

文章编号: 0253-2239(2007)02-0329-6

螺状相液晶旋光特性理论模拟与实验研究

刘厚通^{1,2} 李国华¹ 郝殿中¹

(¹ 曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165
² 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 利用旋光理论模拟了一种用于螺状相液晶显示器(CH-LCD)的螺状相液晶的旋光率与入射波长、螺距的关系,并从理论上给予定量分析;用磁光调制倍频法测试了这种螺状相液晶旋光率随温度变化的规律,并利用所测的旋光率的值计算得出这种螺状相液晶的螺距、折射率、及双折射率随温度变化的规律;对模拟结果给予了实验验证。

关键词: 应用光学; 螺状相液晶; 旋光性; 旋光色散; 螺距; 双折射率

中图分类号: O439 文献标识码: A

Theoretical Simulation and Experimental Research of Cholesteric Liquid Crystal Optical Rotatory Characteristic

Liu Houtong^{1,2} Li Guohua¹ Hao Dianzhong¹

(¹ Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165
² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Heifei 230031)

Abstract: The relationship between specific rotation of one kind cholesteric liquid crystal for CH-LCD and incidence wavelength, screw-pitch is simulated with the general cholesteric liquid crystal optical rotation theory and analyzed quantitatively. The specific rotation-temperature characteristic of this kind cholesteric liquid crystal is measured by means of magneto-optic modulate frequency multiplication, and the variations of screwpitch, refractive index and birefringence with temperature of this kind cholesteric liquid crystal are simulated by using its experimental specific rotation values. The simulated results are validated by experiment finally.

Key word: applied optics; cholesteric liquid crystal; rotation; rotatory dispersion; screwpitch; birefringence

1 引言

螺状相液晶(曾用名:胆甾相液晶)的旋光特性在液晶彩色显示、生物科学、医学研究等研究领域有着广泛的应用^[1]。螺状相液晶的双折射^[2~6]率随温度的变化规律在实际应用中非常重要,但是,在实验中,由于螺状相液晶的双折射率较小,特别是在温度较高时更小,要精确测量螺状相液晶的双折射率随温度变化的规律,往往需要的仪器比较昂贵,实验设计比较复杂。本文模拟计算了一种用于螺状相液晶显示器(CH-LCD)的螺状相液晶的旋光率与入射波长、螺距之间的关系;就这种螺状相液晶的旋光特性

随温度变化的实验规律进行了分析,并结合现有理论,很简便地计算出了这种螺状相液晶的双折射率随温度的变化规律,该结果为这种螺状相液晶旋光特性在实际中的应用提供了可靠的实验依据。螺状相液晶的旋光率比较容易测量,利用螺状相液晶的旋光率能很方便地计算出螺状相液晶其它的一些物理参量(如螺距,折射率等),这对研究螺状相液晶的性质提供了一种很好的方法。

2 理论模拟

一般的螺状相液晶的旋光率 R 和入射波长 λ_0 、

作者简介: 刘厚通(1969—),男,山东新泰人,博士研究生。主要从事偏光器件理论与参量测试方面的研究。

E-mail: liuhoutong6@163.com

导师简介: 李国华(1937—),男,山东乳山人,博士生导师,主要从事偏光物理方面的研究。E-mail: ghli@163169.net

收稿日期: 2006-03-21; 收到修改稿日期: 2006-06-30

螺距 p 以及折射率平均值 \bar{n} 和双折射率 Δn 的关系可用下式^[8]表示:

$$R = -\frac{\pi(\Delta n)^2 p}{4\lambda_0^2 [1 - \lambda_0^2 / (p^2 \bar{n}^2)]}, \quad (1)$$

$\lambda = p\bar{n}$ 为选择反射中心波长。下面就公式中各物理参量之间的关系分别加以讨论。

2.1 一般的螺状相液晶的旋光率与入射波长的关系

螺状相液晶的旋光率随入射波长的变化而变化,常称为螺状相液晶的旋光色散。图 1 是螺状相液晶在双折射率 $\Delta n=0.2$ 、螺距 $p=373$ nm、折射率平均值 $\bar{n}=1.5$ 时,其旋光率与入射波长的关系:当

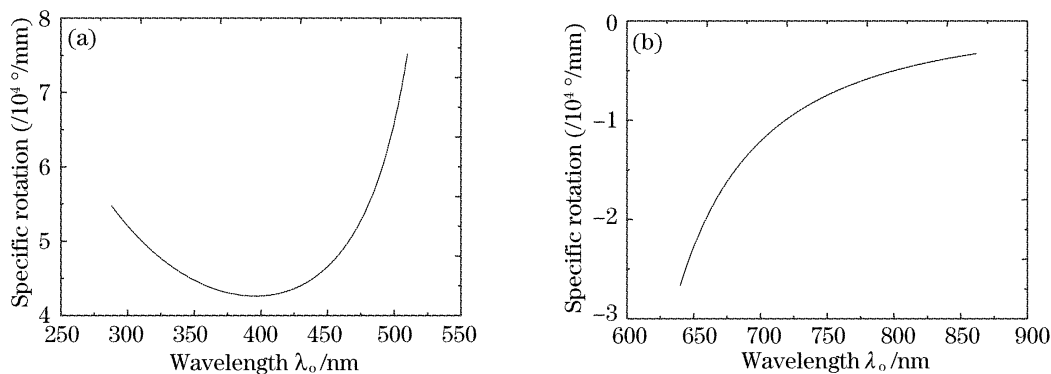


图 1 螺状相液晶的旋光率与入射波长的关系

Fig. 1 Relation of cholesteric liquid crystal specific rotation and indent wavelength

2.2 一般的螺状相液晶的旋光率与其螺距的关系

螺状相液晶的旋光率与螺距的关系非常密切,图 2 是螺状相液晶在双折射率 $\Delta n=0.2$ 、入射波长 $\lambda_0=633$ nm、折射率平均值 $\bar{n}=1.5$ 时,其旋光率与螺距的关系曲线:当螺距满足 $\lambda = \bar{n}p$ 时,发生选择

其他参量相同时,不同波长对应液晶的旋光率不同;当入射光的波长满足 $\lambda_0 = \bar{n}p$ 时,这时螺状相液晶发生选择反射;在比选择反射波长短的波段,旋光率随着入射波长的减小而减小,但减小到一定程度后,其旋光率反而随波长的减小而增加[如图 1(a)];在比选择反射波长长的波段,旋光率随着入射波长增加绝对值减小;在接近 $\lambda_0 = \bar{n}p$ 的位置,旋光率的绝对值随入射波长的增加减小得很快,离选择反射带越远,入射波长的变化对旋光率的影响越小[如图 1(b)]。

反射;当螺距大于发生选择反射所需的螺距值时,其旋光率随螺距的增大而减小,但减小到一定程度,其旋光率随螺距的增大而增大[如图 2(b)];当螺距小于发生选择反射的螺距时,其旋光率随螺距的增大而减小[如图 2(a)]。

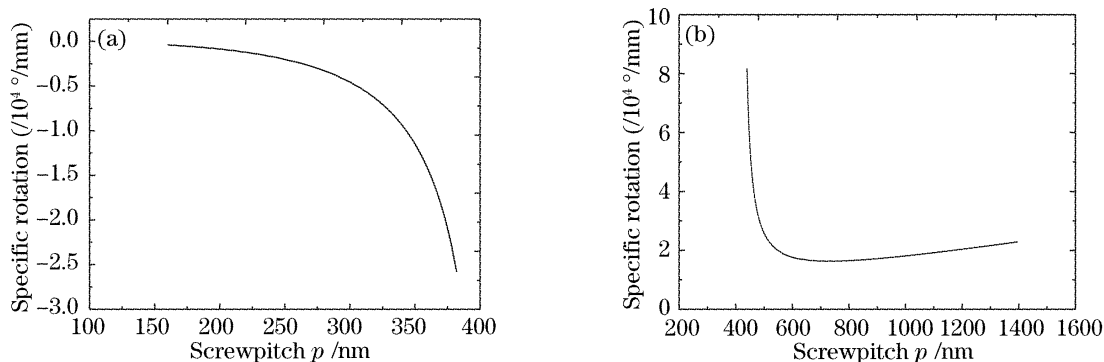


图 2 螺状相液晶的旋光率与螺距的关系

Fig. 2 Relation of cholesteric liquid crystal specific rotation and screwpitch

从上面的分析可以看出,螺状相液晶的旋光率与入射波长的关系曲线和螺状相液晶旋光率与螺距的关系曲线是交叉相似的:其旋光率在比发生选择反射波长短的波段随着入射波长的减小而减小,但当旋光率减小到一定程度,其旋光率在此波段随着入射波长的减小而增加;当螺状相液晶的螺距值比

发生选择反射的螺距值大时,其旋光率随着螺距的增加而减小,但当旋光率小到一定程度,其旋光率随螺距的增加而增加;利用计算软件对(1)式中的 R 求极小值得到:当螺距 P 与入射波长 λ_0 满足下列关系时, R 达到极小值:

$$p = \frac{1}{3} + \frac{2^{1/3} \bar{n}^2}{3(2\bar{n}^6 - 27\bar{n}^4\lambda_0^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{-4\bar{n}^{10}\lambda_0^2 + 27\bar{n}^8\lambda_0^4})^{1/3}} + \frac{(2\bar{n}^6 - 27\bar{n}^4\lambda_0^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{-4\bar{n}^{10}\lambda_0^2 + 27\bar{n}^8\lambda_0^4})^{1/3}}{32^{1/3}\bar{n}^2}, \quad (2)$$

当 p 与 λ_0 满足下列关系时, R 随 P 的增大而减小(或 R 随 λ_0 的减小而减小):

$$p < \frac{1}{3} + \frac{2^{1/3} \bar{n}^2}{3(2\bar{n}^6 - 27\bar{n}^4\lambda_0^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{-4\bar{n}^{10}\lambda_0^2 + 27\bar{n}^8\lambda_0^4})^{1/3}} + \frac{(2\bar{n}^6 - 27\bar{n}^4\lambda_0^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{-4\bar{n}^{10}\lambda_0^2 + 27\bar{n}^8\lambda_0^4})^{1/3}}{32^{1/3}\bar{n}^2}, \quad (3)$$

当 P 与 λ_0 满足下列关系时, R 随 P 的增大而增大(或 R 随 λ_0 的减小而增大):

$$p > \frac{1}{3} + \frac{2^{1/3} \bar{n}^2}{3(2\bar{n}^6 - 27\bar{n}^4\lambda_0^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{-4\bar{n}^{10}\lambda_0^2 + 27\bar{n}^8\lambda_0^4})^{1/3}} + \frac{(2\bar{n}^6 - 27\bar{n}^4\lambda_0^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{-4\bar{n}^{10}\lambda_0^2 + 27\bar{n}^8\lambda_0^4})^{1/3}}{32^{1/3}\bar{n}^2}. \quad (4)$$

3 用于螺状相液晶显示器的螺状相液晶的旋光率的测量及应用

3.1 螺状相液晶旋光特性的实验测量

3.1.1 实验材料和实验测量

本实验用的液晶材料为河北工业大学范志新提供的螺状相液晶盒,它是在丝状相液晶(曾用名:向列相液晶)中加入手性剂调配出的使之具有螺旋结构。所用螺状相液晶的选择反射波长在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 为 $520\sim 580\text{ nm}$,盒厚为 $3\text{ }\mu\text{m}$,驱动电压约为交流 30 V ;实验共用四个同种螺状相液晶盒进行实验。实验用的温控装置的温度变化范围为从室温到 $100\text{ }^\circ\text{C}$,温度测量精度为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。本实验进行旋光测量采用的基本方法为磁光调制倍频法:没有插入液晶样品时,起偏器与检偏器处于消光位置时输出信号的表达式为

$$I = I_0 \cos^2(90^\circ + \theta') = \frac{I_0}{2}(1 - \cos 2\theta'), \quad (5)$$

插入液晶样品,旋转测角仪,检偏器与之同轴旋转,假定线偏光的偏振面经过液晶样品时旋转了 θ 角,则起偏器与检偏器再次处于消光位置时输出信号的表达式为

$$I = I_0 \cos^2(\alpha + \theta + \theta') = I_0 \cos^2(90^\circ + \theta') =$$

$$\frac{I_0}{2}(1 - \cos 2\theta').$$

很明显,起偏器与检偏器处于消光位置时,输出信号的频率为输入信号频率的两倍,从示波器输出波型的频率就可知道起偏器与检偏器是否处于消光位置。这样,根据被测样品放入前后两次出现倍频信号的位置,即可确定被测样品线偏光偏振面的旋转角 θ (α 为起偏器与检偏器透光轴之间的夹角; θ' 为磁光调制器中交变磁场引起的线偏光经过磁光晶体时的法拉第旋转角)。该实验的实验装置如图 3 所示。光源用 633 nm 的氦氖激光器,在温度 $20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行实验测试。实验步骤简述如下:

1) 仔细调整光路,使入射光经过整个光路中心轴线后到达探测器。

2) 在图 3 所示的光路中撤去液晶盒,旋转测角仪,使示波器输出波型的频率是输入波形频率的两倍,此时检偏镜与起偏镜处于消光位置,记下此时测角仪的读数。

3) 放入液晶盒,把温度固定在某一温度,旋转测角仪,使示波器输出波型的频率是输入波形频率的两倍。记下此温度下起偏器和检偏器消光时对应的测角仪的读数。

4) 改变温度,分别测出液晶盒在不同温度下所

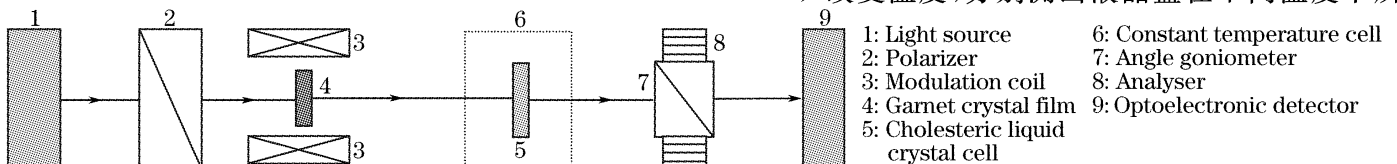


图 3 螺状相液晶旋光特性的测试系统

Fig. 3 Measuring system of cholesteric liquid crystal specific rotation

旋转的角度。实验证明虽然测量四个螺状相液晶盒得到的具体数据有所差别,但它们的旋光角随温度变化规律基本上是一致的。利用 1 号螺状相液晶盒中液晶得到的实验数据作出螺状相液晶旋光角与温度的关系曲线图 4 所示。

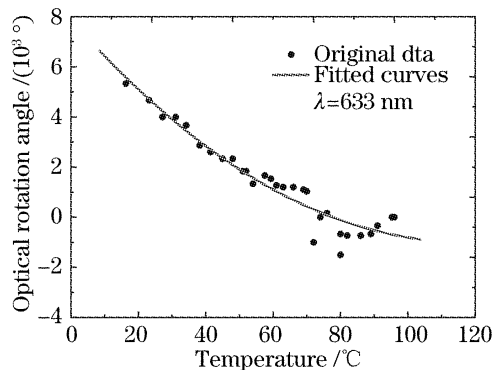


图 4 螺状相液晶的旋光角与温度关系的旋光曲线
Fig. 4 Relational curve of cholesteric liquid crystal rotatory angle and temperature

3.1.2 实验数据分析

从图 4 中可以看出,在 26~60 °C 的温度段内,螺状相液晶的旋光角随温度升高而减小但变化较慢,这是因为螺状相液晶随着温度的升高,螺距发生变化,但并没有解体,螺状相液晶在此温度段内一直处于平面相态没有发生相变,旋光角变化较慢;在 61 °C 左右,螺状相液晶的旋光性有一比较稳定的状态,在这一阶段螺状相液晶的旋光率基本不发生变化;从 61 °C 以后到 68 °C 螺状相液晶的旋光性减小得很快,是旋光率减小最快的温度段,原因是这一阶段螺状相液晶处于螺距解体阶段,螺距值变化很大,导致其旋光性变化很大;68 °C 以后螺距完全解体,螺状相液晶成为各向同性液体,液晶呈清亮状态,再继续加热,旋光角保持零不变,即完全消旋光。

3.2 利用旋光率模拟计算螺状相液晶的螺距、折射率等物理参量的温度特性

下面利用计算一般的螺状相液晶旋光率的(1)式和选择反射波带的带宽公式^[8]:

$$\Delta\lambda = \Delta np, \tag{7}$$

由(1)式得

$$(\Delta n)^2 = \frac{R[4\lambda_0^2(1 - \lambda_0^2/\lambda^2)]}{\pi P}, \tag{8}$$

把(7)式变形整理得

$$(\Delta n)^2 = \left(\frac{\Delta\lambda}{p}\right)^2 = \frac{\Delta\lambda^2}{p^2}, \tag{9}$$

由(8)式,(9)式的右边相等 整理得

$$p = \frac{(\Delta\lambda)^2 \pi}{R[4\lambda_0^2(1 - \lambda_0^2/\lambda^2)]}, \tag{10}$$

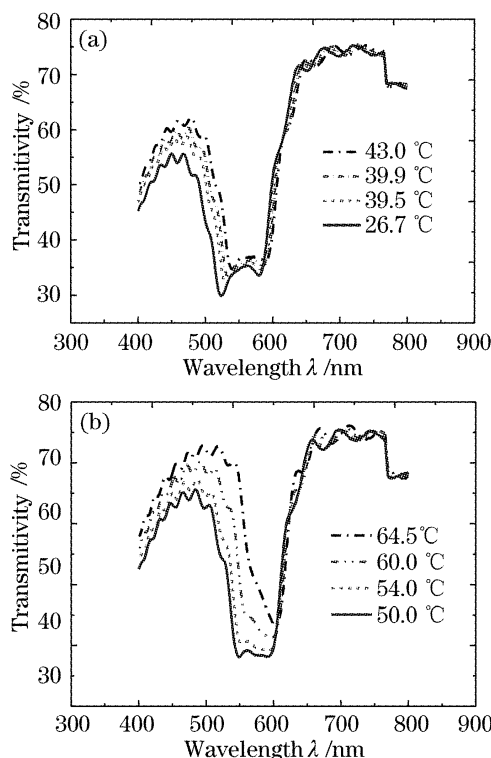


图 5 螺状相液晶透射比与温度关系曲线
Fig. 5 Curve of transmittivity versus temperature

图 5 是测得的 1 号螺状相液晶盒放在两偏振面平行偏光棱镜间透射比与温度的关系,图 5 中(只列部分数据)从下到上对应的温度分别为 26.7 °C,39.5 °C,39.9 °C,43 °C [如图 5(a)],50 °C,54 °C,60 °C,64.5 °C [如图 5(b)]。从图 5 中可以看出,随着温度的升高,螺状相液晶的选择反射最大波长向较长波长方向移动,同时选择反射波带宽度 $\Delta\lambda$ 也随温度的升高而减小。利用图 5 所得的数据可以得出螺状相液晶选择反射波带宽度随温度的变化曲线(图 6),把实验测得的选择反射波带宽度 $\Delta\lambda$ 随温度的变化值和旋光率 R 随温度的变化值代入(10)式,得到螺距 P 随温度的变化曲线,如图 7 所示。把 P 和 $\Delta\lambda$ 随温度变化的值代入(7)式,得出螺状相液晶

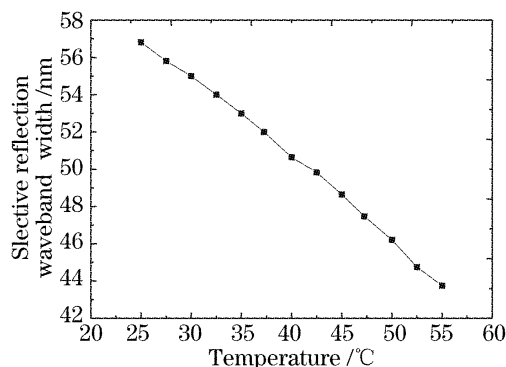


图 6 选择反射波带宽度随温度的变化曲线
Fig. 6 Change of selective reflection wave band with temperature

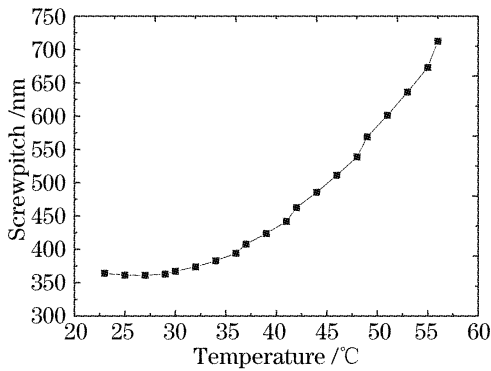


图 7 螺距随温度的变化曲线

Fig. 7 Screw-pitch change with temperature

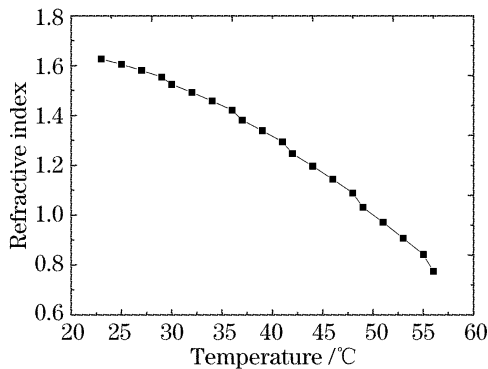


图 8 螺状相液晶的折射率随温度的变化

Fig. 8 Relation curve of cholesteric liquid crystal refractive index and temperature

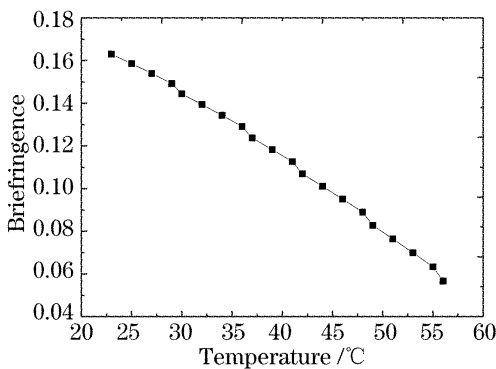


图 9 螺状相液晶的双折射率随温度的变化

Fig. 9 Relation curve of cholesteric liquid crystal birefringence with temperature

的双折射率 Δn 随温度的变化曲线(图 8),然后把得到的 P 、 Δn 和 R 随温度变化的值代入(1)式,得到螺状相液晶的折射率平均值随温度的变化曲线(图 9)。从图 8 和图 9 可以看出,随着温度的升高,在螺状相液晶的螺距还没有解体时,其折射率和双折射率随温度的升高而很快地下降,当到 55 °C 时,其双折射率已经降到很小了。实验测得的是螺状相液晶的旋光角随温度变化的规律,而求螺距、双折射率等物理量用的是螺状相液晶的旋光率,这就要用到液晶层的厚度,液晶层厚度值的精度是决定螺状相液

晶旋光率精度的重要因素,如厚度值不精确,模拟出的螺距、双折射率值与真实值的偏差就可能很大,这种情况就要对液晶层厚度进行精确测量;也可测出室温下液晶的螺距、选择反射波带宽度和选择反射波带中心波长,利用(1)式求出旋光率 R_1 ,进而和利用这一温度下的旋光角计算出的旋光率 R_2 比较,对液晶层厚度作校正。

3.3 理论模拟的实验验证

3.3.1 螺状相液晶的旋光率与入射波长的关系的实验验证

图 10 是 1 号螺状相液晶盒中的液晶在不同温度下的旋光色散曲线,从图 10 可以看出,在选择反射波带的附近两侧,旋光性相反而且变化很快,这和理论值吻合;从实验数据可以看出,靠近选择反射波带,螺状相液晶的旋光率趋向于无穷大,这和理论数据也基本吻合。但是在远离选择反射波带方向上较选择反射波长长的波段,从理论上[图 2(a)]可以看出旋光率有趋于零的趋势,但实验数据中看不出有此趋势,出现一转折点,以图 10(a)为例,图中 ab 段和理论模拟基本吻合,但 bc 段和理论数据有差别:理论分析得出在 bc 段当波长增大时螺状相液晶的旋光率有趋于零的趋势,实验中 bc 段旋光率随入射波长的增大而增大;在比选择反射波长短的波段,理论值和实验值符合得很好。实验证明,在 40 °C 的范

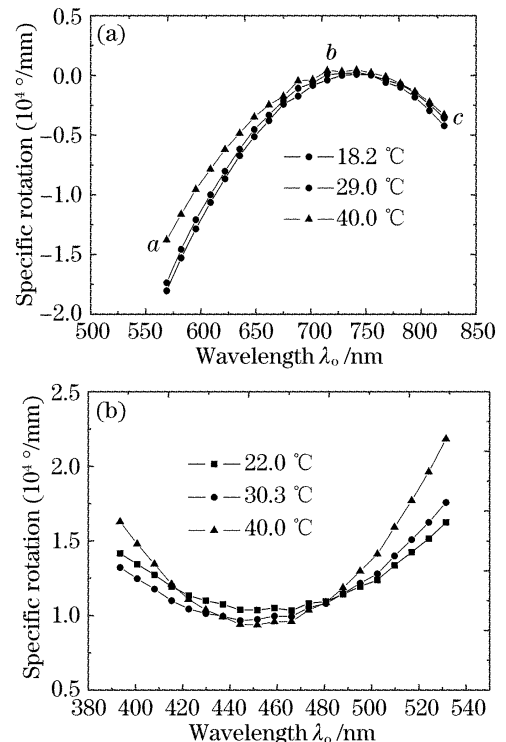


图 10 螺状相液晶的旋光色散随温度变化曲线
Fig. 10 Optical rotatory dispersion curve of cholesteric liquid crystal dn temperature

围内螺状相液晶旋光色散的理论值与实验值吻合得很好。这是利用一般的螺状相液晶的旋光公式进行螺状相液晶物理参量模拟的基础所在。

3.3.2 利用一般螺状相液晶的旋光理论模拟螺状相液晶物理参量的实验验证

利用(1)式结合旋光率随温度变化的实验数据,我们求出了1号螺状相液晶盒中液晶的螺距、折射率和双折射率随温度的变化规律,上述计算结果是否正确,还需要用实验进行验证。为此,我们实验测出了1号螺状相液晶盒中液晶的折射率随温度变化的规律如图11所示,和图8的计算结果比较,在实验误差允许的范围内在温度低于55℃时,实验值和理论值符合得很好,说明理论模拟结果是可靠的。但在55℃以后,实验偏差变大。用实验测出并计算了其它三个螺状相液晶盒中液晶的旋光特性和相应的物理参量,得到和1号螺状相液晶盒中液晶基本一致的结论,不再赘述。

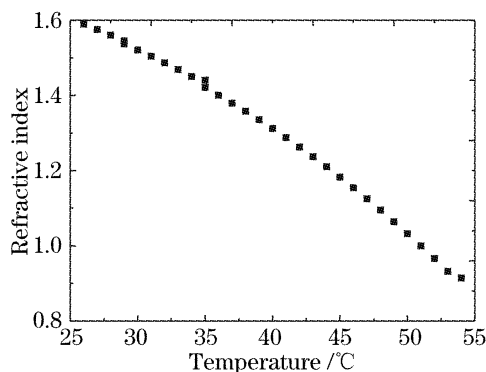


图 11 螺状相液晶折射率与温度的关系(实验)

Fig. 11 Relation cholesteric liquid crystal refractive index and temperature (experimental)

4 结 论

螺状相液晶在实际生活和科研中有着十分重要的应用。在电子现实装置、化工的公害测定、高分子反映的定向聚合,航空机械及冶金产品的无损伤和微波测定、体温测量等方面,有多种液晶合成原料单体可供高分子液晶合成选择使用。螺状相液晶的双折射率较小,准确测定其双折射率一直是一比较重要的研究课题,本文利用螺状相液晶旋光率的实验数据计算出其双折射率与温度的关系,对测试液晶的双折射率提供了一种简便可行的方法;同时利用

实验测量了螺状相液晶的折射率随温度的变化,和理论模拟值进行了比较,证明了理论模拟结果的准确性;利用螺状相液晶旋光率计算出的双折射率和用偏光干涉测量丝状相液晶的双折射率^[9]的结果在相应的温度段趋势是一样的,这是由于本文所用的螺状相液晶是在丝状相液晶中加入手性剂调配出的,里面有相当的向列相液晶成分,这从侧面说明了本方法的可靠性,至于这两种方法哪种更精确,有待于作进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Xie Yuzhang. *Liquid Crystal Physics* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 568~580 (in Chinese)
谢毓章. 液晶物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 568~580
- 2 Wang Wei, Li Guohua, Xu Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 970~972 (in Chinese)
王伟, 李国华, 薛冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 970~972
- 3 Yun Maojin, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. Characteristic of Lyot tunable liquid crystal filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 627~632 (in Chinese)
云茂金, 李国华, 吴福全等. 利奥型可调谐液晶电光滤波器的特性分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(5): 627~631
- 4 Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage dependent birefringence measurement of liquid crystals [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(12): 1064~1066 (in Chinese)
王宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(12): 1064~1066
- 5 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Study of tunable liquid crystal filter by voltage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1119~1122 (in Chinese)
云茂金, 李国华, 王宁. 电压调谐液晶滤光片的研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(9): 1119~1122
- 6 Yun Maojin, Li Guohua, Kong Yong *et al.*. Tunable liquid crystal filter used for line selection of Ar⁺-laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(2): 135~137 (in Chinese)
云茂金, 李国华, 孔勇等. 液晶调谐滤光片对 Ar⁺激光器谱线的提取[J]. 中国激光, 2002, **29**(2): 135~137
- 7 Song Feijun, S. Jutamulia. *Neoteric Optics Information Disposal* [M]. Beijing: Beijing University Press, 1998. 184~186 (in Chinese)
宋菲君, S. Jutamulia 著. 近代光学信息处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998. 184~186
- 8 Zhou Qifeng, Wang Xinjiu. *Liquid Crystal Macromolecular* [M]. Beijing: Science Press, 1999. 230~238 (in Chinese)
周其凤, 王新久. 液晶高分子[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 230~238
- 9 Wang Wei, Li Guohua, Hao Dianzhong *et al.*. Study of thermo-optic effect of nematic LC [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2003, **18**(6): 428~431 (in Chinese)
王伟, 李国华, 郝殿中等. 向列相液晶热光效应的实验研究[J]. 液晶与显示, 2003, **18**(6): 428~431