

TFT 液晶显示 原理与技术

丛书特点

- ◎ TFT LCD是多元知识和技能的总汇，涉及专业包括物理和化学、光学、材料、色彩工程、驱动电路、制程技术等多学科的原理和技术应用。
- ◎ 本系列著作兼顾原理与技术，产业制造与发展前景，适合专家研究与新入门者学习参考，更以深入浅出的文字及图解加深读者的理解。



科学出版社

www.sciencep.com

薄型显示器丛书 1

TFT 液晶显示原理与技术

田民波 叶 锋 著

科 学 出 版 社

北 京

图字：01-2009-7211

内 容 简 介

TFT LCD 液晶显示器在平板显示器中脱颖而出，在显示器市场独占鳌头。目前以 TFT LCD 为代表的平板显示产业发展迅速，为适应平板显示产业迅速发展的要求，本书作者编写了薄型显示器丛书。

本册阐述 TFT 液晶显示的基本原理和技术，共分 4 章：第 1 章介绍液晶显示的历史和现状；第 2 章以近乎动(画)、漫(画)的形式形象直观地介绍了液晶材料和液晶显示的入门知识；第 3、4 章是 TFT LCD 液晶显示器的基础，分别介绍了液晶化学与物理简论、液晶显示器及其显示特性。本书内容系统完整、诠释确切、图文并茂、深入浅出，特别是本书内容源于生产一线，具有重要的实际指导意义和参考价值。

本书适合作为大学或研究所各相关专业的教科书，特别适合产业界技术人员阅读。

本书为(台湾)五南图书出版股份有限公司授权科学出版社在大陆地区出版发行简体字版本。

图书在版编目(CIP)数据

TFT 液晶显示原理与技术/田民波，叶锋著. —北京：科学出版社，2010
(薄型显示器丛书；1)

ISBN 978-7-03-027000-9

I. ①T… II. ①田… ②叶… III. ①薄膜晶体管—液晶显示器
IV. ①TN321 ②TN141.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 043057 号

责任编辑：胡 凯 张 静 于宏丽/责任校对：郑金红

责任印制：钱玉芬/封面设计：王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月 第 一 版 开本：B5 (720 × 1000)

2010 年 4 月 第一次印刷 印张：22 3/4

印数：1—3 000 字数：442 000

定价：65.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

序

以 TFT LCD 为代表的新型平板显示器件和半导体集成电路是信息产业两大基石，涉及技术面宽，产业带动力大，是国家工业化能力和竞争力的重要体现。

当前，TFT LCD 为代表的平板显示技术正在快速替代以彩色显像管(CRT)为基础的传统显示技术，国内电视和显示器产业面临前所未有的挑战。2008 年，全球液晶电视出货已超过 1 亿台，占电视市场 50% 以上，预计 2012 年将超过 80%。我国平板显示产业起步晚，企业规模小，目前尚未形成 32 英寸以上大尺寸液晶电视面板规模的生产能力，大尺寸液晶显示面板仍受制于人，多年积累的 CRT 电视和显示器产业面临严峻的替代危机。我国电视全球市场占有率从 CRT 时代 50% 以上降至目前 20% 左右，其中液晶电视全球市场占有率不足 8%，竞争优势正在丧失。这一尴尬局面也表现在工业和军事科技等领域。

另一方面，以数字化、平板化和 4C 整合为特点的新一轮产业升级和重组已在全球范围内展开。能否抓住机遇将直接影响到我国未来 20 年的产业竞争力。如果我国不发展 TFT LCD 产业，不仅会失去下一代产业更新换代的机会，而且在微电子、光电子、核心材料、装备和特种显示等技术领域与国外的差距会进一步拉大。

可喜的是，我国政府、企业、投资者、高校与科研机构对坚持自主创新和发展的 TFT LCD 产业的战略意义已形成共识。温家宝总理在 2008 年政府工作报告中提出将新型显示器列为国家重大高科技产业化专项，总理将显示器产业列于年度政府工作报告中，足以表明政府的重视程度。在政府、企业界、高校、科研和投资机构携手，经过多年艰苦努力，我国平板显示产业已具有一定实力，为参与全球竞争奠定了发展基础。

TFT LCD 等新型平板显示器产业是技术、资本和人才密集型产业，其中人才是关键要素。专业人才培养主要依靠大学和科研机构。日、韩各约有 30 所大学、中国台湾也约有 20 所大学设有显示及相关专业，每年培养数万工程技术人员。就是这样，全球人才仍然紧缺。中国大陆设有显示相关专业的大学数量较少，这方面专业人才，特别是较为顶尖人才更紧缺。因此，推动显示技术专业人才培养和成长，是企业、大学和科研机构共同的责任。田民波教授多年来致力于平板显示技术研究，并承担多项国家重要课题和国际合作项目，是备受尊敬的专家。凝聚了田教授心血和情感的这套系列著作，包括《TFT 液晶显示原理与技术》，《TFT LCD 面板设计与构装技术》和《平板显示器技术发展》，兼顾 TFT LCD 原

理与技术、设计与制造及产业趋势，对其他平板显示器也作了较为详尽的介绍。本套丛书图文并茂，深入浅出，是一套难得的专业丛书。

我愿意向一切关注和有志于液晶与平板显示领域的青年学生、科研人员、业内伙伴、政府领导等各界朋友推荐该丛书。这不仅是一套教科书，更倾注了几代中国科技工作者发展中国自主技术、产业的梦想和情感。

我希望中国官、产、学、研各界人士继续携手合作，推动和促进我国平板显示技术和产业的发展，共创美好明天。

王东升

京东方科技集团股份有限公司董事长

2009年6月于北京

前 言

进入 21 世纪, TFT LCD 液晶显示器在平板显示器中脱颖而出, 从小尺寸的手机、摄像机、数码相机, 中尺寸的笔记本电脑、台式计算机, 大尺寸的家用电视到大型投影设备, 应用 TFT LCD 的产品在显示器市场上独占鳌头。

从技术上讲, 自 20 世纪 70 年代起, 液晶显示器已经历 TN、STN、a-Si TFT(TN 模式)、大型 TFT(IPS、MVA、OCB 等模式)等四个发展阶段, 并成功解决了扩大开口率、提高亮度、增大视角、提高响应速度、增大画面尺寸、扩大色域等问题, 从而其应用领域迅速扩展。

玻璃母板尺寸决定整个 TFT LCD 生产线的投资规模、技术水准、切割面板尺寸, 从而市场竞争力, 因此产业化水平以玻璃母板的“代”为标志。从 1991 年的第 1 代(300mm × 350mm)开始, 目前正筹建第 9 代, 甚至第 10 代(2 600mm × 3 100mm)生产线。在过去的十几年中, 开始是按每两年一代, 近几年甚至按每年一代的速度扩大。与此相应, 面板尺寸、像素数、像素密度(图像分辨率)也按类似于半导体摩尔定律的规律增加。

今天 TFT LCD 技术仍在不断进展, 突出表现为简约技术的采用、生产效率的提高, 以便进一步降低价格。据预测, TFT LCD 下一个发展阶段是可支持用户各种各样的附加功能, 可在任何场合使用的创能型显示器。

从制作技术看, 薄膜型挠性基材的采用、卷辊连续方式(roll to roll)及喷墨浆料喷射)技术等的成功推广, 为各类平板显示器的普及创造了良好的条件。顺便指出, 近年来业界已将原来沿用多年的“平板显示器”这一名称改为“薄型显示器”, 这一方面是为了突出显示器薄型的特征, 另一方面是为了涵盖正迅速发展的有机 EL、电子纸等超薄型显示器。本书在论述中仍保留“平板显示器”这一名称。

目前以 TFT LCD 为代表的平板显示产业发展迅速, 据估计在今后几年内其总产值将超过集成电路产业。面对机遇和挑战, 发展 TFT LCD 产业对我国刻不容缓。但由于受到资金、管理、设备、材料、技术, 特别是知识产权的制约, 进入门槛很高。实际上, 目前的形势比若干年前集成电路产业所面临的更为严峻。除了体制因素之外, 人才缺口就是主要障碍之一。

需要指出的是, 无论是研究开发还是产业化, 要想以某种角色跨足 TFT LCD 领域, 并不是很容易的事。必须认识到 TFT LCD 是多元知识和技能的总汇, 涉及包括液晶物理和化学、光学、材料科学、彩色化技术、驱动电路、制程技术等多学科的原理和技术, 如果不深入探讨、系统学习, 很难将这些知识融会贯通。而

学习、掌握这些知识和技能对于入门者来说，费力劳神，又谈何容易。特别是，涉及 TFT LCD 的许多知识和技能都源于生产第一线，不具备强大的产业化背景，在书斋和一般实验室难以获得。

本书就是在这种背景下编写的。全系列共分 12 章。在第 1 章介绍液晶显示的历史和现状之后，第 2 章作为液晶材料和液晶显示入门，以近乎动(画)、漫(画)的形式形象直观地说明。第 3、4、5、6 章作为 TFT LCD 液晶显示器的基础，分别是液晶化学与物理简论、液晶显示器及其显示特性、主动式(有源)驱动及被动式(无源)驱动、TFT LCD 的工作模式及显示屏构成。第 7、8、9 章分别讨论 TFT LCD 制作技术、液晶显示器的主要组件及材料、TFT LCD 的改进及性能提高。第 10 章讨论液晶显示器的产业化。由于 TFT LCD 对于其他类型平板显示器可谓异曲同工，熟悉了前者可以触类旁通，因此第 11 章介绍各类平板显示器的最新进展，第 12 章讨论平板显示器产业现状及发展预测。本册内容包括第 1~4 章。其他章节见薄型显示器丛书 2 和薄型显示器丛书 3。

由于目前国内外缺乏有关 TFT LCD 较为系统的教材和专著，因此本书力求照顾到原理、技术，理论、实践，产业化、发展前景，研究专家、新入门者各个层面，在保证时新性、系统化、方向性、指导性的同时，尽量做到形象生动、深入浅出。实际上，本书对于新入门者可以读懂，对于博士后专家也有新意。所以，我们推荐本书作为大学相关专业本科及研究生用教材。如果本书能在人才培养、提高研发能力、促进产业化等方面有些许帮助，作者深感欣慰。

作者才学有限，不妥或谬误之处在所难免，恳请读者批评指正。

田民波

北京 清华大学

材料科学与工程系教授

叶 锋

深圳市道尔科技有限公司

董事长

目 录

序

前言

第 1 章 液晶显示的历史和现状	1
1.1 液晶的发现和液晶显示的发明.....	1
1.1.1 液晶的发现.....	1
1.1.2 液晶在液晶显示器中的关键作用.....	2
1.1.3 液晶显示器的发明.....	4
1.1.4 液晶显示器的发展史.....	8
1.1.5 各类电子显示器的对比.....	16
1.1.6 电子显示器与互联网社会.....	19
1.1.7 液晶显示器所涉及的学科体系.....	21
1.2 TFT LCD 20 年发展回顾.....	22
1.2.1 实用 TFT LCD 的三次重大突破.....	22
1.2.2 TFT LCD 产业化发展过程.....	24
1.2.3 多样化技术支撑更大的产业.....	31
1.2.4 显示屏尺寸的大型化.....	34
1.2.5 玻璃基板生产线的更新换代.....	36
1.2.6 显示品位的提高.....	37
1.3 TFT LCD 研究开发的课题.....	38
1.3.1 扩大视角.....	38
1.3.2 提高响应速度.....	40
1.3.3 高质量动画显示技术.....	41
1.3.4 色表现技术.....	41
1.3.5 背光源的改进.....	43
1.4 TFT 液晶及薄型显示器产业.....	44
1.4.1 迅速扩展的薄型显示器市场.....	44
1.4.2 信息社会中显示器制品的应用领域.....	47
1.4.3 显示器的市场规模.....	50
第 2 章 液晶显示入门	53
2.1 从液晶分子的基本单元谈起.....	53
2.1.1 热运动和凝聚力——决定物质状态的两大因素.....	53

2.1.2	流动性和各向异性——液晶用于显示的两个基本特性	54
2.1.3	胆甾醇分子的基本单元——苯环、碳氢链和 OH 基	56
2.1.4	安息香酸酯——最初发现的液晶	58
2.1.5	液晶分子的基本结构形态——板状和棒状液晶分子	66
2.1.6	液晶分子中各种各样的极性基	68
2.1.7	液晶分子的三种基本排列方式	69
2.2	液晶分子与范德瓦耳斯力	71
2.2.1	藉由改变液晶分子的排列状态实现液晶显示	71
2.2.2	碳氢化合物中的范德瓦耳斯力	73
2.2.3	如何改良液晶材料的工作温度	77
2.2.4	液晶分子的排列与范德瓦耳斯力	79
2.2.5	如何控制范德瓦耳斯力	84
2.3	试制一个液晶盒	85
2.3.1	电压作用下的液晶分子	85
2.3.2	如何实现画面显示	88
2.3.3	不可缺少的透明电极	89
2.3.4	液晶盒的构成及显示器的制作流程	90
2.3.5	玻璃基板的处理	93
2.3.6	透明电极的图形化	95
2.3.7	液晶分子的排列方式和取向方法	96
2.3.8	做成液晶盒	99
2.4	偏振光和液晶的双折射	100
2.4.1	液晶分子的结构和排列决定显示器的类型和工作方式	100
2.4.2	横波、纵波及全方位光(自然光)	101
2.4.3	液晶显示器需要利用偏振光	102
2.4.4	单轴性晶体和双折射	105
2.4.5	向列液晶的双折射	108
2.4.6	偏光片的制作方法	113
2.4.7	电场效应双折射型液晶显示器的工作原理	114
2.5	螺旋排列液晶与手性液晶分子	115
2.5.1	如何认识胆甾相型(螺旋排列)液晶	115
2.5.2	螺旋排列在何种情况下才能出现?	117
2.5.3	左右对称的液晶分子的结构	118
2.5.4	胆甾相型液晶分子的立体结构	120
2.5.5	不对称碳的存在导致光学各向异性	121
2.5.6	圆锥形螺旋排列和平板形螺旋排列	124

2.5.7 光射入螺旋排列的物质会发生什么现象?	126
2.5.8 外加电压作用在螺旋排列液晶上	127
2.5.9 螺旋光射入螺旋排列液晶会发生什么变化?	130
2.6 各种类型的液晶显示器	135
2.6.1 液晶显示器的各种不同工作方式	135
2.6.2 利用拆开螺旋排列进行显示的液晶显示器	137
2.6.3 扭曲向列型液晶显示器	137
2.6.4 铁电液晶型显示器	140
2.6.5 宾-主(GH)型液晶显示器	146
2.6.6 液晶的电阻	149
2.6.7 液晶的介电常数	150
2.7 彩色化及动画显示	153
2.7.1 透明电极	153
2.7.2 液晶显示器的驱动与显示	156
2.7.3 薄膜三极管(TFT)	162
2.7.4 实现彩色化的各种方式	164
第3章 液晶化学与物理简论	172
3.1 液晶材料基础	172
3.1.1 液晶状态	172
3.1.2 液晶分子	187
3.1.3 液晶物性	196
3.2 液晶显示屏的基本结构及工作原理	212
3.2.1 显示屏的基本构造及屏内液晶分子取向	212
3.2.2 取向处理与液晶分子的界面取向	216
3.2.3 利用液晶分子取向变化实现光透射强度开关	217
3.3 液晶显示器的基本特征	220
3.3.1 阈值(临界)电压特征	220
3.3.2 时间响应特性	223
3.3.3 光学特性	225
3.4 灰阶显示特性及全色显示原理	227
3.4.1 灰阶显示	227
3.4.2 全色显示	228
3.4.3 画质评价	231
3.5 显示与视觉工学	234
3.5.1 人的视觉特性	234
3.5.2 人眼的顺应特性	235

3.5.3	画角(视场角)与临场感	236
3.5.4	大尺寸与全高清(full HD)	238
3.5.5	清晰度与图像分辨率	239
3.5.6	显示性能与主观评价指针	240
第4章 液晶显示器及其显示特性		242
4.1	LCD 的基本结构及分类	242
4.1.1	LCD 的基本结构	242
4.1.2	LCD 的分类	246
4.1.3	LCD 显示原理	254
4.1.4	LCD 彩色显示	257
4.2	液晶显示器的显示性能	263
4.2.1	图像分辨率	263
4.2.2	像素数与显示屏显示规格	264
4.2.3	像素节距	266
4.2.4	显示尺寸(显示区域)	267
4.2.5	宽高比	268
4.2.6	开口率	269
4.2.7	灰阶与显示色数	270
4.2.8	对比度	271
4.2.9	液晶显示器的寿命	273
4.2.10	液晶显示器显示性能汇总	276
4.3	液晶显示器显示性能的提高	276
4.3.1	透射率及提高亮度的措施	276
4.3.2	视角及增大视角的措施	279
4.3.3	响应速度及提高响应速度的措施	285
4.4	玻璃基板尺寸和画面尺寸的发展趋势	289
4.4.1	玻璃基板尺寸越来越大	289
4.4.2	关于液晶生产线的“代”	291
4.4.3	画面向宽屏发展, 像素向高精细化发展	292
4.4.4	生产设备由批量式到单片式	294
4.5	采用新结构、新材料、新技术的液晶显示器	296
4.5.1	采用新结构的液晶显示器	296
4.5.2	采用新材料的液晶显示器	301
4.5.3	采用新技术的液晶显示器	307
4.6	液晶显示器的最新技术动向	318
4.6.1	液晶电视用 TFT LCD	318

4.6.2 中小型 TFT LCD	323
4.6.3 In-Cell 化技术	325
4.6.4 全球金融危机下的液晶显示器产业	328
参考文献	337
薄型显示器常用缩略语注释	341

第 1 章 液晶显示的历史和现状

1.1 液晶的发现和液晶显示的发明

1.1.1 液晶的发现

液晶发现的历史已相当久远, 1854 年有人发现, 肥皂水以及神经细胞含适量水时, 会成为具有光学各向异性的有机分子集合体(溶致型(lyotropic)液晶/浓度转变形液晶), 这可算是液晶发现的开始。

1888 年, 奥地利植物学家 Friedrich Reinitzer 在研究植物中的胆甾醇过程中, 当他制得现在我们已熟知的胆甾醇苯甲酸酯时, 发现了这个化合物具有两个熔点的奇特现象: 加热固体样品时可以观察到晶体变为雾浊的液体; 当进一步升高温度时, 雾浊的液体突然变成清亮的液体(热致型(thermotropic)液晶)。更重要的是, 两个熔点之间, 他观测到了双折射现象和相应的颜色变化。Reinitzer 对此百思不解, 于是写信给著名的晶体学家 van Zepharovich, Zepharovich 对此也很惊奇, 于是推荐 Reinitzer 给当时著名的德国物理学家 Otto Lehmann 写信, 后者是研究相变的权威。



Friedrich Reinitzer (1857—1927)

Lehmann 在收到 Reinitzer 寄给他的两个样品后, 对其进行了测定, 并确认了 Reinitzer 的发现: 在 145.5°C , 物质变为雾浊状液体, 升温至 178.5°C 变为清亮; 降温时, 先变为蓝色然后是雾浊状, 进一步降温, 变为紫色, 最后变为白色固体。

异常的双熔点现象发现不久, 液晶的另一个基本性质——双折射, 也在许多有机物中发现。由于生物体内许多物质具有晶体才具有的双折射现象, 因此这种物质曾被称为“活晶体”。



Otto Lehmann (1855—1922)

Lehmann 进一步对 Reinitzer 的胆甾醇物质进行了细致的研究。他把液体中产生双折射的部分解释为晶体。当加上电场, 发现形成类似单晶的白色网状条纹, 深入分析后, 他写信给 Reinitzer: “……我的结果符合你的观点, 即(胆甾醇物质中)存在非常软的晶体……它是完全均一的, 你先前假定的液体是不存在的……晶

体以这种被人们误认为液体的软物质的形式存在，必将引起物理学家的极大关注。”之后不久，他发表了题为“About Liquid Crystal”的文章。因而，Lehmann 也被称为年轻的化学家、作家。



Ludwig Gatterman (1860—1920)



George Friedel (1865—1933)

1890年，Ludwig Gatterman 在德国 Freiburg 合成并发现了一些新的氧化偶氮苯化合物也具有双熔点现象。这是第一次得到已知结构的液晶，它的流动性要比 Reinitzer 得到的胆甾醇结构的流动性要大得多。Lehmann 对此非常兴奋，称它们为“结晶流体”。在 19 世纪 90 年代，Gatterman 和 Lehmann 不断发表文章介绍他们的新发现，尽管直到 1922 年 George Friedel 才提出这类物质及其相的分类和命名规则，但在 Lehmann 论文中使用的许多名词术语，在现在液晶学中一直沿用。

1.1.2 液晶在液晶显示器中的关键作用

1.1.2.1 以电子窗帘类比

目前液晶显示器所用液晶的液晶分子几乎都是棒状的，液晶分子的典型结构如图 1-1(a) 所示，它是直径约 0.4nm，长约 2nm 的细长有机体。

这种液晶分子一般由如图 1-1(a) 所示的四部分，即作为骨架的刚硬部分(联苯)、柔软的尾部(戊基)、二者间的连接部分(烷叉基)和极性基(氰基)组成。刚硬的骨架部分保证液晶分子按一定的规则排列(图 1-1(b))，柔软部分利于液晶分子的运动，极性基则提供电场作用下的转矩。

当这种液晶材料被夹于两个电极之间时，在两电极间所施加电压的作用下，液晶分子纵向排列；无电压时，液晶分子横向排列。若以图 1-2 所示的电子窗帘类比，当电压 ON 时，窗帘打开(图 1-2(a))；电压 OFF 时，窗帘封闭(图 1-2(b))。这样看来，液晶分子所起的作用与窗帘(起电子窗帘作用)十分类似。

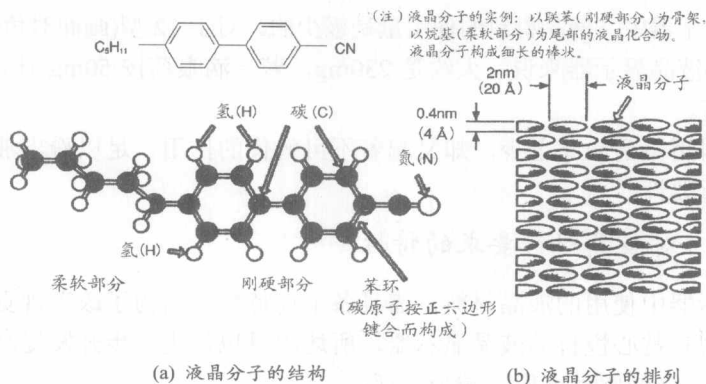
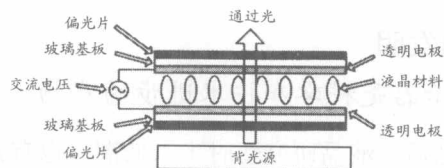
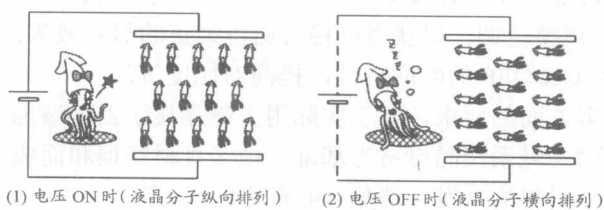
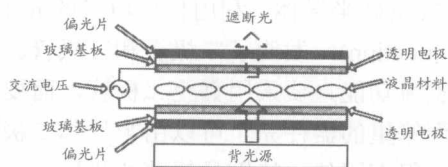


图 1-1 用于液晶显示器的液晶材料的分子结构



(a) 施加电压时(电子窗帘打开)



(b) 不施加电压时(电子窗帘关闭)

图 1-2 起电子窗帘作用的液晶分子

在液晶显示器中，液晶材料的使用量是极少的。对于 12 型(画面对角线为 12 英寸，即 30cm)液晶显示器来说，大约是 230mg，若一滴眼药按 50mg 计，仅仅是 5 滴眼药的程度。

液晶材料用量是如此之少，却又起着不可替代的作用，足以看出液晶对于液晶显示器的重要性。

1.1.2.2 对液晶材料要求的特性

液晶显示器中使用的液晶材料，需具备下述特性，而为了改善视觉特性，以获得便于观视且赏心悦目的液晶显示器，所述项目也是进一步开发提高的重点。

- ① 电压：降低驱动电压，减少功耗；
- ② 温度：扩大从低温到高温稳定的工作温度范围；
- ③ 黏滞性(黏度)：对应动画显示等，响应特性的改善；
- ④ 折射率：调整色调，以获得鲜艳且白色纯正的显示效果；
- ⑤ 改善开关 ON/OFF 的响应特性，提高对比度等。

为满足上述多方面的要求，对于实际用于液晶显示器的液晶来说，一般是以酯系、联苯系、席夫碱系液晶母材为基础，由多种材料调和而成的。

关于新型液晶材料的开发，请见 8.4 节及 9.4.4 节。

1.1.3 液晶显示器的发明

1.1.3.1 液晶显示器是科学和技术进步的产物

在 George Freidel 之后，液晶研究暂时步入低潮，也有人说，1930—1960 年期间是液晶研究的空白期(表 1-1)。究其原因，大概是由于当时没有发现液晶的实际应用。但是，在此期间，半导体电子工学却获得长足进展。为使液晶能在显示器中应用，透明电极的图形化以及液晶与半导体电路一体化的微细加工技术必不可缺。随着半导体工学的进步，这些技术早已不在话下。

20 世纪 40 年代，开发出硅半导体，利用传导电子的 n 半导体和传导空穴的 p 型半导体构成 pn 结(pn junction)，发明了二极管和三极管。在此之前，在电路中为实现从交流到直流的整流功能，要采用真空二极管，而要实现放大功能，要采用真空三极管。这些大而笨重的器件完全可以由半导体二极管和三极管代替，不需要向真空中发射电子，仅在固体，特别是极薄的膜层中，即可实现整流、放大功能，从而电子回路实现了小型化。

接着，光加工技术实现了包括二极管、三极管在内的电子回路图形的薄膜化、超微细化。这种技术简称为光刻(photolithography)。photo 即光，lithography 意为石版画。photolithography 除表示照相技术之外，还有在像石头那样的硬板上利用光加工制作“岩画”的技术。20 世纪 60 年代，随着半导体集成电路(integrated circuit,

IC)技术的进展, 电子设备实现了进一步小型化。

表 1-1 与液晶相关的科学和技术的发展史^①

	液晶的历史	液晶显示器的发展史	半导体电子学的发展史
1880	<ul style="list-style-type: none"> 液晶的发现(1888年) 		
1920	<ul style="list-style-type: none"> 液晶基础研究的黄金时代 		<ul style="list-style-type: none"> 量子力学的形成(1925年)
1930			
1940	<ul style="list-style-type: none"> 液晶研究的空白时代 		<ul style="list-style-type: none"> 三极管的发现(1947年) 从真空管电路向半导体电路的转变 透明电极的开发(1950年)
1950			
1960	<ul style="list-style-type: none"> Williams 的发现(1963年) 		<ul style="list-style-type: none"> 半导体集成电路的发现(1958年) 光刻技术的进步(1960年)
1970		<ul style="list-style-type: none"> Heilmeier 发表液晶显示器(DS型)(1968年) 液晶手表(1971年) 液晶计算器(1973年) 	<ul style="list-style-type: none"> 微处理器的发明(1970年)
1980			<ul style="list-style-type: none"> 调制解调器的发明(1980年) 鼠标的发明(1985年)
1990		<ul style="list-style-type: none"> 液晶笔记本电脑、监视器、手机、电视等(1990年代) 	<ul style="list-style-type: none"> 互联网的推广与普及(1989年起)

^① 请继续见图 1-7。