

文章编号: 1002-1582(2008)03-0352-04

胆甾相液晶温控旋光色散特性的研究*

刘厚通¹, 范志新², 周军¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 河北工业大学 应用物理系, 天津 300130)

摘 要: 胆甾相液晶的螺距易受温度和电压的影响, 螺距变化时, 胆甾相液晶的旋光色散特性发生相应的变化。实验证明: 温度对胆甾相液晶旋光色散特性的影响与所对应的波长范围有关, 在不同的波长范围内, 温度对其旋光色散特性的影响规律不同; 温度对胆甾相液晶旋光色散特性的影响还与所测试的波长离该温度下选择反射波带的远近有关, 离选择反射波带越近, 温度对其旋光色散特性的影响越大。实验表明: 温度变化时, 胆甾相液晶的旋光色散特性的变化是偏振透射谱移动的一个重要原因。

关 键 词: 胆甾相液晶; 旋光色散; 选择反射波带; 焦锥态; 方格栅图案

中图分类号: TN27 文献标识码: A

Study of cholesteric liquid crystal temperature-control ORD characteristic

LIU Hong-tong¹, FAN Zhi-xin², ZHOU Jun¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2. Department of Applied Physics Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Screw-pitch of cholesteric liquid crystal is affected easily by temperature and voltage. Cholesteric liquid crystal optical rotatory dispersion(ORD) characteristic is change when crew-pitch changes. Experiment maked clear: when cholesteric liquid crystal optical rotatory dispersion characteristic is influence by temperature, the influenced concerned with researchful wavelength area. Changed rules of cholesteric liquid crystal optical rotatory dispersion characteristic is differ when investigative wavelength area vary. The cholesteric liquid crystal optical rotatory dispersion characteristic is impacted by temperature. The influence relate to the distance from the tested wavelength to selective reflection band, the distance smaller, the impact lager. Experiments prove that changes of optical rotatory dispersion are one importance factor for changes of depolarization when temperature changes, one importance factor for shift of polarization transmission spectrum too.

Key words: cholesteric liquid crystal; optical rotatory dispersion; selective reflection band; focal conic; square grid perturbation

0 引 言

胆甾相液晶的旋光色散特性在液晶彩色显示、生物科学、医学等研究领域有着广泛地应用^[1-4]。胆甾相液晶的旋光色散特性对温度和电压的依赖性很强, 当温度变化时, 胆甾相液晶的旋光色散规律发生较明显的变化。

本文分析了一种对温度比较稳定的胆甾相液晶的旋光色散曲线随温度变化的实验规律, 并和现有理论结果进行了比较。实验得出这种液晶的旋光色散温度特性与所研究的光谱区和选择反射波带的相对位置有关。该实验结果对胆甾相液晶旋光色散特性在实际中的应用提供了可靠的实验依据。

1 理论模拟

一般的胆甾相液晶的旋光率和入射波长 λ_0 、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^[1]表示

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

式中 R 为胆甾相液晶的旋光率; $\lambda = p\bar{n}$ 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。

1.1 一般的胆甾相液晶的旋光率与入射波长的关系

胆甾相液晶的旋光率随入射波长的变化而变化, 常称为胆甾相液晶的旋光色散。图 1 是根据公式(1)模拟出的胆甾液晶在双折射率 $\Delta n = 0.2$ 、螺距 $p = 373\text{nm}$ 、折射率平均值 $\bar{n} = 1.5$ 时, 其旋光率与入射波长的关系: 当其它参数相同时, 不同波长对应液晶的旋光率不同; 当入射光的波长满足 $\lambda = \bar{n}p$ 时, 这时胆甾相液晶发生选择反射; 在此选择反射波

* 收稿日期: 2007-06-15

E-mail: liuhoutong6@163.com

作者简介: 刘厚通(1974-), 男, 安徽光学精密机械研究所博士研究生, 从事液晶器件参数测试与激光大气探测研究。

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;在此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 $\lambda = \bar{n}p$ 的位置,旋光率的绝对值随入射波长的增加减小的很快,离选择反射波带越远,入射波长的变化对旋光率的影响越小。

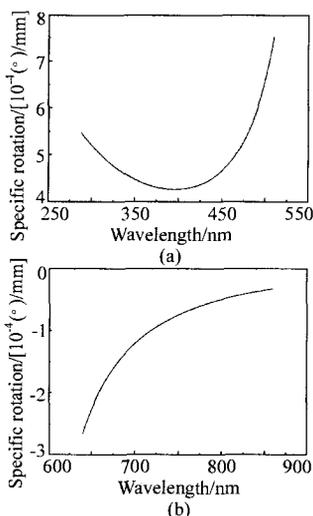


图 1 胆甾相液晶的旋光率与入射波长的关系

1.2 一般的胆甾相液晶的旋光率与其螺距的关系

胆甾相液晶的旋光率与螺距的关系非常密切,图 2 是根据公式(1)模拟出的胆甾相液晶在双折射率 $\Delta n = 0.2$ 、入射波长 $\lambda_0 = 633\text{nm}$ 、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;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。

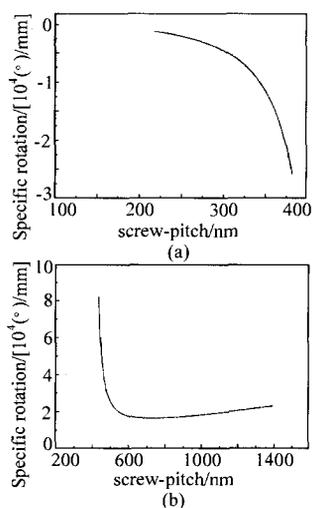


图 2 胆甾相液晶的旋光率与螺距的关系

从上面的分析可以看出,胆甾相液晶的旋光率与入射波长的关系曲线和胆甾相液晶旋光率与螺距的关系曲线是交叉相似的:其旋光率在此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;当胆甾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;对公式(1)中的 R 求极小值得出,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)

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

2 实验研究

2.1 实验测试系统及实验材料

建立如图 3 的实验测试系统,测量胆甾相液晶旋光色散与温度关系。实验利用日本产岛津 UV-310PC 分光光度计来测量。图 1 所示的测试系统由三部分组成:光源及分光系统;信号检测系统;数据采集与处理系统。光源及分光系统由光源、会聚透镜、单色仪组成,主要为测量提供单色探测光。光源为 24V 150W 卤钨灯,在紫外仍有较好的发光效率,光源配有风冷散热系统。分光仪器为美国 Acton Research Corporation (ARC)公司生产的 SP-300 型单色仪,配有三块不同闪耀波长的光栅,光谱范围为 200nm—1900nm。信号检测系统采用 ARC 公司生产的光电倍增管(UV-3101PC),工作于光伏模式,在 895nm 以下具有较好的光谱响应。数据采集与处理主要由计算机配以相应的测试软件实现。岛津

分光光度计采用双光路测量形式,并通过微机实现自动测量。实验时检偏镜固定在测角仪上,通过旋转检偏镜寻找消光位置来测量旋光色散值。

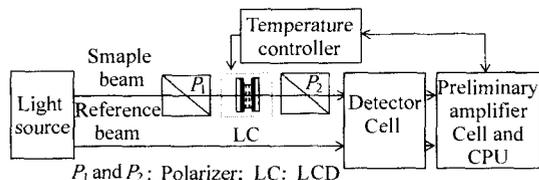


图3 胆甾相液晶测试系统

本实验用的液晶材料为河北工业大学范志新老师提供的胆甾相液晶盒,它是在向列相液晶中加入手性剂使之具有螺旋结构调配出的。所用胆甾相液晶的选择反射波长在20℃为520—580nm,盒厚为3 μ m,驱动电压约为交流30V;实验共用四个同种胆甾相液晶盒进行实验。实验用的温控装置的温度变化范围为从室温到100℃,温度测量精度为0.01℃。实验中共用4个胆甾相液晶盒,分别用1、2、3、4号加以标示。

2.2 实验测试及数据分析

2.2.1 实验测试

本实验分以下几步进行:

(1) 搭建如图3的实验光路,由于分光光度计的样品箱相对较小,在设计光路时应应对仪器进行尺寸测量,然后选择合适的物品来搭建光路。

(2) 打开电源,打开分光光度计开关和微机。

(3) 把分光光度计的波长调整到633nm,调整光路,使光线从光路中心轴线处通过。

(4) 实验测量

① 打开温控装置的电源,选择某一温度测试点,对胆甾相液晶进行加热,把加热温度输入计算机,由计算机实时控制,当温度稳定在某一温度时,选取某一组波长测试其旋光角,快速测量,为了减小由温度漂移引起的误差,要在每一设定温度对要测量的物理量测量3次,然后取平均。

② 改变温度,重复上述步骤,分别测出温度为18.2℃,29℃,40℃的旋光色散曲线,本实验所用液晶的选择反射波段为光谱区520nm—580nm,为了能从实验中得出在选择反射波段两侧附近的旋光特性的差别,在400nm—520nm光谱区(选择反射波段附近的较短光谱区)和520nm—800nm光谱区(选择反射波段附近的较长光谱区)两个波段分别对胆甾相液晶的1号液晶盒的旋光色散进行测试,测试数据如图4所示。

2.2.2 旋光色散实验曲线的温度特性分析

从图4中可以看出^[5-10]:

(1) 1号胆甾相液晶的旋光色散曲线在18.2℃—40℃的温度范围内比较稳定,在某些光谱区甚至几乎无变化。在临近选择反射波带的波长范围内,不同的温度对应的胆甾相液晶旋光率随波长的变化率($da/d\lambda$)即旋光色散曲线的斜率与测试的波段在选择反射波带的那一侧有关,在此选择反射波带所对应的波长短的波段,温度越高对应的旋光色散曲线的斜率越大;在此选择反射波带所对应的波长长的波段,温度越高对应的旋光色散曲线的斜率越小。在远离选择反射波带的波段温度对旋光色散曲线斜率的影响不是很明显。

(2) 温度对胆甾相液晶旋光率随波长的变化率的影响还与离选择反射波带的远近有关:越靠近选择反射波带,效果越明显;离得越远,温度对胆甾相液晶旋光率随波长的变化率的影响越小。我们把温度对液晶旋光率随波长的变化率的影响看成一个扰动,离选择反射波带越近,这个扰动的作用越大。

(3) 温度变化

不仅影响旋光率随波长的变化率的值,而且能使选择反射波带发生偏移,本实验中的胆甾相液晶随温度的升高,选择反射波带向长波方向移动,转移的原因是随着温度的变化,胆甾相液晶的折射率、双折射率及螺距发生相应的变化(另文探讨)。

2.2.3 数据分析

图1中的两个图是根据胆甾相液晶的旋光率及旋光色散公式(1)得出的,图1(a)是在光谱区260nm—500nm的旋光色散图,它是在选择反射波段外较长波段处胆甾相的旋光色散曲线,图1(b)是光谱区636nm—850nm的旋光色散图谱,它反映出在选择反射波段外较长波段处旋光旋光色散情况。从理论图1和实验图4对比可以看出:

(1) 在选择反射波段附近的两侧,胆甾相液晶的旋光率发生突变而且符号相反,旋光率值变化很大,靠近选择反射波带,胆甾相液晶的旋光率趋向于无穷大,在这方面实验数据和理论值基本吻合。

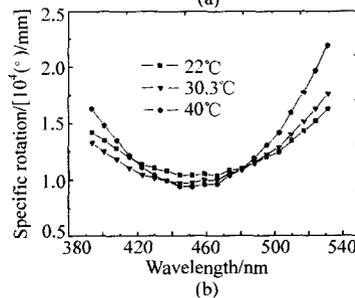
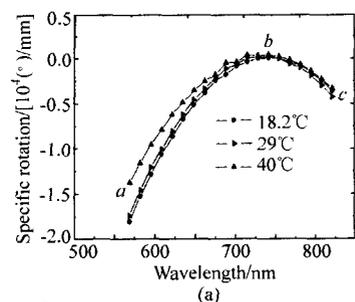


图4 胆甾相液晶的旋光色散随温度变化曲线

(2)在远离选择反射波带外的较长波段处,从理论上[图1(b)]可以看出旋光率有趋于零的趋势,但实验数据[图4(a)]中看不出有此趋势,出现一转折点,图4(a)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段当波长增大时胆甾相液晶的旋光率有趋于零的趋势,实验结果则显示相应光谱区的旋光率绝对值随波长增加略有增加;在远离选择反射波带外的较长波段处,实验值[图4(b)]和理论值符合的很好。用实验测出其它三个胆甾相液晶盒中液晶的旋光特性得到和1号胆甾相液晶盒中液晶基本一致的结论,不再赘述。

2.3 胆甾相液晶旋光色散与偏振透射谱移动的关系

胆甾相液晶的旋光色散特性随温度的变化能引起胆甾相液晶退偏振比的变化,而退偏振比的变化是胆甾相液晶的偏振平行分量透射谱和偏振垂直分量透射谱的幅度随温度的变化发生相应的变化的一个重要原因,也是胆甾相液晶的偏振平行分量透射谱和偏振垂直分量透射谱随温度的变化而向长波方向移动的一个重要原因。图5是胆甾相液晶的平行分量透射谱,当温度升高

时,其选择反射波带的较短波长边沿移动的幅度大于选择反射波带的较长波长边沿移动的幅度且透过率增大;对于胆甾相液晶的垂直透射谱(图6),温度升高时,其选择反射波带的较短波长边沿移动的幅度大于选择反射波带的较长波长边沿移动的幅度且

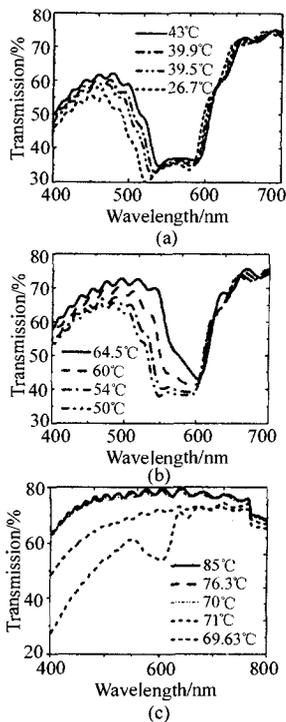


图5 胆甾相液晶温控平行透射谱

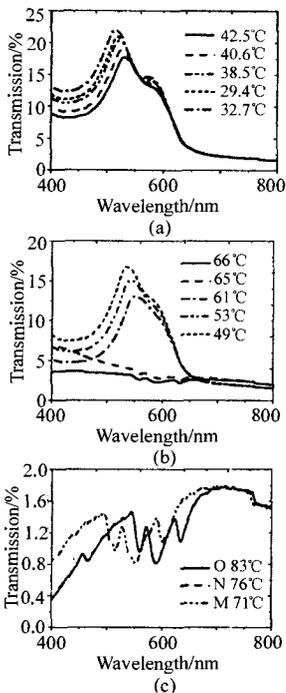


图6 胆甾相液晶温控正交透射谱

透过率减小。图7入射光波长为542nm为例详细说明了胆甾相液晶的平行透射谱和垂直透射谱随温度变化的情况。胆甾相液晶的旋光色散特性随温度变化是造成温控透射谱移动的一个重要的原因(图8)。出射光的平行分量和垂直分量分别满足

$$I_{\parallel} = A_0^2 \cos^2 \alpha \quad (5)$$

$$I_{\perp} = A_0^2 \sin^2 \alpha \quad (6)$$

式中 A_0 为胆甾相液晶内偏振光的振幅; I_{\parallel} 是出射光的偏振平行分量; I_{\perp} 是出射光的偏振垂直分量。从公式

(5)(6)中可以看出,温度变化使胆甾相液晶产生旋光效应(角度 α 发生变化),角度 α 的改变使透射光的偏振平行分量和垂直分量发生相应的改变,当平行分量增大时,垂直分量减小,这和图5、6中偏振平行透射谱和垂直透射谱的变化规律一致。在选择反射波带两侧透射谱移动的幅度相差很大,一个重要原因是胆甾相液晶的旋光温度特性与波长有关。

3 结论

胆甾相液晶在实际生活和科研中有着十分重要的意义。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^[5-8]。

本文详细研究了温度对旋光色散曲线的影响的规律,为液晶显示方面处理透射光的旋光性提供了可靠的实验依据;胆甾相液晶的旋光色散随温度的变化可以导致透射光的平行透射谱和垂直透射谱移动;同时指出了温度对旋光色散的影响与选择反射波带的关系,这对于在器件设计中设定合适的波段有重要的参考价值。

参考文献:

[1] 周其凤,王新久.液晶高分子[M].北京:科学出版社,1995.

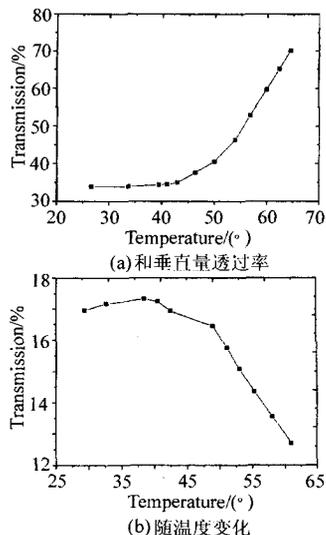


图7 当入射波长为542nm时,平行分量透过率

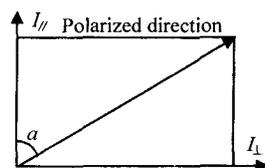


图8 偏振光平行分量与垂直分量示意图

如图 3 所示。仿真的基本参数用 DVD 光盘系统的基本参数:物镜数值孔径 $NA = 0.6$; 波长 $\lambda = 650\text{nm}$; 盘基折射率 $n = 1.56$ 。

调制幅度是衡量坑点好坏的一个主要指标。在光盘标准^[10]中,归一化的 I_{14} (记为 I_{14N}) 是衡量坑点调制幅度的重要参数。它定义为最长坑点(占 14 个信道位)引起的信号幅值降低量与最长岸读出幅值之比^[10]。

I_{14N} 值越大,说明坑点对读出信号的调制能力越强。按照光盘标准, I_{14N} 应该至少大于 0.6, 光盘才合格。影响 I_{14N} 的关键因素,除了坑点本身的形貌,还有坑点的深度和宽度。所以,我们对两种坑点在不同深度和半深宽下的 I_{14N} 做了仿真,结果如图 5 所示。

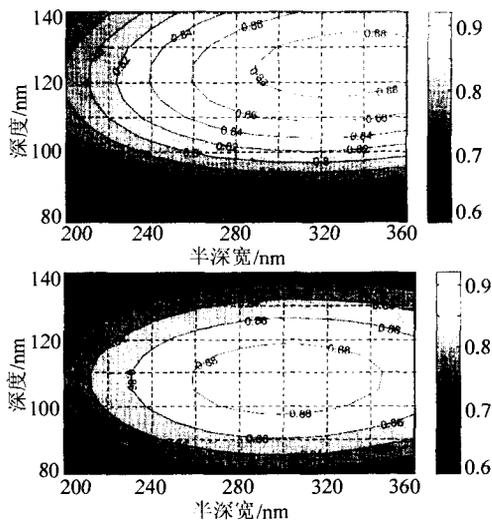


图 5 对两种坑形在不同深度和宽度下 I_{14N} 的仿真结果

上:染料聚合物工艺 下:光刻胶工艺

表 1 I_{14} 的实验和仿真结果的比较

工艺	深度/nm	半深宽/nm	实验 I_{14N}	仿真 I_{14N}	实验与仿真 I_{14N} 比值
光刻胶	122	282	0.74	0.8756	0.8451
染料聚合物	103	261	0.75	0.8790	0.8532

我们对实际生产线上得到的两种工艺的光盘进

行了测量。用原子力显微镜测量了几何坑形,用 DaTARIUS 光盘测试仪测试了 I_{14N} 参数。实验结果和仿真结果对照如表 1 所示。

实验测得的 I_{14N} 值比仿真的 I_{14N} 值小,这是因为:仿真的结果是理想的光盘读出系统下的结果,而实际的光盘读出系统(包括盘片测试仪)都存在着光学误差和伺服误差,这些都会造成读出信号幅值的降低,所以实验测得的 I_{14} 值会比仿真值小。两种工艺下实验与仿真 I_{14N} 比值相当,也证明了仿真结果的正确性。

4 结论

本文使用基于角谱分解的衍射理论,利用原子力显微镜得到的实际坑形,对两种工艺光盘 I_{14N} 参数进行了仿真。仿真结果表明:在较小的深度和半深宽下,染料聚合物工艺的坑形能得到与光刻胶工艺坑形相当的 I_{14N} 值。亦即,染料聚合物工艺的坑形对读出信号有更好的调制能力。实际光盘的测量结果证明了仿真结果的正确性。该结果对光盘生产中坑点尺寸的选定具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Korpel A. Simplified diffraction theory of the video disk[J]. Appl. Opt., 1978, 17:2037—2042.
- [2] Hopkins H H. Diffraction theory of laser read-out systems for optical discs[J]. J. Opt. Soc. Am, 1979, 69: 4—24.
- [3] Jipson V B, Williams C C. Two-dimensional modeling of an optical disk readout[J]. Appl. Opt., 1983, 22: 2202—2209.
- [4] Cheng X F, Jia H B, Xu D Y. Vector diffraction analysis of optical disk readout [J]. Appl. Opt., 2000, 39: 6436—6440.
- [5] Liu L, Shi Z M, He S. Analysis of the polarization-dependent diffraction from a metallic grating by use of a three-dimensional combined vectorial method[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2004, 21: 1545—1552.
- [6] 王玉英,熊剑平,贾惠波. 光盘信息符形貌对读出信号影响的研究[J]. 激光与红外, 2002, 32: 197—199.
- [7] 王玉英,熊剑平,马骋,等. 光盘信息符特征宽度的确定[J]. 光学技术, 2004, 30: 259—266.
- [8] Yue H D, Windeln W. Relationship between physical parameters and electrical parameters for recordable disk[J]. IEEE Trans. On Magnetics, 2005, 41: 1009—1011.
- [9] Shen Q H, Xu D Y. Analysis of the effects of disk tilt on the differential-phase-detection signal in a high-density DVD read-only disk driver[J]. Appl. Opt., 2006, 45: 3998—4004.
- [10] ECMA-267. 120 mm DVD - Read-Only Disk [S].

(上接第 355 页)

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 云茂金,李国华,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.
- [5] Kiselev A D, Sluckin T J. Twist of cholesteric liquid crystal cells:

Stability of helical structures and anchoring energy effects[J]. Physical Review E, 2005, 71, 031704: 1—11.

- [6] Shibaev P V, Kopp V I, Genack A Z. Photonic materials based on mixtures of cholesteric liquid crystals with polymers[J]. J. Phys. Chem. B, 2003, 107: 6961—6964.
- [7] Sarov Y, et al. Optical properties of polymer dispersed cholesteric liquid crystals[J]. Bulg. J. Phys., 2004, 31: 33—38.
- [8] Ramos L, et al. Rheology of defect networks in cholesteric liquid crystals[J]. Physical Review E, 2002, 66, 031711: 1—10.