



DUOYUAN FEIJING YANGHUAWU BAOMO  
JI QI BAOMO JINGTIGUAN

# 多元非晶氧化物薄膜 及其薄膜晶体管

岳 兰 著



西安交通大学出版社

贵州民族大学学术文库

# 多元非晶氧化物薄膜 及其薄膜晶体管

岳 兰 著

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

-----  
图书在版编目 ( C I P ) 数据

多元非晶氧化物薄膜及其薄膜晶体管 / 岳兰著. —  
成都: 西南交通大学出版社, 2019.7  
ISBN 978-7-5643-6978-1

I. ①多… II. ①岳… III. ①薄膜晶体管 - 研究  
IV. ①TN321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 146015 号  
-----

Duoyuan Feijing Yanghuawu Baomo Ji Qi Baomo Jingtiguan  
多元非晶氧化物薄膜及其薄膜晶体管  
岳兰 著

责任编辑 牛 君  
助理编辑 赵永铭  
封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)  
发行部电话 028-87600564 028-87600533  
邮 政 编 码 610031  
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>  
印 刷 四川煤田地质制图印刷厂  
成 品 尺 寸 170 mm × 230 mm  
印 张 9.5  
字 数 172 千  
版 次 2019 年 7 月第 1 版  
印 次 2019 年 7 月第 1 次  
书 号 ISBN 978-7-5643-6978-1  
定 价 68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

在信息产业的发展过程中，显示技术和显示器件作为人机交互的主要枢纽/界面，进入了加速发展的时期。经过技术的不断革新，平板显示器已取代了早期传统的阴极射线管显示器，成为显示技术市场的主流产品，并需要向大尺寸、超高清、裸眼 3D、全透明、可卷曲、低功耗的方向发展。

平板显示器的核心驱动元件——多元非晶氧化物半导体（AOS）薄膜晶体管（TFT），凭借迁移率高、可见光透明性好以及均匀性优良等特点，有望突破传统硅基 TFT 的技术瓶颈，从而推动新一代显示技术蓬勃发展。

目前，基于多元非晶 In-Ga-Zn-O(a-IGZO)沟道层薄膜晶体管的研究已取得了一些实质性的进展。然而，In、Ga 的消耗与日俱增，价格持续上涨，因此开发少含甚至不含 In 和 Ga 的新型 AOS 沟道层材料成为本领域的一个重要研究方向之一。此外，为了推动透明显示和柔性显示等新一代显示技术的发展，开发可低温制备（ $<150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）且具备较好光学和电学性能，同时适用于 AOS TFT 的介质层具有重要的现实意义。近年来，为了降低工业化成本，溶胶凝胶法制备 AOS TFT 受到了研究人员的青睐。已报道的基于溶胶凝胶法的 AOS TFT 主要是采用旋涂或喷墨打印工艺成膜。事实上，浸渍提拉法作为一种成本低廉、操作简单且适合大面积均匀成膜的工艺，同样值得被开发用于 AOS TFT 中沟道层和介质层的研制。更值得注意的是，相比传统溅射法而言，基于溶胶凝胶法制备 AOS TFT 的器件迁移率普遍偏低，器件性能有待提升。基于上述研究背景，本书基于溶胶凝胶法的浸渍提拉工艺研制了非晶 La-Zn-Sn-O（a-LZTO）以及非晶 Al-In-Zn-O（a-AIZO）的两种多元 AOS 沟道层薄膜材料，并以 a-LZTO 和 a-AIZO 薄膜作为沟道层，尝试以有机聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）材料（同样采用浸渍提拉工

艺制备)来代替传统的无机  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等作为介质层,从而将无机多元 a-LZTO、a-AIZO 沟道层和有机 PMMA 介质层材料的优点结合起来,研制了混合型、顶栅结构 a-LZTO TFT 和 a-AIZO TFT 器件。

全书共分 7 章,主要内容是:第 1 章全面介绍了平板显示器中核心驱动元件——多元非晶氧化物薄膜晶体管的工作原理、器件结构、性能表征,以及其在超高清大屏显示、3D 显示、透明显示以及柔性显示等新一代显示技术中的应用优势;系统介绍了多元非晶氧化物薄膜晶体管国内外的研究进展。第 2 章介绍了多元非晶氧化物薄膜及其晶体管器件研制过程中涉及的制备方法和表征手段。第 3 章、第 4 章和第 5 章详细介绍了基于浸渍提拉法低成本制备的两种新型非晶氧化物沟道层材料和一种有机介质层材料的组成成分、制备工艺条件,以及由其构成的多元非晶氧化物 TFT 器件的制备流程,探讨影响多元非晶氧化物 TFT 性能的关键参数和影响机理。第 6 章通过一具体的多元氧化物材料(如 Al-In-Zn-O)为实例,尝试基于密度泛函理论的第一性原理计算方法,从电子和原子水平对材料的物理特性进行预测,揭示多元氧化物材料中的缺陷态及掺杂原子对材料宏观性能影响的物理本质。第 7 章对未来研究趋势进行了预测和展望。

衷心感谢复旦大学张群教授对书中研究工作的宝贵指导与讨论,并同样感激贵州民族大学的同事、朋友和家人的支持与帮助。本书涉及的一些研究内容得到了国家自然科学基金(61504031)、贵州省自然科学基金(黔科合 LH 字[2014]7388 号)和贵州民族大学校人才引进项目(15XRY009)的资助,在此也表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在错漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2019 年 3 月

# 目 录

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 薄膜晶体管的技术特点 .....                | 1  |
| 1.2 氧化物材料及多元非晶氧化物 TFT 的优势 .....     | 4  |
| 1.2.1 氧化物材料 .....                   | 4  |
| 1.2.2 多元非晶氧化物 TFT 的优势 .....         | 6  |
| 1.3 多元非晶氧化物 TFT 的结构、工作原理及性能表征 ..... | 9  |
| 1.3.1 多元非晶氧化物 TFT 的结构 .....         | 9  |
| 1.3.2 多元非晶氧化物 TFT 的工作原理 .....       | 10 |
| 1.3.3 多元非晶氧化物 TFT 的性能指标 .....       | 14 |
| 1.4 多元非晶氧化物 TFT 的研究现状 .....         | 16 |
| 1.4.1 多元非晶氧化物沟道层的研究 .....           | 16 |
| 1.4.2 介质层材料的研究 .....                | 24 |
| 1.4.3 电极材料的研究 .....                 | 28 |
| 1.4.4 器件结构的研究 .....                 | 29 |
| 1.4.5 多元非晶氧化物 TFT 在显示领域的应用现状 .....  | 32 |
| 1.5 选题意义及研究内容 .....                 | 36 |
| 参考文献 .....                          | 38 |
| 第 2 章 多元非晶氧化物 TFT 的制备及表征 .....      | 50 |
| 2.1 多元非晶氧化物 TFT 的成膜工艺 .....         | 50 |
| 2.1.1 溶胶凝胶法 .....                   | 50 |
| 2.1.2 真空蒸发法 .....                   | 53 |
| 2.2 多元非晶氧化物 TFT 的结构与制备流程 .....      | 54 |

|              |                                    |           |
|--------------|------------------------------------|-----------|
| 2.3          | 表征方法                               | 56        |
| 2.3.1        | 溶胶的热重分析                            | 56        |
| 2.3.2        | 薄膜的厚度测试                            | 56        |
| 2.3.3        | 薄膜的结构分析测试                          | 56        |
| 2.3.4        | 薄膜光学性能测试                           | 59        |
| 2.3.5        | 薄膜电学性能测试                           | 60        |
| 2.3.6        | 薄膜晶体管电学性能测试                        | 61        |
|              | 参考文献                               | 61        |
| <b>第 3 章</b> | <b>非晶 La-Zn-Sn-O 沟道层及其薄膜晶体管的研究</b> | <b>63</b> |
| 3.1          | 概述                                 | 63        |
| 3.2          | La-Zn-Sn-O 沟道层薄膜及其薄膜晶体管的制备         | 64        |
| 3.3          | 溶胶的 TGA 测试                         | 64        |
| 3.4          | La-Zn-Sn-O 薄膜结构与性能的研究              | 66        |
| 3.4.1        | La 含量对薄膜特性的影响                      | 66        |
| 3.4.2        | 膜厚对薄膜特性的影响                         | 71        |
| 3.5          | 非晶 La-Zn-Sn-O 薄膜晶体管电学性能的研究         | 74        |
| 3.5.1        | 沟道层 La 含量对薄膜晶体管性能的影响               | 74        |
| 3.5.2        | 沟道层厚度对薄膜晶体管性能的影响                   | 76        |
| 3.6          | 本章小结                               | 79        |
|              | 参考文献                               | 80        |
| <b>第 4 章</b> | <b>非晶 Al-In-Zn-O 沟道层及其薄膜晶体管的研究</b> | <b>83</b> |
| 4.1          | 概述                                 | 83        |
| 4.2          | Al-In-Zn-O 沟道层薄膜及其薄膜晶体管的制备         | 84        |
| 4.3          | 溶胶的 TGA 测试                         | 86        |
| 4.4          | Al-In-Zn-O 薄膜结构与性能的研究              | 87        |
| 4.4.1        | Al 含量对薄膜特性的影响                      | 87        |
| 4.4.2        | 退火温度对薄膜特性的影响                       | 91        |
| 4.5          | 非晶 Al-In-Zn-O 薄膜晶体管电学性能的研究         | 94        |

|              |                                    |            |
|--------------|------------------------------------|------------|
| 4.5.1        | 沟道层 Al 含量对薄膜晶体管性能的影响               | 94         |
| 4.5.2        | 沟道层退火温度对薄膜晶体管性能的影响                 | 100        |
| 4.5.3        | 高/低电阻率双沟道层薄膜晶体管的制备及性能的研究           | 103        |
| 4.6          | 本章小结                               | 109        |
|              | 参考文献                               | 111        |
| <b>第 5 章</b> | <b>有机聚甲基丙烯酸甲酯介质层的研究</b>            | <b>114</b> |
| 5.1          | 概述                                 | 114        |
| 5.2          | 介质层薄膜的制备                           | 114        |
| 5.3          | 溶胶的 TGA 测试                         | 115        |
| 5.4          | 介质层薄膜的性能分析                         | 116        |
| 5.4.1        | 薄膜的表面形貌                            | 116        |
| 5.4.2        | 薄膜的光学性能                            | 116        |
| 5.4.3        | 薄膜的介电特性                            | 118        |
| 5.5          | 介质层厚度对薄膜晶体管性能的影响                   | 119        |
| 5.6          | 本章小结                               | 122        |
|              | 参考文献                               | 122        |
| <b>第 6 章</b> | <b>氧空位及 Al 掺杂 IZO 电子结构的第一性原理研究</b> | <b>124</b> |
| 6.1          | 概述                                 | 124        |
| 6.2          | 密度泛函理论                             | 124        |
| 6.2.1        | Hohenberg-Kohn 定理                  | 125        |
| 6.2.2        | 自洽 Kohn-Sham 方程                    | 126        |
| 6.2.3        | 局域密度近似                             | 127        |
| 6.3          | 模型构建与计算方法                          | 128        |
| 6.4          | 理想 IZO 电子结构的理论计算与分析                | 130        |
| 6.5          | 氧空位缺陷对 IZO 电子结构的影响                 | 131        |
| 6.6          | Al 掺杂对 IZO 电子结构的影响                 | 133        |
| 6.7          | 本章小结                               | 137        |
|              | 参考文献                               | 138        |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第 7 章 结论与展望 ..... | 140 |
| 7.1 结论 .....      | 140 |
| 7.2 展望 .....      | 142 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 薄膜晶体管的技术特点

随着计算机技术、网络技术和显示技术的出现和不断发展，我们也逐步跨入了多姿多彩的信息化时代。平板显示器作为显示技术市场的主流产品，其根据驱动方式可分为无源驱动（Passive Matrix, PM）和有源驱动（Active Matrix, AM）两种。为了避免无源驱动的行间串扰效应及功耗大、寿命短的问题，平板显示往往采用有源矩阵来辅助驱动，即在信号线与像素电极之间设置一非线性元件来解决器件驱动中的各种问题。

当前市场上有源矩阵的这一非线性核心元件则是薄膜晶体管（Thin-Film Transistor, TFT），一种在玻璃基板上使用薄膜工艺制作的场效应管，其是通过调节栅电压来控制半导体导电能力的一种有源器件。目前这类 TFT 被广泛应用在有源矩阵液晶显示（Active Matrix Liquid Crystal Display, AMLCD）中。美国的调查数据显示，在 2008 年第一季度，平板显示器的出货量已经占到全球显示器市场出货量总额的 51.7%，并且其市场份额呈现出逐年上升的趋势，而在平板显示器件中，AMLCD 占据了高达 88% 的市场份额。近年来，新一代的平板显示技术如以有机发光二极管（Organic Light-Emitting Diode, OLED）为代表的有源矩阵有机发光二极管显示（Active Matrix Organic Light-Emitting Diode, AMOLED）技术逐渐走上前台。国内外对 OLED 器件的研究已经持续了 20 年，也已经有用于手机屏幕的产品。OLED 器件由玻璃上的多层膜结构构成，膜层一般来说包括五个部分：ITO 薄膜电极-空穴传输层-发射层-电子传输层-金属电极，除电极外各层均为有

机材料。在外加电流的驱动下，空穴和电子分别从 OLED 两侧电极注入有机材料中复合并释放能量，能量传递给有机发光物质的分子，使其受激发生辐射跃迁而产生发光现象。OLED 显示器比 LCD 更轻更薄，也没有 LCD 中难以克服的响应时间长和视角小的问题。OLED 显示器如果采用简单的行扫描驱动，在显示屏亮度一定的情况下，显示器的行数越多，选中行就要越亮，需要的电流脉冲就越大。经常施加大电流脉冲会降低 OLED 的发光效率，严重缩短显示器寿命，因此大屏幕的 OLED 必须采用比较复杂的有源驱动方式，而 TFT 在 AMOLED 技术中也取得了一定进展<sup>[1]</sup>。

图 1-1 和图 1-2 分别为 AMLCD 及 AMOLED 中一个显示单元的电结构示意图。在 AMLCD 中一个显示单元主要包括一个 TFT，其被作为控制像素明暗的电子开关。在 AMOLED 的一个子像素显示单元中要包括两个 TFT，一个寻址开关用 TFT ( $T_S$ )，一个驱动 OLED 用 TFT

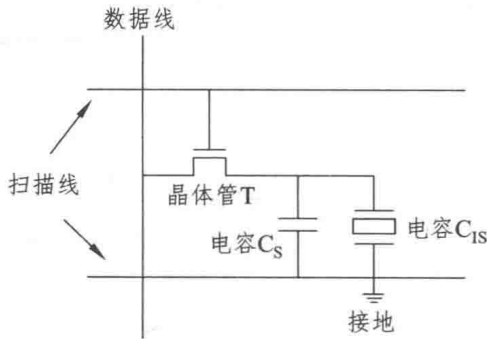


图 1-1 AMLCD 显示单元电路图

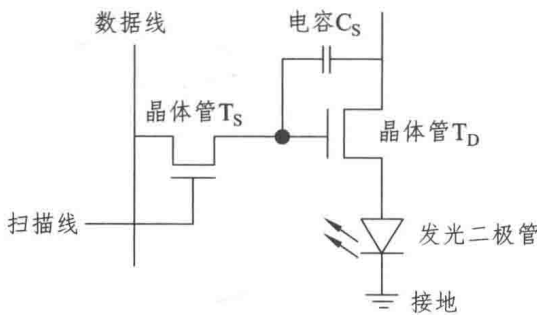


图 1-2 AMOLED 子像素单元电路图

( $T_D$ )。对于选中行，行电极上的电压使得图中左侧的开关 TFT ( $T_S$ ) 导通，亮度信号通过该 TFT 给存储电容充电，充电电压的大小控制了右侧 TFT ( $T_D$ ) 的工作状态，并以此来控制 OLED 的导通电流幅度。扫描下一行时，本行电极上的电压归零，左侧 TFT ( $T_S$ ) 关闭，但存储电容上的电压得以保持，在此后整帧时间内，OLED 上的驱动电流一直保持不变。这样的驱动方案打破了驱动电流和行数的正比关系，OLED 显示器因此才可以达到和 LCD 相似的屏幕面积和分辨率。实际中使用的电路要比图 1-2 复杂得多，为了稳定发光，需要多个 TFT 组成电流稳定补偿电路。与 AMLCD 相比，AMOLED 具有响应速度快、无须背光源、宽视角、低功耗等优点，成为最有希望的新一代显示技术。但由于 AMOLED 为电流驱动，因此，AMOLED 的发展对 TFT 技术提出了更高的要求。

目前，AMLCD 和 AMOLED 中，普遍使用的是传统硅基 TFT。硅基 TFT 包含单晶硅 TFT、低温多晶硅(Low Temperature Poly Si, LTPS)、非晶硅 TFT ( $a\text{-Si:H}$ ) 以及微晶硅 TFT。单晶硅的电子迁移率比 LTPS 高一个数量级，但其生产温度在  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  以上，大面积生产困难，成本昂贵。微晶硅是介于 LTPS 和  $a\text{-Si:H}$  之间的一种技术，微晶硅薄膜是结晶晶粒很小的硅薄膜。在制作 LTPS 半导体层的过程中，适当加大反应气体中氢的含量，可以得到微晶硅。微晶硅 TFT 比 LTPS TFT 场致迁移率更高，在栅压脉冲下的阈值漂移更小，因此有希望应用于 OLED 中替代  $a\text{-Si:H}$  TFT。微晶硅 TFT 技术发展很快，早期的硅薄膜沉积速度慢、器件开关比不高等问题逐步得以解决，然而后来的研究则更多的关注于底栅结构器件沟道界面问题和源漏电极接触电阻问题等。由于这些细节问题的阻碍，微晶硅 TFT 仍待实验研究。因此，目前应用于工业化大规模生产的是 LTPS TFT 和  $a\text{-Si:H}$  TFT。随着人们对显示需求的不断提高，迫切需要实现超高清大屏显示、3D 显示、透明显示以及柔性显示等新一代显示技术。然而面对新一代显示技术，传统硅基 TFT (LTPS TFT 和  $a\text{-Si:H}$  TFT) 却呈现出一些不足：

(1)  $a\text{-Si:H}$  TFT 的迁移率较低 [ $<1\ \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ]，电流供给能力较弱，限制了器件的响应速度。因此， $a\text{-Si:H}$  TFT 技术无法满足 55 英寸 (240 Hz) 以上的大尺寸超高清 AMLCD 的需求，更加无法适用于

电流驱动的 AMOLED 中<sup>[2]</sup>。此外,非晶硅材料的能带带隙较窄(1.7 eV),为避免其电学性能受光照影响必须增加黑矩阵保护,这不仅使制备工艺复杂化,而且需要增加光源的强度来获得足够的亮度,增加了功耗。

(2)与 a-Si:H TFT 相比,LTPS TFT 具有较高的迁移率[~100 cm<sup>2</sup>/(V·s)],可以提供足够 OLED 发光的驱动电流,但由于多晶硅薄膜中存在大量的晶界,使得 TFT 间的电学特性出现差异。据报道 TFT 的阈值电压仅相差±0.1 V 便会导致 OLED 发光亮度变化高达 16%<sup>[3]</sup>。因此,LTPS TFT 逊色的电学均匀性,使其并不适用于大尺寸 AMOLED,即便是用于小尺寸(如 5 英寸)AMOLED 中,在实际工艺中也往往需要多个 TFT 组成复杂的电流补偿回路以实现 OLED 的均一稳定发光<sup>[4]</sup>。此外,用于 TFT 的 LTPS 薄膜都是由非晶硅薄膜经晶化处理得到。广泛采用的晶化处理方法是准分子激光器退火(Excimer Laser Annealing, ELA)技术<sup>[5]</sup>,该技术不仅成本高也很难应用于大尺寸面板的制造中。

(3) a-Si:H 及 LTPS 材料对可见光不透明以及薄膜的工艺温度相对有机基底太高(>150 °C),因此也不适应透明显示和柔性显示的发展趋势。

综上所述,面对新一代显示技术,传统硅基 TFT 技术暴露的问题与硅基半导体材料本身的特性紧密相关。因此,为了推动新一代显示技术的发展,突破传统硅基半导体材料本身特性限制,寻找新型半导体材料以提高 TFT 性能是十分棘手的关键问题。基于非晶氧化物半导体材料的 TFT 便是在此背景下出现,其凭借着非晶氧化物半导体材料自身的优势,在新一代显示领域已初露锋芒,成为最有希望的下一代薄膜晶体管之一。

## 1.2 氧化物材料及多元非晶氧化物 TFT 的优势

### 1.2.1 氧化物材料

氧化物材料种类很多,而目前用于 TFT 半导体沟道层的氧化物材

料是以基于传统的透明导电氧化物材料为主，典型包括二元和多元体系，如 ZnO、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SnO<sub>2</sub>、In-Zn-O (IZO)、Zn-Sn-O (ZTO)、In-Sn-O (ITO)、In-Zn-Sn-O (IZTO) 以及在它们基础上的各种掺杂体系。由于这些氧化物天然存在诸如氧空位和金属间隙等本征缺陷，因此几乎所有未掺杂的氧化物半导体均呈现 n 型导电特性，相应的氧化物 TFT 大多为 n 型器件。下面就二元氧化物材料及由二元氧化物组成的多元氧化物材料的特点做简要介绍。

### 1.2.1.1 二元氧化物材料

二元氧化物材料的一个基本特征是元素 Zn、In、Sn 同 O 反应后，它们的电子轨道都处于填满状态。概括来讲，其基本特点包括：离子键强、熔点高、禁带宽 (>3 eV)、在可见光区有较高的透过率 (>80%) 及较好的 n 型导电性。以上三种典型的二元透明导电氧化物薄膜材料的主要物理参数见表 1-1 所示<sup>[6]</sup>。

表 1-1 几种典型二元透明导电氧化物薄膜室温下的基本特性

| 材料                               | ZnO                    | In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SnO <sub>2</sub>       |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 稳定结构                             | 六角纤锌矿                  | 正立方                            | 金红石                    |
| 晶格常数/nm                          | $a = 0.324\ 96$        | $a = 1.011\ 7$                 | $a = 0.473\ 71$        |
|                                  | $c = 0.520\ 65$        |                                | $c = 0.318\ 61$        |
| 导电类型                             | n                      | n                              | n                      |
| 电阻率/( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) | $10^{-4} \sim 10^{-1}$ | $10^{-4} \sim 10^{-2}$         | $10^{-4} \sim 10^{-2}$ |
| 禁带宽度/eV                          | 3.1 ~ 3.6              | 3.5 ~ 3.75                     | 3.7 ~ 4.6              |
| 介电常数                             | 8.5                    | 8.9                            | 12                     |
| 折射率                              | 1.85 ~ 1.9             | 2.0 ~ 2.1                      | 1.8 ~ 2.2              |
| 毒性                               | 无                      | 轻微                             | 无                      |

2003 年，Wager J F、Hoffman R L 等人<sup>[7, 8]</sup>分别在 *Science*、*Applied Physics Letters* 等权威杂志上发表了场致迁移率大于  $1\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  的透明 ZnO TFT 的研究报道，标志着以 ZnO 为首的氧化物半导体材料作为沟道层在 TFT 中应用的开端。从此，ZnO、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SnO<sub>2</sub> 等二元氧化物曾被认为是可用于 TFT 半导体沟道层的首选材料。然而，研究发现

这类二元氧化物薄膜在制备过程中极易形成多晶薄膜，尤其是 ZnO 薄膜即使室温沉积也呈现出多晶结构，这与 LTPS 薄膜类似，同样存在晶界的问题。因此，研制高性能的非晶氧化物半导体（Amorphous Oxide Semiconductor, AOS）材料才是提升其竞争力的关键。

### 1.2.1.2 多元非晶氧化物材料

通常情况下，由具有不同晶体结构的组元组成的材料更易形成非晶态<sup>[4]</sup>。正如表 1-1 所示，上述二元氧化物材料正好符合此情况。因此，为了开发适合 TFT 用的 AOS 薄膜，一些研究小组将这些二元氧化物材料进行各种组合，以制备出同时具有高透过率和高迁移率的多元 AOS 材料。当前，典型多元组合代表有 IZO、ZTO、ITO 以及 ZITO 等。值得一提的是，这些多元氧化物材料除了具备较稳定的非晶结构以外，同时还保留了二元氧化物材料的一些基本特征：宽禁带、高可见光透过率及高的电子迁移率等。因此，将这些多元 AOS 作为沟道层应用于 TFT 中，使得 AOS TFT 会具备传统硅基 TFT 所无法比拟的优点，有潜力推动新一代显示技术的发展。

### 1.2.2 多元非晶氧化物 TFT 的优势

表 1-2 给出了基于非晶氧化物半导体材料的 TFT 与传统硅基 TFT 的特性比较，可以看出 AOS TFT 具备如下典型优势：

表 1-2 基于不同半导体材料的 TFT 特性比较

| 半导体层类型                    | a-Si:H   | LTPS         | AOS         |
|---------------------------|----------|--------------|-------------|
| 低成本                       | ○        | ▲            | ○           |
| 工艺温度                      | ~ 250 °C | 450 ~ 550 °C | 室温 ~ 250 °C |
| 载流子类型                     | 一般 n 型   | p/n          | 一般 n 型      |
| 迁移率 (cm <sup>2</sup> /Vs) | < 1      | ~ 100        | 1 ~ 100     |
| 均匀性                       | ⊙        | ▲            | ⊙           |
| 可见光透明                     | ▲        | ▲            | ⊙           |
| 稳定性                       | ▲        | ⊙            | ○           |

注：⊙—好；○—较好；▲—逊色。

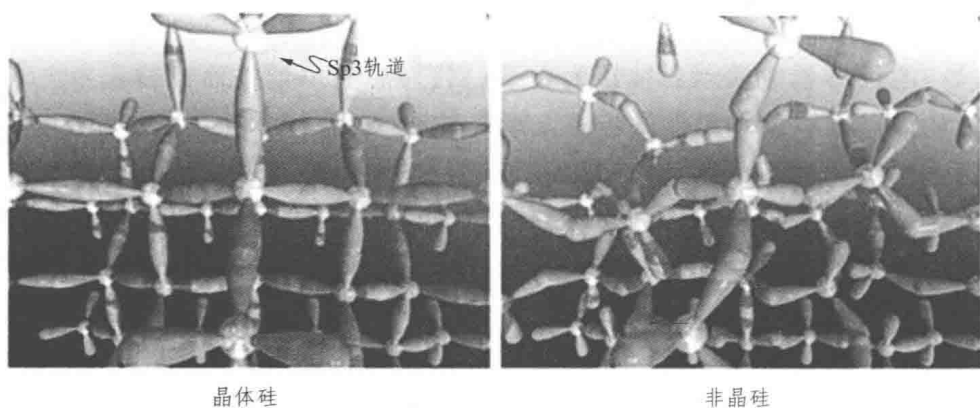
(1) 可低温甚至室温条件下制备。

柔性可卷曲显示器被认为是下一代理想显示器, 而目前技术上最大的难点之一就是柔性基板难以承受传统 Si 基 TFT 制备工艺的高温。而一般氧化物半导体薄膜可以在低温甚至室温下通过磁控溅射等方法沉积, 因此对衬底要求不高, 衬底可以选择廉价的玻璃或者柔性塑料等, 这不仅可以降低显示器的成本, 并为便携式柔性可卷曲显示器开辟新的途径。

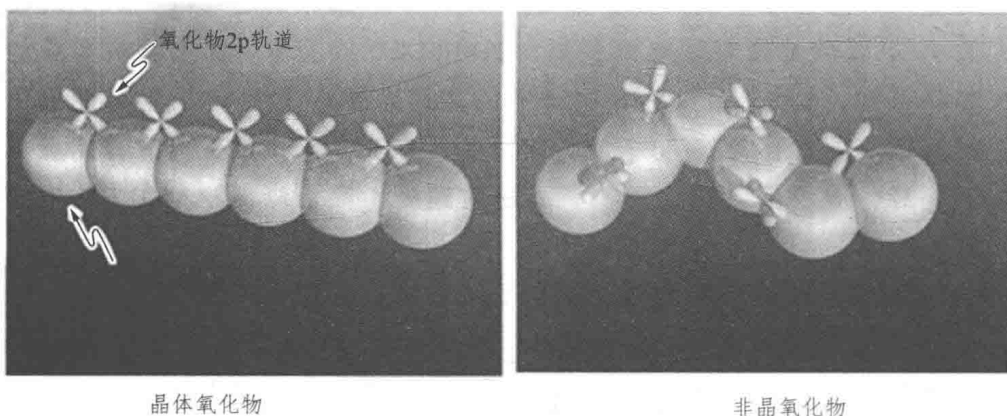
(2) 较高的迁移率和良好的均匀性。

研究表明即使在氧化物材料为非晶态的情况下, AOS TFT 仍具有较高的迁移率(比 a-Si:H TFT 高一个数量级, 与 LTPS TFT 可比拟), 足以满足高画质电流型驱动 AMOLED 的需求。加上材料本身的非晶结构, 也克服了 LTPS 薄膜中包含晶界导致 TFT 电学均匀性逊色的问题。因此, AOS TFT 将传统 a-Si:H TFT 与 LTPS TFT 的优点集于一身, 展示了其在大面积、高响应速度、高清晰的 AMOLED 中的应用前景。

针对半导体层同为非晶态时, a-Si:H TFT 迁移率低, 而 AOS TFT 却仍具备较高迁移率这一现象, 1996 年, 东京工业大学, Hosono 研究组<sup>[9,10]</sup>结合化合物离子的电子结构给出了合理的理论依据。他们提出了一种在 AOS TFT 研究领域被广泛应用的理论, 即只有金属离子的外层电子结构为  $(n-1)d^{10}ns^0$  的金属氧化物才能够在材料分子比较无序的状态下还保证比较高的电子迁移率。而 Zn、In、Sn 等金属阳离子即具有这样的结构。这种理论比较直观的解释如图 1-3 所示<sup>[11]</sup>。该理论认为这类金属氧化物的导带底都是由金属离子的 s 轨道构成, 由于电子的 s 轨道分布是球形的, 对方向的变化不敏感, 因此即使在原子排列比较无序的情况下, 电子在原子之间仍然具备良好的运输路径。然而, 对于 Si 系列共价型半导体, 原子间通过呈哑铃状分布的  $sp^3$  杂化轨道键合, 该轨道对方向特别敏感。因此, 当晶体 Si 转变为非晶硅时, 迁移率也急剧地下降, 仅有不到  $1\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。



(a) 共价型硅半导体



(b) 金属氧化物半导体

图 1-3 导带底的电子轨道示意图<sup>[11]</sup>

(3) 高可见光透过率。

AOS 较大的禁带宽度 ( $>3$  eV), 使其在可见光区平均透过率一般高于 80%。因此 AOS 并不存在像 a-Si:H 材料对可见光敏感的问题, 在有源阵列设计上 AOS TFT 也不需要黑矩阵保护, 这在提高了显示器开口率的同时, 也降低了背光源的能耗。此外, 结合透明的衬底、介质层和电极材料还可以制备全透明薄膜晶体管 (TTFT), 推动透明电子学的进一步发展。

(4) 较好的稳定特性。

理想的 TFT, 除了要具备较好的工作特性以外, 器件运行过程中的电学稳定性是直接决定其在实际应用, 尤其在 AMOLED 中应用的另