快速响应液晶波前校正器的研究进展

彭增辉, 曹召良, 姚丽双, 穆全全, 刘永刚, 王启东, 李大禹, 宣丽*

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, 长春 130033

*联系人, E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2016-11-28; 接受日期: 2016-12-14; 网络出版日期: 2017-04-28

国家自然科学基金(编号: 61378075, 61377032, 61475152, 61405194)和应用光学国家重点实验室资助基金(编号: Y6133FQ161)资助

摘要 液晶波前校正器是一种对光波前进行调制的光学元件, 具有像素密度高、可靠性好、高精度等技术优点, 可用于光束波前整形、光信息处理、光束变换等, 具有非常大的应用潜力和广阔的应用前景. 当液晶波前校正器应用于光学系统时, 大多数情况下均要求它具有快速响应性能, 甚至要到1 ms量级; 此外, 要求校正器必须具有特定的调制量. 例如, 当在1 λ 调制量内实施响应时, 现有的在售液晶波前校正器的响应速度较慢, 通常大于10 ms, 阻碍了校正器的进一步应用. 对于液晶波前校正器, 其响应速度的影响因素主要有两个: 液晶材料参数和器件制备参数. 针对以上问题, 首先概述了本研究组在高双折射率(Δn)、低黏度快速响应液晶材料领域的研究进展; 其次介绍了我们在器件参数优化及驱动方式研究中提高其响应速度的研究进展. 基于上述研究工作, 目前液晶波前校正器的响应速度达亚毫秒量级, 这将大幅度提升它在应用光学领域的实用化水平, 并将拓展其应用范围.

关键词 液晶波前校正器, 快速, 液晶材料, 液晶器件

PACS: 42.70.Df, 42.79.Kr, 64.70.Pp, 42.79.Hp

1 引言

液晶波前校正器是一种基于液晶器件制作而成的光学元件, 它采用具有双折射性质的液晶材料作为调光介质. 当施加驱动电压后, 液晶分子将按照特定的形态进行排布, 导致器件的有效双折射率发生改变, 从而实现对光波位相的调制. 与传统的波前校正器变形镜相比, 液晶波前校正器具有如下优势^[1].

(1) 驱动单元多: 基于成熟的工业液晶显示器的集成电路工艺技术, 液晶波前校正器的像素数目可以很容易达到几百万个.

(2) 位相调制量大: 液晶波前校正器一般采用位相压缩法(Phase Wrapping)调制目标光, 调制量可以达到10 μm 以上.

(3) 驱动电压低: 液晶波前校正器的驱动电压一般在10 V以内, 容易与集成电路匹配.

(4) 调制精确: 由于液晶波前校正器是利用液晶分子的转动调制折射率, 实现波前位相调制, 其没有宏观的机械运动, 不存在过冲现象和迟滞效应, 故产生的波面精度高.

(5) 体积小重量轻: 液晶波前校正器采用芯片工艺制备, 体积非常小, 非常有利于自适应光学系统向

引用格式: 彭增辉, 曹召良, 姚丽双, 等. 快速响应液晶波前校正器的研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 084203
Peng Z H, Cao Z L, Yao L S, et al. The review of liquid crystal wavefront corrector with fast response property (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 084203, doi: 10.1360/SSPMA2016-00497

着小型化、微型化方向发展.

(6) 价格低廉: 变形镜单个驱动器平均约2000美元, 一个千单元变形镜的价格高达数百万美元. 而普通的液晶波前校正器的价格约在5万美元.

正是由于液晶波前校正器的上述优良特性, 它在自适应光学领域具有广阔的应用前景^[2]. 液晶波前校正器虽然具有巨大的应用优势, 但是其缺点同样明显. 由于液晶材料特性的限制, 其响应速度慢, 校正频率大约在几十赫兹. 当其应用到地基大口径望远镜上进行大气湍流校正时, 需要其具备千赫兹水平. 其还有一个明显的缺点是能量利用率低. 由于其只能对偏振光进行校正和液晶材料的色散特性, 导致其能量利用率约15%, 极大地限制了其在自适应光学系统中的应用.

针对能量利用率低的问题, 本研究组通过十余年的努力, 基于开环控制技术, 通过巧妙的光学系统设计, 使得其能量利用率提高到85%, 与其他变形镜系统相当^[3,4].

从20世纪90年代开始, 研究者就针对液晶波前校正器响应速度慢的问题开展了广泛的研究. 为了获得高的响应速度, 铁电液晶和双频液晶开始被考虑为校正器的液晶材料^[5-7], 其中双频液晶更被看好. 美国应用技术协会与空军实验室对双频液晶波前校正进行了系列的研究工作, 成功应用于观测国际空间站(轨道高度为400 km), 这是迄今为止最成功的液晶自适应光学系统应用实例^[8]. 该系统虽然使液晶响应速度实质性提高, 但双频液晶的驱动电压还较高, 不能与大规模集成电路匹配, 使像素数受限, 所以做成的自适应系统只有91像素. 近两年, 美国在集成电路技术上又取得了重要进步, Gu等人^[5]研制出大于500 Hz, 812像素双频液晶波前校正器; 美国BNS公司报道了1000 Hz, 256×256像素的双频液晶空间光调制器^[9], 但这种高电压集成电路新技术目前还未公开.

为了获得高速液晶波前校正器, 本研究组另辟蹊径, 从传统的向列相液晶材料入手, 通过合成新型的快速液晶材料, 来解决液晶波前校正器响应速度慢的问题. 本文主要综述了本研究组在快速响应液晶波前校正器方面的研究进展.

2 快速响应液晶材料的研究

液晶波前校正器的工作原理如下: 液晶分子在电

场作用下会发生0°–90°的连续转动, 引起液晶层有效折射率变化, 进而造成该像素区域光延迟的变化, 因此可实现对光学波前的调制. 液晶波前校正器的最大调制量为 $\Delta n d$ (Δn 为液晶材料的双折射率, d 为液晶层厚度), 见图1.

在液晶自适应光学中, 要求液晶波前校正器具有特定的调制量与响应速度. 一般情况下, 液晶波前校正器是通过相息图的方法实现波前校正, 施加的相息图可以将一个波长的调制量扩展成数十个波长, 来实现几微米的调制量^[10], 因此液晶波前校正器只要求具备 1λ 的调制量即可满足实用化要求, 即 $\Delta n d > 1\lambda$. 液晶器件的响应时间通常定义为上升时间、下降时间, 分别是指器件施加、释放电压时的响应时间. 由于加电的上升响应时间通常较短且可以通过实施过压驱动而变得更短; 所以下降响应时间决定着液晶校正器的响应速度, 它可表示为^[11]

$$\tau_{\text{decay}} = \frac{\gamma_1 d^2}{K_{11} \pi^2}, \quad (1)$$

式中, γ_1 为液晶的旋转黏滞系数(或黏度), K_{11} 为液晶的展曲弹性常数, d 为液晶层厚度(或器件厚度), 由公式可看出, 减小响应时间可通过降低液晶黏度 γ_1 、减小器件厚度 d 来实现.

现有商品化液晶波前校正器的响应时间均较长, 多为10 ms量级(依据调制波长不同而不同), 无法达到千赫兹的实用化水平, 因而需要提高液晶波前校正器的响应速度. 因为 $\Delta n d$ 需要大于等于 1λ , 所以可以提高液晶材料的 Δn 值来减小液晶层厚度 d , 获得快速响应. 总之, 高 Δn 、低黏度液晶材料是提高液晶波前校正器的响应速度的必要手段.

图1 液晶波前校正器的工作原理示意图
Figure 1 Schematic diagram of liquid crystal wavefront corrector.

从上述分析可知,快速液晶材料研究就是要制备高 Δn 、低黏度液晶材料.高 Δn 液晶化合物一般具有直线状的中心分子骨架,骨架中多包含苯环和炔键,这些化学结构可提升液晶分子的极化度强度,进而实现分子的高 Δn 值.Dabrowski等人^[12]认为在这种直线状液晶分子结构中,一个苯环大约会产生0.09的 Δn 值,一个炔键约产生0.07 Δn 值.此外,研究者还尝试着将液晶分子中的极性端基改造成共轭结构,这样在分子量、分子长度、熔点基本保持不变情况下,可进一步提升液晶化合物的 Δn 值.例如,氟代戊基联苯 Δn 值为0.09^[13],腈基(-CN)戊基联苯为0.19^[14],异硫氰酸酯基(-NCS)戊基联苯为0.26^[15].随着端基共轭结构的增加, Δn 值也逐渐增大.然而,-CN基团虽然可以增大化合物的 Δn 值,但-CN基在液晶态下容易形成二聚体,液晶化合物的黏度将大幅上升,并不适宜作为快速响应液晶材料.

2004年,英国的Hird等人^[16]、美国的Gauza等人^[17]均制备了环己基苯基异硫氰酸酯、三联苯基异硫氰酸酯等液晶化合物,具体化学结构如图2所示.这些液晶化合物的 Δn 值都在0.3–0.4之间,且黏度适中.此后,异硫氰酸酯作为快速响应液晶材料被广泛研究.

2008年,我们研究组开始进行高 Δn 值液晶化合物的研究.在研究中,一般采用有机化学方法制备目标结构的液晶化合物,将其溶于常用液晶材料分析其液晶性质.首先,我们制备了联苯基异硫氰酸酯类高 Δn 值液晶化合物,具体化学结构见图3.采用椭圆仪测定了液晶化合物的 Δn 值,正戊基联苯NCS化合物约为0.27.将NCS材料混入商品液晶材料TEB30A,混合液晶材料的 Δn 值提升,不同浓度下器件的响应速度均有不同程度地提升,最大提升幅度为20%,具体结果如图4所示^[18].

为了获得更高 Δn 值的液晶化合物,我们采用苯炔和对溴硝基苯制备了3种二苯乙炔基NCS液晶化合物,化合物结构见图5.这3种液晶化合物的 Δn 值在0.38–0.58之间,其中乙基苯基二苯乙炔基NCS化合物最高.将这3种液晶化合物溶于商品炔类液晶,可不同程度地降低液晶材料的黏度,显著提高响应速度.其中,端基为乙苯基的化合物对响应速度提升最为明显,为23%^[19].

为了定量描述液晶材料的响应性能,美国的Gauza等人^[17]提出了液晶材料的响应性能因子 FoM (Figure-of-Merit):

图2 异硫氰酸酯液晶化合物的初始分子结构
Figure 2 Molecular structures of preliminary isothiocyanate liquid crystal compounds.

图3 联苯基NCS液晶化合物的分子结构^[18]. (a) 无取代化合物; (b) 氟代化合物

Figure 3 Molecular structures of biphenyl isothiocyanate liquid crystal compounds^[18]. (a) Common compound; (b) fluorinated compound.

图4 (网络版彩图)戊基联苯基NCS化合物对液晶化合物响应时间的影响^[18]

Figure 4 (Color online) Response time comparison of mixed LC materials with n-pentyl biphenyl isothiocyanate^[18].

$$FoM = K_{11}\Delta n^2 / \gamma_1, \quad (2)$$

式中, Δn 为液晶材料的双折射率, γ_1 / K_{11} 称作黏弹系数. Δn 值越大、 γ_1 / K_{11} 值越小、 FoM 值越大,表示液晶材料的响应性能越好.为此,在后续研究中,我们采用该物理量来描述液晶化合物的响应性能.

为了进一步提高液晶材料的响应速度,我们制备了氟代苯基二苯乙炔基NCS液晶化合物^[20],具体分子结构见图6.这些液晶化合物的 Δn 值为0.40–0.54.在这系列化合物中,具有更多取代氟原子的液晶化合物具

图5 二苯乙炔基NCS液晶化合物的分子结构
Figure 5 Molecular structures of tolane isothiocyanate liquid crystal compounds.

图6 氟代苯基二苯乙炔基NCS液晶化合物的分子结构
Figure 6 Molecular structures of fluorinated phenyl-tolane isothiocyanate liquid crystal compounds.

有相对更低的熔点. 将这些高 Δn 液晶化合物溶于商品液晶材料时(浓度10%), 取代氟原子为1, 2的液晶化合物C3-1F, C3-2F显示出相对更低的黏度, 液晶化合物C3-2F显示出了最佳的响应性能. 图7为这些液晶化合物的响应性能对比.

从上述液晶化合物研究工作中, 可看出具有快速响应性能的液晶化合物的分子结构非常多, 若均通过化学法制备来优选响应性能好的液晶材料, 将会产生巨大的工作量. 为此, 我们采用了理论物理方法来计算液晶化合物的旋转黏度, 并分析其响应性能^[21]. 具体方法如下: 首先, 选择AMBER及GAFF势能模型(力场)进行分子动力学模拟. 接着, 采用分子动力学方法模拟液晶化合物从高温各向同性相降温形成液晶的过程、液晶相下平衡动力学过程, 计算出液晶分子在

此过程中的有序度序参数张量 Q , 进而可以计算出液晶体系的有序度 S , 根据有序度特征我们可以进一步确定模拟的化合物是否具有液晶态及相变点. 然后, 可计算出目标化合物在一段时间内的均方根位移值MSD, 可获得均方根位移随时间变化的斜率, 然后依据爱因斯坦公式计算其黏度, 对一系列的化合物进行模拟计算, 可分析出此类化合物黏度变化的定性、定量规律. 表1给出了溶解于5CB的联苯NCS液晶与二苯乙炔NCS液晶的黏度, 可以看出计算结果与实验值相符合.

基于分子模拟分析方法, 进一步寻找具有高响应性能的液晶化合物, 制备了双侧氟取代的苯基二苯乙炔NCS液晶化合物^[22], 其分子结构如图8所示, Δn 值为0.47–0.52. 图9是这些液晶化合物在不同温度下的响应性能, 结果表明, 端基为正丙基的化合物(1和2)具有更好的响应性能.

在制备了多种液晶化合物后, 我们制备了高 Δn 快速响应液晶混合物. 在研究中, 选择了低熔点的联苯基NCS液晶化合物与二苯乙炔NCS液晶化合物作为溶剂, 选择高熔点高 Δn 值的苯基二苯乙炔基NCS液晶化

图7 苯基二苯乙炔基NCS液晶化合物的响应性能比较^[20]
Figure 7 Response performance of the guest-host LC solution of six kinds of isothiocyanate LCs [20].

表1 理论模拟溶解于5CB的联苯NCS液晶与二苯乙炔NCS液晶的黏度^[21]
Table 1 Theoretical simulation viscosity values of biphenyl isothiocyanate LC and tolane isothiocyanate LC in 5CB solution [21]

液晶分子	分子数	指向矢均方根位移斜率(10^{-5})	旋转黏度 (mPa s)	γ_1, η (mPa s)
5CB[2FT]	172	9.39	1117.73	—
5CB_2FT	200	7.51	1379.53	1467.48, 1.66
5CB[2FP]	170	9.40	1101.28	—
5CB_2FP	200	8.75	1183.09	1203.54, 1.25

图8 双侧氟取代苯基二苯乙炔基NCS液晶化合物的分子结构

Figure 8 Molecular structures of phenyl-tolane isothiocyanate liquid crystal compounds with bilateral fluorine substitution.

图9 (网络版彩图) 双侧氟取代苯基二苯乙炔基NCS液晶化合物的响应性能比较^[22]

Figure 9 (Color online) Temperature-dependent FoM value of different LC mixtures with bilaterally substituted 4'-(4-alkylphenyl) tolane isothiocyanate LC compounds^[22].

合物作为溶质, 最终形成在室温条件下的向列相液晶混合物^[23], 其参数为: Δn 值0.35 ($\lambda=785$ nm), 向列相范围0°C–120°C, 制成1.8 μm 的液晶波前校正器后, 40°C下的响应速度为2.4 ms. 同等情况下, 研究者Gauza等人^[24]制备的混合液晶材料的响应速度为3.0 ms. 为了进一步提高液晶材料的响应速度, 我们选择了更多的低黏度高 Δn 值液晶化合物作为溶质, 最终形成混合液晶材料, 其参数为: Δn 值为0.37, 制成液晶波前校正器后其响应速度为1.4 ms^[25]. 在进一步的改进中, 我们将液晶混合物的 Δn 值提高到0.40 ($\lambda=785$ nm), 1 λ 响应时间可提高到1.0 ms (45°C).

3 器件参数优化

3.1 液晶层厚度的优化选取

在液晶自适应光学系统中, 期望液晶校正器实现

2 π 位相调制所用的时间最短. 为了获得最短的响应时间, 通过Ericsson-Leslie公式推出了液晶波前校正器一个波长下降响应时间公式^[26]:

$$t_{2\pi}(d) = -\tau_d \ln \left\{ \frac{1}{\bar{\theta}_{i_0}} \arcsin \left[\frac{1}{n_e^2 - n_o^2} \left(\frac{1}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \bar{\theta}_{i_0} + n_e^2 \sin^2 \bar{\theta}_{i_0}}} + \frac{\lambda}{dn_e n_o} \right) \right] - \frac{n_o^2}{n_e^2 - n_o^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中, n_e 和 n_o 分别为液晶分子长轴和短轴方向的折射率; $\bar{\theta}_{i_0}$ 是液晶分子的最大电压下的初始平均倾角, λ 为调制的目标光波长. 依据该公式计算了使用高双折射率液晶材料SG2制备透射式液晶波前校正器的最佳厚度, 在 $n_e=1.884$, $n_o=1.541$, $\gamma/K_{11}=8.310$ ms μm^{-1} , $\lambda=635$ nm, $\bar{\theta}_{i_0}=1.065$ rad的条件下, 计算结果如图10所示. 可以看出, 2 π 位相响应时间随盒厚的增加, 先下降然后再上升, 因而存在一个最佳盒厚. 从图中可看出, 器件的最佳厚度 d 为2.86 μm , 此时液晶校正器的响应速度最快. 图中的离散点为实验数据, 可以看出和理论结果有所偏差.

由于公式(3)中使用了对于初始液晶分子排列的平均预倾角, 图10中的实验和理论数据在某些区域存在较大误差. 为此, 采用差分迭代法计算液晶波前校正器的响应过程, 获得响应曲线后经变换获得不同厚度的 $t_{2\pi}$, 图11为理论与实验结果对比, 可看出两者符合得很好^[27].

3.2 过压驱动技术提高器件响应速度

公式(3)表述的响应时间并不涉及器件的驱动电压, 但实际上液晶波前校正器的最大驱动电压会影响参数 $\bar{\theta}_{i_0}$, 实验结果显示, 对于同一个液晶器件高压驱动将会减小1 λ 响应时间^[28], 并且最佳盒厚与响应时间随驱动电压的增加而减小; 对于同一个厚度为最佳盒厚的器件, 若将驱动电压由5 V增至10 V时, 响应时间缩短了10.6%, 若电压增至15 V甚至更高电压时, 响应时间的减小幅度会降低, 具体实验结果见图12.

基于驱动电压对响应速度的影响, 拟采用过压驱动技术来提高液晶波前校正器的响应速度. 液晶波前校正器在不同调制量之间切换响应时, 液晶分子指向矢的分布越接近平衡态时转动速度越慢, 严重的拖尾

图 10 (网络版彩图)1波长下降响应时间与器件厚度的关系^[26]

Figure 10 (Color online) The decay response time of 1λ retardation depending on thickness of LC device ^[26].

图 11 (网络版彩图)采用差分迭代法计算获得的1波长响应时间相对于 d 的变化^[27]

Figure 11 (Color online) The decay response time of 1λ retardation depending on thickness of LC device via finite-difference method ^[27].

现象使响应速度大大降低. 为此, 采用过驱动方法来提升液晶波前校正器的响应速度^[29]. 过压驱动的原理如图13所示, 在从灰度级 g_1 到 g_F 的转变中, 若直接施加 g_F 对应的电压则获得一个缓慢的、逐渐趋近响应; 若响应刚开始时施加更高(或更低)的中间灰度级 g_T 的电压, 当液晶器件响应到目标灰度级时, 再施加 g_F 对应的电压, 则可获得一个快速到达 g_F 灰度的响应.

利用该过压驱动技术, 可以把液晶波前校正器的大部分灰度之间的响应时间从1.0 ms降低到0.6 ms, 具体降低幅度示意图见 图14^[30].

图 12 驱动电压对液晶波前校正器响应时间的影响^[28]

Figure12 Response time of 1λ depending on the driving voltage of LC wavefront corrector ^[28].

图 13 (网络版彩图)液晶器件过压驱动的原理示意图^[29]. (a) 相对强度; (b) 灰度级

Figure 13 (Color online) Schematic diagram of overdriving method in LC device ^[29]. (a) Relative intensity; (b) gray level.

图 14 (网络版彩图)液晶器件过压驱动的效果示意图^[30]

Figure 14 (Color online) The overdriving result of liquid crystal device ^[30].

4 快速液晶波前校正器在自适应光学中的应用

基于快速液晶波前校正器的成功研制, 同时改进

了液晶自适应系统的波前处理速度、数据传输速度和系统控制算法, 最终研制出液晶自适应光学系统, 并在长春光机所的1.23 m望远镜上进行了多年的自适应观测校正实验. 该系统的误差抑制-3 dB带宽可达80 Hz, 能量利用率达85%, 和变形镜系统相当, 达到实用化水平. 在该系统中, 我们使用了响应速度约为0.8 ms的液晶波前校正器, 当系统用于1.2 m口径望远镜进行自适应光学成像时, 可观测4.5星等的恒星, 在 r_0 为5.3 cm的强湍流中700–950 nm波段的角分辨从校正前的2"提高到0.2"(图15), 是该望远镜衍射极限角分辨的1.3倍. 图为进行和未进行自适应校正时的恒星成像效果对比^[31].

图15 (网络版彩图) 1.23 m望远镜上恒星的液晶自适应成像分辨率(r_0 为5.3 cm)^[31]

Figure 15 (Color online) Image resolution of star in a 1.23 m telescope with liquid crystal adaptive optics systems (r_0 is 5.3 cm) [31].

5 结论

本文综述了我们研究组在快速响应液晶波前校正器制备研究方面的进展. 首先, 研究了快速响应的液晶化合物及液晶混合物. 通过化学法制备了烷基联苯基异硫氰酸酯、二苯乙炔基异硫氰酸酯、苯基二苯乙炔基异硫氰酸酯、氟代苯基二苯乙炔基异硫氰酸酯等几类液晶化合物, 化合物的 Δn 值为0.24–0.59, 远高于普通商用液晶材料, 这些化合物大部分可提升商用液晶材料的响应速度. 我们选择其中的7–9种化合物, 组成液晶混合物, 混合液晶材料的 Δn 值为0.37 ($\lambda=785$ nm), 制成校正器后响应时间为1.4 ms ($\lambda=785$ nm), 后续研究中我们将这一响应速度提高到1.0 ms; 其次, 我们研究了器件参数对于液晶波前校正器响应速度的影响. 理论和实验都显示液晶波前校正器存在最佳的器件厚度, 在最佳厚度下可获得1 λ 下降响应时间最小. 液晶波前校正器的驱动电压也会影响响应时间, 随着电压增大响应时间减小, 但超过10 V后变小幅度越来越小. 具有帧处理技术的过压驱动技术可大幅提升液晶波前校正器的调制效果, 一般可将响应时间缩短为原来的60%. 综合上述两个方面的结果, 液晶波前校正器的响应时间可改进为约0.6 ms ($\lambda=785$ nm), 这一响应速度已经接近于机械调光元件的速度, 在一定程度上为液晶波前校正器的实用化扫除了障碍.

参考文献

- 1 Tylson R K. Adaptive Optics Progress. InTech, Chapters Published, 2012
- 2 Xuan L, Li D Y, Liu Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application (in Chinese). Chin J Liquid Cryst Displays, 2015, 30: 1–9 [宣丽, 李大禹, 刘永刚. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望. 液晶与显示, 2015, 30: 1–9]
- 3 Mu Q, Cao Z, Hu L, et al. Novel spectral range expansion method for liquid crystal adaptive optics. Opt Express, 2010, 18: 21687
- 4 Cao Z, Mu Q, Hu L, et al. Optimal energy-splitting method for an open-loop liquid crystal adaptive optics system. Opt Express, 2012, 20: 19331
- 5 Gu D F, Winker B, Wen B, et al. Wavefront control with a spatial light modulator containing dual frequency liquid crystal. Proc SPIE, 2004, 5553: 68–82
- 6 Neil M A A, Booth M J, Wilson T. Dynamic wave-front generation for the characterization and testing of optical systems. Opt Lett, 1998, 23: 1849–1851
- 7 Tam E C, Wu S, Tanone A, et al. Closed-loop binary phase correction of an LCTV using a point diffraction interferometer. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2: 143–146
- 8 Dayton D, Gonglewski J, Restaino S, et al. Demonstration of new technology MEMS and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites. Opt Express, 2002, 10: 1508–1519
- 9 Serati S A, Xia X W, Mughal O, et al. High-resolution phase-only spatial light modulators with sub millisecond response. Proc SPIE, 2003, 5106: 138–145
- 10 Cao Z, Xuan L, Hu L, et al. Effects of the space-bandwidth product on the liquid-crystal kinoform. Opt Express, 2005, 13: 5186–5191
- 11 Jakeman E, Raynes E P. Electro-optic response times in liquid crystals. Phys Lett A, 1972, 39: 69–70

- 12 Dąbrowski R, Kula P, Herman J. High birefringence liquid crystals. *Crystals*, 2013, 3: 443–482
- 13 Schmidt W, Vögtle F, Poetsch E. Spiro units as building blocks in thermotropic liquid crystals: Synthesis and physical properties of terminally substituted spiro[5.5] undecanes. *Liebigs Ann*, 1995, 1995: 1319–1326
- 14 Gray G W, Harrison K J, Nash J A. Stable low melting nematogens of positive dielectric anisotropy for display devices. In: *Liquid Crystals and Ordered Fluids*. New York: Plenum Press, 1974. 142–142
- 15 Peng Z H, Zhang R, Liu Y G, et al. Preparations and properties of isothiocyanate liquid crystal materials with two benzene ring (in Chinese). *Chin J Liquid Cryst Displays*, 2009, 24: 630–634 [彭增辉, 张然, 刘永刚, 等. 双环NCS液晶的合成与性质研究. *液晶与显示*, 2009, 24: 630–634]
- 16 Hird M, Toyne K J, Goodby J W, et al. Synthesis, mesomorphic behaviour and optical anisotropy of some novel materials for nematic mixtures of high birefringence electronic supplementary information (ESI) available: Experimental procedures for all compounds not already given in this paper. *J Mater Chem*, 2004, 14: 1731
- 17 Gauza S, Wang H, Wen C H, et al. High birefringence isothiocyanato tolane liquid crystals. *Jpn J Appl Phys*, 2003, 42: 3463–3466
- 18 Peng Z H, Liu Y G, Cao Z L, et al. Preparations and properties of isothiocyanate fluorinated liquid crystal materials with two benzene ring (in Chinese). *Chin J Liquid Cryst Displays*, 2010, 25: 622–625 [彭增辉, 刘永刚, 曹召良, 等. 含氟双环NCS液晶的合成与性质研究. *液晶与显示*, 2010, 25: 622–625]
- 19 Peng Z H, Liu Y G, Yao L S, et al. Synthesis and liquid crystal properties of isothiocyanate tolane compounds (in Chinese). *Chin J Liquid Cryst Displays*, 2011, 26: 427–431 [彭增辉, 刘永刚, 姚丽双, 等. 二苯乙炔基异硫氰酸酯的合成与液晶性质研究. *液晶与显示*, 2011, 26: 427–431]
- 20 Peng Z H, Yao L S, Mu Q Q, et al. Synthesis and properties of fluorinated isothiocyanate phenyl-tolane liquid crystal compounds (in Chinese). *Chin J Liquid Cryst Displays*, 2013, 28: 479–483 [彭增辉, 姚丽双, 穆全全, 等. 氟代苯基二苯乙炔基异硫氰酸酯的合成与液晶性质研究. *液晶与显示*, 2013, 28: 479–483]
- 21 Wang Q D, Peng Z H, Liu Y G, et al. Rotational viscosity comparison of liquid crystals based on the molecular dynamics of mixtures (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 126102 [王启东, 彭增辉, 刘永刚, 等. 基于混合液晶分子动力学模拟比较液晶分子旋转黏度大小. *物理学报*, 2015, 64: 126102]
- 22 Peng Z, Wang Q, Liu Y, et al. Electrooptical properties of new type fluorinated phenyl-tolane isothiocyanate liquid crystal compounds. *Liquid Cryst*, 2016, 43: 276–284
- 23 Xuan L, Peng Z H, Liu Y G, et al. The preparation method of liquid crystal materials used in the liquid crystal wavefront corrector (in Chinese). PRC Patent, CN201210046752.2, 2013-11-27 [宣丽, 彭增辉, 刘永刚, 等. 用于液晶波前校正器的快速响应液晶材料及制备方法. 中国专利, CN201210046752.2, 2013-11-27]
- 24 Gauza S, Li J, Wu S T, et al. High birefringence and high resistivity isothiocyanate-based nematic liquid crystal mixtures. *Liquid Cryst*, 2005, 32: 1077–1085
- 25 Xuan L, Peng Z H, Zhang Z Y, et al. The molecular design and mixture design of fast response liquid crystal materials used in liquid crystal wavefront correctors (in Chinese). PRC Patent, CN201310704962.0, 2014-4-16 [宣丽, 彭增辉, 张智勇, 等. 快响应液晶伴侣的分子设计与混合设计. 中国专利, CN201310704962.0, 2014-4-16]
- 26 Peng Z, Liu Y, Yao L, et al. Improvement of the switching frequency of a liquid-crystal spatial light modulator with optimal cell gap. *Opt Lett*, 2011, 36: 3608
- 27 Wang Q, Peng Z, Fang Q, et al. Response time improvement of liquid-crystal wavefront corrector using optimal cell gap of numerical computation. *Opt Commun*, 2013, 305: 236–239
- 28 Qi M J, Wang Q D, Mu Q Q, et al. Study of response time depending on driving voltage of liquid crystal spatial light modulator (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2013, 50: 092302 [齐梦娇, 王启东, 穆全全, 等. 驱动电压对液晶空间光调制器响应时间影响的研究. *激光与光电子学进展*, 2013, 50: 092302]
- 29 Yao L, Mu Q, Peng Z, et al. Optimising response of liquid crystal corrector with digital overdriving technique. *Liquid Cryst*, 2013, 40: 817–821
- 30 Hu H, Hu L, Peng Z, et al. Advanced single-frame overdriving for liquid-crystal spatial light modulators. *Opt Lett*, 2012, 37: 3324
- 31 Cao Z, Mu Q, Hu L, et al. Optimal energy-splitting method for an open-loop liquid crystal adaptive optics system. *Opt Express*, 2012, 20: 19331

The review of liquid crystal wavefront corrector with fast response property

PENG ZengHui, CAO ZhaoLiang, YAO LiShuang, MU QuanQuan,
LIU YongGang, WANG QiDong, LI DaYu & XUAN Li^{*}

*State Key Laboratory of Applied Optics, The Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*

Liquid crystal wavefront corrector (LCWFC) is an optical device that can modulate wavefront of incident light, and shows advantages of high density pixels, high reliability, and high precision accuracy, and can be used in the field of optical beam shaping, optical information processing and beam transforming. All these application model show broad application prospect of LCWFC. When LCWFC is used in the optics systems, a fast response speed is always required, such as 1 ms. In optical application, specific modulation depth is always required. If the modulation depth is 1λ , the response time of the commercial LCWFC is slow, such as, 10 ms, which block the application of LCWFC. The response speed of LCWFC always depends on two elements, the properties of LC material and the parameters of LC device. Firstly, fast response liquid crystal material with high birefringence and low viscosity was studied and reviewed in our research group. Secondly, the optimization of LC device parameters and driving method was reviewed. By the research in LC material and device, the response time of LCWFC can be fast to sub-millisecond, which will highly enhance the application region and depth of LCWFC.

liquid crystal wavefront corrector, fast response, liquid crystal materials, liquid crystal devices

PACS: 42.70.Df, 42.79.Kr, 64.70.Pp, 42.79.Hp

doi: [10.1360/SSPMA2016-00497](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00497)