

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院

博士学位论文

四分之一波长延迟膜在向列相液晶 显示器件中的应用

崔宏青

指导教师_____凌志华、研究员、理学博士_____

_____长春光学精密机械与物理研究所_____

申请学位级别_____博 士_____学科专业名称_____光学工程_____

论文提交日期_____2008.4_____论文答辩日期_____2008.5_____

培养单位_____长春光学精密机械与物理研究所_____

学位授予单位_____中国科学院研究生院_____

答辩委员会主席_____林君 研究员_____

Classified Index _____
UDC _____

Confidential grade _____
Number _____

**A Dissertation Submitted to Academy of Sciences, For the
Degree of Ph.D of Science**

**The Application of Quarter-wave Retardation Film in Nematic
Liquid Crystal Displays**

by

Cui Hongqing

Directed by

Prof. Ling Zhihua

**Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese
Academy of Sciences, China**

May, 2008

学位论文知识产权权属声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。知识产权归属中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。长春光学精密机械与物理研究所享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权力。本人离所后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长春光学精密机械与物理研究所。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：崔宏青

日期：2008年6月4日

导师签名：凌志军

日期：2008年6月4日

四分之一波长延迟膜在向列相液晶显示器件中的应用

崔宏青（光学工程）

导师：凌志华

摘要

本文围绕四分之一波长延迟膜在向列相液晶显示器件中的应用进行研究。四分之一波长延迟膜作为制作圆偏振片的重要元件而在各种类型的液晶显示中被广泛应用,首先根据 Muller 矩阵,设计了聚合性液晶型圆偏振片的最佳参数。应用宽波段消色差四分之一波长延迟膜,解决了反射式 VA 模式和单倍盒厚间距透反式向列相非扭曲液晶显示中存在的色散较大的问题,从而有利于实现应用上述模式的便携式液晶显示的全彩色化显示。另外,通过设置两组相互正交的线偏振片和四分之一波片组成圆偏光系统,设计了一种测量扭曲向列相液晶盒盒厚的新方法,不同于旋转液晶盒或偏振片寻找输出光强最大值或最小值的方法,圆偏光仪测量盒厚不需要旋转任何光学元件或液晶盒观测输出光强的变化,只需要观测检偏器在平行和垂直方向的两个强度值,减少了机械转动的次数,更加快速简洁。

从 Muller 矩阵出发,经过严格的理论解析推导,得到了液晶型宽波段圆偏振片的结构参数。这种结构由一个紧贴于扭曲向列相聚合性液晶薄膜的半波延迟膜与一个外贴的线偏振片组成。为了获得色散最小的圆偏振态,合理地设置线偏振与半波延迟膜,线偏振片与上层液晶分子取向之间的角度,精密设计液晶层相位延迟和扭曲角,可得到宽波段圆偏振片。另外,根据以上设计的参数关系,可以设计单偏振片反射式向列相液晶显示,并应用扩展琼斯矩阵对其显示特性进行了模拟分析。

随着信息化社会的到来,反射式和透反式的便携式液晶显示在个人信息显示应用中越来越受到人们的青睐。基于以上的理论,首次应用消色差四分之一波长延迟膜对手性垂直排列反射式液晶显示进行了色散补偿,应用 2×2 扩展琼斯矩阵对其显示特性进行模拟分析,通过宽波段四分之一延迟膜补偿,使反射式 VA 显示的亮暗状态反转,与单纯使用四分之一波长延迟膜补偿相比,有效地降低了暗态色散,提高了对比度;掺入适合螺距的手性剂材料有效降低了开态反射率受波长和电压的影响。

设计了两种单倍盒厚间距的透反式液晶显示: ECB/HAN 和 VA/HAN 透反式液晶显示模式。两种模式均是以 HAN 液晶层为反射区,应用宽波段四分之一波长延迟膜的理论模型对其进行补偿,得到常黑和常白两种模式的 ECB/HAN 透反式液晶显示以及常黑模式的 VA/HAN 透反式液晶显示。应用 2×2 扩展琼斯矩阵对其显示特性进行模拟分析,透射区电光特性曲线和反射区电光特性曲线比较吻

合，非常适宜便携式直视型全彩色液晶显示。

最后提出了一种应用两组相互正交的线偏振片和四分之一波片组成圆偏光系统测量扭曲向列相液晶盒盒厚的新方法，此方法适用于假定扭曲角已知的情況，能够实现快速测量，简洁而且有效。

关键词：四分之一波长延迟膜， 圆偏振片， Muller 矩阵， 反射式液晶显示， 透反式液晶显示

The Application of Quarter-wave Retardation Film in Nematic Liquid Crystal Displays

Cui Hongqing (Optical engineering)

Directed by: Ling Zhihua

Abstract

In this paper, the application of quarter-wave retardation film with a wide broadband for nematic liquid crystal displays(LCDs) was studied. The parameters of polymerized nematic liquid crystal type circular polarizer were designed and optimized. The problems of large color dispersion existing in reflective vertical alignment LCD and non-twisted nematic transreflective LCD were improved. The result would help to realize direct-view type reflective and transreflective full-color LCD. In addition, a new method for fast measuring the thickness of general twist nematic liquid crystal cell was proposed. In this method, we designed a circular polarized light system, which involving two pairs of conjugated linear polarizer and quarter-wave retardation plate at the front and back side. Be difference from the rotating polarizer/or liquid crystal cell method to find the maximum or minimum output intensity value, there is no need of rotating any optical elements or the liquid crystal cell for the circular polarized light meter method to measure the cell thickness of liquid crystal cell, it is enough for us to measure the two intensity values in the parallel and vertical orientation. The experiment results indicated that this method is fast and effective.

Based on Muller matrix method, a liquid crystal type chromatic circular polarizer was proposed after rigorous analytical deduction. This preferred device configuration includes a chromatic half-wave film adjacent to a twist nematic polymerized liquid crystal film, the linear polarizer is attached to the side of chromatic half-wave film. In order to obtain the lowest color dispersion for the output circular light, the angles between the axial of polarizer and the optical axial of the half-wave retardation film, as well as the orientation of liquid crystal molecule in the top layer are properly set. In addition, the optical retardation and the twist angle of liquid crystal layer must be exactly designed. Then the combination of the linear polarizer, the chromatic half-wave film and twist nematic polymerized liquid crystal film behaves as a broadband circular polarizer. According to the parameters obtained

above, designed single polarizer reflective nematic liquid crystal display. Simulated and analysed the optical performance with extended 2×2 Jones matrix method.

Along with the information society coming, reflective and transfective LCDs gain more and more attention in personal information display. Based on the above theory, for the first time compensated the chiral vertical alignment reflective LCD by the chromatic quarter-wave retardation film to solve the problem of large color dispersion, and the optical performance was analysed with extended 2×2 Jones matrix method. The bright and dark state of reflective VA mode LCD were inverted after compensated by the broadband quarter-wave retardation film, compared with the effect of compensated by a single quarter-wave retardation film, the color dispersion of dark state was depressed more effectively, and the contrast ratio was enhanced; With the chiral dopant introduced, the dependence of reflectivity on the wavelength and voltage was suppressed. In the meanwhile, a thicker cell gap was obtained which help to control in the factory production.

Two kinds of single cell gap transfective LCDs were designed: ECB/HAN and VA/HAN mode transfective LCDs. Taking the HAN liquid crystal film as the reflective area in both the two modes. Through the compensation using the broadband quarter-wave retardation film, normally white/normally black ECB/HAN mode transfective LCDs and normally black VA/HAN mode transfective LCD are obtained. The optical performances of the two kinds of transfective LCDs were analysed with extended 2×2 Jones matrix method. The results indicate that the electric-optical curve in the transmissive area matches well with that in the reflective area, they are very suitable to be applied in the full color direct view portable type LCDs.

In the last, proposed a new method of fast measuring the twist nematic liquid crystal cell gap utilizing circular polarized light system including two pairs of conjugated linear polarizer and quarter-wave retardation plate at the front and back side. This method is fitted for the twist angle of liquid crystal cell is known beforehand. The experiment results indicated that this method is fast and effective.

Key Words: Quarter-wave retardation film, Circular polarizer, Muller matrix, Reflective liquid crystal display, Transfective liquid crystal display.

目录

第一章 绪论	1
§ 1.1 液晶研究的发展历史.....	1
§ 1.1.1 液晶材料的结构与分类.....	2
§ 1.1.2 液晶显示器件的原理及分类.....	4
§ 1.2 本论文研究对象	6
§ 1.2.1 反射式彩色液晶显示.....	6
§ 1.2.2 透反式液晶显示.....	7
§ 1.2.3 液晶盒盒厚的测量.....	7
§ 1.3 论文立题的意义和论文结构安排.....	8
§ 1.3.1 四分之一波长延迟膜改善液晶显示特性的方法研究及意义.....	8
§ 1.3.2 论文结构.....	11
第二章 液晶显示器件模拟计算的理论基础	13
§ 2.1 液晶的连续体弹性形变理论.....	13
§ 2.1.1 形变的描述.....	14
§ 2.1.2 弹性自由能.....	14
§ 2.1.3 表面锚定能.....	15
§ 2.2 有限差分法求解液晶分子指向矢的分布.....	16
§ 2.2.1 指向矢一维形变下的液晶 Gibbs 自由能密度.....	16
§ 2.2.2 液晶薄层空间格点划分与描述.....	18
§ 2.2.3 有限差分法的数学描述.....	19
§ 2.2.4 指向矢和电压分布求解过程.....	20
§ 2.3 偏振光的描述.....	24
§ 2.3.1 偏振光的偏振椭圆表示.....	24
§ 2.3.2 偏振光的琼斯矢量表示.....	27
§ 2.3.3 偏振光的斯托克斯(Stokes)参量和 Poincaré球表示	28
§ 2.4 液晶器件光学特性计算	30
§ 2.4.1 各种模拟方法简介.....	30
§ 2.4.2 两层各向同性介质夹一层单轴介质的 Jones 2×2 矩阵.....	31
§ 2.4.3 扩展 Jones 2×2 矩阵.....	33

§ 2.5 本章小结.....	37
第三章 液晶型圆偏振片设计及单偏振片反射式向列相液晶显示.....	39
§ 3.1 传统的圆偏振片的设计方法.....	39
§ 3.2 液晶型宽频圆偏振片设计	41
§ 3.2.1 均匀扭曲向列相液晶的 Jones 及 Muller 矩阵表示.....	41
§ 3.2.2 中心波长入射情况下液晶型圆偏振片参数的最优化设计.....	44
§ 3.3 单偏振片反射式扭曲向列相液晶显示	48
§ 3.3.1 暗态光谱特性.....	48
§ 3.3.2 延迟膜与液晶材料的色散.....	51
§ 3.3.3 方位角度最佳化设计.....	53
§ 3.3.4 模拟结果比较和讨论.....	60
§ 3.4 本章小结.....	65
第四章 消色差反射式手性垂直液晶显示.....	67
§ 4.1 反射式液晶显示器介绍	67
§ 4.1.1 为什么采用反射式液晶显示器.....	67
§ 4.1.2 反射式液晶显示模式的设计.....	68
§ 4.2 VA 显示模式的特点.....	68
§ 4.3 消色差反射式手性垂直排列液晶显示模式	69
§ 4.3.1 宽波段消色差四分之一波长延迟膜.....	70
§ 4.3.2 无手性剂反射式 VA 模式.....	70
§ 4.3.3 掺手性剂反射式 VA 模式.....	72
§ 4.3.4 电光特性与视角特性比较.....	73
§ 4.4 本章小结.....	75
第五章 单倍盒厚间距透反式液晶显示模式	77
§ 5.1 透反式液晶显示的特点及发展	77
§ 5.2 ECB/HAN 透反式液晶显示	78
§ 5.2.1 常黑模式 ECB/HAN 透反式液晶显示.....	79
§ 5.2.2 常白模式 ECB/HAN 透反式液晶显示.....	81
§ 5.2.3 模拟计算结果.....	83
§ 5.2.4 结论.....	87
§ 5.3 常黑模式 VA/HAN 透反式液晶显示.....	88

§ 5.3.1 VA/HAN 透反式液晶显示结构模型	88
§ 5.3.2 VA/HAN 模式反射区亮暗显示原理	89
§ 5.3.3 透射区偏振片平行模式亮暗显示原理	89
§ 5.3.4 透射区偏振片垂直模式亮暗显示原理	90
§ 5.3.5 模拟计算结果	90
§ 5.3.6 结论	93
§ 5.4 本章小结	94
第六章 利用圆偏光系统测量扭曲向列相液晶盒盒厚	95
§ 6.1 扭曲向列相液晶盒盒厚的测量方法简介	95
§ 6.2 圆偏光系统测量扭曲向列相液晶盒盒厚的原理分析	95
§ 6.2.1 透射式液晶盒盒厚光学测量系统	96
§ 6.2.2 偏振态轨迹变化的 Poincaré 球分析	98
§ 6.2.3 反射式液晶盒盒厚光学测量系统	101
§ 6.3 实验	102
§ 6.4 本章小结	105
第七章 结论	107
参考文献	111
附 录	121
一、 崔宏青个人简历	121
二、 崔宏青在攻读博士学位期间发表的论文目录	121
致 谢	123

第一章 绪论

液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)器件是众多平面显示器件中发展最成熟、应用面最广泛、已经产业化并且仍在迅猛发展着的一种显示器件,究其原因这是由于液晶自身的一系列无可比拟的特点和相关配套技术的发展所决定的。本章首先介绍了液晶及液晶显示器件的结构、分类以及发展的历史和现状,然后阐述了四分之一波长延迟膜在便携式非扭曲向列相液晶显示,特别是反射式及透反式液晶显示中的应用及地位,最后概述了本论文研究工作的研究背景、主要内容和意义。

§ 1.1 液晶研究的发展历史

液晶的发现可以追溯到 1888 年,那时奥地利植物学家埃尼采儿(F. Reinitze)^[1]注意到,在测定胆甾醇酸酯(Cholesteryl benzoate)的熔点的时候,发现熔融后会经历一个不透明混浊液态阶段,此时的温度称之为熔点,继续加热,才成为透明的各向同性液态,此时的温度称之为清亮点。德国物理学家雷曼(O. Lehmann)观察到同样的现象,经过系统的研究,雷曼发现在熔点清亮点的温度范围内,许多有机化合物都会出现不同于各向同性液体的中介相,这些物质的机械性能与各向同性液体相似;但是它们的光学性质却和晶体相似,是各向异性的,这就是说,物质在中介相具有强烈的各向异性物理特性,同时又象普通液体那样具有流动性。因此,这种中介相被称之为液晶相。那些可以出现液晶相的物质就被笼统地称之为“液晶”。

二十世纪二十年代,人们合成了大量的液晶材料。法国的 George Friedel 及 Grandjean 等对液晶的光学性质作了详细的研究。Friedel 完成了液晶研究历史上最重要的研究成果之一——液晶的分类,将液晶划分为近晶相、向列相和胆甾相。由于历史条件所限,当时并没有引起很大重视,只是把液晶用于压力和温度的指示器上。

二十世纪三十年代到六十年代之间液晶物性研究取得丰硕成果,众多世界著名物理学家对液晶的基本理论,液晶的电、光、磁学的各向异性,液晶材料的电光效应等各个领域进行了深入细致的研究。其中有两项重大研究成果对液晶物性研究及显示应用具有划时代的意义,其一是由 Oseen^[2]和 Zocher^[3]等创立

的连续体理论,此理论最终由 Frank^[4]在六十年代末完成;另一项重大研究成果是发现磁场或电场的作用引起向列相液晶的变形及其阈值的变化,此阈值是 Freedericksz 和 Zolina 在 1927 年发现的^[5],即所谓的 Freedericksz 转变。

液晶的发展在1961年出现了转折点。该年,美国无线电公司(RCA)普林斯顿研究所的一个从事微波固体元件研究已两年的年轻技术工作者Heimeier^[6]发现了动态散射、相变等一系列液晶的电光效应,并且研究出一系列数字、字符显示器件以及液晶钟表、驾驶台显示器等应用产品。1968年RCA公司向世界公布这些液晶发明。1969年2月日本NHK向国内进行了报导,引起日本科技、工业界的极大重视。日本将当时的大规模集成电路与液晶相结合,以“个人电子”市场为导向,由液晶手表、液晶计算器等低档次产品起步,发展到小尺寸无源矩阵黑白显示器件、非晶硅有源矩阵彩色显示器件,直到目前多晶硅有源矩阵高分辨率彩色液晶显示器件,经过30多年的发展,液晶已形成一个独立的学科,液晶知识涉及多门学科,化学、光学、计算机、微电子、精细加工、色度学、照明等。要全面、深入了解液晶显示器件必须对上述提及的领域有一定的了解。

§ 1.1.1 液晶材料的结构与分类

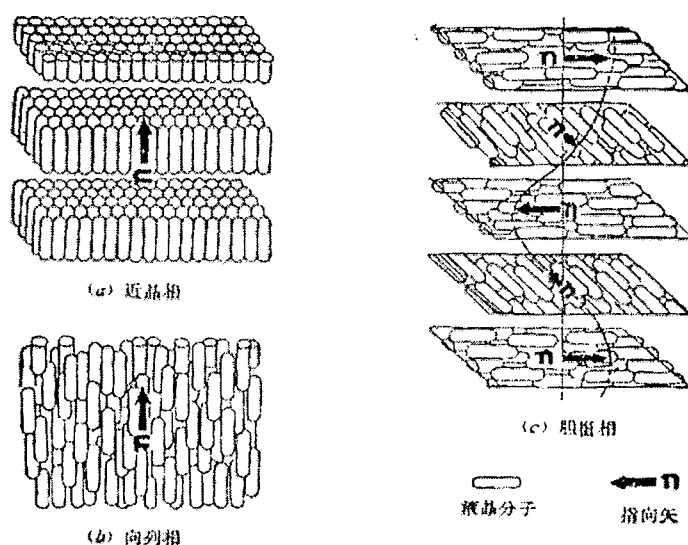


图 1.1 近晶相、向列相、胆甾相液晶的分子排列示意图
(a)近晶相 (b)向列相 (c)胆甾相

一般情况下,从成分和中间相出现的物理条件来看,液晶材料大致可分为

热致液晶 (Thermotropic Liquid Crystal) 和溶致液晶 (Lyotropic Liquid Crystal) 两大类^[7]。热致液晶是指单成分的纯化合物或均匀混合的混合物在温度变化下出现的液晶态，其相变过程与温度变化有关。典型的长棒状有机化合物热致液晶的分子量一般在 $200 \sim 500 \text{ g/mol}$ 左右，分子的长宽比约在 $4 \sim 8$ 之间。热致液晶中所有的分子对长程序都具有同等的作用。热致液晶主要应用于显示领域。若从液晶分子排列的平移和取向有序性来区分液晶，特别是对热致液晶，可以分为三大类：近晶相、向列相和胆甾相。三类液晶相的分子有序性如图 1.1 所示，图中矢量 n 表示液晶分子的宏观取向，被称为指向矢。

近晶相 (Smectic) 也称层状相，如图 1.1(a) 所示，从结构上看具有层状结构，层与层之间的距离是一定的，在每一层内分子的长轴互相平行，其方向垂直于层面或与层面斜交，各层中分子的重心可能是杂乱分布的，也可能做有规则的排列，并只能在层中运动。近晶相的种类繁多，结构较为复杂。与显示应用关联较大的是近晶 C 相，其每一分子层仍是二维液体，在光学上是双轴晶体，其分子长轴倾斜于层法线方向。如果在 Sc 相中加进某种光活性分子，就会形成具有螺旋结构的 Sc^* 相，即铁电液晶。

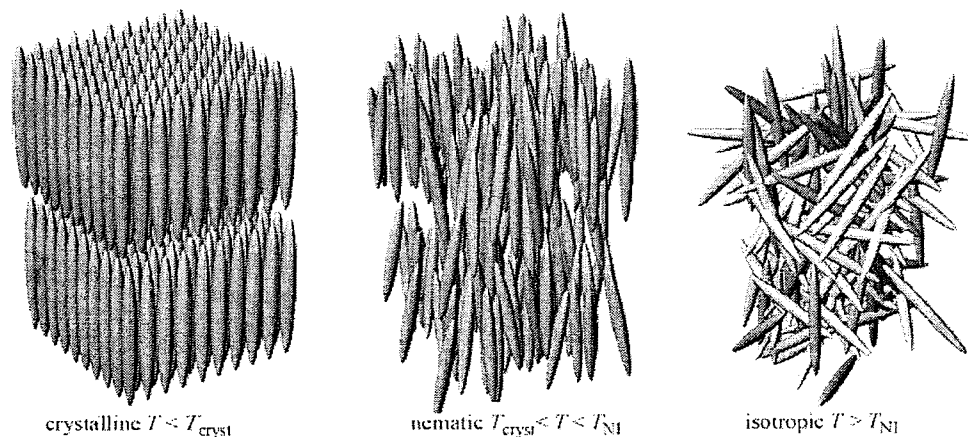


图 1.2 不同相态的分子形态关系示意图

向列相 (Nematic) 也称丝状相，如图 1.1(b) 所示，其分子长轴的取向存在一定的有序性，并倾向于平行某个择优方向排列，这个择优方向常常用单位矢量 n 表示，但是分子的重心长程无序。目前用于液晶显示器件工业生产的液晶材料主要是有机小分子向列相材料。这种液晶分子是 $100 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA}$ 左右的细长棒状分子，在室温下通常呈流动态，也就是液晶相。液晶相的物质除了具有液体的流动性以外，它们还具有一些晶体特性，就是晶体的各向异性。这些各向异性体现在光学上就是其对光具有光学双折射特性（相对于液晶分子，光的传播方向不同，其具有不同的折射率）。液晶材料在温度升高到一定温度后，如图

1.2 所示, 会由液晶相变为各向同性相(Isotropic), 也就是人们通常说的液体相。温度降低到一定程度液晶材料也会由向列相转化为近晶相或晶体相。液晶材料变成各向同性相或近晶相及固体时, 液晶显示器是不能正常工作的。

胆甾相(Cholesterics)液晶是因为来源于胆甾醇衍生物而得名的。如图 1.2(c) 所示, 这类液晶分子呈扁平状, 排列成层, 层内液晶分子互相平行。分子长轴平行于层平面, 不同层的分子长轴方向稍有变化, 而对于相邻两平面而言, 其指向矢有一个扭曲角, 沿层的法线方向排列形成螺旋周期结构。

§ 1.1.2 液晶显示器件的原理及分类

液晶除了具有流动性及光学各向异性之外, 还具有介电各向异性, 介电各向异性使液晶分子在外电场的作用下发生形变, 由于其光学各向异性, 液晶对于外界光的调制作用将发生改变, 这正是液晶为什么能应用于显示的主要原因。图 1.3 是目前广泛应用的扭曲向列相液晶显示器 (Twisted Nematic Liquid Crystal Display, 简称 TN-LCD) [8] 的原理图。上下偏振片垂直放置, 液晶扭曲 90 度, 不加电压时, 入射光经过上偏振片变成线偏振光, 然后线偏振光将随液晶的扭曲而同步扭曲, 因而在到达下偏振片时, 偏振面扭曲 90 度, 线偏振光正好从下偏振片出射, 液晶显示器呈现亮态, 此时实际上是利用液晶的旋光效应。当外加电压超过液晶的阈值电压后, 液晶分子不再是扭曲排列而呈现垂直于玻璃基板的方向排列, 导致旋光效应消失, 入射光变成线偏振光后经过液晶层时不再发生扭曲, 从而被下偏振吸收, 液晶显示器呈现暗态。液晶显示器利用这一现象, 显示出文字、图像、画像等。

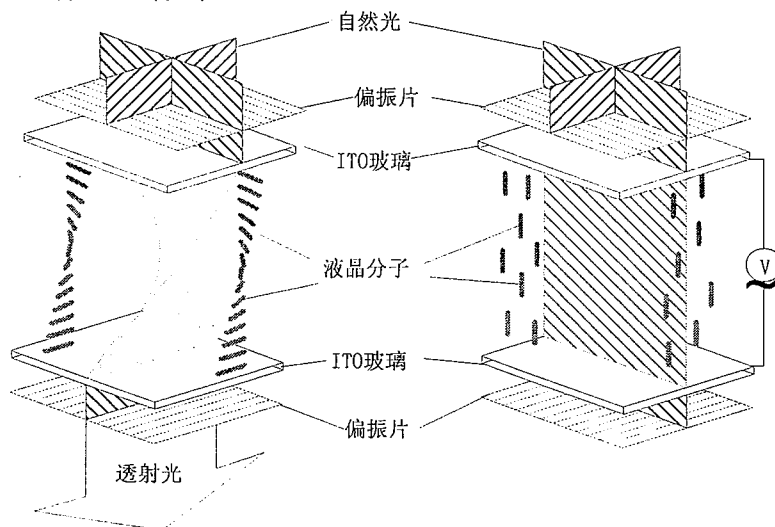


图 1.3 TN-LCD 的结构原理图

液晶显示器件应用范围广泛, 其类型规格也很多, 根据分类的标准不同,

可以分成如下情况：从显示方式上可分为无源矩阵式和有源矩阵式。无源矩阵式(Passive Matrix)^[9, 10] TN-LCD 的电光曲线比较舒缓，其无源矩阵多路寻址能力受到限制，因此只适用于低容量显示。高扭曲向列相液晶显示器(High-Twisted Nematic Liquid Crystal Display, 简称 HTN-LCD)和超扭曲向列相液晶显示器(Super-Twisted Nematic Liquid Crystal Display, 简称 STN-LCD)^[11, 12]的多路寻址能力大大增强。但是在无源矩阵显示方面，二者均存在交叉串扰的影响。为此，有源矩阵薄膜晶体管液晶显示器(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display, 简称 TFT-LCD)^[13, 14]应运而生，由于每一个像素由一个独立的有源开关控制，因而从根本上消除了交叉串扰现象。液晶显示器件按照观察者的观看方式可以分为直接观看显示屏的直视型和将影像投影到屏幕上观看的投影型两大类，如图 1.4。其中直视型又分为带有背光源的透射型(Transmissive)和不带背光源的反射型(Reflective)^[15]两种。由于液晶本身不发光，液晶盒后面的背光源发出的光通过液晶盒的光的调制作用，从而显示影像，这样就构成了透射型显示。反射型显示则是利用环境光，如日光或灯光通过液晶盒背基板的反射作用，同时配合液晶盒的光的调制作用，这样显示图像的器件就是反射型器件。而反射型液晶显示器件由于在环境比较暗的情况下，观察者难以使用，所以在实际应用中更多地是结合透过型一起做成所谓半透半反型(Transflective)^[16]的显示器，如图 1.5。

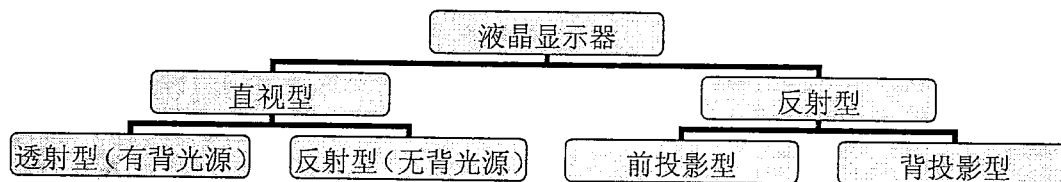


图 1.4 液晶显示器分类

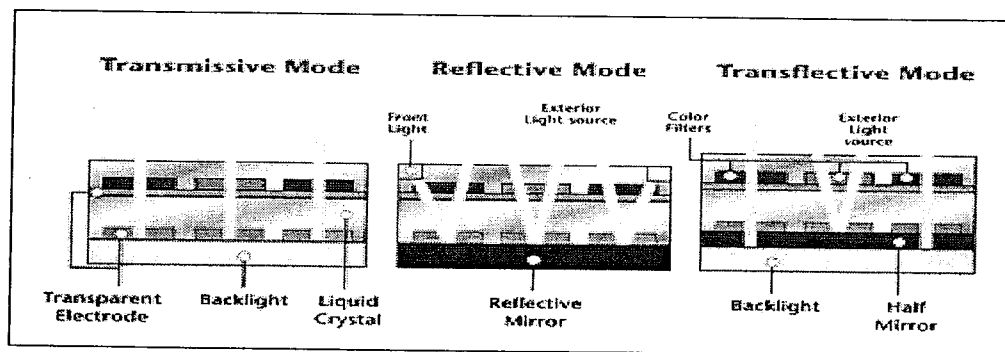


图 1.5 透射式、反射式及半透半反式液晶显示

另外，如果按照液晶分子是否扭曲可以将液晶显示分为扭曲型和非扭曲型液晶显示。扭曲型的液晶显示主要有TN, STN等等，笔记本电脑及台式PC机一般采用 90° TN 模式；而抵档的手机等便携式终端显示主要采用STN模式。随着微电子

技术的发展和液晶工业的成熟,非扭曲的液晶显示越来越占有重要的地位,主要包括电控双折射模式(Electrically Controlled Birefringent mode,简称ECB mode),混合排列模式(Hybrid Aligned Nematic Liquid Crystal mode,简称HAN mode)^[17],垂直排列模式(Vertically Aligned mode,简称VA mode)^[18]共面转换模式(In Plane Switching mode,简称IPS mode)^[19-22],边缘场开关模式(Fringe Field Switching mode,简称FFS mode)^[23],光学补偿弯曲模式(Optically Compensated Bend mode,简称OCB mode)^[24]以及表面稳定铁电液晶模式(Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal mode,简称SSFLC mode)^[25]。

§ 1.2 本论文研究对象

§ 1.2.1 反射式彩色液晶显示

反射式 TFT-LCD 保持了液晶显示原有的优势与特点,已成为当今液晶显示一大发展趋势,更是未来液晶显示持续发展的重要支柱之一。反射式的优点不言而喻,它利用并调制环境光满足显示需求,省电、节能皆源于此。早期的中低档 LCD 大都属于反射式。在手表和计算器中可以看到这些例子,但由于普通扭曲向列型(TN)LCD、超扭曲向列型(STN)LCD 必须采用偏光片,故其显示底色灰暗,对比度低、显示质量差。随后,在透射式 LCD 背后增装了背光源,改善了显示质量,众多笔记本电脑及台式 PC 机的监视器皆采用透射式 TFT-LCD,特点是具有颇高的分辨率及显示彩色活动图像的性能,而且显示亮度足够高。但因需有背照光源的透射式 LCD 屏,故美中不足的是功耗较大,还占有一定的空间。另外厚度及重量限制其更为广泛的应用,不适用于便携领域。并且,相对于一系列新型低压、低功耗的主动式发光显示器,如 OLED、PLED 及 FED 等的不断问世,其优势则大减。

面对这一市场的竞争,自 20 世纪 90 年代以来,人们试图通过不用背照光的方法,寻找实现薄型化、重量轻及低功耗的新型 TFT-LCD。因此种方法是利用反射环境光来显示图像,故将其称为反射式(Reflective type)TFT-LCD。直视型反射式显示器被认为是下一代最重要的显示器产品之一,已先后提出 TN-ECB 模式、混合排列模式,反射式 OCB 模式等。反射式显示器的关键性能参数有三个:(1)功耗;(2)反射率;(3)对比度。尽管目前带背光源的 LCDs 可以显示清晰而无闪烁的图像,而且并不十分费电,但仍留有进一步节能的余地来方便用户。用于这些 LCDs 的电一半以上都消耗在显示器的照明上。例如,在对角线为 12 inch 的 LCD 中,3W 用于背光照明,2W 用于驱动液晶屏。背光源功耗如此之高是因为只有不足 10% 的背光能穿过液晶屏。因此,使用没有背光源的系统可望降低 60% 的功耗,并可能实现高信息量的显示,从而扩大显示器的应用范围。除了低功耗以外,反射式显示器的另一个优点是其类似于纸张

的外观。自发光显示器的亮度是固定不变的，并与周围的环境和照明条件无关。与之不同，反射式显示器的亮度总是取决于环境，因而更容易被眼睛接受，使阅读速度提高并降低眼睛的疲劳程度。类似纸张的显示器的关键特性是具有高分辨率，如黑白两级显示的分辨率为 300dpi，反射率与纸张相近，对比度优于 10: 1。如果显示灰度的话，其像素密度可能降低，分辨率降为 150dpi。实际上，要想真正实现明亮的令人满意的彩色反射式 TFT-LCD，必须解决众多的研究课题。

将来，反射式显示器的主要应用领域大概是 PDA、MP4 和手机等便携式显示以及代替印刷品的模拟纸张显示器。特别是便携式产品正推动着反射式 TFT-LCD 的市场发展。反射式彩色 TFT-LCD 已开始商品化。如分辨率 400×234 、画面宽高比 16: 9 的 5.8 英寸反射式彩色 TFT-LCD，其反射率达 30%、响应速度 30ms 及功耗为 0.15W。

§ 1.2.2 透反式液晶显示

透反式液晶显示器兼有透射式和反射式显示器的优点，功耗低，环境光适应性强，是目前比较活跃的平板显示技术研究方向。透射式液晶显示对比度高，亮度好，色纯度高，但使用背光源，功耗大，在强环境光下的可视性差；反射式液晶显示器不用背光源，功耗低、重量轻、小巧精致、在强环境光下的可视性好，但对比度低、色饱和度差、在暗环境光下可见性差。而透反液晶显示器兼具透射式和反射式液晶显示器的优点，具有很大的环境光使用范围，透反式液晶显示器可以单独或同时采用透射模式或反射模式显示图像，所以这种透反液晶显示器可以在任何环境光下使用。因此，透反液晶显示器一直受到业界的关注，已经在便携式电子设备方面得到了广泛的应用。

透反式液晶显示器的基本结构是将每个 R、G、B 子像素单元分成透射区和反射区两部分，使透射区工作于透射模式，反射区工作于反射模式。其工作原理是：当环境光较暗时，打开背光源，光线透过透射区，器件工作于透射模式；而在明亮环境下，关闭背光源，透反式液晶显示器工作在反射模式，利用环境光反射来显示图像。目前开发的透反式显示模式主要包括金属开孔式透反式液晶显示器、双盒厚 ECB 透反式液晶显示器、采用图像增强反射器的透反式液晶显示器、双电路驱动式透反式液晶显示器、双液晶模式透反式液晶显示器和空间混色与时间混色相结合的透反液晶显示器等，这些模式各有自己的优点和缺点。目前，色彩平衡、图像亮度、视角、生产成本等是透反液晶显示器研究需要解决的主要问题。

§ 1.2.3 液晶盒盒厚的测量

当前，液晶显示器件作为平板显示的主流得到了广泛的发展和应用。在液

晶面板制作过程中，精确的控制液晶盒盒厚至关重要，因为它直接影响到面板的光电特性，比如亮度和对比度。因此，在生产过程中，快速而有效的测量液晶盒盒厚，对于得到高质量的显示画面非常重要。传统的测量液晶盒盒厚的方法主要有：单色光测量法和光谱扫描法。相位补偿法以及利用圆偏振光或线偏振光条件特性的偏振旋转法属于单色光测量法的范畴。其中相位补偿法需要调整相位补偿器使输出光强最小，得到相位补偿器相位与液晶盒厚的关系，从而求取液晶盒厚。偏振旋转法是通过液晶盒或者偏振片的旋转得到最大或最小输出光强，将此时的光学元件角度值代入特定的条件公式求解得到盒厚。光谱扫描法与偏振旋转法相类似，也是通过液晶盒或偏振片的旋转从而得到光谱曲线对应的极大值点或极小值点，以此得到与盒厚的对应关系，从而求取盒厚。

§ 1.3 论文立题的意义和论文结构安排

完整的TFT-LCD家族应该涵盖有手机、数码相机、数码摄影机(Digital Video Camera, DVC)、个人数码助理PDA、AV、车用浏览器面板 (Car Navigator)、平板电脑 (Tablet PC)、笔记型电脑、显示器、液晶电视 (LCD-TV)^[26]等。在此之前的液晶显示器采用的多是传统的扭曲向列式 (Twisted Nematic, TN) 显示模式，此模式的产品确也撑起了行业近些年的兴衰，而且多家面板厂商前仆后继的投入生产后，供需的起伏让此产品有着强烈的景气循环依存性，不过这样的状况到了最近几年已经改观。多样性的显示技术和面板大型化，让TFT-LCD产业破网而出，打破了传统的扭曲向列式显示模式独大的格局。其中所谓的多样性显示技术，最受瞩目就是非扭曲液晶显示技术，其在便携式个人信息显示领域得到越来越广泛的关注和应用。因为这种便携式个人信息显示设备一般用电池驱动，所以它必须保持非常低的电损耗，因此人们把注意力投入到反射型或透反型液晶显示器件的研究当中。在便携式直视型液晶显示领域，全彩色、高对比度、广视角和大容量显示是发展的趋势。反射式和透反式液晶显示正在取代透射式液晶显示成为当前市场的主流，而非扭曲液晶显示正在取代TN型液晶显示在反射式和透反式液晶显示中扮演越来越重要的角色。但是反射式和透反式液晶显示技术还存在着很多不足，例如反射模式的对比度难以提高，液晶分子的非扭曲排列方式导致的暗态色散较大，难以实现全彩色直视型液晶显示等等。因此在对比度和全彩色化方面存在很大的改善余地。

§ 1.3.1 四分之一波长延迟膜改善液晶显示特性的方法研究及意义

因为圆偏振片和椭圆偏振片是在偏振片上组合了具有适当相位差的光学薄膜的物质，由于液晶显示器的工作原理所必须的理由或为了改善视角特性问题，因此其作为液晶显示器件的一个部件来使用，在各种显示模式中，由于光源和液晶的位置关系决定的方式有所不同，例如上面提到的TN, STN型LCD, IPS mode、FFS

mode、ECB mode、VA mode、HAN mode、OCB mode以及FLC型的透射型、反射型和透反型等，因此需要圆偏振片和椭圆偏振片对各种方式的液晶显示模式进行补偿。

众所周知，在TN、STN型液晶显示装置中，为了消除透过液晶时由于剩余延迟引起的画面着色问题，同时为了消除由观看方向引起的显示色或显示对比度变化的问题，一般使用线偏振片和光学薄膜组合的椭圆偏振片进行补偿。

然而在应用外光作为光源的反射型、透反型以及微反射型的LCD中，通常使用四分之一波长延迟膜^[27-29]和线性偏振片组合的圆偏振片进行补偿。四分之一波长延迟膜通常被应用在非扭曲液晶显示器件中，以此改善显示性能。通常情况下线性偏振片吸收轴与四分之一波长延迟膜的光轴夹角为 45° 时，可以使从线偏振片一侧垂直入射的光经过四分之一波长延迟膜后以圆偏振态出射，从而构成一个圆偏光片。

四分之一波长补偿膜在改善反射式液晶显示的对比度方面具有优势。在一个将圆偏光片及反射体组成的叠片中，当圆偏振光在反射体表面反射时其旋转方向发生反转，所以从偏振片一侧垂直入射到反射体上的光的反射理想地变为零，利用这个原理，可以有效降低显示器表面的反射光出射率，从而提高对比度。

另外，通常的四分之一波长延迟膜只是在一个波长下具有 $1/4$ 波长的相位差，其它波长下相位差偏离该值，所以为了使其发挥作为跨越在整个可见光区域的 $1/4$ 波长延迟膜的功能，需要开发使用一片或多片 $1/2$ 波长延迟膜和 $1/4$ 波长延迟膜层叠而成的宽波段相位差膜与线性偏振片组合而成的宽波段圆偏振片，这时需要精确的控制涉及每个波长延迟膜方位角的层叠角度以及波长延迟膜光轴与线性偏振片吸收轴的层叠角度。另外，用于液晶显示元件时，波长延迟膜的光学轴和液晶的取向方向所成的角度也必须精密符合设计值。

以往，在相位差膜中使用双折射性拉伸薄膜，但近年，作为具有更复杂的光学性质的相位差膜，开发了在设置了取向膜的基板上涂布聚合性液晶，在使该液晶分子取向的状态下使其固化而得到的光学薄膜。将此种薄膜与线性偏振片、 $1/2$ 波长延迟膜相结合可以得到一种新型的液晶型宽波段圆偏振片。利用Jones矩阵或Muller矩阵计算线性偏振片吸收轴与 $1/2$ 波长延迟膜和 $1/4$ 波长延迟膜（或者具有固定取向的扭曲向列相聚合性液晶薄膜构成的消色差 $1/4$ 波长延迟膜）的方位角的层叠角度，同时扭曲向列相聚合性液晶薄膜的扭曲角和相位延迟也必须精密的设计。 $1/4$ 波长延迟膜在液晶显示器件中的应用，不但可以提高显示对比度，有效降低暗态色散，而且还可以实现视角依赖性小、全彩色化的液晶显示器件。本论文前半部分就是用四分之一波长延迟膜对应用非扭曲液晶显示模式的反射式、透反式便携式液晶显示的色散较大，及反射模式对比度较低的问题进行补偿方法的研究。

四分之一波长延迟膜作为特定方式的液晶显示器件的一部分在显示特性的改善方面发挥了不可或缺的作用。除此之外，四分之一波片在液晶盒盒厚的测量方面同样有着重要的应用价值。众所周知，在测量薄膜厚度或薄膜折射率时通常

会用到椭圆偏振仪，而1/4波片就是用来补偿使用椭圆偏振仪检测薄膜时所产生的相位差的一个重要的光学元件，从而检测光线经过待检测样品所产生的相位延迟和方位角。另外，取代机械转动式的光电型椭圆偏光谱仪，例如，采用液晶相位调制器的光电型椭圆偏光谱仪，需要1/4波长液晶相位调制器来检测光线经过待检测样品后的Stokes参量，从而确定膜厚或折射率随波长的依赖关系。本论文最后一部分介绍了一种利用四分之一波片组成的圆偏光仪测量向列相液晶盒盒厚的新方法。

最近关于四分之一波长延迟膜在液晶显示器件中的应用的研究有了进一步的进展和应用。一般情况下，一对正交的线偏振片在许多透射型液晶显示中被广泛采用。如果非扭曲型液晶盒放置在两片正交的线偏振片之间时，为了获得最大透过率，在显示明亮画面时，液晶分子应该按照两片偏振片吸收轴的等平分线（bisectors）方向取向。由于VA模式的透射型液晶显示高对比度的特点，在大尺寸LCD-TV中被广泛采用。为了在所有方位角度观察时获得均匀的显示画面，将VA型液晶像素划分成四畴或更多畴。对于四畴而言，在显示明亮画面时，每个畴的液晶分子在电场的作用下都要按照正交偏振片两个吸收轴的等平分线方向重新取向，如图1.6所示。

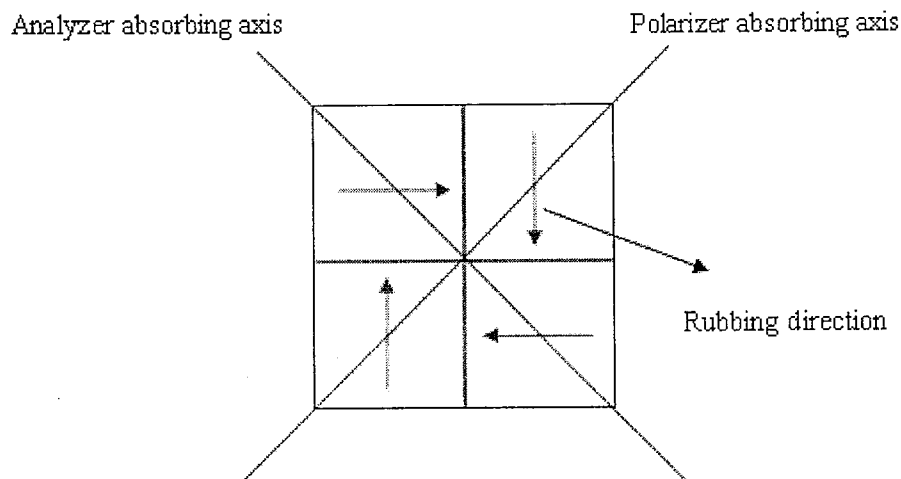


图 1.6 四畴 VA 模式透射型液晶显示各畴液晶分子取向和偏振片吸收轴方位角度示意图

由于采用多畴显示，畴与畴的交界处由于液晶分子的取向不同会产生畸变，因而在选择态产生明亮画面时，在畴与畴的交界处会产生阻碍光线透过的现象，从而降低了开口率，同时使得对比度下降。如果将多畴VA型液晶盒夹在两片互相正交的圆偏振片（polarizer+1/4 film）之间，那么通过琼斯矩阵计算得到的结论表明：出射光强只与开态时倾倒的与基板平行的液晶分子的相位延迟有关，即 $T = \sin^2(\delta/2)$ ，而与液晶分子的取向方位角度 ϕ 无关，因而，各畴的液晶分子取

向不必位于偏振片吸收轴的等平分线的位置；同时，畴与畴的交界处液晶分子取向紊乱所带来的影响不会在显示明亮画面时表现出来，从而有效的提高了开口率 and 对比度，提高了光利用率。

另外在采用VA模式的硅基液晶微显示(Liquid Crystal on Silicon, 简称 LCoS)中，由于在极小的尺寸上实现大信息量的高分辨率显示，要求每个像素的面积非常小，尺寸通常为10-20微米左右，因而像素与像素之间横向电场加强，导致横向电场与垂直电场竞争加剧，从而引起的边缘场效应是影响画面显示质量的一个重要因素，而在如此小的尺寸上制作黑矩阵遮掩杂散光也不太现实，基于此种原因，将玻璃基板表面贴附的线偏振片用圆偏振片代替，与用1/4波长延迟膜补偿透射型多畴VA模式大尺寸液晶显示的原理相似，可以实现消弱边缘场效应，提高光利用率 and 对比度的作用。

§ 1.3.2 论文结构

本论文主要是针对四分之一波长延迟膜在向列相液晶显示中的应用进行研究。应用Muller矩阵对扭曲向列相液晶层的相位延迟和扭曲角进行计算分析，与半波延迟膜和线偏振片以一定角度关系构成叠片，从而得到了宽波带圆偏振片，当扭曲的液晶层被非扭曲液晶层或单轴延迟膜代替时，证明其有效相位延迟为四分之一波长时，同样可以得到宽波带圆偏振片。基于上述结论，用宽波带四分之一波长延迟膜对掺入手性剂材料的反射式VA显示进行补偿，得到对比度高、色散小、开态反射率对波长和电压依赖性小的彩色化液晶显示。设计了两种单倍盒厚间距透反式液晶显示：ECB/HAN和VA/HAN透反式液晶显示模式。同时应用宽波带四分之一延迟膜对两种模式进行补偿，得到很好的显示特性。另外搭建了应用四分之一波片的圆偏光仪，能够实现对向列相液晶盒盒厚的快速而有效的测量。

本论文共分七章对四分之一波长延迟膜在液晶显示中的应用进行讨论：

在第一章《绪论》中主要回顾了液晶及液晶显示器件的结构、分类以及发展的历史和现状。介绍了本文所主要研究的对象：反射式液晶显示；透反式液晶显示；液晶盒盒厚测量的主要方法，以及他们各自的技术特点和存在的问题。介绍了利用四分之一波长延迟膜在改善反射式液晶显示、透反式液晶显示的对比度、视角依赖性以及色散方面的重要应用意义。最后简要介绍了四分之一波长延迟膜在液晶显示应用领域的最新技术进展情况。

在第二章《液晶显示器件模拟计算的理论基础》中介绍了液晶模拟计算所涉及的基础理论和方法。

在第三章《液晶型宽频圆偏振片设计》中介绍了一种液晶型圆偏振片。此圆偏振片结构由线偏振片、半波延迟膜以及扭曲向列相聚合性液晶薄膜组成的叠片构成。中心波长入射情况下，利用Muller矩阵方法计算得到他们之间的角度配

置关系及扭曲向列相聚合性液晶薄膜的相位延迟和扭曲角。当用非扭曲液晶层代替扭曲液晶层时，得到四组构成宽波带圆偏振片的参数组合，并且非扭曲液晶层的相位延迟为四分之一波长，可以应用于接下来讨论的反射式及透反式非扭曲液晶显示中。

在第四章《消色差手性垂直液晶显示》中介绍了一种反射式手性垂直排列液晶显示。应用宽波带四分之一波长延迟膜对手性垂直排列反射式液晶显示进行了色散补偿，应用 2×2 扩展琼斯矩阵对其显示特性进行模拟分析，通过宽波带四分之一延迟膜补偿，使反射式VA显示的亮暗状态反转，与单纯使用四分之一波长延迟膜补偿相比，有效的降低了暗态色散，提高了对比度；掺入适合螺距的手性剂材料有效降低了开态反射率受波长和电压的影响，同时使盒厚增加，在工艺上更容易控制。

在第五章《单倍盒厚间距透反式液晶显示模式》中介绍了两种单倍盒厚间距的透反式液晶显示：ECB/HAN和VA/HAN透反式液晶显示模式。两种模式均是以HAN液晶层为反射区，应用宽波带四分之一波长延迟膜对其进行补偿，得到常黑和常白两种模式的ECB/HAN透反式液晶显示以及常黑模式的VA/HAN透反式液晶显示。应用 2×2 扩展琼斯矩阵对其显示特性进行模拟分析，透射区电光特性曲线和反射区电光特性曲线比较吻合，非常适宜便携式直视型全彩色液晶显示。

在第六章《利用圆偏光系统测量扭曲向列相液晶盒盒厚》中介绍了一种应用两组线偏振片和四分之一波片组成的圆偏光系统测量扭曲向列相液晶盒盒厚的新方法，此方法适用于假定扭曲角已知的情况，能够实现快速测量，简洁而且有效。

在第7章《结论》中对本文的工作进行了总结，归纳了本文的创新点并对四分之一波长延迟膜最新的研究热点作了大概的介绍。

第二章 液晶显示器件模拟计算的理论基础

在液晶显示器件中，向列相液晶显示器件占有相当大的比重，而向列相液晶显示器件在制作的过程中对于材料的选择，器件参数的确定，显示性能的改进仅仅依靠实验方法来摸索已经远远不能跟上器件的发展。因此人们渴望能够用一种理论计算的方法来模拟液晶材料和器件参数对显示性能的影响，以此探索得到新的改进方案乃至新的显示模式。对于液晶显示的数值模拟计算可分为两步：第一步，首先根据初始条件计算液晶分子在外电场作用下的指向矢在空间的分布。第二步，利用光波在液晶中的传播理论计算液晶盒的电光特性。同时液晶显示模拟计算又可分为静态模拟计算和动态模拟计算两个方面。静态模拟计算是指液晶体系处于平衡状态时的模拟计算，包括计算平衡状态下的液晶分子指向矢的静态分布，以及由该静态分布决定的相应的光学特性；动态模拟计算则考虑的是液晶体系从一个初始非平衡状态变化到平衡状态过程中的时间响应特性。由于本论文只考虑平衡状态下，非扭曲液晶显示的光学特性，因此只需作静态模拟计算，而不考虑动态响应问题。

本章首先介绍液晶弹性连续体理论^[30, 31]，接着介绍运用这一理论求解平衡状态下指向矢分布的计算方法——差分迭代法，然后介绍偏振光的三种表描述的方法：琼斯矢量法；Muller 矢量法；斯托克斯矢量法。介绍了怎样用邦加球描述光波偏振态在液晶中的变化。最后介绍了液晶显示器件光学模拟计算普遍使用的方法——扩展琼斯矩阵法。

§ 2.1 液晶的连续体弹性形变理论

固体中的问题和流体中的问题相似，有关液晶的许多重要物理现象都可以在忽略单个组成分子存在的情况下，把液晶当作连续介质来进行处理。这种连续体模型最初是由 Oseen^[32] 和 Zocher^[33] 在 20 年代后期提出的，他们的静态理论获得了相当的成功。到了 50 年代后期 Frank^[34] 在此基础上提出了曲率弹性理论（Curvature Elasticity Theory）。这个理论基本上仍然是一个静态理论，并且由于它一定程度上与固体弹性理论相似，因此我们称之为连续体弹性形变理论。尽管液晶不可能产生固体那样的形变，但是，描述液晶分子排列取向的指向矢在外场的作用下将发生变化，去除外场后指向矢又恢复到原来的状态。在这一过程中可以将液晶看成相当于一个弹性连续体，并在外力作用下产生了弹性形变，并且引入了相应的弹性常数。

§ 2.1.1 形变的描述

指向矢是一个单位矢量，满足 $\vec{n} \times \vec{n} = 1$ ，而且是一个没有量纲的量，它描述了液晶分子在空间的择优排列方向，用以表征液晶的宏观结构和状态。根据液晶弹性连续体理论，指向矢是位置的连续函数，当液晶中某个点位置的指向矢偏离了其平衡状态时，液晶发生了形变，这时液晶内部就像弹性固体那样将产生回复作用力，并最终达到一个平衡。液晶分子的形变共有三种类型：展曲(Splay)、扭曲(Twist)和弯曲(Bend)，其几何形态如图2.1所示，液晶中实际产生的复杂形变最终都只能是这三种基本形变的组合。

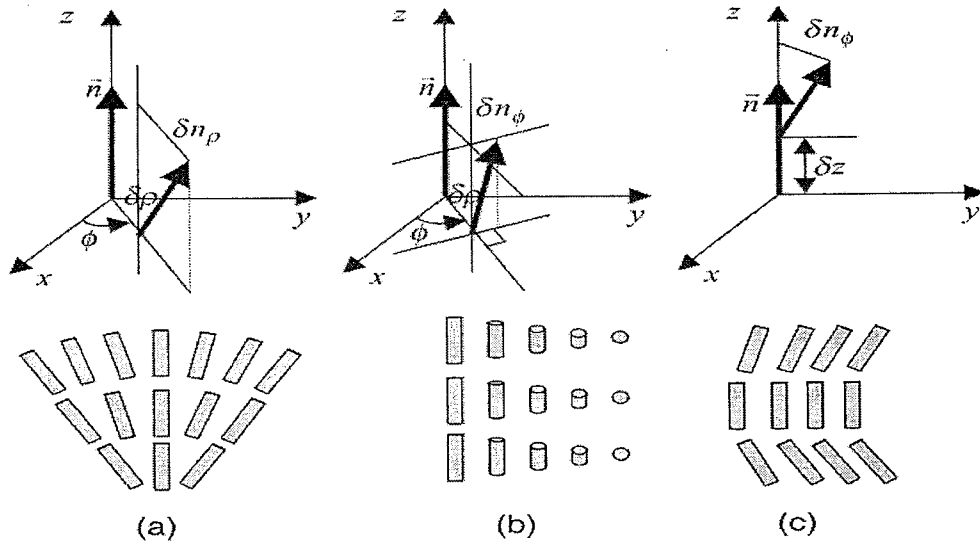


图 2.1 液晶分子的三种形变类型：(a) 展曲；(b) 扭曲；(c) 弯曲

§ 2.1.2 弹性自由能

弹性自由能的数学描述是液晶模拟计算的核心，是系统弹性应力的度量，当液晶指向矢没有受到外界扰动时其值为零。根据Frank-Oseen理论，胆甾相液晶自由能密度方程可以表述为：

$$g = \frac{1}{2} k_{11} (\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2} k_{22} (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n} + q_0)^2 + \frac{1}{2} k_{33} (\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2 \quad (2.1)$$

$\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 是单位指向矢， k_{11} ， k_{22} ， k_{33} 分别为展曲、扭曲和弯曲三种弹性常数，分别对应液晶分子的三种形变，单位是牛顿，一般向列相液晶的弹性常数的

数量级为 $10^{-12}N$ 。公式(2.1)中的参数 q_0 代表胆甾相液晶的扭曲率,且 $q_0 = 2\pi / p_0$,其中 p_0 是自由状态下的螺距。右旋扭曲时, p_0 取值为正;左旋扭曲时, p_0 取值为负。对于向列相液晶,可以认为其螺距无穷大,于是 $q_0 = 0$ 。另外两个会出现在弹性自由能密度公式里的项是混合项 k_{13} 和 k_{24} ,其中 k_{13} 项通常总是可以被简化,在计算过程中常常被忽略;对于大多数器件我们通常会假定表面液晶分子指向矢是固定的,这时 k_{24} 项可以被忽略。在全部空间对自由能密度求积分即可计算出液晶总自由能。

§ 2.1.3 表面锚定能

液晶分子的表面排列问题是LCD技术的关键问题之一,基板表面的锚定能^[35]是衡量排列质量的主要参数。对于指向矢在由易取向轴方向 e 和基板法线所确定的平面内转动的情形称之为极化或极向锚定能^[36];而相对于指向矢垂直于该平面转动的情形称之为方位或歪曲锚定能^[37, 38]。较高的锚定强度表示处于表面的液晶分子指向矢较为固定,不易发生改变,较低的锚定强度说明表面指向矢容易改变。实际上,依赖于取向材料和处理条件,锚定能在 $10^{-7} \sim 10^{-3} N/m$ 之间。在一般的理论处理中,认为液晶分子在基板表面的排列为强锚定,这种假设在模拟计算中仅会带来很小的误差。然而在某些特殊的显示模式下,表面指向矢是需要移动的,我们需要考虑表面锚定能的影响。如图2.2所示,表面锚定能可以表示为

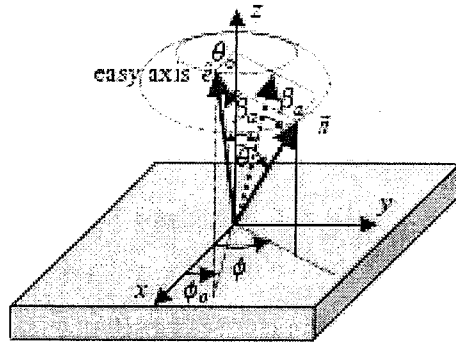


图 2.2 液晶分子指向矢和基板易取向轴的位置关系示意图

$$f_s = \frac{1}{2}W_p \sin^2(\theta - \theta_0) + \frac{1}{2}W_a \sin^2 \theta \sin(\phi - \phi_0) \quad (2.2)$$

其中 (θ_0, ϕ_0) 为易取向轴方向矢量， (θ, ϕ) 为液晶指向矢方向矢量， W_p ， W_a 分别为极向锚定强度和方位锚定强度。

§ 2.2 有限差分法求解液晶分子指向矢的分布

根据Oseen-Frank的液晶连续体弹性形变理论，在外电场或磁场的作用下，液晶指向矢会偏离原来的平衡位置，产生展曲、扭曲和弯曲等各种形变，最终在体弹性回复力、表面锚定和电场或磁场力的共同作用下从原先的平衡状态到达一个新的平衡状态，这一过程中，液晶吉布斯自由能趋向最小值，液晶指向矢模拟计算^[39, 40]正是根据这一原理来求解的。

§ 2.2.1 指向矢一维形变下的液晶Gibbs自由能密度

如图2.3建立坐标系， x - y 平面为液晶盒基板， z 轴是垂直液晶基板方向， $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 为液晶分子指向矢， φ 为指向矢方位角， θ 为指向矢倾角。因此指

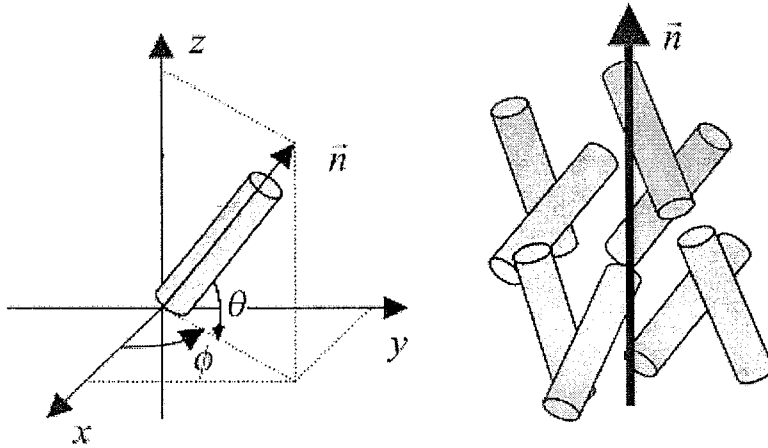


图 2.3 液晶指向矢坐标

向矢可以表示为 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z) = (\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, \sin \theta)$ ，由于只考虑一维形

变，即 $\frac{\partial n_\alpha}{\partial x} = \frac{\partial n_\beta}{\partial y} = 0 (\alpha, \beta = x, y, z)$ ，所以

$$\begin{cases} \nabla \cdot \bar{n} = \cos \theta \frac{d\theta}{dz} \\ \bar{n} \cdot (\nabla \times \bar{n}) = -\cos^2 \theta \frac{d\varphi}{dz} \\ (\bar{n} \times (\nabla \times \bar{n}))^2 = -\sin^2 \theta \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 \end{cases} \quad (2.3)$$

于是胆甾相液晶的自由能密度可以表示为

$$g = \frac{1}{2} f(\theta) \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 + \frac{1}{2} p(\theta) \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 + \frac{1}{2} e(\theta) \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 \quad (2.4)$$

其中,

$$\begin{cases} f(\theta) = k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta \\ p(\theta) = \cos^2 \theta (k_{22} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \\ e(\theta) = -2k_{22}q_0 \cos^2 \theta \end{cases} \quad (2.5)$$

如果在液晶盒上下基板加电压,若忽略像素的边缘场效应,只考虑一维指向矢形变,那么单轴液晶体系的静电场能量密度等于

$$f_e = \frac{1}{2} \bar{E} \cdot \bar{D} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\varepsilon_{\perp} + \Delta\varepsilon \sin^2 \theta) \left(\frac{dv}{dz}\right)^2 \quad (2.6)$$

这里, $\bar{E}$ 和 $\bar{D}$ 分别是电场强度矢量和电位移矢量, ε_0 和 $\varepsilon_{\perp}$ 分别代表真空介电常数和液晶材料的垂直介电常数, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ 为液晶的介电各向异性, $v = v(z)$ 是液晶盒Z方向不同位置的电压。

于是电场作用下液晶体系的Gibbs自由能密度f为Frank弹性自由能密度g与静电场能量密度 f_e 之差

$$f = g - f_e \quad (2.7)$$

这里我们只考虑强锚定情形,因而未加入表面能部分。将(2.6)和(2.4)代入上式有

$$f = \frac{1}{2} f(\theta) \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 + \frac{1}{2} p(\theta) \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 + \frac{1}{2} e(\theta) \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\varepsilon_{\perp} + \Delta\varepsilon \sin^2 \theta) \left(\frac{dv}{dz}\right)^2 \quad (2.8)$$

由此得到单位面积的柱体内液晶体系的总Gibbs自由能 F 为

$$F = \int_0^d f \cdot dz \quad (2.9)$$

这里 $f = f(\theta, \varphi, v)$ ，求解平衡状态下的液晶指向矢分布实际上就是求解(2.9)式的极小值。

§ 2.2.2 液晶薄层空间格点划分与描述

由于本文研究的是非扭曲液晶显示，在忽略像素的边缘场效应的情况下，一维的模拟计算就可以满足要求。液晶盒中指向矢的分布用 $\theta = \theta(z)$ 和 $\varphi = \varphi(z)$ ($0 \leq z \leq d$) 来描述，但在求解液晶系统总的Gibbs自由能极小值时，还需要考虑电压的变化。这是因为在外场作用下，液晶分子发生畸变，由于液晶分子的介电各向异性，液晶盒内电场分布不均匀，导致盒内不同 z 处的电压并不是线性变化的。所以计算时共需考虑 $\theta(z)$ 、 $\varphi(z)$ 和 $V(z)$ 三个变量，且满足下面的边界条件：

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_{p1}, \theta(d) = \theta_{p2} \\ \varphi(0) = \phi_1, \varphi(d) = \phi_2 \\ V(0) = 0, V(d) = V \end{cases} \quad (2.10)$$

其中 θ_{p1} 和 θ_{p2} 分别是上下基板的预倾角， $\phi = \phi_2 - \phi_1$ 是液晶的总扭曲角，由于本文研究的是非扭曲液晶显示，因此 $\phi_1 = \phi_2$ ，如果掺入手性剂材料， $\phi_1 \neq \phi_2$ ， V 是施加于液晶盒的电压。这里只考虑强锚定情形，相应的关系坐标如图 2.4 所示。

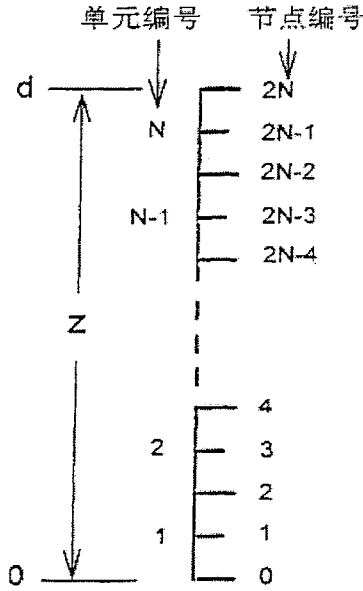


图 2.4 液晶层的单元分割及节点编号

§ 2.2.3 有限差分法的数学描述

确定平衡状态下指向矢的分布是液晶显示器件光学特性计算的前提,大部分方法都是求解由变分原理得到的欧拉-拉格朗日(Euler-Lagrange)微分方程组。液晶指向矢的模拟计算有多种方法,常见的例如牛顿法、有限元法、有限差分法等。牛顿法采用倾角 θ (液晶分子长轴与基板平面的夹角)和扭曲角 φ (液晶分子长轴在基板平面的投影与下基板液晶取向轴方向的夹角)来描述指向矢在空间的分布,对于计算简单的扭曲向列相液晶盒比较方便,但是对于较为复杂的液晶盒计算过程则显得繁琐,并难于给出稳定解。有限元法假定解可以用基本函数有限集合的线性组合来表示,这些基本函数称之为元素,解可以表示为:

$$f(x) \approx u(x) = \sum_{i=1}^n a_i \phi_i(x) \quad (2.11)$$

系数 a_i 通过有限元的方法来确定。这种方法可以得到较为精确的解,但计算过程也较为复杂。有限差分法^[41]具有直观、快速、简便和通用性好等优点,因此成为液晶模拟计算中最为常用的一种方法。

先来简单的介绍下有限差分的方法,把整个计算区域分割为同样大小的立方体格点,每一格点都可以用泰勒级数展开为:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)}{2}(\Delta x)^2 + \frac{f'''(x)}{6}(\Delta x)^3 + \dots \quad (2.12)$$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)}{2}(\Delta x)^2 - \frac{f'''(x)}{6}(\Delta x)^3 + \dots \quad (2.13)$$

由(2.12)和(2.13)可以得到：

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} - \frac{f''(x)}{2}\Delta x + \dots \quad (2.14)$$

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} + \frac{f''(x)}{2}\Delta x + \dots \quad (2.15)$$

由方程(2.14)和(2.15)可以得到：

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} - \frac{f'''(x)}{6}(\Delta x)^2 + \dots \quad (2.16)$$

$$f''(x) = \frac{f(x + \Delta x) + 2f(x) - f(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} - \frac{f^{(4)}(x)}{12}(\Delta x)^2 + \dots \quad (2.17)$$

这样就可以得到各格点的近似值，通过不断循环更新的计算可以得到各点的指向矢分布。

§ 2.2.4 指向矢和电压分布求解过程

液晶指向矢在外加电场下达到平衡状态时，(2.9)中 F 取最小值，这时可以根据欧拉-拉格朗日方程求解：

$$-[f]_{n_i} + \lambda n_i = 0, i = x, y, z \quad (2.18)$$

其中，

$$[f]_{n_i} = \frac{\partial f}{\partial n_i} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{dn_x}{dx} \right)} \right) - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{dn_x}{dx} \right)} \right) - \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{dn_z}{dz} \right)} \right) \quad (2.19)$$

式中 λ 为拉格朗日因子用以保证 $\bar{n}$ 为单位矢量，为了获得一个迭代公式，引入时间参量 t 和张弛系数 γ

$$\gamma \frac{dn_i}{dt} = -[f]_{n_i} + \lambda n_i \quad (2.20)$$

但是使用(2.20)式，当计算循环数据更新时我们不可能同时调整拉格朗日因子 λ 和液晶指向矢随时间的变化，因此可以舍弃拉格朗日因子项，在每次循环后使液晶分子指向矢长度归一化。用有限差分代替微分使(2.20)式离散化得到，

$$\gamma \frac{\Delta n_i}{\Delta t} = -[f]_{n_i} \Rightarrow \Delta n_i = -\frac{\Delta t}{\gamma} [f]_{n_i} \Rightarrow n_i^{new} = n_i^{old} - \frac{\Delta t}{\gamma} [f]_{n_i} \quad (2.21)$$

使 n_i^{new} 长度归一化采用：

$$n_i = \frac{n_i}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (2.22)$$

至此我们已经得到指向矢的循环表达式，为了进行求解计算，还需要得到电压的表达式。

应用高斯定律：

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot (\epsilon \cdot \vec{E}) = 0 \quad (2.23)$$

采用矢量法液晶分子介电常数可以表示为：

$$\epsilon = \epsilon_0 \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon n_x^2 & \Delta\epsilon n_x n_y & \Delta\epsilon n_x n_z \\ \Delta\epsilon n_y n_x & \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon n_y^2 & \Delta\epsilon n_y n_z \\ \Delta\epsilon n_z n_x & \Delta\epsilon n_z n_y & \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon n_z^2 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

电场矢量可以用电势梯度表示：

$$\vec{E} = -\nabla \cdot V \quad (2.25)$$

由(2.23), (2.24)和(2.25)可得

$$-\nabla \cdot (\epsilon \cdot \nabla V) = 0 \quad (2.26)$$

假如我们认为介质为均匀的各向同性介质，则会有

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.27)$$

(2.27)式是一个拉普拉斯(Laplace)方程，利用有限差分方法，可以求解这个方程。我们认为所求解的液晶区域为一个矩形，长度分别为 L_x 和 L_y ，将矩形区域划分成诸多正方形液晶元胞，每个元胞的长度为 Δ ，液晶中的电势为 $V(i, j)$ ，根据(2.17)，(2.27)近似为

$$\frac{V(i+1, j) + V(i-1, j) - 2V(i, j)}{\Delta^2} + \frac{V(i, j+1) + V(i, j-1) - 2V(i, j)}{\Delta^2} = 0 \quad (2.28)$$

其中， $i = 1, 2, \dots, N_x$ ($N_x = L_x / \Delta$)； $j = 1, 2, \dots, N_y$ ($N_y = L_y / \Delta$)

重新整理(2.28)式可以得到

$$V(i, j) = \frac{1}{4} [V(i+1, j) + V(i-1, j) + V(i, j+1) + V(i, j-1)] \quad (2.29)$$

一般情况下，边界初始电压为给定值，假设为 $V_0(i, j)$ 。临近边界处节点的电压值可以通过(2.29)计算得到，通过循环，各个节点处的电压值就可以求解出来了。但是这种方法还存在一个缺陷，就是收敛比较慢，我们可以通过“超松弛”(“Over-Relaxation”)方法使收敛速度加快，引入超松弛因子 α ，(2.29)可以写为

$$V^{\tau+1}(i, j) = (1 - \alpha)V^{\tau}(i, j) + \frac{\alpha}{4} [V^{\tau}(i+1, j) + V^{\tau}(i-1, j) + V^{\tau}(i, j+1) + V^{\tau}(i, j-1)] \quad (2.30)$$

其中， τ 为循环次数，一般情况下，为了保证求解的稳定性，超松弛因子 $\alpha \leq 1.5$ ，(2.30)又可以写为

$$V^{\tau+1}(i, j) = V^{\tau}(i, j) + \frac{\alpha}{4} [V^{\tau}(i+1, j) + V^{\tau}(i-1, j) - 2V^{\tau}(i, j)] + \frac{\alpha}{4} [V^{\tau}(i, j+1) + V^{\tau}(i, j-1) - 2V^{\tau}(i, j)] \quad (2.31)$$

(2.31)式即为

$$V^{\tau+1}(i, j) = V^{\tau}(i, j) + \frac{\alpha\Delta^2}{4} \left[\frac{\partial^2 V^{\tau}}{\partial x^2}(i, j) + \frac{\partial^2 V^{\tau}}{\partial y^2}(i, j) \right] \quad (2.32)$$

当 $V^{\tau}(i, j)$ 接近于拉普拉斯方程解时， $\Delta V^{\tau}(i, j) = V^{\tau+1}(i, j) - V^{\tau}(i, j)$ 将会越来越

越小，当 $V^r(i, j)$ 不再变化时，满足方程

$$\frac{\partial^2 V^r}{\partial x^2}(i, j) + \frac{\partial^2 V^r}{\partial y^2}(i, j) = 0 \quad (2.33)$$

此时循环结束。

因为液晶分子为各向异性介质，所以液晶中的电场电势写为

$$\begin{aligned} V^{r+1}(i, j, k) &= V^r(i, j, k) + \frac{\Delta^2 \alpha}{4} \nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla V)^r(i, j, k) \\ &= V^r(i, j, k) + \frac{\Delta^2 \alpha}{4} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{11} \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{12} \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{13} \frac{\partial V}{\partial z}) \right]^r(i, j, k) \\ &\quad + \frac{\Delta^2 \alpha}{4} \left[\frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon_{21} \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon_{22} \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon_{23} \frac{\partial V}{\partial z}) \right]^r(i, j, k) \\ &\quad + \frac{\Delta^2 \alpha}{4} \left[\frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_{31} \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_{32} \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_{33} \frac{\partial V}{\partial z}) \right]^r(i, j, k) \end{aligned} \quad (2.34)$$

由于我们只计算一维情形下液晶层中电势的变化，电势 $V = V(z)$ ，只随盒厚 Z 方

向变化，因此 $\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial x} = 0$ ，并且 $\frac{\partial n_\alpha}{\partial x} = \frac{\partial n_\beta}{\partial y} = 0 (\alpha, \beta = x, y, z)$ ，所以

$$V^{r+1}(z) = V^r(z) + \frac{\Delta^2 \alpha}{4} \left[\frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_{33} \frac{\partial V^r(z)}{\partial z}) \right] \quad (2.35)$$

即

$$\begin{aligned} V^{r+1}(z) &= V^r(z) + \frac{\alpha}{4} \{ (\Delta \varepsilon + \varepsilon_\perp \sin^2 \theta) [V^r(z+1) + V^r(z-1) - 2V^r(z)] \\ &\quad + 2\varepsilon_\perp \sin \theta_z (\sin \theta_{z+1} - \sin \theta_z) (V^r(z+1) - V^r(z)) \} \end{aligned} \quad (2.36)$$

因此(2.21)和(2.36)分别给出了液晶指向矢和电压分布的迭代公式。

§ 2.3 偏振光的描述

§ 2.3.1 偏振光的偏振椭圆表示

由于两振动方向相互垂直的偏振光叠加时，一般将形成椭圆偏振光。两偏振光振幅比 E_{0y}/E_{0x} 和相位差 δ 决定了这个椭圆的长、短轴之比及其在空间的取向。这表明只需两个特征参量： E_{0y}/E_{0x} 和 δ 就可以表示任一光波偏振态。一束沿正 OZ 轴方向传播的单色平面电磁波，可以表示为

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(-i(kz + \omega t)) \quad (2.37)$$

其中

$$k = n \frac{\omega}{c} = n \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.38)$$

λ 是光波波长， n 是折射率， k 是波矢，代表光波传播的方向，其电矢量可以表示为

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos(\omega t + \delta_x) \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta_y) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

消去 ωt ，(2.39) 式化简为

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{A_x}\right)\left(\frac{E_y}{A_y}\right)\cos(\delta_x - \delta_y) = \sin^2(\delta_x - \delta_y) \quad (2.40)$$

E_x ， E_y 合成矢量的端点随时间描出一个椭圆，如图2.5所示。

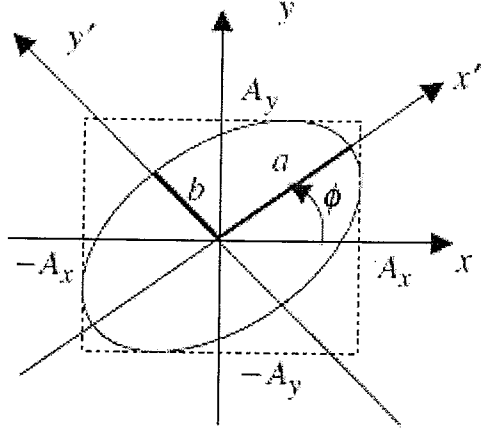


图 2.5 椭圆偏振光电矢量振动椭圆

进行适当的坐标变换, 可以将(2.40)式对角化, 即将 XOY 坐标系逆时针旋转角度 ϕ , 得到新坐标系 $X'OY'$, (2.40)式对角化得

$$\left(\frac{E'_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{E'_y}{b}\right)^2 = 1 \quad (2.41)$$

其中 a, b 分别为椭圆的长轴和短轴; $e = \pm b/a$ 是其椭率; ϕ 是其方位角。

坐标系 $X'OY'$ 和 XOY 之间的转换矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

而电场矢量在这两个坐标系之间的相互关系为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

将(2.42)和(2.43)代入(2.40)有

$$\left[\left(\frac{\cos \phi}{A_x} \right)^2 + \left(\frac{\sin \phi}{A_y} \right)^2 - \frac{\sin 2\phi \cos \delta}{A_x A_y} \right] E'^2_x + \left[\left(\frac{\sin \phi}{A_x} \right)^2 + \left(\frac{\cos \phi}{A_y} \right)^2 + \frac{\sin 2\phi \cos \delta}{A_x A_y} \right] E'^2_y$$

$$-\left[\frac{\sin 2\phi}{A_x^2} - \frac{\sin 2\phi}{A_y^2} + \frac{2\cos 2\phi}{A_x A_y} \cos \delta\right] E'_x E'_y = \sin^2 \delta \quad (2.44)$$

比较(2.44)和(2.41)，有

$$\left(\frac{\cos \phi}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{\sin \phi}{A_y}\right)^2 - \frac{\sin 2\phi \cos \delta}{A_x A_y} = \frac{\sin^2 \delta}{a^2} \quad (2.45)$$

$$\left(\frac{\sin \phi}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{\cos \phi}{A_y}\right)^2 + \frac{\sin 2\phi \cos \delta}{A_x A_y} = \frac{\sin^2 \delta}{b^2} \quad (2.46)$$

$$\frac{\sin 2\phi}{A_x^2} - \frac{\sin 2\phi}{A_y^2} + \frac{2\cos 2\phi}{A_x A_y} \cos \delta = 0 \quad (2.47)$$

由(2.47)。我们可以得到方位角 ϕ

$$\tan 2\phi = \frac{A_x A_y \cos \delta}{A_x^2 - A_y^2} \quad (2.48)$$

由(2.46) 和(2.47)，得到

$$(a^2 + b^2) \left(\frac{\sin \delta A_x A_y}{ab} \right)^2 = A_x^2 + A_y^2 \quad (2.49)$$

因为坐标系变换不会影响到光强的变化，因此

$$(a^2 + b^2) = A_x^2 + A_y^2 \quad (2.50)$$

所以

$$\sin \delta A_x A_y = \pm ab \quad (2.51)$$

令

$$A_y / A_x = \tan \alpha, \quad (0 \leq \alpha \leq \pi/2) \quad (2.52)$$

由(2.48) 和(2.52)，有

$$\tan 2\phi = \tan(2\alpha) \cos \delta \quad (2.53)$$

由(2.50) 和(2.51), 有

$$\frac{\pm 2ab}{a^2 + b^2} = \sin(2\alpha) \sin \delta \quad (2.54)$$

令

$$\pm b/a = \tan \chi, \quad (-\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4) \quad (2.55)$$

式中正、负号分别表示椭圆是右旋和左旋, 于是(2.54)可以改写成

$$\sin 2\chi = \sin(2\alpha) \sin \delta \quad (2.56)$$

由此可见, 若测出 χ 和 ϕ 的实际值, 则两偏振光的振幅 E_x, E_y 和相位差 δ 就可以由公式(2.50), (2.52), (2.53)和(2.56)求出。

§ 2.3.2 偏振光的琼斯矢量表示

1941年琼斯(R.C.Jones)用一个列矩阵来表示一电场矢量的 x, y 分量:

$$J = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x \exp(i\delta_x) \\ A_y \exp(i\delta_y) \end{pmatrix} = \exp(i\delta_x) \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \begin{pmatrix} \frac{A_x}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \\ \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \exp[i\delta_y - \delta_x] \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

(2.57)式一般称之为琼斯(Jones)矢量, 他表示一般的椭圆偏振光, 由于光强 $I = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ 和频率项并不重要, 因此可以忽略, 因此归一化的琼斯矢量可以写为

$$J = \begin{pmatrix} \frac{A_x}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \\ \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \exp[i\delta_y - \delta_x] \end{pmatrix} \quad (2.58)$$

当 J 经过一些介质后, 偏振状态会发生改变, 用下式连接起来

$$J' = M \cdot J \quad (2.59)$$

J' 表示出射光的Jones矢量, M 表示介质的Jones矩阵。Jones矩阵对分析经偏振光经过复杂光学系统后的出射状态是一个好的方法, 用简练的矩阵来表示光路各处

的偏光器件，用矢量表示偏振光。数学上只需简单的矩阵运算即可。

§ 2.3.3 偏振光的斯托克斯(Stokes)参量和Poincaré球表示

表征一个椭圆偏振光，除了上述的振幅比值 E_{0y}/E_{0x} 和相位差 δ ，或者长短轴 a, b ，以及长轴方位角 ϕ 之外，1852年斯托克斯(Stokes)提出了用四个参量(斯托克斯参量)来描述光波的强度和偏振态，与琼斯矢量不同的是，被描述的光可以是完全偏振光、部分偏振光和完全非偏振光；可以是单色光也可以是非单色光。任一偏振光，用Stokes参量表示为

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x^2 + E_y^2 \\ E_x^2 - E_y^2 \\ 2E_x E_y \cos(\delta_x - \delta_y) \\ 2E_x E_y \sin(\delta_x - \delta_y) \end{pmatrix} \quad (2.60)$$

其中， S_0 代表光波总的光强； S_1 代表沿X和Y方向偏振分量光强之差； S_2 代表沿 $\pm 45^\circ$ 偏振分量光强之差； S_3 表示左旋和右旋圆偏振光分量之差。参量 S_0 显然正比于光波强度，如果以 S_1, S_2, S_3 构成正交坐标系， S_0 一定位于一个球面(半径为 S_0)上，所以球面上的点可以表征不同的偏振光。可以证明，球面上的点的球坐标的方位角 α 和极角 β ，分别对应于椭圆偏振光长轴的方位角 ϕ 和椭圆率 χ ($\tan \chi = b/a$)的两倍，这就是著名的邦加(H.Poincaré)球，是1892年由邦加提出来的，如图2.6所示。

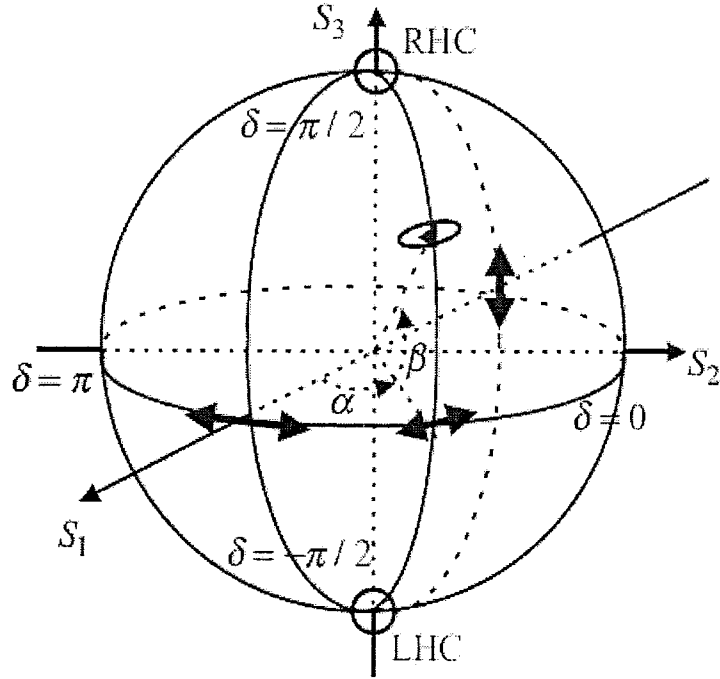


图 2.6 单色光偏振态的 Poincaré 球表示

显然，邦加球有如下结论：

- (1) 赤道上 ($\chi = 0$) 任一点代表不同振动方向的线偏振光，其中， $\phi = 0$ ，即X轴正向的表示水平偏振； $\phi = \pi$ ，即X轴负向的点表示垂直偏振。
- (2) 球的北极 ($\chi = \pi/4$) 表示右旋圆偏振；南极 ($\chi = -\pi/4$) 表示左旋圆偏振。
- (3) 北半球上的每个点表示右旋椭圆偏振形式，南半球上的每个点表示左旋椭圆偏振形式。
- (4) 对于完全偏振光，四个参量存在如下的关系

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (2.61)$$

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_0 \cos 2\chi \cos 2\phi \\ S_0 \cos 2\chi \sin 2\phi \\ S_0 \sin 2\chi \end{pmatrix} \quad (2.62)$$

- (5) 在邦加球中心处，表示完全非偏振光；
 在邦加球表面上，表示完全偏振光；
 在邦加球内任意一点，表示部分偏振光。

§ 2.4 液晶器件光学特性计算

§ 2.4.1 各种模拟方法简介

对于探索得到新的液晶显示器件的改进方案乃至新的显示模式，数值模拟计算是一种非常重要的工具。由于液晶显示器件光电特性紧紧依赖于一整套的材料参数和器件参数，只有在少数情况下，存在着简单的输入量和输出量之间的解析关系。如Gooch和Tarry^[42]给出的在关态下，满足Mauguin条件的90° TN^[43]液晶盒的光透过率关系。但是当加有电压或倾斜入射的情况下，问题就变得非常复杂了，必须找到一种合适的数值模拟的计算方法去得到透射率或反射率与入射偏振光的关系。

对于液晶这种分层连续变化的介质，经典的处理方法是将液晶层均匀的划分成N个双折射介质层的叠加层。N一般小于100。到目前为止已经提出了几种有效的方法。早在70年代初，Teitle和Berreman提出了一个4×4矩阵方法来解决在胆甾相液晶这类分层介质的光传播问题。Berreman的4×4矩阵法^[44]是一种非常精确的计算方法，从麦克斯韦方程出发，通过考虑介质的物理方程，进而将麦克斯韦方程的6×6矩阵化成4×4矩阵，考虑了电磁波在界面间的折射和多次反射，因此单色光入射时，光透过率会有Fabry-Perot干涉现象。然而在一般显示器上，这种干涉现象是不会发生的，因为一般显示器所用的光源不是零频带宽的单色光，而是有一定宽度的频带。一个波长光的Fabry-Perot干涉现象就被邻近波长的Fabry-Perot干涉现象平滑(Smooth Out)掉了。除去Fabry-Perot干涉最直接的方法是所谓的频谱平均(Spectrum Average)法^[45]，也就是当计算一个波长的透过率或反射率时，同时也计算邻近波长的透过率或反射率，然后平均之。这个方法在快速4×4矩阵方法^[46]中得到了很好地体现，在实际的模拟计算中能够减少运算时间，同时保持比较合理的计算精度。

另外一种计算液晶中光波传播的方法是 Jones 矩阵法。最早的 Jones 2×2 矩阵法，可以从解析的角度考虑问题，但它没有考虑光在液晶层中的多次反射，与 Ong^[47]的几何光学近似(Generalized Geometrical Optics Approximation) 法相类似，同样只考虑垂直入射的情况，因此在数值模拟计算中存在局限性。后来发展了的扩展 Jones 2×2 矩阵方法^[48-52]可以处理倾斜入射的情况。Yeh 首先用光的折射和反射理论讨论了光在单层双折射介质中的传播^[38, 49]，并且精确考虑了双折射介质和各向同性介质边界处的边界条件。后来 Gu 和 Yeh 将之推广到

多层双折射介质层的情况，适用于对液晶层的模拟计算^[21]。对于液晶器件的光学模拟，必须考虑到光从一个双折射介质层入射到另一个双折射介质层的情况，而电磁边界条件不能像 Berreman 4×4 矩阵方法那样考虑的精确，Gu 和 Yeh 的方法假设在双折射液晶层中存在厚度为零的各向同性介质层，然后按照各向同性介质和各向异性介质之间的折射和反射理论来处理。Lien 提出了另外一种扩展 Jones 矩阵方法^[22]，这种方法考虑了界面间菲涅耳(Fresnel)折射，并且只考虑电场的边界条件，而忽略掉磁场的边界条件。这种方法模拟的结果和 Berreman 4×4 矩阵方法非常相符，并且普遍应用在液晶器件的模拟中。但是 Lien 提出的扩展 Jones 矩阵方法忽略了反射的影响，并且认为在液晶中传播的只有两束透射光(寻常光和非寻常光)。后来，Lien 对这种方法做了改进，同时考虑了电场和磁场的边界条件，并且通过某种方式^[52]将这两种边界条件整合在一起。这种 Jones 矩阵方法的计算结果相比较以前的 Jones 矩阵方法更加精确有效。

§ 2.4.2 两层各向同性介质夹一层单轴介质的 Jones 2×2 矩阵

根据 Yeh 提出的光的折射和反射原理分析光在单层双折射介质中的传播的理论，认为各向同性介质层的厚度为零，这样问题就简化为处理单轴介质和各向同性介质之间的折射和反射问题，相比较处理两层各向异性介质之间的电磁边界条件问题简化了许多。这里我们假设各向同性介质层的折射率为 n_0 ，与液晶层的寻常光折射率相同，在两个各向同性介质层中用 S 和 P 代表两束光波分量， s 表示和入射面垂直的光波分量， p 代表和入射面平行的光波分量。在液晶层中，用 o 和 e 代表寻常光分量和非寻常光分量。如图 2.7 所示，为平面波由各向同性介质入射到单轴介质时反射和折射的示意图，假设入射面为 YOZ 面，并且由于各向同性介质层的折射率和单轴介质的短轴折射率都为 n_0 ，因此入射光和折射光在同一个平面—— YOZ 面内。折射光电矢量和入射光电矢量有如下关系

$$\begin{pmatrix} E_e \\ E_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(p,e) & R(s,e) \\ R(p,o) & R(s,o) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} \quad (2.63)$$

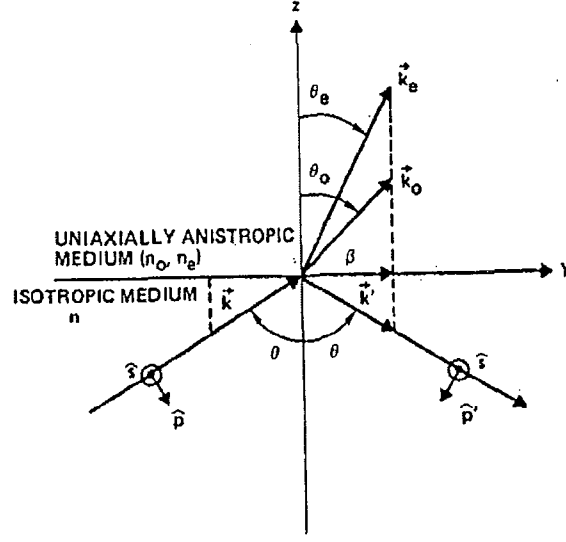


图 2.7 光波由各向同性介质入射到单轴介质时的反射和折射示意图

如果光波由各向同性介质层穿过单轴介质层，然后再经由另一层各向同性介质层出射，则出射光电矢量可以表示为

$$\begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(e, p) & R(o, p) \\ R(e, s) & R(o, s) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \exp(-ikn_{ez}h) & 0 \\ 0 & \exp(-ikn_{oz}h) \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} R(p, e) & R(s, e) \\ R(p, o) & R(s, o) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} \quad (2.64)$$

令

$$R_2 = \begin{pmatrix} R(e, p) & R(o, p) \\ R(e, s) & R(o, s) \end{pmatrix} \quad (2.65)$$

$$R_1 = \begin{pmatrix} R(p, e) & R(s, e) \\ R(p, o) & R(s, o) \end{pmatrix} \quad (2.66)$$

$$G = \begin{pmatrix} \exp(-ik\sigma_{ez}h) & 0 \\ 0 & \exp(-ik\sigma_{oz}h) \end{pmatrix} \quad (2.67)$$

则

$$J = R_2 G R_1 \quad (2.68)$$

其中, G 为单轴介质层的琼斯矩阵, h 为单轴介质层的厚度, σ_{0z} 和 σ_{ez} 分别为单轴介质层的寻常光折射率和非寻常光折射率。 R_1 和 R_2 分别为光波从各向同性介质到单轴介质的转换矩阵以及由单轴介质到各向同性介质的转换矩阵, 并且有

$$\begin{cases} R(p, e) = R(e, p) = \bar{p} \cdot \bar{e}; \\ R(s, e) = R(e, s) = \bar{s} \cdot \bar{e}; \\ R(p, o) = R(o, p) = \bar{p} \cdot \bar{o}; \\ R(s, o) = R(o, s) = \bar{s} \cdot \bar{o} \end{cases} \quad (2.69)$$

这种 Jones 矩阵的夹心结构对于液晶的光波传输特性的研究非常重要, 是扩展 Jones 2×2 矩阵的基础。

§ 2.4.3 扩展 Jones 2×2 矩阵

如图 2.8 所示, 如果假设液晶层由 N 层单轴介质层叠加而成, 那么整个液晶层的扩展 Jones 2×2 矩阵表示为

$$J = J_N J_{N-1} \cdots J_n \cdots J_3 J_2 J_1 \quad (2.70)$$

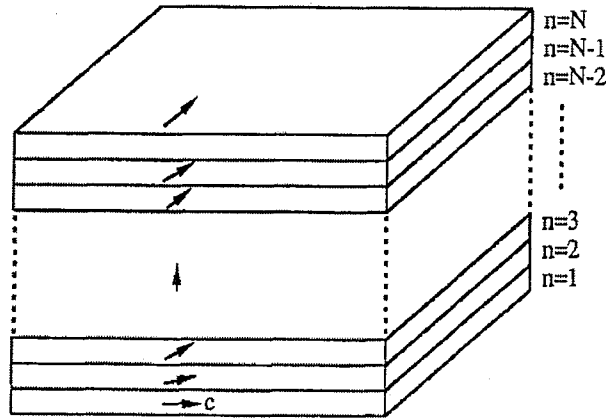


图 2.8 液晶层的等效 N 层单轴介质层叠加示意图

其中,

$$J_n = [R_2 G R_1]_n \quad (2.71)$$

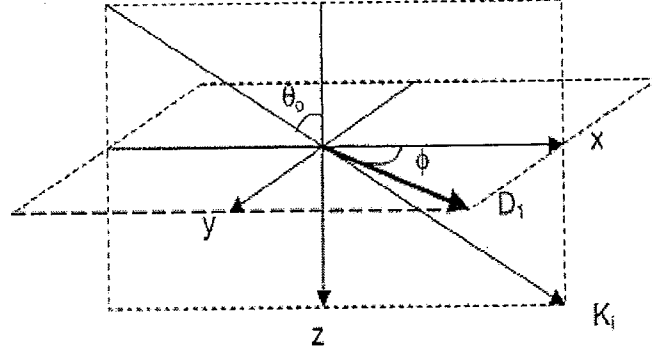


图 2.9 入射光入射面和传播方向示意图

在公式(2.71)中没有考虑到各向同性介质层的反射、折射以及相位的变化，因为认为各向同性介质层的厚度为 0。如图 2.9 所示，入射光入射角 θ_0 为入射光波矢 k_i 始终位于 XOZ 面内， XOY 面平行于单轴液晶层，那么入射光波矢 $\bar{k}_i$ 可表示为

$$\bar{k}_i = [\sin \theta_0 \quad 0 \quad \cos \theta_0] \quad (2.72)$$

在各向同性介质层中，入射光波的 $\bar{s}$ 和 $\bar{p}$ 分量分别表示为

$$\bar{s} = [0 \quad -1 \quad 0] \quad (2.73)$$

$$\bar{p} = \frac{\bar{k}_i \times \bar{s}}{|\bar{k}_i \times \bar{s}|} [\cos \theta_0 \quad 0 \quad \sin \theta_0] \quad (2.74)$$

在第 n 层液晶中，寻常光和非寻常光波的波矢表示为

$$\bar{k}_o = [\sin \theta_0 \quad 0 \quad \cos \theta_0] \quad (2.75)$$

$$\bar{k}_e = [n_o \sin \theta_0 \quad 0 \quad n_e(\theta_e) \cos \theta_e] \quad (2.76)$$

令

$$\sigma_{ez} = n_e(\theta_e) \cos \theta_e \quad (2.77)$$

其中， θ_e 为非寻常光在液晶层中传播时的折射角， $n_e(\theta_e)$ 为对应的折射率，

因为各向同性介质层和液晶层的寻常光折射率都为 n_o ，因此寻常光在界面处不存在折射。假设第 n 层液晶层中液晶分子的方位角为 ϕ_n ，倾角为 θ_n ，则指向矢量为

$$D_n = [\cos \phi_n \cos \theta_n \quad \sin \phi_n \cos \theta_n \quad \sin \theta_n] \quad (2.78)$$

因此在液晶层中，寻常光矢量为

$$\begin{aligned} \bar{o} &= \frac{\bar{D}_n \times \bar{k}_o}{|\bar{D}_n \times \bar{k}_o|} \\ &= \frac{1}{A_o} [\sin \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o \quad \sin \theta_n \sin \theta_o - \cos \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o \quad -\sin \phi_n \cos \theta_n \sin \theta_o] \end{aligned} \quad (2.79)$$

假设 $|n_e - n_o| \ll n_o, n_e$ ， $\theta_o \cong \theta_e$ ，则非寻常光矢量为

$$\begin{aligned} \bar{o} &= \frac{\bar{k}_e \times \bar{o}}{|\bar{k}_e \times \bar{o}|} \\ &= \frac{1}{A_e} [n_e(\theta_e) \cos \theta_e (\cos \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o - \sin \theta_n \sin \theta_o) \\ &\quad \sin \phi_n \cos \theta_n [n_o \sin^2 \theta_o + n_e(\theta_e) \cos \theta_e \cos \theta_o] \\ &\quad - n_o \sin \theta_o (\cos \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o - \sin \theta_n \sin \theta_o)] \end{aligned} \quad (2.80)$$

其中

$$A_o = [\sin^2 \phi_n \cos^2 \theta_n + (\cos \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o - \sin \theta_n \sin \theta_o)^2]^{1/2} \quad (2.81)$$

$$A_e = \{[n_o^2 \sin^2 \theta_o + n_e^2(\theta_e) \cos^2 \theta_e] \Delta^2 + (\sin^2 \phi_n \cos^2 \theta_n) \times [n_o \sin^2 \theta_o + n_e(\theta_e) \cos \theta_e \cos \theta_o]^2\}^{1/2} \quad (2.82)$$

$$\Delta = \cos \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o - \sin \theta_n \sin \theta_o \quad (2.83)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ez} &= \frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \theta_n \cos \theta_n \cos \phi_n \sin \theta_o}{n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \sin^2 \theta_n} + \frac{n_o n_e}{n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \sin^2 \theta_n} \\ &\times \left\{ n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \sin^2 \theta_n - \left[1 - \frac{(n_e^2 - n_o^2)}{n_e^2} \cos^2 \theta_n \sin^2 \phi_n \right] \sin^2 \theta_o \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\sigma_{oz} = (n_o^2 - \sin^2 \theta_o)^{1/2} \quad (2.85)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R(\bar{p}, \bar{e}) = \frac{[n_o \sin^2 \theta_o + n_e(\theta_e) \cos \theta_e \cos \theta_o](\cos \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o - \sin \theta_n \sin \theta_o)}{A_e} \\ R(\bar{s}, \bar{e}) = \frac{\sin \phi_n \cos \theta_n [n_o \sin^2 \theta_o + n_e(\theta_e) \cos \theta_e \cos \theta_o]}{A_e} \\ R(\bar{p}, \bar{o}) = \frac{\sin \phi_n \cos \theta_n}{A_o} \\ R(\bar{s}, \bar{o}) = \frac{\cos \phi_n \cos \theta_n \cos \theta_o - \sin \theta_n \sin \theta_o}{A_o} \end{array} \right. \quad (2.86)$$

由(2.86)可以得到 R_1 和 R_2 的转换矩阵。这样便得到了液晶层在任意角度入射的情况下的 Jones 2×2 计算公式。

§ 2.5 本章小结

本章介绍了液晶显示器件模拟计算的一些基础理论，它们包括：

1. 液晶的弹性连续体理论，它是分析液晶盒中液晶指向矢分布的基础。
2. 介绍了求解液晶指向矢分布的有限差分法，提出了对电压和指向矢的迭代公式，指向矢的求解引入粘滞系数和拉格朗日因子，每次循环都对指向矢进行归一化处理，保证了计算的稳定性和精确性。电压分布的求解采用“超松弛”法使得收敛速度加快。此方法已经广泛应用于液晶显示器件的指向矢和电压的模拟中，和有限元法相比较，物理机制更加容易理解，数学表述简单，运算速度更快。
3. 液晶显示器件的原理是通过液晶的旋光效应或双折射效应对偏振光实现亮暗的调制，研究向列相液晶显示器件中偏振光状态的变化需要对偏振光进行准确的描述。系统地介绍了描述偏振光的三种方法：偏振椭圆表示法；琼斯矢量表示法；斯托克斯矢量表示法以及 Poincaré 球图示法。
4. 介绍了液晶显示器件的光学模拟计算的各种方法的发展历史及特点，着重介绍了已经广泛应用了的扩展 Jones 2×2 方法，应用这一方法，可以计算以任意角度入射的光线穿过液晶层后的透过率或反射率，计算精度和消除了 Fabry-Perot 干涉现象的快速 4×4 矩阵方法模拟结果精度相当。

第三章 液晶型圆偏振片设计及单偏振片反射式向列相液晶显示

圆偏光片是一种在许多应用场合都有很大用处的光学元件，比如说光纤通讯、激光通讯以及液晶显示领域等等。尤其是在反射式和透反式向列相液晶显示当中经常使用。本章首先介绍了早期的两种类型的圆偏振片的设计方法，提出了一种由线偏振片，消色差半波延迟膜和向列相液晶层组成的新型宽频圆偏振片的新的设计方法。

§ 3.1 传统的圆偏振片的设计方法

通常圆偏振片的制作方法有两种：一种是利用胆甾相液晶 (Cholesteric Liquid Crystal, 简称CLC) 的布拉格反射 (Bragg Reflection)^[53-56]效应制作的圆偏振片, 制作方法是将含聚合性手性剂和光异构化材料的液晶混合物, 涂布在基质材料上, 然后进行紫外线聚合得到。胆甾相液晶沿轴向激发时呈现圆Bragg现象, 轴向激发时胆甾相液晶的光学活性起源于局部线性双折射与其结构手征性的相互作用, 具有圆偏振光分离功能, 其液晶的螺旋旋转方向与圆偏振光方向一致, 所以具有选择反射性, 根据这种选择反射特性, 通过只透过分离一定波长带域自然光的特定圆偏振光, 反射残余光进行再利用, 可以制造高效率的偏振光膜。

但是胆甾相液晶的选择反射特性, 只限于特定的波段, 所以较难覆盖可见

光线全域。胆甾相液晶的选择反射波段宽 $\Delta\lambda = 2 \frac{n_e - n_o}{n_e + n_o} \lambda$, 其中 n_o 为胆甾相液

晶分子对于正常光的折射率; n_e 为胆甾相液晶分子对于异常光的折射率, λ 为选

择反射的中心波长, $\lambda = (n_e + n_o) \cdot P/2$, P 为胆甾相液晶的螺距。因此 $\Delta\lambda$ 依赖于

胆甾相液晶本身的分子结构。若增大 $n_e - n_o$, 可以扩展选择反射波段宽 $\Delta\lambda$, 但

是 $n_e - n_o$ 通常在0.3以下, 当增大该值时, 做为液晶的其他功能 (定向特性, 液

晶温度等) 则很不充分, 所以较难达到实用。因此, 实际中, 即使增大选择反射

波段宽 $\Delta\lambda$ ，最大也只能达到150nm。作为胆甾相液晶多数可实用的也只是30-100nm。

因此，为了覆盖可见光全域，需要层叠具有不同选择反射中心波长的多层膜，或者在厚度方向上连续改变间距长度，在一个比较宽的可见光波带域中形成选择反射中心波长的分布。

由于胆甾相液晶的选择反射特性限定于特定波段，在光线倾斜入射时会有蓝移现象发生^[57, 58]，并且不易实现全彩色显示。如图3.1所示为反射式双稳态胆甾相液晶原理示意图，在不加电压的情况下，左旋圆偏振光穿过右旋的胆甾相液晶层后被下基板的吸收层吸收，右旋圆偏振光被反射，显示为亮态；施加电压后液晶分子变为焦锥型结构，光线透过液晶层后被下基板的吸收层吸收，没有光线反射，显示为暗态。因此利用胆甾相液晶的圆偏光效应可以制作反射式双稳态胆甾相液晶显示。

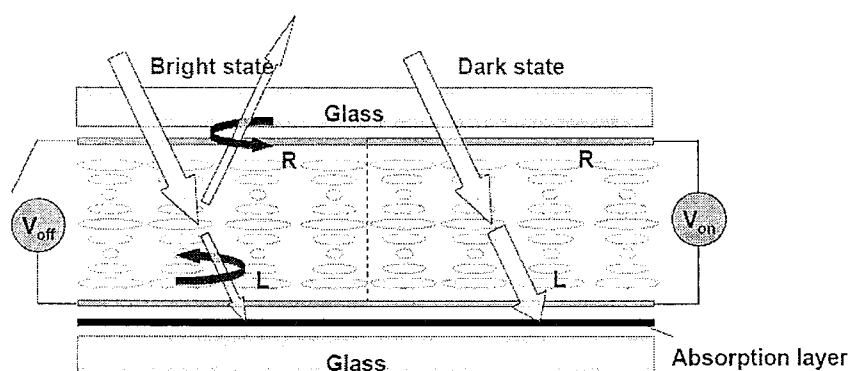


图 3.1 反射式双稳态胆甾相液晶显示原理示意图

另外一种制作圆偏振片的方法是在线偏振片上粘贴四分之一波长延迟膜，线偏振片吸收轴和1/4波长延迟膜光学轴之间的角度为45度^[59]，制作方法是将聚碳酸酯溶于二氯甲烷中制备溶液，将溶液浇铸到玻璃板上，于室温干燥30分钟，于70摄氏度进一步干燥30分钟。通过干燥，蒸发溶剂，将形成的聚碳酸酯膜从玻璃板上剥离，制得一定厚度的聚碳酸酯膜，切片之后，在160摄氏度左右拉伸，这样便制得相位差为四分之一波长延迟的双折射拉伸聚碳酸酯膜。如图3.2所示，当圆偏振光在反射体表面反射时其旋转方向发生反转，所以从偏振片一侧垂直入射到反射体上的光的反射理想地变为零，利用这个原理，应用在反射式液晶显示器件中，可以有效降低显示器表面的反射光出射率，从而提高对比度。在正入射条件下，这种圆偏振片的作用非常明显。但是在倾斜入射情况下，线偏振光经过这种圆偏振片的光波偏振态为椭圆，转换效率偏低，因而会造成漏光；并且这种圆偏振片的波长依赖性比较大。偏振片采用双轴膜^[60-62]的广视角圆偏振片已经提出，但是在60度角入射情况下，对比度只有不到10:1。因而需要设计宽波段圆偏振片^[63, 64]。作为具有更复杂的光学性质的相位差膜，开发了在设置了取向膜的基

板上涂布聚合性液晶，在使该液晶分子取向的状态下使其固化而得到的光学薄膜。将此种薄膜与线性偏振片、1/2波长延迟膜相结合可以得到一种新型的液晶型宽波带圆偏振片。

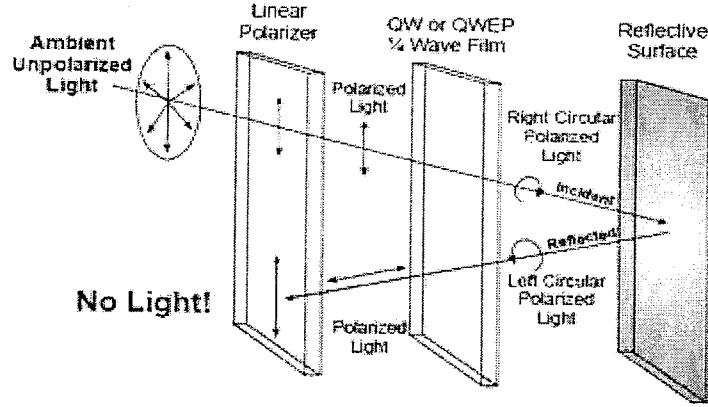


图 3.2 线偏振片粘贴四分之一波长补偿膜式圆偏振片结构示意图

§ 3.2 液晶型宽频圆偏振片设计

§ 3.2.1 均匀扭曲向列相液晶的Jones及Muller矩阵表示

在没有外加电场的情况下，均匀扭曲向列相液晶层的琼斯矩阵^[65]表示为

$$M_{LC}(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos u - i \frac{\delta}{u} \sin u & \frac{\phi}{u} \sin u \\ -\frac{\phi}{u} \sin u & \cos u + i \frac{\delta}{u} \sin u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a + ib & -c + id \\ c + id & a - ib \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

其中，

$$\begin{cases} a = \frac{\phi}{u} \sin \phi \sin u + \cos \phi \cos u \\ b = -\frac{\delta}{u} \cos \phi \sin u \\ c = -\frac{\phi}{u} \cos \phi \sin u + \sin \phi \cos u \\ d = -\frac{\delta}{u} \sin \phi \sin u \\ u = \sqrt{\phi^2 + \delta^2} \\ \delta = \pi d_{LC} \Delta n / \lambda \\ \Delta n = \frac{n_e n_o}{n_e^2 \sin^2 \theta_{ilt} + n_o^2 \cos^2 \theta_{ilt}} - n \end{cases} \quad (3.2)$$

ϕ 为液晶扭曲角，并且规定逆时针旋转，扭曲角为正值，即是液晶层左旋；顺时针方向旋转，扭曲角为负值，即是液晶层右旋。 d_{LC} 和 θ_{ilt} 分别为液晶盒盒厚和平均倾角， n_o 和 n_e 分别是液晶的寻常折射率和非寻常折射率。

另一种表示方法为Muller矩阵表示，扭曲向列相液晶盒的Muller矩^[66] U_{LC} 可以从琼斯矩阵推演得到：

$$U_{LC} = T(M_{LC} \otimes M_{LC})T^{-1} \quad (3.3)$$

其中，

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

因此，

$$U_{LC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2(c^2 + d^2) & 2(bd - ac) & -2(ad + bc) \\ 0 & 2(ac + bd) & 1 - 2(b^2 + c^2) & 2(ab - cd) \\ 0 & 2(ad - bc) & -2(ab + cd) & 1 - 2(b^2 + d^2) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

可以将上式改写为：

$$U_{LC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & B & C \\ 0 & D & E & F \\ 0 & G & H & K \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

其中A, B, C, D, E, F, G, H, K的值可以由(3.5)和(3.6)式对比得到

$$\begin{cases} A = 1 - 2(c^2 + d^2) = 1 - \left[2 \frac{\sin^2 u}{u^2} (\phi^2 \cos^2 \phi + \delta^2 \sin^2 \phi) + \sin^2 \phi \cos^2 u - \frac{\phi}{u} \sin 2u \sin 2\phi \right] \\ B = 2(bd - ac) = \frac{\phi}{u} \sin 2u \cos 2\phi - \sin 2\phi \cos 2u \\ C = -2(ad + bc) = -\frac{\delta\phi}{u^2} \sin^2 u \cos^2 \phi + \frac{\delta}{u} \sin 2\phi \sin 2u \\ D = 2(ac + bd) = -\frac{\phi}{u} \sin 2u \cos 2\phi + \sin 2\phi \left(1 - \frac{2\phi^2}{u^2} \sin^2 u \right) \\ E = 1 - 2(b^2 + c^2) = 1 - 2 \left[-\frac{\phi}{2u} \sin 2\phi \cos 2u + \sin^2 u \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cos^2 u \right] \\ F = 2(ab - cd) = -\frac{2\delta\phi}{u^2} \sin^2 u \sin 2\phi - \frac{\delta}{u} \sin 2u \cos 2\phi \\ G = 2(ad - bc) = -\frac{2\phi\delta}{u^2} \sin^2 u \\ H = -2(ab + cd) = -\frac{2\delta}{u} \sin 2u \\ K = 1 - 2(b^2 + d^2) = 1 - \frac{2\delta^2}{u^2} \sin^2 u \end{cases} \quad (3.7)$$

当液晶层的扭曲角 $\phi = 0^\circ$ 时, 液晶层的Muller矩阵可以化简为

$$U_{LC}(\phi = 0^\circ) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & B & C \\ 0 & D & E & F \\ 0 & G & H & K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_L & \sin \delta_L \\ 0 & 0 & -\sin \delta_L & \cos \delta_L \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

其中 $\delta_L = 2\delta = 2\pi d_{LC} \Delta n / \lambda$

§ 3.2.2 中心波长入射情况下液晶型圆偏振片参数的最优化设计

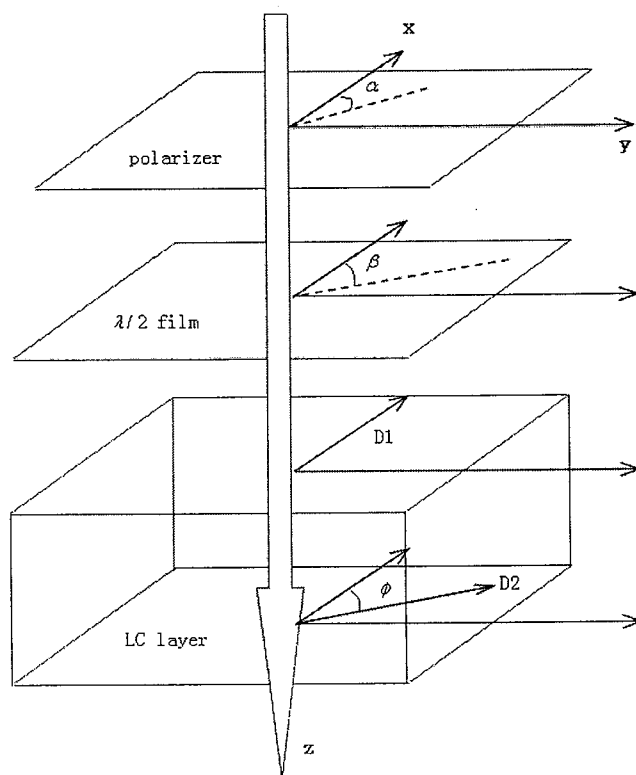


图 3.3 液晶型宽波段圆偏振片各光学元件几何位置关系示意图

通常的四分之一波长延迟膜只是在一个波长下具有 $1/4$ 波长的相位差，其它波长下相位差偏离该值，所以为了使其发挥作为跨越在整个可见光区域的 $1/4$ 波长延迟膜的功能，需要开发使用一片或多片 $1/2$ 波长延迟膜和 $1/4$ 波长延迟膜层叠而成的宽波带相位差膜与线性偏振片组合而成的宽波带圆偏振片，这时需要精确的控制涉及每个波长延迟膜方位角的层叠角度以及波长延迟膜光轴与线性偏振片吸收轴的层叠角度。另外，用于液晶显示元件时，波长延迟膜的光学轴和液晶的取向方向所成的角度也必须精密符合设计值。

但是作为具有更复杂的光学性质的相位差膜，开发了在设置了取向膜的基板上涂布聚合性向列相液晶，在使该液晶分子取向的状态下使其固化而得到的光学薄膜。其制作方法是通过在基板上涂敷聚酰亚胺等高分子膜，用布等对其进行单方向的摩擦（摩擦法）的取向膜上，涂布聚合性液晶，使液晶分子取向于摩擦方向，然后使其聚合，将取向固定化，通过取向膜的取向方向与聚合性液晶的取向形态的组合，可以得到具有拉伸双折射薄膜中不能得到的光学性质的相位差膜。

将此种薄膜与线性偏振片、 $1/2$ 波长延迟膜相结合可以得到一种新型的液

晶型宽波带圆偏振片。下面根据 Muller 矩阵计算线性偏振片吸透光轴与 $1/2$ 波长延迟膜和液晶薄膜的方位角的层叠角度，同时扭曲向列相聚合性液晶薄膜的扭曲角和相位延迟也必须精密的设计。如图 3.3 所示为液晶型宽波段圆偏振片各光学元件几何位置关系示意图。偏振片透光方向和 X 轴夹角为 α ，并且规定逆时针方向旋转角度为正，反之为负。半波延迟膜的慢轴方向和 X 轴的夹角为 β ，上基板液晶分子指向矢和 X 轴平行，下基板液晶分子指向矢和 X 轴夹角为 ϕ 。我们假设液晶盒中的液晶是正性的，则中心波长为 λ_0 的单色光正入射，经过线偏振片后，变为偏振方向与 X 轴夹角为 α 的线偏振光，经过半波延迟膜之后，线偏振光偏振方向绕半波延迟膜的慢轴方向转过 $2(\beta - \alpha)$ 角度，变为偏振方向与 X 轴夹角为 $\alpha + 2(\beta - \alpha) = 2\beta - \alpha$ 的线偏振光。若这束线偏振光经过液晶层之后转化为圆偏振光，需要液晶层的相位延迟 $\delta_{LC} = 2\pi d_{LC} \Delta n / \lambda$ 以及扭曲角 ϕ 满足一定的条件，按照图 3.3 所示的光传播次序，得到到达反射板处的偏振光的 Stokes 矢量为：

$$S_{mirror} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & B & C \\ 0 & D & E & F \\ 0 & G & H & K \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2(2\beta - \alpha) \\ \sin 2(2\beta - \alpha) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ A \cos(4\beta - 2\alpha) + B \sin(4\beta - 2\alpha) \\ D \cos(4\beta - 2\alpha) + E \sin(4\beta - 2\alpha) \\ G \cos(4\beta - 2\alpha) + H \sin(4\beta - 2\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

如果经过液晶层之后的偏振光为圆偏振光，则

$$\begin{cases} A \cos(4\beta - 2\alpha) + B \sin(4\beta - 2\alpha) = 0, \\ D \cos(4\beta - 2\alpha) + E \sin(4\beta - 2\alpha) = 0, \\ G \cos(4\beta - 2\alpha) + H \sin(4\beta - 2\alpha) = \pm 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

即， $AE=BD$ ，化简上式得到

$$\frac{\delta}{u} \sin u = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (3.11)$$

$$\tan(4\beta - 2\alpha) = -\frac{D}{E} = -\frac{u}{\phi} \cot u \quad (3.12)$$

即

$$\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\sqrt{\phi^2 \lambda_0^2 + (\pi d_{LC} \Delta n)^2}} \sin \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.13)$$

$$\tan(4\beta - 2\alpha) = -\frac{\sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2}}{\phi} \cot \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2} \quad (3.14)$$

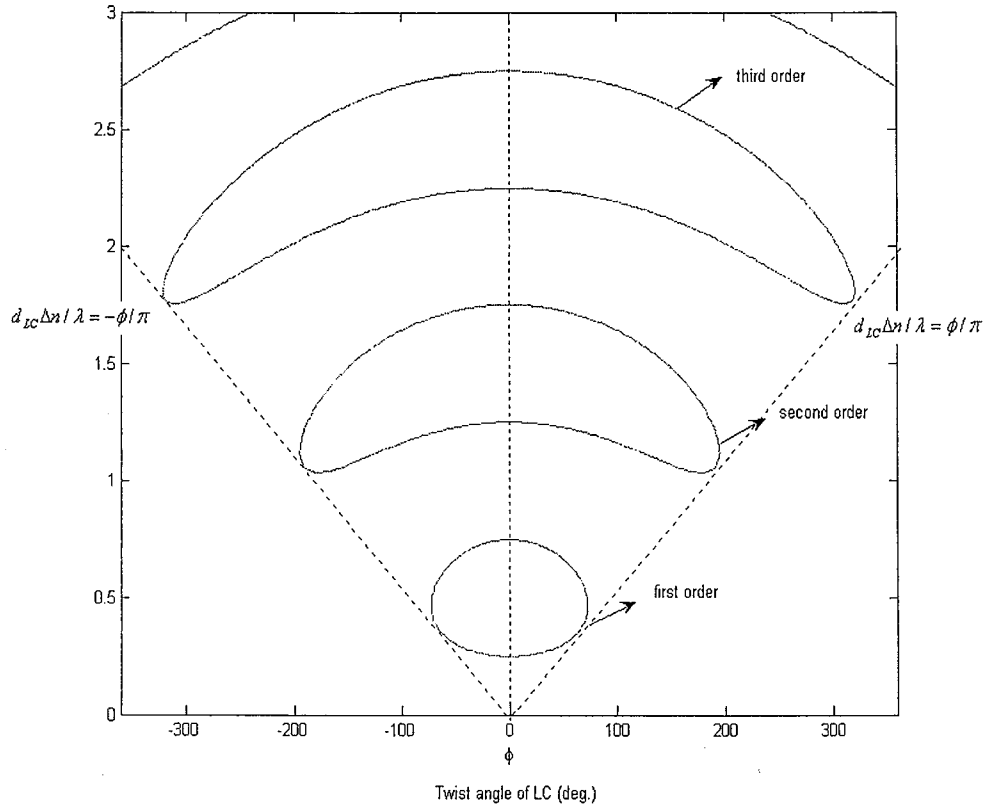
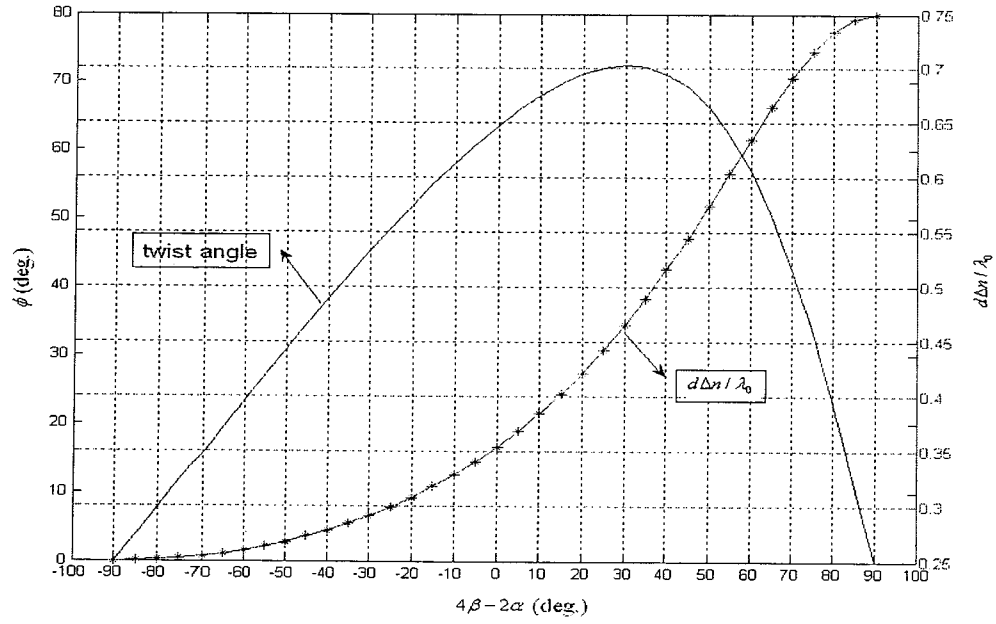
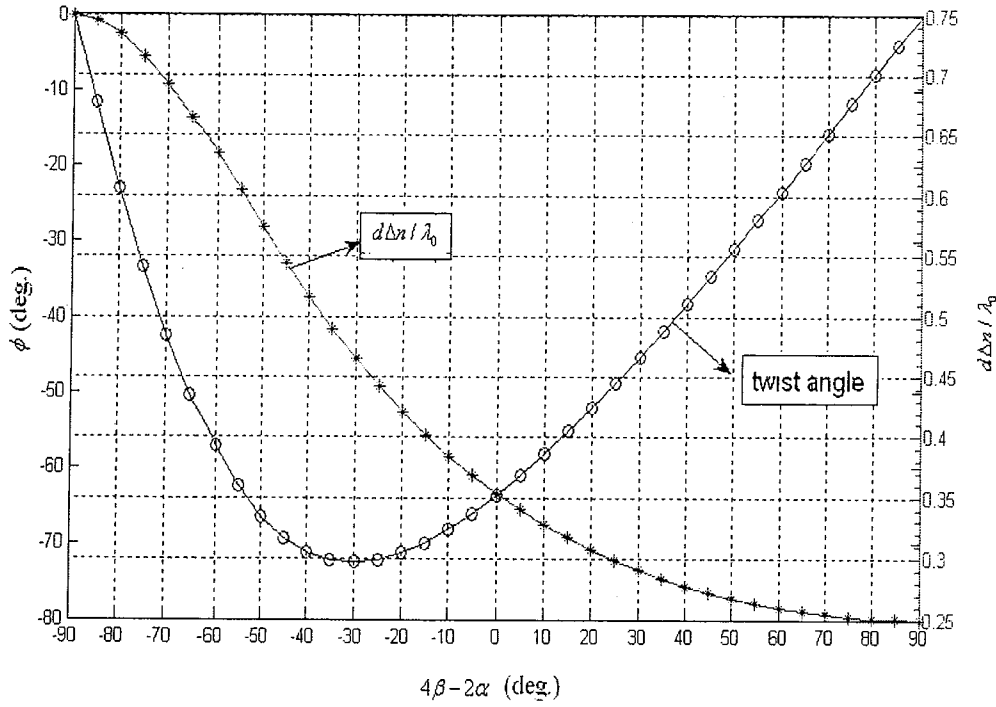


图 3.4 满足圆偏振光出射条件的 ϕ 和 $d_{LC} \Delta n / \lambda_0$ 的关系曲线。



(a)



(b)

图 3.5 (a)液晶层左旋； (b)液晶层右旋时满足圆偏振光出射条件的 $(4\beta - 2\alpha)$ 与 ϕ 和 $d_{LC}\Delta n/\lambda_0$ 的关系曲线。

(3.13) 式和 (3.14) 式保证了半波延迟膜和向列相扭曲聚合性液晶层组合成的一个宽频消色差四分之一波长延迟膜。并且通过 (3.13) 式和 (3.14) 式我们可以得到 $(4\beta - 2\alpha)$, ϕ 和 $d_{LC}\Delta n/\lambda_0$ 之间的关系, 根据 (3.13) 式绘制了 $(\phi, d_{LC}\Delta n/\lambda_0)$ 两个参数之间的关系曲线, 如图 3.4 所示, 由参数曲线图可以看出, 在 $d_{LC}\Delta n/\lambda_0 \in [0, 3]$ 范围内存在一阶、二阶和三阶三组方程解, 由于二阶解、三阶解比一阶解情况下对应的液晶层光延迟大, 在扭曲角相同的情况下, 造成的色散会比较强, 因此采用一阶解来设计宽频四分之一波长延迟膜会比较理想。对于图 3.4 中一阶解的每一组 $(\phi, d_{LC}\Delta n/\lambda_0)$ 的值代入到 (3.14) 式中, 我们可以求解得到相应的 $(4\beta - 2\alpha)$ 的值, 使得在该角度下到达反射板的光为圆偏振光。由于 (3.13) 式和 (3.14) 式两个方程中 ϕ 和 $d_{LC}\Delta n/\lambda_0$ 包含在开方项和三角函数项中, 不能直接求得 $(4\beta - 2\alpha)$ 与 ϕ 和 $d_{LC}\Delta n/\lambda_0$ 的解析函数关系。因此这里采用遍历取值求解的方法, 对 $(4\beta - 2\alpha)$ 在 -90° 到 90° 范围内按 5° 的角度步长依次取值, 将此角度值代入到 (3.14) 式中, 然后求解 (3.13) 式和 (3.14) 式组成的方程组, 保留 $d_{LC}\Delta n/\lambda_0$ 值为正的解, 那么每一个 $(4\beta - 2\alpha)$ 角度值对应两组 ϕ 和 $d_{LC}\Delta n/\lambda_0$, 按照扭曲角为左旋还是右旋, 即扭曲角为正值还是负值来分别绘制关系曲线, 图 3.5(a) 所示为液晶层左旋, 即扭曲角为正值时的 $((4\beta - 2\alpha), \phi, d_{LC}\Delta n/\lambda_0)$ 之间的关系曲线; 图 3.5(b) 所示为液晶层右旋, 即扭曲角为负值时 $((4\beta - 2\alpha), \phi, d_{LC}\Delta n/\lambda_0)$ 之间的关系曲线。

§ 3.3 单偏振片反射式扭曲向列相液晶显示

§ 3.3.1 暗态光谱特性

如果用均匀扭曲向列相液晶层代替均匀扭曲向列相聚合性液晶薄膜, 在向列相液晶层后面设置反射板, 可以制作单偏振片半波补偿常黑模式反射式向列相液晶显示。因为在上述参数下入射到反射板的光波偏振态为圆偏振, 反射时旋转方向发生翻转, 最后达到上偏振片时被吸收轴吸收, 显示为暗态。当施加驱动电压,

液晶分子全部站立，对透过液晶层的光波偏振态没有任何影响，到达反射板处的光波偏振态为线偏振，最后达到上偏振片时为与偏振片透光轴平行的线偏振光，显示为亮态。如图3.6所示为单偏振片半波补偿常黑模式反射式向列相液晶显示的结构示意图。

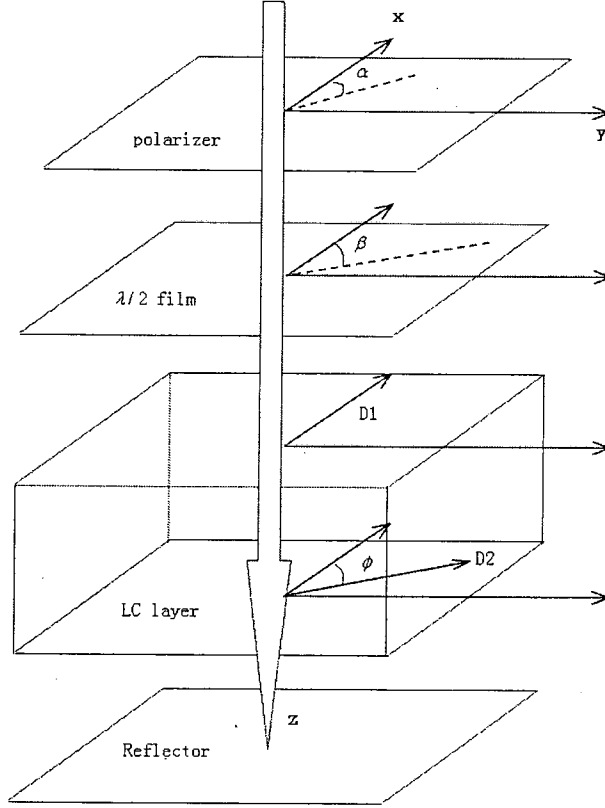


图 3.6 单偏振片反射式均匀扭曲向列相液晶显示结构示意图

若采用图3.5所示的 $((4\beta - 2\alpha), \phi, d_{LC} \Delta n / \lambda_0)$ 参数关系设置图3.6的结构，按照光束传播次序，用琼斯矩阵计算单偏振片均匀扭曲常黑模式液晶显示的反射率，得到

$$R = \left[2 \left(\delta \cdot \frac{\sin u}{u} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left\{ 2 \delta \cdot \frac{\sin u}{u} \left[\cos u \cdot \cos(4\beta - 2\alpha) + \phi \frac{\sin u}{u} \sin(4\beta - 2\alpha) \right] \right\}^2 \quad (3.15)$$

那么单偏振片均匀扭曲常黑模式液晶显示的暗态的光谱特性如图3.7和图3.8所示。图3.7所示曲线为 $(4\beta - 2\alpha)$ 以 10° 为步长依次从 -10° 变化到 -90° 时，图3.5(a)的左半侧参数所对应的暗态光谱特性曲线；图3.7所示曲线为 $(4\beta - 2\alpha)$ 以

10° 为步长依次从 10° 变化到 90° 时, 图3.5(a)的右半侧参数所对应的暗态光谱特性曲线。与之相对应, 图3.5(b)的左右两侧参数所对应的单偏振片均匀扭曲常黑模式暗态光谱特性曲线与3.5(a)的左右两侧参数所对应的暗态光谱特性曲线刚好对调, 图3.5(b)的右半侧参数与3.5(a)左半侧参数对应的暗态光谱特性曲线吻合, 如图3.7所示。而图3.5(b)的左半侧参数与3.5(a)右半侧参数对应的暗态光谱特性曲线吻合, 如图3.8所示。从暗态光谱特性曲线可以看出, 无论是 $(4\beta - 2\alpha)$ 由 -10° 变化到 -90° , 还是由 10° 变化到 90° 的光程中, 光谱特性曲线都是以 550nm 中心波长为中心, 蓝光光谱区域和红光光谱区域都向中心波长区域收窄。

在液晶层扭曲角取特殊角度值时, 例如 $\phi = 0^\circ$ 时, 对应的 $d_{LC} \Delta n / \lambda_0 = 0.25$ 或 0.75 , 此时液晶层为四分之一波片或四分之三波片。为了减小色散, 我们一般采用四分之一波长延迟层。也就是说如果液晶层为非扭曲时, 对应的液晶层光程差为四分之一波长。

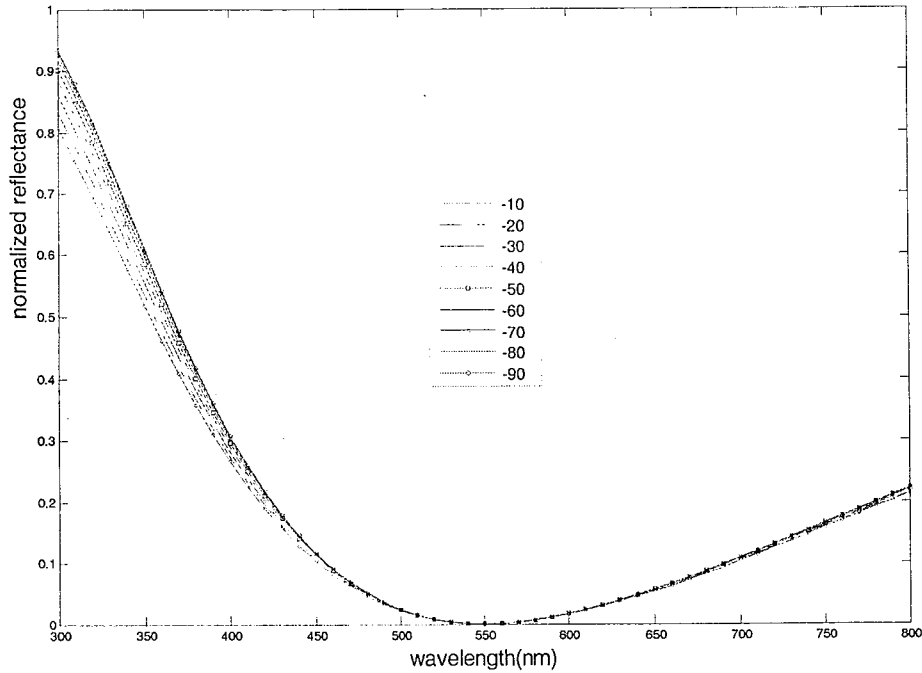


图 3.7 $(4\beta - 2\alpha)$ 以 -10° 为步长依次从 -10° 变化到 -90° 时, 单偏振片均匀扭曲常黑模式液晶显示的暗态光谱特性曲线。

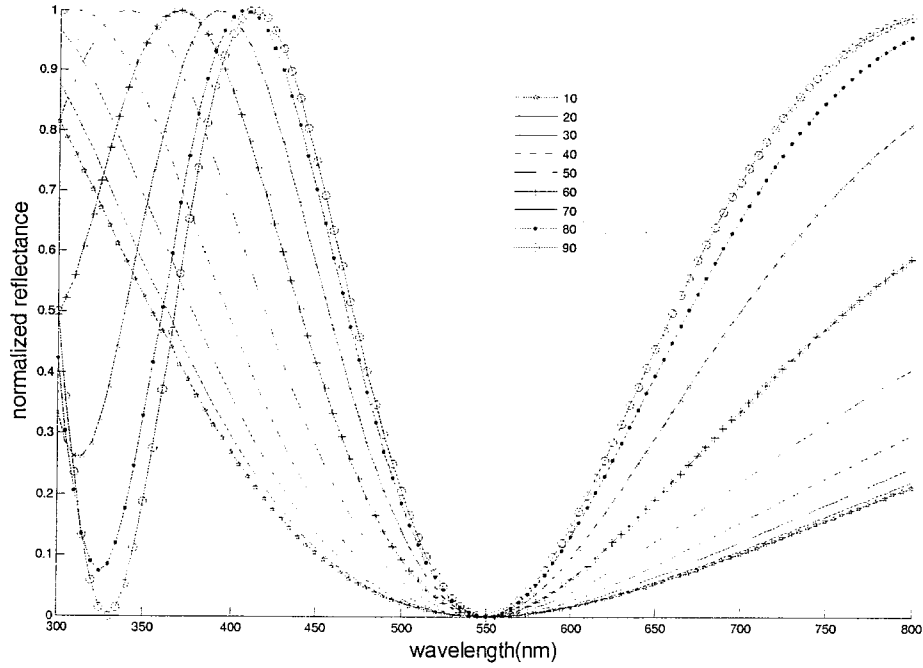


图 3.7 $(4\beta - 2\alpha)$ 以 10° 为步长依次从 10° 变化到 90° 时, 单偏振片均匀扭曲常黑模式液晶显示的暗态光谱特性曲线。

§ 3.3.2 延迟膜与液晶材料的色散

如果考虑以中心波长 λ_0 的单色光正入射, 那么根据上面分析得到的任意一组 $(4\beta - 2\alpha)$ 和与其对应的 $(\phi, d_{LC} \Delta n / \lambda_0)$ 值都可以使得经过液晶层圆偏振光出射。但是在可见光范围内, 由于波长的变化以及材料的色散, 延迟膜和液晶的位相差将发生变化, 导致出射偏振光为椭圆偏振光, 而不是圆偏振光。由此可以看出延迟膜和液晶材料本身的色散对出射偏振态的影响不可以忽略。

根据单带模型理论^[67, 68], 液晶材料的色散关系可描述为

$$\Delta n = G \frac{\lambda^2 \lambda^{*2}}{\lambda^2 - \lambda^{*2}} \quad (3.16)$$

其中 G 是一个比例常数, λ^* 是电子跃迁的平均波长, 它由材料的化学结构决定,

λ 是光波长, $\Delta n = n_e - n_o$ 是波长为 λ 时液晶的折射率各向异性。对于由聚酯薄膜 (Mylar) 材料做成的延迟膜, 其材料的分子结构和许多 LCD 用液晶材料相似, 因而延迟膜和液晶具有相似的 λ^* , 所以二者具有相似的色散关系, 只是由于比例系数的不同, 延迟膜的折射率各向异性只有液晶材料折射率各向异性的约 $1/3^{[69, 70]}$ 。在实际应用中, 往往选择位相条件匹配的延迟膜和液晶材料, 以尽可能减小材料色散对显示器对比度和色散的影响^[71]。为了简单起见, 在本文的计算中, 我们假设延迟膜和液晶材料的电子跃迁平均波长 λ^* 相同, 而比例系数不同, 计算所用参数如表 3.1 所示, 根据 (3.13) 式, 计算得到延迟膜和液晶的色散曲线如图 3.9 所示, 从中可以看出随波长的增加, 延迟膜和液晶的折射率各向异性均单调减小, 这样通过选择延迟膜和液晶层的厚度可使二者的位相差达到所需的匹配条件。

表 3.1 延迟膜和液晶的单带模型参数 (计算用)

参数	参数值
λ^*	150nm
G_L	2.88×10^{-6} nm
G_F	9.60×10^{-7} nm

若在中心波长和另一波长处, 延迟膜和液晶的折射率各向异性分别为 Δn_F^0 、 Δn_F 、 Δn_L^0 和 Δn_L , 考虑到二者具有相同的 λ^* , 根据 (3.13) 式有如下关系

$$\frac{\Delta n_F^0}{\Delta n_F} = \frac{\Delta n_L^0}{\Delta n_L} \quad (3.17)$$

这样, 当入射波长为 λ 时, 延迟膜与液晶的位相延迟 δ_F 与 δ_L 可分别表示为

$$\delta_F = \frac{2\pi}{\lambda} d_F \Delta n_F = \frac{2\pi}{\lambda \frac{\Delta n_F^0}{\Delta n_F}} d_F \Delta n_F^0 = \frac{\lambda_0}{\lambda \frac{\Delta n_F^0}{\Delta n_F}} \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot d_F \Delta n_F^0 = \frac{\lambda_0}{\lambda \frac{\Delta n_F^0}{\Delta n_F}} \cdot \delta_F^0 \quad (3.18)$$

$$\delta_L = \frac{2\pi}{\lambda} d_L \Delta n_L = \frac{2\pi}{\lambda \frac{\Delta n_L^0}{\Delta n_L}} d_L \Delta n_L^0 = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{2\pi}{\frac{\Delta n_L^0}{\Delta n_L}} \cdot d_L \Delta n_L^0 = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\Delta n_L^0}{\Delta n_L} \cdot \delta_L^0 \quad (3.19)$$

其中， δ_F^0 代表波长为 λ_0 时延迟膜的位相差， δ_L^0 代表波长为 λ_0 时非扭曲液晶层的位相差，显然，由于 Δn_F 和 Δn_L 依赖于波长，因此， δ_F 和 δ_L 都是波长的函数。

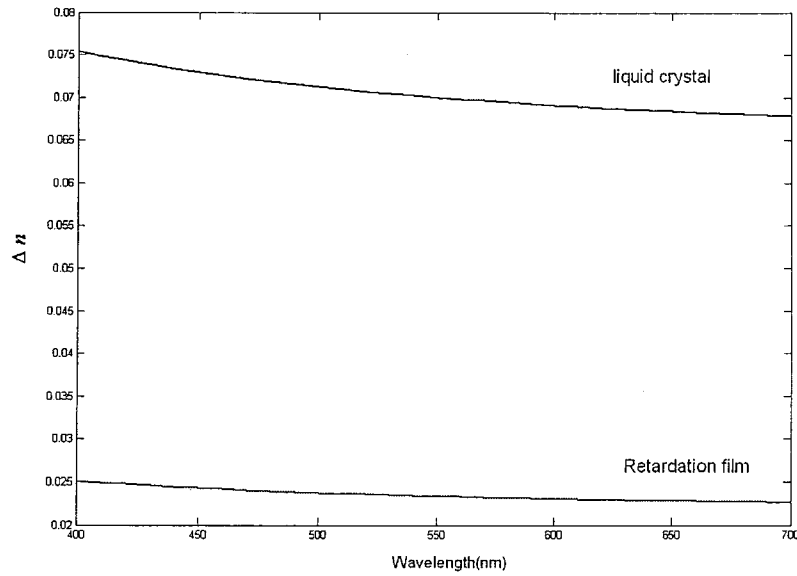


图 3.9 延迟膜与液晶的色散曲线

§ 3.3.3 方位角度最佳化设计

如果考虑到延迟膜和液晶材料的色散，那么对于给定的 $(4\beta - 2\alpha)$ ， α 角和 β 角取值的不同，也会造成不同程度的色散。因此为了得到宽频的四分之一波长补偿膜，需要最优化 $(4\beta - 2\alpha)$ 中的 α 角和 β 角。

根据图3.3所示的光传播次序，用Muller矩阵计算入射线偏振光经过半波延迟膜和液晶层之后的偏振态的斯托克斯矢量为

$$S_{mirror} = U_{LC} \cdot M(\beta, \delta_F) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

其中,

$$M(\beta, \delta_F) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta_F & \sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) & -\sin 2\beta \sin \delta_F \\ 0 & \sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) & \sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta_F & \cos 2\beta \sin \delta_F \\ 0 & \sin 2\beta \sin \delta_F & -\cos 2\beta \sin \delta_F & \cos \delta_F \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$M(\beta, \delta_F)$ 为半波延迟膜的Jones矩阵, 将(3.6)式和(3.21)式代入(3.20)式, 得到使得出射光偏振态为圆偏振光的条件为

$$\begin{cases} A \cdot [(\cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta_F) \cos 2\alpha + \sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ + B \cdot [\sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \cos 2\alpha + (\sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ + C \cdot [\sin 2\beta \sin \delta_F \cos 2\alpha - \cos 2\beta \sin \delta_F \sin 2\alpha] = 0 \\ \\ D \cdot [(\cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta_F) \cos 2\alpha + \sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ + E \cdot [\sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \cos 2\alpha + (\sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ + F \cdot [\sin 2\beta \sin \delta_F \cos 2\alpha - \cos 2\beta \sin \delta_F \sin 2\alpha] = 0 \\ \\ G \cdot [(\cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta_F) \cos 2\alpha + \sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ + H \cdot [\sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \cos 2\alpha + (\sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ + K \cdot [\sin 2\beta \sin \delta_F \cos 2\alpha - \cos 2\beta \sin \delta_F \sin 2\alpha] = \pm 1 \end{cases} \quad (3.22)$$

液晶层非扭曲时的方位角度关系

在考虑液晶材料和补偿膜材料的色散时, 首先看液晶在非扭曲情形下的偏振片透光轴和半波补偿膜光轴的最佳角度选取问题。考虑到公式(3.7)以及 $\phi = 0^\circ$, 公式(3.21)化简为

$$\begin{cases} [(\cos^2 2\beta + \sin^2 2\beta \cos \delta_F) \cos 2\alpha + \sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \sin 2\alpha] = 0 \\ \cos \delta_L \cdot [\sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \cos 2\alpha + (\sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ - \sin \delta_L \cdot [\sin 2\beta \sin \delta_F \cos 2\alpha - \cos 2\beta \sin \delta_F \sin 2\alpha] = 0 \\ \sin \delta_L \cdot [\sin 2\beta \cos 2\beta (1 - \cos \delta_F) \cos 2\alpha + (\sin^2 2\beta + \cos^2 2\beta \cos \delta_F) \sin 2\alpha] \\ + \cos \delta_L \cdot [\sin 2\beta \sin \delta_F \cos 2\alpha - \cos 2\beta \sin \delta_F \sin 2\alpha] = \pm 1 \end{cases} \quad (3.23)$$

并且根据图3.5所示 $((4\beta - 2\alpha), \phi, d_{LC} \Delta n / \lambda_0)$ 关系曲线, 当 $\phi = 0^\circ$ 时,

$$4\beta - 2\alpha = \pm 90^\circ; \quad \delta_L^0 = 2\pi d_{LC} \Delta n / \lambda_0 = \pi / 2; \quad \delta_F = 2\delta_L = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\Delta n_L^0}{\Delta n_L} \cdot \pi; \quad \text{并且考虑到}$$

$4\beta - 2\alpha = 90^\circ$ 时,

$$\sin 2\alpha = -\cos 4\beta, \quad \cos 2\alpha = \sin 4\beta \quad (3.24)$$

$4\beta - 2\alpha = -90^\circ$ 时,

$$\sin 2\alpha = \cos 4\beta, \quad \cos 2\alpha = -\sin 4\beta \quad (3.25)$$

化简公式(3.23), 得到

$$\begin{cases} S_1^{mirror} = \sin 4\beta (1 - \sin \delta_L) = 0 \\ S_2^{mirror} = -\cos \delta_L (2 \cos 2\beta \sin^2 \beta \sin^2 \delta_L + \cos 4\beta) = 0 \\ S_3^{mirror} = \pm \sin \delta_L (4 \cos^2 \beta \cos 2\beta \cos^2 \delta_L + 1) = \pm 1 \end{cases} \quad (3.26)$$

因此到达反射板时的光波偏振态的Stokes矢量为

$$S_{mirror} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sin 4\beta (1 - \sin \delta_L) \\ -\cos \delta_L (2 \cos 2\beta \sin^2 \beta \sin^2 \delta_L + \cos 4\beta) \\ \pm \sin \delta_L (4 \cos^2 \beta \cos 2\beta \cos^2 \delta_L + 1) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

从公式(3.27)可以看出达到反射板处的光波偏振态是 β 和 δ_L 的函数, 当以中心波长入射的情况下, 只要满足 $4\beta - 2\alpha = \pm 90^\circ$, 光波偏振态则为圆偏振光。

但是如果考虑到液晶材料和补偿膜材料的色散， δ_L 为波长 λ 的函数，在整个可见光谱范围内，如果想得到宽带消色差圆偏振片，需要找到一个最佳角度 β 值，使得公式 (3.27) 所表示的反射板处光波的偏振状态尽可能的接近圆偏振光。左旋或右旋圆偏振光可以用邦加球上的南极点或北极点来表示，如果考虑到液晶材料和补偿膜材料的色散，不同的角度 β 值引起的偏振状态的偏离程度不同。由于偏振光的偏振态可以由 Stokes 参量 (S_1, S_2, S_3) 来表示，例如，某一偏振光偏振态为 $S = (S_1, S_2, S_3)$ ，那么两束不同状态的偏振光 $S_{(1)}$ 与 $S_{(2)}$ 的偏振状态差异可以表示为

$$\Delta S_{(1)-(2)} = S_{(1)} - S_{(2)} = \sqrt{(S_{1-(1)} - S_{1-(2)})^2 + (S_{2-(1)} - S_{2-(2)})^2 + (S_{3-(1)} - S_{3-(2)})^2} \quad (3.28)$$

而左旋圆偏振光的 Stokes 参量为 $S_{(LCP)} = (0, 0, 1)$ ，右旋圆偏振光的 Stokes 参量为 $S_{(RCP)} = (0, 0, -1)$ ，并且考虑到 $(S_1^{mirror})^2 + (S_2^{mirror})^2 + (S_3^{mirror})^2 = 1$ ，因此 S_{mirror} 和左旋圆偏振光 $S_{(LCP)}$ 以及右旋圆偏振光 $S_{(RCP)}$ 的偏振态差异可以表示为

$$\begin{cases} \Delta S_{(mirror)-(LCP)} = S_{mirror} - S_{(LCP)} = \sqrt{2(1 - S_3^{mirror})} \\ \Delta S_{(mirror)-(RCP)} = S_{mirror} - S_{(RCP)} = \sqrt{2(1 + S_3^{mirror})} \end{cases} \quad (3.29)$$

为了考量在反射板处得到的偏振态与纯粹的圆偏振态的偏离程度，若要得到比较好的左旋圆偏振态，则 $S_3^{mirror} = \sin \delta_L (4 \cos^2 \beta \cos 2\beta \cos^2 \delta_L + 1)$ ，若要得到较好的右旋圆偏振态，则 $S_3^{mirror} = -\sin \delta_L (4 \cos^2 \beta \cos 2\beta \cos^2 \delta_L + 1)$ ，因此反射板处的偏振态与其相应的纯粹的圆偏振光的偏离程度可以表示为

$$\Delta S_{(mirror)-(CP)} = \sqrt{2(1 - \sin \delta_L (4 \cos^2 \beta \cos 2\beta \cos^2 \delta_L + 1))} \quad (3.30)$$

那么，问题转化为如何令 $f = 1 - \sin \delta_L (4 \cos^2 \beta \cos 2\beta \cos^2 \delta_L + 1)$ 取极小值的问题，我们可以这样考虑，对于可见光谱范围内的任意波长 λ ，若 f 在某一个

β 处都取极小值, 那么相应的 f 对于波长的依赖性达到最小值, 也就是说, 反射板处的光波偏振态对于圆偏振光的偏离程度最小。这样我们只需寻找, 对于可见光范围内的任意波长 λ , 使得 f 都取极小值的 β , 然后由 $4\beta - 2\alpha = \pm 90^\circ$, 得到相应的半波延迟补偿膜的光轴与前基板液晶分子指向矢的夹角 β 所处的位置。

为此, 首先需要确定 f 随着 β 变化的极值点, 他由下式决定

$$\frac{\partial f}{\partial \beta} = 0 \quad (3.31)$$

$$\text{得到 } \sin 2\beta(4\cos^2 \beta - 1)\sin \delta_L \cos^2 \delta_L = 0$$

考虑到波长的任意性, δ_L 具有不确定性, 所以要求

$$\sin 2\beta = 0 \text{ 或 } 4\cos^2 \beta - 1 = 0 \quad (3.32)$$

从而 $\beta = 0^\circ$ 或 $\pm 90^\circ$ 或 $\pm 60^\circ$ 。很显然, 当 $\beta = 0^\circ$ 或 $\pm 90^\circ$, 半波延迟膜的光轴和液晶层光轴的方向平行或正交, 达不到补偿的效果, 因此 $\beta = 0^\circ$ 或 $\pm 90^\circ$ 为无效解。

综合上面的分析, 当 $\beta = \pm 60^\circ$ 时, 到达反射板处的光波偏振态最接近圆偏振态, 在可见光谱范围内对波长 λ 的色散依赖性最小, 相应的偏振片透光轴和非扭曲液晶分子层的光轴方向的夹角为 $\alpha = \pm 75^\circ$ ($4\beta - 2\alpha = \pm 90^\circ$) 或 $\alpha = \mp 15^\circ$ ($4\beta - 2\alpha = \pm 90^\circ$ 与 $4\beta - 2\alpha = \mp 270^\circ$ 等价)。这样我们就得到了四种组合下宽波段非扭曲液晶圆偏振片的参数:

$$(a1). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = 75^\circ \\ \beta = 60^\circ \end{cases} \quad (a2). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = -75^\circ \\ \beta = -60^\circ \end{cases} \quad (3.33)$$

$$(b1) \cdot \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = -15^\circ \\ \beta = 60^\circ \end{cases} \quad (b2) \cdot \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = 15^\circ \\ \beta = -60^\circ \end{cases} \quad (3.34)$$

上面推导出了四组使得非扭曲型液晶圆偏振片具有最小色散的参数，他们的几何位置关系如图3.10所示。从中可以看到(a1)和(a2)相比以及(b1)和(b2)相比，半波延迟膜光轴方向和偏振片透光轴方向对称分布于液晶层光轴两侧。注意到液晶的光轴与半波延迟膜的光轴成 60° 夹角，导致液晶层和延迟膜分别引入的相位差被大部分抵消，所以得到的圆偏振片的色散较小。

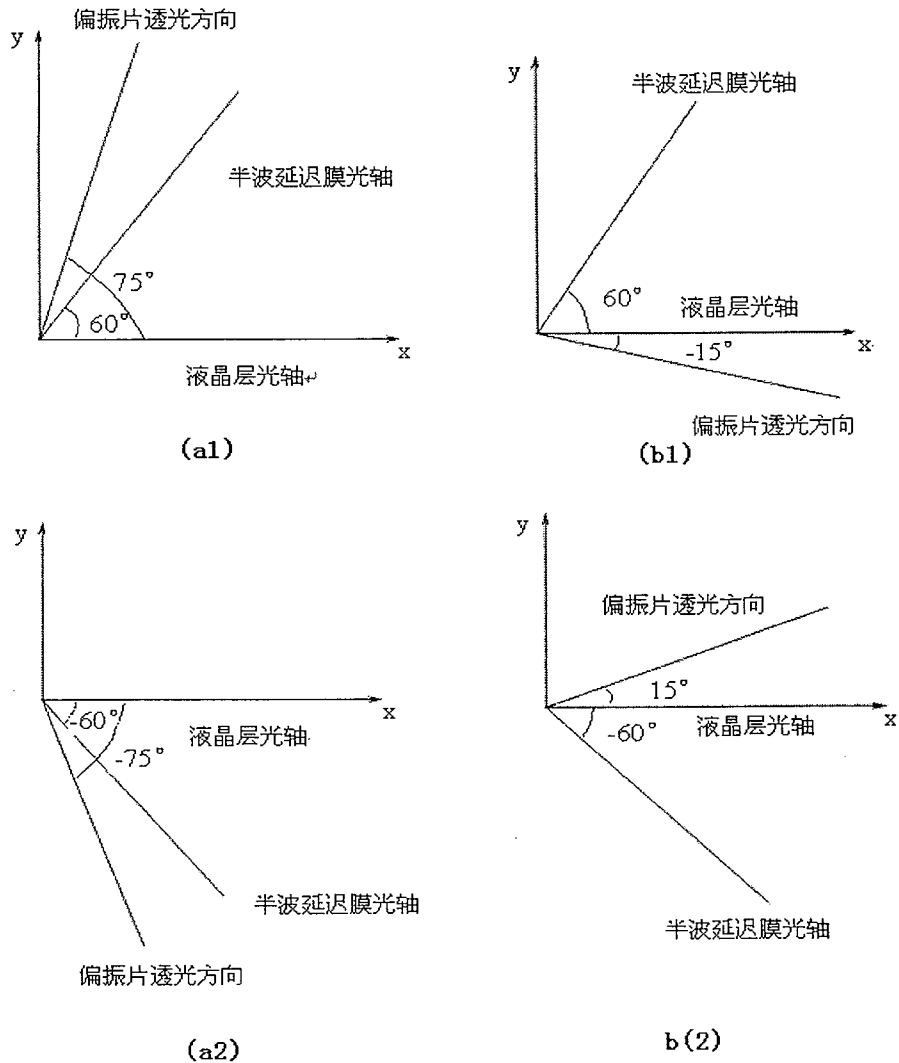


图 3.10 非扭曲圆偏振片中个光学元件的几何位置关系

液晶层扭曲时的方位角度关系

若液晶层扭曲角度不为零,那么根据(3.22)式,以及求解非扭曲液晶圆偏振片参数配置的方法和结论。得到 $(4\beta - 2\alpha)$ 在 -90° 到 90° 之间取任意角度值时, α 和 β 各自的最佳角度值,如图 3.11 所示。这样,对于图 3.5 所示的任意的取参数值为 $(\phi, d_{LC}\Delta n/\lambda_0)$ 的液晶层,都能找到最佳的角度值 α 和 β ,与半波延迟膜和线性偏振片组合而构成一个宽波段圆偏振片。其中图 3.11 中 a(1)和 a(2)所示为液晶层右旋扭曲的情形,即负扭曲;b(1)和 b(2)所示为液晶层左旋扭曲的情形,即正扭曲。

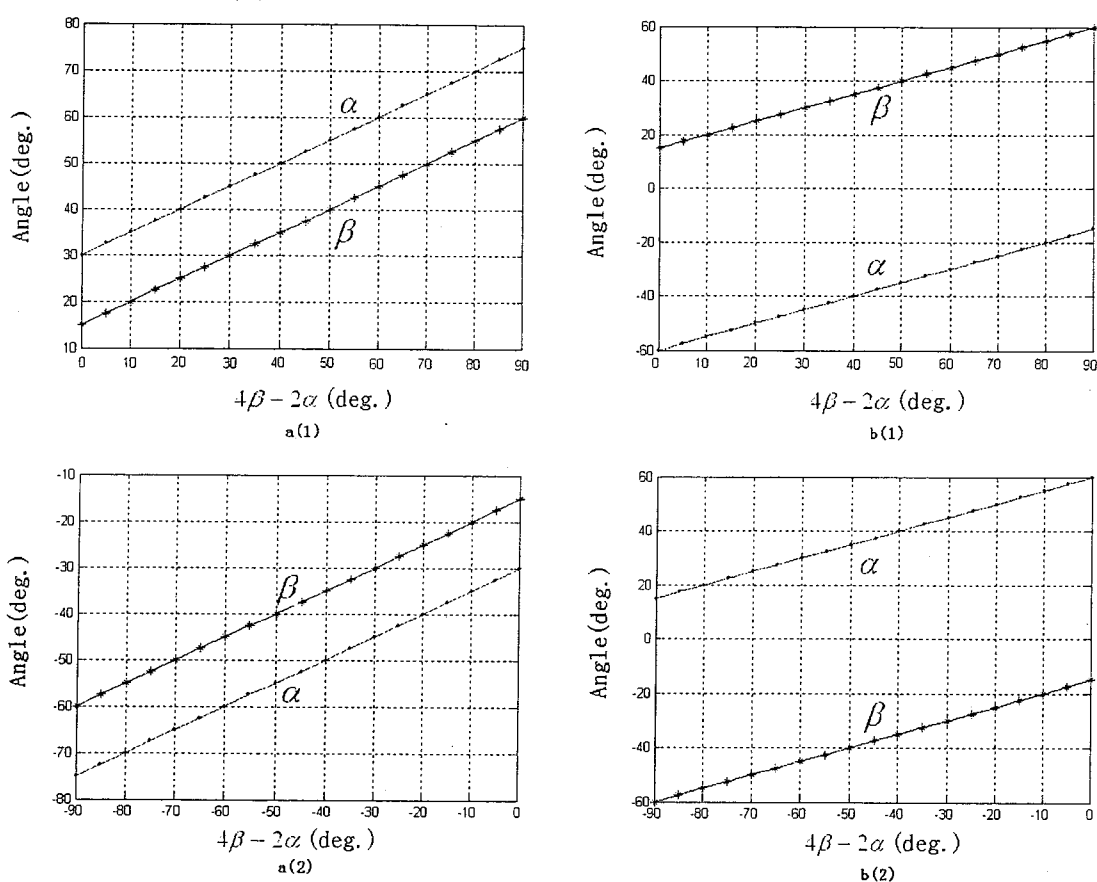


图 3.11 向列相聚合性扭曲液晶圆偏振片中 α 和 β 的最佳角度取值

§ 3.3.4 模拟结果比较和讨论

根据上面得到的非扭曲时的最佳角度关系，任取一组数值，模拟其构成的单偏振片反射式扭曲向列相液晶显示的显示特性。例如，当 $(4\beta - 2\alpha) = 50^\circ$ 时， $\alpha = 55^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ ，对应的液晶层的扭曲角为 $\phi = -30.93^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0 = 0.2673$ ；或者 $\alpha = -35^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ （计算中 $(4\beta - 2\alpha) = 230^\circ$ ，而根据 (3.15) 式， $(4\beta - 2\alpha)$ 有 180° 的周期性，因此 $(4\beta - 2\alpha) = 230^\circ$ 与 $(4\beta - 2\alpha) = 50^\circ$ 等价），对应液晶层的扭曲角为 $\phi = 66.40^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0 = 0.5739$ 。根据扩展琼斯矩阵，绘制其电光

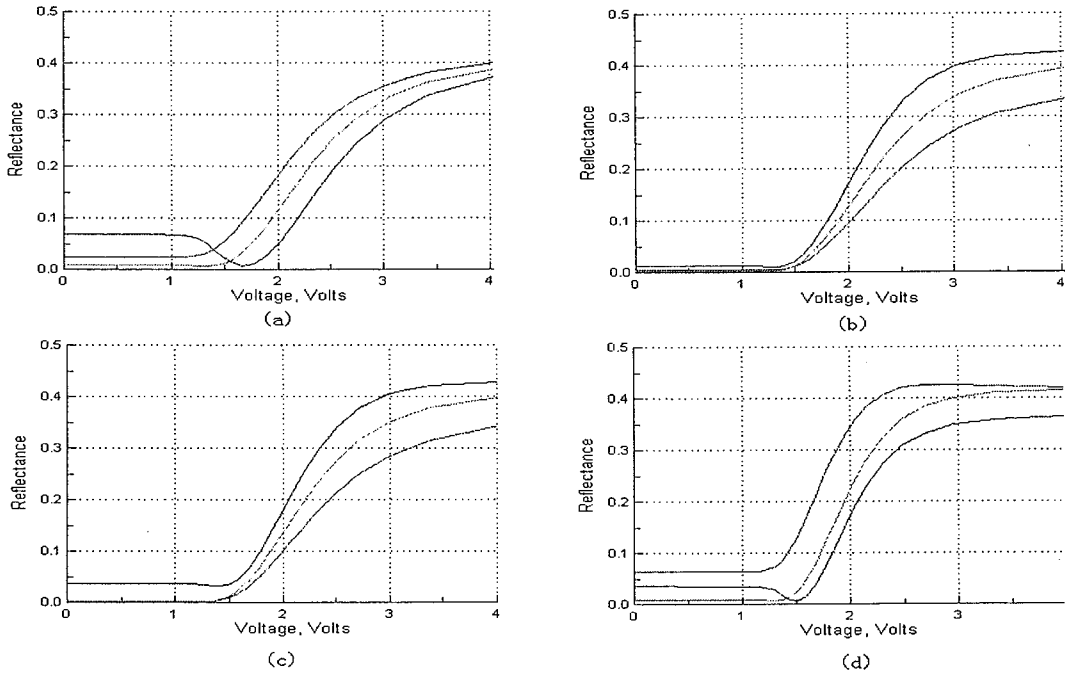


图 3.12 单偏振片向列相液晶显示电压-反射率曲线，参数设置为：(a) $\alpha = 45^\circ$ ， $\phi = 0^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0 = 0.25$ ；(b) $\alpha = 15^\circ$ ， $\beta = -60^\circ$ ， $\phi = 0^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0 = 0.25$ ；(c) $\alpha = 55^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ ， $\phi = -30.93^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0 = 0.2673$ ；(d) $\alpha = -35^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ ， $\phi = 66.40^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0 = 0.5739$

特性曲线，光谱特性曲线，等对比度视角图和暗态的亮度视角图，与单纯使用液晶层相位延迟为四分之一波长的单偏振片非扭曲反射式液晶显示，以及使用半波延迟膜补偿液晶层相位延迟为四分之一波长的单偏振片反射式非扭曲液晶显示相比较，模拟结果如图 3.12，图 3.13，图 3.14 和图 3.15 所示。

由图 3.12，我们看到，由于考虑到空气和偏振片表面的反射，以及偏振片的消光比，反射板的反射率等因素，单偏振片反射式液晶显示的反射率不能理想的达到 50%（其它 50%的自然光被偏振片吸收），这里模拟的结果最大反射率大约为 42%左右，红光、绿光和蓝光波长分别为 650nm, 550nm 和 450nm。

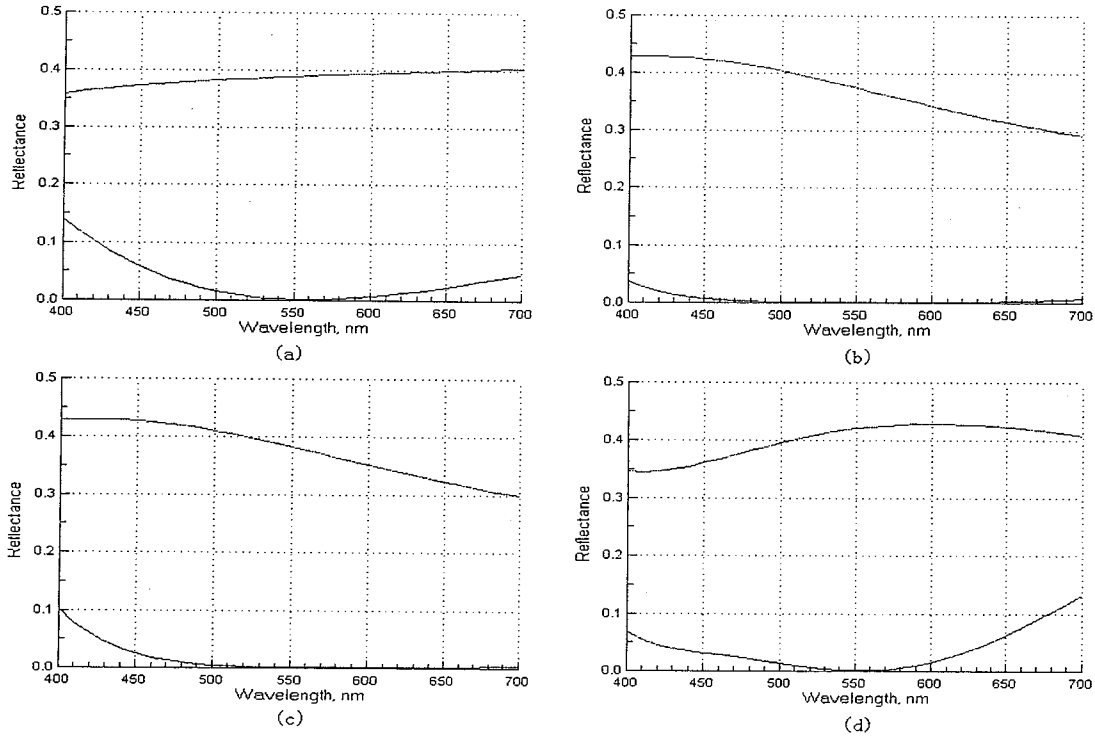


图 3.13 单偏振片向列相液晶显示光谱特性曲线，参数设置为：(a) $\alpha = 45^\circ$ ， $\phi = 0^\circ$ ， $d_{LC} \Delta n / \lambda_0 = 0.25$ ；(b) $\alpha = 15^\circ$ ， $\beta = -60^\circ$ ， $\phi = 0^\circ$ ， $d_{LC} \Delta n / \lambda_0 = 0.25$ ；(c) $\alpha = 55^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ ， $\phi = -30.93^\circ$ ， $d_{LC} \Delta n / \lambda_0 = 0.2673$ ；(d) $\alpha = -35^\circ$ ， $\beta = 40^\circ$ ， $\phi = 66.40^\circ$ ， $d_{LC} \Delta n / \lambda_0 = 0.5739$

由图 3.13 所示，显然单纯使用液晶层相位延迟为四分之一波长的单偏振反射式非扭曲液晶显示的暗态光谱特性比较差；使用半波延迟膜补偿液晶层相位

延迟为四分之一波长的单偏振片反射式非扭曲液晶显示和 $\phi = -30.93^\circ$ 的单偏振片反射式扭曲液晶显示的光谱特性相近似； $\phi = 66.40^\circ$ 的单偏振片反射式扭曲液晶显示由于的暗态特性较差，但是其亮态反射率则比较高，光谱特性曲线在整个可见光谱范围内比较平滑。

由图 3.14 和图 3.15 所示，几种模式相比较，单纯使用液晶层相位延迟为四分之一波长的单偏振反射式非扭曲液晶显示的等对比度视角图形最好，暗态亮度视角图表明在较大方位角度范围内的漏光也较小。分析造成这种现象的原因，认为由于只采用一层四分之一波长液晶延迟层，与其它三种模式相比较，少了一层半波延迟层，相位延迟最小，因此在倾斜视角观察时，引起的相位延迟的偏差也最小，因此在一个较大的方位角度范围内拥有比较好的可视特性。而由于其他三种模式，由于采用了半波延迟膜进行补偿，虽然在一定程度上改善了暗态光谱特性，但是由于在倾斜角度入射的光线，不再满足 $(4\beta - 2\alpha) = \pm 90^\circ$ （半波补偿膜补偿反射式非扭曲液晶显示，如 3.14(b) 的情形），同时倾斜入射的光线也不再满足图 3.11 所示的位置角度关系下的参数结构；另外，多增加的半波延迟膜，在光线倾斜入射时，与正入射光线相比，增加了相位延迟的偏差程度，使得视角恶化。因此为了解决视角问题，已经有研究人员考虑用额外贴敷正性的 C 膜(Positive C Film)抵消这种影响，同时为了研究宽波带四分之一波长延迟膜的新的设计方法，研究人员将两片 A 片(A-Plate)中间夹一片 C 片(A-Plate)，或者三片 A 片交替叠加 C 片（即三片 A 片+2 片 C 片），经过严密的数学迭代求解，提取适合的各层膜的方位角度关系以及厚度，从而代替半波延迟膜或者四分之一波长延迟膜，按照本章上述的半波延迟膜和四分之一波长延迟膜(或聚合性液晶型等价四分之一波长延迟膜)角度关系，叠合成具有多个中心波长的宽波带四分之一波长延迟膜。这样既解决了视角狭窄的问题，同时可以保证拥有非常好的光谱特性曲线。

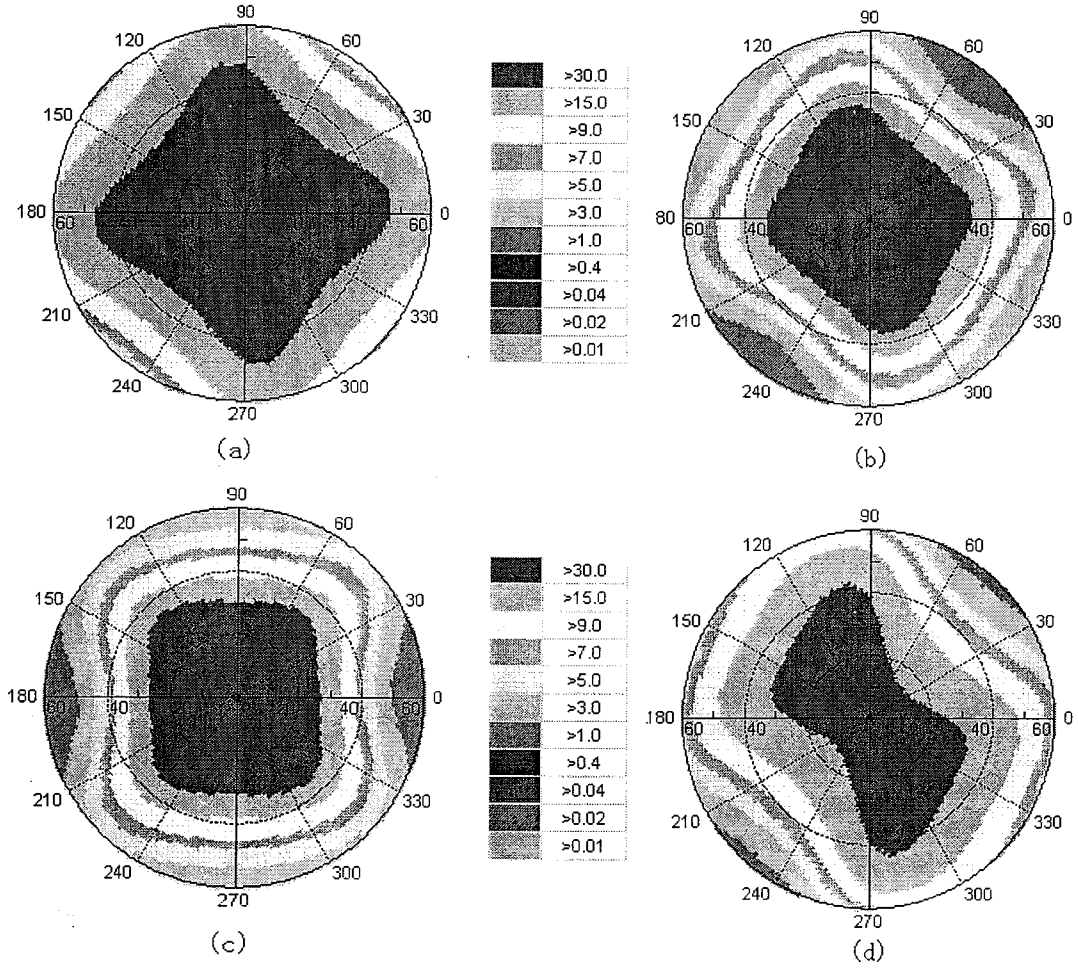


图 3.14 单偏振片向列相液晶显示等对比度视角图，参数设置为：(a) $\alpha=45^\circ$ ， $\phi=0^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.25$ ；(b) $\alpha=15^\circ$ ， $\beta=-60^\circ$ ， $\phi=0^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.25$ ；(c) $\alpha=55^\circ$ ， $\beta=40^\circ$ ， $\phi=-30.93^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.2673$ ；(d) $\alpha=-35^\circ$ ， $\beta=40^\circ$ ， $\phi=66.40^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.5739$

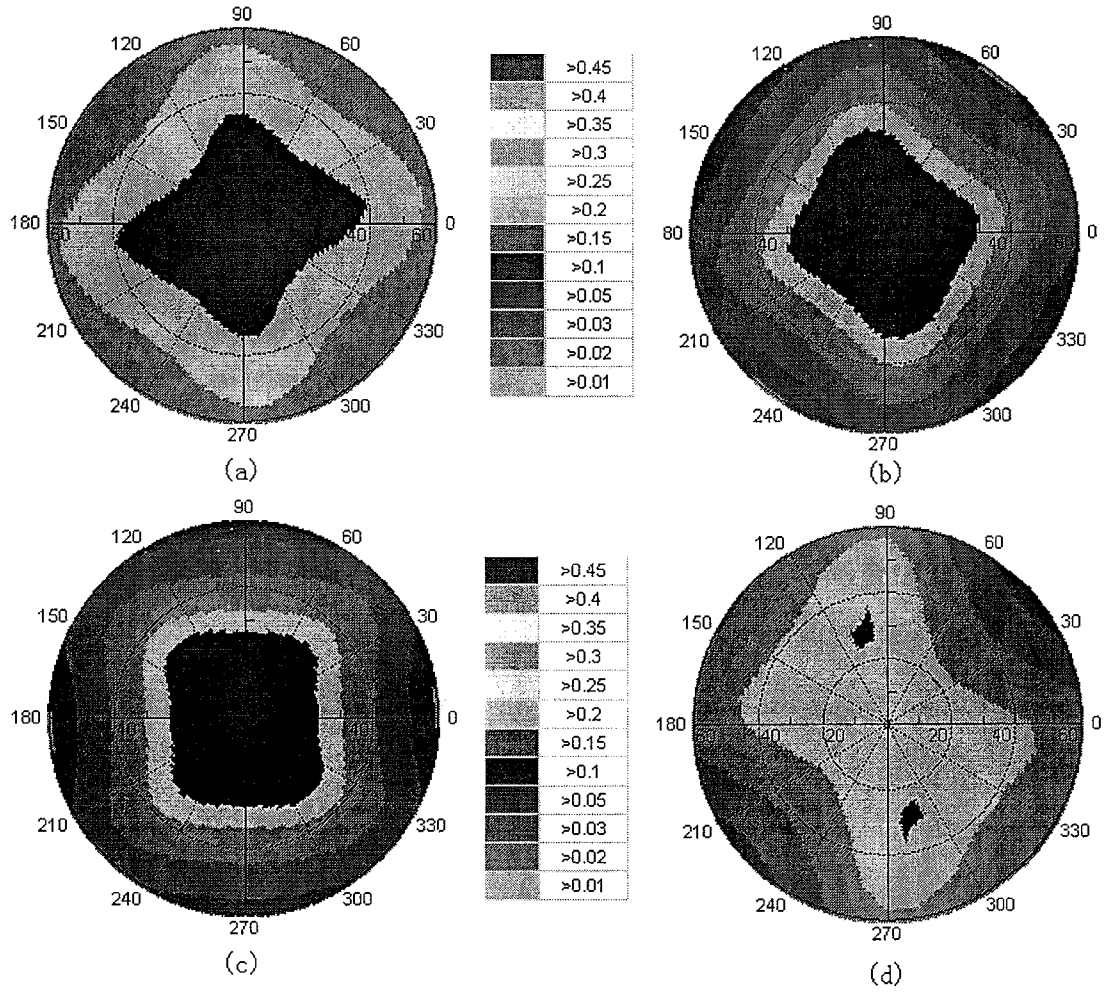


图 3.15 单偏振片向列相液晶显示暗态亮度视角图，参数设置为：(a) $\alpha=45^\circ$ ， $\phi=0^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.25$ ；(b) $\alpha=15^\circ$ ， $\beta=-60^\circ$ ， $\phi=0^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.25$ ；(c) $\alpha=55^\circ$ ， $\beta=40^\circ$ ， $\phi=-30.93^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.2673$ ；(d) $\alpha=-35^\circ$ ， $\beta=40^\circ$ ， $\phi=66.40^\circ$ ， $d_{LC}\Delta n/\lambda_0=0.5739$

§ 3.4 本章小结

本章从模拟计算的角度,设计了一种新型的液晶型圆偏振片,其结构依次为线性偏振片/1/2波长延迟膜/向列相聚合性液晶膜。得到了如下结论:

1. 根据Muller矩阵,推导了液晶型圆偏振片中各个光学元件的层叠角度与向列相聚合性液晶薄膜的扭曲角和相位延迟的关系:

$$\begin{cases} \frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\sqrt{\phi^2 \lambda_0^2 + (\pi d_{LC} \Delta n)^2}} \sin \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \tan(4\beta - 2\alpha) = -\frac{\sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2}}{\phi} \cot \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2} \end{cases}$$

其中偏振片透光方向和上基板液晶分子取向方向夹角为 α ,半波延迟膜的慢轴方向和上基板液晶分子取向方向的夹角为 β 。并且绘制了

$((4\beta - 2\alpha), \phi, d_{LC} \Delta n / \lambda_0)$ 三个参数间的数值关系图形。

2. 如果用扭曲或非扭曲的向列相液晶层代替向列相聚合性液晶薄膜,可以制作单偏振片半波补偿常黑模式反射式向列相液晶显示,考虑到薄膜材料和液晶的材料色散特性,对于非扭曲液晶层,需要满足条件 $4\beta - 2\alpha = \pm 90^\circ$,液晶层相位延迟为四分之一波长,得到四组最佳配置参数:

$$\begin{aligned} (a1). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = 75^\circ \\ \beta = 60^\circ \end{cases} & (a2). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = -75^\circ \\ \beta = -60^\circ \end{cases} \\ (b1). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = -15^\circ \\ \beta = 60^\circ \end{cases} & (b2). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = 15^\circ \\ \beta = -60^\circ \end{cases} \end{aligned}$$

若用1/4波长双折射拉伸聚碳酸酯薄膜材料代替向列相聚合性液晶薄膜,则线偏振片、1/2波长延迟膜及1/4波长延迟膜叠加构成的消色差圆偏振片的最佳参数配置同样为上述四组参数。

若液晶层扭曲时，计算得到了与液晶层参数 $(\phi, d_{LC}\Delta n/\lambda_0)$ 一一对应的

方位角度 α 和 β 。

3. 模拟了单纯使用液晶层相位延迟为四分之一波长的单偏振反射式非扭曲液晶显示，半波补偿液晶层相位延迟为四分之一波长的单偏振片反射式非扭曲液晶显示，以及半波补偿均匀扭曲反射式液晶显示的显示特性。模拟结果表明，所设计的液晶层和半波补偿膜相结合构成的宽波带四分之一波长延迟膜，可以明显的改善反射式液晶显示的暗态的光谱特性，这对于实现反射式液晶显示的高对比度和全彩色化非常重要。但是另外一方面，由于引入半波延迟膜，倾斜入射光线相比较正入射光线的光程差偏差加大，造成视角相对狭窄。因此，设计既具备宽波带特性，又具备广角化特性的四分之一波长延迟膜是今后研究工作亟需解决的问题。

第四章 消色差反射式手性垂直液晶显示

本章提出了一种新型的消色差反射式手性垂直液晶显示模式。运用上一章得到的半波延迟膜、四分之一波长延迟膜与线性偏振片以最佳方位角度层叠构成的宽波段圆偏振片对垂直排列的反射式液晶显示进行色差补偿。由于垂直排列液晶层开态的有效光程差为四分之一波长，因此液晶盒厚只有不到 $2\mu\text{m}$ ，制作工艺难以控制，同时开态的反射率受波长和电压影响较大，为了增加盒厚，掺入适合螺距的手性剂材料使得液晶盒厚增加，显示特性得到很好改善。

§ 4.1 反射式液晶显示器介绍

§ 4.1.1 为什么采用反射式液晶显示器

反射式液晶显示器^[72-78]因具有低功耗、重量轻、体积小、户外可读性好等优点而成为目前LCD研究的热点。直视型反射式显示器被认为是下一代最重要的显示器产品之一。液晶显示作为低压场效应被动显示，消耗在CMOS驱动电路和液晶屏本身的能量都很小。但由于亮度的原因，绝大多数大信息量LCD都使用背光源，消耗在背光源上的功耗要占整个模块的60%以上。另一方面，由于缺少高效白色面光源，LCD背光源通常采用冷阴极荧光灯和楔型光导等。光导本身比较厚重，其厚度约占整个模块的一半左右。作为便携式电子显示设备，还需要更加轻薄。为了降低便携式电子显示设备的功耗和体积，最有效的办法就是摆脱背光源，采用反射式显示。例如，在对角线为12英寸的LCD中，3W用于背光照明，2W用于驱动液晶屏。背光源功耗如此之高是因为只有不足10%的背光能穿过液晶屏。因此，使用没有背光源的系统可望降低60%的功耗，并可能实现高信息量的显示，从而扩大显示器的应用范围。除了低功耗以外，反射式显示器的另一个优点是其类似于纸张的外观。自发光显示器的亮度是固定不变的，并与周围的环境和照明条件无关。与之不同，反射式显示器的亮度总是取决于环境，因而更容易被眼睛接受，使阅读速度提高并降低眼睛的疲劳程度。类似纸张的显示器的关键特性是具有高分辨率，如黑白两级显示的分辨率为300dpi，反射率与纸张相近，对比度优于10:1。如果显示灰度的话，其像素密度可能降低，分辨率降为150dpi。

§ 4.1.2 反射式液晶显示模式的设计

常规反射式向列相液晶显示器实际上是透光的(transflective),在反射时,光束要两次透射过LCD。因此,它们采用两个偏振片,一个在前面,另一个在背面。这自然会引起亮度损失,而且还要增加材料耗费与生产成本。通常的扭曲向列相(TN)与超扭曲向列相(STN)LCD都属于这样的设计。从早年研究LCD以来,为取消背面的偏振片,设计结构更加简单,显示性能更加优秀,与现有工艺水平更加匹配的单偏振片反射式液晶显示器成为主流,目前已经尝试过各种各样的方案。但是,实用性并不好。最近,设计真正的反射式LCD的问题又被重新提了出来。将反射板装进液晶盒内的优点很多,包括消除视差,在AMLCD中有更高的有效像素密度,亮度更高,结构更薄与视角更宽。有三种设计反射式向列相LCD的方法:第一种设计只简单地包含一个前偏振片,一个液晶盒与一个背面反射板,后者可置于液晶盒内部或外部。这种设计最简单,但是,发现这样的显示器色散太大,而且所要求的盒厚太薄,以致不实用。为补偿强烈的色散,第二种设计是设置一层延迟薄膜于液晶盒与背面反射板之间。虽然这样可以制作出无色散的反射式显示器,但是这种设计不容许将反射板置于液晶盒内,从而失去了反射式显示器的突出优点。第三种设计是将延迟薄膜置于液晶盒的前面。这与第二种设计相比,是一个很大的改进。Fukuda等成功地分析并演示了这样的显示器。

如果按照液晶层的排列方式分类,反射式向列型液晶显示可分为扭曲向列型和非扭曲向列型,两者均得到了广泛的研究。前者以混合扭曲向列模式(Mixed Twisted-Nematic mode, 简称MTN模式)^[79, 80]为代表,它具有较好的显示品质,如高对比度、低色散、低电压等等,但其光利用率没有达到最大值,导致光利用率略低;后者以反射式混合排列模式(Reflective Hybrid Aligned Nematic mode, 简称R-HAN模式)^[81]和反射式光学补偿弯曲模式(Reflective Optically Compensated Bend mode, 简称R-OCB模式)^[82, 83]为代表,他们具有宽视角,快速响应速度、高亮度和高对比度等优点,但是由于双折射效应的影响,其反射率的波长依赖性(也称为反射率的色散)有点偏大,因而在反射式直视型全彩色液晶显示中存在困难,并且R-OCB模式采用常黑显示模式,其暗态对盒厚的波动非常敏感,因此不利于大面积均匀显示。

§ 4.2 VA显示模式的特点

垂直(Vertical Alignment, 简称VA, 也称为Homeotropic Alignment)^[84-88]显示模式已经在反射式投影显示^[89-91]和透射式直视型液晶显示^[92-94]中得到广泛的应用。VA模式最大的优势在于工作在两个正交偏振片之间时,可以得到极其完善的黑态,是目前所有液晶模式中对比度最高的,但是同时对比度相对于波长和温度的敏感性也非常大。除了对比度之外,VA模式的另外一个优点在于相比较平行排列模式(Homogeneous Alignment mode)或TN模式拥有更快的响应速度。弹性

常数和盒厚是影响VA模式响应速度的两个重要因素。对于透射式显示模式, 为了获得半波长光程差, 平行定向排列的液晶盒和垂直定向排列的液晶盒拥有相同的 $d\Delta n$, 也就是 $d\Delta n = \lambda/2$ 。然而对于 90° TN模式, $d\Delta n = 0.866\lambda$ 。另外一方面, 决定平行排列、扭曲排列和垂直排列液晶盒的弹性常数分别为展曲弹性常数 (K_{11})、扭曲弹性常数 (K_{22}) 和弯曲弹性常数 (K_{33}), 对于绝大多数液晶材料而言,

$K_{33} > K_{11} > K_{22}$ 。液晶层的响应时间与 $\gamma_1^2 d^2 / K^2 \pi^2$ 成正比, 其中 γ_1 表示转动粘滞系数, K 为相对应的弹性常数, 因此VA模式是三种模式中响应速度最快, 对比度最高的一种模式。

VA模式所采用的液晶材料要求具有高电阻率和电负性。高电阻率是为了避免TFT-LCD显示器件出现画面闪烁问题。而负的 $\Delta\epsilon$ 是为了使得施加驱动电压时液晶分子长轴方向转向与电场强度方向垂直的方向, 从而平行基板排列, 使显示为暗态。为了获得负性液晶材料, 要求其极性基团, 特别是含氟基团应该分布在侧链上, 但是极性基团分布在侧链上相比较分布在主链上使得粘滞系数增大, 因此负性液晶材料的选取比正性液晶材料的选取要相对比较困难。

§ 4.3 消色差反射式手性垂直排列液晶显示模式

垂直排列液晶盒工作在两个正交偏振片之间, 可以得到极其完善的黑态、很高的对比度。目前, 已经在小尺寸反射式投影显示和大尺寸透射式直视型液晶显示中得到广泛的应用。但是在反射式直视型液晶便携显示中很少应用, 这是由于垂直排列的液晶分子在反射式显示中相当于工作于两个平行偏振片之间, 显示为亮态, 垂直排列的优势荡然无存。虽然可以通过四分之一波长延迟膜使亮暗态反转, 但是补偿后开态和暗态色散严重。消色差四分之一波长延迟膜 (Polarizer + $\lambda/2$ film + $\lambda/4$ film) 可以消除亮态和暗态色散, 但是其开态透过率受光波长和驱动电压的影响较大。另外, 液晶层光程差只有四分之一波长, 导致盒厚不到 $2\mu m$, 工艺上很难精确控制。

为了降低透过率对波长和电压的依赖性, 适当增加VA模式液晶盒盒厚, 需要广泛地研究手性垂直排列的液晶盒^[95-101]。这种结构也称作逆扭曲向列式液晶盒, 一方面保持了一般垂直排列液晶盒高对比度的特点, 又同 90° 扭曲向列模式一样, 大大降低了开态时透射率或反射率对电压的依赖性。它适用于透射和反射两种显示模式。本文在消色差四分之一延迟膜补偿的基础上, 提出了一种新型的消色差反射式手性垂直液晶显示模式。在垂直排列的液晶分子中掺入手性剂材料来控制螺距 P 和盒厚 d 之比, 使液晶层扭曲适当的角度。扩展琼斯矩阵方法模拟计算电光特性曲线, 光谱响应曲线以及视角图形, 表明掺入手性剂可以有效增大液晶盒厚, 消除开态电压对反射率的影响, 得到理想的光谱响应曲线和视角图形。

§ 4.3.1 宽波带消色差四分之一波长延迟膜

反射式垂直排列液晶显示由于为非扭曲显示,相比较 90° TN扭曲向列相液晶层色散较大。因而需要配合补偿膜补偿色散。在上一章基于严格的解析分析,我们知道利用半波补偿膜补偿非扭曲反射式液晶显示可以同时消除暗态和亮态的色散。假如半波补偿膜和偏振片透光轴夹角为 α ,则当液晶层有效相位延迟为 $\pi/2$,指向矢分子长轴与偏振片透光轴夹角为 $45^\circ + 2\alpha$ 时,可以实现常黑显示。研究表明,当 $\alpha=15^\circ$ 时,对暗态和亮态的色散补偿最明显,能最大限度的改善反射光谱响应。由于这里液晶分子初始排列为垂直排列,没有相位延迟,因此可以在半波延迟膜和液晶层之间插入四分之一波长延迟膜,如图1所示,其慢轴方向与偏振片透光轴方向的夹角为 75° ,与半波延迟膜构成宽波段消色差四分之一波长补偿膜。

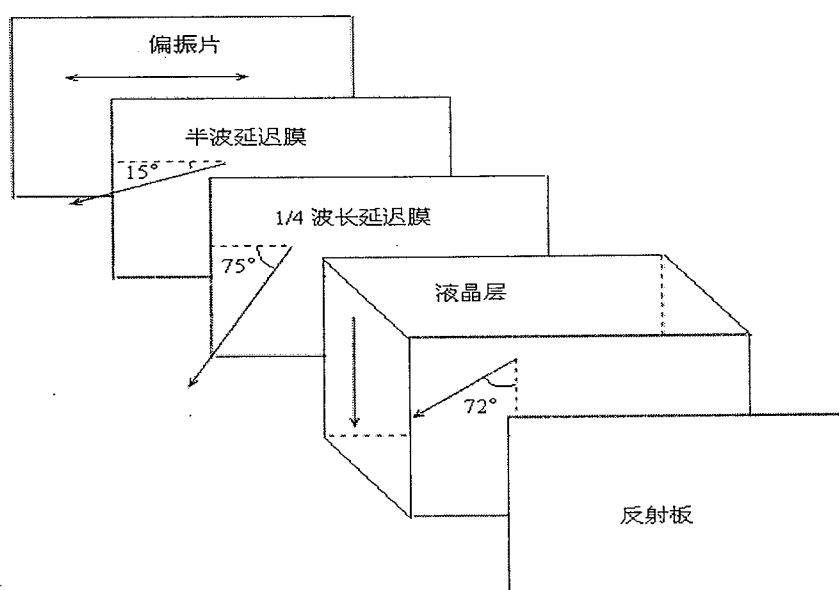


图 4.1 反射式手性垂直排列液晶显示模式结构示意图

§ 4.3.2 无手性剂反射式VA模式

如果不掺手性剂材料,用扩展琼斯矩阵方法^[102, 103]模拟了盒厚分别为 $2\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$ 的反射式垂直排列液晶显示的电光特性及光谱响应曲线。采用一种适于有源矩阵的Merck液晶混合物,其电压保持率高达97%。它的主要物理参数如下:

$n_e=1.556$; $\Delta n=0.080$ ($\lambda=589\text{ nm}$, 20°C); $\varepsilon=3.6$; $\Delta\varepsilon=-4.0$; $K_{11}=15.8\text{pN}$;

$K_{22}=6.0\text{pN}$; $K_{33}=17.9\text{pN}$ 。以 550nm 为中心波长来设计, 半波延迟膜和四分之一

波长延迟膜的光程差分别为 275nm 和 137.5nm 。液晶盒厚设定为 $2\mu\text{m}$

($2\pi d\Delta n/\lambda=48\pi/55>\pi/2$), 是因为在开态施加电压时, 由于上下基板界面的锚定作用, 液晶分子不能完全躺下, 在某一合适电压下, 其有效相位延迟达到 $\pi/2$, 等效于一个四分之一波片, 其摩擦方向选择任意方向, 这是因为入射到液晶层上的光为圆偏振光, 无论液晶分子长轴如何取向, 只要相位延迟为 $\pi/2$, 到达反射板的光均为线偏振光, 显示为亮态。

如果增加液晶盒厚至 $3\mu\text{m}$, 电光特性曲线如图 4.2 所示, 到达最高反射率之后, 随电压增加又降低, 这是因为达到最高反射率时液晶分子有效相位延迟为 $\pi/2$, 继续增加电压, 有效相位延迟继续增大, 导致反射率又降低。为了避免电压对开态反射率的影响, 同时兼顾盒厚取一稍大的值。可以考虑增大开态液晶层的扭曲角, 因此对于参入手性剂材料的垂直取向液晶层的研究非常具有价值。

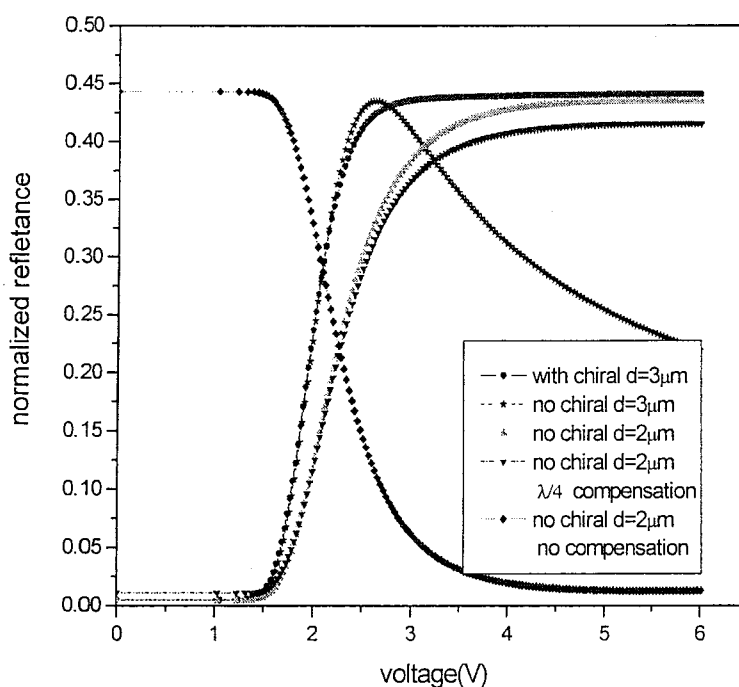


图 4.2 反射式垂直排列液晶显示的反射率电压依赖特性

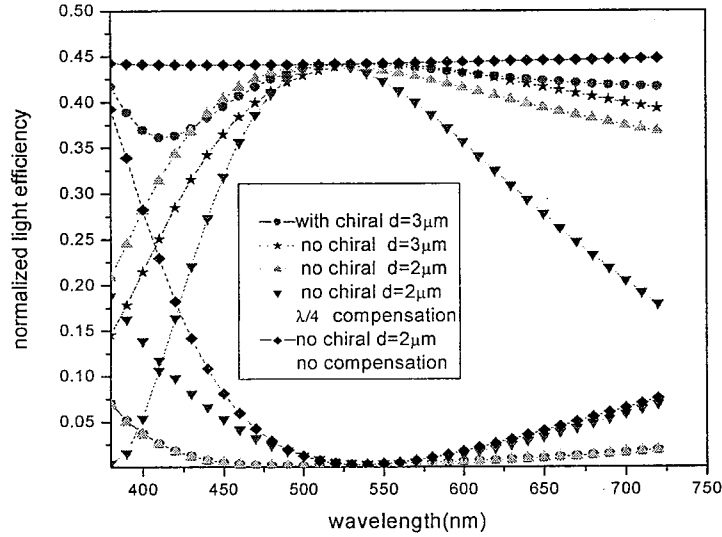


图 4.3 反射式垂直排列液晶显示的反射率波长依赖特性

§ 4.3.3 掺手性剂反射式VA模式

那么在液晶材料物理特性和盒厚取值固定的情况下，首先需要解决的问题是究竟怎样选择手性剂材料的螺距，垂直排列液晶层产生多大的扭曲角才能使得开态反射率最大。因为开态反射率最大值对应于反射板处光波的偏振态为线偏振，而入射到液晶层的光波偏振态为圆偏振。根据均匀扭曲向列液晶层的线偏振光入射转换为圆偏振光的条件：

$$\frac{\delta}{\beta} \sin \beta = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.1)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\beta}{\phi} \cot \beta \quad (4.2)$$

其中， $\beta = \sqrt{\delta^2 + \phi^2}$ ， $\delta = \pi d \Delta n / \lambda$ ， α 为反射板处的线偏振光的偏振方向与靠近反射板处的液晶分子指向矢方向的夹角， ϕ 为液晶层扭曲角。因此在盒厚

为 $3\mu\text{m}$ 时, $\delta=1.37$, 代入公式 (4.1), 得到液晶层扭曲角为 $\phi=72^\circ$, $\alpha=12^\circ$,

因此, 需要掺入的手性剂材料的螺距为 $p=d \cdot 2\pi/\phi=15\mu\text{m}$ 。也就是说掺入螺距

为 $15\mu\text{m}$ 的手性剂材料, 扭曲角为 72° , 盒厚为 $3\mu\text{m}$ 的垂直排列液晶层在开态时等效于一个四分之一波片, 可以将入射的圆偏振光转化为反射板处的线偏振光, 从而达到反射率最大值。

虽然参入液晶分子的手性剂材料的螺距确定下来了, 但是为了不至于在施加电压时, 液晶分子倒下的动作产生紊乱, 还需要摩擦上下基板, 做取向处理, 上下基板的摩擦方向的夹角为 $2\pi \cdot d/p$ 。另外还存在液晶层在反射式VA器件的放置方位问题。因为入射到液晶层上的光波偏振态为圆偏振光, 在反射板处光波偏振态为线偏振光, 液晶层等效于一个四分之一波片, 无论液晶层的方位如何变化, 对于中心波长为 550nm 的正入射线偏振光, 反射率都可以达到一样的最大值。唯一改变的地方在于液晶层方位角的变化会对开态反射率光谱特性产生一定影响。也就是说开态反射率光谱决定于线性的半波延迟膜, 四分之一波长延迟膜光轴的方位角度和扭曲向列相液晶层 (等价于四分之一波长延迟膜) 的液晶分子取向, 而前两个的方位角已经确定, 因此反射率光谱特性决定于液晶层的液晶分子的排列取向状态。模拟发现, 液晶层方位角对反射率光谱的影响较小, 在取某些特定值时光谱特性稍好。比如液晶层的等效四分之一波片的慢轴方向和四分之一波长延迟膜的慢轴方向平行或垂直时, 光谱特性最好。若平行, 则叠加的结果相当于一个半波片, 如图1所示, 此时上基板液晶分子长轴与偏振片透光轴的夹角为 $75^\circ + (72^\circ - 12^\circ - 45^\circ) = 90^\circ$, 下基板液晶分子长轴与偏振片透光轴的夹角为 $(90^\circ - 72^\circ) = 18^\circ$ 。图2与图3模拟的均为此种状态下的光谱特性和电光特性。

§ 4.3.4 电光特性与视角特性比较

如图2与图3所示, 与传统的无补偿常白型反射式VA模式, 四分之一波长延迟膜补偿的常黑型反射式VA模式, 以及用宽带消色差四分之一波长延迟膜补偿的无手性剂材料的盒厚分别为 $2\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$ 的反射式VA模式作比较, 发现参入手性剂材料后光谱特性和电光曲线特性都得到了很好的改善, 宽带消色差四分之一波长延迟膜补偿的三种模式暗态光谱曲线一致, 参入手性剂材料的亮态光谱曲线更好。盒厚增大到 $3\mu\text{m}$ 时, 驱动电压相对于 $2\mu\text{m}$ 盒厚的反射式VA模式进一步降低, 开态电压对反射率没有影响, 有效的增大了液晶盒盒厚, 便于生产中的精确控制。从图4的视角特性可以看出, 传统的无补偿反射式VA模式由于采用常白显示对比

度最低，中心对比度只有36:1。四分之一波长延迟膜补偿的反射式VA模式对比度稍差，中心对比度为64:1。用宽带消色差四分之一波长延迟膜补偿的三种反射式VA模式的视角特性基本保持一致，相比较前两种模式，中心对比度均达到88:1以上。而且视角范围更宽。

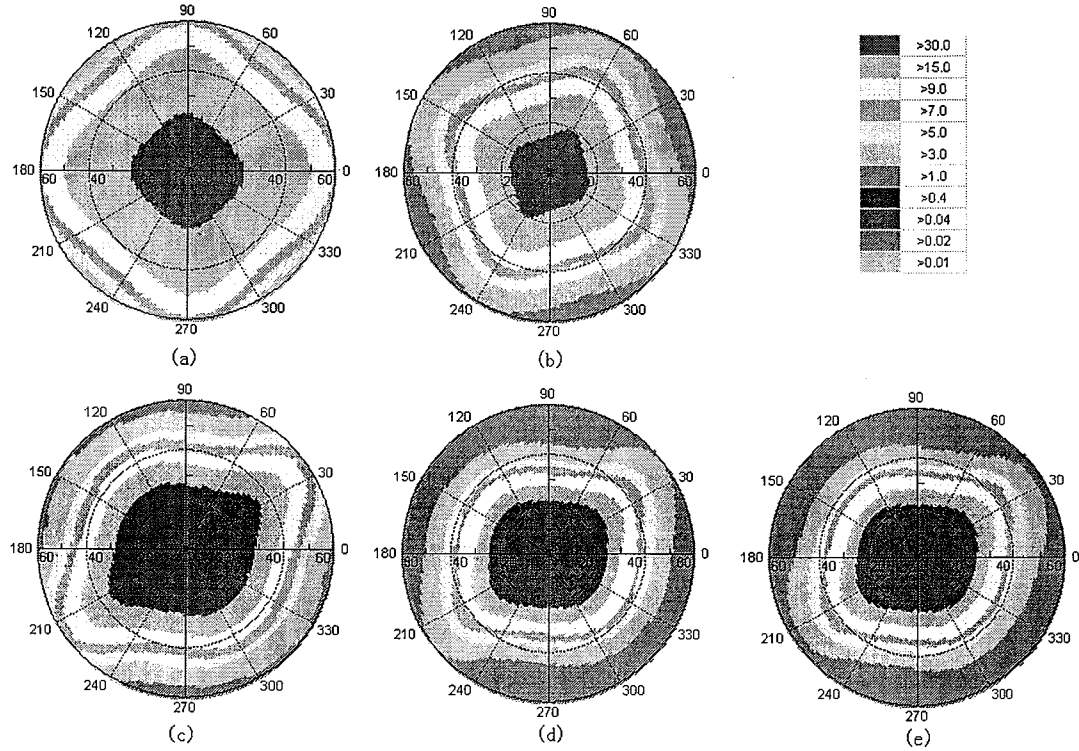


图 4.4 入射波长为 550nm 时，反射式垂直排列液晶显示的等对比度视角依赖特性图形 (a) 传统无补偿常白型反射式 VA 模式；(b) 四分之一波长延迟膜补偿反射式 VA 模式；(c) 宽带消色差四分之一波长延迟膜补偿的 $2\mu\text{m}$ 反射式 VA 模式；(d) 宽带消色差四分之一波长延迟膜补偿的 $3\mu\text{m}$ 反射式 VA 模式；(e) 宽带消色差四分之一波长延迟膜补偿的 $3\mu\text{m}$ 反射式手性 VA 模式

§ 4.4 本章小结

本章提出了一种新型消色差反射式手性垂直排列液晶显示模式，此种模式的设计具备以下几个方面的优点：

1. 采用半波延迟膜与四分之一波长延迟膜叠加构成的消色差四分之一波长延迟膜进行补偿，使反射式VA显示的亮暗态翻转，因此VA模式常黑模式下对比度高的特点得到很好的发挥，同时使得暗态光谱特性比单纯使用四分之一波长延迟膜补偿的效果更佳。
2. 掺入手性剂材料，有效地消除了开态电压对反射率和波长的影响，增加了液晶盒盒厚，解决了反射式VA显示盒厚过薄，不易控制的缺点，使工艺制作能够精确控制。
3. 在液晶材料和液晶盒厚确定的情况下，需要精确的选择手性材料的螺距，根据线偏振光经过均匀扭曲的液晶层，出射光为线偏振的条件，可以计算开态时液晶层的扭曲角，从而确定所选用手性剂材料的螺距。

第五章 单倍盒厚间距透反式液晶显示模式

为了同时获得具有高透射率和反射率的液晶显示器，人们开发了透反式液晶显示模式。为了克服传统的双倍盒厚间距透反式液晶显示模式的种种缺陷，又开发了单倍盒厚间距透反式液晶显示模式。本章提出了两种单倍盒厚间距透反式液晶显示模式：一种是采用平行排列模式与混合排列模式相搭配；另外一种采用了垂直排列模式与混合排列模式相搭配。两种模式的共同点在于，都是利用了光线两次通过混合排列液晶层所在的反射区的光程差，与光线一次性穿过关态的平行排列模式或开态的垂直排列模式所在的透射区的光程差相等的原理，从而实现反射区和透射区同时实现亮暗显示的。同时利用第三章提出的圆偏光补偿膜结构对反射区液晶层进行补偿，可以实现宽光谱响应。最后用扩展琼斯矩阵模拟两种模式的电光曲线，对比度视角依赖特性，模拟结果表明，两种工作模式均可实现宽光谱响应，透射与反射电光响应曲线基本趋于一致，在 60° 方位角度范围内具有很好的可视特性，无灰度反转。非常适宜便携式直视型液晶显示的全彩色化。

§ 5.1 透反式液晶显示的特点及发展

近几年来，便携式液晶显示设备如手机，MP4和PDA等得到广泛的应用。这些设备要求无论是在明亮的室外环境下还是在相对较暗的室内环境下的可读性都能相对较高。然而透射式液晶显示使用背光源照明，虽然在室内相对较暗的环境下对比度高，但在室外明亮环境下的可读性变差。反射式液晶显示利用外部光源照明，在明亮环境下具有很好可读性，但是在室内较暗的环境下亮度不够，同时对比度也偏低。透反式液晶显示^[104-130]综合了透射式和反射式液晶显示的优点，既有背光照明，又可利用环境光，具有很好的可读性，因而在便携显示设备中得到广泛的应用。过去报道了很多种透反式液晶显示模式。使用单纯一种液晶分子排列模式的单倍盒厚间距的透反式液晶显示，如垂直电场驱动的平行排列（Homogenous Alignment）的电控双折射模式（ECB Mode）和垂直排列模式（Vertical Alignment Mode），水平电场驱动的边缘场模式（Fringe Field Switching Mode），都可以通过薄膜补偿以及采用双电路对透射区和反射区分别驱动而实现透反式显示。但是使用双电路驱动既增加了制作成本又增加了能耗。另外对于ECB模式和VA模式也可以通过制作双倍盒厚间距实现透反式显示。通常反射区的盒厚是透射区的一半，因为只有反射区的光程差为四分之一波长，透射区的光程差为半波长时才能达到最佳配置。但是这种模式的缺点比较显著，相比较单倍

盒厚间距透反式显示制作工艺复杂，盒厚均匀性控制困难，同时由于透射区域和反射区域交界处因盒厚不同会使液晶分子产生畸变引起旋转位错，造成常黑显示模式暗态漏光严重，而亮态画面的均匀性变差。

为了解决以上模式的缺点，本章提出了两种单倍盒厚间距透反式液晶显示模式：一种是采用平行排列模式与混合排列模式相搭配；另外一种采用了垂直排列模式与混合排列模式相搭配。两种模式的共同点在于，都是利用了光线两次通过混合排列液晶层所在的反射区的光程差与光线一次性穿过关态的平行排列模式或开态的垂直排列模式所在的透射区的光程差相等的原理，从而实现反射区和透射区同时实现亮暗显示。同时利用第三章提出的圆偏光补偿膜结构对反射区液晶层进行补偿，可以实现宽光谱响应。最后用扩展琼斯矩阵模拟了两种模式的电光曲线，对比度视角依赖特性。

§ 5.2 ECB/HAN透反式液晶显示

图5.1所示为液晶分子指向矢在ECB/HAN透反式液晶盒中的分布图形。在反射区域液晶分子为混合排列，而在透射区域为平行排列。下基板液晶分子在透射区和反射区均为平行排列，而在上基板的透射区为平行排列，在反射区为垂直排列。制作工艺上可以将上下基板涂敷一层平行取向的PI膜，下基板可以通过一道平行摩擦工艺实现平行取向。而在上基板处先用保护层覆盖透射区，在反射区涂敷垂直取向PI膜，而后去掉透射区的保护层，反平行摩擦上基板（与下基板摩擦方向相反）；或者先摩擦涂有平行取向膜的整个上基板，然后用保护层覆盖透射区，用离子倾斜蒸镀法使反射区垂直取向，而后去掉透射区的保护层。

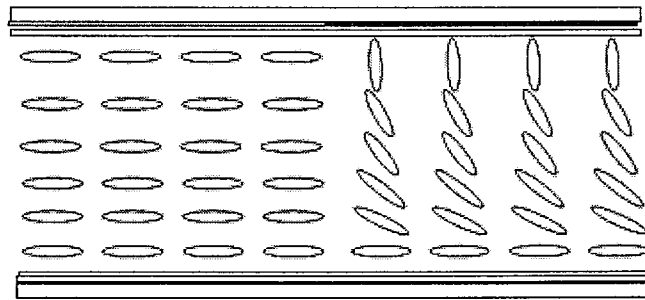


图 5.1 平行-混合排列透反式液晶显示中液晶分子指向矢排列图形

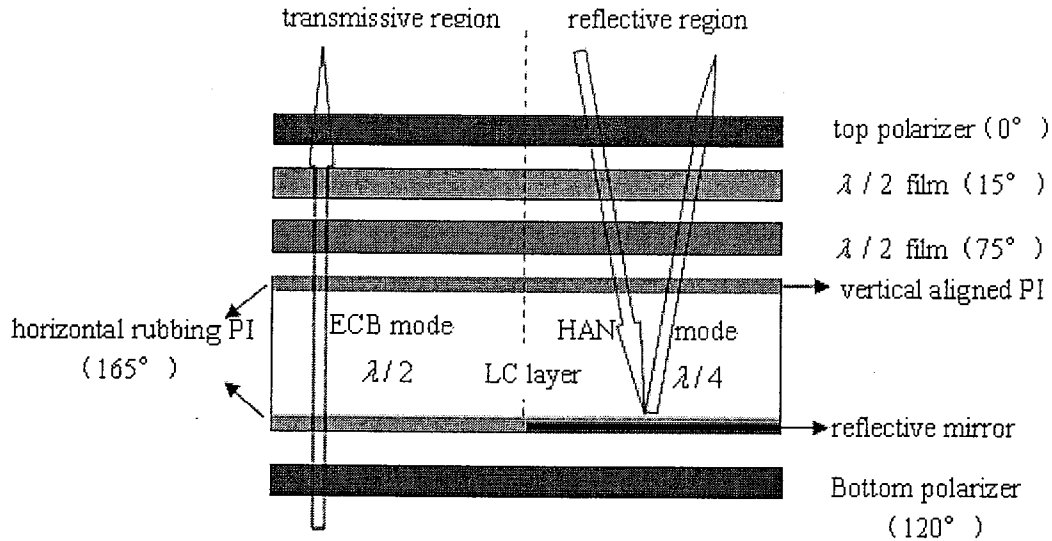


图 5.2 常黑显示 ECB/HAN 模式透反式液晶显示光学部件结构示意图

由于采用非扭曲液晶层设计, 相比较扭曲向列相液晶层色散较大。因而需要配合补偿膜补偿色散。在第三章的研究表明, 对于偏振片-半波补偿膜-非扭曲向列相液晶层-反射板结构的反射式液晶显示而言, 利用半波补偿膜补偿非扭曲反射式液晶显示可以同时消除暗态和亮态的色散。假如半波补偿膜和偏振片透光轴夹角为 α , 则当液晶层有效相位延迟为 $\pi/2$, 指向矢分子长轴与偏振片透光轴夹角为 $45^\circ + 2\alpha$ 时, 可实现常黑显示。当 $\alpha = 15^\circ$ 时, 对暗态和亮态的色散补偿最明显, 能最大限度的改善反射光谱响应。根据这个原理, 设计了常黑及常白显示 ECB/HAN 透反式液晶显示。

§ 5.2.1 常黑模式 ECB/HAN 透反式液晶显示

常黑 ECB/HAN 透反式液晶显示模式结构如图 5.2 所示。工作原理可以用邦加球来描述。偏振光的偏振态可以用邦加球球面上的点来表示, 赤道上的点代表线偏振光, 北极点代表右旋圆偏振光, 南极点代表左旋圆偏振光, 球面上其它的点代表椭圆偏振光。反射区实现亮暗显示的原理为: 环境光正入射到透光轴方向为 $\theta_p = 0^\circ$ 的偏振片, 出射光为一线偏振光, 如图 5.3(a) 所示, 在邦加球上用赤道上的点 A 表示。然后经过慢轴方向为 $\theta_{p1} = 15^\circ$ 的半波补偿膜, 用 OP 轴表示, 与 OA 的夹角为 30° , 这时线偏振光绕 OP 轴从 A 点顺时针旋转 180° 到赤道上的 B 点, B 点代表与偏振片透光轴夹角为 30° 的线偏振光, OB 与 OA 的夹角为 60° 。再经过互相

垂直的半波补偿膜与混合排列的液晶层，半波补偿膜慢轴方向为 $\theta_{F2}=75^\circ$ ，用 OQ 轴表示，与 OA 的夹角为 150° ，液晶层光程差为 $\lambda_0/4$ ，分子长轴排列方向为 $\theta_{LC}=165^\circ$ ，快轴为 OQ 轴，它们叠加在效果上相当于光程差为 $\lambda_0/4$ 的四分之一波长补偿膜，其慢轴与半波补偿膜慢轴的方向一致。这时线偏振光从 B 点绕 OQ 轴顺时针旋转 90° 到邦加球的顶点 N ，此时到达反射板时的光波偏振态为右旋圆偏振光。反射时由于发生半波损失，旋向发生改变，右旋圆偏振光变为左旋圆偏振光，用 S 点表示，经过液晶层和半波延迟膜偏振态绕 OQ 轴逆时针旋转 90° 到点 C ，经过最上层的半波延膜，绕 OB 逆时针旋转 180° 到点 D ，点 D 为偏振片吸收轴所在位置，因此光线被吸收，显示为暗态。当反射区驱动电压超过阈值电压，液晶分子开始逐渐站立起来，到达饱和电压时，液晶分子基本上完全站立，此时液晶层光程差几乎为零，如图 5.3(c) 所示，其光线传播路径为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ ，最终从上偏振片完全透射，反射区显示为亮态。

透射区显示暗态的原理为：如图 5. (b) 所示，由于液晶层与其相邻的半波延迟膜相位相同，并且方向垂直，因此叠加之后光程差为 0。由光线传播可逆原理，假设入射光由上偏振片入射，经下偏振片出射，则光线传播路径为经过上偏振片，光线偏振态用邦加球上的点 A 表示，经过慢轴方向为 $\theta_{F1}=15^\circ$ 的半波补偿膜，绕 OP 轴从 A 点顺时针旋转 180° 到赤道上的 B 点，再经过慢轴方向为 $\theta_{F2}=75^\circ$ 的半波补偿膜和液晶层，光线偏振态没有任何变化，因此到达下偏振片时，在邦加球上的位置仍为点 B ，下偏振片的透光轴与上偏振片的透光轴的夹角为 120° ，因此其吸收轴在邦加球中的位置也为点 B ，因此光线被下偏振片吸收，显示为暗态。当施加驱动电压至饱和时，液晶光程差基本为 0，如图 5.3(d) 所示，光线传播路径为 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ； C 点正好是下层偏振片透光轴所在位置，因此从下偏振片偏完全透射，显示为亮态。

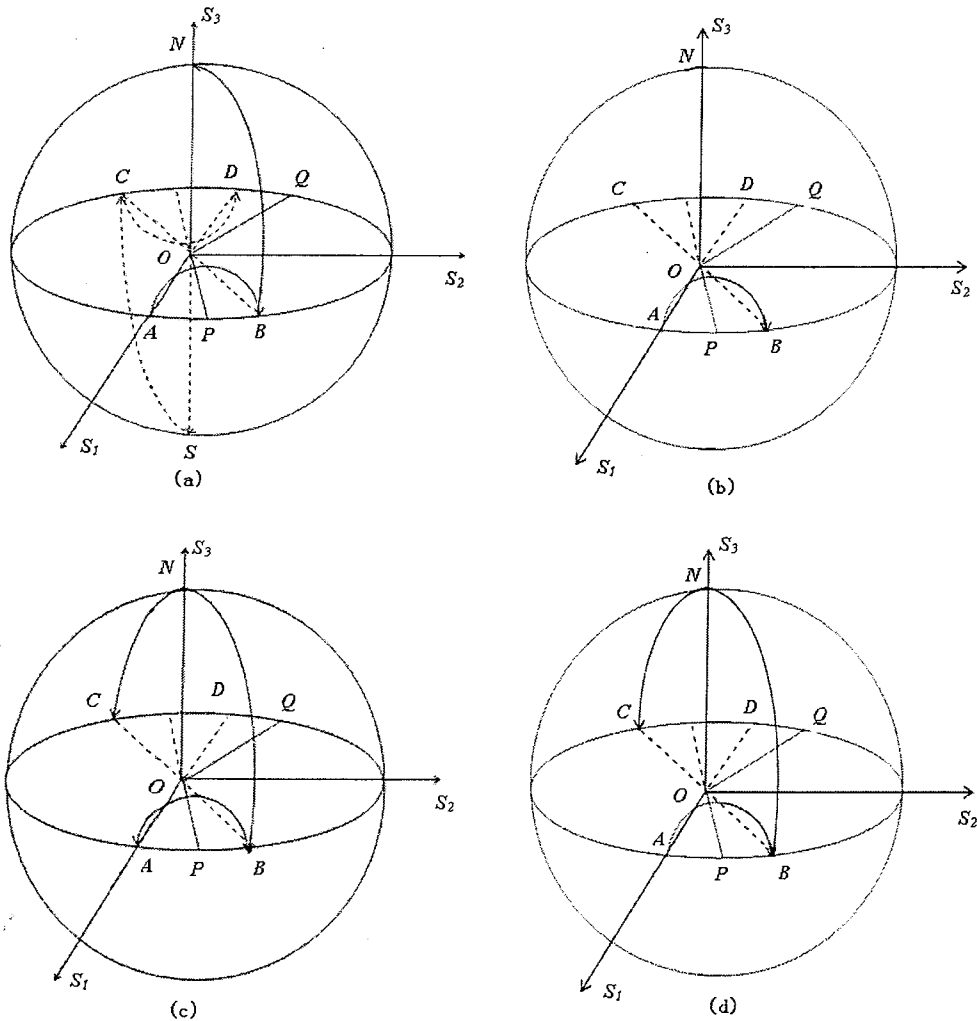


图 5.3 常黑模式透反式液晶显示中反射区：(a) 暗态显示，(c) 亮态显示；
透射区：(b) 暗态显示，(d) 亮态显示的偏振态路径变化的邦加球描述

§ 5.2.2 常白模式 ECB/HAN 透反式液晶显示

由于常黑显示模式在暗态时，反射区和透射区分别为混合排列和平行排列，盒厚的细微变化将导致液晶光程差偏离设定值，从而导致反射率和透射率的剧烈波动，降低对比度。由于盒厚误差是 LCD 工艺中非常普遍的现象，属于固有误差，对显示性能的影响不可避免。为了降低暗态盒厚误差的敏感性对对比度的影响。我们设计了常白显示模式，结构如图 5.4 所示，随着电压增加，当液晶分子逐渐垂直于玻璃基板，此时盒厚的变化对液晶层整体光程差的影响较小，因此暗态的盒厚误差敏感性得到降低。

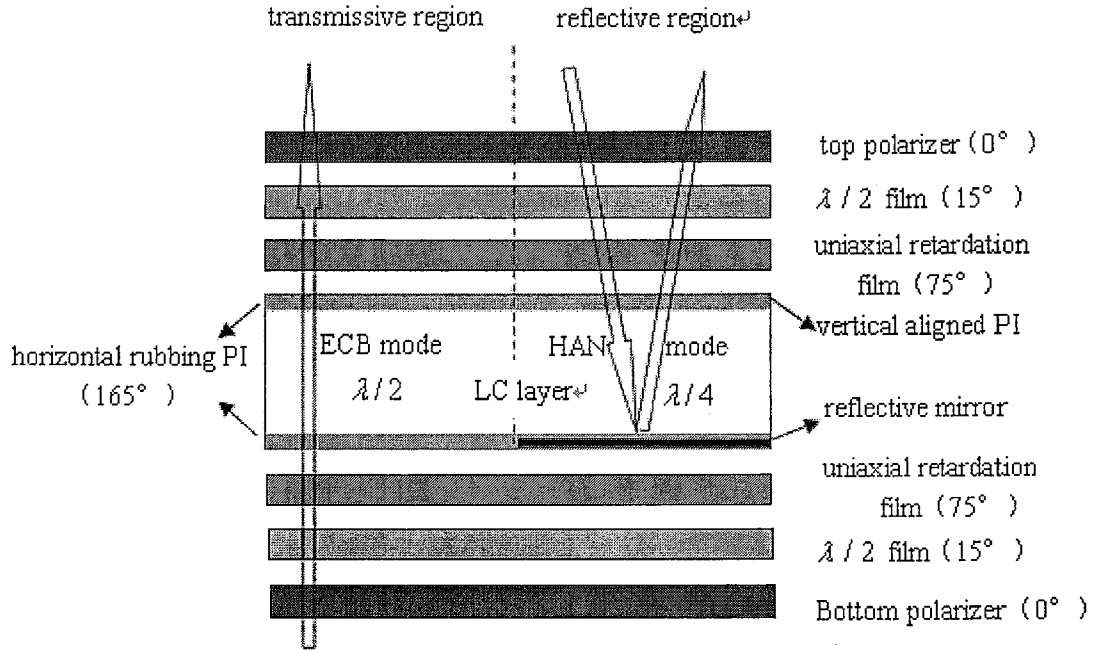


图 5.4 常白显示 ECB/HAN 模式透反式液晶显示光学部件结构示意图

常白显示模式相对于常黑显示模式只是将与液晶层相邻的两个半波延迟膜换作四分之一波长延迟膜。其他光学部件结构不变。但是实际上，因为基板界面的锚定作用，即使施加很高的电压，在界面处的液晶分子也不可能完全站立，光程差并不能为 0，因此为了降低驱动电压，同时降低开态反射率和透射率，提高对比度，须满足以下两个条件：（1）反射区液晶层和单轴延迟膜在不加驱动电压的时候的光程差相等，从而关态反射率为 1。（2）随着驱动电压升高，液晶光程差减小，在某一电压下，反射区液晶光程差刚好比单轴补偿膜的光程差小 $\lambda_0/4$ ，

此时开态反射率为 0。于是有 $\delta_{UF} - \delta_{R-LC}(V_{off}) = 0$ ， $\delta_{UF} - \delta_{R-LC}(V_{on}) = \lambda_0/4$ ，对于透

射区须满足 $2\delta_{UF} - \delta_{T-LC}(V_{off}) = 0$ ， $2\delta_{UF} - \delta_{T-LC}(V_{on}) = \lambda_0/2$ 。因此有

$\delta_{UF} = \delta_{R-LC}(V_{off}) > \lambda_0/4$ ， $2\delta_{UF} = \delta_{T-LC}(V_{off}) > \lambda_0/2$ ，其中 δ_{UF} 代表单轴补偿膜的光

程差， $\delta_{R-LC}(V_{off})$ 和 $\delta_{R-LC}(V_{on})$ 分别代表关态和开态反射区液晶的光程差，

$\delta_{T-LC}(V_{off})$ 和 $\delta_{T-LC}(V_{on})$ 分别代表关态和开态透射区液晶的光程差。图 5.5 所示为

常白透反显示模式的正入射光线传播时偏振态变化在邦加球上的路径表示。其中 5(a) 和 5(c) 分别表示反射区关态和开态时实现亮态和暗态的偏振态变化路径，分

别为 $A \rightarrow B \rightarrow N \rightarrow B \rightarrow A$ 和 $A \rightarrow B \rightarrow N \rightarrow S \rightarrow C \rightarrow D$ 。5(b)和5(d)分别表示透射区关态和开态时实现亮态和暗态的偏振态变化路径,分别为 $A \rightarrow B \rightarrow N \rightarrow S \rightarrow B \rightarrow A$ 和 $A \rightarrow B \rightarrow N \rightarrow C \rightarrow D$ 。

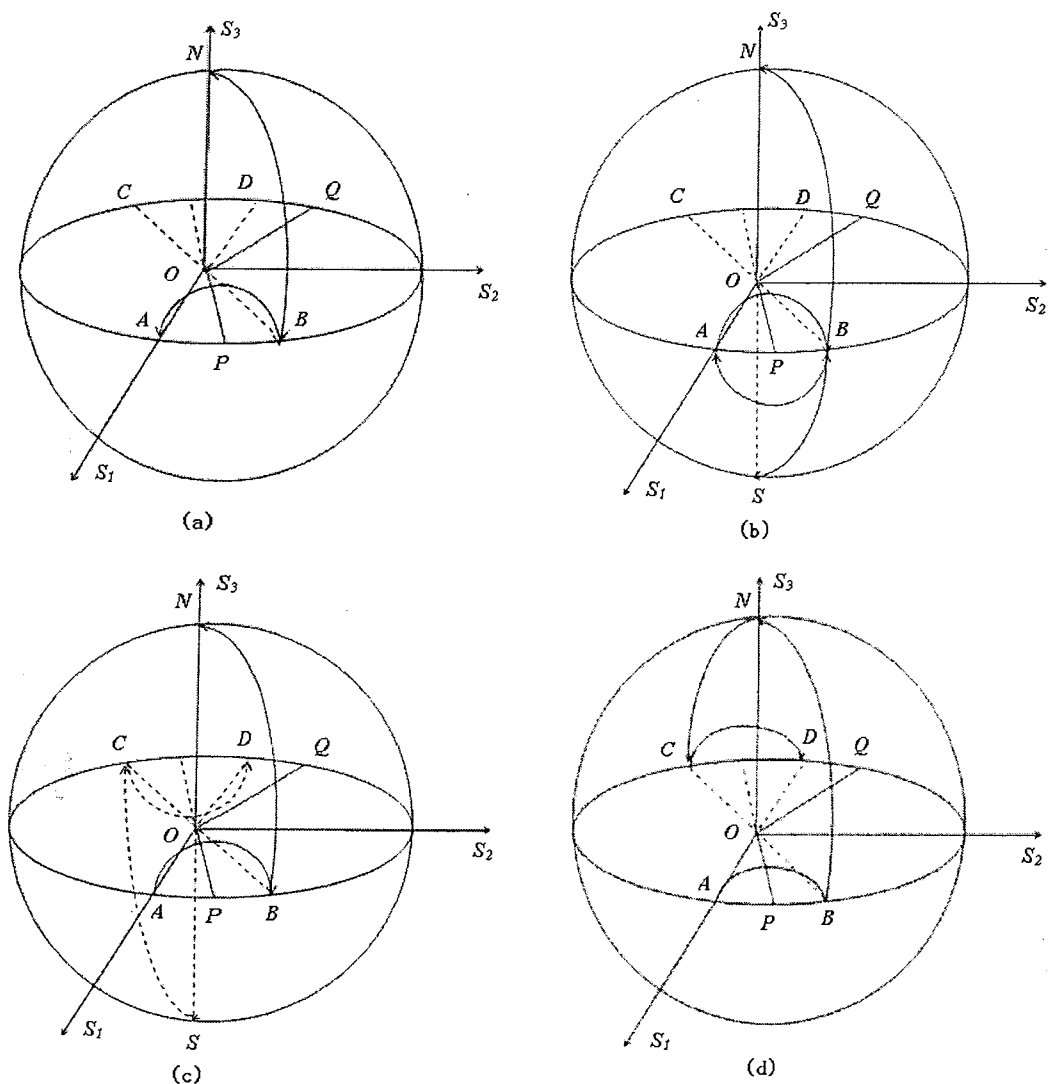


图 5.5 常白模式透反式液晶显示中反射区: (a) 亮态显示, (c) 暗态显示; 透射区: (b) 亮态显示, (d) 暗态显示的偏振态路径变化的邦加球描述

§ 5.2.3 模拟计算结果

为了验证这种设计方案并研究它的性能,在计算中使用扩展的琼斯矩阵方法研究透射模式和反射模式,电光特性如电压—透射率(V—T)曲线、电压—反射率

(V—R) 曲线, 光谱响应曲线以及等对比度曲线图都计算出来了。模拟中采用Merck公司生产的MLC-6012, 它的物理参数如下表示: 介电常数差值为 $\Delta \varepsilon = 8.2$, 寻常光和非寻常光的折射率分别为 $n_o = 1.4620 + 5682/\lambda^2$, $n_e = 1.5525 + 9523/\lambda^2$, λ 为可见光波长(单位为纳米), 弹性系数为 $K_{11} = 11.6 \text{ pN}$, $K_{22} = 5.5 \text{ pN}$, $K_{33} = 16.1 \text{ pN}$ 。透射区ECB模式预倾角为 2° , 反射区平行取向区预倾角为 2° , 垂直取向区预倾角为 88° 。以550nm为中心波长来设计, 液晶材料的折射率差值为 $\Delta n = 0.1033$, 透射区液晶层光程差为半波长, 因此对于常黑显示模式的最佳液晶盒厚为 $d = \lambda_0 / 2\Delta n = 2.66 \mu\text{m}$, 半波延迟膜光程差为275nm。图5.6为常黑显示模式下透

射区和反射区在开态和关态的光谱图, 半波补偿的效果使得无论是透射区还是反射区的暗态色散及亮态色散都非常小, 易实现便携式直视型显示的全彩色化。图5.7为常黑模式下的透射区V—T曲线和反射区V—R曲线, 光效率归一化为最大光效值(约为48%)。从电光特性可以看出V—T曲线和V—R曲线基本趋势大体一致, 但是由于反射区采用混合排列模式, 因此阈值电压为0, 使得暗态波动很大, 这是常黑显示模式的一个缺点。图5.8(a)和5.8(b)所示为在4.2伏驱动电压下, 透射区ECB模式和反射区HAN模式的等对比度图。透射区中心对比度为507:1, 而反射区为58:1, 这是因为计算中考虑到了表面反射对反射区暗态的影响。

为了抵消液晶在开态的剩余延迟, 得到较好的暗态, 须适当增加液晶层的厚度, 若常白显示模式的液晶盒厚设定为 $3.0 \mu\text{m}$, 则其关态时透射区引起的光程差为 $d \cdot \Delta n = 310 \text{ nm}$, 将常黑模式中液晶层邻近的两层半波延迟膜替换为近似四分之一波长延迟膜的两层单轴延迟膜, 其光程差均为 $d \cdot \Delta n / 2 = 155 \text{ nm}$, 主轴和液晶长轴垂直, 其他参数均保持不变。图5.9为常白显示模式下透射区和反射区在开态和关态的光谱图。图5.10为常白模式下的透射区V—T曲线和反射区V—R曲线, 与常黑模式的电光特性类似, V—T曲线和V—R曲线基本趋势大体一致, 但是由于将常黑模式的暗态与亮态反转, 从而解决了反射区混合排列模式的无阈值特性造成的暗态漏光对对比度的影响。图11(a)和(b)所示为透射区ECB模式和反射区HAN模式的等对比度图。在5伏驱动电压下, 透射区中心对比度为835:1, 而反射区为65:1, 同时可以看到反射区的视角图形总是比透射区的视角图形更为对称, 这是由于液晶分子在施加电压的时候只向一个方向倾斜, 对透射式而言, 不同方向的光线的相位延迟不同, 所以视角不对称。而反射区由于反射模式本身的镜面双畴结构使得这种影响抵消, 所以视角比较对称。

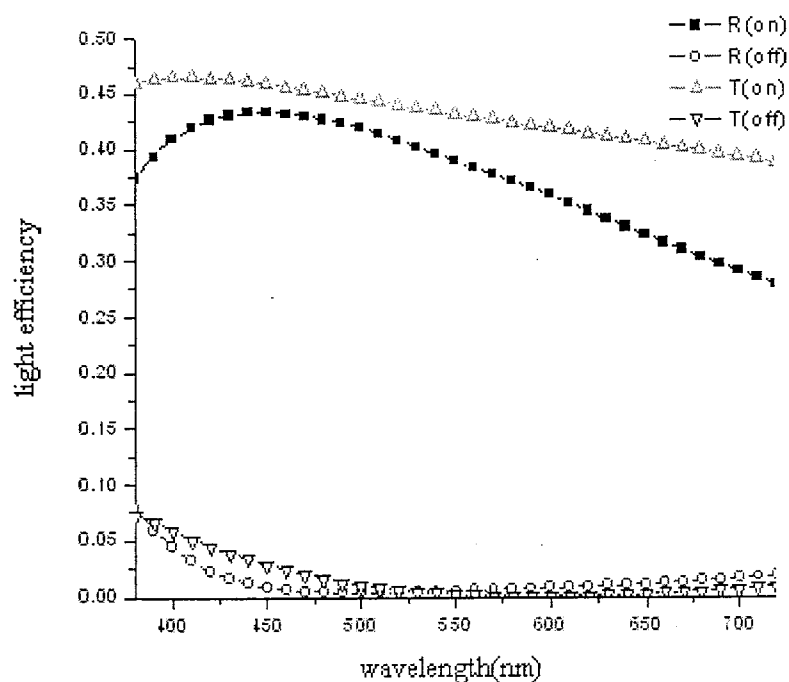


图 5.6 常黑模式透反式液晶显示的透射区和反射区光谱响应曲线

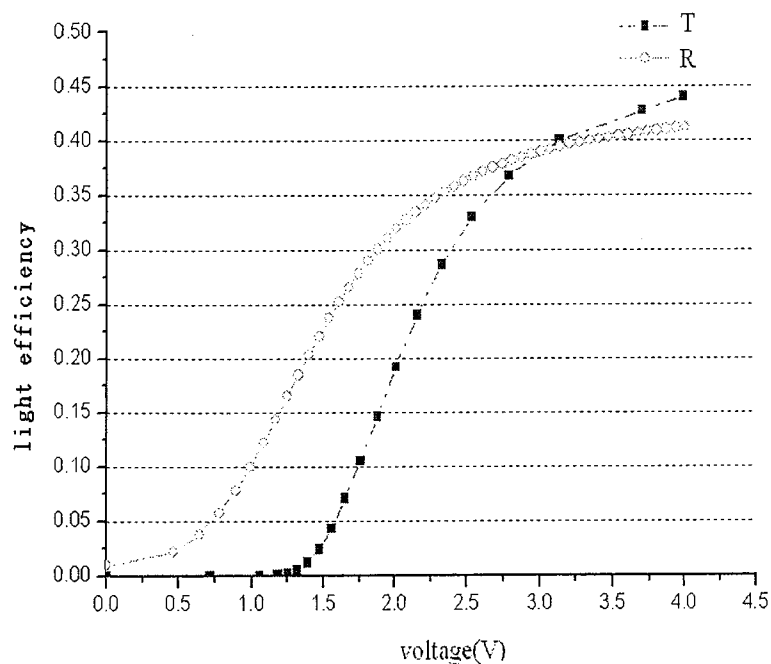


图 5.7 常黑模式透反式液晶显示的电压—透射率和电压—反射率曲线

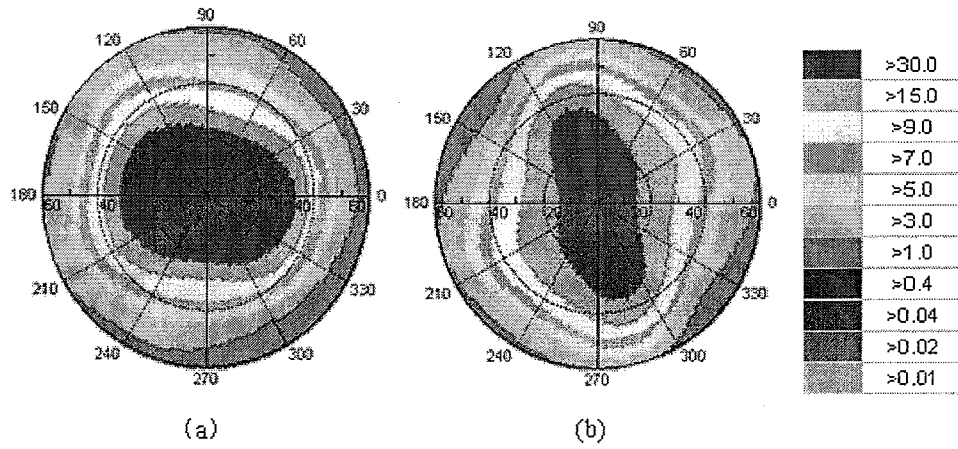


图 5.8 入射波长为 550nm 时常黑模式透反式液晶显示的等对比度图形
(a) 透射区 (b) 反射区

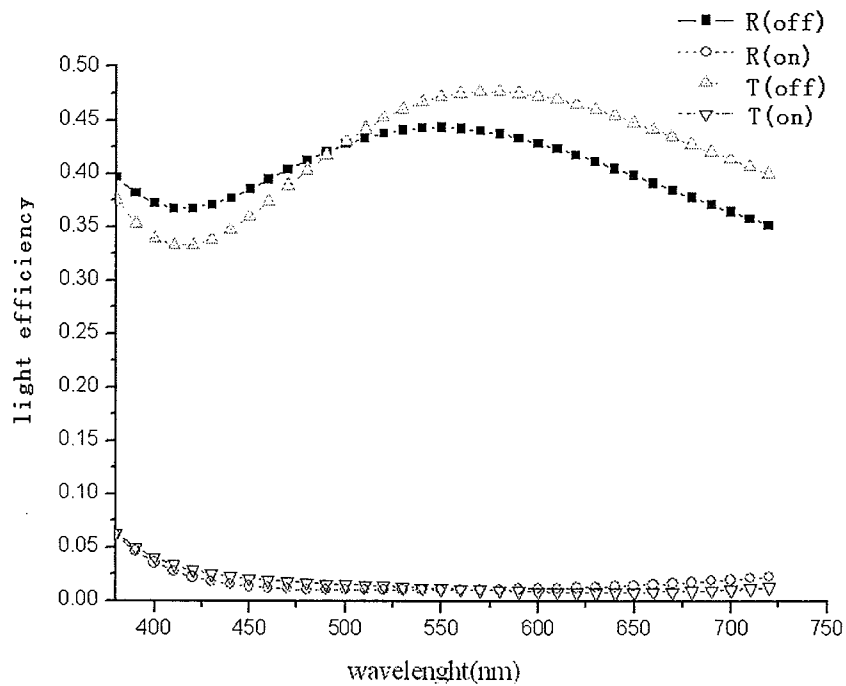


图 5.9 常白模式透反液晶显示的透射区和反射区光谱响应曲线

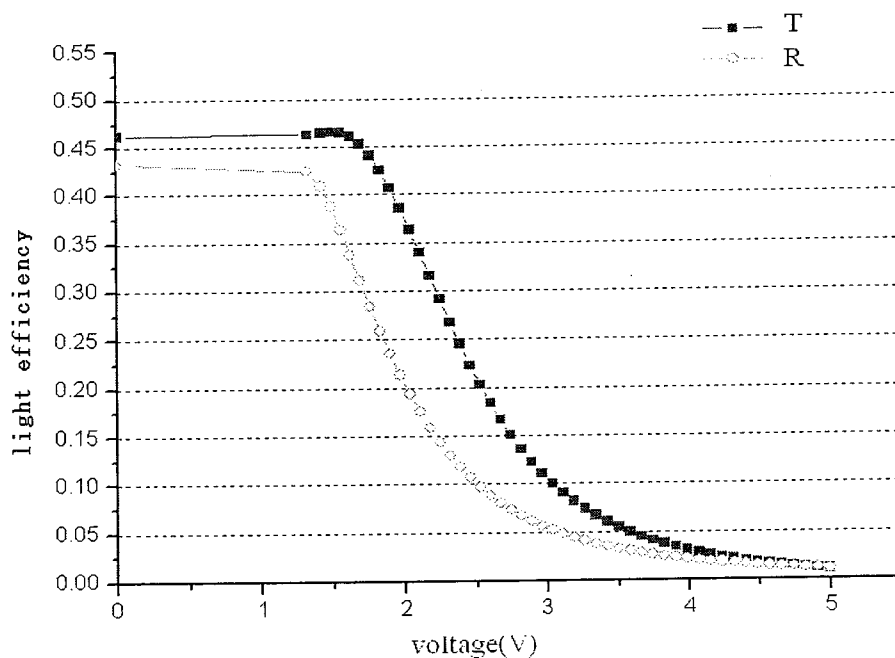
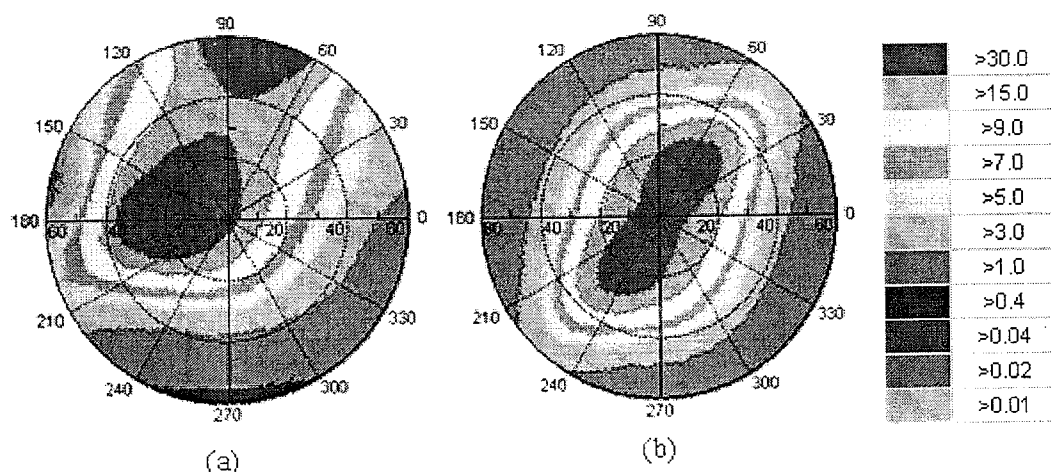


图 5.10 常白模式透反式液晶显示的电压—透射率和电压—反射率曲线

图 5.11 入射波长为 550nm 时常白模式透反式液晶显示的等对比度图形
(a) 透射区; (b) 反射区

§ 5.2.4 结论

采用不同相位延迟的补偿膜可以使 ECB/HAN 模式透反式液晶显示工作于常黑模式和常白模式。两种工作模式均可实现宽光谱响应，透射与反射电光响应

曲线基本趋于一致，非常适宜便携式直视型液晶显示的全彩色化。两种模式相比较各有优缺点：常黑显示模式 4.2 伏饱和驱动电压略低于常白显示模式 5 伏饱和驱动电压，同时便携式显示做成常黑显示模式有助于减小驱动功耗。同时常黑显示模式无论是透射区还是反射区的对比度视角锥图形比常白显示模式更加优化，特别是透射区的对比度视角锥图形比常白显示模式下有了很大的改善，在 60° 方位角度范围内具有很好的可视特性，无灰度反转。而常白显示模式解决了常黑显示模式盒厚误差敏感性大及反射区 HAN 模式阈值电压为 0 造成的暗态漏光对对比度的影响。在模拟中，上层偏振片和空气之间插入了折射率为 1.25 的复合防反射层，并且假设可见光谱范围内偏振片为无吸收色散，反射板为无反射色散的理想器件，透射区中心对比度达到 500:1 以上，反射区中心对比度达到 50:1 以上，虽然透射区比反射区的对比度更高，但反射区由于镜面双筹效应视角特性更加对称，因此将这两种模式将会在便携式全彩色直视型显示中得到很好的应用和发展。

§ 5.3 常黑模式VA/HAN透反式液晶显示

§ 5.3.1 VA/HAN透反式液晶显示结构模型

图12所示为液晶分子指向矢在VA/HAN透反式液晶盒中的分布图形。在反射区液晶分子为混合排列，而在透射区域为垂直排列。下基板液晶分子在透射区和反射区均为垂直排列，而在上基板的透射区为垂直排列，在反射区为平行排列。制作工艺上可以将上下基板涂敷一层垂直取向的PI膜，然后平行摩擦上下基板，使液晶分子在加电压的时候倒下的动作一致。而在上基板处先用保护层覆盖透射区，在反射区用倾斜离子蒸渡法使得原来的垂直取向转换为平行取向，最后去掉透射区的保护层。

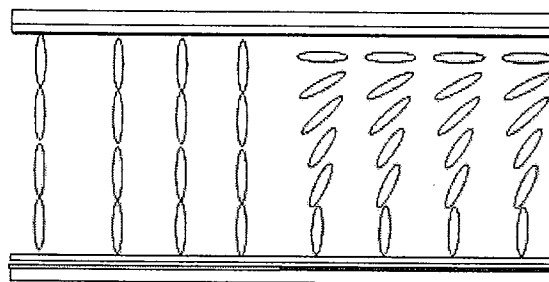


图 5.12 单倍盒厚间距透反式液晶显示中液晶分子指向矢排列图形

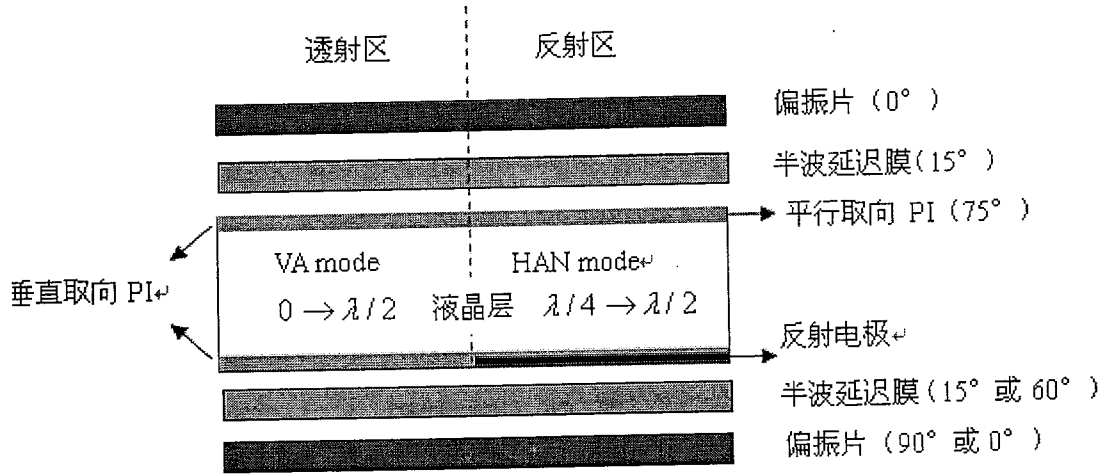


图5.13 单倍盒厚间距透反式液晶显示中液晶分子指向矢排列图形

§ 5.3.2 VA/HAN模式反射区亮暗显示原理

常黑模式 VA/HAN 透反式液晶显示模式结构如图 13 所示。反射区实现亮暗显示的原理为：关态时，环境光正入射到透光轴方向为 $\theta_p=0^\circ$ 的偏振片，出射光为线偏振光。然后经过慢轴方向为 15° 的半波补偿膜，出射后变为偏振方向和偏振片透光轴夹角为 30° 的线偏振光。经过反射区有效相位延迟为 $\pi/2$ 的混合排列液晶层，入射线偏振光的偏振方向与液晶分子长轴（与偏振片透光轴的夹角为 75° ）的夹角为 45° ，这时候达到反射板处的偏振光为右旋圆偏振光。在反射板反射时，由于半波损失，旋向发生改变，右旋圆偏振光变为左旋圆偏振光，到达上层偏振片时，为偏振方向与偏振片透光轴垂直的线偏振光，因此被偏振片吸收，显示为暗态。开态时，由于液晶分子为负性，在垂直电场的作用下，液晶分子逐渐完全倒下，达到饱和电压时，相位延迟为 π ，等效于方位角为 75° 的半波延迟膜。因此，入射线偏振光经过两层半波延迟膜达到反射板时为仍为线偏振光，只是偏振方向改变，偏振方向为 $[2 \times 15^\circ + 2 \times (75^\circ - 2 \times 15^\circ)] = 120^\circ$ ，反射后经原路返回，到达上层偏振片时，偏振方向和偏振片透光轴平行，光线完全出射，因此显示为亮态。

§ 5.3.3 透射区偏振片平行模式亮暗显示原理

对于透射区，实现亮暗显示的方式有两种。根据下层偏振片透光轴和上层偏振片透光轴平行或垂直，下层的半波延迟膜光轴方位角分别为 60° 或 15° 。当两偏振片平行时，光线传播路径如下：关态时，正入射光经过下层偏振片变为偏振方向为 0° 的线偏振光，经过方位角为 60° 的半波延迟膜，到达垂直排

列的液晶层时为偏振方向为 120° 的线偏振光，再经过方位角为 15° 的半波延迟膜，线偏振光转过 $2 \times (120^\circ - 15^\circ) = 210^\circ$ ，偏振方向为 $(120^\circ - 210^\circ) = -90^\circ$ ，出射线偏振光的偏振方向和上层偏振片的透光轴垂直，显示为暗态。当开态时，液晶分子逐渐完全倒下，达到饱和电压时，相位延迟为 π ，等效于方位角为 75° 的半波延迟膜，偏振光转过 $2 \times (120^\circ - 75^\circ) = 90^\circ$ ，偏振方向为 $(120^\circ - 90^\circ) = 30^\circ$ ，再经过上层的半波延迟膜，转过 $2 \times (30^\circ - 15^\circ) = 30^\circ$ ，因此出射线偏振光的偏振方向为 $(30^\circ - 30^\circ) = 0^\circ$ ，与上层偏振片透光轴方向平行，光线完全出射，因此显示为亮态。

§ 5.3.4 透射区偏振片垂直模式亮暗显示原理

当两偏振片垂直时，光线传播路径如下：关态时，正入射光经过下层偏振片变为偏振方向为 90° 的线偏振光，透射区垂直排列液晶层相位延迟为 0，上层和下层半波延迟膜方位角均为 15° ，叠加的结果相当于一个全波片，光线到达上层偏振片时，偏振状态没有发生任何改变，因此被上层偏振片吸收，显示为暗态。当开态时，液晶分子逐渐完全倒下，达到饱和电压时，相位延迟为 π ，等效于方位角为 75° 的半波延迟膜。偏振方向为 90° 的线偏振光经过下层的半波延迟膜，偏振光转过 $2 \times (90^\circ - 15^\circ) = 150^\circ$ ，到达垂直排列的液晶层时为偏振方向为 $(90^\circ - 150^\circ) = -60^\circ$ 的线偏振光，经过液晶层转过 $2 \times [75^\circ - (-60^\circ)] = 270^\circ$ ，偏振方向为 $(-60^\circ + 270^\circ) = 210^\circ$ （即 30° ），再经过上层的半波延迟膜，转过 $2 \times (30^\circ - 15^\circ) = 30^\circ$ ，因此出射线偏振光的偏振方向为 $(30^\circ - 30^\circ) = 0^\circ$ ，与上层偏振片的透光轴平行，显示为亮态。

§ 5.3.5 模拟计算结果

为了验证这种设计方案并研究它的性能，在计算中使用扩展的琼斯矩阵方法研究透射模式和反射模式，电光特性如电压—透射率(V—T)曲线、电压—反射率(V—R)曲线，光谱响应曲线以及等对比度视角依赖图都计算出来了。模拟中采用一种适于有源矩阵的Merck液晶混合物，它的主要物理参数如下：介电常数差值为 $\Delta \epsilon = -8.2$ ，寻常光和非寻常光的折射率为 $n_e = 1.5586$ ； $\Delta n = 0.083$ ($\lambda = 589.3$ nm, 20°C)； $\epsilon_{//} = 3.6$ ； $\Delta \epsilon = -4.2$ ；水平转动粘滞系数 $\gamma = 27 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ 。透射区垂直排列模式液晶分子预倾角为 88° ，反射区平行取向液晶分子预倾角为 2° ，垂直取向液晶分子预倾角为 88° 。

以550nm为中心波长来设计，最佳液晶盒厚为 $3.5 \mu\text{m}$ ，半波延迟膜的光程差为275nm。图14所示为透射区V—T曲线和反射区V—R曲线，光效率归一化为最大光效值(约为45%)。其中透射区的两种模式在光波以550nm正入射的情况下，V

—T曲线相同。从电光特性可以看出V—T曲线和V—R曲线基本趋势大体一致。但是反射区的阈值电压较小，因此需要通过电路进行伽马校正。

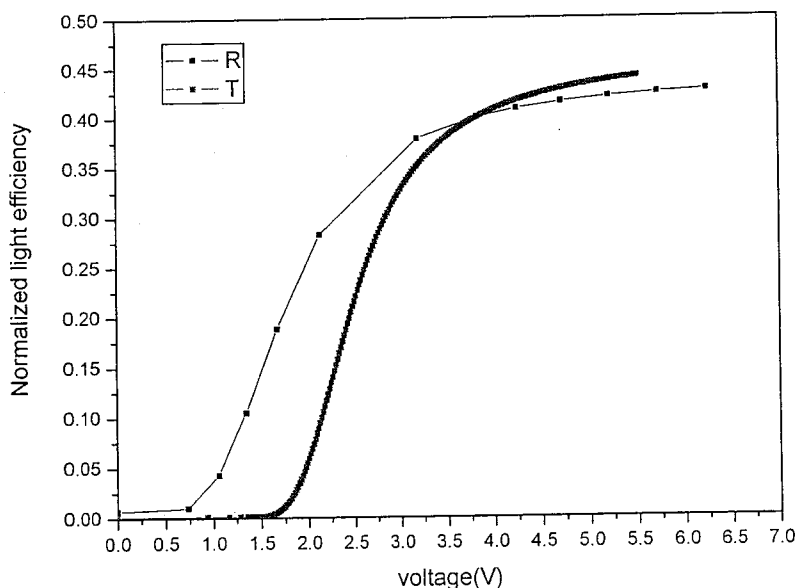


图 5.14 常黑 VA/HAN 模式透反式液晶显示的电压—透射率和电压—反射率曲线

图15所示为透射区和反射区光谱响应曲线，反射区光谱响应曲线暗态和亮态色散都很小，这是上层半波延迟膜和反射区关态有效光程差为四分之一波长的混合排列液晶层构成的消色差宽带四分之一波片补偿的结果。对于透射区，偏振片平行模式和偏振片垂直模式虽然对于中心波长正入射光线的电光响应曲线一致，但是由于半波补偿膜方位角改变导致光谱响应曲线和视角特性发生改变。虽然偏振片平行模式不如偏振片垂直模式的亮态光谱曲线更加平滑，但是暗态色散确更小。同时由图16(b)和(c)可以看出，偏振片平行模式的视角特性优于偏振片垂直模式的视角特性，视角更宽。反射区的视角特性如图5(a)所示，由于玻璃基板和空气之间的折射率差异引起的表面反射使得中心对比度只有65:1，远不如透射区中心对比度(>500:1)，但是反射区混合排列液晶分子具有镜面双筹结构，视角特性更加对称。

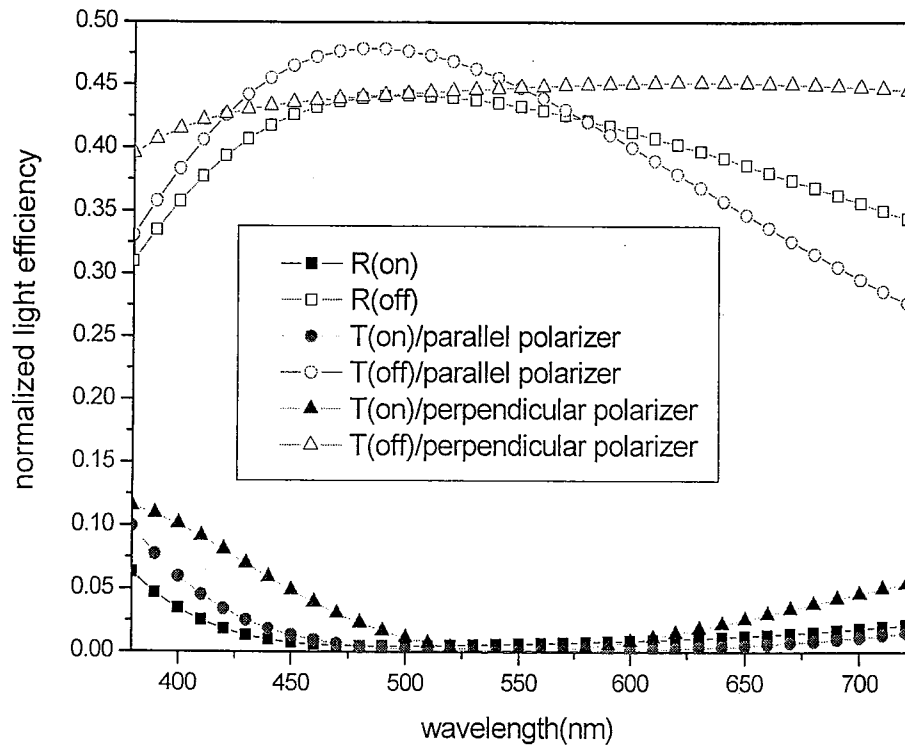


图 5.15 常黑 VA/HAN 模式透反式液晶显示的透射区和反射区光谱响应曲线

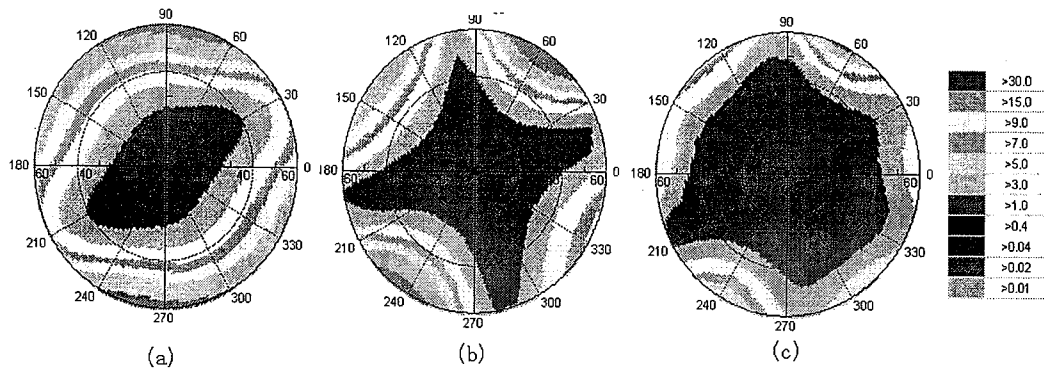


图 5.16 入射波长为 550nm 时常黑 VA/HAN 模式透反式液晶显示的等对比度图形
(a) 反射区；(b) 透射区(偏振片垂直)；(c) 透射区(偏振片平行)

§ 5.3.6 结论

提出了一种新型的常黑VA/HAN模式单倍盒间距的透反式液晶显示模式,此种模式仅仅使用两层半波延迟膜,在保持原来的电光响应特性不变的基础上,比原来提出的三层半波延迟膜和一层正性C膜补偿方法更加简单,制造工艺得以简化,减小了制造成本。跟据透射区上下两层偏振片平行或垂直,设计了两种透射模式,模拟光谱响应曲线和视角特性曲线发现,偏振片平行模式比偏振片垂直模式的透射区显示特性更加优异。

§ 5.4 本章小结

本章设计了两种单倍盒厚间距的透反式液晶显示：ECB/HAN和VA/HAN透反式液晶显示模式。两种模式均是以HAN液晶层为反射区，通过合理设计器件结构，得到常黑和常白两种模式的ECB/HAN透反式液晶显示以及常黑模式的VA/HAN透反式液晶显示。对于反射区常黑模式的设计都是以第三章得到的单偏振片半波补偿反射式非扭曲液晶显示的结构为基础进行改善得到的，在反射区薄膜补偿色散结构确定后，在下基板外侧粘贴适当相位延迟和方位角的延迟膜可实现对透射区的结构设计。应用 2×2 扩展琼斯矩阵对其显示特性进行模拟分析，对他们的光谱响应曲线，电光特性曲线以及等对比度视角特性进行了模拟。结果表明两种工作模式均可实现宽光谱响应，透射与反射电光响应曲线基本趋于一致，反射区对比度均高于50:1，在 60° 方位角度范围内具有很好的可视特性，无灰度反转。非常适宜便携式直视型液晶显示的全彩色化。

第六章 利用圆偏光系统测量扭曲向列相液晶盒盒厚

本章提出了一种利用圆偏光仪测量扭曲向列相液晶盒盒厚的新方法，此方法适用于假定扭曲角已知的情况。圆偏光仪组成为两端是一对起偏器和检偏器，中间放置一对四分之一波片，起偏器和检偏器平行或垂直放置，其中一个四分之一波片的快轴和起偏器透光轴成 45° ，另一个四分之一波片的快轴和起偏器透光轴成 -45° 。液晶盒样品直接插入到两四分之一波片中间，无需调整方向。不同于旋转液晶盒或偏振片寻找输出光强最大值或最小值的方法，圆偏光仪测量盒厚不需要旋转任何光学元件或液晶盒观测输出光强的变化，只需要观测检偏器在平行和垂直方向的两个强度值，能够实现快速测量，简洁而且有效。

§ 6.1 扭曲向列相液晶盒盒厚的测量方法简介

当前，液晶显示器件作为平板显示的主流得到了广泛的发展和应用。在液晶面板制作过程中，精确的控制液晶盒盒厚至关重要，因为它直接影响到面板的光电特性，比如亮度和对比度。因此，在生产过程中，快速而有效的测量液晶盒盒厚，对于得到高质量的显示画面非常重要。传统的测量液晶盒盒厚的方法主要有：单色光测量法^[131-134]和光谱扫描法^[135-137]。相位补偿法以及利用圆偏振光或线偏振光条件特性的偏振旋转法属于单色光测量法的范畴。其中相位补偿法需要调整相位补偿器使输出光强最小，得到相位补偿器相位与液晶盒厚的关系，从而求取液晶盒厚。偏振旋转法是通过液晶盒或者偏振片的旋转得到最大或最小输出光强，将此时的光学元件角度值代入特定的条件公式求解得到盒厚。光谱扫描法与偏振旋转法相类似，也是通过液晶盒或偏振片的旋转从而得到光谱曲线对应的极大值点或极小值点，以此得到与盒厚的对应关系，从而求取盒厚。显然这些操作相对比较复杂。这里我们提出了一种利用圆偏光仪快速测量液晶盒盒厚的新方法。该方法无需旋转任何光学元件或液晶盒观测输出光强的变化，只需要观测检偏器在平行和垂直方向的两个强度值，且不需要调整液晶盒的方位，能够实现快速测量。

§ 6.2 圆偏光系统测量扭曲向列相液晶盒盒厚的原理分析

§ 6.2.1 透射式液晶盒厚光学测量系统

圆偏光仪适用于检测圆偏振通过透明材料，再经过一个四分之一波片后偏振态的变化，可以检测样品的双折射特性。圆偏光仪的装置简图如图6.1所示，诸光学元件的取向如下：起偏器 P 透光方向沿 OY 轴，检偏器 A 的透光方向沿 OX 轴，第一个四分之一波片的快轴和 OX 轴夹角为 45° ，第二个四分之一波片的快轴和 OX 轴夹角为 -45° ，即两个四分之一波片正交，当不插入样品时，系统输出光强为零，此时构成暗视场圆偏光仪。反之，若第二个四分之一波片的快轴和第一个四分之一波片的快轴平行，则构成亮视场圆偏光仪。由于均匀扭曲的向列相液晶盒可以看成由主轴方向连续变化的诸多单轴相位延迟层构成的一个叠加层，因此具有双折射特性。为了检测这种双折射特性造成的光延迟，我们可以考虑将液晶盒样品插入到圆偏光仪的两个正交四分之一波片之间。向列相液晶盒可以由 $(\alpha, \phi, d\Delta n)$ 三个参数来描述，其中 α 为靠近第一个四分之一波片处液晶分子排列方向与 OX 轴的夹角， ϕ 为液晶盒的扭曲角， d 为盒厚， Δn 为液晶分子长轴折射率和短轴折射率之差。均匀扭曲向列相液晶的 Jones 矩阵可表示为：

$$M_{LC} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

其中，

$$\begin{cases} a = \cos \beta \cos \phi + \frac{\phi}{\beta} \sin \beta \sin \phi - i \frac{\delta}{\beta} \sin \beta \cos \phi \\ b = \frac{\phi}{\beta} \sin \beta \cos \phi - \cos \beta \sin \phi - i \frac{\delta}{\beta} \sin \beta \sin \phi \\ \beta = \sqrt{\delta^2 + \phi^2} \\ \delta = \pi d \Delta n / \lambda \end{cases} \quad (6.2)$$

因此对于暗视场圆偏光仪，从第二个四分之一波片出射的出射光的 Jones 矢量为：

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = R(-45^\circ) \cdot R_{QWP} \cdot R^{-1}(-45^\circ) \cdot R^{-1}(\alpha) \cdot M_{LC} \cdot R(\alpha) \cdot R(45^\circ) \cdot R_{QWP} \cdot R^{-1}(45^\circ) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

其中，四分之一波片的快轴和 OX 轴平行，

$$R_{\text{QWP}} = \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$R(\alpha)$ 为坐标旋转矩阵:

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

将公式 (6.1), (6.2), (6.4) 和 (6.5) 代入 (6.3), 可得,

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta \sin \beta}{\beta} e^{i(\frac{\pi}{2} - 2\alpha - \phi)} \\ (\frac{\phi}{\beta} \sin \beta \cos \phi - \cos \beta \sin \phi) + i(\frac{\phi}{\beta} \sin \beta \sin \phi + \cos \beta \cos \phi) \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

因此, OX, OY 方向的归一化透射光强分别为

$$\begin{cases} \frac{I_x}{I_x + I_y} = \langle |E_x|^2 \rangle = \frac{\delta^2}{\beta^2} \sin^2 \beta \\ \frac{I_y}{I_x + I_y} = \langle |E_y|^2 \rangle = \cos^2 \beta + \frac{\phi^2}{\beta^2} \sin^2 \beta \end{cases} \quad (6.7)$$

OX, OY 方向的相位分别为

$$\begin{cases} \varphi_x = \frac{\pi}{2} - 2\alpha - \phi \\ \varphi_y = \arctan \frac{\phi \sin \beta \sin \phi + \beta \cos \beta \cos \phi}{\phi \sin \beta \cos \phi - \beta \cos \beta \sin \phi} \end{cases} \quad (6.8)$$

从公式 (6.7) 和 (6.8) 可以看出, OX, OY 方向的归一化透射光强大小和液晶盒在圆偏光仪中放置的方位没有关系, 无论怎样旋转液晶盒, 从圆偏光仪出射的沿 OX, OY 方向的透射光强不发生变化, 光强的大小只决定于液晶盒本身的物理参数 $(\phi, d\Delta n)$, 而和 α 无关。在液晶盒的物理参数 $(\phi, d\Delta n)$ 确定的情况下, OX 方向的相位 φ_x 随 α 线形变化, OY 方向的相位 φ_y 不随 α 变化, OX, OY 方向的相位差

$\varphi_x - \varphi_y$ 随 α 线形变化。因此经过检偏器，从暗视场圆偏光仪中出射的光强 I_x 只是扭曲角 ϕ 和盒厚 d 的函数。如果我们事先已经知道液晶盒的扭曲角，就可以求得液晶盒盒厚。

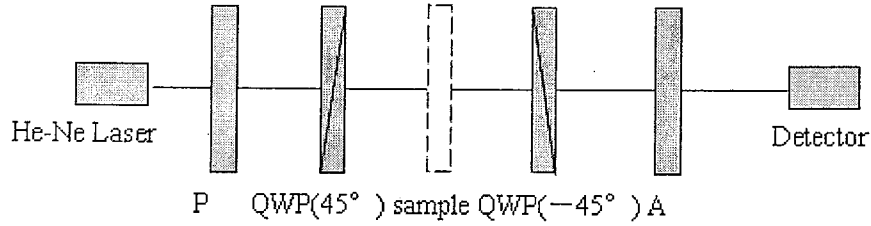


图 6.1 透射式液晶盒盒厚的光学测量装置简图

§ 6.2.2 偏振态轨迹变化的Poincaré球分析

由于均匀扭曲向列相液晶盒本身可以看作是诸多主轴方向连续变化的单轴相位延迟层构成的一个叠加层，因此用Poincaré球^[138,139]来描述偏振态转换的时候变得很烦琐。因此我们可以用一个等价模型来代替向列相液晶盒。众所周知，无耗光学系统可以等价表示为诸多波片和偏振旋转器的组合^[140]，而1941年，H. Hurwitz证明了单位无耗光学介质可以等价表示为一个波片与其后连接的一个偏振旋转器的组合^[141]。因此我们将均匀扭曲向列相液晶层表示为一个波片 $WP(\Gamma, \gamma)$ 和其后连接的一个偏振旋转器 $R(\chi)$ 的组合。

$$M_{LC} = R(\chi) \cdot WP(\Gamma, \gamma) \quad (6.9)$$

其中，

$$\begin{cases}
WP(\Gamma, \gamma) = R(\gamma) \cdot WP(\Gamma) \cdot R(-\gamma) \\
WP(\Gamma) = \begin{bmatrix} e^{-i\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{i\Gamma/2} \end{bmatrix} \\
\sin^2(\Gamma/2) = \frac{\delta^2}{\beta^2} \sin^2 \beta \\
\tan 2\gamma = \frac{\phi}{\beta} \tan \beta \\
\tan \chi = \frac{\beta \sin \phi \cos \beta - \phi \cos \phi \sin \beta}{\beta \cos \phi \cos \beta + \phi \sin \phi \sin \beta}
\end{cases} \quad (6.10)$$

Γ 为波片的相位延迟, γ 为波片快轴和OX的夹角, χ 为偏振旋转器对偏振光的旋转角度。

将 (6.9) 和 (6.10) 代入 (6.3), 可得,

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\Gamma/2) \cdot (\sin(\chi + 2\gamma) + i \cos(\chi + 2\gamma)) \\ \cos(\Gamma/2) \cdot (-\sin \chi + i \cos \chi) \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

所以, 我们可以得到与公式 (6.7) 相同的结果,

$$\begin{cases} I_x = \langle |E_x|^2 \rangle = \sin^2(\Gamma/2) = \frac{\delta^2}{\beta^2} \sin^2 \beta \\ I_y = \langle |E_y|^2 \rangle = \cos^2(\Gamma/2) = \cos^2 \beta + \frac{\phi^2}{\beta^2} \sin^2 \beta \end{cases} \quad (6.12)$$

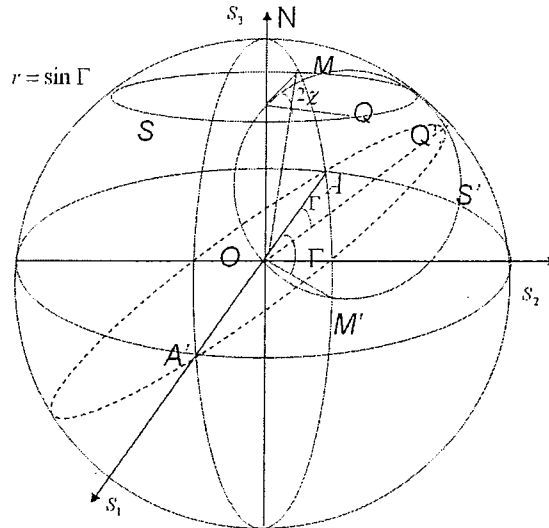


图 6.2 测量液晶盒盒厚的光学系统中光波偏振态轨迹变化的 Poincaré 球表述

如图6.2所示，我们用Poincaré球分析上述光学系统中光波偏振态的轨迹变化。在Poincaré球上，用赤道平面上一点 A (S_1 轴的负方向和赤道的交点) 表示从起偏器 P 出射的线偏振光，其光矢量沿 OY 轴。经过第一个四分之一波片， A 点将绕 S_2 轴（此轴平行于第一个四分之一波片的快轴）旋转 90° ，此角度代表光波通过四分之一波片后的相位滞后量，此时得到从四分之一波片出射的右旋圆偏振光，由Poincaré球的北极 N 来表示。接下来，右旋圆偏振光入射到液晶盒上，等价于首先通过一个快轴与 OX 轴成 γ 角的一个波片 $WP(\Gamma, \gamma)$ ，然后再通过一个偏振旋转器 $R(\chi)$ 。由于 $\gamma \in [0, \pi]$ ，所以经过波片 $WP(\Gamma, \gamma)$ 出射的所有偏振态由Poincaré球上圆 S 代表，圆 S 和赤道平行，其半径 $r = \sin \Gamma$ ，经过圆 S 上任一点 M 的球半径 OM 和 OZ 轴的夹角为 Γ 。点 M 处的偏振态经过偏振旋转器 $R(\chi)$ ，在圆 S 上转动 2χ 角度到达另一点 Q ，点 Q 处的偏振态即为从液晶盒出射的光波的偏振态，实际上，如果液晶盒在圆偏仪中旋转任意角度，则从液晶盒中出射光波的偏振态在Poincaré球上的位置轨迹为圆 S 。经过第二个四分之一波片，其对液晶盒出射光波偏振态的光学作用即是将圆 S 绕 S_2 轴（此轴和第二个四分之一波片的慢轴平行）旋转 90° 得到圆 S' ，显然圆 S' 和圆 S 面积大小相等，并且 OA 为经过圆 S' 圆心且垂直于圆 S' 的直线，点 M 和 Q 分别落在圆 S' 上的点 M' 和 Q' ，并且圆 S' 上任一点和 O 连成的直线和 OA 的夹角均为 Γ 。 Q' 代表从第二个四分之一波片出射的光波偏振态，经过透光轴与 S_1 轴正方向重合的检偏器，得到的偏振态由点 A' 表示，由Poincaré球性质可知，从检偏器出射的光束的强度 I_x 为

$$I_x = \cos^2 \frac{A'Q'}{2} = \sin^2 \frac{AQ'}{2} = \sin^2 (\Gamma/2) \quad (6.13)$$

假如将检偏器旋转 90° ，则出射光束沿 OY 轴，其偏振态由点 A 表示，用其光束强度为

$$I_y = \cos^2 \frac{AQ'}{2} = \cos^2(\Gamma/2) \quad (6.14)$$

如果点 M 位于由 A , A' 和 O 组成的圆上, 我们可以这样考虑, 如果液晶盒的扭曲角 $\phi = 0^\circ$, 那么液晶盒只相当于一个波片, 偏振旋转器可以忽略, 此时 $\chi = 0$, 若液晶盒中液晶分子的排列方向与 OX 轴夹角 45° , 则右旋圆偏振光穿过液晶盒后偏振态为 Poincaré 球上的 M 点, 此时 $\Gamma = \delta$, 经过第二个四分之一波片偏振态变为 M' , 最后从检偏器出射的光强为 $I_x = \sin^2(\delta/2)$ 。

§ 6.2.3 反射式液晶盒盒厚光学测量系统

对于反射式液晶盒, 根据图6.3所示, 其琼斯矩阵可以表示为

$$M_{RLC} = M_{LC}^T M_{LC} = R(\gamma)WP(\Gamma)WP(\Gamma)R(-\gamma) = WP(2\Gamma, \gamma) \quad (6.14)$$

显然, 反射式液晶盒在光学结构上只等价于一个波片, 没有偏振旋转器的作用。反射式液晶盒盒厚的测量装置如图6.4所示。与透射式的 Poincaré 球分析相类似, 右旋圆偏振光入射到反射式液晶盒上, 两次经过液晶盒, 出射光的偏振态绕与 OX 轴成 γ 角的一个波片 $WP(2\Gamma, \gamma)$ 的快轴旋转 2Γ 角度, 为圆 S 上一点, 经过第二个四分之一波片, 转动 90° 到圆 S' 上一点, 最后经检偏器出射, 出射归一化光强表示如下:

$$\begin{cases} \frac{I_x}{I_x + I_y} = \langle |E_x|^2 \rangle = \sin^2(\Gamma) = 4\sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)\cos^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = \frac{4\delta^2 \sin^2 \beta}{\beta^4}(\phi^2 + \delta^2 \cos^2 \beta) \\ \frac{I_y}{I_x + I_y} = \langle |E_y|^2 \rangle = \cos^2(\Gamma) = \left(1 - 2\sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)\right)^2 = \frac{(\delta^2 \cos 2\beta + \phi^2)^2}{\beta^4} \end{cases} \quad (6.15)$$

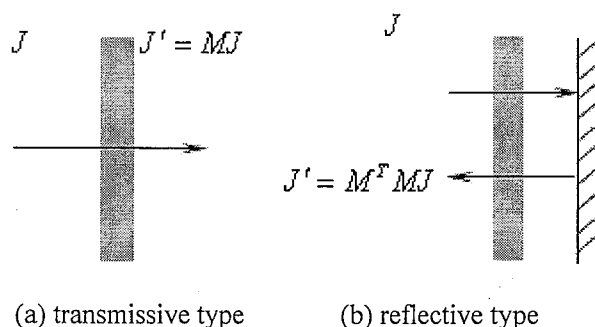


图6.3 透射式和反射式单位光学系统的传输矩阵的琼斯矩阵表示示意图, M^T 为 M 的转置

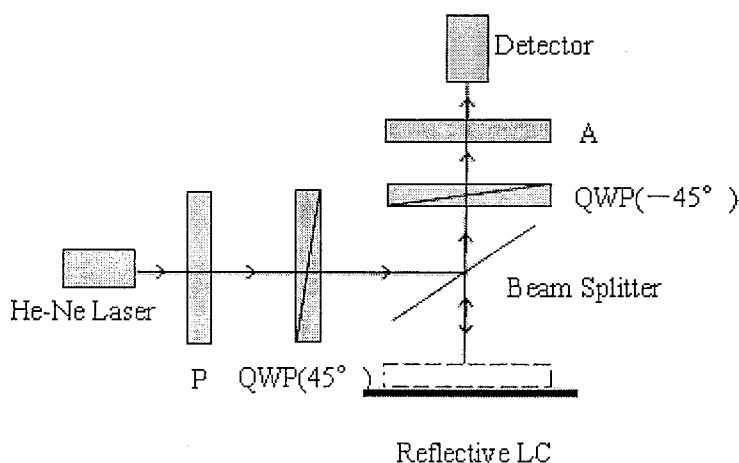


图 6.4 反射式液晶盒盒厚的光学测量装置简图

§ 6.3 实验

在超净实验室分别制作三组不同厚度和扭曲角透射式和反射式液晶盒。用甩胶机将聚酰胺酸溶液匀涂覆在清洗干净的玻璃基板上和镀有铝反射层的硅基板上, 在 90°C 下预烘30分钟, 让溶剂挥发, 使膜面平坦。然后在 240°C 的高温下后烘60分钟, 使其脱水闭环缩合生成聚酰亚胺膜。然后用摩擦机摩擦, 分别喷洒控制液晶盒盒厚的玻璃纤维隔垫颗粒 (spacer), 直径分别为 $15\mu\text{m}$, $4.0\mu\text{m}$, $5.9\mu\text{m}$, 将三块玻璃基板分别与其摩擦方向平行、 45° 角、垂直方向的玻璃基板或硅基板对位贴合, 然后在 25°C 的室温下充入液晶, 制作成设计盒厚分别为

$15\mu\text{m}$ ， $4.0\mu\text{m}$ 和 $5.9\mu\text{m}$ ，扭曲角分别为 0° 、 45° 和 90° 的透射式和反射式液晶盒。采用的He-Ne激光器功率为 3mw ，波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 。液晶材料采用石家庄永生华清液晶有限公司生产的SLC-6014-100， $n_e=1.58$ ， $n_o=1.49$ 。

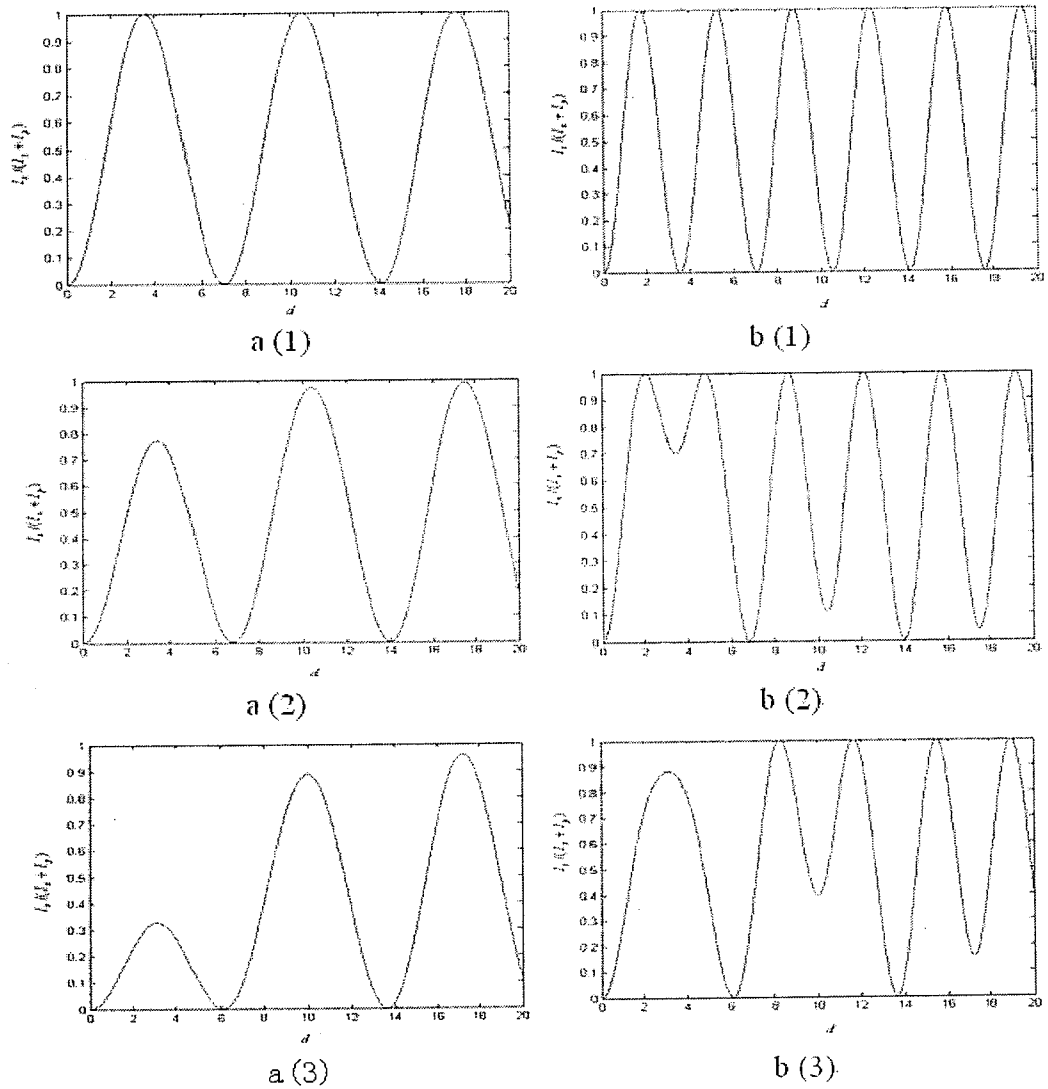


图 6.5 OX 方向归一化出射光强与液晶盒盒厚的关系曲线。a(1)~a(3)分别对应 0° ， 45° ， 90° 扭曲的透射式液晶盒；b(1)~b(3)分别对应 0° ， 45° ， 90° 扭曲的反射式液晶盒

图6.5绘制了 OX 方向归一化出射光强与液晶盒盒厚的关系曲线。a(1)~a(3)

分别对应 0° ， 45° ， 90° 扭曲的透射式液晶盒；b(1)~b(3)分别对应 0° ， 45° ， 90° 扭曲的反射式液晶盒。根据所测量的 $\frac{I_x}{I_x + I_y}$ 值，便可相应的在关系曲线上找到对应的盒厚，与其他单波长法测量液晶盒盒厚相类似，受到周期性方程解的限制，每个 $\frac{I_x}{I_x + I_y}$ 值可能对应多个盒厚，因此在测量液晶盒盒厚之前需要预先知道液晶盒盒厚的大体范围，这决定于所使用的spacer直径的大小，以此可以判断测量结果的取值。表1给出了三种情况下对应的透射式和反射式液晶盒盒厚的测量结果，所测量盒厚精确度在 $\pm 0.5 \mu m$ 之间。以此可以证明此测量方法的有效性。

表1. 测量结果

				检 测 值 设 定 值		
液晶盒类型		I_x (mw)	I_y (mw)	$\frac{I_x}{I_x + I_y}$	(μm)	(μm)
透射式	0° 扭曲	0.146	0.590	0.198	15.1	15.0
	45° 扭曲	0.407	0.142	0.7413	3.88	4.0
	90° 扭曲	0	0.230	0	6.1	5.9
反射式	0° 扭曲	0.080	0.471	0.1454	14.5	15.0
	45° 扭曲	0.408	0.044	0.9022	4.3	4.0
	90° 扭曲	0.103	0.653	0.1363	5.5	5.9

§ 6.4 本章小结

文章提出了一种利用圆偏光仪测量液晶盒盒厚的新方法,该方法能够实现对扭曲角已知的透射式和反射式液晶盒盒厚的快速而有效的测量。测量系统最重要的是利用了起偏器和四分之一波片组成的圆偏光系统得到圆偏振光,然后照射在液晶盒表面上,因此无论怎样旋转液晶盒,在 OX 和 OY 方向的出射光强都不受液晶盒旋转角度的影响,只是其中一个方向的相位随旋转角度线性变化。因此不需要旋转任何光学元件或液晶盒观测输出光强的变化,只需要观测检偏器在平行和垂直方向的两个强度值,能够实现快速测量。整个光学测量系统中光学偏振态的变化轨迹在Poincaré球上作了系统的阐述和分析,最后给出了一组实验结果数据,测量结果表明该方法确实行之有效。从而为工业生产中快速有效的测量液晶盒盒厚提供了一种有效的途径。

第七章 结论

四分之一波长延迟膜作为制作圆偏振片必不可少的一部分在向列相液晶显示器件，特别是采用反射式、透反式的小尺寸液晶显示以及采用VA模式的大尺寸LCD-TV中的有着广泛的应用。本论文围绕液晶型圆偏振片参数的最佳化设计，四分之一波长延迟膜对于反射式VA显示，单倍盒厚间距透反式液晶显示的反射区的暗态补偿，以及用1/4波片测量扭曲向列相液晶盒盒厚等几个方面展开研究，主要得到以下结论：

1. 从Jones矩阵及Muller矩阵出发，根据圆偏振光出射条件，经过严格的理论推导和分析，得到了由线性偏振片/半波延迟膜/扭曲向列相聚合性液晶薄膜组成的液晶型圆偏振片的层叠角度与聚合性液晶薄膜扭曲角和相位延迟之间的关系：

$$\begin{cases} \frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\sqrt{\phi^2 \lambda_0^2 + (\pi d_{LC} \Delta n)^2}} \sin \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \tan(4\beta - 2\alpha) = -\frac{\sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2}}{\phi} \cot \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\pi d_{LC} \Delta n}{\lambda_0}\right)^2} \end{cases}$$

其中偏振片透光轴和上基板液晶分子取向方向夹角为 α ，半波延迟膜的慢轴方向和上基板液晶分子取向方向的夹角为 β 。并且绘制了

$((4\beta - 2\alpha), \phi, d_{LC} \Delta n / \lambda_0)$ 三个参数间的数值关系图形。

2. 为了使结构为线性偏振片/半波延迟膜/非扭曲液晶层/反射板的单偏振片反射式半波补偿向列相液晶显示的色散最小，需要满足条件： $4\beta - 2\alpha = \pm 90^\circ$ 。

若考虑到液晶材料和延迟膜材料的色散特性，可以选择下列四组参数中的任意一组：

$$\begin{aligned}
 (a1). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = 75^\circ \\ \beta = 60^\circ \end{cases} & \quad (a2). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = -75^\circ \\ \beta = -60^\circ \end{cases} \\
 (b1). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = -15^\circ \\ \beta = 60^\circ \end{cases} & \quad (b2). \begin{cases} \delta_F^0 = \pi \\ \delta_L^0 = \pi/2 \\ \alpha = 15^\circ \\ \beta = -60^\circ \end{cases}
 \end{aligned}$$

若用1/4波长双折射拉伸聚碳酸酯薄膜材料代替向列相聚合性液晶薄膜,则线偏振片/半波长延迟膜/四分之一波长延迟膜叠加构成的消色差圆偏振片的最佳参数配置同样为上述四组参数。若液晶层扭曲时,计算得到了与液晶层参数 $(\phi, d_{LC} \Delta n / \lambda_0)$ 一一对应的方位角度 α 和 β 。

3. 当满足上述条件时,在可见光谱范围内,反射式半波补偿向列相液晶显示的暗态光谱可以获得良好的低色散特性,很好的改善了结构为线性偏振片/相位延迟为1/4波长的非扭曲液晶层/反射板的反射式液晶显示暗态色散较大的特性,便于实现反射式直视型全彩色化液晶显示。
4. 提出了一种新型消色差反射式手性垂直排列液晶显示模式,其结构设计的优点主要表现为以下几个方面:
 - 1) 采用半波延迟膜与四分之一波长延迟膜叠加构成的消色差四分之一波长延迟膜进行补偿,使反射式 VA 显示的亮暗态翻转,因此 VA 模式常黑模式下对比度高的特点得到很好的发挥,同时使得暗态光谱特性比单纯使用四分之一波长延迟膜补偿的效果更佳。
 - 2) 掺入手性剂材料,有效地消除了开态电压对反射率和波长的影响,增加了液晶盒盒厚,解决了反射式 VA 显示盒厚过薄,盒厚均匀性不易控制的缺点。
 - 3) 在液晶材料和液晶盒厚确定的情况下,需要精确的选择手性材料的螺距,根据线偏振光经过均匀扭曲的液晶层,出射光为线偏振的条件,可以计算开态时液晶层的扭曲角,从而确定所选用手性剂材料的螺距。
5. 设计了两种单倍盒厚间距的透反式液晶显示: ECB/HAN 和 VA/HAN 透反式液晶显示模式。对于反射区常黑模式的设计都是以第三章得到的单偏振片半波补偿反射式非扭曲液晶显示的结构为基础进行改善得到的。应用 2×2 扩展琼斯矩阵对其显示特性进行模拟分析,对他们的光谱响应曲线,电光特性曲线以及

等对比度视角特性进行了模拟。

6. ECB/HAN透反式液晶显示, 常黑与常白两种模式相比较, 有下列特点:

- 1) 两种模式均是以 HAN 液晶层为反射区。
- 2) 均采用单倍盒厚间距设计, 避免了双倍盒厚间距透反式液晶显示设计中透射区与反射区交界处液晶分子紊乱引起的杂散光, 导致显示画素不均匀, 光利用率降低等问题。
- 3) 采用不同相位延迟的补偿膜可以使 ECB/HAN 模式透反式液晶显示工作于常黑模式和常白模式。
- 4) 常白显示模式采用的四分之一波长延迟膜并不是真正的四分之一波长延迟, 为了补偿液晶分子开态时的剩余相位延迟, 需要满足 $\delta_{UF} - \delta_{R-LC}(V_{on}) = \lambda_0 / 4$ 。
- 5) 两种模式的透射区和反射区电光曲线基本趋于一致, 便于电路匹配。
- 6) 两种工作模式均可实现宽光谱响应, 透射与反射电光响应曲线基本趋于一致, 非常适宜便携式直视型液晶显示的全彩色化。
- 7) 常黑显示模式 4.2 伏饱和驱动电压略低于常白显示模式 5 伏饱和驱动电压, 应用于便携式液晶显示, 有助于减小驱动功耗。
- 8) 两种模式透射区中心对比度达到 500:1 以上, 反射区中心对比度达到 50:1 以上。常黑显示模式的透射区的对比度视角图比常白显示模式更加对称。

9) 常白显示模式解决了常黑显示模式盒厚误差敏感性大的问题, 同时消除了反射区 HAN 模式无阈值电压特性造成的暗态漏光对对比度的影响。

10) 反射区由于液晶分子的镜面双筹效应, 对比度视角图相比较透射区而言更加对称, 由于其固有的表面反射, 对比度比透射区小很多。

7. 常黑模式 VA/HAN 透反式液晶显示模式的特点:

- 1) 为了充分发挥 VA 模式的在透射型液晶显示中对比度高的特点, 只设计了常黑显示模式。
- 2) 反射区用半波延迟膜补偿实现常黑显示, 反射区根据上下偏振片平行或垂直, 调整下层半波延迟膜的方位角, 可以设计两种实现常黑显示的方法。
- 3) 偏振片平行与偏振片垂直两种情形相比较, 透射区正入射光线的电光特

性曲线相同。

- 4) 两种情形下均可实现宽光谱响应,透射区和反射区电光特性曲线基本趋于一致,便于电路驱动。
- 5) 偏振片平行模式比偏振态垂直模式的等对比度视角图更好。在 60° 方位角度范围内具有很好的可视特性,无灰度反转。
8. 提出了一种利用正交圆偏光片构成的系统测量液晶盒盒厚的新方法,该方法能够实现对扭曲角已知的透射式和反射式液晶盒盒厚的快速而有效的测量。用Poincaré球对整个光学测量系统中光学偏振态的变化轨迹上作了系统的阐述和分析。出射光在OX或OY方向的光强与液晶盒的方位角度没有关系,只是相位延迟的函数。不需要旋转任何光学元件或液晶盒来观测输出光强的变化,只需要观测检偏器在平行和垂直两个方向的强度值,能够实现快速测量。

参考文献

- [1] F. Reinitzer, *Montash Chem.*, 1888, 9: P. 421.
- [2] C. W. Oseen, *Trans. Faraday Soc.*, 1933, 29: P. 883.
- [3] H. Zocher, *Trans. Faraday Soc.*, 1933, 29: P. 945.
- [4] F. C. Frank, *Disc. Faraday Soc.*, 1958, 25: P. 19.
- [5] V. Freedericksz and V. Zolina, *Trans. Faraday Soc.*, 1933, 29: P. 919.
- [6] G. H. Heimeier, L. A. Zanoni, and L. A. Burton, 'Dynamic scattering: A new electrooptic effect in certain classes of nematic liquid crystals', *Proc. IEEE*, 1986, 56: P. 1162-1171.
- [7] 谢毓章, *液晶物理学*. 1998, 北京: 科学出版社.
- [8] T. Scheffer and J. Nehring, 'Twisted nematic and supertwisted nematic mode LCDs', in *Liquid crystals applications and uses*, Vol. 1, ed. B. Bahadur, 1990, Singapore: World Scientific.
- [9] A. R. Kmetz, 'Matrix addressing of non-emissive displays', in *Nonemissive electrooptical displays*, ed. A. R. Kmetz and F. K. von Willisen, 1976, New York: Plenum.
- [10] E. Kaneko, *Liquid crystal TV: principles and applications of liquid crystal displays*, 1987, Tokyo: KTK Scientific Publishers.
- [11] T. J. Scheffer and J. Nehring, 'A New, Highly Multiplexable Liquid Crystal display', *Appl. Phys. Lett.*, 1984, 45: P. 1023-1023.
- [12] T. J. Scheffer, J. Nehring, 'Investigation of the Electro-Optical Properties of 270° Chiral Nematic Layers in the Birefringence Mode', *J. Appl. Phys.*, 1985, 58: P. 3022-3031.
- [13] F. C. Luo, 'Active matrix LC Displays', in *Liquid crystals applications and uses*, Vol. 1, Chapter 15, ed. B. Bahadur, 1990, Singapore: World Scientific.
- [14] E. Lueder, *Liquid crystal displays: addressing schemes and electro-optical effects*, 2001, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd..
- [15] A. R. Kmetz, 'A single-polarizer twisted nematic display', *Proc. SID*, 1980, 21: P. 63-66.
- [16] Haim and S. Elias, 'Transflective liquid crystal display with integral heating unit', Feb. 17, 1987, United States Patent 4643525.
- [17] Y. Lu, X. Liang, Y. H. Wu, F. Du, and S. T. Wu, 'Dual-frequency addressed hybrid-aligned nematic liquid crystal', *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85: P. 3354-3356.
- [18] K. H. Fan-Chiang, X. Zhu, S. T. Wu, and S. H. Chen, 'Eliminating fringing field effects of vertical aligned liquid-crystal-on-silicon by using circularly polarized light', *SID Tech.*

- Dig., 2005, 36: P. 1290-1293.
- [19] R. A. Soref, 'Transverse field effect in nematic liquid crystals', *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 22: P. 165-166.
- [20] R. A. Soref, 'Field effects in nematic liquid crystals obtained with interdigital electrodes', *J. Appl. Phys.*, 1974, 45: P. 5466-5468.
- [21] R. Kiefer, B. Weber, F. Windscheid, and G. Baur, 'In-plane switching of nematic liquid crystals', *Japan Displays'92*, 1992, P. 547-550.
- [22] M. Oh-e, M. Ohta, S. Arantani, and K. Kondo, 'Principles and characteristics of electro-optical behavior with in-plane switching mode', *Asia Display'95*, 1995, P. 577-580.
- [23] Y. M. Jeon, I. S. Song, S. H. Lee, H. Y. Kim, S. Y. Kim, and Y. J. Lim, 'Optimized electrode design to improve transmittance in the fringe-field switching (FFS) liquid crystal cell', *SID Symp. Dig.*, 2005, 36: P. 328-331.
- [24] P. J. Bos and K. R. Koehler/Beran, 'The π -cell: a fast liquid crystal optical switching device', *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1984, 113: P. 329-339.
- [25] J. W. Goodby, R. Blinc, N. A. Clark, S. T. Lagerwall, M. A. Osipov, S. A. Pikin, T. Sakurai, K. Yoshino, and B. Zeks, 'Ferroelectric liquid crystals: principles, properties and applications', *Ferroelectricity and related phenomena*, Vol. 7, 1991, Amsterdam: Gordon and Breach.
- [26] Y. Ito, R. Matsubara, R. Nakamura, M. Nagai, S. Nakamura, H. Mori, and K. Mihayashi, 'OCB-WV film for fast-response-time and wide viewing angle LCD-TVs', *SID Tech. Dig.*, 2005, 36: P. 986-989.
- [27] S. Pancharatnam, 'Achromatic combinations of birefringent plates: Part I. An achromatic circular polarizer', *Proc. Indian Acad. Sci., Section A*, 41, 1955, P. 130-136.
- [28] S. J. Roosendaal, B. M. I. van der Zande, A. C. Nieuwkerk, C. A. Renders, J. T. M. Osenga, C. Doornkamp, E. Peeters, J. Bruinink, J. A. M. M. van Haaren, and S. Takahashi, 'Novel high performance transfective LCD with a patterned retarder', *SID Tech. Dig.*, 2003, 34: P. 78-81.
- [29] B. M. I. van der Zande, A. C. Nieuwkerk, M. van Deurzen, C. A. Renders, E. Peeters, and S. J. Roosendaal, 'Technologies towards patterned optical foils', *SID Tech. Dig.*, 2003, 34, 194-197.
- [30] P. G. de Gennes and J. Prost, *The physics of liquid crystals*, (2nd ed). Clarendon Press, Oxford, 1993, P. 8-117.
- [31] 谢毓章, 液晶物理学. 1998, 北京: 科学出版社, P. 24-58.
- [32] C. W. Oseen, The theory of liquid crystal, *Trans. Faraday Soc.*, 1933, 29: P. 883-889.
- [33] H. Zocher, The effect of a magnetic field on the nematic state, *Trans. Faraday Soc.*, 1933, 29: P. 945-957.

-
- [34] F. C. Frank, On the theory of liquid crystal, Discuss Faraday Soc., 1958, 25. P. 19-28
- [35] E. S. Lee, P. Vetter, T. Miyashita, T. Uchida, 'Orientation of Polymer Molecules in Rubbed Alignment Layer and Surface Anchoring of Liquid Crystals', Jpn. J. Appl. Phys., 1993, 32: P. L1339-L1341.
- [36] X. Nie, Y. H. Lin, T. X. Wu, H. Wang, Z. Ge, and S. T. Wu, 'Polar anchoring energy measurement of vertically-aligned liquid crystal cells', J. Appl. Phys., 2005, 97: P. 013516.
- [37] Y. Iimura, N. Kobayashi, S. Kobayashi, 'A New Method for Measuring the Azimuring Anchoring Energy of a Nematic Liquid Crystal', Jpn. J. Appl. Phys., 1994, 33: P. L434-L436.
- [38] E. S. Lee, T. Uchida, 'Relationship between Azimuthal Surface Anchoring Strength and Chiral Pitch Required for Twisted-Nematic Liquid Crystal Display Without Reverse-Twist Domain', Jpn. J. Appl. Phys., 1994, 33: P. L1420-L1422.
- [39] C. J. Chen, A. Lien, and M. I. Nathan, 'A general method to solve the deformation profile of chiral nematic LCDs with asymmetric pretilt,, in Society for Information Display International Symposium, Orlando, Florida (Society for Information Display, San Jose, Calif., 1995), P. 548-551.
- [40] H. J. Deuling, 'Deformation pattern of twisted nematic liquid crystal layers in an electric field', Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1974, 27: P. 123-131.
- [41] James.E.Anderson, Philip.E.Watson, Philip.J.Bos, 'LC3D liquid crsytal display 3-D director simulator software and technology guide', 2001, Artech house.
- [42] G. H. Gooch and H. A. Tarry, 'The optical properties of twisted nematic liquid crystal structures with twist angles $<90^\circ$ ', J. Phys. D, 1975, 8: P. 1575-1584.
- [43] M. Schadt and W. Helfrich, 'Voltage-dependent optical activity of twisted nematic liquid crystal', Appl. Phys. Lett., 1971, 18: P. 127-128.
- [44] D. W. Berreman, 'Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 matrix formulation', J. Opt. Soc. Am., 1972, 62: P. 502-510; 'Optics in smoothly varying anisotropic planar structure: application to liquid crystal twist cells', J. Opt. Soc. Am., 1973, 63: P. 1374-1380.
- [45] K. H. Yang, 'Elimination of the Fabry-Perot effect in the 4×4 matrix method for inhomogeneous uniaxial media', J. Appl. Phys., 1990, 66: P. 1550-1554.
- [46] H. Wöhler, G. Hass, M. Fritsch, and D. A. Mlynski, 'Faster 4×4 matrix method for inhomogeneous uniaxial media', J. Opt. Soc. Am., 1988, A5: P. 1554-1557.
- [47] H. L. Ong, 'Origin and characteristics of the optical properties of general twist nematic liquid crystal displays', J. Appl. Phys., 1988, 64(2): P. 614-628.
- [48] P. Yeh, 'Extended Jones matrix method', J. Opt. Soc. Am., 1982, 72: P. 507-513.
- [49] C. Gu and P. Yeh, 'Extended Jones matrix method. II', J. Opt. Soc. Am., 1993, A 10: P.

966-973.

- [50] A. Lien, 'Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid-crystal display at oblique incidence', *Appl. Phys. Lett.*, 1190, 57: P. 2767-2769.
- [51] A. Lien and C. J. Chen, 'A new 2×2 matrix representation for twisted nematic liquid crystal displays at oblique incidence', *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, 35: P. L1200-L1203.
- [52] Kanghua Lu and B. E. A. Saleh, 'Reducing Berreman's 4×4 formulation of liquid crystal display optics to 2×2 Jones vector equations', *Opt. Lett.*, 1993, 17: P. 1557-1559.
- [53] D. W. Berreman and T. J. Scheffer, 'Bragg reflection of light from single-domain cholesteric liquid crystal films', *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 25: P. 577-581.
- [54] P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, 2nd Edition, 1993, New York: Oxford University Press.
- [55] W. H. de Jeu, *Physical properties of liquid crystalline materials*, 1980, New York: Gordon and Breach.
- [56] R. L. Sutherland, 'Bragg scattering in permanent nonlinear-particle composite gratings', *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, 8: P. 1516-1525.
- [57] S. T. Wu and D. K. Yang, *Reflective Liquid Crystal Displays*, 2001, New York: Wiley.
- [58] Q. Hong, T. X. Wu, and S. T. Wu, "Optical wave propagation in a cholesteric liquid crystal using the finite element method," *Liq. Crystals*, 2003, 30: P. 367-375.
- [59] S. Huard, *Polarization of Light*, 1997, New York: Wiley.
- [60] T. H. Yoon, G. D. Lee, and J. C. Kim, "Nontwist quarter-wave liquid crystal cell for a high-contrast reflective display," *Opt. Lett.*, 2000, 25: P. 1547-1549.
- [61] Y. Iwamoto, Y. Toko, H. Hiramoto, and Y. Iimura, "Improvement of transmitted light efficiency in SHLCDs using quarter-wave retardation films," *Soc. Inf. Display Tech. Digest*, 2000, 31: P. 902-905.
- [62] T. Ishinabe, T. Miyashita and T. Uchida, "Design of a quarter wave plate with wide viewing angle and wide wavelength range for high quality reflective LCDs," *Soc. Inf. Display Tech. Digest*, 2001, 32: P. 906-909.
- [63] S. Pancharatnam, 'Achromatic combinations of birefringent plates: Part I. An achromatic circular polarizer', *Proc. Indian Acad. Sci., Section A*, 1955, 41: P. 137-144.
- [64] S. J. Roosendaal, B. M. I. van der Zande, A. C. Nieuwkerk, C. A. Renders, J. T. M. Osenga, C. Doornkamp, E. Peeters, J. Bruinink, J. A. M. M. van Haaren, and S. Takahashi, 'Novel high performance transreflective LCD with a patterned retarder', *SID Tech. Dig.*, 2003, 34: P.78-81.
- [65] F. H. Yu, J. Chen, S. T. Tang, H. S. Kwok, 'Reflective twisted nematic liquid crystal displays. II. Elimination of retardation film and rear polarizer', *J. Appl. Phys.*, 1997, 82(11): P. 5287-5294.
- [66] I. C. Khoo, F. Simoni, *Physics of Liquid Crystalline Materials*, 1991, London, Gordon and

- Breach Science, P. 337-340.
- [67] S. T. Wu, 'Birefringence dispersions of liquid crystal', *Phys. Rev. A*, 1986, 33: P. 1270-1274.
 - [68] S. T. Wu, 'A semiempirical model for liquid crystal refractive index dispersions', *J. Appl. Phys.*, 1991, 69(4): P. 2080-2087.
 - [69] S. T. Wu and A. M. Lackner, 'Mylar-film-compensated π and parallel-aligned liquid crystal cells for direct-view and projection displays', *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(16): P. 2047-2049.
 - [70] S. T. Wu and C. S. Wu, 'A biaxial film-compensated thin homogeneous cell for reflective liquid crystal display', *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(8): P. 4096-4100.
 - [71] T. Ogawa, S. Fujita, Y. Iwai, et al, 'The trends of reflective LCDs for future electronic paper', *SID'98 Digest*, 1998, P. 217-220.
 - [72] A. R. Kmetz, 'A single-polarizer twisted nematic display', *Proc. SID*, 1980, 21: P. 63-66.
 - [73] S.-T. Wu and D.-K. Yang, *Reflective Liquid Crystal Displays*, 2001, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
 - [74] F. J. Kahn, 'Reflective mode, 40-character, alphanumeric twisted-nematic liquid crystal displays', *SID Tech. Dig.*, 1978, 9: P. 74-77.
 - [75] W. H. McKnight, L. B. Stotts, and M. A. Monahan, 'Transmissive and reflective liquid crystal display', Feb. 9, 1982, US patent 4,315,258.
 - [76] S. T. Wu and C. S. Wu, 'Comparative studies of single-polarizer reflective liquid crystal displays', *J. SID*, 1999, 7: P. 119-121.
 - [77] T. H. Yoon, G. D. Lee, G. H. Kim, S. C. Kim, W. S. Park, J. C. Kim, and S. H. Lee, 'Reflective liquid crystal display using 0° -twisted half-wave cell', *SID Tech. Dig.*, 2000, 31: P. 750-753.
 - [78] K. Lu, and B. E. A. Saleh, 'Complex Amplitude Reflectance of the Liquid Crystal Light Valve', *Appl. Opt.*, 1991, 30: P. 2354-2362.
 - [79] S. T. Wu and C. S. Wu, 'Mixed twisted-nematic mode for reflective liquid crystal displays', *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68: P. 1455-1457.
 - [80] C. L. Kuo, C. K. Wei, S. T. Wu, and C. S. Wu, 'Reflective display using mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell', *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, 36: P. 1077-1080.
 - [81] C. L. Kuo, M. S. Shieh and S. H. Chen, 'Wide-Viewing-Angle Reflective LCD Using a Film-compensated HAN Cell with Single Polarizers', *Asia Display'95*, 1995, P. 135-138.
 - [82] T. Uchida, T. Nakayama, T. Miyashita, et al, 'A Novel Reflective LCD for High Resolution Color Display', *Asia Display'95*, 1995, P. 599-602.
 - [83] T. Uchida, T. Ishinabe, M. Suzuki, 'A Bright Reflective LCD Using Optically compensated Bend Cell with Gray-Scale Capability and Fast Response', *SID'96 Digest*, 1996, P. 618-621.

- [84] M. F. Schiekkel and K. Fahrenschon, 'Deformation of nematic liquid crystals with vertical orientation in electric fields', *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 19: P. 391-393.
- [85] A. Takeda, S. Kataoka, T. Sasaki, H. Chida, H. Tsuda, K. Ohmuro, Y. Koike, T. Sasabayashi, and K. Okamoto, 'A super-high-image-quality multi-domain vertical alignment LCD by new rubbing-less technology', *SID Tech. Dig.*, 1997, 29: P. 1077-1080.
- [86] K. Ohmuro, S. Kataoka, T. Sasaki, and Y. Koike, 'Development of super-high-image-quality vertical alignment-mode LCD', *SID Tech. Dig.*, 1997, 28: P. 845-848.
- [87] H. Wang, T. X. Wu, X. Zhu, and S. T. Wu, 'Correlations between liquid crystal director reorientation and optical response time of a homeotropic cell', *J. Appl. Phys.*, 2004, 95: P. 5502-5508.
- [88] S. H. Lee et al., 'Homeotropically aligned nematic liquid crystal device locked by a polymer wall with wide viewing angle', *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86: P. 031108
- [89] 黄锡珉, LCOS 技术的发展, *液晶与显示*, 2002, 17 (1): P. 1-5.
- [90] P. M. Alt, 'Single crystal silicon for high resolution displays', *Conference record of the International Display Research Conference.*, 1997, M19-28.
- [91] H. Kurogane, K. Doi, T. Nishihata, A. Honma, M. Furuya, S. Nakagaki, and I. Takanashi, 'Reflective AMLCD for projection displays', *SID Tech. Dig.*, 1998, 29: P. 33-36.
- [92] 黄锡珉, 液晶显示技术发展轨迹, *液晶与显示*, 2003, 18 (1): P. 1-6.
- [93] S. T. Wu, 'Film-compensated homeotropic liquid-crystal cell for direct view display', *J. Appl. Phys.*, 1994, 76 (10): P. 5975-5980.
- [94] S. T. Wu, C. S. Wu and K. W. Lin, Chiral-homeotropic liquid crystal cells for high contrast and low voltage displays., *J. Appl. Phys.*, 1997, 82: P. 4795-4799.
- [95] Ju-Hyun Lee, Zhibing Ge, and S. T. Wu, 'Electro-optic properties of a homeotropic liquid crystal cell with 90° surface rubbings and a reverse-handed chiral dopant', *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90: P. 201108.
- [96] Jy-Shan Hsu Bau-Jy Liang Shu-Hsia Chen, 'Bistable chiral tilted-homeotropic nematic liquid crystal cells', *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85: P. 5511-5513.
- [97] Shu-Hsia Chen, 'Flow effect in the chiral-homeotropic liquid-crystal cell', *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75: P. 3491-3493.
- [98] Shu-Hsia Chen and Li-Yi Chen, 'Homeotropic liquid-crystal device with two metastable states', *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74: P. 3779-3781.
- [99] L. Y. Chen, 'Dynamics of the Chiral-Homeotropic Liquid Crystal Displays', *SID Symposium Digest*, 1999, 30: P. 636-639.
- [100] Seong-Woo Suh, 'Reflective homeotropic mode in a twisted nematic liquid crystal', *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73: P. 1062-1064.
- [101] S. T. Wu, 'A Chiral-Homeotropic Cell for 2.5-V TFT-LCD Operation', *SID Symposium*

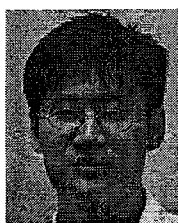
- Digest, 1998, 29: P. 754-757.
- [102] A. Lien, 'Extended Jones Matrix Representation for the Twisted Nematic Liquid Crystal Display at Oblique incidence', *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57: P. 2767-2769.
- [103] Zhibing Ge, Thomas X. Wu, Xinyu Zhu, et al., 'Reflective Liquid Crystal Displays with Asymmetric Incident and Exit Angles', *Opt. Soc. Amer. A.*, 2005, 22: P. 966-977.
- [104] X. Zhu, Z. Ge, T. X. Wu, and S. T. Wu, 'Transflective liquid crystal displays', *J. Disp. Technol.*, 2005, 1: P. 15-29.
- [105] R. D. Ketchpel and S. Barbara, 'Transflector', Aug. 9, 1977, US patent 4,040,727.
- [106] H. C. Borden, Jr., 'Universal transmission reflectance mode liquid crystal display', July 24, 1973, US patent 3,748,018.
- [107] J. E. Bigelow, 'Transflective liquid crystal display', June 6, 1978, US patent 4,093,356.
- [108] H. Furuhashi, C. K. Wei, and C. W. Wu, 'Transflective liquid crystal display having dielectric multilayer in LCD cells', Oct. 19, 2004, US patent 6,806,934.
- [109] D. R. Hall, 'Transflective LCD utilizing chiral liquid crystal filter/mirrors', Nov. 24, 1998, US patent 5,841,494.
- [110] D. P. Hansen and J. E. Gunther, 'Dual mode reflective/transmissive liquid crystal display apparatus', Nov. 16, 1999, US patent 5,986,730.
- [111] J. Ouderkirk, S. Cobb, Jr., B. D. Cull, M. F. Weber, and D. L. Wortman, 'Transflective displays with reflective polarizing transflector', Sept. 26, 2000, US patent 6,124,971.
- [112] H. S. Cole, 'Transflective liquid crystal display', Aug. 16, 1983, US patent 4,398,805.
- [113] Y. P. Huang, X. Zhu, H. Ren, Q. Hong, T. X. Wu, S. T. Wu, S. H. Lin, and H. P. Shieh, 'Full-color transflective Ch-LCD with image-enhanced reflector', *SID Tech. Dig.*, 2004, 35: P. 882-885.
- [114] Y. P. Huang, X. Zhu, H. Ren, Q. Hong, T. X. Wu, S. T. Wu, M. Z. Su, M. X. Chan, S. H. Lin, and H.-P. Shieh, 'Full-color transflective cholesteric LCD with image-enhanced reflector', *J. SID*, 2004, 12: P. 417-420.
- [115] W. H. McKnight, L. B. Stotts, and M. A. Monahan, 'Transmissive and reflective liquid crystal display', Feb. 9, 1982, US patent 4,315,258.
- [116] T. Maeda, T. Matsushima, E. Okamoto, H. Wada, O. Okumura, and S. Iino, 'Reflective and transflective color LCDs with double polarizers', *J. SID*, 1999, 7: 9-13.
- [117] H. Molsen and M. D. Tillin, 'Transflective liquid crystal displays', International patent application No. PCT/JP99/05210; Mar. 30, 2000, International publication No. WO 00/17707.
- [118] S. J. Roosendaal, B. M. I. van der Zande, A. C. Nieuwkerk, C. A. Renders, J. T. M. Osenga, C. Doornkamp, E. Peeters, J. Bruinink, J. A. M. M. van Haaren, and S. Takahashi, 'Novel high performance transflective LCD with a patterned retarder', *SID Tech. Dig.*, 2003, 34: P. 78-81.

- [119] T. Uesaka, E. Yoda, T. Ogasawara, and T. Toyooka, 'Optical design for wide-viewing-angle transfective TFT-LCDs with hybrid aligned nematic compensator', Proceedings of the 9th International Display Workshops, 2002, P. 417-420.
- [120] S. H. Lee, K. H. Park, J. S. Gwag, T. H. Yoon, and J. C. Kim, 'A multimode-type transfective liquid crystal display using the hybrid-aligned nematic and parallel-rubbed vertically aligned modes', Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, 2003, 42: P. 5127-5132.
- [121] Y. J. Lim, J. H. Song, Y. B. Kim, and S. H. Lee, 'Single gap transfective liquid crystal display with dual orientation of liquid crystal', Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 2004, 43: P. L972-L974.
- [122] S. H. Lee, H. W. Do, G. D. Lee, T. H. Yoon, and J. C. Kim, 'A novel transfective liquid crystal display with a periodically patterned electrode', Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 2003, 42: P. L1455- L1458.
- [123] J. H. Song and S. H. Lee, 'A single gap transfective display using in-plane switching mode', Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 2004, 43: P. L1130- L1132.
- [124] M. Shibazaki, Y. Ukawa, S. Takahashi, Y. Iefuji, and T. Nakagawa, 'Transfective LCD with low driving voltage and wide viewing angle', SID Tech. Dig., 2003, 34: P. 90-93.
- [125] C. L. Yang, 'Electro-optics of a transfective liquid crystal display with hybrid-aligned liquid crystal texture', Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, 2004, 43: P. 4273-4275.
- [126] T. B. Jung, J. C. Kim, and S. H. Lee, 'Wide-viewing-angle transfective display associated with a fringe-field driven homogeneously aligned nematic liquid crystal display', Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 2003, 42: P. L464- L467.
- [127] T. B. Jung, J. H. Song, D. S. Seo, and S. H. Lee, 'Viewing angle characteristics of transfective display in a homogeneously aligned liquid crystal cell driven by fringe-field', Jpn. J. Appl. Phys., Part 2, 2004, 43: P. L1211-L1213.
- [128] Z. Ge, X. Zhu, and S. T. Wu, 'A transfective liquid crystal display using an internal wire grid polarizer', J. Disp. Technol., 2006, 2: P. 102-105.
- [129] K. Fujimori, Y. Narutaki, Y. Itoh, N. Kimura, S. Mizushima, Y. Ishii, and M. Hijikigawa, 'New color filter structures for transfective TFT-LCD', SID Tech. Dig., 2002, 33: P.1382-1385.
- [130] K. J. Kim, J. S. Lim, T. Y. Jung, C. Nam, and B. C. Ahn, 'A new transfective TFT-LCD with dual color filter', Proceedings of the 9th International Display Workshops, 2002, P. 433-436.
- [131] A. Lien, H. Takano, 'Cell gap measurement of filled twisted nematic liquid crystal displays by a phase compensation method', J. Appl. Phys., 1991, 69: P. 1304-1309.
- [132] A. Lien, 'Simultaneous measurement of twist angle and cell gap of a twisted nematic cell by an optical method', IDRC '91, 1991: P. 192-194.
- [133] X. Shao, T. Yu, Z. Wang, J. Yuan, et al., 'A new method to measure thickness of twist

- nematic liquid crystal cells', EuroDisplay'96, 1996: P. 309-312.
- [134] S. T. Tang, H. S. Kwok, Reflective method of LCD measurement, IDW '00, 2000, P. 109-111.
- [135] S. T. Tang, H. S. Kwok, 'A new method to measure twist angle and cell gap of LC cells', SID '98 Dig., 1998, P. 552-555.
- [136] M. Bosma, Method of Determination of Retardation and Twist Angle of Twisted Birefringent Layers, 1997, Deventer, The Netherlands: Akzo Nobel.
- [137] T. Inoue, 'Method of measuring thickness of liquid crystal cells', 1993-08-24, US, 5239365.
- [138] 申溯,余俊. 一种反射式扭曲向列型液晶显示优化设计的新方法, 光子学报, 2005, 34(4): P. 520-524.
- [139] 袁明辉,张明德,孙小菡. 偏振模色散对非线性光纤环镜微波光子开关的影响及其补偿, 光子学报, 2006, 35(7): P. 1008-1012.
- [140] S. Huard, Polarization of light, 1996, New York: Wiley.
- [141] H. Hurwitz, R. C. Jones, A New calculus for the treatment of optical systems- II : Proof of three general equivalent theorems, J. Opt. Soc. Amer., 1941, 31: P. 493-499.

附 录

一、 崔宏青个人简历



崔宏青，男，1981年10月5日出生于山东省德州市。1999年~2003年在山东省烟台师范学院（现更名为鲁东大学）物理系学习，获理学学士学位。2003年考入长春光学精密机械与物理研究所光学工程专业攻读硕士学位，2005年直博，就读光学工程专业，在凌志华研究员的指导下，从事液晶显示器件的光学模拟计算与器件参数的最佳化研究，期间参与了中日合作项目《新一代偏振片的研究》和国家973项目《反射式硅上液晶微显示器件与材料的研究》，是课题的主要参与者和研究成员。

二、 崔宏青在攻读博士学位期间发表的论文目录

1. 崔宏青，宋玉龙，刘绍锦，张俊瑞，冯亚云，凌志华，多维液晶指向矢的数值模拟计算，液晶与显示，2006年，第21卷（2）：P.107-112.
2. 崔宏青，凌志华，扭曲向列相 LCoS 显示模式的优化设计分析，液晶与显示，2007年，第22卷（4）：P.440-447.
3. 崔宏青，凌志华，傅里叶分析法求 Stokes 矢量测量扭曲向列相液晶盒盒厚和扭曲角，电子器件，2008年，第31卷（1）：P.87-91.
4. Hong-Qing Cui, Zhi-Hua Ling, The Cell Thickness and Twist Angle Measurement of Twist Nematic Liquid Crystal Cell by Rotation of a Quarter-wave Plate Using Fourier Analysis Method, Proceedings of Asia Display 2007 Vol.2, P.1138-1143.
5. 崔宏青，陈冬静，任娇燕，冯亚云，凌志华，一种快速测量扭曲向列相液

- 晶盒盒厚的新方法, 光子学报, 接收.
6. 崔宏青, 冯亚云, 陈冬静, 任娇燕, 凌志华, 平行-混合排列透反式液晶显示模式的原理研究, 光子学报, 接收.
 7. 崔宏青, 冯亚云, 陈冬静, 任娇燕, 凌志华, 单倍盒厚间距垂直排列和混合排列半透半反式液晶显示模式, 液晶与显示, 接收.
 8. Hong-Qing Cui, Zhi-Hua Ling, Optimized Configuration for Horizontally Switching Single Polarizer Non-Twist Reflective LCD, 2006 中国平板显示会议论文集, P.78-81.
 9. 崔宏青, 凌志华, 应用于 LCoS 的高反射率向列相常白混合效应模式, 2006 中国平板显示会议论文集, P.229-232.
 10. 崔宏青, 冯亚云, 陈冬静, 任娇燕, 吴双红, 凌志华, 消色差反射式手性垂直排列液晶显示模式的特性研究, 2008 中国平板显示会议论文集, P.84-87.
 11. 陈冬静, 崔宏青, 冯亚云, 任娇燕, 凌志华, 一种新的测量向列相液晶盒厚和扭曲角的 Stokes 矢量法, 液晶与显示, 2007 年, 第 22 卷 (6): P. 662-667.
 12. 宋玉龙, 刘绍锦, 崔宏青, 张俊瑞, 冯亚云, 凌志华, 一种新型硅基液晶微显示像素电路的研究, 液晶与显示, 2005 年, 第 20 卷 (4): P. 328-332.
 13. 刘绍锦, 宋玉龙, 张俊瑞, 崔宏青, 凌志华, 冯亚云, 改进的极向锚定强度测量方法, 液晶与显示, 2006 年, 第 21 卷 (1): P. 15-18.
 14. 张俊瑞, 马志华, 刘绍锦, 宋玉龙, 崔宏青, 冯亚云, 凌志华, 预倾角对超扭曲向列相液晶显示的影响, 液晶与显示, 2006 年, 第 21 卷 (2): P. 145-148.

致 谢

在此论文完成之际，我以诚挚的心情向我的导师凌志华研究员表示衷心的感谢。在论文完成过程中，凌志华老师给予了悉心的指导和有力的支持，使我顺利地完成了课题研究工作。凌老师严谨的治学态度、渊博的知识、真诚谦逊的品格以及对学科发展敏锐的洞察力和平易近人的工作作风给我留下了深刻的印象，这将对我以后的学习与工作产生深远的影响，在此谨向凌老师表示最衷心的感谢和最崇高的敬意。

感谢实验室的师兄宋玉龙、刘绍锦；师姐冯亚云；同学张俊瑞；师弟安凯、张文；师妹陈冬静、任娇燕、吴双红在学习、工作以及论文完成过程中的帮助。与你们进行探讨和实验，给我很多有益的启发，一起工作的日子是永远值得珍惜和难忘的。

在就读研究生期间，得到了研究生部金东明老师、李海老师、侯小贞老师、魏洪老师关心和帮助，在此深表谢意。

感谢我的妻子连科研陪我走过多年的求学之路，并在生活中给予我很多的关怀和鼓励。

感谢二十多年来一直默默支持和鼓励我的父母，感谢你们对我的学业给予的支持，离开你们的支持，很难想象我能如此顺利的完成论文，祝你们身体健康。

最后，再一次对所有在生活、工作和学习方面给予我大力支持和帮助的人们表示衷心的感谢。