

稀土掺杂金属氧化物薄膜晶体管的研究进展

黄湘兰, 彭俊彪*

(华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 金属氧化物薄膜晶体管(Metal Oxide Thin Film Transistors, MOTFTs)因其具有较高的载流子迁移率和较好的电学稳定性,在大尺寸发光显示驱动背板应用方面极具潜力。此外,MOTFTs与非晶硅薄膜晶体管的制备工艺兼容,制造成本较低,具有较强市场竞争优势。然而,衡量MOTFTs性能的两个关键指标——迁移率和稳定性之间的矛盾限制了其高端显示应用。因此,开发高迁移率兼具高稳定性的MOTFTs成为研究热点和产业竞争焦点,大量研究表明,稀土掺杂氧化物有源半导体材料体系有望实现这一目标。本文重点综述兼具高迁移率和高稳定性的稀土掺杂氧化物材料设计及MOTFTs已达到的性能,探讨稀土掺杂金属氧化物薄膜晶体管(RE-MOTFTs)面临的挑战和发展潜力。

关键词: 金属氧化物薄膜晶体管; 稀土元素; 迁移率; 稳定性

中图分类号: 文献标识码: DOI: 10.37188/CJL.20240268

Research progress on rare earth doped metal oxide thin film transistors

HUANG Xianglan, PENG Junbiao*

(State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

* Corresponding Author, E-mail: psjbpeng@scut.edu.cn

Abstract: Metal oxide thin film transistors (MOTFTs) have great potential for application in large-sized organic light-emitting display driver backplanes due to their high carrier mobility and good electrical stability. In addition, the fabrication processes of MOTFTs are compatible with amorphous silicon thin film transistors', resulting in their lower manufacturing costs and strong market advantages. However, the trade-off between mobility and stability which are the key indicators for measuring MOTFTs limits their high-end applications. Therefore, developing MOTFTs that combine high mobility with high stability has become a research hotspot and industry competition focus. Numerous studies indicate that rare earth (RE) doped oxide semiconductor materials is promising for achieving this goal. This paper focus on reviewing the design of RE doped oxide materials that achieve both high mobility and high stability, as well as the characteristic indicators that MOTFTs have reached, and discuss the changes and development potential of RE doped MOTFTs (RE-MOTFTs).

Key words: metal oxide thin film transistors; rare earth; mobility; stability

1 引 言

数字化时代的发展离不开显示技术。更大尺寸、更快刷新率、更低功耗、柔性拉伸等均是下一代显示需要的性能^[1]。薄膜晶体管(Thin Film Transistors, TFTs)作为主要电子元件驱动显示像

素和调控画质,高迁移率TFTs意味着显示像素的开口率更大、分辨率更高、芯片更节省、成本更低。通常,像素驱动TFTs是三端场效应器件,其主要结构包括源极、漏极、有源层、栅绝缘层和栅极。其工作原理是,栅极施加电压后,有源层沟道中载

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3600800); 国家自然科学基金(62074059)

Supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFB3600800); National Natural Science Foundation of China (62074059)

流子的平均漂移速率决定了 TFTs 的迁移率。其中,器件的饱和迁移率(μ_{sat})的计算公式为:

$$\mu_{\text{sat}} = \frac{2L}{C_i W} \frac{\partial \sqrt{I_{DS}}}{\partial V_{GS}} \quad (1)$$

其中, L 和 W 分别是 TFTs 沟道的长度和宽度, C_i 是栅绝缘层的单位面积电容, I_{DS} 是源漏极之间的电流, V_{GS} 是栅极到源极之间的电压。阈值电压(V_{th})、开启电压(V_{on})、开关比(I_{on}/I_{off})、亚阈值摆幅(SS)均是 TFTs 的重要性能参数,可以从 TFT 的转移曲线中得出。

传统氢化非晶硅(a-Si:H)TFTs在液晶显示领域已应用约30年,但其低迁移率($\sim 0.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)无法满足高分辨率有机发光二极管(OLED)显示等的发展需要。基于a-Si激光晶化制备的低温多晶硅(LTPS)TFTs显著提高了 TFTs 的迁移率($\sim 100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),并在中小尺寸显示中广泛应用,但该技术在本成本和在大尺寸面板均匀性等方面仍存在瓶颈。对此,学界和业界一直关注开发可大面积生产的高迁移率和高稳定性的金属氧化物 TFTs(MOTFTs)材料与技术。2004年,Hosono等人^[2-3]发现 a-IGZO TFT(In: Ga: Zn = 1:1:1)的迁移率可以超过 $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,且具备高透明、高均匀性、低功耗和可制备柔性器件等优势,从此开辟了氧化物 TFTs 技术新方向。目前,a-IGZO TFT 已在大尺寸有源矩阵驱动(AMOLED)显示中得到应用,但在中小尺寸尚未取代 LTPS TFTs,因为其迁移率尚远低于 LTPS TFTs。此外,a-IGZO TFT 还面临亮度均匀性、器件稳定性和成品率等问题。为利用 a-IGZO 材料的超低漏电流特性以降低功耗,同时驱动电流型显示屏,将 MOTFTs(开关管)与 LTPS TFTs(驱动管)有机结合,开发了低温多晶硅氧化物(LTPO)技术^[4],并应用于高端中小尺寸 AMOLED 面板。但该技术面临成本高、工艺复杂、良率低等难题,从经济性考虑不适合大面积生产。

根据 a-IGZO 体系的载流子输运机制,铟(In)是贡献迁移率的主要元素,In 含量越高,载流子传输性能越好^[5]。此外,通过调节氧化物薄膜的结晶性也可提高载流子迁移率^[6-7]。目前,实验室研制的 MOTFTs 迁移率已从个数发展至 $\sim 100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[8-9]。但 MOTFTs 还存在稳定性欠佳导致显示屏出现亮点缺陷等问题^[10-14],在负偏压光照(NBIS)条件下的稳定性问题尤为突出。目前认

为,高迁移率 MOTFTs 在 NBIS 条件下稳定性差的主要原因是光照导致表面氧空位电离,光生电子进入导带,改变了沟道载流子数量,引起阈值电压的漂移。稳定性和迁移率的矛盾问题可通过工艺优化、晶体结构调节、掺杂和叠层结构设计等手段加以解决^[5,15-18]。近期,我们开发了低浓度掺杂的稀土氧化物半导体材料,发现稀土掺杂可显著提高 TFTs 稳定性,同时保持较高电子迁移率^[19]。主要原理是,一方面稀土离子具有较高的金属-氧(M-O)离解能和较低的电负性,低浓度的稀土离子可有效控制氧化物的载流子浓度;另一方面,稀土离子作为缺陷辅助复合中心,可快速驰豫消除激发态电子,降低光生载流子对沟道电子的影响。该技术不仅为实现 MOTFTs 的高迁移率和高稳定性提供了新的理论依据和技术路线,同时可为 AMOLED 显示、柔性电子、传感器等应用领域提供高性能的驱动器件。本文将介绍氧化物半导体材料的基本物理特性、MOTFTs 的主要器件结构及性能,以及稀土掺杂金属氧化物薄膜晶体管(RE-MOTFTs)的研究进展。

2 氧化物半导体材料的物理特性

氧化物的电子结构决定其电学特性。不同类型的缺陷,如间隙金属(M_i)和氧空位(V_o)会影响 TFTs 器件的性能,氧化物半导体中氧空位缺陷通常是主导因素^[20-22]。在多数情况下,氧空位作为结构缺陷在能带中形成深能级陷阱态,捕获输运过程中的载流子;在某些情况下,氧空位会形成提供电子的浅能级陷阱态。实验发现,稀土离子的少量掺杂可以有效调控氧化物半导体电学特性,如 In_2O_3 、 InZnO 等的本征载流子浓度,并降低氧空位的含量^[23]。这里重点介绍氧化物半导体中的载流子传输、氧空位缺陷和掺杂技术。

2.1 载流子传输

金属氧化物的载流子传输通道主要通过离子键连接,易形成低密度的浅带尾态,如图 1(a)所示。金属阳离子的空 ns 轨道形成金属氧化物的导带底(CBM),为电子提供传输通道^[24-25]。完全填满的氧(O) $2p$ 轨道形成价带顶(VBM),为空穴提供传输通道。金属阳离子的 ns 轨道直径大,重叠面积大,使其具有小的电子有效质量($0.25 \sim 0.35 m_e$)。载流子在金属氧化物半导体中通过能带传导,可以产生较高的载流子迁移率^[26-27]。

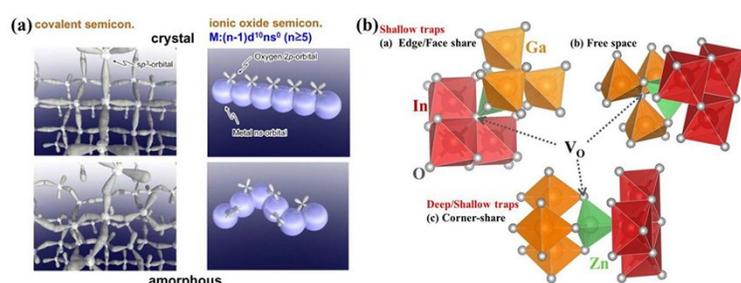


图1 (a)共价键半导体和离子键氧化物半导体的电子传输通道示意图^[25]; (b)不同氧空位的局部配位结构。

Fig. 1 (a) The schematic diagram of electron transmission pathways of covalent semiconductor and ionic oxide semiconductor^[25], (b) The local coordination structure of some oxygen vacancies.

氧化物 IGZO 的电子浓度越高,其迁移率越高,且对非晶态或结晶态都适用^[28],这种现象可以用渗流传导模型进行解释^[25]。Nomura 等^[29]发现当电子浓度 N_e 低于阈值电子浓度 $N_{th} = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,载流子通过渗流传导;当 N_e 增加到高于 N_{th} 时,载流子输运模式变为简并传导,室温下的霍尔迁移率从 $\sim 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 迅速增加到 $> 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,材料的 N_e 必须高于 N_{th} ,才能实现氧化物半导体器件的高迁移率。

2.2 缺陷与氧空位

根据第一性原理计算 In_2O_3 和 ZnO 模型中各种缺陷的形成能,结果表明,在热力学平衡生长过程中, V_O 是最丰富的点缺陷,而不是间隙金属阳离子^[30]。金属氧化物晶体结构中不同位点的 V_O 会在带隙中的不同位置产生不同密度的亚隙态^[31]。角共享、边/面共享和自由位点的氧空位(如图 1(b))会导致深能级或浅能级缺陷。氧缺陷的形成能较低是因为 V_O 相邻的 In 或 Zn 能形成稳定的金属(M-M)键。而 V_O 还会导致持续光电导(PPC)现象。基态氧空位(V_O^0)具有不导电的深能级 a_1^2 ,光激发后,空的深能级 a_1^0 深入到导带,同时, V_O^0 被光激发产生亚稳态,并释放两个电子到 CBM 附近的浅能级态^[32]。从激发态 V_O^1 到基态 V_O^0 的反向转变需要克服能量势垒,并且 V_O 作为体系中的 F 中心具有大吸收截面(F 中心通常指体系中因阳离子缺失而产生的电子陷阱),光照下可持续产生自由电子,纯 In_2O_3 和 ZnO 中自由载流子浓度部分也源于此。通过掺杂、辐照、热处理等方式可以改变 V_O 的浓度,当 V_O 浓度为 $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, n 型氧化物表现出从绝缘体到金属的转变,且随 V_O 浓度的增加,其导电性进一步提高^[33-35]。正因 V_O 引发了光生载流子的生成,导致 PPC 效应,使得 MOTFTs 在光照下表现出较差的稳定性。

2.3 掺杂技术及材料设计

目前,用于 TFTs 的二元氧化物如 In_2O_3 , ZnO , SnO_2 , 三元氧化物如 InZnO , InGaO 和 ZnSnO , 四元氧化物如 InGaZnO 和 InSnZnO , 具有高载流子浓度的宽禁带氧化物被广泛用作 n 型 MOTFTs 的有源层基质材料。大多数高迁移率 MOTFTs 采用 In 基氧化物,但其成本高且有毒性,新型非/低 In 氧化物体系有待探索。研究表明,掺杂技术可调制氧化物半导体中的载流子浓度,并解决由 V_O 引起的 PPC 现象。掺杂剂的电子结构、晶体结构、离子半径、价态以及光电性能均是需要考虑的因素,掺杂的有效性取决于主客体材料的相容性^[36],不一致的晶格结构容易导致晶格失配产生缺陷并降低载流子迁移率,相同的离子价态可以防止过量的电子或空穴。Pan 等研究氢(H)掺杂对 a-IGZO 的影响,发现随着 H 含量的增加, H 从缺陷抑制剂转变为施主型缺陷再进一步转变为受主型缺陷,而体系中的 V_O 会帮助 H 扩散,加速其转变为受主型缺陷。而掺杂氟(F)离子可以降低体系中 V_O 的含量以及 H 的解离能,从而提高器件在富 H 环境下的稳定性^[37]。采用氮(N)/H 共掺杂的 a-IGZO TFT,其电子迁移率可以达到 $45.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,主要是由于 N 和 H 能有效控制载流子浓度,并通过 Zn-N 和 N-H 键钝化 V_O 缺陷^[38-39]。一些低电负性金属如 Al^[40-41], Zr^[42], Ta^[43-44], Hf^[45], W^[46-47], La^[48-49] 等已被作为强氧结合剂和载流子抑制剂掺杂在氧化物半导体如 a-IGZO、 InZnO 、 ZnSnO 等中,以改善器件的偏压稳定性,但可能对器件的光照稳定性带来一定的影响,但这方面报道得较少。

稀土掺杂在多种基质材料中均可获得显著效果,因其具有较低电负性和较高的金属-氧解离能可以有效控制氧化物半导体中的 V_O 和载流子的浓度,使 TFTs 器件具有低关态电流和优异的开关

特性,而其独特的电子结构也能改善器件的偏压光照稳定性^[50]。

3 氧化物薄膜晶体管的器件结构

3.1 传统 MOTFTs 的器件结构

传统 MOTFT 的器件结构根据栅极位置的不同,可分为底栅结构和顶栅结构,又根据有源层沟道和源漏电极的相对位置不同,可分为顶接触和底接触。图 2 为四种器件结构的示意图。底栅顶接触结构的工艺简便,易于研究有源层,寄生电容小,根据制备工艺又可分为背沟道刻蚀结构(BCE)和刻蚀阻挡层结构(ESL)。BCE 结构是直

接在有源层上刻蚀源漏电极,为避免刻蚀时损坏有源层而在有源层上制备了一层刻蚀阻挡层即 ESL 结构。但刻蚀阻挡层会增加工艺难度及成本,所以目前多采用 BCE 结构,并通过优化源漏极的刻蚀工艺减少对器件的损害。底栅底接触结构避免了源漏极刻蚀对有源层的损害,但寄生电容和接触电阻较大。底栅结构的有源层完全暴露在空气中,器件需要用钝化层如 SiO_2 、 Al_2O_3 或 MgO 等封装以保证其稳定性。顶栅结构可通过封装保证器件的稳定性,但介电层和栅极在制备过程可能会损害有源层,造成器件性能下降,目前业界多采用顶栅结构。

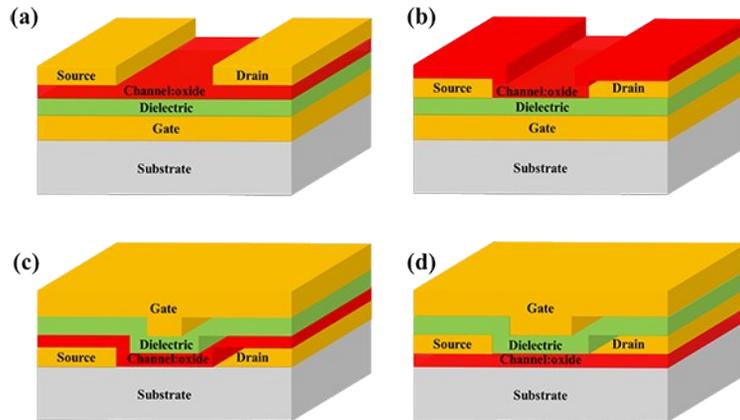


图 2 (a)底栅顶接触结构(即底栅交错结构);(b)底栅底接触结构(即底栅共面结构);(c)顶栅底接触结构(即顶栅交错结构);(d)顶栅顶接触结构(即顶栅共面结构)。

Fig. 2 (a) Bottom-gate top-contact (Staggered bottom-gate), (b) Bottom-gate bottom-contact (Coplanar bottom-gate), (c) Top-gate bottom-contact (Staggered top-gate), (d) Top-gate top-contact (Coplanar top-gate).

3.2 新型 MOTFTs 的器件结构

3.2.1 叠层结构

为提高氧化物 TFT 性能,2008 年 Kim 等^[51]采用传统底栅顶接触结构制备了双有源层 MOTFTs,具有高载流子浓度的 InZnO_x 或 InSnO_x 靠近介电层,以保证器件的高饱和电流;较低载流子浓度的 GaInZnO_x 靠近源漏极,以控制器件的阈值电压。通过调制有源层的厚度可获得高性能 $\text{InZnO}_x/\text{GaInZnO}_x$ TFT,电子迁移率可达到 $51.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, V_{th} 为 0.31 V 。其工作原理是,靠近栅绝缘层的有源层贡献迁移率,靠近源漏电极的有源层控制 V_{th} 和稳定性。典型的叠层结构如图 3(a)所示。基于此结构设计理念,陆续开展了多源层(异质结/同质结)结构的 MOTFTs,获得了具有较高电子迁移率和稳定性的 TFTs 器件^[52-53],通常的理解是相邻半导体层之间的接触能级差导致能带偏移,电荷在其面积累并传输,从而实现高迁移率^[54]。

3.2.2 垂直结构

为突破平面 TFT 小型化的极限,垂直沟道 TFT(V-TFT)应运而生。V-TFT 的源漏电极通常不在同一平面,中间由薄绝缘层垂直隔开,有源层位于源漏电极之间且垂直于间隔层,载流子运动方向与衬底垂直^[55]。典型的垂直结构如图 3(b)所示。此外,为进一步提升 TFTs 性能,发展了“双栅”型和沟槽型等垂直结构等^[56]。目前,V-TFT 电子迁移率尚不及平面结构,但其尺寸小、功耗低、便于集成,且由于垂直沟道电流不受平面裂纹的影响,具有抗机械应力,适用于柔性电子器件,未来研究的重点是如何形成良好的垂直侧壁和抑制短沟道效应。

3.2.3 自对准结构

寄生电容过大会导致 TFTs 器件的响应速度下降、电阻电容(RC)电路延迟,并产生画面残影。而自对准共面结构的栅极与源漏极无交

叠,可以基本消除器件的寄生电容和寄生电阻。典型的自对准共面结构(SAC)如图3(c)。SAC多为顶栅结构,但该结构对工艺要求较高。目前,大量研究尝试不同的工艺方法以实现自对准,如喷墨打印^[57]和光固化等。近期,Luo等^[58]

开发了一种新型IGZO SAC-TFT,采用有机分子自组装修饰栅极/介电层堆叠实现自对准,实现了栅与源漏电极之间纳米级的重叠(≈ 17 nm),有效降低了TFTs器件的寄生电容和接触电阻。

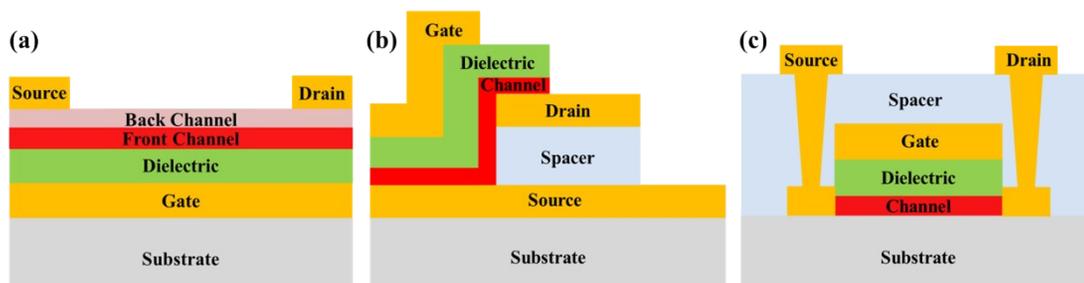


图3 (a)叠层结构(b);垂直结构(V-TFT);(c)自对准共面结构(SAC)。

Fig. 3 (a) stacked structure, (b) vertical structure, (c) self-aligned coplanar structure.

4 具有高迁移率和高稳定性的MOTFTs

在实际应用中,长时间的栅极偏压、湿度、温度和光照等因素都会通过沟道载流子输运影响到器件的开关特性,如阈值电压漂移、亚阈值摆幅增大、关态电流增大等,从而导致显示屏出现亮暗不均匀的缺陷。通常采用阈值电压的漂移量表征器件的稳定性。实验发现,具有高迁移率的MOTFTs在稳定性上的表现总是不尽如人意,这主要与有源层材料本身的特性、界面接触结构及表面态有关。偏压稳定性(PBS、NBS)主要通过正、负偏压下的阈值电压漂移进行表征,如PBS的物理解释是在长期正栅压条件下,有源层能带向下弯曲,电子载流子在有源层/介电层界面堆积,并在栅压作用下被界面俘获或注入到介电层内,导致有源层中载流子浓度发生变化,阈值电压发生漂移。目前,PBS和NBS稳定性都能控制在实际应用的允许范围内。偏压温度稳定性(PBTS、NBTS)也是衡量MOTFTs稳定性的重要指标,但其物理机制比较复杂,尚未达成共识,主要认为是某些杂质如H、CO等导致了NBTS的不稳定性。关于偏压光照稳定性(PBIS、NBIS),行业比较公认的解释是氧空位模型。接下来介绍几种当前研究的高迁移率和高稳定性的MOTFTs。

4.1 高迁移率和高稳定性MOTFTs的研究进展

二元氧化物如 In_2O_3 , ZnO , SnO_2 具有一定的高迁移率特性,但是其TFTs器件的载流子浓度过高,难以关断,一般基于三元体系制备的MOTFTs

往往综合性能更优^[59]。对于InGaO TFT,自对准共面结构的多晶InGaO TFT的平均饱和和迁移率可高达 $78.73 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,且器件在NBTS和PBTS测试条件下,阈值电压漂移可控制在 0.1 V 以内^[60]。对于In-W-Zn-O (IWZO) TFT,采用具有高W-O解离能的 W^{6+} 掺杂IZO,一方面控制了氧空位的浓度,另一方面正6价的W可以为体系提供额外的电子,IWZO TFT的迁移率和稳定性均优于IGZO TFT,但器件的迁移率在交流电驱动下不稳定^[61]。对于In-Sn-Zn-O (ITZO) TFT,Shiah等^[62]通过消除器件制备过程中引入的CO等杂质,并在有源层上生长钝化层,实现了 $\sim 70 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的迁移率,在NBTS和PBTS($\pm 20 \text{ V}$, 60°C)条件下,其阈值电压仅漂移 0.02 V 和 0.12 V 。他们针对双层结构TFTs,揭示了NBTS稳定性机制,认为其与氧化物本身的能级结构有关。迁移率较高的氧化物如ITZO往往具有较深的CBM和较浅的施主能级,因此更容易受外部杂质如CO、H的影响,产生缺陷态进而导致器件的稳定性变差。而迁移率较低的IGZO的CBM位置较浅,对杂质吸附较弱,TFTs稳定性较好。

基于单沟道器件结构的高迁移率MOTFTs多为晶态或富铜材料体系,然而器件的阈值电压和稳定性等指标较难满足实际需求。因此,科研人员尝试采用多有源层设计解决迁移率和稳定性之间的矛盾。Liang等^[5]将具有高载流子浓度的富In-ITZO作为电子传输层(CTL)沉积在靠近栅极一侧,将具有短光生载流子寿命的Pr掺杂ITZO作为电子弛豫层(CRL)沉积在CTL上,从而实现了

高迁移率 ($75.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和高稳定性的 MOTFTs, NBIS 和 PBTS 条件下电压漂移分别为 -1.64 V 和 0.76 V 。采用类似结构的富 Ga-IGZO/富 In-ITZO TFT, 也可获得高迁高稳的特性, 当 CRL/CTL 为 $10/20 \text{ nm}$ 时, TFTs 器件的场效应迁移率达到 $48.58 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, NBIS 测试条件下 ΔV_{th} 约为 -1.14 V ^[63]。此外, 三层结构的 IGZO:Hf/IZO/IGZO:Hf TFT^[64], 掺杂不同浓度 O 和 N 的无结 IGZO:O₁IO_{II}IN TFT^[65], 也具有较优的迁移率和光偏置稳定性。

4.2 稀土掺杂 MOTFTs 的研究进展

研究发现, 稀土掺杂金属氧化物 TFTs (RE-MOTFTs) 具有同时实现高迁移率和高稳定性的潜力。图 4 统计了近年来 RE-MOTFTs 的部分文献, 可以看出 Y、La、Pr、Nd 等稀土元素的掺杂研究较为活跃。表 1 总结了近年来具有代表性的单沟道 RE-MOTFTs 的关键参数, 包括有源层材料、制备

方式、迁移率 (μ)、阈值电压/开启电压 (V_{th}/V_{on})、开关比 (I_{on}/I_{off})、亚阈值摆幅 (SS) 及稳定性 (PBS、NBS、NBIS 测试条件下阈值电压/开启电压的漂移量)。由表 1 可知, Y、La、Nd 掺杂的 MOTFTs 器件的迁移率均超过 $30 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 Pr 掺杂的 MOTFTs 器件在综合稳定性方面表现优异。

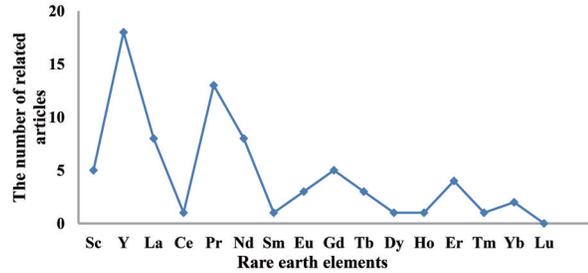


图 4 统计的近年 RE-MOTFTs 的部分文献

Fig. 4 The number of partial papers on RE MOTFTs in recent years.

表 1 不同稀土元素掺杂的单沟道 MOTFTs 性能

Tab. 1 The optimal comprehensive performances of RE-MOTFTs with single channel

Active layer	Film Technique	$\mu \text{ (cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$V_{th}/V_{on} \text{ (V)}$	I_{on}/I_{off}	SS (V/decade)	Stability	Time
Sc: In ₂ O ₃	Sputtering	25.4	$-1 (V_{on})$	1.0×10^7	0.20	PBS: 0.12 V; NBS: -0.37 V	2016 ^[66]
Y: ZnO	Spraying	41.35	2.61	--	0.232	--	2021 ^[67]
La: In ₂ O ₃	Sputtering	34.7	$-3.4 (V_{on})$	$\sim 1.0 \times 10^8$	0.19	PBS: 0.2 V; NBS: -0.6 V	2016 ^[68]
Ce: InZnO	Sputtering	2.5	0.22	2.4×10^{10}	1.00	NBS: 5.2 V	2013 ^[69]
Pr: InZnO	Sputtering	26.3	-0.9	$\sim 1.0 \times 10^8$	0.28	PBS: 1.0 V; NBS: 0.5 V; NBIS: -2.0 V	2019 ^[19]
Nd: In ₂ O ₃	Sputtering	46.4	$-4.2 (V_{on})$	$\sim 1.0 \times 10^8$	0.23	PBS: 0.2 V; NBS: -3.8 V	2016 ^[70]
Sm: In ₂ O ₃	Solution	21.51	2.14	$\sim 1.0 \times 10^8$	0.66	PBS: $\sim 1 \text{ V}$; NBS: $\sim -1 \text{ V}$	2020 ^[71]
Eu: SnO ₂	Solution	4.5	-7.3	9.5×10^6	0.8	--	2020 ^[72]
Gd: In ₂ O ₃	Solution	9.74	-0.27	$\sim 1.0 \times 10^8$	0.079	PBTS: -0.25 V	2017 ^[73]
Tb: In ₂ O ₃	Sputtering	45.0	$-1.1 (V_{on})$	$\sim 1.0 \times 10^8$	--	NBIS: -3.9 V	2022 ^[50]
Dy: In ₂ O ₃	Solution	7.60	1.78	1.2×10^8	0.77	PBS: 5 V; NBS: -5 V	2020 ^[74]
Ho: In ₂ O ₃	Solution	3.8	1.51	2.2×10^7	0.12	NBS: -0.75 V; NBIS: -3.70 V	2024 ^[75]
Er: In ₂ O ₃	Solution	17.55	0.91	1.7×10^7	0.16	PBS: 0.1 V; NBS: -0.09 V	2023 ^[76]
Tm: SnO ₂	Sputtering	5.5	-2.3	5.0×10^7	0.618	PBS: 12.3 V; NBS: -11.7 V	2019 ^[77]
Yb: In ₂ O ₃	Solution	13.32	0.11	3.9×10^7	0.38	PBS: 1.27 V	2023 ^[78]

*稳定性 (Stability) 是指 RE-MOTFTs 在正栅偏压 (PBS)、负栅偏压 (NBS) 和负栅压光照 (NBIS) 测试下 V_{th} 或 V_{on} 的漂移量。稳定性还与测试条件有关。

* The stability sheet means the V_{th} or V_{on} shift of RE-MOTFTs under positive bias stress (PBS), negative bias stress (NBS), negative bias illumination stress (NBIS). Stability is also related to the test conditions.

大多数氧化物半导体, 如 In₂O₃、ZnO、SnO₂ 等, 通常具有缺氧的化学计量比。体系中的氧空位能充当电子给体, 使这些氧化物表现出 n 型半导体特性。当前的 n 型 RE-MOTFTs 主要是基于 In 基材料体系, 且通常低于 10 at. % 的稀土掺杂浓度即可有效抑制本征载流子浓度, 获得优异的开关特性。而在典型的 a-IGZO TFT 中, In: Ga: Zn = 1: 1:

1, 33 at. % 的 Ga 用于控制 In₂O₃ 的载流子浓度, 高浓度的 Ga 掺杂可能会破坏 In 5s 轨道电子云的重叠, 导致迁移率降低。目前的实验结果表明, 采用真空法制备的 RE-MOTFTs 相比于溶液法可实现更高的迁移率和更优的稳定性。下面分别加以介绍。

4.2.1 真空法制备的RE-MOTFTs

真空沉积制膜技术,如磁控溅射、脉冲激光等,制备的薄膜具有更高的致密性、均一性和可重复性,适用于高端集成电路的器件制造,目前产线均采用真空制膜技术。溅射生长的Y: ZnO TFT比纯ZnO TFT的性能更优,纯ZnO TFT的 μ_{FE} , V_{th} 和SS分别为 $0.37 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 24.35 V ,和 0.18 V/decade 。然而,Y: ZnO TFTs的 μ_{FE} , V_{th} 和SS分别为 $38.79 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 13.67 V , 0.16 V/decade ,且开关比为 8.17×10^7 ,如图5(a-b)。研究发现,Y会

提高C轴取向(002)晶面的峰强且Y: ZnO薄膜结晶尺寸的增加,提高了ZnO TFT器件的电性能^[79]。Gd掺杂也能通过改变基质材料结晶性来提升器件的性能。Dong等^[80]发现Gd掺杂后,AlZnO的XRD图谱中的(002)峰减弱,(004)峰消除,Gd使多晶AZO结构发生重组,而Gd:AlZnO薄膜中唯一的(002)峰与C轴取向结晶(CAAC)IGZO的(009)峰相似,故认为Gd掺杂可在室温下生长形成CAAC Gd:AlZnO。

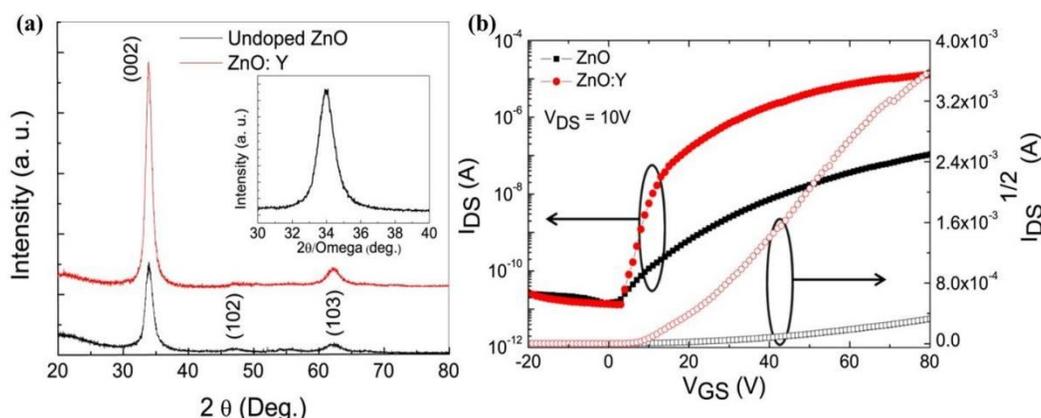


图5 (a-b)ZnO和Y: ZnO薄膜的XRD图及器件转移曲线^[79]; (c-d)AZO和Gd-AZO薄膜的XRD图以及Gd-AZO TFTs的电性能^[80]。

Fig. 5 (a-b) XRD patterns of ZnO and Y: ZnO film and transfer curves of ZnO:Y TFTs^[79], (c-d) XRD of AZO with/without Gd thin films and the electrical performance of Gd-AZO TFTs^[80].

研究人员尝试采用共溅射方法制备RE-MOTFTs器件,如a-Ce:IZO TFTs^[69]。通过固定IZO的溅射功率为50 W,调节CeO₂溅射功率改变稀土Ce的掺杂量,当CeO₂功率为15 W时,a-CIZO TFT器件性能最优,迁移率为 $2.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,NBS下 V_{th} 漂移为5.2 V,开关比为 2.40×10^{10} 。但随着CeO₂溅射功率从15 W增加到30 W,器件的迁移率下降且 V_{th} 负向漂移,表明沟道中载流子浓度有所增加。Ren等^[77]采用射频(RF)磁控溅射制备了Tm: SnO₂ TFTs,发现Tm: SnO₂宽带隙薄膜具有多晶结构,带隙宽度超过3.8 eV。当掺入1.6 at% Tm于SnO₂中时,TFTs器件性能相对未掺杂的SnO₂ TFT较优, μ 、 I_{on}/I_{off} 、SS、 V_{th} 分别为 $5.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 6.7×10^7 、 0.618 V/decade 、 -2.3 V 。在PBS ($V_G = 20 \text{ V}$),NBS ($V_G = -20 \text{ V}$)条件下持续测试3600 s, ΔV_{th} 分别为12.3 V和-11.7 V。Tm³⁺有助于降低SnO₂中的氧空位,但过量的Tm³⁺可能会增加晶界散射。Song等^[66]通过RF磁控溅射制备了Sc: In₂O₃ TFT,发现5% Sc掺杂的Sc: In₂O₃ TFT在

300 °C退火温度下性能优异,饱和迁移率为 $25.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,SS为0.20 V/decade, V_{on} 为-1.0 V,PBS和NBS测试条件下, V_{on} 漂移仅分别为0.12 V和-0.37 V。研究人员还尝试其他元素如Cd或Mg与Sc共掺杂In₂O₃,证明也能获取较好的TFTs器件性能^[81-82]。

Lin^[70]通过射频磁控溅射探究了不同的稀土掺杂剂La和Nd对In₂O₃ TFT的影响,发现Nd: In₂O₃ TFT的迁移率为 $46.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,比La: In₂O₃ TFT的迁移率 $34.7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 高约30%,但在NBS稳定性测试中,Nd: In₂O₃ TFT的 V_{on} 漂移为-3.8 V,而La: In₂O₃ TFT仅为-0.6 V。研究认为, $|Nd3d^5_{5/2}4f^4 O2p^{-1}| >$ 这种电荷转移的电子结构会在沟道中产生空穴被有源层和绝缘层的界面捕获,从而降低TFT器件的稳定性,而 $|La3d^5_{5/2}4f^0| >$ 则不存在此类电荷转移,如图6(a-d)所示。随后,该团队还通过直流溅射制备了Nd: InZnO TFT (Nd: In: Zn = 0.01: 1: 1),Nd: InZnO TFT在300 °C退火下饱和迁移率为 $22.7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,开启电压

为-1.32 V, SS为0.23 V/decade, 且 NBS 和 PBS 稳定

性测试下, 器件的 ΔV_{on} 分别为-0.42 V 和 0.4 V^[83]。

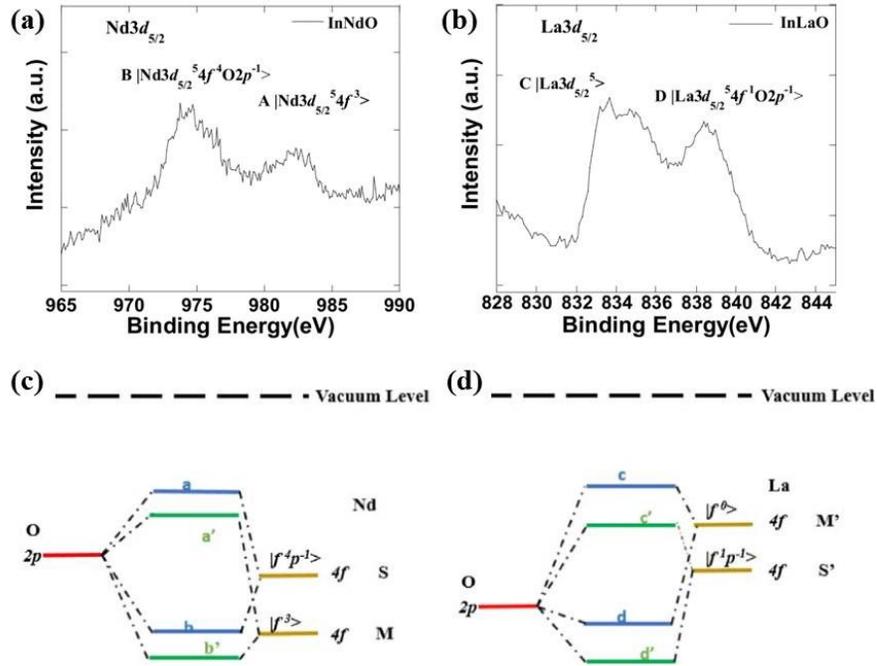


图6 (a-b)Nd: In₂O₃、La: In₂O₃薄膜中 Nd 3d_{5/2}和 La 3d_{5/2}的光电子能谱;(c-d)Nd 和 La 在 Nd: In₂O₃、La: In₂O₃体系中能级离化^[70]。

Fig.6 (a-b) the Nd 3d_{5/2} and La 3d_{5/2} photoelectron spectra of Nd: In₂O₃、La: In₂O₃ thin films, (c-d) the schematic pictures of Nd and La energy level ionization in Nd: In₂O₃、La: In₂O₃ system^[70].

Xu 等^[19]采用射频磁控溅射制备的 IZO TFT 器件, 其 μ_{FE} 为 $32.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, V_{on} 为 -0.4 V, SS 为 0.12 V/decade, I_{on}/I_{off} 为 $\sim 10^9$, 体缺陷态密度 (N_{SS}) 为 $1.05 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$, 沟道/绝缘层界面缺陷态密度 (D_{it}) 为 $2.09 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。通过共溅射的方法对 IZO TFT 进行掺杂, 发现 2.98 at. % Pr 掺杂 IZO TFT 器件性能最优, μ_{FE} 为 $26.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, V_{on} 为 -0.9 V, SS 为 0.28 V/decade, I_{on}/I_{off} 为 $\sim 10^9$, N_{SS} 为 $2.44 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$, D_{it} 为 $4.88 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。对比发现, 2.98 at. % 的 Pr 掺杂器件的迁移率下降 $\sim 20\%$, 主要原因是在沟道和界面处都引入了缺陷态, 但器件的稳定性得到提高。在 $V_{GS} = -20 \text{ V}$, 12000 cd/m^2 白光持续照射 7200 s 后, 纯 IZO TFT 表现出 -16.5 V 的 V_{on} 漂移以及严重的 SS 劣化, 而 Pr 掺杂后的 V_{on} 仅漂移 -2.0 V, NBIS 稳定性提高了 $\sim 90\%$, 器件性能如图 7(a-b) 所示。这或许是 Pr 诱导产生的缺陷态带来的效果, 相关机制将在后文中讨论。后续研究也表明 Pr 掺杂还能提高 IZO TFT 的热稳定性^[84]。在其他基质材料如 In₂O₃、In-GaO^[85] 和 InSnZnO^[86] 等中, 稀土 Pr 掺杂技术同样被证明能有效提高 MOTFTs 的稳定性。此外, Lan 等^[50]通过磁控溅射制备的 Tb:In₂O₃ TFT (5 wt. %

Tb) 器件的饱和迁移率最高可达 $45 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, V_{on} 为 -1.1 V, I_{on}/I_{off} 为 $\sim 10^8$, 在栅压为 -20 V, 250 Lux 白光 LED 持续照射 3600 s 后, Tb:In₂O₃ TFT 器件的 ΔV_{on} 仅为 -3.9 V, 而纯 In₂O₃ TFT 器件的 μ_{sat} 为 $51.1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, V_{on} 为 -6.0 V, I_{on}/I_{off} 为 $\sim 10^8$ 。相同 NBIS 条件下, 纯 In₂O₃ TFT 器件的 ΔV_{on} 为 -11.7 V。这说明 Tb 掺杂 In₂O₃ TFT 能有效控制载流子浓度使器件的开启电压正向移动, 可大幅改善器件的 NBIS 稳定性 $\sim 67\%$, 但会小幅降低器件的迁移率 $\sim 12\%$, 器件性能如图 7(c-d) 所示。

采用真空法制备 RE-MOTFTs, 工艺窗口大、可控性强, 器件的迁移率和稳定性较为优异, 虽然存在如靶材的利用率较低、难以实现大面积均匀性等问题, 但因其优点的无可替代性, 在高端产品的生产中占据重要地位。

4.2.2 溶液法制备的 RE-MOTFTs

溶液法因其操作简单、化学成分比例易调控而受到重视。稀土 Y 元素在 RE-MOTFTs 中的研究较多, 如掺杂于 In₂O₃、ZnO、IZO、ZTO、a-IGZO 和 IZTO 基质中^[87-89]。早在 2011 年, Taehwan 等^[90]采用溶液法制备了 Y: ZnO TFT, 结果显示掺杂 1 mol. % Y 的 Y: ZnO TFT 和纯 ZnO TFT 的迁移率分

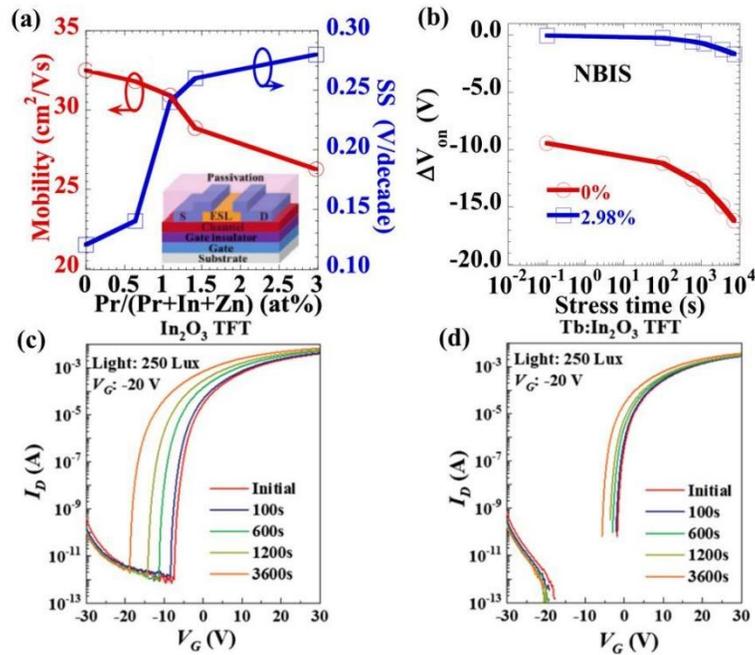


图7 (a-b) Pr: IZO TFT 迁移率和稳定性随 Pr 掺杂浓度的增加而变化^[19]。(c-d) In₂O₃ TFT 和 Tb: In₂O₃ TFT 器件在 NBIS 测试下的转移曲线^[50]。

Fig. 7 (a-b) The summary of mobility and stability of Pr: IZO TFTs with increasing Pr doping concentration^[19]. (c-d) Schematic diagram of transfer curves of In₂O₃ TFTs and Tb: In₂O₃ TFTs devices under NBIS testing^[50].

别为 $1.81 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.07 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 负栅压温度 (60°C , 2 h) 测试下的阈值电压漂移分别为 -1.7 V 和 -4.9 V 。他们认为 Y 的高氧空位形成能 (10.01 eV) 以及高 Y-O 结合能 ($\sim 719.6 \text{ kJ/mol}$) 能有效抑制氧空位。虽然该器件的迁移率仍待提升, 但稀土离子掺杂的潜力初露头角, 之后陆续报道关于 RE-MOTFTs 器件的研究结果。稀土 Eu 具有低电负性 (1.2) 和低标准电极电势 (-1.991 V), 作为载流子抑制剂被用于 SnO₂^[72]、InZnO^[91] 体系。稀土 Er 在 In₂O₃^[76]、SnO₂^[92]、ITZO^[93] 体系中被证明是有效的载流子抑制剂, 如 5% Er 掺杂 Er: In₂O₃ TFT 器件具有良好的电学性能和稳定性, 其中 μ_{FE} 为 $17.55 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ 为 1.7×10^7 , SS 为 0.16 V/decade , V_{th} 为 0.91 V , PBS 和 NBS 测试下阈值电压的漂移控制在 0.1 V 左右^[76]。最近, 考虑到 Yb 的标准电极电势 (-2.19 V) 远低于 In (0.33 V), 且 Yb 相比 In₂O₃ 具有宽禁带 (5.8 eV), 研究人员采用 C₃H₈O₂ 前驱体溶液制备了新型 Yb: In₂O₃ TFT^[78]。优化后的 1 mol.% Yb 掺 In₂O₃ TFT 的 μ_{FE} 为 $13.32 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, V_{th} 为 0.11 V , SS 为 0.38 V/decade , 电流开关比为 3.85×10^7 , 掺杂后的器件稳定性比 In₂O₃ TFT 高出 5 倍。

在上述 RE-MOTFTs 器件中, 稀土主要是作为 V₀ 抑制剂以降低载流子本征浓度并改善 TFTs 器

件的稳定性。稳定性研究主要关注偏压和温度对 TFTs 器件的影响, 但对光照的研究相对缺乏。通常, 为避免光照影响, 尝试添加遮光层, 但此举提高了工艺成本。2021 年, Lan 等^[94] 采用溶液法系统地将 14 种镧系元素 (除 Pm 外) 掺入 In₂O₃ 中, In/Ln 摩尔比为 19: 1。实验结果表明, 未掺杂的 In₂O₃ TFT 器件的 V_{on} 为 -13.3 V , 迁移率为 $17.1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 Ln: In₂O₃ TFT 的 V_{on} 在 $-1 \sim 1 \text{ V}$, 迁移率为 $3.1 \sim 6.1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 说明 5 at.% 的 Ln 可以有效抑制载流子浓度。他们发现 Ln 系稀土提高了 TFTs 器件的 NBIS 稳定性 (如图 8), 未掺杂 In₂O₃ TFTs 器件在 NBIS 测试条件下, ΔV_{on} 高达 -12.5 V , 而 Pr 和 Tb 掺杂的 In₂O₃ TFT 器件在 NBIS 测试下 ΔV_{on} 仅为 -3.0 V 。薄膜中 V₀ 的比例与 NBIS 测试下 ΔV_{on} 无一一对应关系, 表明 Ln: In₂O₃ TFT 中的镧系稀土不仅是 V₀ 抑制剂, 还存在其他作用机制提高器件的 NBIS 稳定性。

总之, 溶液法通过旋涂、喷涂等工艺沉积成膜, 操作简单且灵活, 用于前期探索新的或者不同浓度的稀土掺杂氧化物半导体材料体系, 且在大尺寸显示、柔性电子等方面具有优势。但溶液加工工艺可控性较弱, 相比真空法, 该工艺制备的薄膜均匀性和致密性较低、对厚度的控制不够精确等, 这些原因导致目前溶液法制备的 RE-MOTFTs

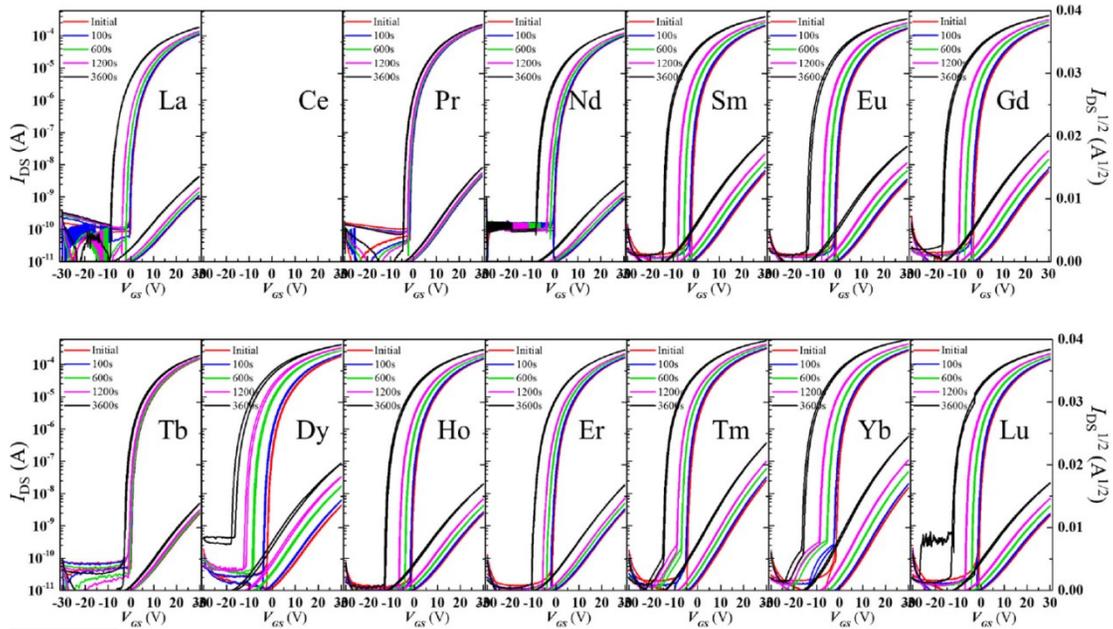


图8 $V_{GS} = -20$ V, 白光 250 Lux, 持续光照下的 Ln: In_2O_3 TFTs 器件的转移特性曲线^[94]。

Fig. 8 The transfer curves of the Ln: In_2O_3 TFTs under continuous illumination with $V_{GS} = -20$ V and white light at 250 Lux^[94].

器件的迁移率普遍较低、开关速度较慢。

4.2.3 稀土掺杂 MOTFTs 的作用机制

在氧化物材料体系中,主要是基于氧空位模型研究稀土的作用机制,稀土元素具有低电负性和高 M-O 解离能,易与 O 结合形成更稳定的 M-O 键,从而通过降低氧化物中 V_O 浓度来控制本征载流子浓度,并提高器件的稳定性^[95-96]。根据 Pr 掺杂既可以改善 IZO TFT 的稳定性,又会增加沟道和界面缺陷态密度的实验现象, Xu 等提出了“缺陷辅助中心”的假设模型,如图 9 (a)^[19]。C-V 实验证实 Pr 诱导产生的浅能级缺陷态位于 CBM 下约 0.3 eV,靠近费米能级(E_f),态

密度为 $10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。该位置的缺陷态可作为 V_O^{2+} 和电子的复合中心,加速光照下电离氧空位的弛豫恢复过程,从而提高器件的 NBIS 稳定性。同样,稀土 Tb 掺杂 IZO TFT 也是缺陷辅助中心机制,能改善器件稳定性^[97]。Tb⁴⁺(Tb 4f⁷)产生的浅能级缺陷会捕获光生电子并转移到靠近由 V_O 产生的深能级缺陷态的 Tb³⁺(Tb 4f⁶),如图 9(b)。Tb³⁺和 V_O^{2+} 之间的电子-空穴复合提供了快速中和 VBM 中空穴的通道,从而阻止 VBM 处积累的空穴在负偏压下被栅绝缘层捕获,这是改善 TFT 器件负偏压光照温度 (NBITS) 稳定性的可能机制。

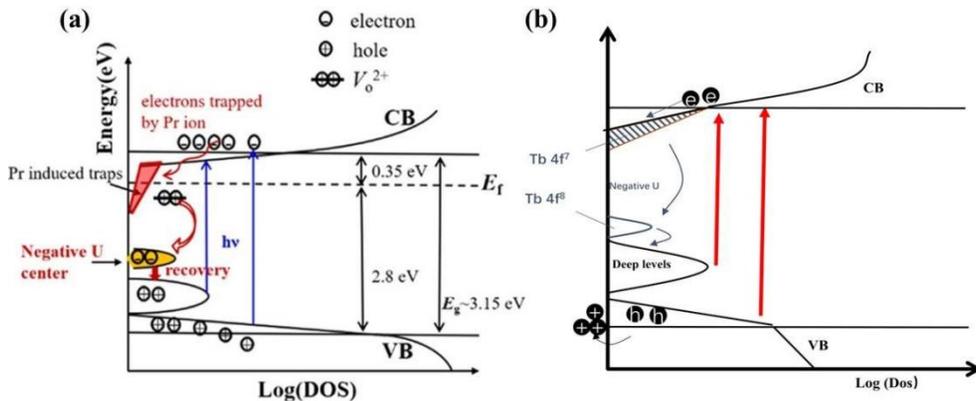


图9 (a) Pr: IZO TFTs 的亚隙态模型^[19]; (b) Tb: IZO TFTs 在 NBITS 测试下的缺陷辅助模型示意图^[97]。

Fig. 9 (a) The sub-gap states model of Pr: IZO TFTs^[19], (b) The schematic diagram of the trap assisted model for NBITS mechanism of Tb: IZO TFTs^[97].

此外, Lan 等^[94]通过对比 14 种溶液法制备的 Ln: In₂O₃ TFT 中 V₀ 的比例与 NBIS 测试下的 ΔV_{on} , 发现 Pr 和 Tb 掺杂的 In₂O₃ TFT 稳定性最佳, 而 Ce 掺杂的 In₂O₃ TFT 因沟道中氧空位浓度过低而未显示出场效应。他们发现 CeO_x, PrO_x 和 TbO_x 薄膜表现出宽带吸收, 而其他 LnO_x 薄膜在波长大于 300 nm 的范围内表现为透明。宽带吸收主要源于配体离子到 Ln 4f 的电荷转移(CT)跃迁, 推断 Ce(III-IV)、Pr(III-IV) 和 Tb(III-IV) 的 E_{CT} 分别为 4.1 eV、2.5 eV 和 2.6 eV。基态 Ln⁴⁺ 吸收光子后, 电子以 CT 转移的方式至激发态 Ln³⁺, O2p⁻¹ 处的空穴则会将跃迁的电子以非辐射跃迁或下转换的方式返回到基态, 如图 10(a) 和 (c), 并观察到 Pr: In₂O₃ 薄膜在 450 nm 激发光下出现极微弱的 ~625 nm 的发光峰, 如图 10(b), 初步推断 Ce: In₂O₃、Pr: In₂O₃、Tb: In₂O₃ 薄膜主要将入射光以晶格振动的

形式消耗掉, 而 Pr: In₂O₃ 薄膜将小部分入射光转换为红光, 因此对应的 TFTs 器件的光照稳定性变好。

通过真空溅射法制备的高迁移率和高稳定性的 Tb: In₂O₃ TFTs 器件, 发现稀土 Tb⁴⁺/Tb³⁺ 之间的 CT 跃迁过程改善器件的 NBIS 稳定性, 如图 10(d)^[50]。在光照下, 电子从 A 点的基态 Tb⁴⁺(4f⁷-O2p⁶) 跃迁至激发态 B 点 Tb³⁺(4f⁸-O2p⁵), 因 Tb³⁺ 的半径大于 Tb⁴⁺, 晶格常数增大, 导致电子移动至 C 点。同时, 由于 O2p⁵ 的半径小于 O2p⁶, 引起晶格常数减小。因此, 相较于 V₀ 的电离过程, Tb⁴⁺ 4f⁷-O2p⁶ 态到 Tb³⁺ 4f⁸-O2p⁵ 态的 CT 跃迁引起的晶格变化更小, 这样, 减少了光生载流子的驰豫时间。最终, 电子从 C 点经过交叉弛豫返回到基态 A 点。综上, 光照后, Tb⁴⁺ 的 CT 跃迁过程比 V₀ 的电离更易发生, 从而提升器件的 NBIS 稳定性。

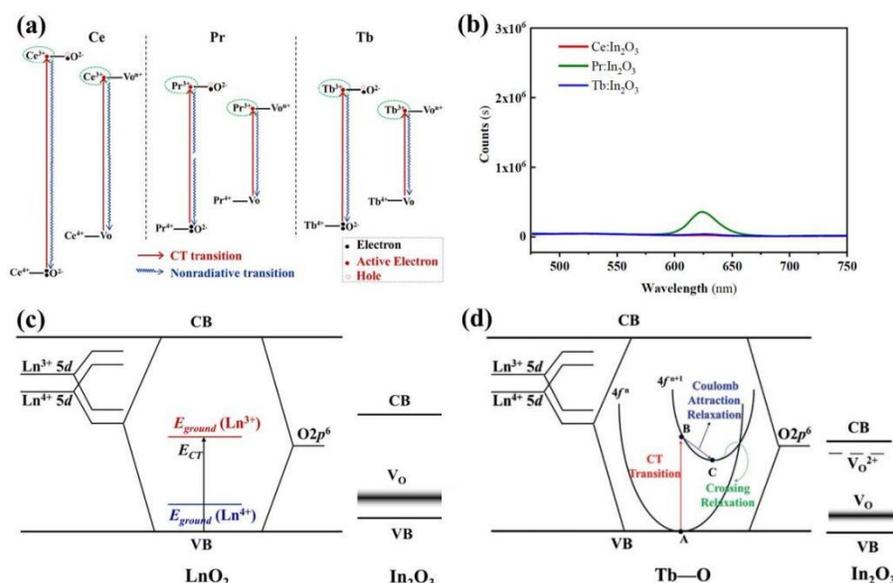


图 10 (a) Ce⁴⁺, Pr⁴⁺, Tb⁴⁺ 的电荷转移跃迁示意图^[94]; (b) 450 nm 光激发的 Ce: In₂O₃、Pr: In₂O₃、Tb: In₂O₃ 薄膜的光致发光谱^[94]; (c) LnO₂ 和 In₂O₃ 能级示意图^[94]; (d) CT 跃迁过程示意图以及 LnO₂ 和 In₂O₃ 的能带结构^[50]。

Fig. 10 (a) The schematic diagram of charge transfer transition for Ce⁴⁺, Pr⁴⁺, Tb⁴⁺^[94], (b) The PL spectrum of Ce: In₂O₃、Pr: In₂O₃、Tb: In₂O₃ film under excitation light at 450 nm^[94], (c) The energy levels of the LnO₂ and In₂O₃^[94], (d) Diagram of the CT transition process and the band alignment of the LnO₂ and In₂O₃^[50].

通过精确的稀土掺杂设计, 能有效调控氧化物的载流子浓度进而实现具有低功耗高迁移率的氧化物薄膜晶体管, 同时微量的稀土能作为“缺陷辅助中心”或进行“电荷转移跃迁”保证氧化物薄膜晶体管优异的偏压、光照稳定性。且 RE-MOTFT 的制备工艺简单, 与传统工艺兼容, 制备成本低, 在高性能显示驱动技术等领域极具潜力。

5 总结与未来发展趋势

本文对氧化物半导体材料的载流子传输机制、材料体系设计、器件结构以及不同制备方法下 n 型 RE-MOTFTs 器件的性能及作用机制进行了综述。尽管稀土离子掺杂对改善 TFT 器件的稳定性和迁移率取得了一定进展, 但是稀土掺杂仍然面临挑战, 如何深入理解稀土掺杂的机制, 进一步提高 TFT 器件的迁移率和改善稳定性仍需要深入研究。

未来的研究可以从以下几个方面展开:(1)探索更有效的稀土掺杂技术,采用更微量的稀土掺杂来实现更高迁移率和稳定性的 TFT 器件,设计具有更高迁移率的低氧化物半导体材料;(2)研究多种稀土元素的联合掺杂效应,探究其对 TFT 器件性能的

协同提升效果;(3)开发新型 RE-MOTFTs 的器件结构,改善界面接触;(4)探索新型薄膜制备工艺,包括原子层外延工艺,制备高质量薄膜,探究成膜机制对器件性能的影响;(5)深入探究稀土掺杂对 MOTFTs 器件受温度、湿度影响的机理。

参 考 文 献:

- [1] KIM T, CHOI C H, HUR J S, *et al.* Progress, Challenges, and Opportunities in Oxide Semiconductor Devices: A Key Building Block for Applications Ranging from Display Backplanes to 3D Integrated Semiconductor Chips [J]. *Adv. Mater.*, 2022, e2204663.
- [2] NOMURA K, OHTA H, TAKAGI A, *et al.* Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors [J]. *Nature*, 2004, 432(7016):488-492.
- [3] YABUTA H, SANO M, ABE K, *et al.* High-mobility thin-film transistor with amorphous InGaZnO₄ channel fabricated by room temperature rf-magnetron sputtering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(11).
- [4] TING KUO C, CHIN WEI L, SHIHCHANG C. LTPO TFT Technology for AMOLEDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1):545-548.
- [5] LIANG L, ZHANG H, LI T, *et al.* Addressing the Conflict between Mobility and Stability in Oxide Thin-film Transistors [J]. *Adv. Sci. (Weinh)*, 2023, 10(14):e2300373.
- [6] FURUTA M, SHIMPO K, KATAOKA T, *et al.* 7-4: High Mobility Hydrogenated Polycrystalline In-Ga-O (IGO:H) Thin-Film Transistors formed by Solid Phase Crystallization [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1):69-72.
- [7] LI F, YIP S, DONG R, *et al.* Crystalline InGaZnO quaternary nanowires with superlattice structure for high-performance thin-film transistors [J]. *Nano. Res.*, 2019, 12(8):1796-1803.
- [8] SPENCER J A, MOCK A L, JACOBS A G, *et al.* A review of band structure and material properties of transparent conducting and semiconducting oxides: Ga₂O₃, Al₂O₃, In₂O₃, ZnO, SnO₂, CdO, NiO, CuO, and Sc₂O₃ [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2022, 9(1).
- [9] CHOI J Y, LEE S Y. Comprehensive Review on the Development of High Mobility in Oxide Thin Film Transistors [J]. *J. Korean. Phys. Soc.*, 2017, 71(9):516-527.
- [10] AIKAWA S, MITOMA N, KIZU T, *et al.* Suppression of excess oxygen for environmentally stable amorphous In-Si-O thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 106(19).
- [11] CHEONG W S, SHIN J H, CHUNG S M, *et al.* Current Stress Induced Electrical Instability in Transparent Zinc Tin Oxide Thin-Film Transistors [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2012, 12(4):3421-3424.
- [12] JI K H, KIM J I, MO Y G, *et al.* Comparative Study on Light-Induced Bias Stress Instability of IGZO Transistors With SiNx and SiO₂ Gate Dielectrics [J]. *Ieee. Edl.*, 2010, 31(12):1404-1406.
- [13] PARK S, CHO E N & YUN I. Instability of light illumination stress on amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors [J]. *J. Soc. Inf. Display*, 2013, 21(8):333-338.
- [14] 翁乐,史大为,郭建,等. OLED显示残像研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2022, 37(09):1140-1150.
WENG L, SHI D W, GUO J, *et al.* Research progress on residual images in OLED displays [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2022, 37(09):1140-1150. (in Chinese)
- [15] CHO M H, CHOI C H, KIM M J, *et al.* High-Performance Indium-Based Oxide Transistors with Multiple Channels Through Nanolaminate Structure Fabricated by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(15):19137-19151.
- [16] LI W, YANG L, GAO Z, *et al.* Impact of the Source/Drain Electrode Process on the Mobility-Threshold Trade-Off for In-SnZnO Thin-Film Transistors [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2023, 5(3):1615-1619.
- [17] KIM Y S, LEE W B, OH H J, *et al.* Remarkable Stability Improvement with a High-Performance PEALD-IZO/IGZO Top-Gate Thin-Film Transistor via Modulating Dual-Channel Effects [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9(16).

- [18] HE P, DING C, ZOU X, *et al.* Enhanced stability and mobility of solution-processed oxide thin-film transistors with bi-layer terbium-incorporated indium oxide channel[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022,121(19).
- [19] XU H, XU M, LI M, *et al.* Trap-Assisted Enhanced Bias Illumination Stability of Oxide Thin Film Transistor by Praseodymium Doping [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, (5):5232-5239.
- [20] KÖRNER W, URBAN D F, ELSÄSSER C. Generic origin of subgap states in transparent amorphous semiconductor oxides illustrated for the cases of In-Zn-O and In-Sn-O [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2015,212(7):1476-1481.
- [21] IDE K, NOMURA K, HOSONO H, *et al.* Electronic Defects in Amorphous Oxide Semiconductors: A Review [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2019,216(5).
- [22] KÖRNER W, URBAN D F, ELSÄSSER C. Origin of subgap states in amorphous In-Ga-Zn-O [J]. *J. Appl. Phys.*, 2013, 114(16).
- [23] LU K, YAO R, WANG Y, *et al.* Effects of praseodymium doping on the electrical properties and aging effect of InZnO thin-film transistor [J]. *J. Mater. Sci.*, 2019,54(24):14778-14786.
- [24] KAMIYA T, HOSONO H. Material characteristics and applications of transparent amorphous oxide semiconductors [J]. *NPG Asia Materials*, 2010,2(1):15-22.
- [25] HOSONO H. Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006,352(9-20):851-858.
- [26] KAMIYA T, NOMURA K, HOSONO H. Present status of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors [J]. *Sci. Technol. Adv. Mat.*, 2010,11(4).
- [27] KAMIYA T, NOMURA K, HOSONO H. Electronic structure of the amorphous oxide semiconductor a-InGaZnO_{4-x}: Tauc-Lorentz optical model and origins of subgap states [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2009,206(5):860-867.
- [28] 兰林锋,张鹏,彭俊彪. 氧化物薄膜晶体管研究进展 [J]. 物理学报, 2016,65(12).
LAN L F, ZHANG P, PENG J B. Research progress on oxide-based thin film transistors [J]. *Acta. Phys. Sin-Ch. Ed.*, 2016,65(12). (in Chinese)
- [29] NOMURA K, KAMIYA T, OHTA H, *et al.* Carrier transport in transparent oxide semiconductor with intrinsic structural randomness probed using single-crystalline InGaO₃(ZnO)₅ films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004,85(11):1993-1995.
- [30] LANY S, Dopability ZUNGER A., conductivity intrinsic, and nonstoichiometry of transparent conducting oxides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007,98(4).
- [31] DE JAMBLINNE DE MEUX A, BHOOLOKAM A, POURTOIS G, *et al.* Oxygen vacancies effects in a-IGZO: Formation mechanisms, hysteresis, and negative bias stress effects [J]. *Phys. status solidi A*, 2017,214(6).
- [32] LANY S, ZUNGER A. Anion vacancies as a source of persistent photoconductivity in II-VI and chalcopyrite semiconductors [J]. *Phys. Rev. B*, 2005,72(3).
- [33] TUFTE O N, CHAPMAN P W. Electron Mobility in Semiconducting Strontium Titanate [J]. *Phys. Rev.*, 1967,155(3):796-802.
- [34] MOOS R, HÄRDTL K H. Electronic transport properties of Sr_{1-x}LaxTiO₃ceramics [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996,80(1):393-400.
- [35] GUNKEL F, CHRISTENSEN D V, CHEN Y Z, *et al.* Oxygen vacancies: The (in)visible friend of oxide electronics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020,116(12).
- [36] ZHENG B, FAN J, CHEN B, *et al.* Rare-Earth Doping in Nanostructured Inorganic Materials [J]. *Chem. Rev.*, 2022, 122(6):5519-5603.
- [37] PAN W, WANG Y, WANG Y, *et al.* Multiple effects of hydrogen on InGaZnO thin-film transistor and the hydrogenation-resistibility enhancement [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2023,947.
- [38] ABLIZ A, GAO Q, WAN D, *et al.* Effects of Nitrogen and Hydrogen Codoping on the Electrical Performance and Reliability of InGaZnO Thin-Film Transistors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017,9(12):10798-10804.
- [39] MATTSON G W, VOGT K T, WAGER J F, *et al.* Illuminating Trap Density Trends in Amorphous Oxide Semiconductors with Ultrabroadband Photoconduction [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023.
- [40] CHO D Y, KIM K H, KIM T W, *et al.* Transparent and flexible amorphous InZnAlO films grown by roll-to-roll sputtering for acidic buffer-free flexible organic solar cells [J]. *Org. Electron.*, 2015,24:227-233.
- [41] YANG W, YANG H, SU J, *et al.* Preparation and electrical characteristics of Li-N co-doped InZnAlO thin film transis-

- tors by radio frequency magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2022, 205.
- [42] CHOI W S, JO H, KWON M S, *et al.* Control of electrical properties and gate bias stress stability in solution-processed a-IZO TFTs by Zr doping [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2014, 14(12):1831-1836.
- [43] LAN L, XIONG N, XIAO P, *et al.* Enhancement of bias and illumination stability in thin-film transistors by doping InZnO with wide-band-gap Ta₂O₅ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(24).
- [44] PARK H W, KIM B K, PARK J S, *et al.* Device performance and bias instability of Ta doped InZnO thin film transistor as a function of process pressure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(10).
- [45] HUANG C X, LI J, FU Y Z, *et al.* Characterization of dual-target co-sputtered novel Hf-doped ZnSnO semiconductors and the enhanced stability of its associated thin film transistors [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2016, 681:81-87.
- [46] WAN D, LIU X, ABLIZ A, *et al.* Design of Highly Stable Tungsten-Doped IZO Thin-Film Transistors With Enhanced Performance [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2018, 65(3):1018-1022.
- [47] PARK H W, PARK K, KWON J Y, *et al.* Effect of Active Layer Thickness on Device Performance of Tungsten-Doped InZnO Thin-Film Transistor [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2017, 64(1):159-163.
- [48] CAI W, LI M, LI H, *et al.* Significant performance and stability improvement of low-voltage InZnO thin-film transistors by slight La doping [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 121(6).
- [49] KIM D N, KIM D L, KIM G H, *et al.* The effect of La in InZnO systems for solution-processed amorphous oxide thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(19).
- [50] LAN L, LI X, DING C, *et al.* The Effect of the Charge Transfer Transition of the Tetravalent Terbium on the Photostability of Oxide Thin-Film Transistors [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 8(10).
- [51] KIM SI, KIM CJ, PARK JC. High performance oxide thin film transistors with double active layers [J]. *Iedm Dig. Tech. Pap.*, 2008, 1:1-4.
- [52] PARK J C, KIM S, KIM S, *et al.* Highly stable transparent amorphous oxide semiconductor thin-film transistors having double-stacked active layers [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(48):5512-5516.
- [53] LU R K, LI S, LU J, *et al.* Homojunction structure amorphous oxide thin film transistors with ultra-high mobility [J]. *J. Semicond.*, 2023, 44(5):05201.
- [54] LEE J, CHUNG D S. Heterojunction oxide thin film transistors: a review of recent advances [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(16):5241-5256.
- [55] SUN B, HUANG H, WEN P, *et al.* Research Progress of Vertical Channel Thin Film Transistor Device [J]. *Sensors*, 2023, 23(14).
- [56] KIM J, KIM D H, CHO S I, *et al.* Channel-Shortening Effect Suppression of a High-Mobility Self-Aligned Oxide TFT Using Trench Structure [J]. *Ieee Edl.*, 2021, 42(12):1798-1801.
- [57] ZHANG Q, SHAO S, CHEN Z, *et al.* High-Resolution Inkjet-Printed Oxide Thin-Film Transistors with a Self-Aligned Fine Channel Bank Structure [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(18):15847-15854.
- [58] LUO L, FABER H, LIU C, *et al.* Contact-Engineering of Self-Aligned-Gate Metal Oxide Transistors Processed via Electrode Self-Delamination and Rapid Photonic Curing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024.
- [59] 李强, 葛春桥, 陈露, 等. 高迁移率金属氧化物半导体薄膜晶体管的研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2024, 39(04):447-465.
- LI Q, GE C J, CHEN L, *et al.* Research progress on high mobility metal oxide semiconductor thin film transistors [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2024, 39(04):447-465. (in Chinese)
- [60] RABBI M H, LEE S, SASAKI D, *et al.* Polycrystalline InGaO Thin-Film Transistors with Coplanar Structure Exhibiting Average Mobility of $\approx 78 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ and Excellent Stability for Replacing Current Poly-Si Thin-Film Transistors for Organic Light-Emitting Diode Displays [J]. *Small Methods*, 2022, 6(9).
- [61] TAKAHASHI T, FUJII M N, MIYANAGA R, *et al.* Unique degradation under AC stress in high-mobility amorphous InW-Zn-O thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Express*, 2020, 13(5).
- [62] SHIAH Y S, SIM K, SHI Y, *et al.* Mobility-stability trade-off in oxide thin-film transistors [J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(11):800-807.
- [63] LI T, SUN J T, LIANG L L, *et al.* 35-4: High-Mobility and High-Negative Bias Illumination Stress Stability Based on ITZO/IGZO Bilayer Thin Film Transistors [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, 55(S1):288-291.

- [64] KIM H G, LEE H J, LEE K M, *et al.* Improved mobility and bias stability of Hf-doped IGZO/IZO/Hf-doped IGZO thin-film transistor [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2024,981.
- [65] LIU J, LIU S, YU Y, *et al.* High Mobility and Photo-Bias Stable Metal Oxide Thin-Film Transistors Engineered by Gradient Doping [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2022,8(7).
- [66] SONG W, LAN L, XIAO P, *et al.* High-Mobility and Good-Stability Thin-Film Transistors With Scandium-Substituted Indium Oxide Semiconductors [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2016,63(11):4315-4319.
- [67] SAHA J K, BILLAH M M, JANG J. Triple-Stack ZnO/AlZnO/YZnO Heterojunction Oxide Thin-Film Transistors by Spray Pyrolysis for High Mobility and Excellent Stability [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021,13(31):37340-37352.
- [68] ZHAO C Y, LI J, ZHONG D Y, *et al.* Effect of La Addition on the Electrical Characteristics and Stability of Solution-Processed LaInO Thin-Film Transistors With High-k ZrO₂ Gate Insulator [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2018, 65 (2) : 526-532.
- [69] KOO J H, KANG T S, KIM T Y, *et al.* Electrical and optical characteristics of Co-sputtered amorphous Ce-doped indium-zinc-oxide thin-film transistors [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2013,62(3):527-530.
- [70] LIN Z, LAN L, XIAO P, *et al.* Effects of Rare-Earth Element Dopants in High-Mobility InO_x-Based Thin-Film Transistors [J]. *Ieee Edl.*, 2016,37(9):1139-1142.
- [71] LI Y, ZHU D, XU W, *et al.* High-mobility nanometer-thick crystalline In-Sm-O thin-film transistors via aqueous solution processing [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020,8(1):310-318.
- [72] YANG J, HU G, CAO D, *et al.* Communication-Wide Bandgap Tin Oxide Thin Film Transistor by Doping Rare Earth Element Europium [J]. *Ecs. J. Solid State Sc.*, 2020,9(6).
- [73] LEE S H, KIM T, LEE J, *et al.* Solution-processed gadolinium doped indium-oxide thin-film transistors with oxide passivation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017,110(12).
- [74] HONG L, XU W, LIU W, *et al.* High performance indium dysprosium oxide thin-film transistors grown from aqueous solution [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2020,504.
- [75] DENG Z, LIANG Z, YANG Y, *et al.* Heterojunction channel engineering for enhanced mobility and stability of solution-processed holmium-doped indium oxide thin film transistors [J]. *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, 2024,184.
- [76] WU X, HE G, WANG W, *et al.* Electrical Performance Enhancement and Low-Frequency Noise Estimation of In₂O₃-Based Thin Film Transistor Based on Doping Engineering [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2022.
- [77] REN J H, HUANG Y T, LI K W, *et al.* Preparation of rare-earth thulium doped tin-oxide thin films and their applications in thin film transistors [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2019,493:63-69.
- [78] WANG Z, ZHAO T, LI J, *et al.* Solution-Processed High Performance Ytterbium-Doped In₂O₃ Thin Film Transistor and Its Application in Common-Source Amplifier [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2023,70(3):1073-1078.
- [79] KUMAR M, JEONG H, KUMAR A, *et al.* Magnetron-sputtered high performance Y-doped ZnO thin film transistors fabricated at room temperature [J]. *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, 2017,71:204-208.
- [80] DONG J, LI H, HAN D, *et al.* Investigation of c-axis-aligned crystalline gadolinium doped aluminum-zinc-oxide films sputtered at room-temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018,112(1).
- [81] LAN L, DAI X, HE C, *et al.* Improving Negative-Bias-Temperature-Stress Stability for Thin-Film Transistors by Doping Mg Into ScInO Semiconductor [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2019,66(6):2620-2623.
- [82] LONG T, DAI X, LAN L, *et al.* High-performance CdScInO thin-film transistors and their stability improvement under negative bias (illumination) temperature stress [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019,7(44):13960-13965.
- [83] SONG E, LAN L, XIAO P, *et al.* Thin-Film Transistors With Neodymium-Incorporated Indium-Zinc-Oxide Semiconductors [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2016,63(5):1916-1920.
- [84] LI M, ZHANG W, CHEN W, *et al.* Improving Thermal Stability of Solution-Processed Indium Zinc Oxide Thin-Film Transistors by Praseodymium Oxide Doping [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018,10(34):28764-28771.
- [85] 朱宇博,徐华,李氏,等. 镧掺杂铟镓氧化物薄膜晶体管的低频噪声特性分析 [J]. *物理学报*, 2021,70(16):330-338.
ZHU Y B, XU H, LI M, *et al.* Analysis of low frequency noise characteristics of praseodymium doped indium gallium oxide thin film transistor [J]. *Acta. Phys. Sin-Ch. Ed.*, 2021,70(16). (in Chinese)
- [86] ZHANG H, LIANG L, WANG X, *et al.* Praseodymium-Doped In-Sn-Zn-O TFTs With Effective Improvement of Negative-

- Bias Illumination Stress Stability [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2022,69(1):152-155.
- [87] TING C C, FAN H Y, TSAI M K, *et al.* Improvement of electrical characteristics in the solution-processed nanocrystalline indium oxide thin-film transistors depending on yttrium doping concentration [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2014,211(4):800-810.
- [88] MARETTE A, SHEA H R, BRIAND D. Yttrium zinc tin oxide high voltage thin film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018,113(13).
- [89] TING C C, CHANG S P, LI W Y, *et al.* Enhanced performance of indium zinc oxide thin film transistor by yttrium doping [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2013,284:397-404.
- [90] JUN T, SONG K, JUNG Y, *et al.* Bias stress stable aqueous solution derived Y-doped ZnO thin film transistors [J]. *J. Mater. Chem.*, 2011,21(35):13524-13529.
- [91] TING C C, LI W Y, WANG C H, *et al.* Structural and electrical properties of the europium-doped indium zinc oxide thin film transistors [J]. *Thin Solid Films*, 2014,562:625-631.
- [92] REN J H, LI K W, SHEN J, *et al.* Effects of rare-earth erbium doping on the electrical performance of tin-oxide thin film transistors [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2019,791:11-18.
- [93] YANG J W, NA Y B, SHIN J H, *et al.* Effects of Er-Doping on Amorphous InZnSnO/InZnSnO: Er Double-Channel Thin-Film Transistors [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2017,17(5):3415-3419.
- [94] HE P, XU H, LAN L, *et al.* The effect of charge transfer transition on the photostability of lanthanide-doped indium oxide thin-film transistors [J]. *Communications Materials*, 2021,2(1).
- [95] AFOUXENIDIS D, HALCOVITCH N R, MILNE W I, *et al.* Films Stoichiometry Effects on the Electronic Transport Properties of Solution-Processed Yttrium Doped Indium-Zinc Oxide Crystalline Semiconductors for Thin Film Transistor Applications [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2020,6(4).
- [96] SONG W, LAN L, XIAO P, *et al.* Low-temperature, high-stability, flexible thin-film transistors with a novel $\text{Sc}_x\text{In}_{1-x}\text{O}_3$ semiconductor [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016,49(24).
- [97] LIU J, XU H, LI M, *et al.* Comprehensive Study of Improved Negative Bias Illumination Temperature Stress Stability in Terbium-Doped Indium-Zinc-Oxide Thin-Film Transistors [J]. *Ieee T. Electron. Dev.*, 2023,70(7):3563-3568.



黄湘兰(1999-),女,湖南邵东人,博士研究生,2021年于中南林业科技大学获得学士学位,主要从事稀土掺杂金属氧化物薄膜晶体管的研究。
E-mail:hxl18079@163.com



彭俊彪(1962-),男,山东宁津人,博士,教授,博士生导师,1993年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,主要从事有机发光材料、器件以及驱动相关的研究。
E-mail:psjbpeng@scut.edu.cn