

文章编号:1007-2780(2009)01-0015-07

快速高双折射率向列相液晶的分子设计与模拟计算

何 军^{1,2}, 张 然^{1,2}, 鲁兴海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 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 当前液晶自适应光学系统还不能满足校正大气湍流频率(>40 Hz)的要求,这主要受限于 LCOS 器件的响应速度(10~20 ms)和位相调制量超过 1λ 的系统要求。研制新型快速高双折射率向列相液晶材料是解决这一问题的根本方案。本文从分子结构上探讨了影响液晶粘度和双折射率的一般规律。在此基础之上,设计了两种低粘度、高双折射率的液晶分子。通过使用 AM1 半经验量子化学算法进行了模拟计算,预测了所设计的液晶材料的 Δn 和 $\Delta\epsilon$ 值。模拟结果说明,这两种结构的液晶材料能够很好地满足自适应系统的要求。

关 键 词: 快速;高双折射率;向列相;液晶

中图分类号: O753⁺.2; Tb133 **文献标识码:** A

1 引 言

当前的液晶自适应光学系统还不能满足校正大气湍流频率(>40 Hz)的要求,其问题主要是 LCOS 中液晶材料的响应速度较慢,使得系统校正周期长达 20~30 ms,对应校正频率为 30~50 Hz,可校畸变频率 <10 Hz。研制新型快速响应向列相液晶材料是解决问题的根本方案。要想满足自适应光学系统的要求,液晶器件的响应时间必须小于 5 ms,同时位相调制量要达到 800 nm 以上。

TN 型液晶器件的响应时间公式为: $\tau_{\text{off}} = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 K}$,其中 γ_1 、 d 、 K 分别代表粘度、盒厚和弹性常数。由公式可看出,响应时间 τ_{off} 与粘度 γ_1 、盒厚 d 和弹性常数 K 有关。在盒厚固定的情况下,弹性常数一般变化不大,可视为定值。因此响应时间主要由粘度 γ_1 决定,为减小响应时间,须降低粘度 γ_1 。

光学位相调制量的计算公式为 $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d$ 。LCOS 器件中,盒厚 d 一般固定在 2.5 μm ,因此为保证足够的位相调制量($>1\lambda$),通常要求液晶

材料的折射率差 $\Delta n > 0.2$ 。

基于以上分析,新材料的研究应重点放在降低粘度 γ_1 和保持 $\Delta n > 0.2$ 两个方面。

近年来,研究人员已经开展了对高 Δn 液晶材料的研究。吴诗聪^[1]总结了含氟联苯联乙炔和二苯乙炔类液晶材料的物理性质。Michael Hird^[2]等人总结了不同取代基对液晶 Δn 的影响。Sebastian Gauza^[3]等人总结了氟在侧链不同位置对高 Δn 液晶材料的影响。A. Spadlo^[4]等人合成了具有高 Δn 的硫氢基类液晶。上述文章中介绍的液晶材料的 Δn 一般都在 0.3 以上,然而对高 Δn 材料的快速响应特性却很少关注。

高 Δn 材料普遍存在粘度高的缺点,而高粘度则会造成响应速度的下降。液晶材料的高 Δn 与高响应速度之间一直是难以解决的矛盾,限制了液晶在自适应光学中的应用。如何在增大 Δn 的同时加快材料的响应速度是本文研究的主要内容。

2 影响液晶粘度与双折射率的因素以及液晶分子的设计

2.1 影响液晶双折射率的因素

吴诗聪等人从联系极化率和折射率关系的

收稿日期:2008-07-04; 修订日期:2008-10-07

基金项目:国家自然科学基金(No. 60578035,50703039,60736042);吉林省自然科学基金(No. 20050520,20050321-2)

* 通讯联系人,E-mail:xuanli@ciomp. ac. cn

Vuks 方程出发^[5],得出以下结论: Δn 主要取决于由不饱和键组成的共轭结构的长短。他们的实验也表明,随着共轭体系长度的增加,吸收向长波方向移动, Δn 进一步增大。

典型的液晶分子由尾链、刚性部分和极性基 3 部分组成。尾链主要影响清亮点和中间相出现的温度范围。因此,为延长液晶分子的共轭长度,需要考虑刚性部分与极性基对液晶双折射的影响。

首先在刚性部分方面,延长共轭长度的办法有:(1)增加苯环数量,延长刚性部分的长度;(2)在分子刚性部分引入碳碳三键(—≡—)。

对极性取代基相同、刚性链长度不同的液晶材料进行了比较,如图 1 所示,随着苯环数量的增加,共轭长度增长, Δn 随之增大。

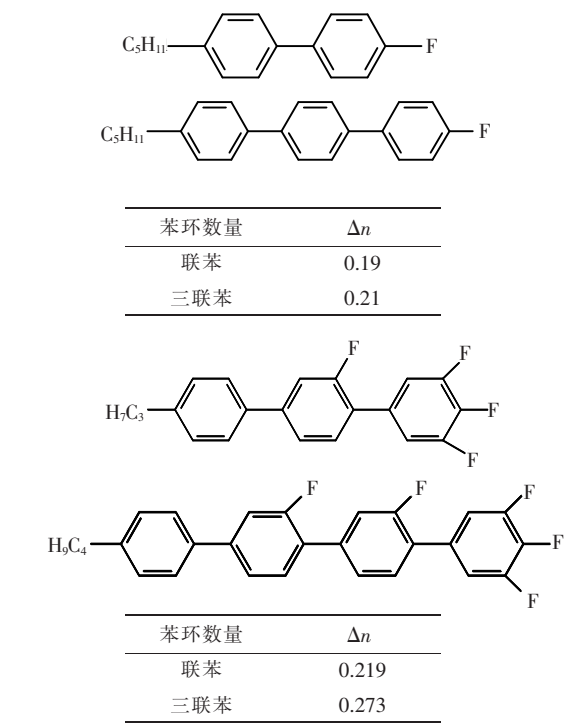


图 1 极性取代基为 F 的液晶系列的 Δn 比较
Fig. 1 Comparison of Δn of fluorine series

其次,在极性取代基方面,使用硫氰基作为极性取代基可延长分子的共轭长度,增大 Δn 。常见的极性取代基有氟基(—F)或含氟基团、氰基(—CN)和硫氰基(—NCS)。

由图 2 可知,随取代基不同, Δn 也不同。同系列材料中,含 F 取代基的 Δn 最小,氰基居中,硫氰基最大。

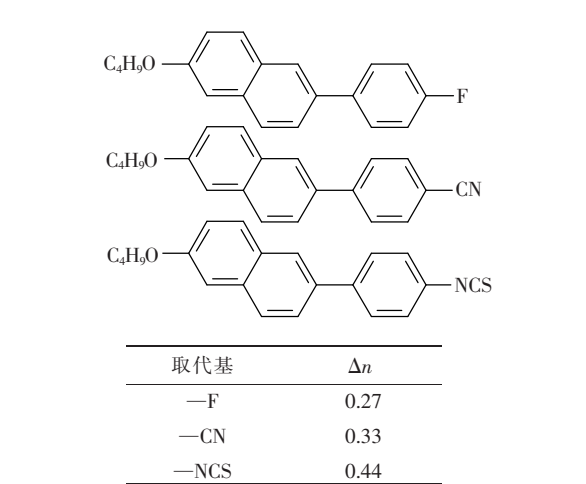


图 2 丁烷氧基萘环系列的 Δn 比较
Fig. 2 Comparison of Δn of butyl alkoxy naphthalene series

为了增大 Δn ,氰基(—N)和硫氰基(—NCS)是经常被引入的极性基团,这主要是因为它们能延长分子中 π 电子共轭体系的长度。由于存在更长的 π 电子共轭长度,硫氰基材料的 Δn 要比相应的氰基材料大。另外,氰基中碳、氮三键之间极化作用很强,碳氮之间形成的 Huckel 电荷很强,造成内部分子相互作用很强,形成二聚物,这使得含氰基材料粘度相对较高。而硫氰基的偶极矩 μ ($1.23 \times 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m}$)要比氰基($1.33 \times 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m}$)低,氮、碳、硫之间形成的 Huckel 电荷比较弱,硫氰基材料中内部分子相互作用要比氰基弱,不会形成二聚物,因此硫氰基液晶材料的粘度比氰基更低。另外,硫氰基材料还具有高电阻率(提高电压保持率 VHR)的优点。

2.2 影响液晶粘度的因素

液晶在上升沿和下降沿的响应时间公式分别为:

$$\tau_{\text{on}} = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 K \left(\frac{V_{\text{on}}^2}{V_{\text{th}}^2} - 1 \right)} \tag{1}$$

$$\tau_{\text{off}} = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 K} \tag{2}$$

其中, γ_1 、 d 、 K 、 V_{on} 、 V_{th} 分别代表粘度、盒厚、弹性常数、所施加的电压和阈值电压。

液晶的弛豫时间 τ_{off} (不加电场,靠自身弹性力恢复)相比加电场时的响应时间 τ_{on} 要高 1 个数量级,因此,降低液晶整体响应时间的关键是在减小弛豫时间 τ_{off} 上。由公式(2)可看出,弛豫时间

τ_{off} 与粘度 γ_1 、盒厚 d 和弹性常数 K 有关。在盒厚固定的情况下,弹性常数一般变化不大,可视为定值。因此弛豫时间主要由粘度决定,为减小弛豫时间,必须降低粘度 γ_1 。

经过大量的调研^[6-11],对文献中提供粘度值的液晶分子结构进行分析、归纳,初步总结了一些减小粘度的方法:

(1)减小分子长度可降低粘度。

常用的液晶材料分为双环、三环、四环和杂环结构,它们的粘度特性也不相同。表 1 归纳了液晶粘度与环结构的大致关系。

表 1 各结构粘度值比较

Table 1 Comparison of viscosity under the effect of core

刚性链结构	种 类	粘度(mpa. s)
双环	21 含氟基团($\Delta\epsilon < 5$)	20~50
	含氟基团($\Delta\epsilon > 5$)	20~50
	含氟基团	50~100
	含氧基基团	100~200
三环	33 有中心桥键(14 种)	90~250
	无中心桥键(19 种)	110~300
四环	5	250~500

从双环、三环、四环结构的比较可以看出,随着刚性链长度的增加,液晶的粘度增大。因此,为减小粘度,应尽量选择分子长度小的结构。

(2)选取 $\Delta\epsilon$ (介电各向异性)较小的分子结构。通过图 3 可以看出,结构相似的液晶材料 $\Delta\epsilon$ 越小,粘度越低。虽然不同分子结构之间没有类似的规律,但这也能在一定程度上说明 $\Delta\epsilon$ 小的液晶分子会有较低的粘度。

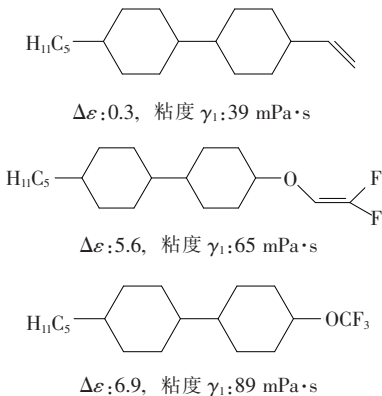


图 3 $\Delta\epsilon$ 对粘度的影响(结构 1)

Fig. 3 Effect of $\Delta\epsilon$ on viscosity (structure 1)

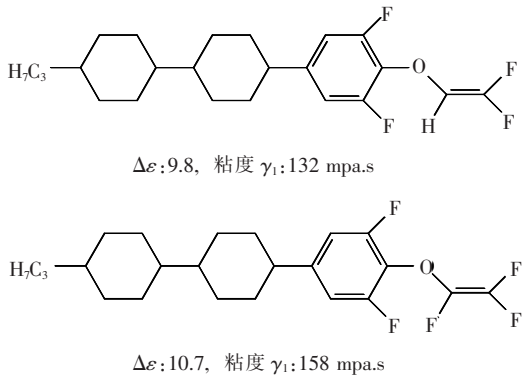


图 4 $\Delta\epsilon$ 对粘度的影响(结构 2)

Fig. 4 Effect of $\Delta\epsilon$ on viscosity (structure 2)

(3)在极性基方面,相比氰基(—CN)和硫氰基(—NCS),用氟(—F)或含氟化合物作为取代基可降低粘度。

正如上文所述,相比氰基,硫氰基液晶材料的粘度更低。而含氟液晶的介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 要比相应的含氰基液晶材料小 2~3 倍,这主要是因为氰基的偶极矩 ($1.33 \times 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m}$) 几乎是氟 ($4.66 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$) 的 3 倍。所以含氟液晶材料中内部分子相互作用要比含氰基材料弱得多,含氟液晶材料的粘度要比相应的含氰基材料约低 2~3 倍。

2.3 快速高双折射液晶材料分子结构的设计

经过上面的分析讨论,在设计低粘度、高 Δn 的液晶分子结构时,应该遵循以下原则:

(1)分子长度不能过长,也不能过短。过长会导致粘度升高,过短会导致 Δn 降低。一般多使用二环或三环结构。

(2)使用介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 小的分子结构。尽管通常情况下, $\Delta\epsilon$ 越小,粘度越低,但相应的阈值电压 V_{th} 却会增大。这是因为 $V_{\text{th}} = \pi \sqrt{\frac{K_{\text{eff}}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}}$ (其中 K_{eff} 是有效弹性常数), V_{th} 增大,会造成驱动电压的升高,功耗加大。同样, $\Delta\epsilon$ 越大,尽管会降低 V_{th} 和功耗,但粘度却会升高。因此,设计分子结构时, $\Delta\epsilon$ 也不能太小,通常 TN 液晶器件中的材料 $\Delta\epsilon$ 为 4~8 之间。

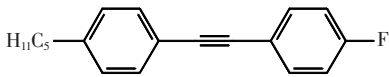
(3)可在刚性链部分适当引入中心桥键(例如炔基),以在减小苯环数量的同时,弥补其带来 Δn 下降的损失,并能降低粘度。

(4)极性基部分,可使用含氟基团或硫氰基团

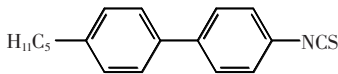
(—NCS)。之所以不使用氰基(—CN),是因为在粘度方面,氰基材料的粘度最高,硫氰基居中,含氟材料最低。而在 Δn 方面,氰基尽管比含氟材料要大,但与硫氰基比较,相似结构的硫氰基材料要比氰基材料的 Δn 大。因此,综合考虑,选用在增大 Δn 方面优势明显的硫氰基和降低粘度方面优势明显的含氟基团。

根据上述原则,设计了以下 2 种结构:

(1)以含氟基团作为极性取代基,在苯环之间引入碳碳三键的结构。含氟基团作为极性取代基是为了降低粘度,而引入碳碳三键则是为了增大 Δn 。



(2)以硫氰基作为极性取代基,无中心桥键的结构(刚性链部分是两个苯环)。使用硫氰基作为极性取代基是为了增大 Δn ,不引入中心桥键是为了降低粘度。



3 液晶双折射与介电各向异性的模拟计算

3.1 液晶材料性能模拟的基本理论

液晶双折射的计算是通过 Vuks^[5,12] 方程实现的。Vuks 把用来描述各向同性体系的 Lorentz-Lorentz 方程推广到了各向异性系统中:

$$\begin{aligned} \frac{n_e^2 - 1}{n^2 + 2} &= \frac{N}{3\epsilon_0} \left(\alpha + \frac{2\Delta\alpha S}{3} \right) \\ \frac{n_o^2 - 1}{n^2 + 2} &= \frac{N}{3\epsilon_0} \left(\alpha - \frac{2\Delta\alpha S}{3} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

这里 $n^2 = (n_e^2 + 2n_o^2)/3$ 。 n_e 和 n_o 分别是对应于非寻常光和寻常光的分子主轴方向的折射率,光学各向异性(birefringence) $\Delta n = n_e - n_o$ 。分子的平均极化率 $\alpha = (\alpha_{//} + 2\alpha_{\perp})/3$ 。 $\Delta\alpha = \alpha_{//} - \alpha_{\perp} = \alpha_{xx} - (\alpha_{yy} + \alpha_{zz})/2$,代表极化率各向异性(分子沿 xx 轴方向具有最小的转动惯量分量)。 S 是 Saupe 取向有序度参数, ϵ_0 是真空介电常数, N 是单位体积内的分子数。在 Vuks 方程中,局域场被假定为各向同性的。尽管该方程不是严格推导得出的,但这一假设后来被实验所证实。该方程已被广泛应用于向列相液晶的研究。

液晶介电各向异性的计算是通过 Maier-Meier 理论^[13] 实现的。Maier-Meier 拓展了描述各向同性电介质的极化的 Onsager 模型,把液晶分子的介电各向异性同其极化率各向异性,偶极矩(μ)及其在分子结构中的取向和分子的取向有序度 S 联系在了一起:

$$\Delta\epsilon = NhF \left\{ \Delta\alpha - \frac{F\mu^2}{2kT} (1 - 3\cos^2\beta) \right\} S \tag{4}$$

这里 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 分别是平行和垂直于指向矢方向的介电常数。 k_B 为波尔兹曼(Boltzmann)常数。 β 是分子偶极矩和转动惯量主轴之间的夹角。反应场因子 $F = 1/(1 - f\alpha)$,其中 $f = (\epsilon - 1)/2\pi\epsilon_0 a^3 \times (2\epsilon + 1)$ 。空腔因子 $h = 3\epsilon(2\epsilon + 1)$ 。 a 为球形空腔的半径,在 Onsager 近似下有 $(4/3)\pi Na^3 = 1$ 。静态介电常数 ϵ 根据 Lorentz-Lorentz 公式得到:

$$\epsilon = (3\epsilon_0 + 2\alpha N)/(3\epsilon_0 - \alpha N) \tag{5}$$

3.2 常用液晶 5CB 的模拟计算

为验证上述方法计算的可靠性,首先以常用液晶材料 5CB 为例,进行模拟计算。

由于对不同的构型, Δn 和 $\Delta\epsilon$ 的计算结果并没有实质的差别^[14],因此本文只对 5CB 的全反构型(all-trans conformation)——其最稳定的构型,进行了计算。计算中采用了以下近似:温度为 298 K(25 ℃),密度为 1 g/cm³。室温下,序参数 S 与液晶的清亮点 T_{NI} 存在以下经验关系^[15]:

$$S = 0.361 \lg T_{NI} \tag{6}$$

5CB 的 $T_{NI} = 35.3$ ℃,代入上式得到的有序度近似为 0.56。

利用半经验量子化学 AM1 方法,我们分别得

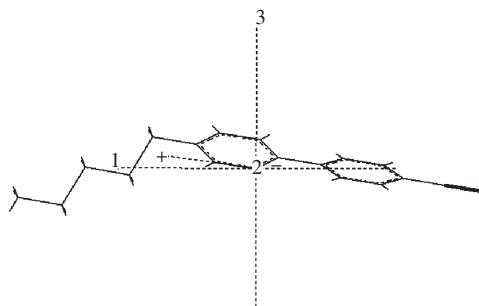


图 5 AM1 计算得到的 5CB 的最稳定构型。图中 1,2,3 为分子的转动惯量主轴(2 垂直纸面),+ 和 - 代表分子偶极矩的方向。

Fig. 5 The most stable conformation of 5CB calculated by AM1. 1, 2, 3 are the inertial principle axis, + and - denotes the orientation of the dipole moment.

表 2 5CB 计算和实验数据比较

Table 2 Comparison of 5CB parameters between calculation and experiment

参数	$\alpha(\text{a. u.})$	$\Delta\alpha(\text{a. u.})$	$\mu(\text{Debye})$	$\beta(^{\circ})$	Δn	$\Delta\epsilon$
计算值	171.90	178.320 3	4.202	8	0.194	11.462
实验值	220.06	183.580 0	4.760		0.180	11.500

到了 5CB 的最稳定构型,其惯量主轴和偶极矩的方向如图 5 所示。 $\alpha, \Delta\alpha, \mu, \beta$ 的结果显示在表 2 中。

尽管计算数据与实验数据在 $\alpha, \Delta n$ 参数上存在较大偏差, Δn 有一定程度的高估(7.8%),但在 $\Delta\alpha, \mu$ 和 $\Delta\epsilon$ 参数上却相当吻合,存在偏差的原因是:计算中采取了许多近似;虽然对 5CB 的全反构型进行了计算,但未考虑实际情况下其他构型对材料特性的影响;计算只是针对一个分子进行的,也没有考虑实际情况下分子间相互作用对分子极化率与偶极矩的影响。但通过求解 Vuks 方程和 Maier-Meier 方程,仍然得到了令人满意的结果。因此,可以利用这种模拟计算方法对所设计分子进行预测。

3.3 快速高双折射液晶分子的模拟计算

对于设计分子的模拟计算,同样采取以下近似:温度为 298 K(25 $^{\circ}\text{C}$),密度为 1 g/cm³。但无法采用式(6)进行有序度近似,根据大部分液晶材料的有序度在 0.6~0.7 之间,本文令 $S=0.7$ 。

第一种分子结构模拟计算微观参数如下:

极化率 $\alpha=194.8$ (a. u.), 偶极矩 $\mu=2.277$ (Debye), $\beta=6^{\circ}$ 。

极化率分量以矩阵形式表示:

$$\begin{pmatrix} 299.398\ 12 & 86.170\ 71 & 0.000\ 39 \\ 86.177\ 08 & 225.489\ 3 & 0 \\ 0.004\ 5 & 0.004\ 13 & 59.582\ 97 \end{pmatrix}$$

即 $\alpha_{xx}=356.207\ 1, \alpha_{yy}=168.680\ 3, \alpha_{zz}=59.583\ 0$, 则 $\Delta\alpha=\alpha_{xx}-(\alpha_{yy}+\alpha_{zz})/2=178.320\ 3(\text{a. u.})$ 。

通过求解 Vuks 方程和 Maier-Meier 方程,可求得: $\Delta n=0.3, \Delta\epsilon=4.9$ 。

同样,第二种分子结构模拟计算微观参数如下:

极化率 $\alpha=217.7(\text{a. u.})$, 偶极矩 $\mu=2.601$

(Debye), $\beta=8^{\circ}$ 。

极化率分量以矩阵形式表示:

$$\begin{pmatrix} 278.728\ 5 & 135.443\ 56 & 15.636\ 1 \\ 135.423\ 87 & 257.051\ 67 & 76.572\ 7 \\ 15.635\ 47 & 76.575\ 25 & 117.387\ 84 \end{pmatrix}$$

即, $\alpha_{xx}=417.497\ 5, \alpha_{yy}=164.586\ 0, \alpha_{zz}=71.084\ 5$, 则 $\Delta\alpha=\alpha_{xx}-(\alpha_{yy}+\alpha_{zz})/2=299.662\ 3(\text{a. u.})$ 。

通过求解 Vuks 方程和 Maier-Meier 方程,可求得: $\Delta n=0.35, \Delta\epsilon=6.1$ 。

表 3 系统要求液晶参数与设计液晶分子对比

Table 3 Comparison of liquid crystal parameters between system requested and designed molecular

材料特性要求	$\Delta n(>0.2)$	$\Delta\epsilon(4\sim8)$
分子结构 1	0.30	4.9
分子结构 2	0.35	6.1

由表 3 可知,本文设计的两种向列相液晶分子能够满足液晶自适应光学系统的要求。

4 结 论

在分析液晶自适应光学系统对液晶材料的要求的基础上,分析总结了影响液晶粘度、双折射的一般规律。根据自适应系统要求,设计了两种液晶分子结构。通过对常用液晶材料 5CB 的模拟,验证了 AM1 半经验算法的可靠性,进而对所设计分子进行了模拟预测。模拟结果表明,这两种结构的液晶材料能够满足液晶自适应光学系统的要求,可以作为下一步的合成目标。

快速高 Δn 向列相液晶材料的研究可以大幅提高液晶自适应光学系统的响应速度,满足由大气湍流引起的波前畸变的校正要求,把液晶自适应光学领域的研究推进到一个新的高度。

参 考 文 献:

[1] Wu Shin-Tson. High birefringence and wide nematic range bis-tolane liquid crystals [J]. *Appl. Phys.*, 1999,73

- (3);344-346.
- [2] Michael Hird, Kenneth J Toyne, John W Goodby, *et al.* Synthesis, mesomorphic behaviour and optical anisotropy of some novel materials for nematic mixtures of high birefringence [J]. *J. Mater. Chem.*, 2004,14;1731-1743.
- [3] Sebastian Gauza, Yang Zhao, Tatiana Le Cor, *et al.* Enhancing birefringence by doping fluorinated phenyltolanes [J]. *J. Display Technology*, 2006,4(2);327-332.
- [4] Spadlo A, Dabrowski R, Dziaduszek J, *et al.* Liquid crystalline materials with high birefringence [J]. *J. Opt. Technol.*, 2005,72(9);659-661.
- [5] Wu Shin-Tson, Wu Chiung-S. A three-band model for liquid-crystal birefringence dispersion [J]. *Appl. Phys.*, 1989,66(11);5297-5301.
- [6] Kirsch P, Bremer M, Huber F, Lannert H. Nematic liquid crystals with a tetrafluoroethylene bridge in the mesogenic core structure [J]. *Am. Chem. Soc.*, 2001, 123(23); 5414-5417.
- [7] Haruyoshi Takatsu. Development and industrialization of liquid crystal materials [J]. *Proc. SPIE.*, 2005, 5936; 59360U1-9.
- [8] Yong Bae Kim, Kook Huh. High-speed response time of LC mixtures containing fluoro-isothiocyanato liquid crystal compounds for LCD monitor and TV applications [J]. *Proc. SPIE.*, 2002, 4658; 67-78.
- [9] Sekine Chizu, Ishitobi Masamitsu, Iwakura Kazunori, *et al.* Novel high birefringence dibenzothiophenylacetylene liquid crystals [J]. *Liq. Cryst.*, 2002, 29(3);355-367.
- [10] Schadt Martin. Liquid crystal materials and liquid crystal displays [J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1997, 27(1);305-379.
- [11] Tarumi K, Bremer M, Geelhaar T. Recent liquid crystal material developnebt for active matrix displays [J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1997, 27(1); 423-441.
- [12] Simpson S H, Richardson R M, Hanna S. Calculation of the birefringence of nematic liquid crystals at optical and infrared wavelengths [J]. *Chem. Phys.*, 2005,123(13904); 1-11.
- [13] Maier W, Meier G Z. A simple theory of the dielectric characteristics of homogeneous oriented crystalline liquid phases of the nematic type [J]. *Z. Natureforsch*, 1961, 16a; 262.
- [14] Dietrich Demus, Takashi Inukai. Calculation of molecular, dielectric and optical properties of 4'-n-pentyl-4-cyano-biphenyl (5CB) [J]. *Liq. Cryst.*, 1999, 26(9); 1257-1266.
- [15] Dietrich Demus, Takashi Inukai. Quantum chemical calculations in industrial liquid crystal research [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2003, 400(1); 39-58.

Molecular Design and Simulation of Nematic Liquid Crystal of Fast Response and High Birefringence

HE Jun^{1,2}, ZHANG Ran^{1,2}, LU Xing-hai¹, XUAN Li¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract

At present liquid crystal adaptive optical system can not meet the requirement of correcting atmospheric turbulence frequency (>40 Hz), which is mainly limited by response time of liquid crystal in LCOS (10~20 ms), meanwhile, phase modulation range should exceed 1λ . Hence the urgent need is to develop new nematic liquid crystal of fast response and high birefringence. This paper sum-

Key words: fast response; high birefringence; nematic; liquid crystal

作者简介:何军(1981—),男,内蒙古锡林浩特人,硕士研究生,主要研究方向为快速液晶材料。

http://www.opec.net.cn