

低压驱动液晶透镜设计的研究*

唐先柱^{1)2)†} 钟德镇²⁾ 简廷宪²⁾ 陆建钢¹⁾ 谢汉萍¹⁾³⁾

1) (上海交通大学, TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室, 上海 200240)

2) (昆山龙腾光电有限公司, 昆山 215301)

3) (台湾交通大学, 新竹)

(2013年3月28日收到; 2013年5月17日收到修改稿)

探讨了低压液晶透镜设计的规律. 由五种液晶材料的 Δn_{eff} 随驱动电压变化的规律可知: 如果液晶材料归一化 Δn_{eff} 控制在 95% 以下, 驱动电压可控制在 10 V 以下; 在能满足透镜性能和制备工艺允许的前提下, 设计液晶透镜时选取的归一化 Δn_{eff} 越小, 获得的液晶透镜驱动电压越低. 该规律可为高性能液晶透镜的设计与制备提供指导.

关键词: 液晶透镜, 设计, 低压驱动, 归一化 Δn_{eff}

PACS: 42.79.Kr, 61.30.Gd, 78.15.+e, 83.80.Xz

DOI: 10.7498/aps.62.164212

1 引言

2009 年一部电影《阿凡达》的放映掀起了三维立体显示^[1] (three dimensional display, 3D) 的研究热潮. 以 2009 年美国国际消费电子展 (CES) 上各大品牌的 3D 电视样机不约而同地集体亮相标志着第三次 3D 技术发展高峰的到来. 液晶透镜由于具有可调谐性, 用于 2D/3D 可切换裸眼 3D 显示具有很多优点, 因此引起了研究人员极大的兴趣. 特别是在互联网比较发达的当今, 人们浏览网页时有的区域显示文字, 有的区域显示图像, 当人们在体验图像 3D 视觉的同时, 分辨率的下降会造成文字模糊, 这就对当前平板显示器作为人机沟通的界面提出更高的要求. 采用大幅度提高面板分辨率的办法, 给当前的制备工艺带来挑战. 另一个解决办法是局部 2D/3D 可切换式显示, 可实现文字 2D 显示, 图像 3D 显示, 同时也可以作为 2D 显示器实现 2D 平板显示器的功能. 对于裸眼 2D/3D 可切换式显示, 在平板显示器按照一定的条件附加上液晶挡板或液晶透镜即可实现. 液晶挡板用于裸眼 3D 显示亮度大幅下降, 而液晶透镜用于裸眼可实现高亮

显示从而备受青睐.

液晶透镜的研究始于 20 世纪 70 年代, 由几个研究小组提出了^[2,3] 用向列相液晶^[4-8] (nematic LC) 研制可调液晶透镜, 最早公开报道成功制得该类器件的时间为 1979 年, 分别由 Berreman 和 Sato 实现. 大多数技术研发围绕电极和电压之间的技术关联性来开展^[9-11]. 而对于一款液晶透镜的液晶材料, 如何设计使得液晶透镜的驱动电压较低鲜有报导. 本文对液晶透镜从液晶材料层面对低压驱动设计进行了研究.

2 理论仿真模拟

2.1 液晶透镜的结构与工作原理

文中涉及的是液晶层式透镜, 主要结构如图 1 所示, 图 1 为液晶透镜的截面示意图. 上面一层玻璃基板和下面一层玻璃基板, 中间夹着液晶层, 在上面的玻璃基板下面和下玻璃基板的上面都有一层带一定图案 (此处采用上电极为整面电极, 下电极为电极条) 的透明电极, 透明电极上是印刷取向作用的取向层 (图中略去), 摩擦方向垂直于纸面

* 江苏省科技支撑计划 (批准号: BE2012862)、国家自然科学基金 (批准号: 60906039) 和上海自然科学基金 (批准号: 09ZR1414800) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: txzciomp@163.com

且上下基板摩擦方向相反,即摩擦方向平行于液晶透镜电极条.偏振方向与光的传播方向如图所示,由于液晶透镜具有偏振依赖性,要求液晶分子的光轴与偏振平面共面,预倾角的大小与取向层有关.

其工作原理:通过施加电场改变液晶分子的排列方向,使对应的非寻常光的折射率 n_e 连续变化到寻常光的折射率 n_o ,通过电压控制盒内液晶分子

的取向,改变折射率,相应地也就调节了焦距,达到实现透镜功能的目的.

图 1(a) 和 (b) 分别表示不施加电压时,器件内的液晶分子均匀排列,此时相当于平行平板,无透镜功能;当给器件施加控制电压时,器件内部液晶分子将根据电压控制实现不同程度的偏转,实现透镜的功能.

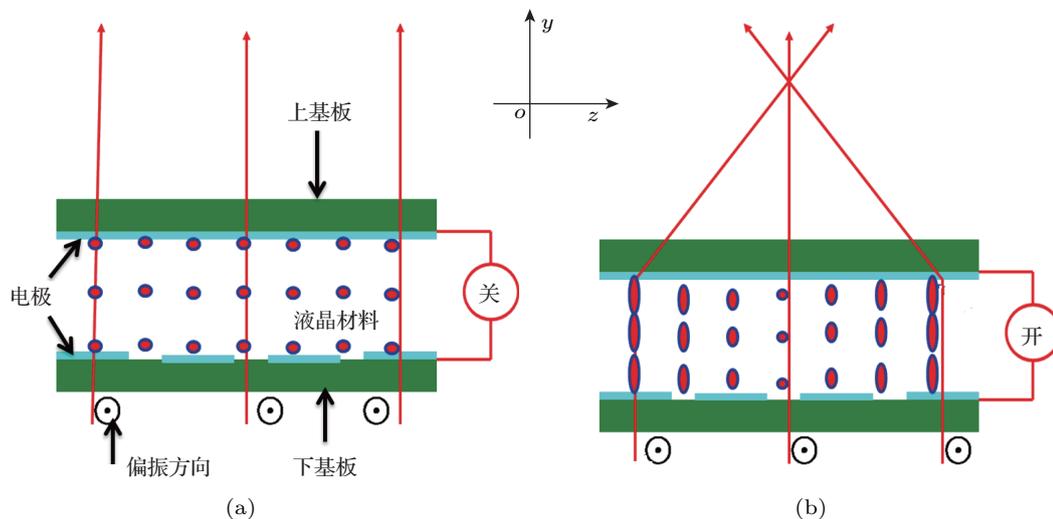


图 1 液晶透镜结构及工作原理示意图

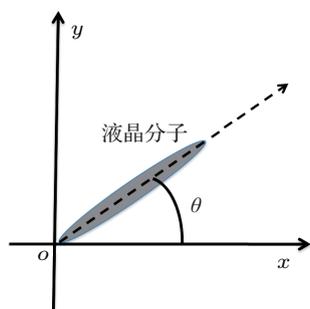


图 2 偏振平面内液晶分子示意图

对于图 1 中的液晶透镜,当入射到液晶透镜的光的偏振方向与液晶分子的光轴在同一平面内时,即光的传播方向沿 y 轴方向,定义 θ 为在某一位置液晶透镜液晶层厚度方向上液晶分子的平均倾斜角,如图 2 所示,向列相液晶可近似看作单轴晶体,已经被应用大片实际生产当中,此时非寻常光折射率 $n_{\text{eff}}(\theta)$ 满足 (1) 式:

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

其中 $n_o \leq n_{\text{eff}}(\theta) \leq n_e$, 令 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pretilt}}) - n_{\text{eff}}(\theta)$, $n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pretilt}})$ 表示平均倾斜角 θ 等于预倾角

θ_{pretilt} 时的非寻常光折射率 n_{eff} .

2.2 DIMOS.2D 仿真架构的建立

为研究 Δn_{eff} 随驱动电压的变化规律,运用商业软件 DIMOS.2D (autronic-melchers GMBH) 将五种液晶材料在同一器件架构中进行理论模拟,其模型架构按照在前面所述的液晶透镜的架构进行建立,但是此处器件与图 1 中不同的是,上下两基板的内表面为整面铟锡氧化物 (ITO),中间夹的一层液晶液晶层的厚度设置为 $13.5 \mu\text{m}$,预倾角设置为 2° ,方位角设置为 90° ,上基板 ITO 上施加的电压始终为 0 V ,下基板 ITO 施加电压的范围为 $0-30 \text{ V}$.随着下基板 ITO 施加电压的增大,液晶分子的偏转(站立)程度不同,对应的非寻常光的折射率也不相同,如图 3 和图 4 所示.图 3 给出的是下基板 ITO 施加 0 V 电压时,液晶分子的偏转分布情况,此时倾斜角等于预倾角;图 4 给出的是下基板 ITO 施加 30 V 电压时液晶分子偏转分布情况,此时预倾角较大,接近直立状态.

表 1 有五种液晶材料, a, b, c, d, e 液晶材料分别由不同的液晶材料厂商提供,其 25°C 折射率参

数见表 1, 这里仅给出液晶材料的部分参数.

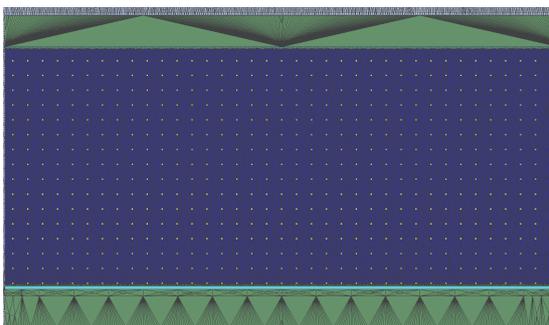


图 3 下基板电压为 0 V 时 DIMOS.2D 中的仿真架构截面

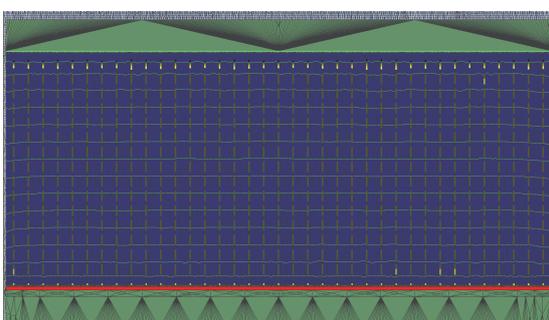


图 4 下基板电压为 30 V 时 DIMOS.2D 中的仿真架构截面

表 1 液晶材料折射率参数表

编号	n_o	n_e
a	1.515	1.781
b	1.521	1.822
c	1.5114	1.7597
d	1.513	1.779
e	1.511	1.776

2.3 DIMOS.2D 仿真结果的分析与液晶透镜的设计

由 DIMOS.2D 软件可以提取出不同位置的液晶分子倾斜角, 然后计算平均值得到平均 θ , 不同的驱动电压下对应的倾斜角不同, 然后由 (1) 式计算出液晶分子 $n_{\text{eff}}(\theta)$, 定义单位电压引起的 Δn_{eff} 变化量, 称为 Δn_{eff} 变化灵敏度, 归一化的 Δn_{eff} 等于 Δn_{eff} 除以对应材料的 Δn ($\Delta n = n_e - n_o$).

图 5 所示为 Δn_{eff} 与驱动电压之间的关系, 可以看出, Δn_{eff} 的变化在小于 5 V 时, Δn_{eff} 变化的灵敏度较高, 而大于 10 V 时, Δn_{eff} 变化的灵敏度较低. 图 6 给出了归一化 Δn_{eff} 与驱动电压之间的关系. 可

以看出, 归一化 Δn_{eff} 在 10 V 时, 基本达到 95%, 这是由于取向层表面锚定作用达到 100% 需要很大的驱动电压. 图 7 给出了平均倾斜角与对应的驱动电压之间的关系, 根据驱动 10 V 时的结果可以看出, 平均倾斜角在 70° 以下时归一化 Δn_{eff} 基本可达到 95%.

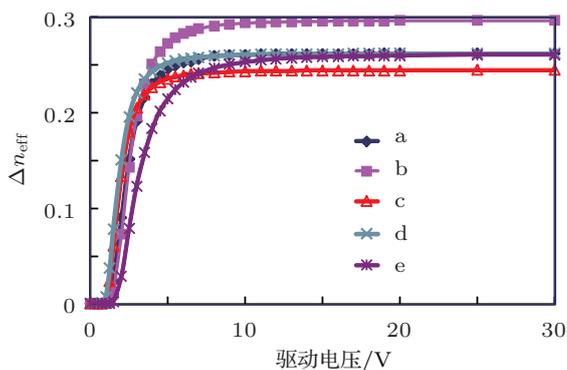


图 5 不同材料 Δn_{eff} 与驱动电压之间的关系

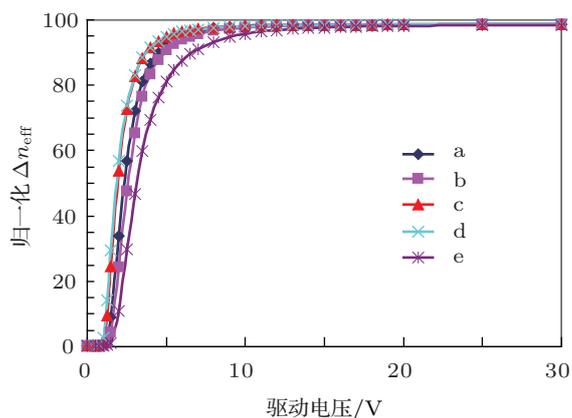


图 6 不同材料归一化 Δn_{eff} 与驱动电压之间的关系

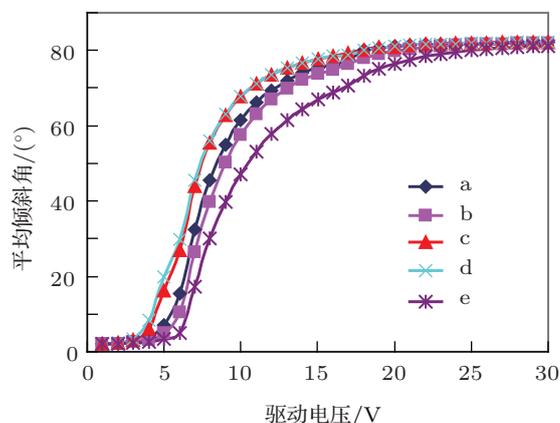


图 7 平均倾斜角与对应的驱动电压之间的关系

设液晶透镜外围媒质的折射率为 n_{media} , 如为空气介质, $n_{\text{media}} = 1$, d 为液晶透镜的盒间隙 (cell gap), 半径为 r , n_{eff1} 为透镜边缘的非寻常光折射率, n_{eff2} 为透镜中心的非寻常光折射率, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff2}} - n_{\text{eff1}}$, 液晶透镜的焦距计算公式一般可表达为

$$f = \frac{(n_{\text{media}} \cdot r)^2 - (\Delta n_{\text{eff}} \cdot d)^2}{2\Delta n_{\text{eff}} \cdot d \cdot n_{\text{media}}} \approx \frac{n_{\text{media}} \cdot r^2}{2\Delta n_{\text{eff}} \times d}. \quad (2)$$

由 (2) 式可以看出: 焦距的大小设计与液晶透镜的口径、器件的盒厚以及 Δn_{eff} 有密切关系. 设计一款液晶透镜, 首先确定要设计的焦距, 然后确定口径大小, 选择合适的 Δn_{eff} , 计算透镜的盒间隙.

如果选取 $\Delta n_{\text{eff}} = \Delta n$, 要使得液晶透镜达到设计的效果, 需要很大的电压才能使得液晶接近完全站立, 这样会使液晶透镜电极中最大电压变得很高. 一方面高驱动电压给器件驱动、集成电路带来挑战, 另一方面, 相邻电极间的电压差变大, 产生的较高的横向电场会使液晶透镜的液晶分子的光轴偏离偏振平面严重影响透镜的光学性能.

因此要获得易制备、性能高的液晶透镜器件, 在考量其他参数设计的同时也需要考虑 Δn_{eff} 的选取. 本文中如果液晶材料归一化 Δn_{eff} 控制在 95% 以下, 驱动电压可控制在 10 V 以下, 根据需要选取更小的归一化 Δn_{eff} , 可使设计的液晶透镜驱动电压更低.

3 液晶透镜设计的实验研究

3.1 液晶透镜的制备

该理论在基于液晶透镜的 2D/3D 可切换式裸眼 3D 显示技术研发实验中得到验证. 液晶透镜的制作架构和制作过程如下: 液晶透镜由上下两片透明的玻璃基板组成, 玻璃的内表面镀一层带有一定图案 (此例采用上电极为整面电极, 下电极为电极条) 的透明的 ITO, 取向层 (PI) 印刷在 ITO 的表面, 然后在一定的温度下预固化, 再在另一温度下固化, PI 固化后的基板再做摩擦取向处理, 然后采用 ODF 工艺或者真空灌注等工艺灌入液晶, 此处采用的液晶材料是 e, 隔垫物按照 100—120 粒/mm² 的密度分布在两基板之间, 维持均匀的盒厚, 此处

的隔垫物采用的是 Sekisui 的 SSP-215-AC4 系列, 直径为 15 μm , 组立后维持的盒间隙为 13.5 μm , $f = 1.5 \text{ mm}$, 柱透镜周期 $l = 140 \mu\text{m}$, 电极宽度和电极间距分别为 5 和 5 μm , $n_{\text{eff1}} = 1.53$, $n_{\text{eff2}} = 1.7756$, $\Delta n_{\text{eff}}/\Delta n = 0.2456/0.265 = 92.6\%$.

3.2 液晶透镜仿真与实验测试

液晶透镜的 DIMOS.2D 仿真架构如图 8 所示, 虚线框内为一个液晶透镜周期, 从左到右为电极 1—14, 对应的电压为 V_1 — V_{14} , 对应的理想透镜的折射率分布和实际设计液晶透镜的折射率分布如图 9(a) 所示, 由图 9(a) 结果可以看出, 实际设计液晶透镜可以和理想透镜的折射率分布达到一致, 其对应的电极电压值分布见表 2.

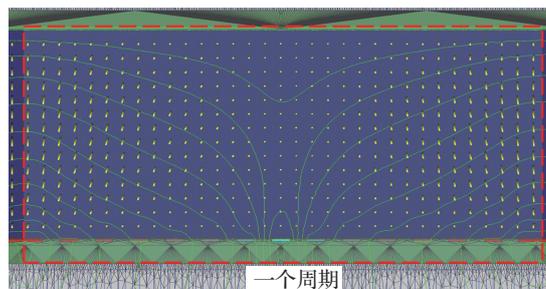


图 8 液晶透镜的 DIMOS.2D 仿真架构

表 2 液晶透镜对应电极的电压分布

电极编号	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
电极施加电压/V	3	2.12	1.77	1.53	1.35	1.2	0.95
电极编号	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}
电极施加电压/V	0	0.95	1.2	1.35	1.53	1.77	2.12

当 Δn_{eff} 选取不合适甚至接近等于 Δn 时, 对应的理想透镜的折射率分布和实际设计液晶透镜的折射率分布会出现图 9(b) 所示的情况, 由图 6 可知, 达到 Δn , 需要较高的驱动电压, Δn_{eff} 越接近 Δn , 实际设计的液晶透镜与理想液晶透镜折射率符合程度越差, 其对应的电极电压值分布见表 3.

表 3 液晶透镜对应电极的电压分布

电极编号	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
电极施加电压/V	8.9	5.4	3.38	2.83	2.45	2.2	1.9
电极编号	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}
电极施加电压/V	0	1.9	2.2	2.45	2.83	3.38	5.4

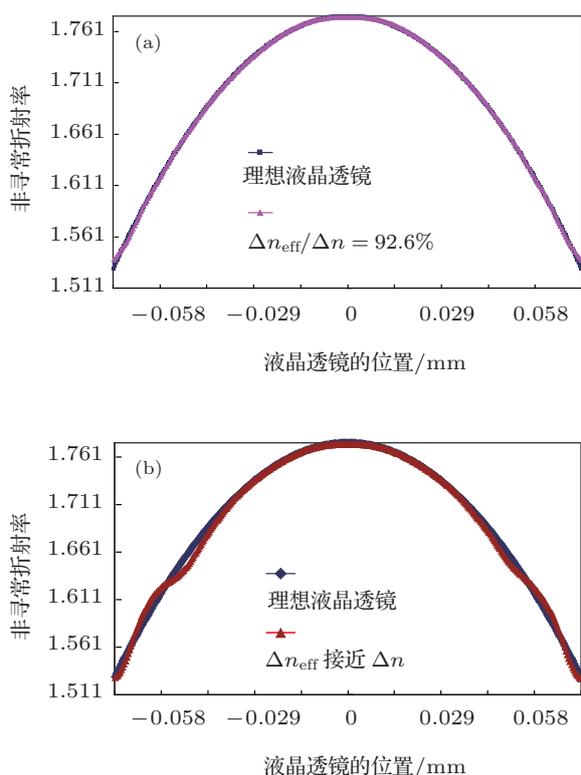


图9 (a) 理想液晶透镜与 $\Delta n_{\text{eff}}/\Delta n = 92.6\%$ 液晶透镜的折射率分布; (b) 理想液晶透镜与 Δn_{eff} 接近 Δn 的液晶透镜的折射率分布

4 实验结果与讨论

由上述液晶透镜的仿真和实验结果可以看出: 使液晶透镜的液晶工作在非寻常折射率对电压变化敏感的低电压区域, 可以实现低压驱动液晶透镜的设计. 如上述液晶材料归一化 Δn_{eff} 控制 95% 以下,

驱动电压可控制在 10 V 以下, 实验和理论仿真证明了这一点. 边缘处与理想液晶透镜相差较大, 主要是由于由中心向两边电压逐渐升高, 且相邻电极的电压差变大, 产生的横向电场造成液晶分子偏离偏振平面, 产生横向转动, 影响透镜的性能和效果. 当液晶材料归一化 Δn_{eff} 高于 95% 甚至接近 100% 时, 达到设计透镜效果, 液晶分子需要较大的驱动电压, 同时也会使产生相邻电极的电压差变大, 横向电场对液晶分子影响更大, 使得偏离理想透镜程度更大.

选取液晶的 Δn_{eff} 对驱动电压的变化越敏感, 设计的液晶透镜电极的最大电压越小. 相反, 如果选取液晶的 $\Delta n_{\text{eff}} = \Delta n$, 由仿真可知, 由于取向层的表面锚定的影响, 即使施加很高的电压也很难达到 Δn .

有时会根据需要设计成不同的电极结构, 如果设计的液晶透镜选取的液晶 Δn_{eff} 对驱动电压 (电场) 的变化敏感, 也会得到低压驱动的液晶透镜.

5 结论

设计一款性能优越的液晶透镜, 除了考虑其制备工艺和口径的选取等, 还要合理选取 Δn_{eff} , 使得设计的液晶透镜可低压驱动, 满足大规模集成电路的要求. 由仿真结果可以看出, 一般液晶材料归一化 Δn_{eff} 控制 95% 以下, 驱动电压可控制在 10 V 以下, 根据需要选取更小的归一化 Δn_{eff} , 可使驱动电压更低. 这一规律可为低压液晶透镜的设计提供指导.

- [1] Wang F, Zhao X, Yong Y, Fang Z L, Yuan X C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084212 (in Chinese) [王芳, 赵星, 杨勇, 方志良, 袁小聪 2012 物理学报 **61** 084212]
- [2] Sato S 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 1679
- [3] Berreman D W 1980 *U.S. Patent* 4190330
- [4] Zheng Z G, Ma J, Song J, Liu Y G, Hu L F, Xuan L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 15 (in Chinese) [郑致刚, 马骥, 宋静, 刘永刚, 胡立发, 宣丽 2007 物理学报 **56** 15]
- [5] Yang P B, Cao L G, Hu W, Zhu Y Q, Guo Q, Yang X B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 285 (in Chinese) [杨平保, 曹龙贵, 胡巍, 朱叶青, 郭旗, 杨湘波 2008 物理学报 **57** 285]
- [6] Zheng Z G, Li W C, Liu Y G, Xuan L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7344 (in Chinese) [郑致刚, 李文萃, 刘永刚, 宣丽 2008 物理学报 **57** 7344]
- [7] Yin J L, Huang X G, Liu S H, Hu S J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5268 (in Chinese) [殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪, 胡社军 2006 物理学报 **55** 5268]
- [8] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4097 (in Chinese) [丁海兵, 庞文宁, 刘义保, 尚仁成 2005 物理学报 **54** 4097]
- [9] Ren H W, Fan Y H, Gauza S, Wu S T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4789
- [10] Nose T, Masuda S, Sato S 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 1643
- [11] Ye M, Wang B, Sato S 2004 *Appl. Opt.* **43** 6407

A design of liquid crystal lens with low voltage driving*

Tang Xian-Zhu^{1)2)†} Chung Te-Chen²⁾ Jen T'ing-Hsien²⁾
Lu Jian-Gang¹⁾ Shieh Han-Ping¹⁾³⁾

1) (*National Engineering Laboratory of TFT-LCD Materials and Technologies, Displays and Lighting Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

2) (*Infovision Optoelectronics Co. Ltd., Kunshan 215301, China*)

3) (*Taiwan Chiao Tung University, Hsinchu, China*)

(Received 28 March 2013; revised manuscript received 17 May 2013)

Abstract

Design rules for liquid crystal (LC) lens with low driving voltage are studied in this paper. Many rules are obtained from simulations of five kinds of LC materials. If normalized Δn_{eff} of the LC material is less than 95%, the driving voltage of LC lens will be less than 10 V. On the premise that the performance of LC lens is satisfied and fabrication process is permitted, the smaller the normalized Δn_{eff} , the lower the driving voltage of the designed LC lens. The results in can guide people in this paper designing and preparing the LC lens with high performance.

Keywords: liquid crystal lens, design, low voltage driving, normalized Δn_{eff}

PACS: 42.79.Kr, 61.30.Gd, 78.15.+e, 83.80.Xz

DOI: 10.7498/aps.62.164212

* Project supported by the Science and Technology Program of Jiangsu Province, China (Grant No. BE2012862), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60906039), and the Shanghai Natural Science Foundation, China (Grant No. 09ZR1414800).

† Corresponding author. E-mail: txzciomp@163.com