文章编号:1007-2780(2014)05-0709-07

液晶波前校正器过驱动矩阵的测量方法研究

张亚超[1,2],胡立发[1*],彭增辉[1],宣 丽[1]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室,
吉林 长春 130033;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:从自适应光学应用的角度,对液晶波前校正器的过驱动矩阵的测量方法进行了系统研究。对量化级次和延迟时间进行了优化,最优量化级次为 32 级,最优延迟时间为 14 帧。最后,在延迟时间为 14 帧时,测量了液晶波前校正器的过驱动矩阵和终到位相矩阵,并对中等强度大气湍流进行了仿真校正,仿真计算结果与理论预期吻合得很好,表明测量方法可行。

关 键 词:液晶波前校正器;自适应光学;过驱动矩阵;终到位相矩阵
中图分类号:O439 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/YJYXS20142905.0709

Method for characterizing the overdrive-matrix of a liquid crystal wavefront corrector

ZHANG Ya-chao[1,2], HU Li-fa[1], PENG Zeng-hui[1], XUAN Li[1]

(1. *State Key Laboratory of Applied optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics, Chinese academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: From the adaptive optics point of view, we investigate the method for characterizing overdrive-matrix (OD) for liquid crystal wavefront corrector (LCWFC) in detail. In addition, the gray level number and delay time are optimized. After optimization, they are the 32 gray levels and the 14 frames delay time, respectively. Finally, OD and terminal phase matrix (TP) were measured and the atmosphere turbulence was corrected in simulation. The root-mean-square of residual wave front was 0.031λ, which indicated that the measurement method is feasible.

Key words: liquid crystal wavefront corrector ; adaptive optics; overdriving matrix; terminal phase matrix

1 引 言

自适应光学系统已经是地基大口径天文望远镜的必不可少的设备,它通过实时补偿大气湍流引起的波前畸变,使望远镜的成像更清晰,图像的分辨率接近它的衍射极限的能力。波前校正器是自适应光学系统的关键设备之一,它主要分为 3 种形式:液晶校正器、变形镜和 MEMS[1]。相对于变形镜,液晶波前校正器具有像素数多、驱动电

收稿日期:2014-06-04;**修订日期**:2014-06-19.
基金项目:国家自然科学基金(No. 11174274, No. 11174279, No. 61205021, No. 11204299)
* 通信联系人,E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn

压低、位相调制量大等优势，但是其响应速度慢，这大大限制了其对校正大气湍流的实时校正能力。液晶波前校正器是自适应光学系统中补偿大气湍流畸变的关键器件，其响应时间会影响系统总的延迟时间；而且，液晶校正器的响应时间是系统各部分延迟时间中最长的。系统总的延迟时间越短，它所导致的波前校正误差越小，最终望远镜的成像越清晰，因此，采用过驱动方法缩短液晶波前校正器的响应时间非常有意义。

提高液晶器件响应速度的方法主要有快速响应液晶材料的合成及新型材料和先进驱动方式。通过改进材料的方法使液晶波前校正器的响应速度得到了明显的提高，但通过改进材料的方法来提高响应速度潜力越来越有限。过驱动方法则可以在现有材料的基础上进一步提高响应速度，减小波前校正误差。

过驱动方法最早由吴诗聪在 1988 年[2]提出来，即瞬态向列相效应，其基本思想是使用更高的电压差来达到更快的响应速度。

国内外对过驱动技术在显示领域的应用都开展了大量的研究，显著地提高了液晶显示器的响应速度，大大减弱了拖尾模糊现象。2001 年，H. Nakamura 研究了过驱动技术在减小液晶显示器响应时间和在液晶动态显示中的应用[3-4]。2007 年，苗盛延分析了 TN 型 TFT 液晶显示的原理及影响响应时间的因素，探讨了过压驱动的原理和系统结构[5]。2008 年，上海交通大学的顾筠筠介绍了显示领域中的 TFT-LCD 过驱动技术及其发展[6]。2013 年，中国海洋大学的丁翰介绍了显示领域过驱动技术的一种新的查表方法[7]。

2011 年中国科学院长春光机所的胡红斌博士将过驱动技术应用在了液晶自适应光学中，提出了单帧过驱动方案，显著地提高了液晶波前校正器的校正速度[8]。2013 年，奥地利因斯布鲁克大学的 Gregor Thalhammer 等人研究了多帧过驱动技术在液晶空间光调制器中的应用[9]。但是针对过驱动矩阵的测量还没有进行过系统的研究，过驱动矩阵测量的准确性将直接影响波前校正的精度。

本文对 LCOS 过驱动矩阵的测量方法进行了深入研究。在第 2 节讨论了过驱动矩阵测量中首先要优化设置的 2 个重要参数，即量化级次和延迟时间的优化设置；在第 3 节，针对实验室所用的 256×256 的 LCOS 详细讨论了过压驱动矩阵的测量方法和数据处理方法；在第 4 节根据测量的过驱动矩阵和终到位相矩阵对中等强度大气湍流进行了仿真校正。

2 过驱动测量的参数优化设置

2.1 过驱动的原理

过驱动原理如图 1。

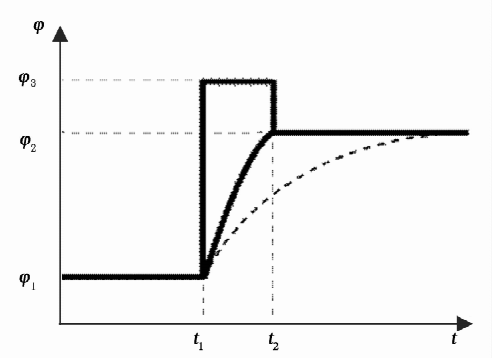


图 1 过驱动示意图

Fig. 1 Overdrive method diagram

φ_1: initial phase φ_2: target phase φ_3: overdrive phase

虚线为正常驱动时的位相响应，经过长时间位相响应到位；实线为过驱动条件下的位相响应，在 t_2 时刻位相响应到目标位相。

与显示领域的过驱动不同，对于液晶自适应光学系统中的 LCOS，其位相校正步长和响应速度这 2 个因素与最终的波前校正精度、成像效果密切相关。因此，在测量过驱动矩阵的时候首先要合理设置这 2 个参数。

2.2 量化级次 N 的优化设置

LCOS 采用相息图法对位相调制量进行扩展，只需产生一个波长的调制量即可得到几个到十几个波长的位相。采用 N 级量化，每个像素的初始灰度为 i，目标灰度为 j，从初始位相变化到目标位相所需施加的过驱动电压 OD(i,j)，得到 $N\times N$的矩阵 OD，即过驱动矩阵(由于电压和位相是一一对应的，OD 的每个元素也用位相表示)。

N 与 LCOS 的最小调制位相相关，也就是与波前校正的精度相关；另外，它还决定了 LCOS 的使用波段范围，量化级次太低会导致调制波段范围太窄，影响校正能力。

根据瑞利判据，当畸变波前 PV 值小于 $\lambda/4$

时，系统接近衍射极限分辨率，能够清晰成像。当量化级次 N 取为 32 级时，最小位相调制量为 0.031λ，约为衍射极限分辨率要求的残差波前 PV 值的 1/8，满足清晰成像的要求。

LCOS 是衍射光学元件，其衍射效率与量化台阶数、量化波长、照明波长以及 Δn（液晶对 o 光和 e 光的折射率差）有关。在仅考虑量化台阶数、波长偏差的影响时，衍射效率公式

$$\eta(\lambda,\lambda_0,L)=\left|\int_0^1\sum_{k=1}^{L}\exp\left(-\mathrm{i}\frac{2\pi k}{L}\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)rect\left[\frac{r^2-\frac{k}{L}-\frac{1}{2L}}{\frac{1}{L}}\right]\cdot\exp(\mathrm{i}2\pi r^2)\,\mathrm{d}r^2\right|^2. \tag{1}$$

入射波长偏离量化波长衍射效率会下降，根据穆全全的理论分析，当衍射效率不低于 95% 时，认为不影响清晰成像[10]。设朝长波方向衍射效率下降为 95%时的波长为 λ_h，朝短波方向衍射效率下降为 95%时对应的波长为 λ_l，则波段宽度为 $\Delta\lambda=\lambda_h-\lambda_l$。

根据上式计算出不同量化级次下的波段宽度如图 2。

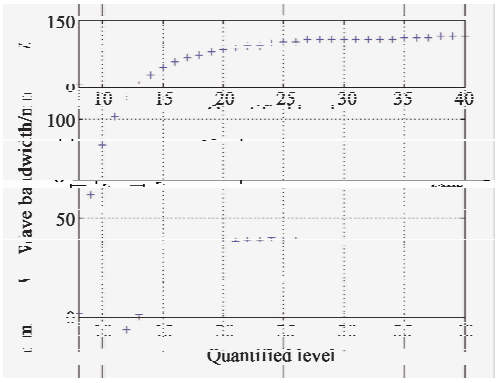


图 2　不同量化级次时 LCOS 的波段宽度

Fig. 2　Wave bandwidth at different quantified levels

随着量化级次的增加，波段宽度逐渐增加最后趋于稳定，稳定在 142 nm。当取 32 级量化时，波段宽度为 140 nm，接近最大波段宽度。

此时过驱动矩阵的大小为 32×32，进行波前校正时，在 10 μs 量级的时间内即可完成过压灰度图的查表，相对于系统的校正周期 2 ms，查表时间可以忽略不计。

综合考虑清晰成像、波段宽度对量化级次的要求，设置量化级次为 32 级。

2.3　过压延迟时间的优化设置

液晶上升响应速度非常快，即使从最低灰度响应到最高灰度大约也只需 600 μs，因此设置延迟时间时只需考虑下降响应过程。

液晶的位相响应特性如图 3。

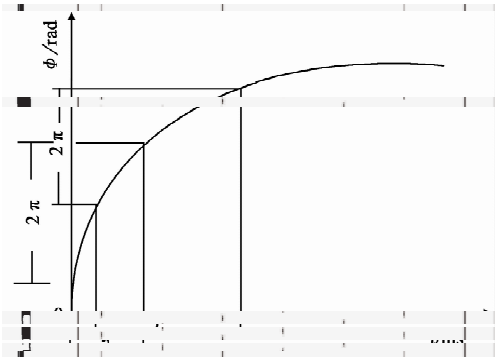


图 3　液晶的位相响应特性

Fig. 3　Phase response property of liquid crystal

根据液晶的位相响应特性，从最高电压开始撤去电压的响应过程，位相变化 2π 所需的时间最短，此即为 2π 自由驰豫时间，记作 $t_{2\pi}$。因此选择 2π 自由驰豫过程作为 LCOS 的位相调制区间。

由于初始灰度为 i，目标灰度为 j 的位相响应过程都可以从自由驰豫过程截取获得[11]，根据过驱动原理并且结合 LCOS 的帧扫描特性，将延迟时间设置为 $t_{\mathrm{delay}}=t_{2\pi}$，即可保证所有像素的位相变化都能在延迟时间内响应到位。但是这带来的时间延迟误差比较大，影响系统的实时校正能力。为了减小时间延迟误差，在保证系统衍射极限分辨率的前提下，进一步缩短延迟时间。

经测量 LCOS 的 2π 自由驰豫时间 $t_{2\pi}$ 为 2.83 ms，所用哈特曼波前探测器的读出时间 $t_{\mathrm{read}}=1.07$ ms，控制时序要求 $t_{\mathrm{delay}}>t_{\mathrm{read}}$ 且 $t_{\mathrm{delay}}<t_{2\pi}$。因此 $t_{\mathrm{delay}}=n\times t_{\mathrm{frame}}$，其中 $n=9,10\cdots21,22$。

在小角近似下，液晶的位相响应特性如下[11]

$$\delta(t)=\delta_\infty+(\delta_0-\delta_\infty)\exp(-2t/\tau_{\mathrm{decay}}), \tag{2}$$

其中：$\tau_{\mathrm{decay}}=\dfrac{\gamma_1 d^2}{K\pi^2}$，$\delta_\infty$ 为经过无限长时间后的最终位相值，δ_0 为初始位相值，τ_{decay} 为不加电场时的自

由回落时间。

液晶的上升位相响应特性，用下面的数模型描述[12]

$$\delta(t) = \delta_0 + (\delta_\infty - \delta_0)\left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\Delta t}\right)\right], \tag{3}$$

其中：$\tau_{\text{decay}} = \dfrac{\gamma_1 d^2}{K\pi^2}$，$\delta_0$ 为 t_0 时刻的位相也即初始位相，δ_∞ 为无穷长时间的位相也即目标位相，Δt 根据实际测量数据通过下文的(4)式采用最小二乘法拟合得到。

根据(2)(3)分别计算出 $t_{\text{delay}} = n \times t_{\text{frame}}$，其中 $n = 9, 10 \cdots 21, 22$ 时的终到位相矩阵。

用湍流模拟器产生大气相干长度 r_0 为 10.08 cm，格林伍德频率 f_G 为 54 Hz 的中等强度大气湍流。根据计算出来的终到位相矩阵进行仿真校正，控制时序要求哈特曼波前探测器(WFS)的曝光采样时间与 LCOS 的响应延迟时间相等，故采样间隔 $\Delta t = n \times$ frame 其中 $n = 9, 10 \cdots 21, 22$。

校正后的畸变波前残差均方根值(rms 值)如图 4。

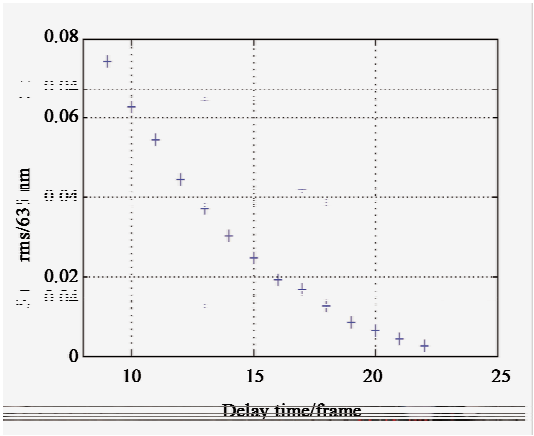


图 4 不同延迟时间下的校正误差

Fig. 4 Residual phase mean square root

由图 4 看出当延迟时间 $t_{\text{delay}} = 14 \times t_{\text{frame}}$ 时，校正误差的 rms 值 $\sigma_{\text{res}} = 0.0301\lambda$，约为衍射极限分辨率要求的波前残差 rms 值的 1/2，满足清晰成像的要求。在进行仿真校正时 WFS 的探测误差、数据处理时的计算误差等都没有包含进去。为了保证系统能够清晰成像，这里将最优延迟时间设置为仿真校正残差不超过衍射极限分辨率要求的波前残差 rms 值的 1/2 时对应的延迟时间。

3 测量装置及数据处理方法

本文采用偏振光干涉法测量 LCOS 的响应时间、LUT 和过驱动矩阵，测量光路如图 5。

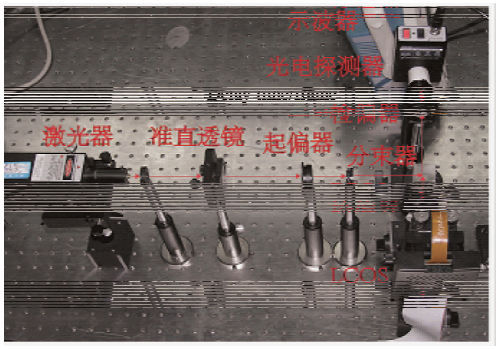


图 5 LCOS 电光响应测量实验光路

Fig. 5 Optical layout for measuring the electro-optical response of LCOS in lab

起偏器透振方向与液晶指向矢在 LCOS 面板的投影成 45°，起偏器与检偏器偏振方向垂直。

激光器为 635 nm 半导体激光器。

LCOS 的参数：

像素数：256×256

阵列尺寸：6.14 mm×6.14 mm

像素尺寸：24 μm×24 μm

填充因子：90%

工作温度：36.2 ℃根据偏振光学原理[13]

$$I = I_{\max} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right), \tag{4}$$

其中：δ 为位相差，I 表示光强，$I_{\max}$ 表示最大光强，于是位相

$$\delta = 2\arcsin\sqrt{\frac{I}{I_{\max}}}. \tag{5}$$

考虑到噪声、光等的干扰，采用归一化光强

$$\delta = 2\arcsin\sqrt{I_{\text{norm}}}, I_{\text{norm}} = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}. \tag{6}$$

4 结果与讨论

4.1 液晶波前校正器的响应时间与 LUT

在液晶自适应光学中以(635 nm)作为 LCOS 的响应时间，经测量 2π 自由驰豫时间 $t_{2\pi} = 2.83$ ms，如图 6。

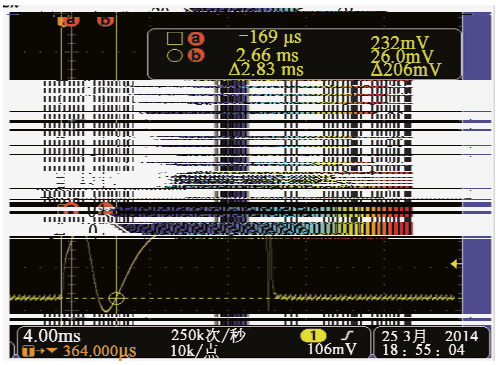


图 6　LCOS 的 2π 自由驰豫间(635 nm)

Fig. 6　Response time of LCOS for 635 nm

依次给 LCOS 发送 128，129…254，255 的单灰度图片，测量光强灰度级的曲线，根据公式(4)计算得到位相灰度级曲线。从最高灰度级开始截取 1λ 位相调制区间，取量化级次为 32 级对 LCOS 的调制量进行量化得到 LUT 曲线。0 对应最高电压，45 对应最低电压，0～31 对应一个波长，剩余的量化级次用来进行过压驱动，结果如图 7 所示。

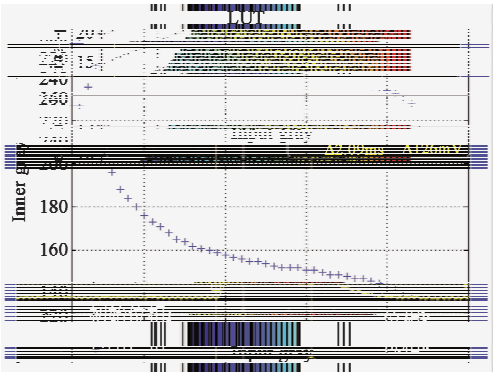


图 7　LCOS 的 LUT(635 nm)

Fig. 7　LCOS' LUT curve for 635 nm

4.2　过驱动矩阵

设置响应延迟时间 $t_{delay}=1.796$ ms。先给 LCOS 发送初始灰度 i，用示波器光标记录初始光强位置，再给 LCOS 发送目标灰度 j，用光标记录目标光强位置，然后给 LCOS 发送试探位相 OD(i,j)和适当的位相 k，使在电压由 OD(i,j)切换为 k 时示波器上出现如图 8 的尖峰，此时 OD(i,j)即为合适的过驱动位相。

延迟时间 $t_{delay}=1.796$ ms 时，测量的过驱动矩阵和终到位相矩阵如图 9～图 10。

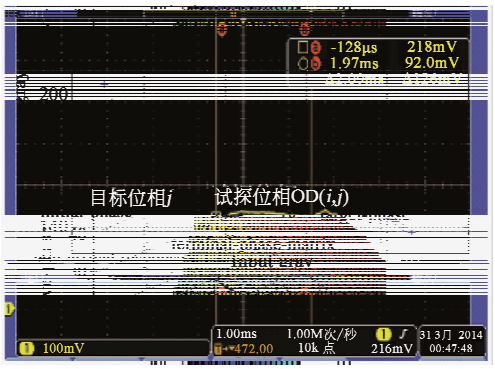


图 8　过驱动矩阵测量示意图

Fig. 8　OD matrix measurement method

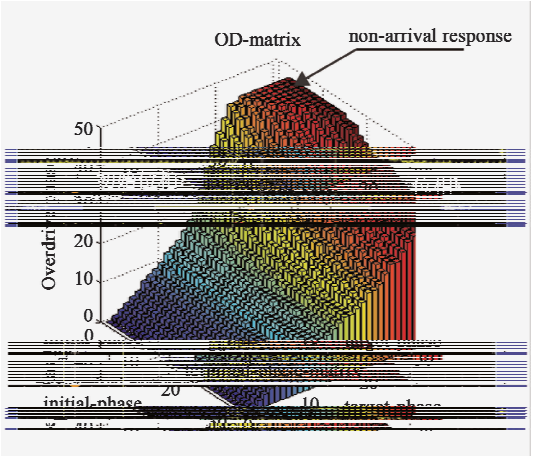


图 9　过驱动矩阵

Fig. 9　Overdriving matrix

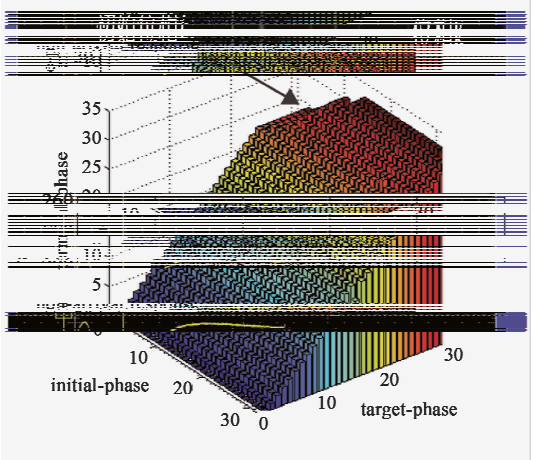


图 10　终到位相矩阵

Fig. 10　Terminal phase matrix

根据实际测出来的过驱动矩阵和终到位相矩阵对格林伍德频率 $f_G=54$ Hz，大气相干长度 $r_0=10.08$ cm的中等强度大气湍流进行仿真校

正。仿真时哈特曼波前探测器的采样间隔取为 $\Delta t=1.796$ ms，校正后的波前残差 rms 值为 0.032λ。根据理论计算出来的过驱动矩阵和终到位相矩阵进行仿真校正的校正残差 rms 值为 0.031λ，测量结果与理论计算结果吻合的非常好。表明上述选取的量化级次、设置的响应延迟时间是合理的。

5 结 论

从自适应光学波前校正的角度，我们对 LCOS 过驱动矩阵测量方法进行了研究，并提出了对量化级次和延迟时间进行优化设置的方法；针对所用的 LCOS，得出最短响应延迟时间 $t_{\mathrm{delay}}=1.796$ ms，最优量化级次 $N=32$。在最优量化级次和最短延迟时间下对过驱动矩阵进行了测量，理论仿真计算了由响应不到位带来的校正误差。校正误差 rms 约为衍射极限分辨率要求的波前残差的 rms 值的 1/2，不影响清晰成像。把 LCOS 的响应时间从 2.83 ms 缩短到了 1.796 ms，大大提高了液晶自适应光学系统对大气湍流的实时校正能力。

参 考 文 献：

[1] 林旭东，王建立，卫沛锋，等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学，2012，5(4)：337-351.
Lin X D, Wang, J L, Wei P F. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Journal of Chinese Optics*, 2012, 5(4):337-351. (in Chinese)

[2] Wu Shin-Tson, Wu Chiung-Sheng. High speed liquid crystal modulators using transient nematic effect [J]. *Appl. Phys*, 1989, 65(20):527-532.

[3] Nakamura H, Sekiya K. Overdrive method for reducing response times of liquid crystal displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2001, 32(1):1256-1259.

[4] Nakamura H. A model of image display in the optimized overdrive method for motion picture quality improvements in liquid crystal devices [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001:406-435.

[5] 苗延盛. TFT- LCD 的过压驱动技术探讨[J]. 液晶与显示，2007，22(6)：757-760.
Miao S Y. Over drive technology for TFT- LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(6):757-760. (in Chinese)

[6] 丁翰，刘卫东，乔明胜. 一种计算 LCD 过压驱动查找表的优化方法 [J]. 现代显示，2013，146，45-48.
Ding H, Liu W D, Qiao M S. The optimization method of calculation for LCD-Overdrive Lookup Table [J]. *Advanced Display*, 2013, 146:45-48. (in Chinese)

[7] 顾筠筠，李荣玉，邱永亮. TFT-LCD 的过驱动技术及其发展[J]. 现代显示，2008，90：33-36.
G J J, Li R Y, Qiu Y L. Over driving technology for TFT-LCD and its development [J]. *Advanced Display*, 2008, 90:33-40. (in Chinese)

[8] Hu H B, Hu L F , Xuan L, et,al. Advanced single-frame overdriving for liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16):3324-3326.

[9] Gregor T, Miles J P, Monika R M. Speeding up liquid crystal SLM using overdrive with phase change reduction [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2):1779-1797.

[10] 穆全全. 液晶自适应光学技术的工程化研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2010：80-81.
Mu Q Q. Engineering research of the liquid crystal adaptive optics technology [D]. ChangChun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences, 2010:80-81. (in Chinese)

[11] 胡红斌. 液晶波前校正器的过驱动研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2013：37-42.
Hu H B. The research of the overdriving for the liquid crystal wavefront corrector [D]. ChangChun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences, 2013:37-42. (in Chinese)

[12] Xun X D, Cho D J, Robert W. Spiking voltages for faster switching of nematic liquid-crystal light modulators [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(32):3136-3143.

[13] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京：科学出版社，2003：100-103.
Liao Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003 :100-103. (in Chinese)

作者简介：张亚超（1989－）男，河南许昌人，硕士研究生，主要从事自适应光学技术研究。E-mail：zyc198902@gmail.com

平板显示与混合信号集成电路设计研究室

南开大学电光学院平板显示与混合信号集成电路设计研究室成立于 2013 年 8 月份，隶属于南开大学，教育部光电信息科学重点实验室，教育部光电子工程中心和光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室。由原来的南开大学光电子薄膜器件与技术研究所硅基微显示课题组和南开大学微电子工程系共同组成，专业方向为硅基微显示器件、微纳电子器件和数模混合集成电路设计。从 1998 年开始，该研究室在教育部和天津市科委支持下，在孙钟林先生的带领下，率先在国内开展了 LCoS 微显示技术的研究，2003 年研制成功中国大陆第一枚具有完全自主知识产权的投影用 LCoS 微显示器模块，天津电视台等多个国内媒体做过专题报导。2005 年研制成功中国大陆第一枚近眼显示用 FSC 模式 LCoS 微显示器模块。获授权和公开专利 20 余项，发表研究论文 200 余篇。目前研究团队有教授 2 人，副教授 6 人，讲师 2 人，具有博士学位教师 8 人。

本研究室主要研究方向：LCoS、OLEDoS 等硅基微显示器件与系统；视频处理及电路系统设计；微纳电子器件；射频和数模混合集成电路。研究室拥有微电子器件和集成电路设计、仿真和分析实验设备，包括 SUN880 服务器，DELL T410 服务器，曙光 A650G 塔式服务器，Blade2000 工作站，Leica INM 200 显微镜和 Proscan 步进微动台；拥有全定制集成电路前后端设计与仿真的主流 EDA 工具软件和 Filmshop Digitizer 版图图像采集软件等。



科技部副部长曹健林参观实验室



天津市委副书记邢元敏和天津市副市长杨栋梁一起参观实验室

地址：天津市南开区卫津路 94 号，南开大学光电子所
邮编：300071
电话：022-23505119(耿卫东)
邮箱：gengwd@nankai.edu.cn