表1 V_3 不变,不同 V_1 下的拟合结果对比

Tab. 1 Comparison of fitting results under different V_1 with constant V_3

V_1/V	V_3/V	R^2
4	2	0.923 2
5	2	0.960 6
6	2	0.979 0
7	2	0.988 6
8	2	0.994 6

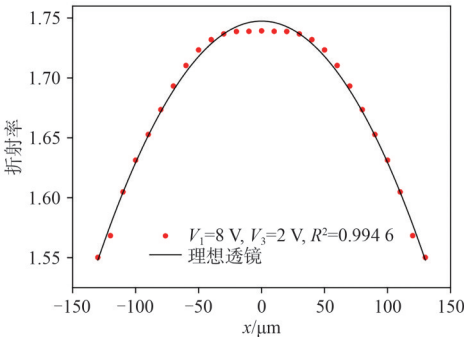


图4 $V_1=8\text{ V}$ 、 $V_3=2\text{ V}$ 时的折射率分布曲线。
Fig. 4 Refractive index profile at $V_1=8\text{ V}$ and $V_3=2\text{ V}$

然而,由于中心电极 V_3 位于介电层深处且作用范围有限,无法将电场有效精准地扩散至透镜中心。这一结构导致中心区域液晶分子没有充分偏转,表现为折射率曲线在中心部分明显偏离了理想的抛物线型。

液晶分子的指向矢偏转图如图5所示。从图5可以看出,尽管中心偏置电极对局部电场起到了一定的调制作用,但受限于其横向作用范围,透镜中心区域的液晶分子几乎未发生偏转,液晶层内的电场并未形成平滑连续的梯度变化。

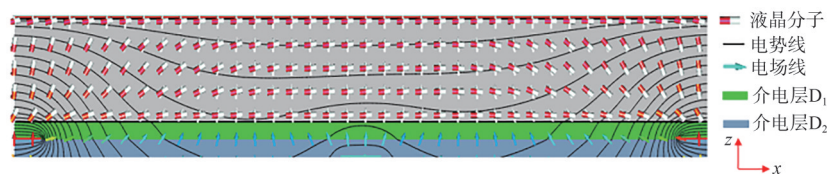


图 5 $V_1=8\text{ V}$ 、 $V_3=2\text{ V}$ 时的液晶指向矢偏转图。
Fig. 5 LC director distribution at $V_1=8\text{ V}$ and $V_3=2\text{ V}$

4.2 内环偏置电极

为了从根本上改善电场分布的不连续性,引入内环偏置电极,如图 6 所示。通过将原有的中心偏置电极替换为间距为 $140\text{ }\mu\text{m}$ 的内环偏置电极,将原本中心处独立的调控点转化为空间连续的协同调控。这种结构利用多个电位点的共同作用,强化了对中心电场的有效控制,实现了中心与边缘电场的平滑过渡与衔接。

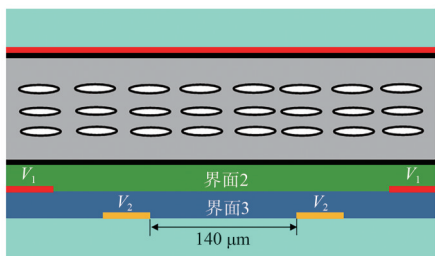


图 6 内环偏置电极结构示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the inner-ring-biased electrode structure

在固定中心区域初始偏置电压 $V_2=2.8\text{ V}$ 的前提下,进一步调节 V_1 来优化电场分布,不同电压下的拟合结果对比见表 2。

结果表明,透镜的决定系数 R^2 得到有效提升,说明该结构能够将电场扩散到透镜中心区域,驱使中心区域液晶分子进行偏转。界面 3 处内环偏置电极的引入,不仅降低了 V_1 的驱动电压,还利用双介电层的空间平滑效应,在全孔径范围内实现了与理想抛物线高度吻合的折射率分布,其 $V_1=4\text{ V}$ 时拟合状态最佳,折射率分布如图 7 所示。

表 2 V_2 不变,不同 V_1 下的拟合结果对比

Tab. 2 Comparison of fitting results under different V_1 with constant V_2

V_1/V	V_2/V	R^2
4	2.8	0.997 0
5	2.8	0.996 2
6	2.8	0.995 7
7	2.8	0.994 6

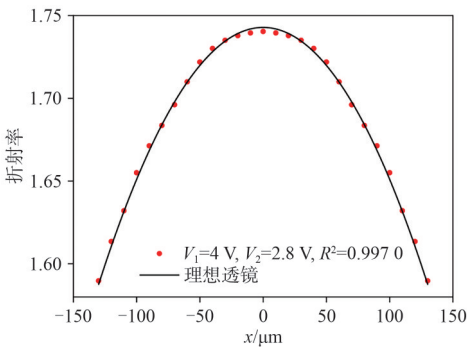


图 7 $V_1=4\text{ V}$ 、 $V_2=2.8\text{ V}$ 时的折射率分布曲线。
Fig. 7 Refractive index profile at $V_1=4\text{ V}$ and $V_2=2.8\text{ V}$

仿真结果显示,得益于 $V_2=2.8\text{ V}$ 偏置电压提供的基础电场,系统仅需施加 $V_1=4\text{ V}$ 的边缘驱动电压,即可构建出精准的梯度电场。在此低电压驱动状态下,折射率分布曲线的决定系数 R^2 高达 0.997 0。若进一步升高电压,反而会因边缘电场强度过强破坏折射率的分布。

图 8 展示了在 $V_1=4\text{ V}$ 、 $V_2=2.8\text{ V}$ 下的液晶指向矢分布情况。如图 8 所示,液晶分子在梯度电场的作用下发生了连续的倾角变化,电场强度

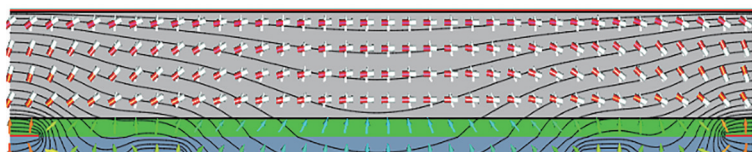


图 8 $V_1=4\text{ V}$ 、 $V_2=2.8\text{ V}$ 时的液晶指向矢偏转图。
Fig. 8 LC director distribution at $V_1=4\text{ V}$ and $V_2=2.8\text{ V}$

越强,液晶分子偏转角度越大,从而形成中心对称的梯度分布。因此,通过添加内环偏置电极可以有效平滑并扩大电场横向扩散范围,使得液晶层内的电场强度从边缘到中心逐渐减弱,从而实现了折射率抛物线分布。

5 折射率分布优化

为了进一步增强透镜中心的电场扩散与空间分布优化能力,将中心偏置电极与内环偏置电极共同施加在透镜中,其结构示意图如图 9 所示。

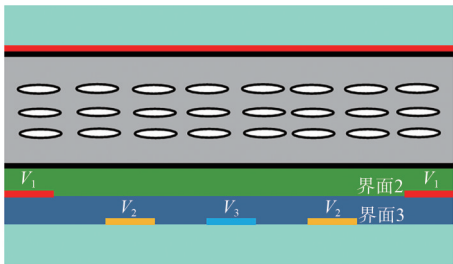


图 9 优化后的电极结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of the optimized electrode structure

在 $V_2=2.8\text{ V}$ 、 $V_3=2\text{ V}$ 不变的情况下,改变 V_1 大小来调控液晶层内的电场,其拟合结果对比见表 3。

可以看出,当 $V_1=4\text{ V}$ 时,液晶透镜的决定系数 R^2 可以达到 0.998 4,其折射率分布如图 10 所示。由图 10 可知,偏置电极液晶透镜无需额外约束孔径,便可实现全透镜范围内的抛物线型折射率分布,其在全孔径下的双折射率差 $\Delta n=0.158\ 3$,对应焦距为 1.78 mm。

然而,通过图 10 可以看出,复合介电层液晶透镜由于驱动电极较长,导致边缘折射率分布偏离理

想抛物线型,须将其有效通光孔径约束在 AB 范围(A 处为 $-110\ \mu\text{m}$,B 处为 $110\ \mu\text{m}$)内,才能截取到与抛物线拟合较好的区域,此时,复合介电层透镜在驱动电压为 4 V 时可以实现 3.99 mm 的焦距^[14]。

表 3 V_2 、 V_3 不变,不同 V_1 下的拟合结果对比

Tab.3 Comparison of fitting results under different V_1 with constant V_2 and V_3

V_1/V	V_2/V	V_3/V	R^2
4	2.8	2	0.998 4
5	2.8	2	0.997 9
6	2.8	2	0.996 7
7	2.8	2	0.995 6

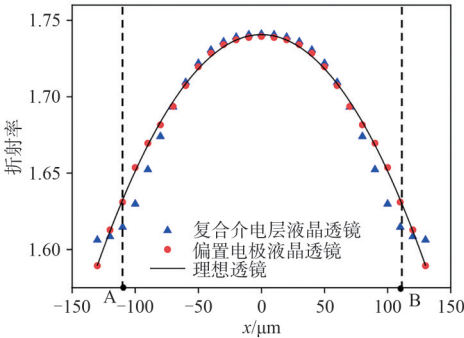


图 10 不同结构透镜的折射率分布曲线

Fig.10 Refractive index distribution curves of lenses with different structures

当施加驱动电压 $V_1=4\text{ V}$ 、 $V_2=2.8\text{ V}$ 、 $V_3=2\text{ V}$ 时,液晶分子的指向矢分布如图 11 所示。仿真结果显示,在边缘电极、内环偏置电极及中心偏置电极的共同作用下,液晶分子在全孔径范围内实现了更为理想的偏转取向。这一改进显著优化了整体电场分布的均匀性,使得电势分布曲线呈现出从边缘向中心平滑且连续的过渡形态。

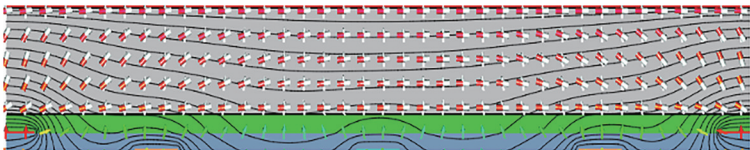


图 11 $V_1=4\text{ V}$ 、 $V_2=2.8\text{ V}$ 、 $V_3=2\text{ V}$ 时的液晶指向矢偏转图。

Fig.11 LC director distribution at $V_1=4\text{ V}$, $V_2=2.8\text{ V}$ and $V_3=2\text{ V}$.

综上, $V_1=4\text{ V}$ 、 $V_2=2.8\text{ V}$ 、 $V_3=2\text{ V}$ 时偏置电极液晶透镜的决定系数 R^2 最优为 0.998 4,其

可以实现 1.78 mm 的焦距,较复合介电层透镜的 3.99 mm 焦距相对缩短了 55.39%。

除此之外,偏置电极液晶透镜在实际制备中,由于采用的是多层非共面电极结构,光刻套刻时难免会产生一定的对准误差。在图9的透镜结构基础上模拟,将内环电极和中心电极向右横向偏移 $0.3\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \mu\text{m}$,其折射率分布如图12所示。

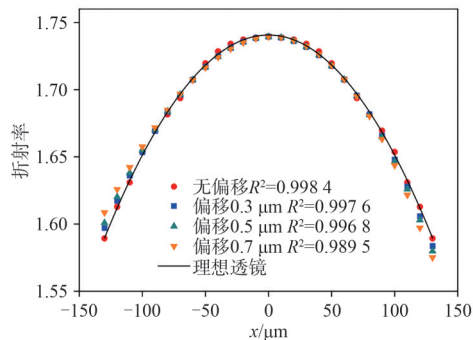


图12 偏置电极不同偏移量下的折射率分布曲线

Fig. 12 Refractive index distribution curves of biased electrodes under different lateral offsets

尽管电极发生横向偏移,透镜中心处折射率曲线却并未发生明显变化。这是因为中心区域电场强度较小,微米级的结构偏移对中心区域的液晶取向趋势影响不大。

相比之下,透镜两端的折射率在偏移后呈现不对称性分布。边缘区域的电场对电极的空间位置极为敏感。微小的物理偏移会被放大为局部电

场强度的不对称,进而导致液晶分子偏转不均。在 $0.3\ \mu\text{m}$ 和 $0.5\ \mu\text{m}$ 的偏移量下,系统决定系数 R^2 为0.997 6和0.996 8;而在 $0.7\ \mu\text{m}$ 偏移量下,系统决定系数 R^2 下降为0.989 5,两侧折射率会出现较大变化,右侧增强的电场迫使液晶分子发生更大角度的偏转,导致折射率曲线快速下降,反之左侧电场削弱,折射率下降相对缓慢。

6 光学分析

本文利用Zemax软件中的正向光线追迹算法,对偏置电极液晶透镜的聚焦特性进行了数值模拟与系统评估。并在此基础上,将其与复合介电层液晶透镜的光学性能进行对比,以验证新结构的优势。

仿真中,透镜平面基板的曲率半径设为无穷大。光源采用可见光(工作波段 $486\sim 656\ \text{nm}$),系统入瞳直径设为 $0.28\ \text{mm}$,玻璃基板厚度设为 $0.3\ \text{mm}$;液晶层作为系统光阑面,厚度设为 $30\ \mu\text{m}$ 。

为了评估液晶透镜的聚焦效果,将折射率拟合曲线参数代入到Zemax中进行光路模拟,结合几何图像分析功能进行定量表征。在仿真中,以中心视场为基准,保持初始光源的位置和尺寸恒定,并设定输入系统的初始光功率为 $1\ \text{W}$ 。设置像面探测器的像面宽度为 $0.005\ 0\ \text{mm}$,采样分辨率为 $100\ \text{像素}\times 100\ \text{像素}$ 。图13(a)是复合介电层

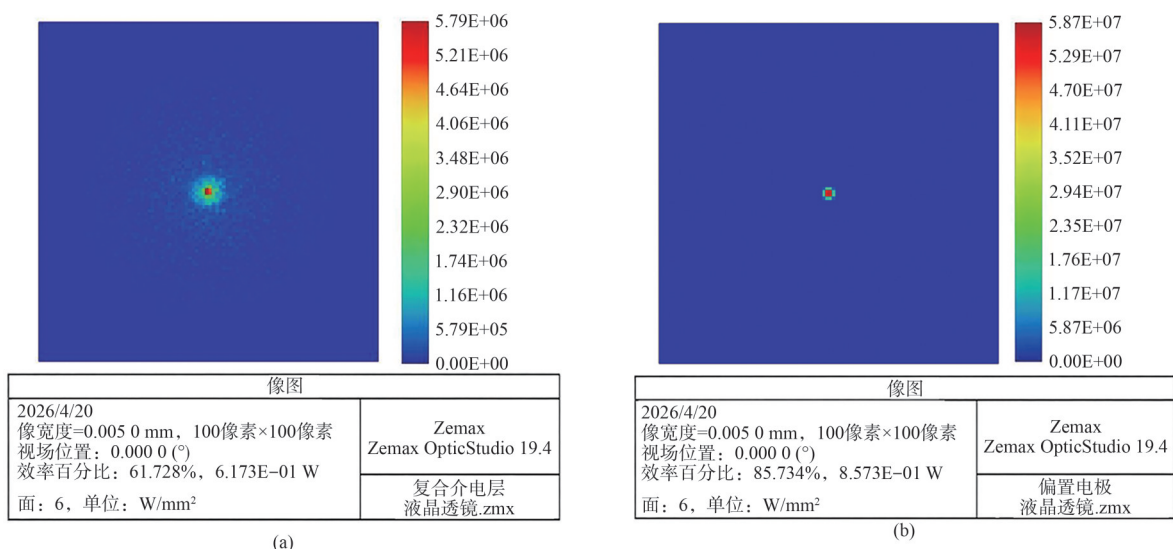


图13 不同结构透镜的几何图像分析结果。(a)复合介电层液晶透镜;(b)偏置电极液晶透镜。

Fig. 13 Geometric image analysis results of different lens structures: (a) Composite-dielectric-layer liquid crystal lens; (b) Biased-electrode liquid crystal lens.

液晶透镜有效孔径为 0.22 mm 时的仿真结果,从中可知该状态下有效通光能量为 0.62 W, 通光效率为 61.73%, 像面中心峰值辐照度为 $5.79 \times 10^6 \text{ W/mm}^2$ 。

图 13(b) 是偏置电极液晶透镜有效孔径为 0.26 mm 时的几何图像分析结果。结果表明,其有效通光能量达到 0.86 W, 通光效率为 85.73%, 较复合介电层透镜提高近 38.89%, 降低了光学系统中的光能损耗。同时,其像面中心峰值辐照度为 $5.87 \times 10^7 \text{ W/mm}^2$, 表明该结构能够实现更

高强度的能量汇聚,像平面处的光斑更为集中。

面向特征尺寸为数毫米的精密零部件微米级缺陷检测需求^[23-25], 系统采用偏置电极液晶透镜作为成像物镜, 搭配 1/2 in (1 in=2.54 cm) CMOS 探测器, 其像素尺寸为 $3.25 \mu\text{m}$, 理论奈奎斯特频率为 153.0 lp/mm。在 Zemax 仿真中, 设定透镜的主波长为 550 nm, F 数为 6.85。为评估系统在探测器极限下的实际性能, 图 14 对比分析了不同电极偏移量下, 系统在空间频率 153.0 lp/mm 处的 MTF 变化规律。

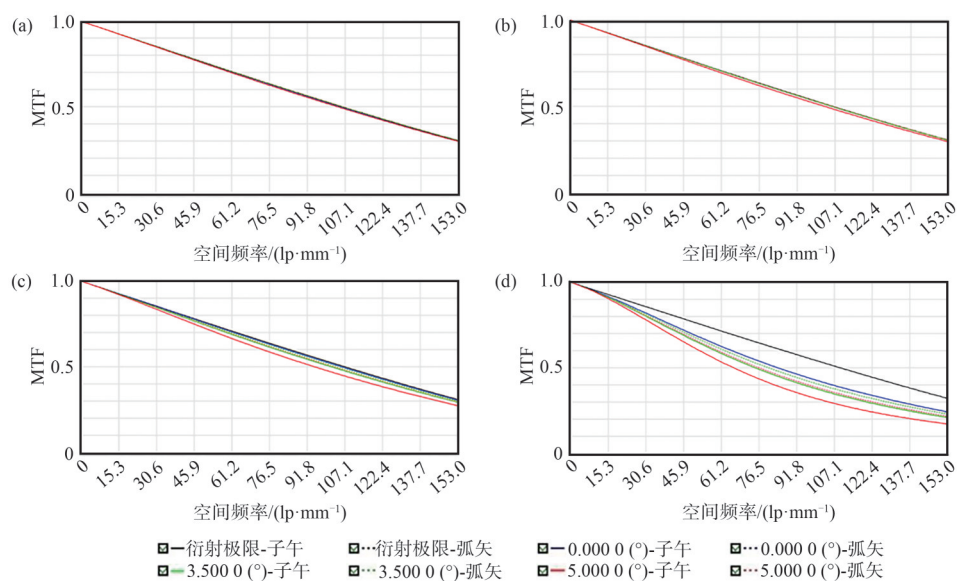


图 14 偏置电极液晶透镜不同偏移量下的 MTF 曲线。(a) 无偏移; (b) 偏移 0.3 μm ; (c) 偏移 0.5 μm ; (d) 偏移 0.7 μm 。

Fig. 14 MTF curves of the biased-electrode LC lens under different lateral offsets. (a) No offset; (b) 0.3 μm offset; (c) 0.5 μm offset; (d) 0.7 μm offset.

由图 14 可知, 当电极无偏移时, 系统在 0° 、 3.5° 和 5° 视场下均表现出极低的像差水平, 153.0 lp/mm 处的 MTF 值均优于 0.3, 子午和弧矢曲线与衍射极限高度重合。随着偏移量的增加, 当电极偏移控制在 0.5 μm 以内时, 系统在该特征频率下的 MTF 表现依然稳定, MTF 曲线虽与衍射极限存在微小偏差, 但整体一致性良好。但当偏移量达到 0.7 μm 时, MTF 曲线出现明显下降, 子午和弧矢曲线均偏离衍射极限, 系统出现明显像差, 成像对比度下降, 缺陷检测能力减弱。

综上, 将偏置电极的横向偏移量控制在 0.5 μm 以内, 可确保液晶透镜系统维持满足分辨率要求的成像质量, 从而为实际器件的制备工艺公差分配提供了设计依据。

7 结 论

本文提出了基于广义斯涅尔定律的偏置电极结构的液晶透镜。通过边缘电极、内环与中心偏置电极的共同作用, 有效解决了复合介电层液晶透镜因驱动电极过长导致的有效孔径受限问题, 提高了通光效率。Techwiz LCD 2D 仿真结果表明, 该结构在低驱动电压 ($V_1=4 \text{ V}$ 、 $V_2=2.8 \text{ V}$ 、 $V_3=2 \text{ V}$) 下, 实现了全孔径范围内与理想抛物线高度吻合的折射率分布, 决定系数 R^2 高达 0.998 4。经 Zemax 分析, 偏置电极液晶透镜的通光效率为 85.73%, 较复合介电层液晶透镜提升约 38.89%。同时, 将光刻时的电极横向偏移量控制在 0.5 μm 以内, 能够

有效保障器件的汇聚能力和成像质量。本研究不仅实现了高通光量与精准的光能量聚焦,也为低压驱动、大通光孔径可调谐光学器件的设计提供了思路。

参 考 文 献:

- [1] ZHOU X Y, DOU H, CHU F, *et al.* A blue phase liquid crystal lens with large tunable focal length range using different birefringence materials [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 920.
- [2] FENG W B, YE M. Method for increasing the utilization rate of birefringence in liquid crystal lenses [J]. *Optics Express*, 2023, 31(24): 40845-40855.
- [3] BENNIS N, JANKOWSKI T, STRZEZYSZ O, *et al.* A high birefringence liquid crystal for lenses with large aperture [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 14603.
- [4] LU J G, SUN X F, SONG Y, *et al.* 2-D/3-D switchable display by Fresnel-type LC lens [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(4): 215-219.
- [5] LI R, CHU F, DOU H, *et al.* Double-layer liquid crystal lens array with composited dielectric layer [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(2): 248-254.
- [6] TIAN L L, CHU F, DOU H, *et al.* Electrically tunable-focusing liquid crystal microlens array with simple electrode [J]. *Crystals*, 2019, 9(8): 431.
- [7] LI R, CHU F, TIAN L L, *et al.* Short focal length tunable liquid crystal lenticular lens array based on fringe field effect [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(10): 793-800.
- [8] BELYAEV V V, SOLOMATIN A S, SUAREZ D R, *et al.* Microlense liquid crystal devices on the base of cylindrical objects [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(9): 536-542.
- [9] FENG W B, LIU Z Q, LIU H, *et al.* Design of tunable liquid crystal lenses with a parabolic phase profile [J]. *Crystals*, 2022, 13(1): 8.
- [10] REN H W, WU S T. Adaptive liquid crystal lens with large focal length tunability [J]. *Optics Express*, 2006, 14(23): 11292-11298.
- [11] YE M, WANG B, SATO S. Realization of liquid crystal lens of large aperture and low driving voltages using thin layer of weakly conductive material [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4302-4308.
- [12] LIN H C, LIN Y H. An electrically tunable focusing liquid crystal lens with a built-in planar polymeric lens [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(8): 083503.
- [13] HSU C J, JHANG J J, HUANG C Y. Large aperture liquid crystal lens with an imbedded floating ring electrode [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16722-16731.
- [14] CHU F, TIAN L L, LI R, *et al.* Adaptive nematic liquid crystal lens array with resistive layer [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(4): 563-571.
- [15] 冯文斌,刘志强,徐律涵,等. 一种高性能液晶透镜的设计方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(2): 192-199.
FENG W B, LIU Z Q, XU L H, *et al.* Design method for high-performance liquid crystal lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(2): 192-199. (in Chinese)
- [16] 王凯,张宝龙,李丹,等. 基于广义斯涅尔定律的倾斜电极液晶显微物镜[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(8): 1122-1131.
WANG K, ZHANG B L, LI D, *et al.* Liquid crystal microscopic objective with inclined electrodes based on the generalized Snell's law [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(8): 1122-1131. (in Chinese)
- [17] YU N F, GENEVE P, KATS M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [18] PANG K W, ZHANG W. Polarization modulation and detection based on nonuniform phase gradient metasurfaces [J]. *Plasmonics*, 2025, 20(7): 5393-5408.
- [19] NI X J, EMANI N K, KILDISHEV A V, *et al.* Broadband light bending with plasmonic nanoantennas [J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427.
- [20] ZHENG H T, ZHANG S, XU T. Advances in tunable electromagnetic metasurfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822004.

- [21] 杨兰,王敏帅,徐恭勤,等. 低电压驱动液晶变焦透镜的设计与优化[J]. 光学学报,2017,37(9),0922003.
YANG L, WANG M S, XU G Q, *et al.* Design and optimization of low voltage driving variable focal length liquid crystal lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922003. (in Chinese)
- [22] 李晖,张新宇,张天序,等. 一种新型液晶透镜的光学成像特性研究[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(6): 428-431.
LI H, ZHANG X Y, ZHANG T X, *et al.* Optical imaging characteristics of a new liquid crystal lens [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(6): 428-431. (in Chinese)
- [23] ZHENG Y, WANG X, JIANG Z, *et al.* Adaptive multiscale microscope with fast zooming, extended working distance, and large field of view [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(1): 62-74.
- [24] WANG D, LI L Y, CHU F, *et al.* Color liquid crystal grating based color holographic 3D display system with large viewing angle [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 16.
- [25] WANG X J, VAN MECHELEN T, BHARADWAJ S, *et al.* Exploiting universal nonlocal dispersion in optically active materials for spectro-polarimetric computational imaging [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 22.

作者简介:



李 钊,男,硕士研究生,2023年于河北水利电力学院获得学士学位,主要从事液晶透镜方面的研究。E-mail: lzhao0223@163.com



李 丹,女,博士,副教授,2007年于香港大学获得博士学位,主要从事成像及非成像光学、液晶器件方面的研究。E-mail: lidan@tust.edu.cn