

文章编号:1007-2780(2018)01-0030-08

梯形凸起电极液晶变焦透镜

吕文明^{1,2}, 张红霞^{1,2*}, 宋晓敏^{1,2}, 贾大功^{1,2}, 刘铁根^{1,2}

(1.天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

2.光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:液晶变焦透镜由于其结构紧凑,低功耗,性能稳定,易于制备等特点,在图像处理,光通信,机器视觉,可切换 2D/3D 显示等方面应用广泛,但是工作电压高阻碍了其实际应用和商业化。本文提出了一种梯形凸起电极结构的液晶变焦透镜,用 TechWiz LCD 3D 软件模拟了此种结构的电场和液晶分子分布,对比分析了液晶盒厚、电极高度、电极梯角和电极宽度与间隔比对液晶透镜工作电压的影响。模拟结果显示,当液晶盒厚为 10 μm 时,液晶透镜的驱动电压可以降低到 10 V 以内;在焦距变化范围相同的情况下,梯形凸起电极液晶透镜比传统的平面电极液晶透镜的工作电压降低了 35.8%。对于梯形凸起电极结构的液晶变焦透镜,当电极高度占液晶盒厚 40%,电极梯角选为 60°,电极宽度与间隔比为 100:50 时,其工作电压最低。

关键词:变焦透镜;液晶透镜;电极结构;工作电压

中图分类号:O439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183301.0030

Tunable liquid crystal lens with raised trapezoidal electrodes

LV Wen-ming^{1,2}, ZHANG Hong-xia^{1,2*}, SONG Xiao-min^{1,2}, JIA Da-gong^{1,2}, LIU Tie-gen^{1,2}(1.College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;2.Key Lab of Opto-Electronic Information and Technical Science (Tianjin University),
Ministry of Education Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Tunable liquid crystal (LC) lenses are expected to have potential applications in image processing, optical communication, machine vision and 2D/3D switchable display due to their advantages of compact structure, low power consumption, good stability, and simple fabrication. However, the high operating voltage of tunable liquid crystal lens has been a significant technical barrier to practical applications and commercialization. In this paper, we propose a tunable liquid crystal lens with raised trapezoidal electrodes and simulate the distribution of electric field and the liquid crystal molecules using software of TechWiz LCD 3D. In addition, we compare and analyze the influence of cell gap, electrode height, trapezoidal angles and electrode width and spacing ratio on operating voltage of tunable liquid crystal lens. Simulation results show that the operating voltage of liquid crystal lens can be

收稿日期:2017-07-11;修订日期:2017-08-15.

基金项目:国家自然科学基金(No.61675153)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61675153)

* 通信联系人, E-mail:2015202048@tju.edu.cn

less than 10 V when the cell gap is 10 μm . Tunable liquid crystal lens with raised trapezoidal electrode has lower operating voltage than that with planar electrode under the condition of the same focal length range and the operating voltage is reduced by 35.8%. Furthermore, the operating voltage of tunable liquid crystal lens with raised trapezoidal electrodes can be the lowest, when the electrode height takes up 40% of the cell gap, the angle of trapezoidal electrode is 60° , electrode width and spacing ratio is 100 : 50.

Key words: tunable lens; liquid crystal lens; electrode structure; operating voltage

1 引言

近年来,随着可切换 2D/3D 显示技术的发展,人们在家中无需借助立体眼镜就可以享受 3D 效果,同时能兼容 2D 画面。这种 3D 液晶电视的原理是通过在液晶面板上加上特殊的精密液晶挡板或液晶透镜屏,将经过编码处理的 3D 视频影像对应的像素点分别投射在左右眼中,实现图像分离,人脑将左右眼接收到的图像进行处理,得到三维感受。液晶透镜对比液晶挡板最大的优点是透镜不会遮挡光线,所以亮度有了很大的改善。

液晶变焦透镜是一种可电调谐性透镜,由于其结构紧凑,低功耗,性能稳定,易于集成等特点成为光学系统设计中重要的光学器件,在可切换 2D/3D 显示技术,电子成像系统,机器视觉,以及与健康密切相关的内窥镜技术等方面有广泛的应用。液晶透镜的提出可以追溯到 1979 年,由日本的 Sato 首次成功制得^[1],经过 30 多年的研究,国内外研究学者已提出多种实现液晶变焦透镜的方法^[2-8],其中条状电极的设计,由于其易于制作,操作简单,能有效增大通光孔径,应用最为广泛^[9]。2013 年中佛罗里达大学的吴思聪研究组提出平面条状电极透镜阵列^[10],工作电压相对较高。同年釜山国立大学的 Park 等人提出了快速响应凸起 FFS(Fringe Field Switching)边缘场转换结构^[11];2016 年河北工业大学的王森^[12]等在液晶显示应用方面提出凸起的 IPS(In-Plane Switching)电极结构。

本文提出一种梯形凸起电极结构的液晶变焦透镜,凸起的电极结构增大了液晶层中电极在水平方向的作用深度,能有效降低液晶透镜的工作电压。详细讨论了电极高度,电极梯角和电极宽度与间隔比对液晶变焦透镜工作电压的影响,对液晶透镜性能的改进具有重要的参考价值。

2 原理与电极结构设计

2.1 原理简介

液晶是长棒状分子结构,可看作单轴晶体。由于其长短轴的差别,液晶在光学特性和介电特性上都呈现各向异性。液晶变焦透镜主要利用非均匀电场,使液晶分子呈现一个类似透镜的折射率梯度分布。图 1 为液晶分子折射率原理图,当光沿着不同方向入射到液晶分子时,折射率是不同的。当入射光的偏振方向平行于液晶分子的长轴方向时,折射率为 n_e (图中黄色箭头表示);当入射光的偏振方向垂直于液晶分子长轴方向时,折射率为 n_o (图中红色箭头表示),当入射光的偏振方向与液晶分子长轴的夹角为 θ 时,折射率为 $n_{\text{eff}}(\theta)$ (图中绿色箭头表示)其表达式如式(1)所示:

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{(n_o \cos \theta)^2 + (n_e \sin \theta)^2}}, \quad (1)$$

其中: n_e 表示入射光的偏振方向平行于液晶分子的长轴方向时的折射率; n_o 表示入射光的偏振方向垂直于液晶分子长轴方向时的折射率; θ 表示入射光的偏振方向与液晶分子长轴的夹角。

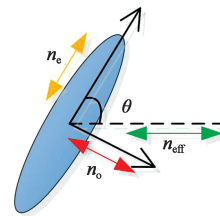


图 1 液晶分子折射率原理图^[2]

Fig.1 Refractive index of liquid crystal molecule

图 2 是液晶变焦透镜的工作原理图。当不加电压时,如图 2(a)所示,液晶分子仅受边界锚定作用和分子间相互作用力的影响,液晶透镜相当

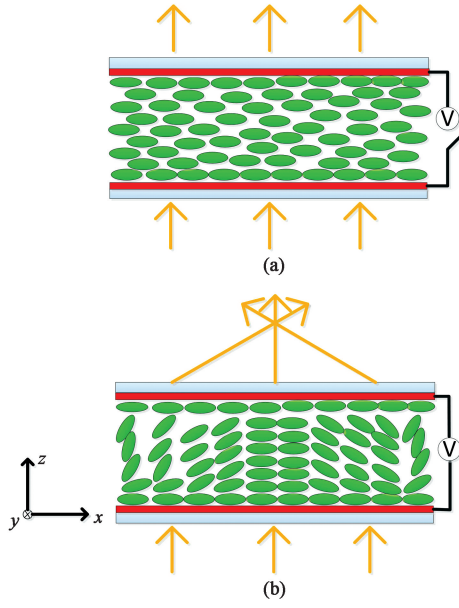


图 2 液晶透镜的工作原理。(a)不加电压时；(b)加电压后。

Fig.2 Principle of liquid crystal lens. (a) Voltage off; (b) Voltage on.

于平行平板,无聚焦作用;当施加电压后,图 2(b)所示,液晶分子在电场的作用下,克服边界锚定作用的影响,沿电场线转动,形成一个类似透镜的折射率梯度分布,改变了光经过其不同位置时的折射率,最终达到变焦的目的。如图 2(b)所示的液晶分子分布从中心到边沿折射率越来越大,液晶层相当于一个凸透镜,反之则有凹透镜的作用。这与不同厚度各向同性介质的透镜具有相同的效果。考虑到上下玻璃基底和注入的液晶构成一个共轴柱面光学系统,所以透镜的焦距计算我们采用共轴柱面光学系统成像原理,结合菲涅尔近似,透镜的焦距可以表示为:

$$f = \frac{\pi r^2}{4\lambda \Delta\varphi}, \quad (2)$$

其中: r 表示透镜的通光半径, λ 表示入射光波长, $\Delta\varphi$ 表示透镜中心和边沿的相位差。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L, \quad (3)$$

其中: ΔL 表示透镜中心处和边沿处的光程差,包含液晶层与电极层两部分。TechWiz LCD 3D 软件能够提取不同电压下不同位置处液晶分子的倾斜角,结合理论分析,通过 matlab 编程,即可计算出不同电压下的焦距。当撤销电场之后,液晶分子在边界取向的作用下,依靠弹性力弛豫到稳定

状态^[12]。

2.2 电极结构

图 3 是平面电极液晶透镜和梯形凸起电极液晶透镜的切面图。从上至下分别是上玻璃基板,PI 取向层,液晶,PI 取向层,透明电极,下玻璃基板。预倾角设置为 2° ,条状电极沿 y 轴方向。理论上取向层的摩擦方向应平行于条状电极方向,即方位角应设置为 90° ,在模拟中我们采用与 x 轴夹角 86° 的方位角(与条状电极的方向夹角 4°),也就是摩擦方向与条状电极方向的一个近平行取向,这样可以帮助液晶分子向同一方向转动,降低工作电压,提高响应速度^[13]。上下 PI 取向层采用反向平行摩擦的方式。入射光的偏振方向与下部取向层的摩擦方向平行(即与 x 轴夹角 86°),光的传播方向沿 z 轴。

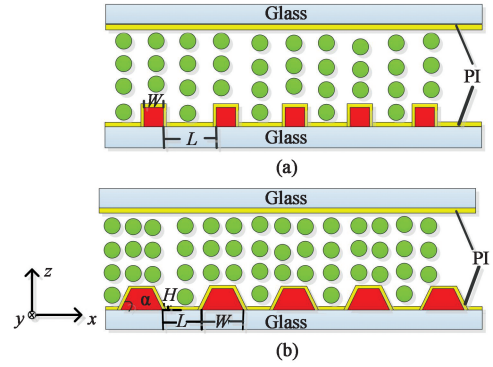


图 3 液晶透镜剖面图。(a)平面电极；(b)梯形凸起电极。

Fig.3 Cross section of liquid crystal lens. (a) Planar electrode; (b) Raised trapezoidal electrode.

3 模拟计算与结果分析

采用 Tech Wiz LCD 3D 软件对传统的平面电极液晶变焦透镜和梯形凸起电极液晶变焦透镜进行模拟计算。为了对比两种不同电极的性能,模拟中选用同种单波长的绿光 $\lambda = 550 \text{ nm}$,相同的液晶盒厚 $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$,且电极宽度和间隔尺寸相同,像素电极与公共电极的宽度均为 $W = 100 \text{ }\mu\text{m}$,电极间隙为 $L = 100 \text{ }\mu\text{m}$, (即电极宽度与间隔比 $W/L = 1:1$),通光孔径 $r = 1.2 \text{ mm}$,同一种液晶材料^[14]。为了增大焦距的变化范围^[15],我们采用高双折射,大介电各向异性的液晶材料。其参数为: $K_{11} = 20.3 \text{ pN}$, $K_{33} = 33.8 \text{ pN}$, $n_e =$

1.965 3, $n_o = 1.525 3$, $\Delta n = 0.44$, 水平方向与垂直方向的介电常数分别为: $\epsilon_{//} = 14.9$, $\epsilon_{\perp} = 3.3$, 介电各向异性 $\Delta \epsilon = 11.6$ 。

3.1 模拟比较

首先模拟梯形凸起电极液晶变焦透镜和平面电极液晶变焦透镜的焦距-电压的变化曲线。其中梯形电极的梯角 $\alpha = 80^\circ$, $H = 2 \mu\text{m}$ 。液晶盒厚均为 $10 \mu\text{m}$ 。当不加电压时,液晶分子平行于玻璃基板,每个液晶分子的折射率为 n_e ,此时液晶透镜相当于一个平面镜,即焦距为无穷。当施加电压后,液晶分子在电场的作用下转动。结合式(2)、(3)将不同电压下对应的焦距计算出来。

图4为梯形凸起电极液晶变焦透镜和平面电极液晶变焦透镜的焦距-电压的变化曲线。可以看出随着电压增大,两种电极结构的液晶透镜焦距都逐渐减小,最后趋于稳定;且梯形凸起电极液晶透镜相比于平面电极液晶透镜,在焦距达到稳定状态时,所需的工作电压明显降低,由模拟数据计算得到工作电压降低了35.8%。

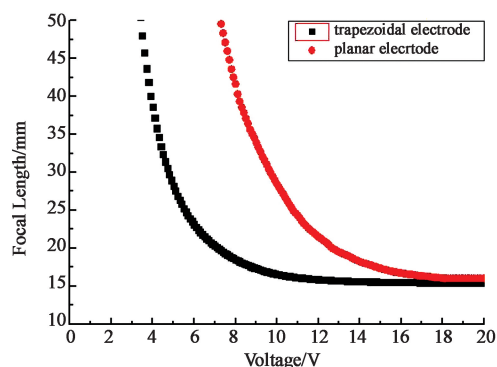


图4 梯形凸起电极与平面电极液晶透镜的焦距-电压曲线

Fig.4 Focal length vs. voltage of LC lens for planar electrode and raised trapezoidal electrode

3.2 结果分析

图5是在相同的电压下,普通平面电极液晶透镜和梯形凸起电极液晶透镜的电场和液晶分子分布的对比图。从中可以看出,在相同的电压下,相比于普通平面电极,梯形凸起电极的电势线更加密集,说明电场强度更大,能够使液晶分子充分地进行共面转动。其次传统的平面电极结构,在电极上方有明显的电场突变,容易引起液晶分子转向混乱;而梯形凸起电极的边沿结构变化较缓慢,其产生的电场梯度相对缓和,且电极梯角为液

晶分子提供了一个初始倾斜角,当施加电压后,液晶分子可以沿着同一方向转动,避免了转向混乱。这也就解释了为什么在相同的变焦范围下,梯形凸起电极液晶透镜比传统的平面电极液晶透镜,在焦距达到稳定状态时所需的工作电压更低。

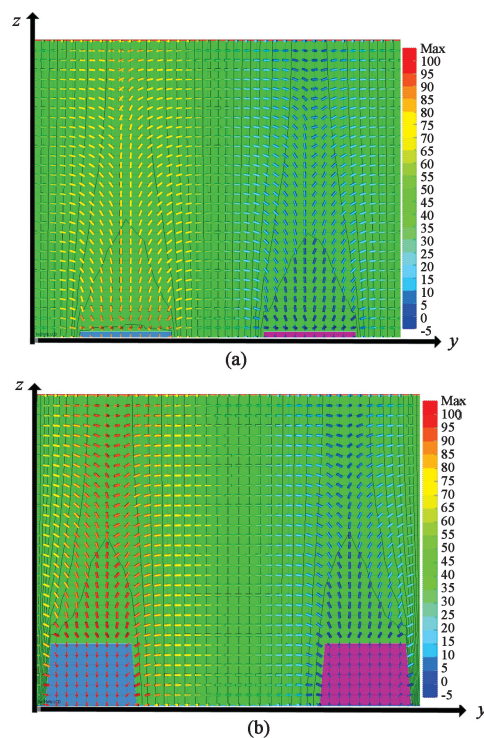


图5 电场和液晶分子分布.(a)平面电极;(b)梯形凸起电极.

Fig.5 Distribution of electric field and liquid crystal molecules. (a) Planar electrode; (b) Raised trapezoidal electrode.

4 梯形凸起电极液晶透镜研究

在确定了梯形凸起电极液晶透镜的优越性能之后,我们利用控制变量法,进一步研究梯形电极的盒厚,电极高度,电极梯角,以及电极宽度与间隔比对液晶透镜工作电压的影响。

4.1 液晶盒厚对液晶透镜工作电压的影响

首先控制电极高度 $H = 2 \mu\text{m}$, 电极梯角为 60° , 电极宽度与间距比例为 $W/L = 100 : 100$, 不考虑电极高度的影响,对不同液晶盒厚的变焦透镜进行模拟。

图6分别给出了液晶盒厚为 $10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ 时液晶透镜的焦距-电压曲线,模拟结果显示:随着液晶盒厚的减小,当焦距达到稳定状态时

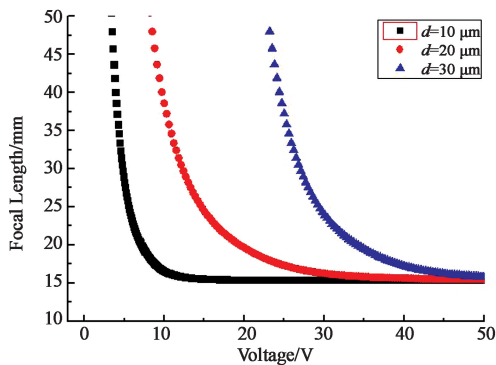


图 6 不同盒厚液晶透镜的焦距-电压曲线

Fig.6 Focal length vs. voltage of LC lens for different cell gap

所需的工作电压也逐渐减小。这是因为在相同的工作电压下,随着液晶盒厚减小,液晶层内电场强度增大。有利于液晶分子更高效地进行共面转换。而且当液晶盒厚为 $10\ \mu\text{m}$ 时,液晶透镜的驱动电压可以降低到 $10\ \text{V}$ 以内。这使得液晶透镜有望应用于内窥镜等精密医学设备中。

4.2 电极高度对液晶透镜工作电压的影响

我们控制液晶盒厚为 $d = 10\ \mu\text{m}$, 电极梯角为 60° , 电极宽度与间距比例相同 $W/L = 100 : 100$, 不考虑电极分布的影响, 对不同电极高度的液晶透镜进行模拟。

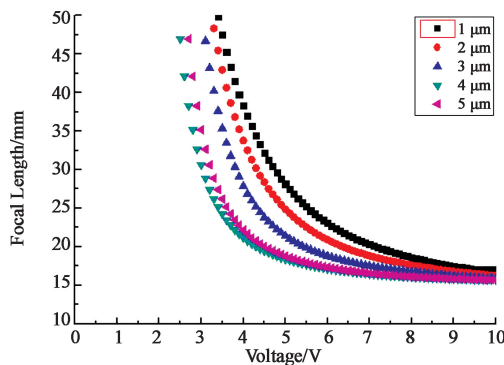


图 7 不同电极高度液晶透镜的焦距-电压曲线

Fig.7 Focal length vs. voltage of LC lens for different electrode thickness

图 7 分别给出了电极高度为 $1\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$, $4\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ 的液晶透镜的焦距-电压曲线, 模拟结果显示: 当电极高度小于 $4\ \mu\text{m}$ 时, 随着电极高度的增加, 当焦距达到稳定状态时所需的工作电压逐渐降低。这是因为在相同的工作电压下, 随着电极高度的增加, 液晶层中水平方向电

极的作用深度增大^[16], 电场强度增大, 这有利于液晶分子更高效地进行共面转换。当电极高度大于 $4\ \mu\text{m}$ 时, 随着电极高度的增加, 当焦距达到稳定状态时所需的工作电压逐渐增大。这是因为随着电极高度的增加, 液晶盒内的液晶分子沿 Z 轴所占的比重逐渐减小, 对透镜的汇聚作用贡献变小。综上, 当电极高度为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 即电极高度占液晶盒厚 40% 时, 焦距达到稳定状态所需要的工作电压最低。

4.3 电极梯角对液晶透镜工作电压的影响

接下来控制液晶盒厚为 $d = 10\ \mu\text{m}$, 电极高度 $H = 4\ \mu\text{m}$, 电极宽度与间距比例为 $W/L = 100 : 100$, 不考虑电极高度的影响, 对不同电极梯角的液晶透镜进行模拟。

图 8 分别给出了电极梯角为 40° , 50° , 60° , 70° , 80° 的液晶透镜的焦距-电压曲线, 模拟结果显示: 在相同的电极高度和电极宽度与间距比下, 当梯角在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 时, 随着梯角的增大, 焦距达到稳定状态时所需的电压逐渐减小; 当梯角在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间时, 随着梯角的增大, 焦距达到稳定状态时所需的电压逐渐增大; 这是因为液晶分子的转动受两个因素的影响: 一是电极的作用范围, 另一个是边界锚定作用。电极的作用范围越大, 能使液晶分子充分转动, 焦距达到稳定状态所需的工作电压越小; 边界锚定作用越大, 对液晶分子的束缚越大, 焦距达到稳定状态所需的工作电压越大。在梯形电极的下底边长固定时, 梯角越大, 电极的体积越大, 作用范围也就越大; 边界锚定能也越大。当梯角小于 60° 时, 电极的作用力起主导作用, 所以随着梯角增大, 当焦距达到稳定状态

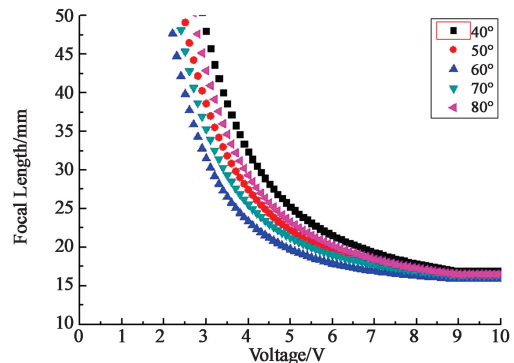


图 8 不同电极梯角液晶透镜的焦距-电压曲线

Fig.8 Focal length vs. voltage of LC lens for different trapezoidal angle

时所需的工作电压降低。当梯角大于 60° 时,边界的锚定能起主导作用,所以随着梯角的增大,要达到相同的变焦范围,需要相对较大的工作电压来克服锚定作用来使液晶分子转动。综上,当梯角为 60° 时,焦距达到稳定状态时所需的电压最小。

4.4 电极宽度与间距比例对液晶透镜工作电压的影响

最后我们控制液晶盒厚为 $d = 10 \mu\text{m}$, 电极高度 $H = 4 \mu\text{m}$, 电极梯角为 60° , 不考虑电极高度的影响, 对不同电极宽度与间距比例的液晶透镜进行模拟。

图 9 为不同电极宽度与间隔比例液晶透镜的焦距-电压曲线。模拟结果显示: 首先当电极宽度与间距比值都为 $W/L = 1:1$ 时, 观察电极宽度与间距比为 $100:100, 50:50, 25:25$ 的电极设计, 对工作电压的影响不大。接着对比电极间距为 $100:300, 100:200, 100:100, 100:50$ 的焦距-电压曲线, 从图中可以看出: 随着电极宽度与间距比值变大, 当焦距达到稳定状态时所需的工作电压逐渐降低。这是因为电极宽度与间距的比值越大, 在相同的工作电压下, 电场强度越大, 对液晶分子水平方向上的作用范围越大, 能够更有效地使液晶分子进行共面转向。综上, 当电极宽度与间距比为 $100:50$ 时, 焦距达到稳定状态时所需的电压最小。

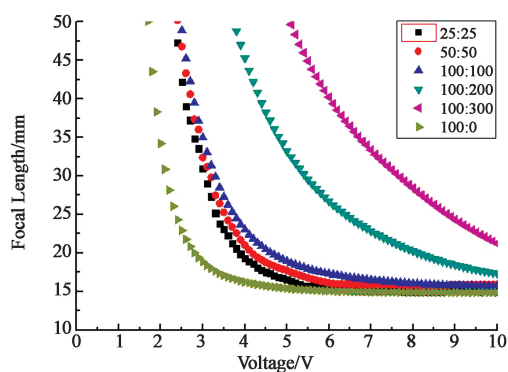


图 9 不同电极宽度与间隔比液晶透镜的焦距-电压曲线

Fig. 9 Focal length vs. voltage of LC lens for different electrode width and spacing ratio

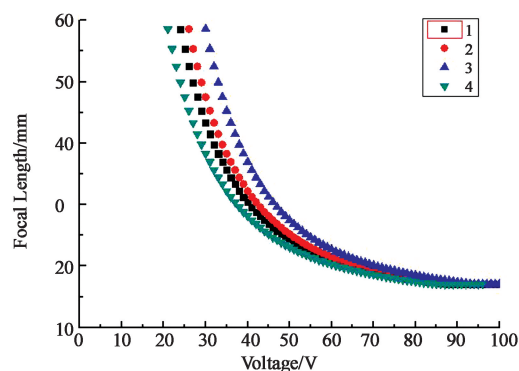
4.5 电极高度对液晶透镜焦距的影响

考虑到电极高度可能对透镜聚焦形成干扰, 为了讨论电极厚度对透镜聚焦能力的影响, 模拟

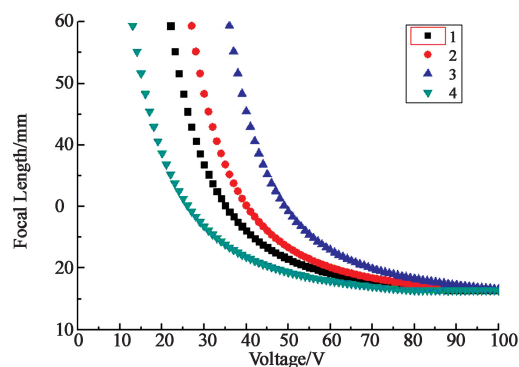
了电极盒厚 $d = 50 \mu\text{m}$ 时, 电极厚度为 $5 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$ 时透镜焦距随电压的变化情况。其中液晶参数与前文相同, 此处不再赘述, 像素电极与公共电极的宽度均为 $W = 100 \mu\text{m}$, 电极间隙为 $L = 100 \mu\text{m}$, $n_{\text{电极}} = 1.96$ 。

由于透镜焦距计分为液晶层与电极层两段考虑, 所以电极分布对透镜焦距有一定影响, 共分为 4 种情况讨论: (1) 透镜的中心和边沿都没有电极; (2) 透镜的中心和边沿都有电极时; (3) 透镜的中心处没有电极, 边沿处有电极; (4) 透镜的中心处有电极, 边沿处没有电极。

图 10 为不同电极分布的液晶透镜的焦距-电压曲线, 图(a)电极高度 $H = 5 \mu\text{m}$, 图(b)电极高度 $H = 30 \mu\text{m}$ 。



(a) $H = 5 \mu\text{m}$



(b) $H = 30 \mu\text{m}$

图 10 不同电极分布液晶透镜的焦距-电压曲线

Fig.10 Focal length vs. voltage of LC lens for different electrode distribution

通过对比(a),(b)两图可以看出, 在电极分布相同的情况下, 电极高度对透镜的汇聚能力有影响, 且高度越大影响越大。在电极高度和施加电压相同的时, 与情况 1 相比, 情况 2 的焦距更大,

这是因为情况 2, 在电极层中, 中心和边沿的光程差相抵消, 只考虑 d - H 液晶层的光程差, 光程差减小, 相同电压下的焦距值偏大。情况 3 透镜的焦距最大, 这是因为边沿电极层的存在使得中心和边沿的光程差减小, 相同电压下的焦距值最大。情况 4 透镜的焦距最小, 这是因为中心电极的存在使得中心和边沿的光程差增大, 相同电压下的焦距值最小。

5 结 论

综上所述, 本文提出了一种梯形凸起电极液

晶变焦透镜, 借助 TechWiz LCD 3D 软件, 对比了传统的平面电极液晶变焦透镜与梯形凸起电极液晶变焦透镜的性能, 详细讨论了液晶盒厚, 梯形电极的高度, 电极梯角和电极宽度与间隔比对液晶透镜工作电压的影响。结果表明当液晶盒厚为 $10\ \mu\text{m}$ 时, 液晶透镜的驱动电压可以降低到 $10\ \text{V}$ 以内; 在变焦范围相同的情况下, 梯形凸起电极液晶透镜比传统的平面电极液晶透镜的驱动电压降低了 35.8% ; 对于梯形凸起电极液晶透镜, 当电极高度占液晶盒厚 40% , 电极梯角选为 60° , 电极宽度与间隔比为 $100:50$ 时, 当焦距达到稳定状态时所需的工作电压最低。

参 考 文 献:

- [1] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [2] LIN Y H, REN H W, FAN-CHIANG K H, *et al.* Tunable-focus cylindrical liquid crystal lenses [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(1A): 243-244.
- [3] XU S, LI Y, LIU Y F, *et al.* Fast-response liquid crystal microlens [J]. *Micromachines*, 2014, 5(2): 300-324.
- [4] LIN H C, LIN Y H. An electrically tunable-focusing liquid crystal lens with a low voltage and simple electrodes [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2045-2052.
- [5] REN H W, FOX D W, WU B, *et al.* Liquid crystal lens with large focal length tunability and low operating voltage [J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11328-11335.
- [6] REN H W, WU S T. Variable-focus liquid lens [J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5931-5936.
- [7] WANG X, DAI H T, XU K S. Tunable reflective lens array based on liquid crystal on silicon [J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 352-357.
- [8] NOSE T, YAMADA Y, SATO S. Improvement of optical properties and beam steering functions in a liquid crystal Microlens with an extra controlling electrode by a planar structure [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(11): 6383-6387.
- [9] LIN Y H, REN H W, FAN-CHIANG K H, *et al.* Tunable-focus cylindrical liquid crystal lenses [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(1A): 243-244.
- [10] REN H W, XU S, LIU Y F, *et al.* Switchable focus using a polymeric lenticular microlens array and a polarization rotator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7916-7925.
- [11] PARK S I, CHOI S W, KIM K H, *et al.* Fast fringe-field-switching liquid crystal cell with a protrusion structure [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(2): 200-204.
- [12] 王森, 孙玉宝. 低驱动电压和快速响应的共面转换液晶显示器 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(7): 649-654.
WANG S, SUN Y B. Low driving voltage and fast-response in-plane switching liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(7): 649-654. (in Chinese)
- [13] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2015.
- [14] LI Y F, SUN Y B, ZHAO Y L. A fast-response in-plane switching liquid crystal display with a protrusion structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(1): 012303.

-
- [15] GAUZA S, WANG H Y, WEN C H, *et al.* High birefringence isothiocyanato tolane liquid crystals[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(6A): 3463-3466.
- [16] WU S T, YANG D K. *Reflective Liquid Crystal Display* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.

作者简介:吕文明(1990—),女,山东泰安人,硕士研究生,从事液体变焦透镜研究。E-mail:2015202048@tju.edu.cn

张红霞(1977—),女,江苏扬州人,博士,教授,2005 年于天津大学获得工学博士学位,主要从事光电检测,液晶,光纤传感方面的研究。E-mail: hxzhang@tju.edu.cn