

平板显示技术丛书

TFT-LCD TECHNOLOGY: STRUCTURE,  
PRINCIPLE AND MANUFACTURING TECHNOLOGY



# TFT-LCD 技术： 结构、原理及制造技术

由于液晶与半导体技术的完美结合，目前TFT-LCD产业成为显示产业的主流。  
因此，发展我国显示产业，非掌握TFT-LCD技术莫属。

申智源 编著 董承远 校对



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

平板显示技术丛书

# TFT - LCD 技术—— 结构、原理及制造技术

申智源 编 著  
董承远 校 对

電子工業出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京 · BEIJING

# 导 读

2009年8月3日第六届世界华人物理大会在兰州大学开幕，来自世界各地的600余名学者在5天时间内参与物理科学和教育两方面内容的讨论，我也应邀出席大会并荣幸地邂逅香港科技大学物理系主任沈平教授。沈教授是华人中最早介入液晶显示研究的第一人，他是加入美国RCA公司开创液晶显示研究的先辈，我们1978年读液晶物理的研究生，学习液晶显示的参考书就是1976年他与P. J. Wojtowich合编的名著《液晶导论》（《Introduction to Liquid Crystals》）。在交谈这几年液晶显示的大发展时，沈先生非常感慨，他说，在RCA时期人们都认为液晶显示（动态散射模式）只可能做数字显示，而不可能做图像显示，因此RCA把专利出卖，停止液晶显示研究。到了1990年代，有源液晶显示（AM-LCD）技术开发出来，人们开始做出图像显示，在笔记本电脑诞生时液晶显示应运而生走向产业化。但那时对于能否做大尺寸的电视显示，业界仍无信心。在日本夏普做出中小尺寸电视时，等离子显示（PDP）也开发出来，人们又担心，在大尺寸电视显示方面，LCD可能会被PDP取代，但随着日本将TFT-LCD（薄膜晶体管液晶显示器件）技术发展到极致，在大尺寸显示方面LCD又战胜了PDP。观察TFT-LCD屡战屡胜的发展史，我们两位都认为，由于液晶与半导体技术的完美结合，目前TFT-LCD产业成为显示产业的主流。因此，发展我国显示产业，非掌握TFT-LCD技术莫属。但我们也感到，国内外全面介绍这个革命性技术的书籍还是阙如。

可喜的是，今年8月中，清华液晶技术工程研究中心张百哲教授交给我申智源博士新作《TFT-LCD技术：结构、原理及制造技术》的电子稿，希望我能为即将在电子工业出版社出版的这本新书写个序言。经过两个月的学习，我认为这本书正是我所期望的、我迄今所知道的最为结合生产实践、又有详细理论分析的TFT-LCD专著，对于我国正在后来居上的TFT-LCD产业发展大有裨益。因此，我自行决定把这个序言“扩版”为导读，论述这本书出版的重要性。

## 1. 我国新型显示产业发展形势

进入21世纪以来，以平板、超薄、大屏幕、高清晰、节能环保等特点为代表的新型显示技术成为继软件、集成电路之后的电子信息产业的核心技术，是战略性高新技术的基础和最具活力的电子信息产业。新型显示技术含量高，占显示终端成本的比重高，如占平板电视成本的70%~80%，计算机的20%，手机的10%~20%。新型显示产业主要包括TFT-LCD、PDP（等离子）及OLED（有机发光二极管）三种平板显示。其中，TFT-LCD去年已占有市场近90%的份额。PDP其市场份额不足10%。

OLED 只在手机上有应用, 笔记本电脑、电视还未市场化。至 2010 年, 全球平面显示器面板的产值达到 1120 亿美元, 占全球光电产业产值的 36.2%。中国是世界上最大显示产品应用的潜在市场, 已有十多种产品的产量占世界首位, 其中显示器、手机、彩电、激光视盘机、笔记本电脑分别占全球总产量的 67%、45%、55%、80% 和 80%。因此, 市场的优势是我国发展 TFT-LCD 产业的天然条件。

2009 年我国彩电产量近亿台, 有一半出口, 其中 TFT-LCD 液晶平板电视占 68.3%。我国平板显示产业布局较晚, 自主创新能力薄弱, 电视生产所需的面板供给能力严重不足, 特别是大尺寸电视用面板目前几乎全部依赖进口, 致使整个彩电和平板显示产业面临十分严峻的挑战和巨大的转型压力。由于液晶面板占液晶电视整机成本的 2/3, 国内彩电厂商被迫花费巨资, 从韩国、台湾、日本厂商手里采购液晶面板等关键零部件。2009 年我国液晶面板进口 1.8 亿块 (含中小尺寸), 进口金额达 350 亿美元, 居单一产品进口额第 4 位, 仅次于集成电路、石油和铁矿石进口额。2010 年, 中国液晶面板进口额超过 400 亿美元, 仅次于集成电路 (1569 亿美元)、石油 (1351 亿美元) 和铁矿石 (794 亿美元)。因此, 加速发展我国平板显示产业是保持我国全球最大的彩电生产国和消费国产业安全的需要。这已经引起我国政府高度重视, 新型显示已被明确纳入“十二五”规划第十章“培育发展战略性新兴产业”第一节“推动重点领域跨越发展”新一代信息产业重点发展的领域。

在新型显示产业中, TFT-LCD 液晶显示技术已经占据主导地位。全球范围在可预见的 15 年内, 仍没有一种显示技术在应用领域的广泛性 (尺寸从 1 英寸到超过 100 英寸)、产业化投资力度 (全球对电视用 TFT-LCD 面板的投资已超过 1000 亿美元)、参与市场竞争和推广的普及面 (全球超过 800 家制造企业) 等三方面可与 TFT-LCD 液晶显示产业相抗衡。截至 2009 年底, 全球共有 42 条 5 代及以上的 TFT-LCD 生产线, 包括 14 条 5 代线 (含中国大陆 4 条)、2 条 5.5 代线、11 条 6 代线、2 条 7 代线、4 条 7.5 代线、2 条 8 代线, 预计未来 4 年还将持续投资 600 亿美元以上 (含中国在建的 5 条高世代线)。从 2003~2004 年起, 若干中国企业进入了 TFT-LCD 工业, 并建设起 5 代线 (主要有京东方、上广电和昆山龙腾光电)。此后, 由于 5 代及以下世代生产线的产品不能满足电视屏的需要, 所以国内各方一直希望能够引进 6 代以上的所谓“高世代”生产线。但直到 2009 年夏天, 国外企业一直封锁技术, 拒绝向中国转让高世代生产线。

2010 年我国电子信息产业的一个重大的突破就是中国大陆首条高世代液晶面板生产线——京东方合肥 6 代线的建设, 填补了中国大陆 32 英寸以上液晶屏的制造空白, 标志着信息产业在关键技术上实现突破。这条生产线自去年 10 月正式量产后, 仅用了两个多月的时间综合良品率已经达到 95% 以上, 达到国际领先水平, 并于 2011 年 5 月已实现满产。这充分说明我国本土企业已完整掌握了液晶显示的核心技术。中共中央政治局常委、中央书记处书记、国家副主席习近平在安徽调研时也视察了京东方合肥 6 代线。习近平同志充分肯定了京东方在开展研发工作、提高自主创新能力方面所作的



努力和取得的成果，并强调战略性新兴产业代表着科技创新和产业升级的方向，决定着未来经济发展的制高点，一定要大力培育和发展。

在这种形势下，2010 年全球主要 FPD 企业陆续宣布到大陆投资计划：成都（富士康）8.5G；广州 & LG（韩国，已批准）8.5G；苏州 & 三星（韩国，已批准）7.5G；南京 & 夏普（日本）8.5G；合肥 & 京东方（国资）8.5G。中国大陆正在成为平板显示的投资热点。在这种条件下，国内出现了一股“液晶热”——各地争相上马液晶面板生产线。根据媒体报道，各地计划准备上马的 7.5 代以上生产线一度达到 8 条（总投资超过 2 000 亿元），而目前全球运行的 7.5 代以上生产线总共也不过 12 条。在此形势下，政府一方面要防止“产能过剩”，一方面要采取正确的发展战略支持、培育我国的 TFT-LCD 产业，使我国新型显示产业发展将有可能突破发展芯片产业长期徘徊不前的困境，在世界显示产业发展上后来居上。

## 2. 我国发展 TFT-LCD 产业存在的问题

### 2.1 对支撑这个产业的核心技术 TFT-LCD 基础研究投入不足

目前，中央及各地已经出台的对平板显示产业的扶持政策和研发资金支持，绝大多数集中在对高世代生产线的引进上，而对下一代新型平板显示技术的重视和投入仍显不足。从短期看，对 TFT-LCD 技术和生产线的引进可以比较快地建立起国内的面板生产能力，对国家和地方的经济带动效应也可较快显现，但我们必须吸取 CRT 时代所带来的教训。由于我国当时在 TFT-LCD 技术研发和产业化方面的投入严重不足，政府有关部门在“十五”、“十一五”基本没有安排 TFT-LCD 研究项目，导致在面板技术领域再次面临国外垄断，不得不重走引进的老路，被局限在产业链的末端。缺乏前瞻眼光、没有构建梯次布局，导致我国彩电业在向平板转型出现“缺屏之痛”。

为追求更快、更高清的显示，TFT-LCD 很多的新技术仍然在快速发展当中，以液晶显示所需的新材料为主的很多新技术研发还没有完成，还有待研究和突破，这些新材料包括有特殊光电性质的无机、有机膜材料，用于液晶分子取向的高分子材料，乃至用于驱动的半导体材料及背光源 LED 材料，所以液晶显示还是一个在不断发展中的产业。如目前 TFT-LCD 主流的是控制电压型 a-Si 工艺，但三星等已启用氧化物半导体技术，日本正在研发有机半导体技术（甚至液晶半导体技术），我们也应加强对液晶显示新技术的研究，否则一旦工艺有变化，我们又会跟不上。当前尤其要特别关注以 OLED 为背光源的 TFT-LCD 技术发展动向。通常背光源用 LED 来做，因为是点光源，所以还要加上光扩散膜工艺，如用 OLED 背光源，因为是面光源，扩散膜工序就可省去，工艺成本下降可观。据报道，2011 年，三星、LG 已开建用 OLED 做背光源 TFT-LCD 新生产线。

### 2.2 人才缺失，企业技术团队严重依赖“外援”

除京东方从 4.5G、5.5G、6G 到 8.5G 建线起培养了自有的技术团队外，我国大陆最近上马的 6 代以上的液晶显示生产线（龙飞-友达、夏普-南京、深圳-华星），采用的技术团队主要是从中国台湾、日本招来的混合团队，这对于企业自主掌握核心技

术和工艺更新发展都是一个潜在的危险，上广电的前车之鉴就是没有独立于合资 NEC 公司的技术核心团队。因此人才缺失是我国发展新型平板显示的心腹之患。

我国台湾地区在发展 TFT-LCD 产业时，于 1997 年提出了“两兆双星”计划（一兆是半导体芯片年产值超一兆新台币，另一兆就是液晶显示屏年产值超一兆新台币）。为配合这个计划，台湾地区的教育部门同时也提出了“八五四专案”人才计划，即每年许可各大学电子专业招聘 85 名教授计划中，从 2003 年起，要保证 20 名是在全球招聘的 LCD 专业的，而且每人至少负责培训 5 名研究生。原因是经过“科技顾问组”2002 年进行的高科技人力缺口调查，2003~2005 年显示产业缺口 8000 多人。

从历史上看我国大陆的高等院校和研究所在液晶显示的科研工作几乎与国际同步。1968 年美国 RCA 公司发明了液晶显示，而 1969 年清华大学、上海有机化学所、上海华东化工学院就开始了液晶的研究，后来又有长春物理所、南京 55 所、华中科技大学、东南大学等进行 LCD 和 PDP 的研究。20 世纪 70~90 年代高校和研究所在平板显示的研究和人才培养上曾做出过重要贡献，我国液晶学会第一任主席谢毓章教授的著作《液晶物理学》（1988 年出版，1998 年再版）是这个时期的杰出代表。但 2000 年以后总体说来高校和研究所的工作落后于企业。随着液晶显示向技术转化，液晶研究的文章不太可能发表在 SCI 高影响因子的期刊上，加上基金部门申请经费的论文导向，迫使清华、北大等高校在液晶专业的教授们退休后，纷纷撤消了液晶物理和化学专业。中国大陆目前在大学里（除河北工大）基本没有液晶显示专业。所以在“十二五”期间，有必要加快培养这方面的人才。我国教育部公布从 2011 年起高校招生将新增 140 个新专业，全部为国家确定的战略性新兴产业相关本科专业，但是，此次新增专业中，基本没有提到液晶显示专业。借鉴我国台湾地区发展液晶显示人才引进的经验，人才计划一定要产学研结合，高校也要设置相应液晶显示专业。现在大学生毕业后就业难，从有些方面的反馈来看，是大学生专业不对口。

### 3. 培育 TFT-LCD 人才，出版“产学研”结合的科技专著必须先行

新世纪开始，我国陆续有不少液晶显示有关的书籍出版，如刘永智等编著的《液晶显示技术》（2000 年），范志新编著《液晶器件工艺基础》（2000 年），应根裕等编写《平板显示技术》（2002 年），小林骏介等编著《前沿显示技术丛书》（2004 年），黄子强编写的《液晶显示原理》（2005 年），李维諝等编写《液晶显示应用丛书》（2006 年），王新久编写的《液晶光学和液晶器件》（2006 年）。这些书籍由于编者没有参加生产实践、或依据出版较早的外国著作、或编译自没有现代液晶显示生产实践的西方国家专著，因此其内容相对简单，与正在产业中应用的工艺技术联系不紧密，因此对从事 TFT-LCD 产业研究与学习借鉴的意义有限。

近几年，随着我国大陆及台湾地区 TFT-LCD 产业发展的大好形势，开始出版了“产学研”结合密切的一批好书，如顾鸿寿、周本达、陈密、张德安、樊雨心、周谊衡等合编的《平面面板显示器基本概论》（2006 年），高鸿锦等编著、用于北京清华液晶技术工程研究中心作为企业技术人员培训教材的《液晶与平板显示技术》（2007 年），



京东方集团公司王大巍等编《薄膜晶体管液晶显示器件的制造测试与技术发展》(2007年), 复旦大学谷至华编《薄膜晶体管(TFT)阵列制造技术》(2007年), [美]Cherie R. Kagan 等编、廖燕平等译《薄膜晶体管(TFT)及其在平板显示中的应用》(2008年), 田民波著、林怡欣校订的《TFT液晶显示原理与技术》(2008年)与《TFT LCD面板与构装技术》(2008年)。这些书籍全面叙述了正在生产线应用的工艺与技术, 对于进入这个产业的技术人员与工人起着良好的科普与培训功能。但相对于申智源博士呈现在大家面前的新著, 上述著作在基础原理性、理论性、实用性都仍然不够全面深刻。其中原因, 不一而足, 如顾鸿寿等的著作本来就限于“概论”; 高鸿锦先生等的书本来是用于对企业技术人员的短期培训; 王大巍等的书是对新进人员对企业认知的教材; 谷至华教授的专著显然受益于曾经的上广电生产线的实践对工艺介绍甚详, 但可惜他不是半导体(TFT)专业出身, 因此不能苛求他的著作要包含TFT基础理论; 田民波等两本书对TFT-LCD的原理与生产线进行了全面、但也只是科普性的介绍, 这应与他核物理材料出身局限有关。

这里我们隆重推介的申智源博士的专著的质量之所以会更上一层楼, 与他的专业出身与工作经历是分不开的。他1989.9~1993.7在吉林大学电子工程系半导体物理及其器件专业学习(工学学士毕业); 1993.9~1996.7在吉林大学研究生院电子工程系半导体光电子专业学习并获得理学硕士; 1996.9~2000.8在韩国亚洲大学研究生院电气电子工程系微电子专业学习获得工学博士; 2000.9~2001.8在KEC综合研究所从事大功率半导体器件开发、CMOS生产工艺开发、多晶硅电阻以及电容开发等; 2001.9~2003.6加入Display Tech产品开发部, 从事手机用STN、CSTN、TFT-LCD模组开发; 2003.7~2009.12在上海广电NEC液晶显示器有限公司任技术部科长、Array工程部科长、Array工程部部长, 因此他的书自然是与他在半导体研究的基础知识、理论积累有关, 与他在建设上广电的TFT-LCD生产线紧密联系。更重要的是, 他为这本书真正付出了近两年的时间: 从上广电出来后, 他就静下心来, 专门写这本书, 直至2010年5月他成立上海友淇光电技术有限公司。作者舍得时间的投入是这本书诞生在中国大陆、而不是在日韩及我国台湾地区的一个原因。

#### 4. 本书简介及将来再版内容扩充的建议

申智源博士的书初稿共分三部分。第1部分(第1章)对液晶显示历史、液晶显示器的分类、从无源到有源LCD的工作原理及基本结构作了全面与深刻的论述, 是读者了解LCD全貌的必备基础。第2部分(第2~6章)从基础理论高度阐述了液晶物理及用于显示的基本原理、LCD的各种模式、TFT的半导体物理及结构特性(这是其他已出版的书未涉及的)、TFT-LCD的光学(包括色度学)与液晶分子电场驱动取向动力学在显示特性(省电、视角、响应速度及彩色)改善应用。第3部分(第7~9章)紧密联系生产线工艺实践论述了非晶硅(a-Si)TFT-Array、CF(彩膜)、成盒、模块制造、测试与不良品分析方法。这些内容对现在中国大陆已经开始第八世代线的TFT-LCD生产线所需的知识是完全足够的。这里要特别补充的是, 申智源博士的专著

主要是对 TFT-LCD 技术的论述，在液晶材料方面该书有触及但不详细，为此建议读者应进一步参考高鸿锦先生今年 7 月刚刚出版的一本专著《液晶化学》（清华大学出版社，2011）。有 2011 年这两本新书，读者将不用参考其他旧作便能又好、又快地入门 TFT-LCD 技术。

但从最近世界各大厂商正在开发的新技术来看，自 2007 年开始到目前，每年我们都可以看到 TFT-LCD 重大的技术上的进步：从高清（HD：1366×768）到 200 多万像素全高清（FHD：1920×1080）以及比 FHD 高四倍、有 800 多万像素超高清（UD：3840×2160）；去年 3D 电视的推出、帧速率 120Hz 增长到 240Hz。这是新一轮的 TFT-LCD 发展方向——智能手机与移动显示（包括平板电脑）的需要。它们要求分辨率高而且要求有低的功耗温度，所以现有的 a-Si TFT-LCD 技术正在向低温多晶硅（LTPS）TFT-LCD 发展。在张百哲教授的建议下，申智源博士现在的书稿又增加了多晶硅部分的内容，其中新加一章“低温多晶硅 TFT 工艺流程与制造技术”特别有参考价值，因为我国也开始建设 LTPS 的生产线，如厦门天马今年开工的 5.5 代线。

2000 年到 2010 年，LCD 产业主要是由大尺寸电视显示屏带动的，但从 2011 年起，带动 LCD 产业的是中小尺寸的移动显示。今年 8 月 31 日宣布的东芝、日立制作所和索尼将合并子公司的中小尺寸面板业务，并以官民共同基金——日本产业革新机构为中心，在 2012 年春季由四家公司组成新公司“日本显示器（Japan Display）”就是一个信号，该公司业务合并后的市场份额方面，2010 年的合计值为 21.5%。新公司将超过夏普，成为全球最大的中小尺寸液晶面板厂商，其采用的核心技术可能是共面模式液晶显示（IPS-LCD）。因此大陆的 TFT-LCD 的“产学研”人士不能不前瞻关注这个技术发展动向。用于移动显示的下一代显示器有三大技术平台，一个是氧化物 TFT，第二是绿色显示平台（比如不需要每天充电的节能显示），第三是互动显示平台。氧化物 TFT 方案平台，有可能跟 LTPS 生产线进行竞争。另外针对三维显示运动图像需要更高分辨率、更好的图像质量，还有更好的深度和角度。为此，申智源博士在本书最后版本中又增加“TFT 器件及显示技术的进展与展望”，在这部分介绍了有机 TFT、氧化物 TFT、反射型 LCD、三维立体显示、透明显示器、柔性显示技术等。

当然，这些新增章节因为不是作者亲临生产线的结晶，也还不是已经定型的大生产工艺，随着日韩、我国大陆及台湾新工艺的研发与产业竞争，其内容还有很大的修改与发展空间，因此，在结束我的导读时，我希望申智源博士继续密切注意下一代 TFT-LCD 技术的发展，诚挚建议本书将来再版时，在内容上，结合生产实践、更加详细介绍 LTPS、氧化物 TFT、3D、移动显示的工艺与制造技术的进展，因为这涉及正在来临的 LCD 的第三次革命。

欧阳钟灿

中科院理论物理所

写于 2011 年国庆长假



# 前 言

记得2010年年初接到电子工业出版社的电话，问能否编写一本关于TFT-LCD技术方面的书，由于当时作者忙于发展新业务，而且没有写书的经验，当然更没有信心独立完成一本书，所以没有马上答应。但考虑到当时正值国内大规模建设高世代TFT-LCD生产线，一定会有许多大专院校的学生、研究生对TFT-LCD技术有兴趣，如果把自己了解的技术及实践经验总结成一本书，必定会对他们有所帮助，少走弯路，尽快掌握TFT-LCD基础。基于上述想法，经过3~4个月的酝酿和构思后，2010年6月正式开始了本书的写作。

本书的编写过程中，作者翻阅了大量的技术文献和书籍，包括近几年SID会议的最新技术和进展。考虑到大专院校、研究所及企业里初次学习TFT-LCD技术的学生和工程师，本书力求从基础讲解，并努力讲清楚每个技术点，旨在希望更多的理工科学生、年轻的技术员被显示技术的魅力所吸引，投入到显示产业中，不断发展壮大我国从事显示产业的工程师队伍。但鉴于作者自身能力及学识所限，可能达不到预期的效果，加之书中错误与不足之处在所难免，敬请读者多多批评指正，以便将来有机会进行修改。如果本书给初学TFT-LCD技术的读者起到入门作用，对从事多年TFT-LCD技术的工程师带来一些启发，作者将倍感欣慰，也算是达到了写这本书的初衷。

本书共由10章构成。第1章对TFT-LCD技术进行了概括性的总结。第2~5章是TFT-LCD基础，主要讲解了液晶及其特性、液晶的显示模式、TFT的结构与工作原理、TFT-LCD的结构与显示原理等。第6章介绍了提高TFT-LCD的开口率、视角、响应速度及色偏等显示特性的技术。第7~8章介绍了非晶硅TFT-LCD的工艺流程、制造技术及不良检查与分析。其中不良分析是本书中与实际生产最接近的内容，但是非常遗憾的是由于时间仓促，曾经总结过的许多生动、有趣的不良分析未能写进本书中。第9章是低温多晶硅TFT的工艺流程与制造技术。第10章介绍了近几年显示行业的热门技术，如3D显示、透明显示、柔性显示等。TFT-LCD产业涉及的材料种类繁多，为了方便读者及时查阅，本书的附录中总结了玻璃、靶材、气体、药液等材料的特性与规格。

在本书的写作过程中，中国科学院欧阳钟灿院士、清华大学北京液晶技术工程研究中心张百哲教授与高鸿锦教授对初稿提出了许多建议，并在三位前辈的指导与鼓励下，充实和完善了书的内容。在此向他们表示诚挚的谢意。



上海交通大学董承远副教授对本书做了全面的校对工作，并对书的结构与内容修改提出了许多建议；电子工业出版社董亚峰编辑为本书的策划、编辑、排版与出版付出了辛勤的劳动，在此向他们表示衷心的感谢。作者还要感谢朱棋锋、叶俊、常程、孙树军、瞿春艳、曹河文、王晓凤、沈洵、刘增利等在编写过程中提供的帮助。

最后感谢我的父母、家人以及朋友们对我的理解、支持和鼓励。

作者

2011年12月于上海

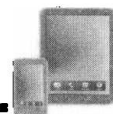
# 目 录

<b>第 1 章 TFT-LCD 技术概要</b> .....	1
1.1 TFT-LCD 技术发展历史 .....	1
1.2 液晶显示器的分类 .....	6
1.3 矩阵式液晶显示器的工作原理 .....	9
1.4 TFT-LCD 的基本结构 .....	16
<b>第 2 章 液晶的基本物理特性</b> .....	22
2.1 液晶的相结构与分类 .....	22
2.1.1 向列相 (Nematic) 液晶 .....	23
2.1.2 胆甾相 (Cholesteric) 液晶 .....	24
2.1.3 近晶相 (Smectic) 液晶 .....	25
2.1.4 盘状 (Discotic) 液晶 .....	26
2.2 液晶的连续弹性体理论 .....	27
2.2.1 液晶的弹性能密度 .....	28
2.2.2 液晶在电场中的自由能密度 .....	29
2.2.3 平衡态下液晶指向矢分布计算 .....	30
2.2.4 动态平衡方程 .....	30
2.3 弗里德里克斯转变 (Fredericksz Transition) .....	31
2.3.1 展曲形变 .....	31
2.3.2 弯曲形变 .....	33
2.3.3 扭曲形变 .....	34
2.3.4 动态弗里德里克斯效应 .....	35
2.4 液晶的表面配向 .....	36
2.4.1 表面配向理论 .....	36
2.4.2 配向方法 .....	37
2.4.3 表面锚定能 (Surface Anchoring Energy) .....	38
2.5 液晶指向矢分布的数值计算方法 .....	39
2.5.1 动态平衡方程 .....	40
2.5.2 数值计算方法 .....	41
2.6 光在液晶显示器中的传播 .....	41
2.6.1 电动力学基础 .....	42

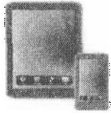


2.6.2	琼斯 (Jones) 矩阵法	47
<b>第3章</b>	<b>LCD 模式及其特性</b>	<b>53</b>
3.1	扭曲向列相 (Twisted Nematic, TN) 模式	53
3.1.1	TN 模式结构与显示原理	53
3.1.2	阈值特性与液晶指向矢分布	54
3.1.3	光透过率特性	55
3.1.4	视角特性	60
3.1.5	响应时间特性	64
3.2	共面开关 (In-Plane Switching, IPS) 模式	66
3.2.1	IPS 模式结构与显示原理	66
3.2.2	阈值特性与液晶指向矢分布	66
3.2.3	光透过率特性	68
3.2.4	视角特性	68
3.2.5	响应时间特性	70
3.3	边缘场开关 (Fringe-Field Switching, FFS) 模式	70
3.3.1	FFS 模式结构与工作原理	70
3.3.2	FFS 模式的电场分布	71
3.3.3	光透过率特性	72
3.4	垂直取向 (Vertical Alignment, VA) 模式	74
3.4.1	VA 模式结构与显示原理	74
3.4.2	阈值特性	75
3.4.3	光透过率特性	76
3.4.4	视角特性	76
3.4.5	响应时间特性	78
<b>第4章</b>	<b>TFT 结构与工作原理</b>	<b>79</b>
4.1	半导体器件基础	79
4.1.1	金属-半导体 (MS) 接触	79
4.1.2	MOS 电容	85
4.1.3	MOSFET	87
4.2	薄膜晶体管	92
4.2.1	TFT 与 MOSFET 比较	92
4.2.2	薄膜晶体管的工作原理	94
4.2.3	薄膜晶体管的特性参数	96
4.3	非晶硅 TFT	98
4.3.1	非晶硅的物理特性	98
4.3.2	非晶硅 TFT 结构	101
4.3.3	a-Si:H TFT 的工作特性	104





4.4	多晶硅 TFT .....	105
4.4.1	多晶硅的物理特性 .....	105
4.4.2	低温多晶硅 TFT 结构 .....	107
4.4.3	低温多晶硅 TFT 的工作特性 .....	111
<b>第 5 章</b>	<b>TFT-LCD 面板结构与显示原理 .....</b>	<b>113</b>
5.1	TFT-LCD 面板结构 .....	113
5.1.1	TFT-array 基板结构 .....	114
5.1.2	CF 基板结构 .....	121
5.2	TFT-LCD 的工作原理 .....	124
5.2.1	单位像素的工作原理 .....	124
5.2.2	TFT-LCD 面板的工作原理 .....	126
5.3	灰阶与彩色显示原理 .....	128
5.3.1	灰阶 (Gray Scale) 显示原理 .....	128
5.3.2	彩色显示原理 .....	130
5.3.3	彩色显示方法及基本特性 .....	132
5.4	影响 TFT-LCD 显示特性的因素 .....	137
5.4.1	TFT 结构的寄生电容 .....	137
5.4.2	扫描线的 RC 延迟 .....	140
5.4.3	液晶盒的漏电流 .....	142
<b>第 6 章</b>	<b>TFT-LCD 显示特性改善技术 .....</b>	<b>146</b>
6.1	开口率 .....	146
6.1.1	TFT-LCD 的开口率 .....	147
6.1.2	高开口率 TFT-LCD .....	148
6.2	视角 (Viewing Angle) .....	150
6.2.1	多畴配向结构 .....	150
6.2.2	S-IPS 模式与 UFFS 模式 .....	151
6.2.3	MVA 模式与 PVA 模式 .....	152
6.3	响应时间 .....	154
6.3.1	灰阶间响应时间 (Gray To Gray, GTG) .....	154
6.3.2	过驱动 (Over Drive) 技术 .....	155
6.3.3	预倾角电压技术 .....	157
6.4	移动图像响应特性 .....	158
6.4.1	拖影现象 .....	158
6.4.2	液晶的响应时间引起的拖影现象 .....	159
6.4.3	人的视觉系统引起的拖影现象 .....	160
6.4.4	移动图像响应时间 .....	163
6.4.5	减轻拖影现象的技术 .....	164
6.5	精确显示色彩 (Accurate Color Capture, ACC) 技术 .....	165
6.6	色序法 .....	168



6.7	光学补偿弯曲 (Optically Compensated Bend, OCB) 模式 .....	171
6.7.1	OCB 模式的结构 .....	171
6.7.2	视角特性 .....	171
6.7.3	响应时间特性 .....	172
<b>第 7 章</b>	<b>非晶硅 TFT-LCD 工艺流程与制造技术</b> .....	<b>174</b>
7.1	TFT-array 与 DRAM 比较 .....	174
7.2	TFT-array 基板制作 .....	176
7.3	TFT-array 制造技术 .....	180
7.3.1	清洗技术 .....	180
7.3.2	溅射技术 .....	183
7.3.3	PECVD 成膜技术 .....	189
7.3.4	涂胶/曝光/显影 (Photolithography) 技术 .....	193
7.3.5	湿刻技术 .....	204
7.3.6	干刻技术 .....	209
7.3.7	光刻胶剥离技术 .....	218
7.3.8	退火技术 .....	220
7.3.9	工程检查技术 .....	220
7.4	4Mask 工艺 .....	222
7.4.1	4Mask 工艺思路 .....	223
7.4.2	半曝光技术 .....	223
7.4.3	4Mask 工艺流程与工艺参数 .....	225
7.5	CF 制造技术 .....	227
7.5.1	CF 制造技术分类 .....	227
7.5.2	彩膜基板制作 .....	228
7.6	成盒制造技术 .....	230
7.6.1	配向膜涂敷 .....	231
7.6.2	配向膜摩擦 (Rubbing) .....	232
7.6.3	制盒技术 .....	233
7.6.4	切断工程 .....	238
7.6.5	面板显示检查 (简称 P 检) .....	240
7.6.6	偏振片贴附技术 .....	243
7.7	模块 (Module) 制造技术 .....	244
<b>第 8 章</b>	<b>非晶硅 TFT-LCD 不良检查与分析</b> .....	<b>251</b>
8.1	不良检查 .....	251
8.1.1	Array 工程检查 .....	251
8.1.2	Array 工程检查设备 .....	252
8.1.3	Array 工程修复设备 .....	257
8.2	不良分析方法 .....	259
8.2.1	显示推理法 .....	259

8.2.2	图片分析法	265
8.2.3	数据分析法	267
8.2.4	解析法	270
8.3	不良发生原因	270
8.3.1	Array 工程	270
8.3.2	成盒工程	275
8.4	不良分析案例	277
8.4.1	D 图形异常	277
8.4.2	漏光	280
8.4.3	虫蚀 G 断	282
8.4.4	纵筋不均	292
<b>第 9 章</b>	<b>低温多晶硅 TFT 工艺流程与制造技术</b>	<b>295</b>
9.1	低温多晶硅 TFT-LCD 与非晶硅 TFT-LCD 比较	295
9.2	低温多晶硅 TFT-array 工艺流程	297
9.3	低温多晶硅 TFT 制造技术	302
9.3.1	脱氢处理	303
9.3.2	多晶硅薄膜制作技术	303
9.3.3	氧化层形成技术	308
9.3.4	离子注入技术	309
9.3.5	离子激活技术	312
9.4	PMOS LTPS 技术	313
<b>第 10 章</b>	<b>TFT 器件及显示技术的进展与展望</b>	<b>318</b>
10.1	有机 TFT (Organic TFT, OTFT)	318
10.1.1	导电性有机物的导电机理	318
10.1.2	有机 TFT 的制作	321
10.1.3	有机 TFT 的应用以及未来展望	322
10.2	氧化物 TFT	323
10.2.1	氧化物半导体的导电机理	324
10.2.2	氧化物半导体制作	324
10.2.3	氧化物 TFT 的应用以及未来展望	325
10.3	反射型与半反半透型 LCD	328
10.3.1	反射型 LCD	329
10.3.2	半反半透 (Transflective) 模式	332
10.4	三维 (3D; Three Dimension) 立体显示	333
10.4.1	三维立体显示分类以及工作原理	333
10.4.2	三维立体显示的未来展望	337
10.5	透明显示器	338
10.5.1	透明显示产品简介	339
10.5.2	透明显示器的今后研究方向	340



10.6 柔性显示技术 .....	342
10.6.1 柔性显示器的分类 .....	342
10.6.2 柔性基板 .....	343
10.6.3 驱动器件 .....	346
10.6.4 显示模式 .....	346
附录 A TFT-LCD 用玻璃 .....	348
附录 B 常用气体特性 .....	357
附录 C 常用化学材料特性 .....	361
附录 D TFT-LCD 生产用材料规格 .....	364
参考文献 .....	376
中文索引 .....	381
英文索引 .....	392



# 第 1 章 TFT - LCD 技术概要

本章介绍了 TFT - LCD 的技术发展历史、液晶显示器的分类以及矩阵式液晶显示器的工作原理。为了便于读者学习后续章节，在本章的最后对 TFT - LCD 的基本结构做了简单的说明。

## 1.1 TFT - LCD 技术发展历史

液晶的发现可以追溯到 1854 年德国生理学家 Virchow 发现的溶致型液晶和 1888—1889 年奥地利植物学家埃尼采尔 (Reinitzer) 与德国物理学家雷曼 (Lehmann) 发现的热致型液晶，至今已经有 100 多年历史。埃尼采尔发现把胆甾醇苯酸酯加热到 145.5℃ 时，晶体熔融成一片混浊的液体，继续加热到 178.5℃ 时，混浊的液体又变得清澈透明，把液体冷却，又会有从紫色过渡到橙色、绿色等颜色变化的现象。埃尼采尔把观察到的现象告诉德国物理学家晶体光学研究的创始人雷曼，并把样品送给了他。在偏光显微镜下，雷曼发现，这种奇异的液体具有与晶体类似的双折射性质，基于液体的流动特性和晶体的光学各向异性，他称这种物质为 Flussige Kristall (可流动的晶体)，Flussige Kristall 在英语中称 Liquid Crystal，即液晶。20 世纪 20 年代，很多液晶研究者们参与了液晶制作，用各种方法合成出 300 多种液晶。1922 年法国科学家弗朗德尔 (Freidel) 提出了液晶的分类方法，由此产生了液晶的三种相即向列相、胆甾相和近晶相的划分。1933 年，在法拉第学会召开的研讨会上，俄罗斯科学家弗里德里克斯 (Fredericksz) 报告了磁场对液晶分子排列的转变效应，也就是弗里德里克斯转变，这一现象被认为是使液晶显示 (Liquid Crystal Display, LCD) 开发成为可能的最重要的物理现象，通过这种物理现象可以在外加电场的作用下得到向列相液晶的形变和临界值。

尽管液晶的发现是在 19 世纪，但是直到 20 世纪 60 年代液晶研究者们合成出常温下具有液晶态的物质以后，液晶的商品化应用才成为可能。1962 年 RCA 公司的威廉斯 (Williams) 在实验中发现，对夹在透明电极间的液晶上施加足够大的直流电压或低频电压时，入射光受到强烈的散射，并申请了动态散射模式液晶显示器 (Dynamic Scattering Mode, DSM) 专利。1968 年 RCA 公司的 Heilmair 基于动态散射模式研制出液晶显示屏，给全球的电子技术人员带来了巨大冲击。以此为契机，日本、英国及瑞士的显示器研究人员纷纷涉足液晶显示研究领域，可以说，从那时起，全球性 LCD 的应用开发拉开了帷幕。1973 年，夏普公司采用 DSM 技术开始批量生产液晶显示计算器，但是