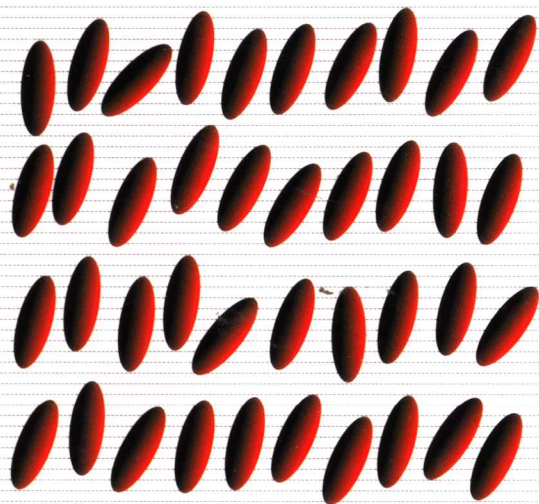


研究生系列规划教材

# 液晶显示原理

Principle of Liquid Crystal Display

黄子强 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

### 图书在版编目(CIP)数据

液晶显示原理 / 黄子强编著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 1

研究生系列规划教材

ISBN 7-118-04083-5

I. 液... II. 黄... III. 液晶显示器 - 研究生 - 教材 IV. TN141.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 088486 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

开本 710 × 960 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$  333 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1-4000 册 定价: 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行传真: (010) 68411535

发行邮购: (010) 68414474

发行业务: (010) 68472764

# 序 言

从 20 世纪 80 年代历时至今的二十多年来,信息电子科学技术的发展令人瞩目。以无线通信和互联网技术为代表的现代信息电子科技极大地促进了经济、社会的发展,并深刻地改变了人类生活。如今,信息电子技术不仅自身已蓬勃发展为强大的新兴产业,它对各传统产业在技术进步上的促进也是有目共睹的。而在国防建设和军事技术的发展中,信息电子技术的重要性更为突出,因为现代化战争最关键的环节就是信息的获取、控制与对抗等电子技术的较量。

正因为迅猛发展的信息电子技术对当今社会发展具有如此重要的意义,因此,国内各高校都极其重视信息电子类相关学科的发展、相关专业的成长和相关专业教学水平的提高。而在这一巨大的努力和付出中,研究生教育质量的提升和研究生教材建设则是至关重要的一环。

电子科技大学正是基于上述认识,近年来加大了电子信息类教材建设的力度。我校的学科专业涵盖了从电子材料、电子器件、电路、信号、控制直到各种电子系统的较为完整的电子信息领域,学校极为重视国内外研究生课程的设置和教材内容的比较研究,并建立了专项基金,用于资助具有一定学术水平的研究生教材的编写与出版。

当然,教材建设也是一项学术性很强的工作。研究生教材既要体现理论上的基础性和系统性,又要尽可能地反映本领域研究的最新成果和进展,要求较高。另一方面,高校的骨干师资力量大多既要承担繁重的科研工作,又要承担大量的教学任务,加之各位教授的专业背景不同,教材的最终质量和使用效果仍需通过实践去检验。因此,我们诚恳希望使用这些教材的各个院校的广大师生直言批评,不吝指正,使我校的教材建设能够越做越好。

电子科技大学  
二〇〇五年十月十九日

## 前 言

液晶的发现到当今液晶显示器件的如此大规模的应用,经历了近 120 年。在早期,人们对液晶进行研究的目的是主要是想扩大和加深对于物质结构的认识。随着认识的积累,特别是当 RCA 公司的 F. Heimeier 博士将液晶材料成功地用于显示器件以后,人们的研究热情开始转向应用。而现在,液晶显示已经成为平板显示的主流技术,液晶显示器件正在进入蓬勃发展的时期。当我们这些后人享受人类对于液晶长期研究而获得的成果的时候,特别要铭记历史上在液晶及相关领域研究的先驱们。正是他们对于这种特殊凝聚态物质长期不懈的探索,才使液晶有了应用的基础,而以应用为目的的研究才产生了液晶显示和液晶光电子领域的产业。从发现到发展,从纯粹科学研究到科学研究与应用研究并重,再到工业化应用,液晶及相关产业发展的历史再现了科研到应用的客观规律,是量变到质变的最好例证,也再现了从科学研究到工业应用的长期而艰苦的探索历程。

从 20 世纪 80 年代开始,液晶开始为工商界带来利润,工商界为了取得更多的利润,又为液晶的研究注入了更多的经费。这是历史上并不多见的“优美成长”模式,令人鼓舞的是,这种模式还在继续之中。然而遗憾的是,这样的优美成长并没有在中国发生。当液晶的应用研究在中国和日本几乎同时起步的时候,中国产业界热衷于引进,在液晶相关科研工作的投入经费极其有限。而到了韩国后来居上,在以有源矩阵液晶显示器为代表的高级技术方面远远超过中国时,不禁感到中国液晶行业的无奈。但有一点值得骄傲,就是中国液晶产业的 120 多家工厂和公司在中低档液晶显示器件的市场占有率达到世界市场的 80% 以上,这是我国液晶行业的希望所在。在此期间,若干作者写出了液晶显示技术方面的专著,从液晶化学、液晶物理、液晶显示器件及其制造工艺、驱动和周边电路等各个层面介绍了与液晶相关的基本知识和应用知识,其内容至今仍是液晶行业的经典之作。还有很多科研工作者多年来一直从事与液晶显示有关的工作,发表了许多重要文章。包括上述著作及文献在内的国内外出版的书籍和资料,加上作者自己的研究体会构成本书的基础。

本书以连续弹性体理论作为指向矢计算的基础,以广义琼斯矩阵为工具来

追踪光波在液晶中的传播,辅以数值分析方法。有了这个基础,液晶显示器件绝大多数显示模式的电光性质都可以计算出来,由此构成液晶显示器件的设计基础。驱动电路和有源矩阵两部分涉及到液晶显示器件的应用,则以双向传输门为核心。只要抓住了上述“纲”,多数问题都能迎刃而解。全书分为5章。第一章试图建立起液晶的微观图像、宏观性质和物理模型,重点放在以连续弹性体理论及其数值计算上。第二章引入泡利矩阵和广义琼斯矩阵,以此为工具推出液晶的光学性质。第三章介绍液晶的电光效应,基于前两章的内容介绍和分析液晶常见的电光效应。第四章介绍液晶显示器件的驱动电路,分析液晶显示器件的特点,阐述其工作原理,结合商品集成电路介绍驱动电路的构成。第五章以有源矩阵为核心,介绍有源矩阵基本单元的材料、结构和器件特性,结合液晶器件的特点分析实际有源矩阵与驱动电路结合时所出现的问题和解决办法。

考虑到本科生和研究生的学时有限,以及本书的读者对象是物理类专业的学生和显示器件的研究人员,因此本书没有涉及液晶化学以及与液晶显示关系不大的内容。又由于液晶显示器件工艺方面的内容已包含于许多书籍之中,本书仅作了简单介绍。对于课程而言,工艺部分相对容易一些,可指定参考书目将其列为自学内容,辅以一两个学时的讲解。此外,作者在编写这本书的时候,虽然主要考虑如何符合课程的要求,但是也想给读者提供一本能有助于日后工作的参考书籍,因此在内容上比规定的学时数要求的多了一些,各校可以根据学生的专业背景和需求予以删简。

虽然本书的编写参考了大量的文献和书籍,但是难免挂一漏万,因此也希望读者批评指正,以便有机会修正。

从1987年作者在电子科技大学开授“液晶显示技术”的本科生课程开始,就计划为他们编写一本讲义,但是由于种种原因没有付印。弹指一挥,20年的时间就要匆匆过去了,液晶界的朋友们一直在鼓励我把讲稿整理出来,加之得到了“电子科技大学研究生教材建设基金”的资助,相关部门的支持,这些都对本书的出版起到了督促的作用,在此一并致谢。

最后要提及的是家人的支持与合作。该书耗费了作者大量的闲暇时间,这些时间本来应该是陪在母亲、妻子和孩子身边的。本书的完成,对他们也算是有了一个交待。

编者

2005年7月于电子科技大学东院

## 内 容 简 介

本书以连续弹性体理论作为指向矢计算的主线,以广义琼斯矩阵为工具来追踪光波在液晶中的传播,系统介绍液晶显示器件的原理、设计方法和电路驱动。全书共分为5章。前三章建立液晶显示器件的理论基础和设计、分析方法,通过介绍其显示模式,为液晶显示器件的设计打下基础。后面两章介绍液晶显示器件的驱动技术,包括纯矩阵器件驱动和有源矩阵器件两个方面,结合液晶器件的特点分析实际有源和无源矩阵与驱动电路结合时所出现的问题和解决办法。考虑到本书的读者是物理类专业的学生和显示器件的研究人员,本书没有涉及液晶化学方面的内容。

本书的读者对象是物理类(包括光学类和电子类)专业的学生以及与液晶、平板显示研究有关的科技人员。

# 目 录

第一章 液晶显示物理基础	1
第一节 液晶的基本概念	1
一、液晶的结构特点	2
二、液晶的宏观对称性	4
三、液晶的相变	7
四、液晶的介电各向异性和折射率各向异性	8
五、显示用向列相液晶材料的回顾与展望	10
第二节 取向有序性的描述和测量	11
一、取向有序度	11
二、取向有序度的测量	15
第三节 向列型液晶的平均场理论	20
第四节 液晶的连续弹性体理论	27
一、液晶的弹性性质	27
二、作为连续弹性媒质考虑时液晶的自由能	29
三、液晶处于电场或磁场中自由能密度	31
四、用连续弹性体理论对液晶指向矢分布进行计算	33
第五节 液晶指向矢分布的数值计算方法	38
一、理论基础	38
二、牛顿法求解欧拉方程简介	41
三、张弛法求解欧拉方程简介	42
四、差分迭代法	42
五、牛顿法、张弛法以及差分迭代法的比较	44
第六节 混合液晶材料及其特性测量	48
一、混合液晶材料	48
二、液晶的材料参数测量	56
第七节 液晶显示器的表面定向技术	60
一、液晶显示器的结构	60

二、液晶分子在边界上的锚定 .....	62
三、基片表面的定向处理 .....	67
<b>第二章 液晶的光学性质 .....</b>	<b>75</b>
<b>第一节 偏振光的产生和叠加 .....</b>	<b>75</b>
一、偏振光的产生 .....	76
二、偏振光的叠加与干涉 .....	79
<b>第二节 双折射现象及分析法 .....</b>	<b>82</b>
一、基本概念 .....	82
二、折射率椭球 .....	83
三、波片 .....	85
四、偏振光与波片的矩阵分析法 .....	86
<b>第三节 液晶在偏光显微镜下呈现的光学性质 .....</b>	<b>91</b>
一、平行偏振光下的干涉现象 .....	91
二、双折射率的测定 .....	94
<b>第四节 螺旋排列液晶相的光学性质 .....</b>	<b>99</b>
<b>第五节 斜入射光波在液晶中的传播 .....</b>	<b>107</b>
一、LCD 的计算模型 .....	108
二、入射矩阵和折射矩阵中各元素的表达形式 .....	110
三、特殊情况下的液晶层的琼斯矩阵表达 .....	112
四、空气—偏振片—玻璃—液晶之间的边界透射公式 .....	114
<b>第三章 液晶的电光效应 .....</b>	<b>116</b>
<b>第一节 电控双折射效应 .....</b>	<b>116</b>
一、使液晶指向矢转向的阈值——Friedericksz 转变电压 .....	116
二、外加电压大于阈值时倾角与位置的关系 .....	120
三、液晶的电控双折射效应 .....	122
<b>第二节 扭曲向列型液晶显示器 .....</b>	<b>127</b>
一、TN-LCD 的基本构成及原理 .....	128
二、零电场正入射条件下 TN-LCD 的透过特性 .....	130
三、外电场下 TN-LCD 的阈值问题 .....	133
四、TN-LCD 的视角特性、多路驱动特性和时间响应特性 .....	135
<b>第三节 超扭曲与高扭曲液晶显示器 .....</b>	<b>140</b>
一、超扭曲液晶显示器的基本概念 .....	140
二、广义扭曲向列液晶显示器的配置参数计算 .....	144
三、超扭曲液晶显示器的黑白化技术 .....	149



第四节	宾主效应与相变效应·····	153
一、	宾主效应·····	154
二、	相变效应·····	161
第五节	其他类型的液晶显示器·····	166
一、	铁电液晶显示器·····	166
二、	聚合物-液晶复合材料所构成的显示器·····	171
第六节	液晶的弛豫特性·····	180
一、	介电弛豫性质·····	180
二、	液晶分子在外场下的转向弛豫·····	185
<b>第四章</b>	<b>LCD 的电路驱动技术</b> ·····	<b>189</b>
第一节	液晶平面显示器件的寻址方式·····	189
一、	字段显示器的静态寻址方式和动态寻址方式·····	189
二、	文字、图形的动态寻址·····	194
三、	液晶空间光调制器·····	197
四、	液晶显示器件的电子束寻址·····	198
第二节	液晶显示矩阵的 RMS 驱动·····	199
一、	扫描方式寻址的最佳驱动电压和最佳偏压比·····	199
二、	液晶显示器的驱动波形·····	202
三、	偏压比·····	207
四、	复线寻址技术·····	209
五、	双幅矩阵和双重矩阵·····	211
六、	特殊图案的矩阵显示·····	213
七、	液晶单元的频率响应对显示的影响·····	213
第三节	灰度图像的显示·····	215
一、	面积灰度调制法和帧分解调制法·····	216
二、	脉宽调制法·····	217
三、	实现连续灰度显示的主动矩阵驱动技术·····	218
第四节	LCD 专用驱动集成电路·····	225
一、	用于笔段显示的动态驱动 LCD 专用 IC 例·····	225
二、	矩阵显示 LCD 的驱动电路实例·····	229
三、	LCD 模块的构成·····	236
<b>第五章</b>	<b>有源矩阵液晶显示器及相关技术</b> ·····	<b>242</b>
第一节	二端子有源矩阵·····	242
一、	二极管有源矩阵·····	246

二、金属—绝缘体—金属(MIM)与 LCD 串联所构成的二端子 有源矩阵 .....	249
三、ZnO 非线性电阻构成的 AM-LCD .....	255
第二节 三端有源矩阵 LCD 器件工作原理 .....	256
一、三端有源矩阵液晶显示器件的结构和工作原理 .....	258
二、实际 TFT-LCD 设计时应考虑的问题 .....	262
第三节 TFT-LCD 的结构与制造方法 .....	267
一、TFT 的结构与制造方法 .....	268
二、TFT-LCD 使用的宽视角技术 .....	271
第四节 有源矩阵 LCD 的驱动 .....	277
一、TFT-LCD 驱动电路原理 .....	277
二、TFT-LCD 驱动电路例 .....	282

# 第一章 液晶显示物理基础

液晶是分子排布或指向具有某种规律的流体。一方面,它的力学性质、电学性质、磁学性质和光学性质都呈现与排列有关的类似于晶体的各向异性;另一方面,它又具有与普通液体类似的流动性。虽然液晶结合了液体和晶体的性质,但是又展示出不同于晶体和液体的、非常特殊的电光学和磁光学特性,正因为如此,才使它不同于晶体和液体,在显示领域中大显身手,受到越来越多的人的关注。

## 第一节 液晶的基本概念

物质由固体向液体的相变是我们熟悉的现象,冰在  $0^{\circ}\text{C}$  开始转变成水就是物质相变的典型例子。固体向液体的相变伴随着构成固体的点阵结构的彻底破坏。在这个过程中物质的温度并不升高,外界提供的热能被吸收,用于提供瓦解晶体点阵结构所需的能量。某些有机物的晶体,通常是由各向异性分子所构成的晶体,它们在由固体向液体的转变过程中会生成一种性质介于晶体和液体之间的中间相,称之为介晶相。例如,随着温度的升高,晶体中的分子之间结合开始松弛,分子指向可以任意转动,但是分子还保持着在点阵中的位置;温度进一步升高才熔融成各向同性的液体。这种介晶相称为塑性晶体。塑性晶体丧失一部分各向异性的同时,还保持着晶体的外形。还有一类有机晶体在熔融中,随着温度的升高,分子之间的结合开始解体,分子的位置不在点阵上而是随机地排列,但是分子的指向保持不变。宏观地,这种有机晶体熔化具有流动性,但其性质仍然像晶体一样呈各向异性;然后随温度进一步升高才使其成为真正的、各方向的物理性能都一样的各向同性的液体。这种介晶相称为液晶。液晶的对称性比原晶体都有不同程度的削弱。

液晶的特点是构成液晶的分子指向有规律,而分子之间的相对位置无规律。前者使液晶具有晶体才具有的各向异性,后者使之具有液体才具有的流动性。它是介晶相中的一种,在显示中占有重要地位,有的书把介晶相和液晶相混为一谈。

上面的例子中,利用热量来瓦解某些物质的晶体点阵结构,使之在某一温度范围表现出液晶性质。能够在某一温度范围表现出液晶性质的材料叫做热致液晶材料,也常简称为热致液晶。有些有机物溶解于各向同性的液体中,溶剂瓦解了物质的晶体点阵结构,在一定浓度范围也能够得到液晶相,这样获得的液晶相叫做溶致液晶。典型的溶致液晶是浓肥皂液。溶致液晶主要与生命活动有关,溶致液晶的研究常常与生物的研究结合在一起。

在光电子技术包括显示器件方面用到的都是热致液晶,因此,本书中以后提到的液晶就是指热致液晶。

## 一、液晶的结构特点

目前还没有方法来肯定地预见哪种分子结构的材料会出现液晶相,但是从晶格能量的观点可以猜想哪种形状分子会出现液晶相。塑性晶体的分子在点阵上的自由转动先于晶格的解体,这就说明分子自由转动所需的能量小于晶格解体的能量,换句话说,就是分子的形状使得分子比较容易转动。球形分子容易在点阵上转动,所以组成塑性晶体的分子的形状绝大部分是球形的和接近球形的;而液晶相中,分子不容易转动,即使晶格解体以后分子还是不能自由转动,所以分子的形状是使其具有一定的指向性而不容易自由转动的长棒状。

常见的液晶分子具有两个特点:第一,分子是细长的;第二,分子是刚性的。液晶分子的物理模型也是依据于此建立的,绝大多数液晶的分子都满足这两个条件。近年发现盘形分子和碗形分子的结构也能出现液晶相,这只是 5000 多种液晶中少数的例外。

液晶的温度范围,介于物质的固相温度和液相温度之间,具有液晶特性的物质都是有机物,约占现有有机物的 1/200,因为有机物的分子容易满足上面提到的两个条件。如液晶相温度范围在 198℃ ~ 235.5℃ 的 TBBM(N, N' - terephthalylidene - bis(4 - n - butylaniline), 对苯二苯叉 - 双 - (4 - 正丁基苯胺)) 的分子结构式为



其分子长度为几十埃(1Å = 0.1nm),宽为几埃。

丹姆士(D. Demms)等人所著 *Flussige kristalle in Tabellen* 中记载了 5000 多种液晶材料,所有这些物质都具有细长棒状分子结构。液晶分子结构的通式如图 1-1 所示,多数是两个或三个苯环在对位通过中间桥的化学键 A、B 共轭结合的化合物。作为连结苯环或联苯环的 A 和 B,早期用的是甲亚胺(—CH=NH—)、偶氮(—N=N—)、氧化偶氮或酯作中间桥键,这些功能团都有双键,因而与两

侧的某环形成某种程度的共轭,保证了整个分子的刚性结构。这些材料的液晶相都在室温范围内,方便了人们对于液晶的深入研究,为液晶的理论研究和应用研究作出过巨大的贡献。然而,甲亚胺类液晶遇水容易分解失效,偶氮和氧化偶氮在可见光下也会分解失效,近年已经弃之不用。只有酯类液晶因其合成和提纯都比较容易,稳定性还算不错,目前作为低档液晶还在使用之中。英国 BDH 公司发明的联苯类液晶,是将中间桥键 A、B 去掉,让苯环直接连起来,这样的液晶性能非常稳定。酯类液晶与联苯类液晶的混合物是目前中低档液晶显示器使用的主要材料。

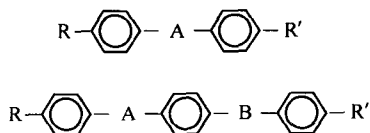


图 1-1 可能呈现液晶相的分子结构

作为末端基的 R 和 R', 有烷基(—R)、烷氧基(—OR)、烷基酯(—O—CO—R)、氰基(—CN)或氟、氟氧基。羧基(—COOH)与硝基(—NO)也可以作取代基,但是其电学性能不好,很少用到。

图 1-1 中的部分苯环或全部苯环用环己烷代替的材料叫环己烷类液晶,其化学性质更为稳定,尤其在紫外光下的性能比具有苯环的液晶的稳定性更好,而且黏度较低。从物理性质来看,这种材料的光学各向异性比联苯型液晶的光学各向异性小,介电各向异性稍小一点,响应更快。通式中的苯环也可以用嘧啶环代替,叫做嘧啶类液晶。与环己烷类液晶相反,这种材料黏度很高,光学各向异性很大,缺点不少。然而这类液晶具有较高的多路驱动能力,对于高驱动路数的扭曲型液晶显示器来说,仍然是不可缺少的材料。

中间桥键 A、B 除了上面提到的甲亚胺、偶氮和氧化偶氮和酯外,实用的液晶化合物还包括中间桥键为炔类的和中间桥键为烷类的液晶。这两种液晶相比,后者的稳定性,尤其是紫外稳定性要好一些。炔类液晶主要用于配制高光学各向异性的液晶混合物,烷类液晶用于宽温、低黏度、高电阻率的高档液晶,配合氟基、三氟基、氟氧基制造有源矩阵用的液晶材料。

末端基 R 大部分是直线状链,其碳链的长度随碳原子个数的奇偶有规律地影响液晶的相变温度。末端基 R 的种类影响整个分子的极性,是影响液晶介电各向异性的主要因素。若选择手性末端基 R\*, 则液晶分子将呈螺旋排列,这在以后的课程中还会讲到。

上面的因素复杂地相互作用,支配着液晶的化学稳定性、光学各向异性、介电各向异性、相变温度、黏度等与液晶的应用密切相关的性质。

胆甾醇本身虽然不是液晶,但是它的酯化物和卤化物却是随着相变而显示出特有颜色的胆甾型液晶,其分子结构仍具有细长棒的形状。

值得注意的是,这里讨论的分子的结构和构成液晶的分子所必须满足的条件只是一般的规律。你可以按图 1-1 液晶分子的通式来设计一种液晶分子,但是不能违背有机化学的规律。也许你辛辛苦苦地把它合成出来了,却不一定保证它一定会显示液晶的性质,你可能放了个“哑炮”。

液晶相的存在可以通过在正交偏光镜下观察液晶的双折射特性获悉,最可靠的办法是用 X 射线衍射来确认,最简单的办法是将该材料放在载玻片之间,迅速推拉两块玻璃片,通过观察玻片之间的材料是否会“闪光”而粗略判定是否为液晶。

## 二、液晶的宏观对称性

上面已经把介晶相分成了塑性晶体和液晶相,液晶相又以形成它的原因而分成热致液晶和溶致液晶。显示中只用到热致液晶,因此作为显示材料的考虑,上面的分类已经没有了意义。对液晶在光电子方面的应用而言,液晶是怎么来的以及化学组成如何是次要的,而它的分子排列的宏观对称性以及具有该种对称性的液晶的物理性质才是要关心的主要问题。

液晶分子的排列状态按其对称性可分成三大类——向列型、胆甾型和近晶型,这种分类法是由弗郎德尔(G. Friedel)在 1922 年提出的,沿用至今。

### 1. 向列型液晶

向列型液晶分子排列的特点示于图 1-2。其分子排列的对称性特点是:

- ① 分子的长程指向有序性,分子之间趋于彼此互相平行排列。
- ② 向列相是流动的,即众多分子的中心排列是无序的或长程无序。

关于向列型液晶相的分子中心是否短程有序这一点,近年有人正试图来验证上述②,即证明液晶分子中心位置是长程无序、短程有序的。实验发现,用 X 射线衍射得不到晶体衍射图案,而用电子衍射可以得到衍射图案。电子束斑很小,这就说明分子中心位置是短程有序的。

从热力学与统计物理学的观点来看,分子彼此平行排列时,液晶的内能最小,应该是最稳定的状态。随着时间的推移,分子最终应该完全平行排列。但是由于分子热运动,分子之间相互摩擦、碰撞,分子的指向并不完全都是平行于某一方向,而是以平均指向为中心随机变化的,如图 1-2 所示。该平均方向叫做液晶分子的指向矢。另一方面,任取一个分子在受到别的分子的碰撞时会随机摆动,在无穷长时间里的平均方向也可以看作是该分子的指向矢。在没有外力的情况下,上述两种表述是等价的,即: $\hat{n}$  矢量的方向是众多分子的轴指向的统

计平均或某一点上分子轴指向在无穷长时间的平均方向。但是假如有外力存在,上述的表述就不再等价了,这一点,留在液晶的连续弹性体理论一节讲述。

若以  $\hat{n}$  作为  $z$  轴建立柱坐标系,大量分子在热力学平衡状态表现出来的性质,就是以  $z$  轴为对称轴的各向异性。这种对称性叫做圆对称性,仿晶体学中的做法,记作  $\infty/mm$  对称。应指出,因液晶分子没有极性,所以  $\hat{n}$  矢量的正方向与反方向相互等同。

## 2. 胆甾型液晶

胆甾型液晶是由旋光性分子构成的,其特点是在某一平面内分子长轴的指向是一致的,与这一平面平行的另一平面内分子长轴的指向却一致地朝着另一个方向,两相邻平面分子的指向稍有不同。以这种方式,分子的指向矢在空间成一螺旋,如图 1-3 所示。应当强调,这里的所谓相邻平面是为了叙述方便,实际上,胆甾型液晶指向矢的旋转是连续的。以与所有面的指向矢垂直的方向作  $z$  轴,建立直角坐标系,各面的指向矢在  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴上的投影  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  表示为

$$\hat{n} = \begin{cases} n_x = \cos\left(\frac{2\pi}{p_0}z\right) \\ n_y = \sin\left(\frac{2\pi}{p_0}z\right) \\ n_z = 0 \end{cases} \quad (1-1-1)$$

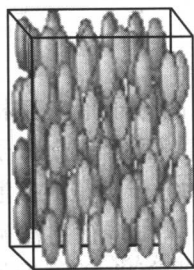


图 1-2 向列型液晶分子排列的特点

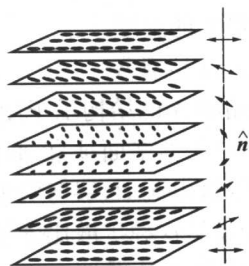
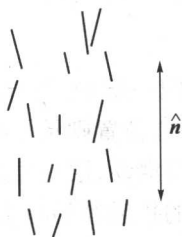


图 1-3 胆甾型液晶分子排列的特点

胆甾型液晶的结构是以  $p_0$  为周期的螺旋结构, $p_0$  的符号与胆甾型液晶是左旋还是右旋有关,取正号为右手螺旋,取负号为左手螺旋, $p_0$  的数值则用来计算空间周期。 $p_0$  与液晶折射率的乘积称为胆甾型液晶的光学螺距。当光学螺距与光波长相同时,这样的周期结构会导致胆甾型液晶对光的强烈的布喇格(Bragg)散射,因此,胆甾型液晶看起来就是色泽鲜艳的液体。

若只取胆甾型液晶以  $z$  轴为法向的极薄的一层来看,液晶分子的排列和向列型液晶一样。在这一层中,分子的指向是有序的,分子中心的位置则是随机的。这就不难使人想到胆甾型液晶与向列型液晶有一定的联系。实际上,向列

型液晶可看作是螺距为无穷大的胆甾型液晶,这两种液晶不过是同一大类中的两个小类,区别仅在于  $p_0 = 0$  或  $p_0 \neq 0$ ,若组成液晶相的分子是非旋光性的,即“镜中”分子的像与镜外的分子能够重叠,这些分子就构成向列相;相反,若组成液晶的分子是旋光性分子,分子在“镜中”的像与镜外分子不能重叠,这样的分子就构成胆甾相。“镜中”的像与镜外不能重叠这一性质与人的左右手一样,所以,具有上述宏观对称性的胆甾型液晶相有时又称为手性液晶相,简称为手性相。在向列型液晶中加入胆甾醇酯,该液晶就成了胆甾型液晶,说明这两类液晶是可以转化的。

准确的说,胆甾型液晶这个名字来源于一个历史事实,就是首次观察到的具有螺旋结构的液晶是一种胆甾醇酯,为区别起见,对有旋光性的由胆甾醇的衍生物分子组成的液晶相还称为胆甾型液晶(Cholesterical Liquid Crystal),而对旋光非酯溶性分子构成的具有螺旋结构的液晶相称为手征型(Chiral Liquid Crystal)液晶。

### 3. 近晶型液晶相

到目前已经有多至八种近晶型液晶相被陆续发现,对其中三种研究得比较透彻,而其余几种近晶相的性质尚不能精确描述。

我们只对这三种研究得最充分的近晶相作简单介绍,这就是近晶相 A、B、C。三种近晶相都具有一个共同的性质——分子空间位置的一维的有序性,即近晶相的分层结构。由于这种部分有序性,近晶型液晶比向列型液晶和胆甾型液晶有更大的黏度。

#### (1) 近晶型 A

近晶型 A 的结构示于图 1-4。在同一层中,近晶型 A 的分子指向互相平行,并与该层的平面垂直,而各分子的中心位置则是长程无序、短程有序,分子在层中可以自由流动,层与层之间能够相对滑动,层与层之间的分子则是靠扩散机制交换,显然这种扩散比分子在固体中的扩散容易得多。用 X 射线衍射法确定每层的厚度,发现其厚度正好是一个分子的长度。在热力学平衡状态下,近晶型 A 与平行层法线的轴与向列型液晶一样,也是呈  $\infty$ /mm 的对称性,其物理性质当然呈圆对称性。

#### (2) 近晶型 B

近晶型 B 的结构示于图 1-5。X 射线衍射数据表明,近晶型 B 的结构特点是在近晶型 A、B、C 的分层结构上,分子的位置在层内也是有序的,近晶型 B 已不再是流体。但是近晶型 B 的力学性质与三维有序的物质有相当大的不同,这就使人们把它与那些柔软的固体材料相区别。有人认为近晶相 B 或许是一种塑性晶体,真是这样的话就得寻找分子转动先于点阵解体的原因;又有人认为这种材料是由二维的层状固体材料堆砌起来的,层与层之间的滑动非常容易。目



前尚无实验数据支持上面的哪一种理论模型。近晶型 B 可以是单轴晶体,也可以是双轴晶体,这取决于它的层内分子是否倾斜。

### (3) 近晶型 C

近晶型 C 的分子排列示于图 1-6。经射线衍射数据表明,近晶型 C 的层间厚度明显小于分子长度,这是分子轴对层法线有一均匀倾斜角的第一个证据。近晶相 C 具有两个光轴这一事实支持了这一看法。已经观测到的最大倾斜角达到了  $45^\circ$ ,有的近晶相 C 材料的倾斜角还是温度的函数。与近晶型 A 类似,分子的层向流动是主要的,层间的扩散也可以进行,但是概率要小一些。

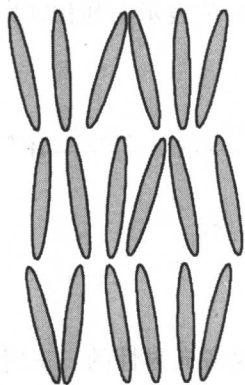


图 1-4 近晶型 A 液晶分子的排列

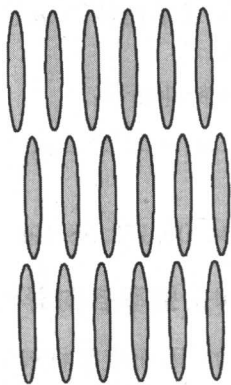


图 1-5 近晶型 B 液晶分子的排列

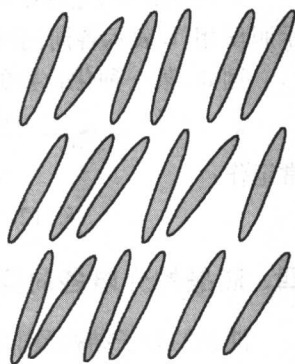


图 1-6 近晶型 C 液晶分子的排列

## 三、液晶的相变

现已知道,上述分子形状为长棒状的有机物从固体到各向同性液体的相变过程中,会有液晶相出现,这些液晶相通常不只上面提到的其中一种类型。常常是某个温度范围内是一种液晶相,另一温度范围内分子重新排布,成为另一种液晶相。较高的温度能够有效地破坏材料内分子的有序程度,依据这个观点就能预计,随着温度的升高,应该先出现什么相,后出现什么相。在较低的温度下出现有序程度高的相;反之,随着温度的升高,该材料出现有序程度较低的相。

相变随温度改变的规律可以总结为如下三条:

① 具有向列相和各类近晶相的材料,从固体开始随温度升高各相出现的顺序是:固相→近晶型 B 相→近晶型 C 相→近晶型 A 相→向列相→各向同性液体。除少数外,这个顺序与实验中所观察到的相变规律基本一致。

② 某些材料可能在上述的液晶相中不具备某些相,只需在上面的顺序中把不具有的相划掉,就是该材料随温度升高各相出现的顺序。