

硅薄膜晶体管液晶显示器的发展*

郭立强^{1, †} 丁建宁^{1, 2} 何宇亮³ 袁宁一² 祁宏山¹

(1 江苏大学机械工程学院 镇江 212013)

(2 江苏工业学院新能源工程研究院 常州 213164)

(3 南京大学物理系 南京 210093)

摘要 在当前迅速发展的液晶显示技术中,薄膜晶体管液晶显示器以其大容量、高清晰度和高品质全真彩色^[1]受到人们的广泛青睐.薄膜晶体管液晶显示器的显示质量和整体性能在很大程度上取决于薄膜晶体管性能,薄膜晶体管(TFT)是众多场效应晶体管(FET)中的一种^[2].非晶硅用于制作薄膜晶体管液晶显示器技术的成熟,使非晶薄膜晶体管液晶显示器在薄膜晶体管液晶显示器的市场中占据了主导地位,而非晶硅薄膜晶体管由于其低迁移率、电导率^[3]等性能,严重制约了薄膜晶体管液晶显示器的发展,寻找合适的替代品,追求高迁移率和高电导率一直是研究人员关注的焦点,在此基础上,多晶硅、微晶硅相继发展,虽然在一定程度上暂时解决了迁移率、电导率低的问题,但因多晶硅、微晶硅的价格昂贵、材料短缺,因而未能动摇非晶硅的主导地位.随后的纳米硅薄膜晶体管液晶显示器依靠其本身具有高电导率、高迁移率^[4-6]的优越性以及当前纳米技术的进展而成为一个引人注目的新亮点.

关键词 液晶显示器 非晶硅 纳米硅

Silicon Thin-Film Transistor Liquid Crystal Displays

GUO Li-Qiang^{1, †} DING Jian-Ning^{1, 2} HE Yu-Liang³ YUAN Ning-Yi² QI Hong-Shan¹

(1 School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2 Institute of New Energy Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

(3 Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract In liquid crystal display (LCD) technology, thin-film transistor LCDs are currently favored due to their high-capacity, high-definition, and high-quality full color^[1]. The display quality and overall performance of such monitors depend largely on the performance of the thin-film transistors, which are one of a large group of metal-oxide-silicon field-effect transistors^[2]. Amorphous silicon thin-film transistor LCDs currently occupy a dominant position in the market as the technology is mature, but its further development is seriously restricted because thin-film transistors have low mobility and conductivity. The pursuit of a suitable replacement with high mobility and conductivity led to great progress in the development of polycrystalline silicon and silicon-ceramic devices. Although the problems have been resolved temporarily to a certain extent, due to the high price and shortage of these materials the dominant position of amorphous silicon has not yet been shaken. Now, nano-silicon thin-film transistor LCDs have become a new focus of attention because of their superior high conductivity, high mobility^[4-6], and the rapid progress of nanotechnology.

Keywords liquid crystal display, amorphous silicon, nano-silicon

1 引言

薄膜晶体管液晶显示器英文名称是 Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display (TFT-LCD) 是英文字头的缩写.薄膜晶体管液晶显示器技术是一种微

电子技术与液晶显示器技术巧妙结合的技术. 把单

* 江苏省“六大人才高峰计划”(批准号 06-D-022)资助项目
2008-07-01 收到

† 通讯联系人. Email: hhw_665@163.com

晶 Si 上进行微电子精细加工的技术,移植到在大面积玻璃上进行薄膜晶体管(TFT)阵列的加工,再将该阵列基板与另一片带彩色滤色膜的基板,利用与业已成熟的液晶显示器(LCD)技术,形成一个液晶盒,再经过后工序如偏光片贴覆等过程,最后形成液晶显示器件。

薄膜晶体管液晶显示器技术是由欧美国家率先提出的,但由于技术和制作过程不够成熟,直到上世纪 80 年代末期,日本厂商完全掌握了主要生产技术,并开始进行大规模的生产,形成了目前的巨大产业。1992 年,随着笔记本电脑对液晶显示器件产品的需求,薄膜晶体管液晶显示器确立了作为液晶显示的主流地位,并随着技术的进一步发展,薄膜晶体管液晶显示器的生产成本大幅度下降,促使人们对显示器件的需求从笨重的阴极射线管转向轻薄的薄膜晶体管,且最终超过阴极射线管的市场份额,到 2000 年前后,开启了液晶电视新行业。据中国电子报报道,目前薄膜晶体管液晶显示器制造技术已经发展到 8 代线、10 代线、11 代线、12 代线的建设也已经在规划中。我国薄膜晶体管液晶显示器在显示领域已经落后,但专家建议我们不能绕过薄膜晶体管液晶显示器,寻找别的突破口发展我国的平板显示产业,而应迅速开展 TFT-LCD 生产线和相关技术创新能力的建设,提高我国薄膜晶体管液晶显示器件产业在国际上的竞争力。

2 薄膜晶体管液晶显示器的工作原理

在 20 世纪 60 年代中期,科学家发现通过施加外部电场可以改变通过液晶材料的光的方向^[7],利用光的这一原理制成了液晶显示器件,薄膜晶体管液晶显示技术是薄膜晶体管驱动液晶材料进行显示的技术。薄膜晶体管液晶显示器结构包括上偏振片、彩色滤光片、液晶层、薄膜晶体管阵列、下偏振片和背光模组,并在薄膜晶体管阵列的基板上连接驱动。在薄膜晶体管液晶显示器中,薄膜晶体管起到开关元件的作用^[8]。常用的薄膜晶体管是三端器件。在玻璃基板上制作半导体层,在两端有与之相连接的源极和漏极,并通过栅极绝缘膜,与半导体相对置,利用施加于栅极的电压来控制源、漏电极间的电流。

对于显示屏来说,每个像素从结构上可以看作是像素电极和公共电极之间夹一层液晶。更重要的是从电的角度可以把它看作电容。其等效电路如图 1 所示。要对 j 行 i 列的像素 $P(i, j)$ 充电,就要把开

关 $T(i, j)$ 导通,对信号线 D_i 施加目标电压。当像素电极被充分充电后,即使开关断开,电容中的电荷也得到保存,电极间的液晶分子继续有电场作用。数据(列)驱动器的作用是对信号线施加目标电压,而栅极(行)驱动器是起开关的导通和断开的作用。由于加在液晶层上的电压可存储,从而使液晶层能稳定地工作。这个显示电压通过薄膜晶体管也可在短时间内重新写入,因此,即使对高清晰度液晶显示器,也能满足图像品质要求。

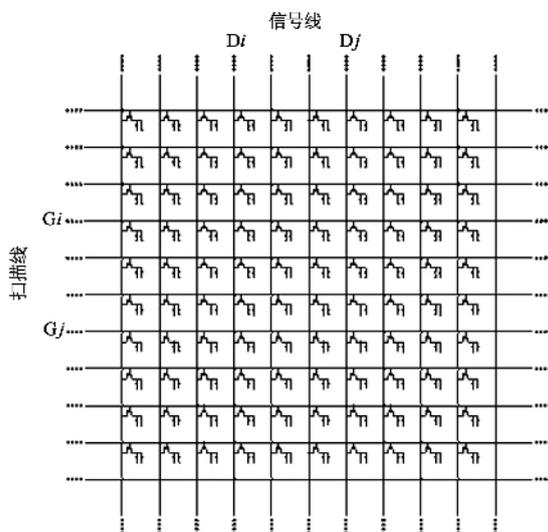


图 1 TFT-LCD 等效电路图 (D_i 是漏极第 i 列信号线, D_j 是漏极第 j 行信号线, G_i 是栅极第 i 列扫描线, G_j 是栅极第 j 行扫描线)

显示图像的关键还在于液晶在电场作用下的分子取向。一般通过对基板内侧的取向处理,使液晶分子的排列产生我们希望的形变,来实现不同的显示模式。在电场作用下,液晶分子产生取向变化,并通过与偏振片的配合,使入射光在通过液晶层后强度发生变化,从而实现图像显示。

薄膜晶体管液晶显示器与无源 TN-LCD, STN-LCD 的简单矩阵不同,它在液晶显示屏的每一个象素上都有一个薄膜晶体管,可有效地克服非选通时的串扰,使显示液晶屏的静态特性与扫描线数无关,因此大大提高了图像质量。而开关单元的特性,则要满足通态电阻低和闭态电阻非常大这一要求。

3 薄膜晶体管的结构

薄膜晶体管液晶显示器的显示质量和性能在很大程度上都取决于薄膜晶体管的性能,而质量良好的薄膜又是保证薄膜晶体管的性能的关键所在。薄

膜晶体管的结构一般分为:正交叠结构和反交叠结构.反交叠结构包括背沟道刻蚀型和背沟道保护型^[9].由于正交叠结构形成的薄膜晶体管的源极和漏极与有源层构成的欧姆接触很不理想,所以大多在制造薄膜晶体管时选用反交叠结构.正交叠结构薄膜晶体管、背沟道保护型结构薄膜晶体管也称为顶栅式薄膜晶体管、背沟道阻挡型薄膜晶体管^[10].但不论是正交叠结构,还是反交叠结构,其结构的组成基本都是一样的,一般包括:栅金属电极、栅绝缘层、有源层、欧姆接触层、源电极、漏电极.栅电极金属可选用金、钨、铝、钼、铜以及某些合金材料等,但就其成本而言,铝被最广泛采用的.栅绝缘层可采用由不同方法制备的二氧化硅薄膜和氮化硅薄膜,这两种薄膜各有利弊,初期的薄膜晶体管是用二氧化硅薄膜作为栅绝缘层的,二氧化硅可以填补有源层的晶粒缺陷,增大晶粒密度.而现在越来越青睐于应用氮化硅薄膜作栅绝缘层^[11,12],但氮化硅薄膜的厚度对薄膜晶体管的影响很大,太厚导致充电电流 I_{on} 较小,像素电容电压较低,液晶不能被充分驱动,降低了薄膜晶体管的开关性能和器件的对比度,甚至无法显示图像;太薄时抗击穿的能力变差^[7],容易出现栅电极与源极短路现象.针对这一问题,有关研究人员提出了双层栅绝缘层结构^[11,12].有源层采用硅薄膜,硅薄膜按其平均晶粒大小、晶态百分比、氢原子数含量等不同,依次分为非晶硅、微晶硅、纳米硅、多晶硅、单晶硅.各种硅薄膜的主要参数对比见表1.源漏电极普遍使用溅射的ITO薄膜.图2表示了反交叠的结构.

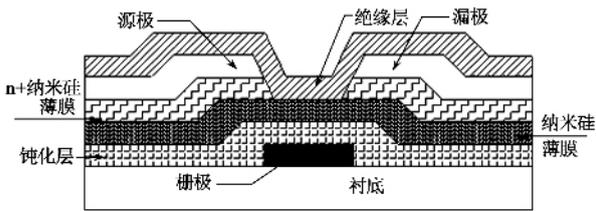


图2 反交叠的结构

4 非晶硅薄膜晶体管液晶显示器的发展与优缺点

非晶硅薄膜晶体管液晶显示器以其成熟的技术和合理的性价比成为显示器行业的佼佼者.非晶硅薄膜晶体管显示器件目前被誉为平板显示器件的标准,它以其大容量、高清晰度以及高彩色品质吸引着越来越多的关注.我国发展平板显示技术虽然较晚,

但经过努力也已具备了生产6代线的能力.无论非晶硅薄膜晶体管的技术如何成熟,均没有超越薄膜晶体管的大致结构,在非晶硅薄膜晶体管中是采用非晶硅作有源层, n^+ 非晶硅作欧姆接触层,由于非晶硅薄膜晶体管的迁移率不高,而薄膜晶体管的迁移率与薄膜晶体管液晶显示器件的响应时间成反比,因此低迁移率不利于薄膜晶体管液晶显示器件性能的提高,非晶体薄膜可经过氢化处理^[12]以提高迁移率.氢化非晶硅是含有氢元素的非晶硅,其特性适于制作薄膜晶体管,氢化非晶硅材料制成的薄膜晶体管包括普通氢化非晶硅薄膜晶体管、高性能非晶硅薄膜晶体管以及低温非晶硅薄膜晶体管^[12].虽然氢化非晶硅在一定程度上提高了薄膜晶体管的迁移率,但是氢化非晶硅薄膜表面存在很多悬挂键^[12]及膜内的缺陷,使得氢化非晶硅中载流子迁移率并未达到理想效果.因此研究人员提出可以掺入镍元素^[10,13],以提高薄膜晶体管的性能.非晶硅薄膜晶体管液晶显示器件依然存在着许多待解决的问题,如迁移率低、动态图像质量^[14]不高、成品率低等.

5 多晶硅、单晶硅薄膜晶体管液晶显示器

多晶硅有源矩阵液晶显示屏^[15]采用集成电路工艺.在其加工过程中,需要高温处理(大约 600°C).在此温度下,玻璃已开始软化,因此必须采用耐高温的价格昂贵的石英材料做衬底,这便增加了多晶硅薄膜的制造成本.虽然采用多晶硅的薄膜晶体管液晶显示屏可满足1080线的高清晰度电视的要求,但制造出N型MOS晶体管(即金属氧化物半导体晶体管)和P型MOS晶体管,以生产出低能耗的互补型MOS晶体管驱动电路^[16],需要增加两道工序,增加了薄膜液晶显示器件中晶体管阵列的制造难度.

多晶硅薄膜晶体管器件与非晶硅薄膜晶体管器件相比具有了以下明显特点:自对准结构、高迁移率、光敏性差和制备工艺与CMOS兼容等^[9],但其随着晶体管尺寸缩小后,由Kink效应和较低的导通能力所导致的信号延迟和输出电压信号失真的现象,使其未能适应显示技术的需求(在输出特性中,当偏置在高漏压的情况下出现源漏电流突增现象,称为Kink效应)最近微晶硅材料的TFT器件虽有发展的趋势,但其柱状生长模式会导致其结构和电

表1 硅薄膜主要参数对比

特征	非晶硅(a-Si:H)	微晶硅($\mu\text{c-Si:H}$)	纳米硅(nc-Si:H)	多晶硅(pc-Si:H)		单晶硅(c-Si)
				高温生长	低温生长	
$X_c/\%$	0	<45	53±5	>70		100
平均晶粒大小/nm	0	3—10	3—8	>20		∞
氢原子数含量/%	5—10	~15	15—25	0		0
迁移率/ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$	~0.2	0.5左右	8—10	1—1000	40—200	300—600
电导率/ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$	10^{-9} — 10^{-8}	10^{-7} — 10^{-4}	10^{-3} — 10^{-0}	10^{-6} — 10^{-5}		10^{-9} — 10^{-4}

学性能不均匀。材料的柱状生长使其晶化百分比、晶粒尺寸和暗电导受到薄膜厚度的调制;并在平行于衬底和垂直于衬底的方向,电导率随着材料衬底条件的变化呈现出不同的变化规律。另外,多晶硅、微晶硅的价格昂贵,材料短缺,导致很难在显示技术中得到广泛的应用。

以低温多晶硅晶体管为例,随着低温制备大面积多晶硅薄膜技术的成熟,多晶硅薄膜材料在显示技术领域展示了广阔的应用前景。大面积的低温多晶硅薄膜晶体管的高迁移率是通过优化多晶硅材料的制备工艺来完成的,它实现了液晶显示器件的周边驱动电路在玻璃基板上的集成,也实现了控制电路、CPU 处理器、音频电路等系统功能的集成。然而,多晶硅薄膜的生长对温度有很大的要求,即需要高温工艺来制备,温度越高,薄膜晶粒尺寸越大,晶粒与晶粒之间的缺陷越少,迁移率才能提高;同时,优良的多晶硅薄膜也需要很长的制备时间。对于如何降低晶化温度和减少晶化时间是多晶硅薄膜生长一直未得到解决的问题。最后,多晶硅薄膜结构决定其电学特性受晶界势垒和缺陷陷阱的影响而变得更为复杂^[9,15],曾经还有过有关多晶硅电导率和施主浓度以及陷阱密度关系的研究报道。但无论多晶硅薄膜晶体管如何发展,因其价格昂贵、材料短缺未能动摇非晶硅的主导地位。

6 纳米硅薄膜晶体管液晶显示器的发展展望

纳米硅薄膜是一种具有特殊网络结构的薄膜^[17],在该结构中呈现出紧密相接而又杂乱的细小晶粒(原子阵列明显不同于非晶硅和微晶硅),晶粒尺寸可达到 1.76nm 左右,如果恰当控制其晶粒尺寸,可以在室温下得到高达 $10^{-1}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ^[18]的本征电导率,电导激活能仅为 0.10eV^[18],据国内外有关报道^[19]纳米硅薄膜材料制成的晶体管将具有高迁移率、低漏电流、极短的开关时间以及良好的 $I-V$ 特性,因此有利于整个系统整体性能的提高。本文作者将纳米硅薄膜晶体管应用于液晶显示设备,研制

纳米硅薄膜晶体管液晶显示器,即 nc-Si:H TFT-LCD。

6.1 采用玻璃作衬底的纳米硅薄膜晶体管液晶显示器

在玻璃基板上采用 PECVD 沉积技术制作半导体层,即双氮化硅薄膜做绝缘层及钝化层,厚度分别为 200—300nm,利用 SiN_x 薄膜做栅极绝缘层,克服了 SiO_2 薄膜做栅极绝缘层阻挡阳离子的能力差,不具有防水性、抗钠离子性,杂质的渗透能力差,抗辐射性能低等造成 TFT 器件性能不稳定的现象^[20],纳米硅薄膜是采用高氢稀释的硅烷作为反应气体,在 RF+DC 双重功率源作用和衬底温度约为 250℃ 的条件下生长成的,具有很高的稳定性、迁移率、电导率以及良好的 $I-V$ 特性,使 TFT 器件的漏电流的强度在 $V_{\text{DC}}=10\text{V}$ 时降低到 10^{-13}A ,在 4V 的阈值电压下,开态电流与闭态电流之比提高到 10^8 。厚度为 50—100nm 的 n^+ 纳米硅薄膜形成势垒区,并在两端溅射厚度为 300—500nm 的 ITO 薄膜作为源极和漏极,通过栅极绝缘膜,与半导体相对置,通过施加于栅极的电压来控制源、漏电极间的电流。由此制备出的薄膜晶体管液晶显示器,在制造方面,降低了成本价格,提高了成品率,可实现大面积的批量生产;在性能方面,高迁移率,提高了动态图象质量,缩短了响应时间,而高稳定性,也保证了产品总体性能。

6.2 采用单晶硅作衬底的纳米硅薄膜晶体管液晶显示器

单晶硅的禁带宽度窄,而纳米硅的禁带宽度宽,用单晶硅作衬底,长成纳米硅薄膜后,单晶硅与纳米硅薄膜之间形成 P-N 异质结,其结构如图 3 所示。

实验发现,在 P-N 异质结的二维结构面上具有二维电子系的特殊现象,易于载流子的传输,其迁移率甚至可达到 $1000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,因此,可在高性能或小面积要求的条件下,采用单晶硅作衬底,制作纳米硅薄膜晶体管阵列,来实现薄膜晶体管的高迁移性能。其结构如图 4 所示:

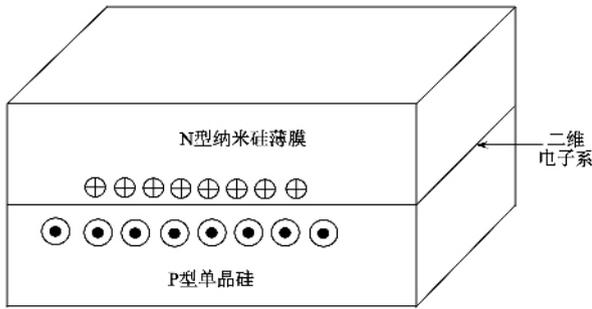


图3 单晶硅与纳米硅薄膜形成的 p-n 异质结

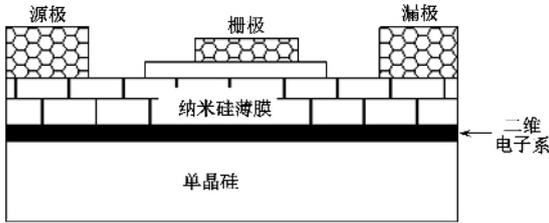


图4 单晶硅衬底的纳米硅薄膜晶体管

单晶硅薄膜晶体管液晶显示器仅从性能上,提高了薄膜晶体管的迁移率,克服了响应时间长的问题,使薄膜晶体管液晶显示器的图像真正实现“真彩”。

6.3 采用塑料等其他材料的纳米硅薄膜晶体管液晶显示器

纳米硅薄膜晶体管液晶显示器虽然在性价比上优于了非晶硅、多晶硅薄膜晶体管液晶显示器,但它不代表薄膜晶体管液晶显示器已发展到极点,在高温、高磁场、移动性等的设备上往往对薄膜晶体管液晶显示器性能均有不同的要求,随着科技的进步以及技术的成熟,我们还将继续采用合适的塑料等其他材料作衬底,制作薄膜晶体管阵列,实现不同用途的液晶显示。

7 结束语

从液晶显示技术的发展来看,如何提高液晶显示器件的性能和扩大显示器件的应用领域,如响应时间、清晰度以及选用可卷曲材料作薄膜晶体管的衬底^[21]等等,仍将是该领域下一步的工作重点。

参 考 文 献

[1] 许洪华,徐征,黄金昭等. 光子技术,2006,3:135 [Xu H H, Xu Z, Huang J Z *et al.*. Photonic Technology, 2006, 3:135 (in Chinese)]

[2] Jin B A, Mu Q, Ma Y. Micronelectronics, 2004, 134:554
 [3] Chan K Y, Eerke B, Helmut S *et al.* Chinese Journal of Electron Devices, 2008, 31:109
 [4] Alex Z, Kattamis, Russell J *et al.* IEEE E D L, 2006, 27:49
 [5] 何宇亮,余明斌,胡根友等. 物理学报,1997,46:1636 [He Y L, Yu M B, Hu G Y *et al.* Acta Physica Sinica, 1997, 46:1636 (in Chinese)]
 [6] 徐澄. 家庭电子,2005(4):7 [Xu C. Home Electronics, 2005 (4):7 (in Chinese)]
 [7] Wang L J, Wang B J. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2004, 27:74
 [8] 徐澄. 家庭电子,2005(12):9 [Xu C. Home electronics, 2005 (12):9 (in Chinese)]
 [9] 王大巍,王刚,李俊峰. 薄膜晶体管液晶显示器件的制造、测试与技术发展. 北京:机械工业出版社,2007.135—143页 [Wang D W, Wang G, Li J F *et al.* The Development of Thin-film Transistor or Liquid Crystal Display Manufacturing, Testing and Technology. Beijing: China Machine Press, 2007. 135—143 (in Chinese)]
 [10] 史永基,史建军,史红军. 传感器世界,2003(3):15 [Shi Y J, Shi J J, Shi H J. Sensor World, 2003, 3:15 (in Chinese)]
 [11] 张化福,祁康成,袁玉珍等. 工艺技术与材料,2007,7:602 [Zhang H F, Qi K C, Yuan Y Z *et al.* Process Technique and Materials, 2007, 7:602 (in Chinese)]
 [12] 谢振宇. a-Si TFT用氮化硅薄膜制备及其性能的研究,电子科技大学硕士学位论文,2007.10—45 [Xie Z Y. The Study of a-Si TFT with SiNX and its property. University of Electronic Science Technology of China, Master Dissertation, 2007. 10—45 (in Chinese)]
 [13] 史永基,史建军,史红军. 传感器世界,2003(3):10 [Shi Y J, Shi J J, Shi H J. Sensor World, 2003(3):10 (in Chinese)]
 [14] 闫亮,梁珂,徐宇博. 科技经济市场,2007(1):48 [Yan L, Liang K, Xu Y B. Science and Technology Economy Market, 2007(1):48 (in Chinese)]
 [15] Wang H H, Qi K C. Advanced Display, 2005, 55:9
 [16] 马兰. 铁道知识,2006(2):14 [Ma L. Railway Knowledge, 2006(2):14 (in Chinese)]
 [17] Zhou B Q, Pan H T, Zhou P Q. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2007, 36:296
 [18] 何宇亮. 中国科学(A辑),1992(9):998 [He Y L. Science in China(A), 1992(9):998 (in Chinese)]
 [19] Cheng I C, Sigurd W. IEEE Transactions on Electron Devices, 2008, 55:973
 [20] Qian X Z. J. of WenZhou Normal College (Nat. Sci.), 2004, 25(2):59
 [21] BJB. 日本开发超薄型液晶显示面板,前沿科技,2007,25(12):72 [BJB. Japan's Development of Ultra-slim LCD Panel. Forefront of science and technology, 2007, 25(12):72 (in Chinese)]