液晶与显示
Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-11

基于电控可调液晶延迟器的高对比度硅基液晶显示光机

闫旭东[1,2], 郑　鑫[2], 蒋松旭[2], 胡　飞[2*], 刘晓利[1*]
(1. 深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518000;
2. 深圳光峰科技股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:硅基液晶显示器(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)的对比度不够高是影响其大规模商用的关键因素,如何实现高对比度成为LCoS器件在工业化应用中亟需解决的问题。本研究提出了一种基于电控可调液晶延迟器的对比度提升方法,通过在LCoS面板前端引入可动态调谐的液晶延迟器,利用外加电压幅值与频率的双重调控,实现了对LCoS面板中液晶残余延迟量的动态补偿,并测试探究出不同调控电压下对比度值的变化规律。基于商用光源光机和LCoS面板搭建本征对比度测试实验系统,之后对该测试系统进行改进,同时实现了添加延迟器后对比度的测试功能。实验结果证明通过调节施加在液晶延迟器的电压幅值和频率,可以有效提升LCoS面板的对比度,测试出的最优对比度值(340.5)是LCoS面板本征对比度值(37.32)的9.12倍。通过频率调制显著降低了液晶延迟器的驱动电压,减小了硅基液晶显示光机系统的整体功耗。本研究对电控可调液晶延迟器的多自由度调制,在硅基液晶显示光机的产品开发工业化应用道路上提供了技术支撑和理论依据。

关　键　词:液晶光学;LCoS面板;电控液晶延迟器;动态可调谐;对比度;驱动频率
中图分类号:TN27;O753^{+}.2　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0191　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0191

High-contrast LCoS optical engine using an electrically tunable liquid crystal retarder

YAN Xudong[1,2], ZHENG Xin[2], JIANG Songxu[2], HU Fei[2*], Liu Xiaoli[1*]

(1. *College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen* 518000, *China*;
2. *Shenzhen Appotronics Corporation Limited, Shenzhen* 518000, *China*)

Abstract: The low contrast ratio of LCoS panel is a critical factor limiting their large-scale commercial deployment. Achieving high contrast has become a pressing challenge for LCoS devices in industrial applications. This study proposes a contrast enhancement method employing an electrically tunable liquid crystal retarder. A dynamically tunable liquid crystal retarder was introduced into the optical path preceding the LCoS panel. By simultaneously modulating the amplitude and frequency of the applied voltage, dynamic compensation for the residual retardation of the liquid crystal within the LCoS panel is realized. Furthermore, the dependence of the contrast ratio on the control voltage parameters is

收稿日期:2026-09-14;**修订日期**:2026-10-15.
基金项目:国家自然科学基金(No.62275173)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62275173)
*通信联系人,E-mail:lxl@szu.edu.cn

systematically investigated and experimentally validated. An intrinsic contrast ratio measurement system was constructed using a commercial light source optical engine and an LCoS panel. The testing system was subsequently improved to enable contrast measurement with a retarder. The experimental results demonstrate that the contrast ratio of the LCoS panel can be significantly enhanced by modulating the amplitude and frequency of the voltage applied to the liquid crystal retarder. The optimal contrast ratio achieved was 340.5, representing a 9.12 fold improvement over the intrinsic contrast ratio of 37.32. Frequency modulation significantly refuces the driving voltage of the liquid crystal retarder, thereby lowering the overall power consumption of the LCoS optical engine. This study provides a theoretical basis and technical support for the multi-degree-of-freedom modulation of electrically tunable liquid crystal retarders in LCoS optical engine applications.

Key words: liquid crystal optics; LCoS panel; electronically controlled liquid crystal retarder; dynamic tuning; contrast ratio; drive frequency

1 引　　言

硅基液晶显示器是一种液晶显示器与CMOS集成电路结合的反射型显示技术,由于其可以与成熟的半导体工艺紧密兼容结合,已日趋成为主流器件[1-5]。该技术凭借其紧凑的结构尺寸、高分辨率、高光学效率和低功耗等优势,逐渐在投影显示、空间光调制、增强和虚拟现实等领域得到了广泛地应用[6-15]。然而,LCoS系统在实际应用中仍面临着对比度不足的问题,该问题直接降低显示图像的清晰度、色彩饱和度,进而限制了其在高端显示的进一步应用[16-19]。已有研究表明导致低对比度的根源主要受限于LCoS面板中液晶层的残余延迟与入射光偏振态控制的不完全性[20]。为了解决这些问题,研究者提出了多种补偿技术,包括静态光学补偿膜、双轴薄膜以及偏振控制器件[21-25]。这些方法在一定程度上改善了LCoS的偏振控制能力,但仍存在补偿范围有限、响应速度较慢、难以实现动态调节等不足,无法满足高性能显示与实时光学调制的需求。

近年来,电控双折射(Electrically Controlled Birefringence, ECB)液晶延迟器因其可通过外加电压实现双折射的连续可调,成为提升LCoS对比度的有效途径[26-27]。与传统静态补偿膜相比,电控液晶延迟器不仅能够动态修正LCoS面板的残余延迟,还具备快速响应与实时调节的优势。通过调节电压幅值,ECB延迟器能够灵活适配不同工作状态下的LCoS面板,从而显著改善系统的偏振控制能力与对比度表现。此外,液晶延迟器在器件集成与系统兼容性方面也具有较大潜力,适合与LCoS系统结合,实现小型化与高性能化的光学解决方案[28-30]。

目前关于使用ECB延迟器来提升LCoS对比度的研究仍集中于实验室中搭建的简化光学系统,所使用的激光器光源的波谱范围窄且发散角较小。然而,工业化产品的光源光机由于考虑投影镜头等因素使得出射光有一定的发散角度。所以这两种不同的光源照射到LCoS面板后,产生的残余延迟量不相同,最终所需要延迟器的延迟量也是不同的。目前在产业中急需可供商用LCoS面板对比度提升的方法以及如何精准测试对比度的光学系统。本工作使用自主研制的蜻蜓单绿G1光机作为光源,基于自研的ECB延迟器以及商用LCoS面板(豪威科技),搭建了一套符合产业需求的LCoS对比度测试系统。该系统更精确的评估了LCoS面板所需要的补偿延迟量,为得到更高的对比度提供了有力的测试平台。在测试评估过程中,通过外加电压调控液晶延迟器的分子取向,实现对LCoS面板残余相位值的动态补偿。与传统的ECB延迟器使用方式相比,本研究中的电控液晶延迟器还引入了频率调制方法,通过频率调制显著降低液晶延迟器的驱动电压,从而显著提升LCoS系统的对比度,同时减小了系统的整机功耗。该ECB延迟器多自由度的设计调控,在产品开发工业化的道路上提供了新的思路和技术支撑。

2 残余延迟量补偿的原理方法

对于处于高电压状态的混合扭曲向列相(Mixed mode twisted nematic, MTN)型LCoS显示器,在高电场作用下,液晶盒中间部分的液晶分子指向矢几乎垂直于基板表面。但是紧挨着上下基板表面的液晶分子,由于聚酰亚胺摩擦取向层的作用,带有小角度的预倾角。这些液晶分子在取向层的强锚定力下,很难完全垂直于基板排列,这是引起LCoS面板出现残余延迟的主要原因。与此同时当有小发散角度的偏振光入射到LCoS面板上也会造成少量的延迟量。

在向列相液晶中,液晶分子的长轴倾向于沿着一个特定的方向排列,该方向被称为液晶指向矢,用单位矢量$\vec{n}$表示。液晶指向矢通常沿着液晶分子预定的方向排列,但在施加电压后,由于液晶介电常数和电导率的各向异性,分子的指向矢倾斜角会发生变化,有效折射率就会变化。当光线以角度θ_i入射到LCoS面板,光线传输路径如图1(a)所示。

根据斯涅耳定律:

$$n_{air}\sin\theta_i = n\sin\theta\ , \tag{1}$$

其中θ_i是空气中的入射角,θ是LC介质中的入射角。此时液晶的有效折射率n_{eff}表示为:

$$n_{eff}=\frac{n_e n_o}{\left[n_o^{\,2}\sin^2(\theta\pm\phi)+n_e^{\,2}\cos^2(\theta\pm\phi)\right]^{\frac{1}{2}}}\ . \tag{2}$$

LC介质的相位延迟$\delta(\theta,\lambda))$可以表示为[21]:

$$\delta(\theta,\lambda)=\frac{2\pi R}{\lambda}=\frac{2\pi(d\Delta n_{eff})}{\lambda}\ . \tag{3}$$

上式中光程延迟量$R=d\Delta n_{eff}$,

$$(d\Delta n_{eff})=\frac{d}{\cos\theta}\left\{\frac{n_e n_o}{\left[n_o^{\,2}\sin^2(\theta\pm\phi)+n_e^{\,2}\cos^2(\theta\pm\phi)\right]^{\frac{1}{2}}}-n_o\right\}. \tag{4}$$

在(1)和(4)中,n_o和n_e代表寻常和非常折射率,Δn代表双折射,n_{eff}代表LC材料的有效折射率,d是液晶盒厚度,ϕ是液晶分子的倾斜角度。(4)式中的±符号分别代表来自左侧和右侧的入射光。

当入射角θ_i等于零时,即入射光垂直入射LCoS面板,此时主要补偿的是LCoS面板在高电压下由于PI层小预倾角导致的面内延迟量。当入射角不等于零时,由于不同入射角θ_i的偏振光透射液晶层后产生相位差,这些偏振光经过LCoS面板反射后变成椭圆偏振光,再经过PBS元件分束成两种正交的偏振分量,最终就会有一部分光透射出PBS,导致暗态光强增大,对比度降低。本文实验所使用光机光源的发散半角是10°。

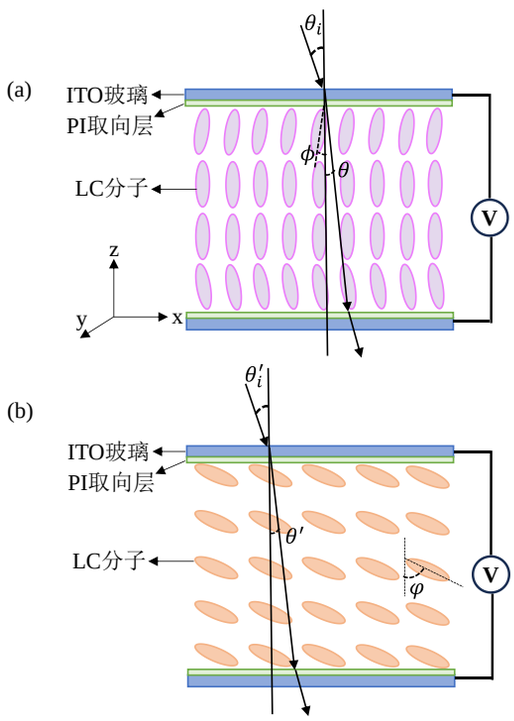


图1 (a)入射光束在LCoS面板中的传输路径图;(b)入射光束在电控液晶延迟器中的传输路径图。

Fig. 1 (a) Transmission path diagram of incident light in LCoS panel and (b) the electrically tunable liquid crystal retarder

为了补偿以上LC介质的残余延迟量,引入电控液晶延迟器,通过调节施加电压的幅值实现液晶分子的偏转,使其产生的延迟量$\delta(\theta,\lambda)'$与LCoS面板高电压下的残余延迟量$\delta(\theta,\lambda)$相互抵消,从而实现暗态光强的降低,提升对比度。即:

$$\delta(\theta,\lambda)+\delta(\theta,\lambda)'\approx 0\ . \tag{5}$$

当施加特定电压后,液晶延迟器中的液晶分子沿着z轴方向旋转,与z轴夹角φ。当光线以θ_i'入射到延迟器时,光线传输路径如图1(b)所示,光线经过液晶延迟器后产生延迟量$\delta(\theta,\lambda)'$,如公式(6)所示:

$$\delta(\theta',\lambda')=\frac{2\pi d'}{\lambda\cos\theta'}\times\left\{\frac{n_e'n_o'}{\left[n_o'^2\sin^2(\theta'\pm\varphi)+n_e'^2\cos^2(\theta'\pm\varphi)\right]^{\frac{1}{2}}}-n_o'\right\}. \tag{6}$$

上式中n_o'和n_e'分别代表液晶延迟器中液晶的寻常和非常折射率，d'是液晶延迟器的厚度，φ是液晶分子的倾斜角度。

3 电控液晶延迟器的特性分析

3.1 电控液晶延迟器的制备

把ITO玻璃分别依次放置在酒精、异丙醇和丙酮溶液中，在超声机中各清洗10分钟，清洗干净玻璃表面的油污。用氮气将玻璃表面吹干净后，把玻璃放置在臭氧清洁机中照射20分钟。在玻璃表面旋涂聚酰亚胺溶液后放置在烘箱中高温固化成膜，然后用摩擦机平行取向。使用两片反平行摩擦的基板制备液晶盒，盒厚1.0 μm，最后利用毛细力将正性向列相液晶(XL0065，双折射率$\Delta n=0.065$)填充到空盒中。液晶盒的示意图如下图2所示。图2(a)是不加电压时液晶延迟器的状态，图2(b)是施加特定电压时延迟器的状态。

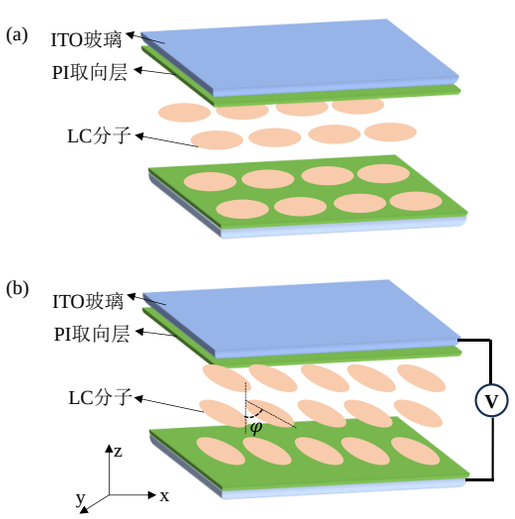


图2 电控液晶延迟器示意图。(a)不加电压；(b)加电压。

Fig. 2 Schematic diagram of the electrically tunable liquid crystal retarder. (a) No voltage applied; (b) Voltage applied.

3.2 电控液晶延迟器的延迟量测试

对于制备完成的液晶延迟器，我们测试了不同电压下的延迟量值。测试设备是穆勒矩阵偏振测量仪(AxoScan，Axometrics)，如图3(a)所示。我们主要关注630 nm、530 nm和450 nm三种波长下的延迟量。这里延迟量(retardance)R定义为e光和o光之间的光程差($R=\Delta n\cdot d$)，和相位延迟δ关系是$R=\delta\lambda/2\pi$。在延迟量R测试的过程中，使用信号发生器对液晶延迟器施加电压(方波，200 Hz)。在不同的波长下，延迟量随着电压的变化曲线如3(b)所示。

从测试数据可以看出随着施加电压的不断增大，液晶延迟器的延迟量逐渐降低。在低电压区间(0 V-4 V)延迟量值迅速下降；在高电压区间(6 V-8 V)延迟量值下降速率变慢，趋于稳定值。这种趋势符合标准电控液晶延迟器的延迟量变化趋势，延迟量下降的主要原因是随着电压的增加，液晶分子从几乎平行于玻璃基板排列的状态，慢慢变成垂直于玻璃基板排列，液晶分子在电场作用下双折射率($\Delta n=n_e-n_o$)逐渐减小，所以导致光垂直入射时，延迟量逐渐降低。

对于初始状态的液晶延迟器，此时施加电压为零，测试了在不同波长下延迟量值的变化曲线，如图3(c)所示。从测试曲线可知在波长589 nm下，延迟量为64.89 nm。结果基本符合该延迟器延迟量的初始设计值65 nm。在波长为450 nm时，延迟量为70.85 nm；波长为530 nm时，延迟量为67.64 nm；波长为550 nm时，延迟量为64.93 nm；波长为630 nm时，延迟量为64.82 nm；该测试结果符合液晶材料的双折射率正常色散特性，波长越长双折射率越小，波长越短双折射率越大；即红光的Δn最小，蓝光的Δn最大，在相同的厚度下，蓝光的延迟量最大，红光延迟量最小。

对于图3(c)中所测试出的延迟量值随着波长的增大，在降低的过程中出现上下波动的现象，是由于在测试过程中入射光在液晶盒内多重反射引起的干涉效应(法布里-珀罗干涉)叠加在真实的延迟量光谱上所导致的。双折射色散导致非单调变化，而固定厚度引起的干涉效应则叠加形成周期性波动[31]。

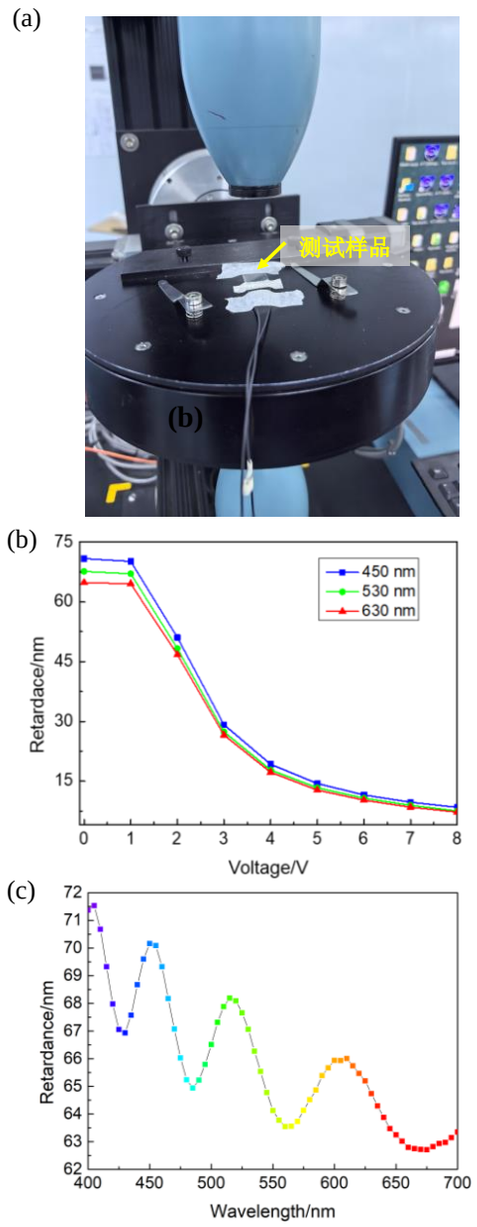


图3 (a)测试液晶延迟器延迟量的实验装置图;(b)电控液晶延迟器延迟量随电压变化曲线;(c)不加电压下延迟器的延迟量随波长的变化曲线。

Fig. 3 (a) Experimental setup for measuring the retardation of the liquid crystal retarder; (b) Retardance of the electronically tunable liquid crystal retarder versus applied voltage; (c) Retardance of the retarder as a function of wavelength with no applied voltage.

4 结果与讨论

4.1 LCoS面板对比度测试的光学系统

在实验中测试了不同频率下,施加不同电压的延迟器对LCoS面板对比度的影响,这里使用了自搭建的光路系统,测试系统的示意图和实物图如图4所示。图4(a)和(b)分别表示测试系统示意图的正面和侧面图,从图中可以清楚看出光源光机、商用LCoS面板和ECB延迟器的放置位置。图4(c)表示对比度测试系统的实物图。使用本公司自研的蜻蜓单绿G1光机作为光源,主波长在550 nm。在暗室环境下,通过光功率计分别记录LCoS面板在明暗两种状态下的光强值,然后计算对比度。LCoS面板的对比度(Contrast ratio, CR)定义为:电压开启状态的光强(L_{on})和电压关闭状态的光强(L_{off})之间的比值,$CR=L_{on}/L_{off}$[32]。

4.2 液晶延迟器的频率调制对LCoS面板对比度的影响

分别对延迟器施加6种不同的频率,10 Hz、200 Hz、1 kHz、10 kHz、50 kHz和100 kHz。测试出LCOS面板的对比度随着施加电压变化曲线如图5(a)-(l)所示。图5(a)代表频率是10 Hz时,对比度随大范围的电压变化曲线,右侧图(b)是图(a)中红圈所画位置的放大曲线。代表的是达到最优对比度的电压附近趋势放大图,在该图中可以更细化的找到最优电压值。图(c)、(e)、(g)、(i)和(k)均对应右侧的放大曲线图。

从测试曲线可知,在不同的频率响应下,LCoS面板的对比度随着延迟器施加电压的不断增大,均呈现先增大后减小的趋势。对于不同的频率,延迟器存在一个最优的电压值,使得LCoS面板达到最高对比度。当频率是10 Hz时,LCoS面板达到最高对比度时,延迟器的最优电压是2.80 V,此时对比度是325.56。当频率是200 Hz时,LCoS面板达到最高对比度时,延迟器的最优电压是2.85 V,此时对比度是340.50。当频率是1 kHz时,LCoS面板达到最高对比度时,延迟器的最优电压是2.9 V,此时对比度是339。当频率是10 kHz时,LCoS面板达到最高对比度时,延迟器的最优电压是3.0 V,此时对比度是339.50。当频率是50 kHz时,LCoS面板达到最高对比度时,延迟器的最优电压是3.9 V,此时对比度是326.11。当频率是100 kHz时,LCoS面板达到最高对比度时,延迟器的最优电压是5.45 V,此时对比度是324.63。

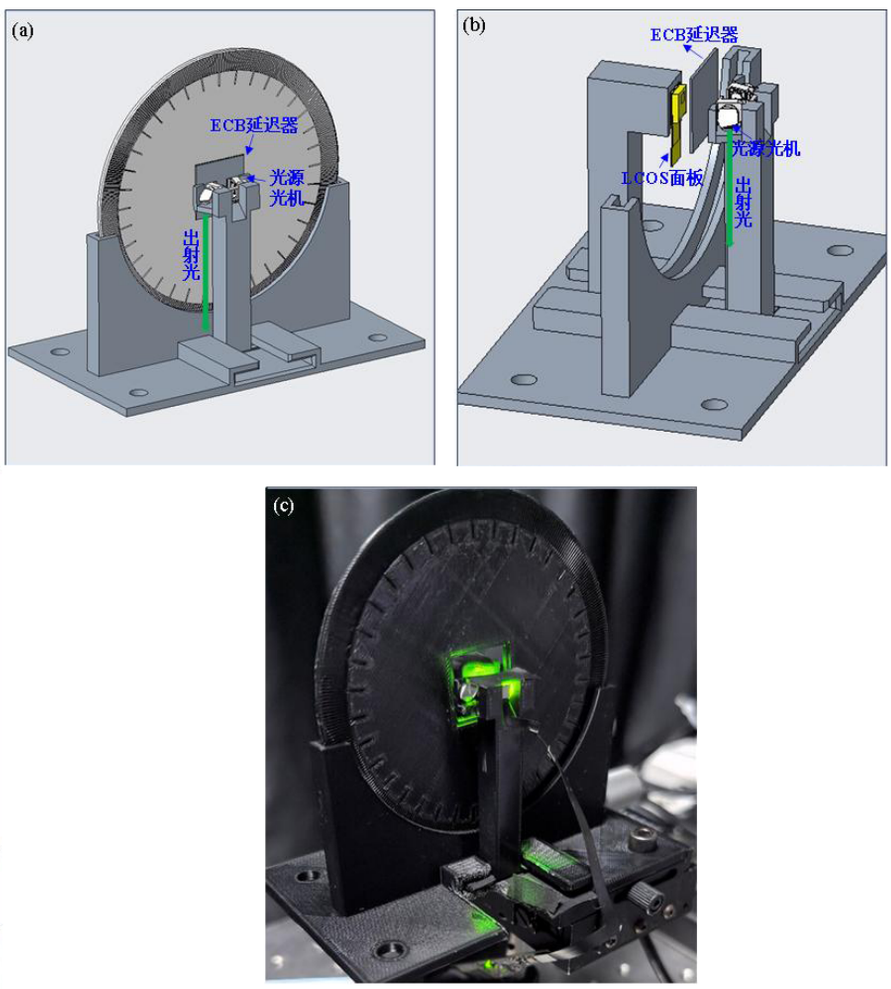


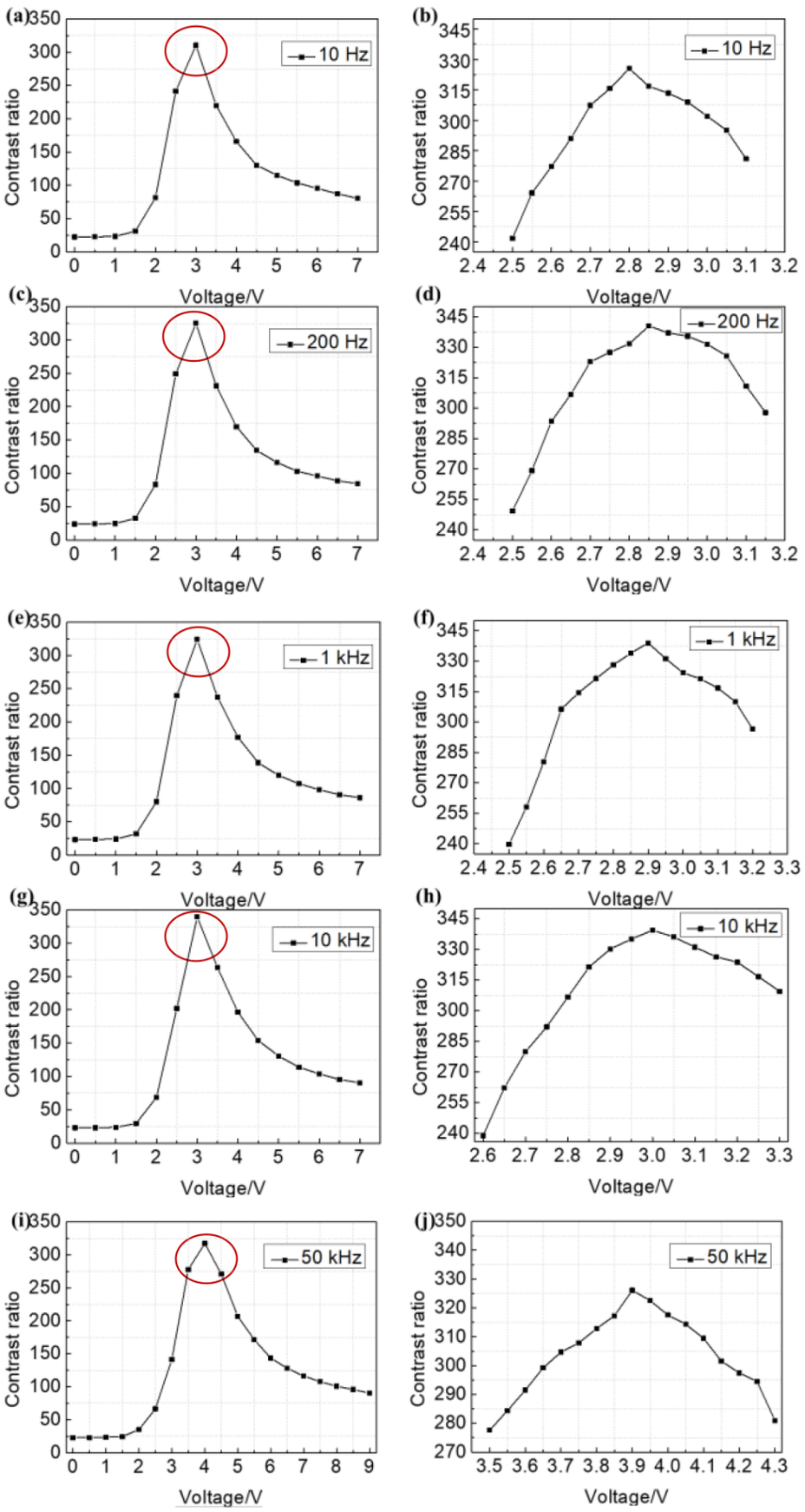
图4 测试LCoS面板对比度的光学系统。(a)和(b)分别表示测试系统示意图的正面和侧面图;(c)对比度测试系统的实物图。

Fig. 4 Optical system for testing the contrast ratio of an LCoS panel. (a) Front and (b) side views of the schematic diagram of the testing system. (c) Photograph of the experimental setup.

随着施加频率的逐渐增大,LCoS面板所对应的最优对比度值则呈现先增大、然后变平缓,之后再减小的趋势。其中在200 Hz- 10 kHz范围内,最优对比度值比较接近,如图6(a)所示。此时延迟器达到最优对比度时的电压值是呈现逐渐增大的趋势,在频率为200 Hz时最大为340.50,如图6(b)所示。在可以达到相似最优对比度的情况下,低频率(200 Hz)可以降低液晶延迟器的驱动电压,驱动电压的降低会减少整个LCoS系统的功耗。

在实验中使用图3(a)所示的偏光测量仪设备测试了在不同频率下LCoS面板达到最佳对比度时,ECB液晶延迟器的延迟量值,如图6(c)所示。不同驱动频率下的最高对比度、对应电压及延迟量的测试结果如表格1所示。从测试结果可以看出LCoS面板达到最佳对比度时,延迟器的延迟量值随着频率的增大呈现先减小后增大的趋势,在频率1 kHz时最小。这些延迟量值呈现小幅度变化趋势,符合正性液晶随频率响应的特性。

对于正性向列相液晶($\Delta\varepsilon > 0$)来说,其介电各向异性常数$\Delta\varepsilon$随频率升高而减小[33],因此在相同盒厚下,延迟量也会减小。当频率较低时,介电各向异性常数$\Delta\varepsilon$较大,同样的电压能产生更强的电驱动力,驱使液晶分子更大角度的偏转。当频率较高时,介电各向异性常数$\Delta\varepsilon$变小,电驱动力减弱,液晶分子的偏转角度也会相应减小。由于不同频率下分子的偏转角度不同,它们对通过的光线产生的有效双折射(Δn)也就不同,


(a)
10 Hz
(b)
10 Hz
(c)
200 Hz
(d)
200 Hz
(e)
1 kHz
(f)
1 kHz
(g)
10 kHz
(h)
10 kHz
(i)
50 kHz
(j)
50 kHz
Contrast ratio
Voltage/V

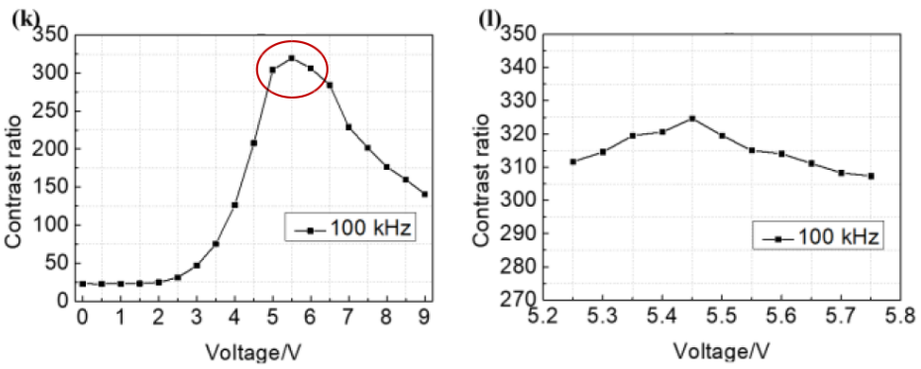


图5 (a)、(c)、(e)、(g)、(i)和(k)分别表示了不同频率下LCoS面板的对比度随着电压变化曲线图。图(b)、(d)、(f)、(h)、(j)和(l)分别表示左图中红圈位置放大区域。

Fig. 5 (a), (c), (e), (g), (i) and (k) show the contrast ratio of the LCoS panel as a function of applied voltage at different frequencies. (b), (d), (f), (h), (j) and (l) are enlarged views of the regions indicated by the red circles in the corresponding left panels.

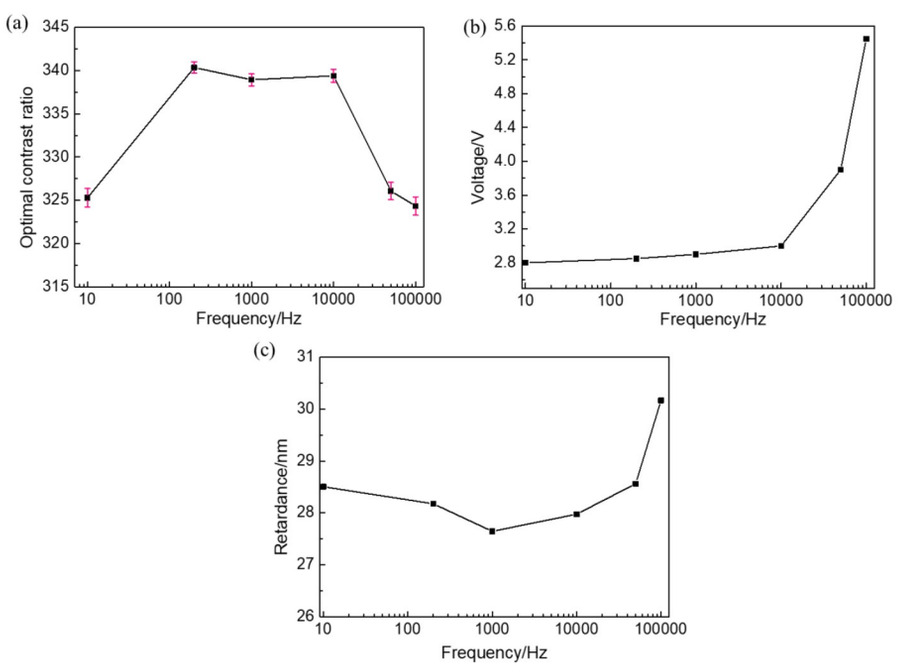


图6 (a)LCoS面板的最优对比度随频率变化曲线,(b)最优对比度所对应的电压值,以及(c)最优对比度所对应的延迟量值随着频率的变化曲线。

Fig. 6 shows (a) the optimal contrast ratio, (b) the corresponding voltage, and (c) the corresponding retardance of the LCoS panel, all as functions of frequency.

表1 不同驱动频率下的最高对比度、对应电压及延迟量的测试结果

Tab. 1 Measuring result of maximun contrast ratio, corresponding driving voltage, and retardation as the function of driving frequency

频率/kHz	电压/V	最优对比度	延迟量/nm
0.01	2.80	325.56	28.502
0.2	2.85	340.50	28.175
1	2.90	339.00	27.645
10	3.00	339.50	27.974
50	3.90	326.11	28.561
100	5.45	324.63	30.165

最终表现为延迟量的差异。所以为达到对比度最优时所需的延迟量,在低频率时,需要的施加电压值较小;而高频率时,需要的施加电压值变大。综上实验测试结果符合理论预期结果。

5 结 论

本文通过实验精确测量了LCoS面板在使用电控ECB液晶延迟器后的对比度提升结果。探究了ECB液晶延迟器在外加不同频率的电压对延迟量值的影响。本研究通过使用自主研制的光机搭配LCoS面板,搭建了对比度测试系统。实验结果表明外加电压的频率会影响液晶延迟器的延迟量值,为达到LCoS面板对比度最优时所需的延迟量,在低频率(10 Hz)时,需要的施加电压值较小,为2.80 V;而高频率(100 kHz)时,需要的施加电压值变大,为5.45 V。液晶延迟器的驱动频率越低时施加电压幅值越低,即液晶延迟器低频率响应可以降低整个显示系统的功耗。测试出的最优对比度值(340.50)是LCoS面板本征对比度值(37.32)的9.12倍。本研究为产业技术开发中进一步探索电控液晶延迟器的介电性能对延迟量的影响,以及LCoS面板对比度的提升提供了基础的实验指导。

参 考 文 献:

[1] 季渊,许怡晴,陈宝良,等. 硅基微显示器发展现状与研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(20): 2011007-2011007-12.
JI Y, XU Y Q, CHEN B L, *et al*. Development and research progress of silicon-based microdisplays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): 2011007-2011007-12. (in chinese)

[2] ZHANG Z, YOU Z, CHU D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e213-e213.

[3] YU X J and KWOKA H S. Fast response film-compensated liquid crystal on silicon display[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(3): 031104-1- 031104-3.

[4] HUANG H C, LEUNG K Y, KWOK H S, *et al*. P-188: Single-panel spatial-color and sequential-color LCOS projectors using LED lamp[C]//SID Symposium Digest of Technical Papers. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2007,38(1): 903-906.

[5] LI W J, GUO Y Q, ZHANG C, *et al*. A 90° mixed-mode twisted nematic liquid-crystal-on-silicon with an insulating protrusion structure[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(6): 064210.

[6] CHU F, GUO Y, ZHANG Y, *et al*. Accurate phase modulation scheme in a micropixel liquid crystal on silicon with multiple polymer walls[J]. *ACS Applied Optical Materials*, 2024, 2(7): 1330-1337.

[7] WOJCIK A J, SHEN D Z, SELVIAH D R, *et al*. Computer-generated holograms using phase front elements for higher resolution LCoS spatial light modulators[J]. *Optics Express*, 2025, 33(10): 20383-20398.

[8] WANG H, CAO Q, HOU Y T, *et al*. Integrated LCOS-SLM-based laser slicing system for aberration correction in silicon carbide substrate manufacturing[J]. *Micromachines*, 2025, 16(8): 930.

[9] CHEN H F, Tao Y, ZHU B H, *et al*. Reconfigurable nonlinear Pancharatnam-Berry diffractive optics with photopatterned ferroelectric nematics[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 314.

[10] CHEN B Q, LI C, FANG C T, *et al*. SiC diffractive waveguides for augmented reality: single-layer, full-color, rainbow-artifact-free display with vision correction[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 21.

[11] ZHANG Z L, KONG L Y, ZHANG L H Y, *et al*. Structured light meets machine intelligence[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 26.

[12] LI B X. Continuous-phase liquid-crystal optics promise a flat revolution[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2026, 7(2): 217-218.

[13] ZHANG J R, DONG Y J, LI P, *et al*. Multidimensional multiplexing geometric phase metaholography[J]. *Light:*

Advanced Manufacturing, 2025, 6(3): 474-485.

[14] 雷俊阁,孙国斌,张锦,等. 基于液晶空间光调制器的全息再现像设计[J]. 中国光学,2025,18(4):771-783.
LEI J G, SUN G B, ZHANG J, *et al*. Design of holographic reproduction images based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 771-783. (in chinese)

[15] 贺晓旭,姜莉莉,阮锐,等. 基于硅基液晶方案的抬头显示系统投影光机设计[J]. 光学与光电技术, 2026,24(4): 159-166.
HE X X, JIANG L L, RUAN R, *et al*. Design of picture generation unit for heads-up display system based on liquid crystal on silicon solution[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2026, 24(4): 159-166. (in chinese)

[16] ZHU Z X, WEN Y H, LI J Q, *et al*. Metasurface-enabled polarization-independent LCoS spatial light modulator for 4K resolution and beyond[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(7): 1391-1400.

[17] CHEN H M P, YANG J P, YEN H T, *et al*. Pursuing high quality phase-only liquid crystal on silicon (LCoS) devices[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2323.

[18] YANG H, CHU D. Phase flicker in liquid crystal on silicon devices[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2020, 2(3): 032001.

[19] OU X N, HU Y Q, YU D, *et al*. Meta-optics redefines microdisplay: monolithic color LCoS without polarization dependency[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 10925.

[20] KWON D W, LIM Y J, JEON E J, *et al*. Film compensation of twisted nematic liquid crystal display using a rod-like reactive mesogen[J]. *Current Applied Physics*, 2011, 11(3): 725-730.

[21] LU R, ZHU X, WU S T, *et al*. Ultrawide-view liquid crystal displays[J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(1): 3.

[22] TOYOOK T, KOBORI Y. "NISSEKI LC Film" Liquid crystalline polymer film for optical devices[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2000, 13(2): 301-306.

[23] 苑留涛,孙嘉盈,黄悦蓁,等. 液晶器件无机取向技术的发展及应用[J]. 液晶与显示,2025,40(10):1440-1449.
YUAN L T, SUN J Y, HUANG Y Z, *et al*. Development and applications of inorganic alignment technology for liquid crystal devices[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(10): 1440-1449. (in chinese)

[24] KUO C L, WEI C K, WU S T, *et al*. Reflective direct-view display using a mixed-mode twisted nematic cell[J]. *Japanese journal of applied physics*, 1997, 36(3R): 1077.

[25] 李韵九,韦穗,郝学锋,等. 液晶调控下的亚波长金光栅反射相位[J]. 液晶与显示,2024,39(11):1445-1453.
LI Y J, WEI S, HAO X F, *et al*. Subwavelength gold gratings refection phase modulated by liquid crystals[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(11): 1445-1453.

[26] LAGERWALL S T, DAHLGREN A, JÄGEMALM P, *et al*. Unique electro-optical properties of liquid crystals designed for molecular optics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2001, 11(2): 87-94.

[27] SOREF R A, RAFUSE M J. Electrically controlled birefringence of thin nematic films[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(5): 2029-2037.

[28] HEGDE G, XU P, POZHIDAEV E, *et al*. Electrically controlled birefringence colours in deformed helix ferroelectric liquid crystals[J]. *Liquid Crystals*, 2008, 35(9): 1137-1144.

[29] JEONG E, LIM Y J, RHEE J M, *et al*. Viewing angle switching of vertical alignment liquid crystal displays by controlling birefringence of homogenously aligned liquid crystal layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(5): 179

[30] LIU Y D, LI Y, CHEN Q M, *et al*. Liquid crystal based head-up display with electrically controlled contrast ratio [J]. *Crystals*, 2019, 9(6): 311.

[31] VARGAS A, DONOSO R, RAMÍREZ M, *et al*. Liquid crystal retarder spectral retardance characterization based on a Cauchy dispersion relation and a voltage transfer function[J]. *Optical Review*, 2013, 20(5): 378-384.

[32] WU S T and YANG D K, Reflective liquid crystal displays. *New York: Wiley*, 2001.

[33] 戴亚雨,高林,庞泽,等. 外加电压频率对液晶介电各向异性的影响[J]. 液晶与显示,2018,33(003):175-181.
DAI Y Y, GAO L, PANG Z, *et al*. Influence of the frequency of external applied voltage on the dielectric anisotropy of liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(003):175-181. (in chinese)

作者简介:



闫旭东,女,博士,研究员,2024年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事LCoS面板相位延迟器方面的研究。E-mail: 12049010@mail. sustech. edu. cn



刘晓利,男,博士,教授,2008年于天津大学获得博士学位,主要从事光学三维测量与计算成像测量研究。E-mail: lxl@szu. edu. cn



胡　飞,男,博士,研究员,2022年于清华大学获得博士学位,主要从事激光投影显示的研究。E-mail: feihu@appotronics. com