

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-15

氧化物半导体薄膜晶体管的研发现状与 发展趋势分析

熊雨婷^{1,2}, 任俊彦¹, 梁凌燕^{1*}, 曹鸿涛^{1,2}

- (1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 原子尺度与微纳制造实验室,
浙江宁波315201;
2. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京100049)

摘要:氧化物半导体薄膜晶体管(Oxide semiconductor thin-film transistor, OS TFT)以其高迁移率、优良均匀性与低制造成本等优势,已成为高端显示技术的核心驱动元件,并逐步向传感、存储、类脑计算等集成系统领域拓展。本文基于Web of Science与Incopat数据库,对2016—2025年间的OS TFT领域的科研论文与专利数据进行了系统性分析。研究发现,全球研发活动高度集中于东亚地区,中国与韩国在论文与专利产出方面领先。然而,该领域存在明显的学术-产业失衡:90%以上论文来自高校及科研院所,而81.01%的专利由企业持有,产学研转化不足。同时,专利集中度偏低,技术壁垒尚未形成;上游关键材料溅射靶材仍由日本主导(占比54.55%),对中国产业链安全构成潜在风险。未来,OS TFT将突破传统显示驱动,与传感、存储与类脑计算等领域深度融合,本文就其在这些领域中的发展趋势及存在问题进行了分析。

关键词:氧化物半导体薄膜晶体管;显示;传感;存储;类脑计算

中图分类号:TP321^{+.5} 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0036 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0036

Analysis of research status and development trends in oxide semiconductor thin-film transistors

XIONG Yuting^{1,2}, REN Junyan¹, LIANG Lingyan^{1*}, CAO Hongtao^{1,2}

- (1. Laboratory of Atomic-scale and Micro & Nano Manufacturing, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang, 315201;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049)

Abstract: Oxide semiconductor thin-film transistor (OS TFT) has become a core driving component of high-end display technology due to its advantages such as high mobility, excellent uniformity and low manufacturing cost, and is gradually expanding into integrated system fields such as sensors, memory, and neuromorphic computing. Based on the Web of Science and Incopat databases, this paper conducts a systematic analysis of the scientific research papers and patent data in the field of OS TFT from 2016 to

收稿日期:2026-03-13;修订日期:2026-04-01.

基金项目:国家重点研发计划(No.2024YFB3614200)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2024YFB3614200)

*通信联系人, E-mail: lly@nimte.ac.cn

2025. Research has found that global R&D activities are highly concentrated in East Asia, with China and South Korea leading in the output of papers and patents. However, there is a clear academic-industry imbalance in this field: over 90% of the papers come from universities and research institutes, while 81.01% of the patents are held by enterprises, and the transformation of research into applications is insufficient. Meanwhile, the concentration of patents is relatively low, and technological barriers have yet to be formed. The key upstream material, sputtering targets, are still dominated by Japan (accounting for 54.55%), posing a potential risk to the security of China's industrial chain. In the future, OS TFT is poised to move beyond conventional display driving, forging deep convergence with sensor, memory, and neuromorphic computing.

Key words: oxide semiconductor thin-film transistors; display; sensor; memory; neuromorphic computing

1 引 言

薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)是一种基于薄膜材料制备的场效应晶体管,是平板显示、柔性电子等领域的核心器件,其发展历程始终与材料科学的突破深度协同。TFT技术的雏形可追溯至20世纪60年代:1962年,美国无线电公司(RCA)的P. K. Weimer首次提出TFT结构并制备出功能性器件,为大面积电子系统奠定了基础。与此同时,显示技术也在同步演进——1968年,同属RCA的George Heilmeier团队发现了液晶的动态散射等电光效应,并成功研制出世界首个液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)原型机,验证了液晶用于平板显示的可能性。然而,早期液晶屏采用无源矩阵驱动,存在响应慢、交叉串扰严重等问题,限制了其在高分辨率场景的应用。

这一瓶颈直至TFT与LCD的结合才得以突破。20世纪70年代初,研究人员首次将TFT作为像素级开关集成于液晶面板之下,实现有源矩阵驱动(Active Matrix, AM),每个像素由独立晶体管控制,从根本上解决了串扰问题,显著提升了图像质量与刷新能力。这一融合标志着现代高性能显示时代的开启。此后,TFT材料体系持续迭代:1991年,非晶硅(Amorphous Silicon, a-Si)TFT实现大规模量产,成功驱动TFT-LCD面板,正式拉开TFT-LCD产业化序幕;1994年,低温多晶硅(Low Temperature Poly-Silicon, LTPS)技术取得突破,凭借更高的载流子迁移率,为小尺寸、高像素密度(Pixels Per Inch, PPI)

显示器件提供了更强驱动能力。

进入21世纪,TFT技术加速向更高性能、更广泛应用拓展。2000年,有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)实现量产,其自发光特性与TFT驱动的结合,催生了AMOLED显示技术,推动柔性、可折叠显示成为现实;2004年,金属氧化物半导体(Oxide Semiconductor, OS)TFT展现出高迁移率与低温制备的双重优势,引发广泛关注;2010年,OS TFT开启规模化应用,2011年,首款基于铟镓锌氧化物(InGaZnO, IGZO)材料的高端显示屏问世,凭借高迁移率、高可见光透光性、低功耗及大面积均匀性等综合优势,迅速在高端大尺寸显示与高刷新率面板中占据核心地位,成为继a-Si与LTPS之后的第三代TFT技术代表。其高性能驱动能力也为微型发光二极管(Micro-LED/MLED)等新型发光技术的探索提供了可能。

在多元化的TFT技术路线中,OS TFT凭借其独特的性能优势,已成为支撑高端显示产业发展的基石技术。传统a-Si TFT技术虽具备工艺成熟、成本低廉的优势,但其迁移率通常低于 $1\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,难以满足动态高清的驱动需求。LTPS TFT虽可实现 $50\sim 100\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的高迁移率,适用于小尺寸、高PPI面板,但其依赖高能激光退火工艺,存在大面积均匀性差、工艺复杂、成本高等瓶颈,制约了其在在大尺寸面板中的广泛应用。相比之下,OS TFT(以IGZO为代表)兼具高迁移率、优异的大面积均匀性、极低的关态电流、低温工艺兼容性以及成本低等优势,更适合大尺寸与高分辨率面板的制造。

基于上述特性,OS TFT已成为驱动高端LCD、OLED以及Micro-LED等显示技术的核心背板方案,并凭借高可见光透过率,为透明显示、增强现实(Augmented Reality, AR)、虚拟现实(Virtual Reality, VR)与车载抬头显示(Head-Up Display, HUD)等新型应用提供了理想的技术路径。进一步地,低温多晶氧化物(Low Temperature Polycrystalline Oxide, LTPO)技术通过将LTPS的高驱动能力与OS TFT的低功耗特性集成于同一背板,实现了刷新率的动态自适应调节,在保障显示性能的同时大幅提升系统能效,已成为高端智能手机的核心技术方案。

值得注意的是,OS TFT的价值正突破“显示驱动”的传统边界。其极低的关态电流、低温工艺下的高迁移率、透明性,以及大面积均匀性的优势,使其在传感^[1-3]、存储(例如2T0C结构的动态随机存取存储器,DRAM^[4-5])、逻辑电路^[6]乃至类脑芯片(包括感官模拟^[7-8]和类脑计算^[9])等超越显示领域展现出巨大潜力。

这些新型应用不仅拓展了TFT的技术生命周期,也为后摩尔时代低功耗、大面积电子系统提供了可行路径。在此背景下,本文基于近十年的学术论文与专利数据,系统梳理OS TFT在研发和产业化进程中的关键问题与挑战,以期对相关研究与产业布局提供参考。

2 文献计量分析

基于Web of Science数据库的检索结果,

2016至2025年间,全球TFT领域的研究论文发表数量呈现出明显的阶段性变化趋势。

如图1(a)所示,2016至2017年间,论文数量有所增加;此后逐步回落,2021年后整体趋于稳定,至2025年再次出现明显增长态势。从沟道材料体系来看,TFT的研究主要集中在a-Si、二维材料、有机半导体及OS四大类别,其相关论文总量占该领域的90%以上。其中,二维材料、有机半导体和OS的相关研究占据主导地位。2016至2017年间,正是这三类半导体方向的研究论文产出有力支撑了TFT领域整体发文量的增长。而在2017至2021年间,有机半导体研究论文数量从1334篇下降至971篇,二维半导体相关论文数量由519篇减少至372篇,OS相关论文数量也有小幅下降,共同导致该时期TFT领域论文总量显现持续回落态势。2021年至2024年间,这四个类别的相关论文数量逐渐趋于稳定,TFT领域整体研究规模也相应进入平稳阶段。进入2025年,受OS研究热度显著回升,加之二维材料和有机半导体领域研究同步回暖的双重驱动,薄膜晶体管领域的整体论文数量呈现大幅攀升态势。近十年,各类TFT论文数量占比的演变趋势揭示了研究热点的转移。

如图1(b)所示,a-Si占比持续低于4%,并不断下降,表明该类TFT已经逐渐丧失研究活力。二维材料TFT相关论文数量占比从10.81%增至15%以上,反映其作为新兴方向的生命力。有机半导体TFT在柔性显示、电子皮肤及智慧医疗等前沿领域展现出广阔的前景,其电学性能和

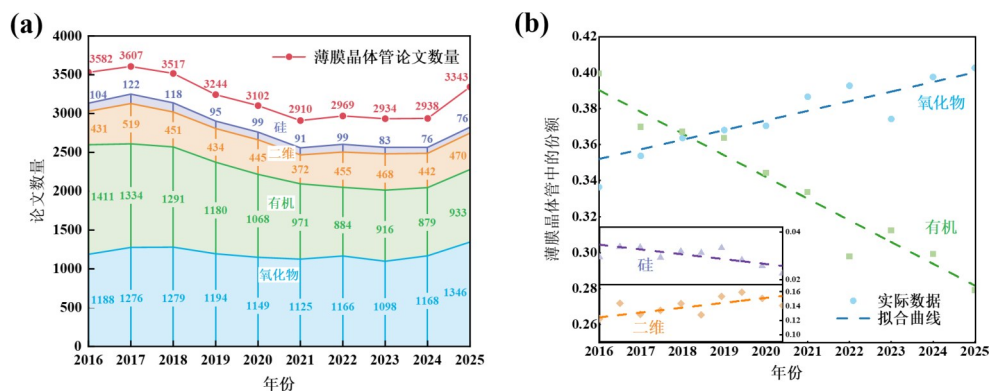


图1 根据Web of Science搜索,2016-2025年间按照沟道材料分类的薄膜晶体管(a)论文数量;(b)论文数量占比。

Fig. 1 Based on Web of Science from 2016 to 2025, (a) the number of publications and (b) their percentage distribution for thin-film transistors categorized by channel materials.

相关加工工艺也有巨大进步。然而器件稳定性仍是制约实用化的主要瓶颈,也成为该领域是否具备实际应用价值的关键争议点。尽管近年来有机薄膜晶体管的研究热度减退,但其在特定应用场景与材料体系中仍保有持续探索的研究空间。OS TFT相关研究量占比总体呈现上升趋势,并在2018年后取代有机半导体成为TFT领域的主导地位,清晰地表明该领域的研究重心已转向OS体系,发展潜力巨大,2025年占比已经达到40%。

2016年至2025年间OS TFT在不同应用方向的发展趋势呈现显著差异。OS TFT的应用正从传统显示(如LCD、OLED)到前沿显示(AR/VR)、再到电路(如反相器、振荡器)及多功能器件(如传感器、存储器、光电器件、类脑神经突触器件)的全方位拓展,如图2所示,凸显了其在构建未来集成电子系统中的核心价值。

如图3(a)所示,在显示方面的应用,前五年研究数量有所下降,后五年则出现明显回升,这一趋势可能与Micro-LED技术的快速发展和

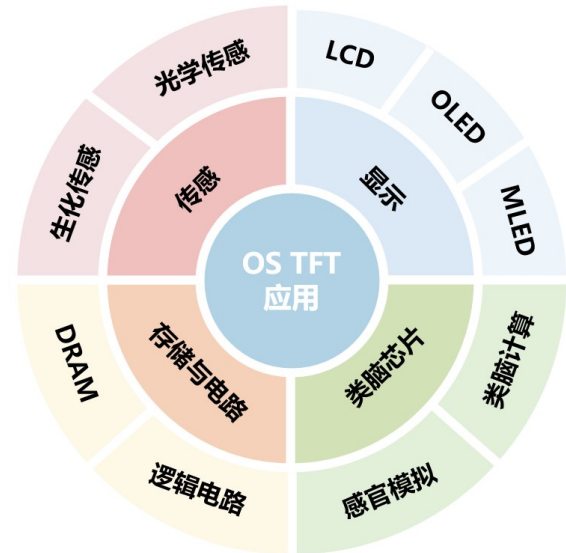


图2 氧化物薄膜晶体管的应用

Fig. 2 Applications of oxide thin-film transistors

VR/AR^[10-11]设备对高性能TFT背板的迫切需求所带动的新一轮研究热潮有关。传感器应用趋势与之相反,前五年呈现上升态势,虽在2019年后略有回落,但仍保持一定的研究活跃度。电路

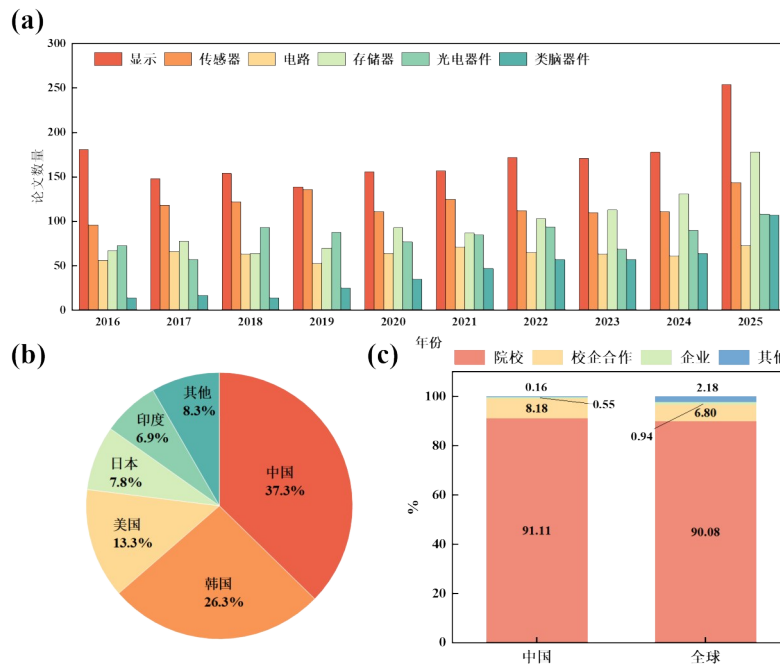


图3 根据Web of Science搜索,2016—2025年间,氧化物薄膜晶体管领域中(a)各应用方向的论文数量(b)各国论文发表数量占比(c)各类发表主体论文发表数量占比。

Fig. 3 Based on Web of Science from 2016 to 2025, in the field of oxide thin-film transistors: (a) number of publications by application field; (b) percentage distribution of publications by country; (c) percentage distribution of publications by institution type.

方面的研究在十年间保持缓慢但稳定地增长,但其总规模远低于显示与传感器方向。在光电器件方向,OS TFT 相关研究在前五年增长迅速,规模扩大两倍以上,后五年增速趋于平缓。而在新兴领域,受人工智能与高性能计算机需求的推动,存储器和类脑神经突触器件方向表现出极强的增长势头:十年间存储器相关研究增长 266%,类脑器件更是实现 764% 的显著增幅,显示出极高的研究活力与发展潜力。这些新兴应用方向的迅猛发展,预示着 OS TFT 正从单一的显示驱动器件,向融合感知、存储与计算功能的集成化平台演进。

如图 3(b)所示,2016 年至 2025 年间全球关于 OS TFT 的论文发表总量为 11 793 篇。从国家/地区分布来看,中国、韩国、美国、日本、印度是发文量前五的国家,占比分别为 37.3%、26.3%、13.3%、7.8% 和 6.9%,其他国家/地区占 8.4%。这一分布表明,OS TFT 的研究活动高度集中于东亚地区,尤其是中国和韩国,显示出两国在该前沿技术领域投入的科研资源与重视程度。本文进一步将 OS TFT 论文的发表主体划分为四类:高校/科研院所(院所)、校企合作、企业以及其他(如个人发表或未注明机构)。如图 3(c)所示,在全球与中国范围内,由院校作为主要发表主体的论文占比均超过 90%,占据绝对主导地位;而单纯由企业作为发表主体的论文占比均不足 1%,中国在此类别的占比低于全球水平。OS TFT 领域的研究目前仍以高校和科研院所为核心推动力,体现出该技术处于以基础研究和前沿探索为主的发展阶段。企业参与度较低,反映出其研发重点可能更偏向于专利布局与工艺开发等贴近产业化应用的环节。尽管中国在校企合作论文占比(8.18%)略高于全球水平(6.80%),但总体占比仍处于较低水平,因此未来仍需进一步强化产学研协同创新机制,加快推动 OS TFT 相关技术成果的商业化转化与产业落地。

3 专利布局解析

本文专利相关数据基于 Incopat 专利检索系统,数据分析以简单同族为统计单位。

如图 4(a)所示,2016—2025 年间全球 TFT

专利申请热度显著降低,2025 年申请量仅为 2016 年的 21%。TFT 作为显示领域的核心器件,经过数十年发展已进入技术成熟期,传统 TFT 技术的专利布局已趋于饱和,基础结构、工艺方法的创新空间大幅收窄,导致相关专利申请量回落。OS TFT 的专利申请量在 2016—2017 年间处于高位平台期,年申请量均超过 500 件。2018 年后申请量逐步回落,尽管 2022 年存在小幅波动,但整体仍呈持续下降趋势。OS TFT 的核心材料体系(如 IGZO)与基本器件结构的关键专利,多由夏普、三星企业在前一阶段完成布局。2018 年后申请量回落一定程度上反映原始创新难度增加,同时也表明企业更注重将已有专利技术转化为实际产品。

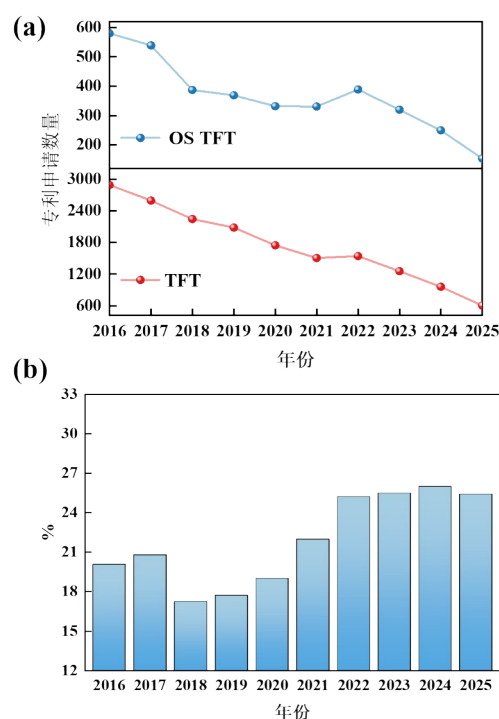


图 4 根据 Incopat 检索,2016-2025 年间 (a) TFT 和 OS TFT 专利申请数量;(b)OS TFT 在 TFT 中的占比。

Fig. 4 Based on Incopat from 2016 to 2025, (a) the number of patent applications for TFT and OS TFT; (b) the percentage of OS TFT in TFT.

近五年 OS TFT 在整体 TFT 专利申请总量中的份额增大,如图 4(b)所示,相对于传统非晶硅 TFT 等技术而言,仍然是当前技术迭代和创新的主要方向。随着柔性电子、传感集成、神经

形态计算等新方向的拓展,OS TFT 专利布局将会迎来新一轮增长。

图 5(a)显示,全球 OS TFT 专利申请量主要集中于中国、日本、韩国以及美国。在 2016 至 2025 这十年间,中国申请量显著高于其他国家,表明中国在该技术方向上大规模的研发投入与创新力度。但这并未改变日、韩、美在该领域的重要性。日本在基础材料与原创技术方面底蕴深厚,韩国在高端显示集成与工艺开发上持续领先,美国则在新型应用与跨领域融合方面具备创新活力。中、日、韩三国的集体领先,凸显东亚在显示与半导体产业中的集群优势,也预示着未来产业竞争的重要阵地将进一步聚焦于东亚。

图 5(b)以专利公开国家为纵坐标,对应专利数量为横坐标,直观呈现了 OS TFT 专利技术在各国目标市场的布局情况。数据显示,专利公开

量集中于中国、美国、韩国以及日本这四个国家,其中中国和美国的在专利族覆盖数量上显著领先。这一结果表明,在采用“简单同族合并”统计方法后,中国和美国仍是全球 OS TFT 专利族布局最密集的国家,显示出两国作为技术落地与市场竞争的核心地区,在全球知识产权体系中的关键地位。

综合“申请人国家/地区”与“专利公开国家”两个视角可见,中国不仅在技术产出规模上居于全球首位,同时也是最重要的专利布局目标市场。美国虽在技术来源方面占比不及东亚三国,但其市场开放度使其成为全球创新实体的必争之地。日本和韩国则凭借其在产业链关键环节的深度布局,持续发挥技术引领与高端制造的双重作用。

OS TFT 全球专利的主要申请人如图 6(a)所示。通过对数据库进行检索,共获得相关专利

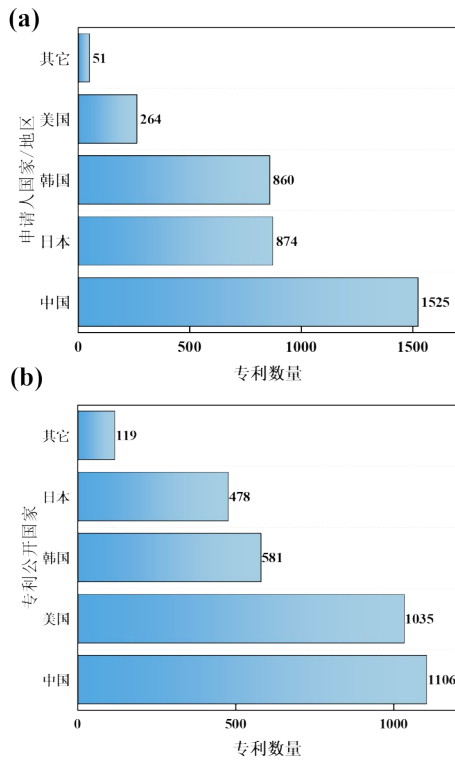


图 5 根据 Incopat 检索,2016-2025 年间全球 OS TFT 专利(a)申请人国家/地区维度专利申请量;(b)专利公开国家维度专利申请量。

Fig. 5 Based on Incopat search 2016 to 2025, global OS TFT patents: (a) number of patent applications by applicant's country/region; (b) number of patent applications by patent publication country.

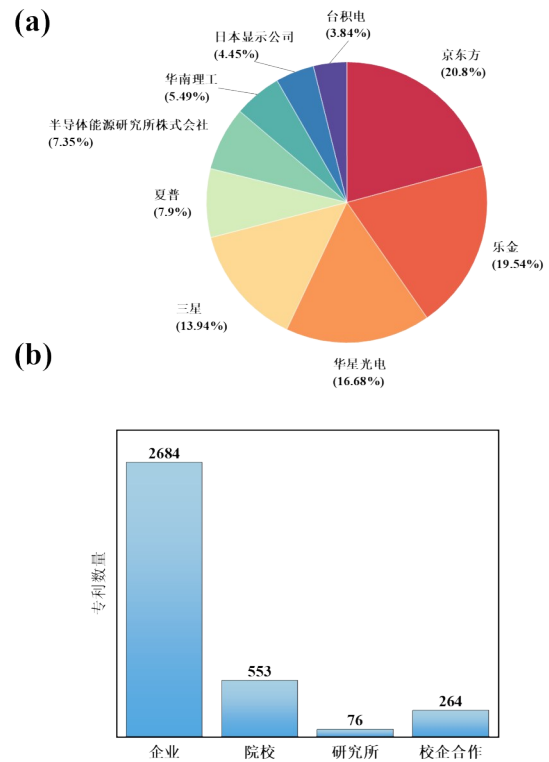


图 6 根据 Incopat 检索,2016—2025 年间全球氧化物薄膜晶体管(a)申请人排名;(b)申请人类型。

Fig. 6 Based on Incopat from 2016 to 2025, global oxide thin-film transistors: (a) top applicants; (b) applicant types.

11 229件,经简单同族合并后得到3 803个独立专利族,其中,申请量排名前9位的申请人共拥有1 822个,约占合并后专利总数的48%,显示出该技术领域的专利集中度相对有限,创新主体分布较为分散。从国家与地区分布来看,中国在全球专利申请中表现突出,其中京东方位居申请量首位。进一步统计显示,在前9为主要申请人中,来自中国的企业及高校共计占比46.81%,韩国企业占33.48%,日本企业则为19.70%,反映出东亚地区在全球OS TFT专利布局中的主导地位,也体现出中国在相关技术研发与知识产权积累方面的显著进展。

OS TFT全球专利的申请人类型分布如图6(b)所示。统计数据显示,企业申请人的专利申请量占比最高,达到总申请量的81.01%,高校申请人占比16.69%,其中华南理工大学为核心贡献主体;研究所占比2.29%,中国科学院微电子所和宁波材料技术与工程研究所是该类别的主要力量。

这一分布格局表明,企业是推动OS TFT技术研发与专利布局的绝对核心主体,凸显出该技术领域具有鲜明的产业化导向特征。与此同时,高校与科研院所虽在专利总量上占比较小,但在前沿探索与基础研究领域发挥着不可或缺的重要作用,尤其是在关键材料体系与器件开发、器件物理机制研究等方向,为技术创新提供了坚实的理论与实验支撑。值得注意的是,企业与高校、科研院所合作产出的联合专利申请量,在总申请量中的占比仅为7.97%。由此可见,现阶段产学研协同创新的深度与广度仍有较大提升空间,未来需要进一步强化以企业为主体、市场为导向的产学研协同机制,加速高校和科研机构的前沿成果向产业应用的转化,助力OS TFT技术实现更大规模的突破与落地。

在OS TFT制造中,沟道层的制备方式直接决定了器件性能。目前主流的沟道制备方式包括磁控溅射、原子层沉积、脉冲激光沉积等。其中,原子层沉积和脉冲激光沉积虽然可以实现原子级厚度控制和完美台阶覆盖率,但在大规模量产中往往面临成本高、产能低等问题;相比之下,磁控溅射凭借其适合大面积均匀成膜、沉积速率高、成本可控且易于大规模量产等优势,成为显

示面板行业中最成熟的、最广泛采用的技术路线。

磁控溅射工艺的核心是氧化物陶瓷靶材,通过高能等离子体轰击靶材,使材料原子化并均匀沉积于基底。需要注意的是,溅射过程通常在室温或较低温度下进行,薄膜往往处于亚稳态,存在较多缺陷和悬键,在成膜后通常需要进行后退火处理,以促进薄膜的结构有序化、降低缺陷态密度、提升载流子迁移率并改善器件稳定性。因此,氧化物靶材作为决定薄膜成分、结构与电学性能的关键源头材料,其纯度、致密度、均匀性等直接影响溅射等离子体的稳定性、薄膜的沉积速率与组分控制,进而决定最终器件的性能。

氧化物薄膜溅射靶材专利全球地域分布如图7所示。基于申请人国家/地区的专利族为143个,基于公开国家的专利族为141个。两者数量高度一致,表明该技术领域的专利布局具有极强的全球化特征,绝大多数技术成果均在主要目标市场寻求保护,显示出优异的技术转化效率与市场覆盖能力。

从申请人国家/地区分布来看,日本、中国、韩国、美国是核心技术创新来源。其中,日本以54.55%的占比居于绝对领先地位,体现出其在靶材基础材料、制备工艺与原始专利方面的深厚积累。中国紧随其后,占比达26.57%。在专利

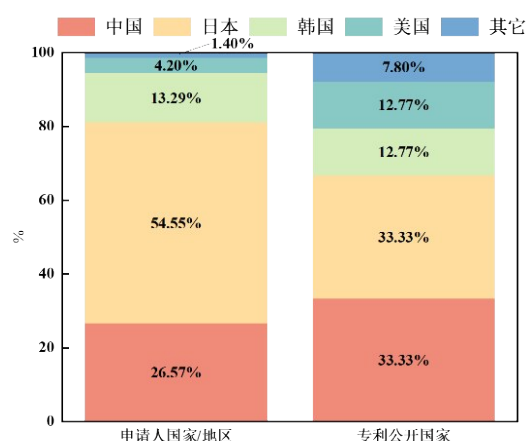


图7 根据Incopat检索,2016—2025年间全球氧化物薄膜溅射靶材专利数量分布。

Fig. 7 Based on Incopat from 2016 to 2025, distribution of global patents on oxide thin-film sputtering targets.

公开国家方面,日本与中国两地公开数量相当,合计约占全球总公开量的三分之二,显示出东亚地区在全球靶材供应链与知识产权布局中的核心地位。综合来看,日本在氧化物靶材领域仍掌握着技术主导权,而中国正凭借着其庞大的市场需求与制造能力,迅速提升其全球影响力。

4 OS TFT 研究与发展中存在的主要问题

4.1 研究主体与成果转化失衡

尽管 OS TFT 领域的科研产出持续活跃,但论文发表与专利申请的主体呈现显著分离,超过 90% 的科研论文来源于高校及科研院所,而企业独立发表的论文占比不足 1%;与之相对,企业在专利申请中占比高达 81.01%。这种学术-产业二元结构表明,高校与科研机构致力于材料、物理机制及新结构的前沿突破,其成果多以论文形式体现;而企业则聚焦于工艺集成、可靠性提升及成本控制等贴近市场的专利布局。二者之间缺乏有效的协同平台 and 对接机制,导致具有潜在价值的实验室成果难以跨越工艺验证的鸿沟。

4.2 专利集中度低,尚未形成技术壁垒

与高度集中的传统硅基半导体产业不同,OS TFT 领域全球专利前九大申请人仅持有 48% 的专利族,技术集中度较低。这种分散状态表明,第一核心材料体系(如 IGZO、ITZO、IGZTO 等)与器件架构还未统一,多种技术路线并行发展,为新兴企业提供了机会;第二碎片化的专利布局与尚未形成的技术壁垒可能导致重复研发,延缓统一技术标准的建立。

4.3 靶材环节存在“卡脖子”风险

日本凭借其在材料科学以及核心专利上的长期积累,掌控该领域超过 54% 的专利,占据主导地位。溅射靶材的成分、纯度与密度直接决定了薄膜的质量与器件性能,是影响产品良率与可靠性的决定性因素。中国的靶材专利申请量低于靶材专利公开量,而日、韩则相反,说明尽管中国在产业链上游关键环节高性能氧化物溅射靶材领域仍然存在明显的对外依赖。而在当前的科技竞争背景下,实现靶材等关键材料的自主研发可控已成为战略必需。

5 OS TFT 研究与发展中面临的挑战

5.1 显示领域

如图 8 所示,显示技术经历了从电子束扫描(CRT)到平板显示器的重大变革,其中 LCD、OLED、Micro-LED 等技术相继成为主流,反映了市场需求对高分辨率、快速响应、低功耗等性能的迫切需求。在各类显示技术中,TFT 作为像素驱动背板的核心组件,其性能直接决定了显示面板的整体表现。OS TFT 凭借其高迁移率、低漏电流和良好的稳定性,已成为现代显示技术的重要组成部分。而在显示技术的演进中,OS TFT 在像素驱动背板中的功能角色由各显示技术的核心需求决定。

LCD 本身不发光,需要背光源配合液晶分子的偏转来控制光线通过,像素需要持续的电压来维持液晶分子的角度,是电压驱动型器件。对 OS TFT 的核心要求在于优异的关态漏电特性($< 10^{-12}A$)以维持像素电压稳定,因此常规应用中迁移率仅需 $> 10 \text{ cm}^2/V \cdot s$ 即可满足需求,然而,在 8K 及以上超高清分辨率、120 Hz 甚至 240 Hz 刷新率等场景下,像素数量激增与帧周期缩短导致充电时间极度压缩,为此,高端 LCD 必须依赖高迁移率 TFT($> 40 \text{ cm}^2/V \cdot s$)以提升响应速度,确保在极短时间内完成海量像素的精准写入。

OLED 是电流驱动型器件,其亮度直接取决于流经像素的电流大小,因此 OS TFT 必须具备高迁移率,以输出足够电流。通常要求迁移率 $> 20 \text{ cm}^2/V \cdot s$,普通非晶 IGZO TFT 的迁移率仅能满足中低端或大尺寸 OLED 的需求。随着高端手机与平板追求更高亮度以及更大开口率,迁移率需进一步提升至 $> 30 \text{ cm}^2/V \cdot s$,以在更短时间内完成充电,降低功耗并提升寿命。而在折叠屏与高刷电竞等场景中,TFT 必须具备更强的瞬态响应能力,迁移率的要求攀升至 $> 40 \text{ cm}^2/V \cdot s$ 。此外,OLED 使用的是有机材料,在高电流下发热容易导致效率衰减,如果注入电流过大,会迅速老化甚至烧毁,因此需要解决散热问题,才能实现更高性能。

Micro-LED 是基于无机材料的微米级自发

光技术,需要通过“巨量转移”将LED芯片从生长基板转移到驱动背板上,需要高电流驱动,TFT必须具备高迁移率($> 30 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)。在中等分辨率与穿戴设备中,迁移率需稳定在 $> 40 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,以应对微小像素带来的巨大驱动压力。作为无机材料的自发光器件,可以承受远高于OLED的电流密度以激发高亮度($> 5\,000 \text{ nits}$),可应用于AR/VR等像素密度(PPI $> 3\,000$)极高、像素尺寸极小的近眼场合中,但对驱动电路的精度与响应速度要求极为苛刻。在高端AR/VR与车载HUD等应用中,迁移率需突破 $> 60 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,才能提供足够的驱动电流密度。

需明确的是,高端显示并非由单一技术路线主导,而是各类显示技术实现性能极致化的综合体现。LCD、OLED还是Micro-LED等技术路线,只要在亮度、对比度、分辨率、刷新率、响应速度与长期工作稳定性等关键指标上达到极致水平,均可跻身高端显示范畴。例如,如图8所示,LCD技术结合Mini-LED背光源和量子点色彩增强技术后,进一步巩固了其市场竞争力^[12]。Mini-LED背光源的应用显著提升了LCD面板的亮度和对比度,同时实现了更精细的局部调光控制,

从而在高端市场中赢得了青睐。量子点色彩增强技术的引入使得LCD面板的色彩表现达到了前所未有的高度,其色域覆盖率和色彩精准性均接近甚至超越了OLED显示器的水平^[13]。

尽管不同显示技术对OS TFT迁移率的要求存在差异,但高性能化面临着一个根本性的矛盾:高迁移率与高稳定性之间的博弈。这一矛盾的物理根源在于氧空位(V_O)缺陷的双刃剑作用:一方面,适量的氧空位作为施主能有效提供载流子,是实现高迁移率、满足高速驱动需求的关键;另一方面,氧空位属于不稳定缺陷态,在电场、光照或热应力作用下易引发阈值电压漂移、关态电流增大与器件退化,导致性能优化难度显著提升。

LCD为电压驱动型器件,虽然对电流稳定性要求不如OLED高,但是LCD模组内部有强大的背光源,在实际使用中,不可避免会受到来自背光模组的杂散光照射。对于OS TFT,光照会激发 V_O 产生光生载流子,导致器件在非工作状态下产生光生漏电流,直接表现为屏幕出现残影或对比度下降。因此,LCD应提高负偏压光照稳定性(NBIS)。



图8 显示行业驱动TFT及发光技术的发展历程

Fig. 8 Development timeline of driving TFTs and light-emitting technologies in the display industry

OLED是电流驱动自发光器件,TFT长时间处于高电场工作状态,且OLED自发热严重,OS TFT不仅要承受电压应力,还要承受高温。由于OLED亮度与电流呈指数关系,微小的阈值漂移都会导致亮度剧烈变化,表现为出现色斑或烧屏。所以,OLED应提高偏压温度稳定性

(BTS)。Micro-LED对于OS TFT的挑战主要是在制造工艺阶段,由于Micro-LED芯片通常是在高温下外延生长,而传统玻璃基板与低温OS TFT工艺在此温度下会软化、变形或性能崩塌。若想要实现单片集成,即在TFT背板上直接生长,OS TFT器件必须具备超高热稳定性。并且

Micro-LED 常用于户外大屏、车载显示或可穿戴设备,面临剧烈的温度变化和湿度考验,因此应用于 Micro-LED 的 OS TFT 还需要具备高环境应力稳定性。

为突破单一材料的性能极限并实现高画质和低功耗的平衡,催生了 LTPO 技术。该技术是在同一背板上集成 P 型 LTPS 与 N 型氧化物(如 IGZO),构建面板级的类 CMOS 逻辑电路。该架构中,高性能 P 型 LTPS(空穴迁移率在 $50\sim 100\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)担任驱动管,确保充足且稳定的电流输出,N 型氧化物则凭借其超低关态电流,担任开关管。P 型和 N 型晶体管互补工作的特性,使得动态画面外的无效功耗大幅降低,这是实现自适应刷新率($1\sim 120\text{ Hz}$)的电路基础。虽然全氧化物逻辑电路方案可避免 LTPS 激光晶化等复杂步骤,工艺更简单,但 P 型氧化物半导体(如 $\text{SnO}^{[14]}$ 、 $\text{Cu}_2\text{O}^{[15]}$ 、 $\text{NiO}_x^{[16]}$ 等)空穴迁移率极低,与 N 型氧化物性能严重不匹配,远未达到实用要求。

综上,OS TFT 在高端显示的突破路径包括:第一,通过材料组分优化(如引入稀土元素^[17-18]、Sn 元素^[19-21])和工艺改进(如后退火优化、高密等离子体溅射^[22-23]、金属诱导^[20,24-25]等)继续提升 N 型氧化物的迁移率与稳定性;第二,优化 LTPO 混合技术的激光退火工艺,控制热预算以避免氧化物薄膜损伤,改善两种材料界面态;第三,开发新型 P 型氧化物材料体系,解决全氧化物逻辑电路的性能瓶颈。

5.2 传感领域

5.2.1 化学传感器

OS TFT 化学传感器依托氧化物半导体表面与目标化学物质的相互作用调控载流子传输,涵盖气体吸附-脱附效应及溶液体系中离子、质子等的界面作用。

气体检测中,还原性气体(如 $\text{H}_2^{[26]}$)向半导体释放电子,氧化性气体(如 $\text{NO}_2^{[27-29]}$)从半导体表面捕获电子,两类作用均改变材料内部氧空位浓度,通过源漏电流变化,完成气体识别与浓度检测。目前,基于 IGZO 的 OS TFT 气体传感器的 NO_2 的灵敏度可达 ppb 级^[30]。然而,气体选择性不足是核心痛点:相关研究表明,当相对湿度上升时,传感器的响应值与基线电阻均显著下降,

水分子与目标气体竞争吸附位点,加剧多组分气体环境下的识别难度,影响低浓度场景识别精度^[31]。

pH 传感基于氢离子(H^+)在半导体/电解液界面吸附对表面电势的重构,调制沟道载流子浓度,实现溶液 pH 值检测^[32-33]。但溶液中其他离子(如 Na^+ 、 Cl^-)易干扰 H^+ 的特异性吸附,在强酸强碱环境还可能导致氧化物表面腐蚀或钝化。

基于 OS TFT 传感器受限于氧空位不稳定性,制约其长期应用。并且,现有器件多为分立结构,缺乏与信号处理电路的单片集成能力。此外,溶液相检测还需解决电解液与器件的兼容性封装问题。

5.2.2 生物传感器

OS TFT 生物传感器以无标记检测为核心优势,将生物识别元件(抗体、适配体、酶等)固定于氧化物半导体表面,当目标生物分子(DNA、蛋白质、葡萄糖等)与识别元件特异性结合时,引发表面电荷分布重构,调控 TFT 沟道载流子传输,实现高灵敏度检测。然而,生物相容性封装与特异性干扰是主要瓶颈:复杂生物基(如血液、血清)中非目标蛋白的吸附会导致假阳性信号;器件在生理环境中的长期稳定性不足,也是制约其从实验室向临床转化的重要原因。为此,分离式扩展栅结构被提出,通过物理隔离传感界面与 TFT 器件,有效保护了半导体沟道免受生理环境的退化影响^[34],然而,物理分离带来的互连寄生效应及对外部参比电极的依赖,制约了其响应速度与高密度集成能力。

5.2.3 光电传感器

OS TFT 光电传感器基于氧化物半导体的光电导效应工作:光子能量激发价带电子跃迁至导带,产生电子-空穴对,使沟道载流子浓度显著增加,通过源漏电流变化完成光信号的捕获、转化与放大,兼具检测与信号放大功能。主流体系包括 IGZO^[27](带隙约 $3.0\sim 3.5\text{ eV}$,紫外至可见光边缘)、 $\text{ZnO}^{[35]}$ (带隙约 3.3 eV ,紫外敏感)、 $\text{Ga}_2\text{O}_3^{[36]}$ (带隙约 $4.5\sim 4.9\text{ eV}$,日盲紫外探测)等。此外,还有一部分工作集中于将窄带隙的材料与氧化物半导体复合来拓展器件的响应光谱,从紫外到可见光,甚至到近红外^[37]。该领域的核心技术瓶颈为响应性能与稳定性的失衡:光照和

偏压应力下,氧空位电离态变化导致持续光电导(PPC)效应,使响应时间延长、暗电流增大;长期光照还会引起不可逆的性能退化。这与显示领域的高迁移率-高稳定性博弈本质相同,根源在于氧化物半导体的缺陷特性。

5.3 存储与电路领域

5.3.1 逻辑电路

全氧化物逻辑电路核心依托P型与N型OS TFT的互补工作特性,基本电路包括反相器、NAND/NOR门和环形振荡器^[38],关键指标为噪声容限、传输延迟和功耗延迟积。目前,高性能N型OS TFT已较成熟,但P型OS TFT性能严重不足,导致反相器增益低、噪声容限差,难以构建复杂逻辑电路。这一瓶颈同样制约类脑芯片等高端应用的发展。

从硬件实现层面看,P型与N型的工艺温度不兼容,同时对氧分压、气氛环境、钝化层工艺的要求存在差异;此外,P型氧化物多为多价态体系,薄膜均匀性与可重复性较差,难以与N型非晶氧化物优良的大面积成膜特性相匹配,进一步加剧了全氧化物互补电路的工艺集成难度。

5.3.2 存储领域

OS TFT在存储领域的应用聚焦于DRAM架构创新,核心在于解决传统1T1C-DRAM的微缩瓶颈。传统DRAM采用1T1C架构——即1个晶体管及1个存储电容——随制程微缩($< 20\text{ nm}$)面临存储电容难以缩小、漏电与信号干扰加剧等问题,2T0C架构通过取消存储电容、依托两个TFT的沟道电荷存储实现数据存储,而垂直沟道新形态可实现超高密度存储,将单元面积缩小至 $4F^2$ (F 为最小特征尺寸),显著提升集成密度。中科院微电子所采用自对准单步工艺,避免光刻对准偏差,实现 $4F^2$ 超小单元面积以及4比特存储^[39]。然而,高温环境下,IGZO沟道的氧空位易发生热激活迁移,导致沟道缺陷密度增加,关态电流随温度升高呈指数增长,会明显缩短电荷保持时间^[40]。此外,氧空位不稳定性导致阈值电压漂移,引起存储电荷泄漏,长期可靠性存疑。因此,如何提高OS TFT的正偏压高温($\geq 120\text{ }^\circ\text{C}$)稳定性是该领域亟待解决的关键问题。

5.4 类脑领域

神经形态计算的核心在于模仿大脑的信息

处理范式,硬件实现主要围绕两个紧密关联的目标展开:一是仿生感知单元,直接处理现实世界的多模态信号;二是开发存算一体的突触阵列,突破冯·诺依曼架构中存储与计算分离所带来的“内存墙”瓶颈,实现高效计算。根据栅介质和调控物理机制的不同,OS TFT类脑器件可分为基于传统栅控型与离子栅控型两类。

传统栅控型器件采用成熟的固态栅介质(如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 HfO_2),通过纯电子过程实现沟道电导的非易失性调制,核心优势是与主流的半导体制造工艺高度兼容。离子栅控型器件以离子液体、固态质子导体等电解质代替固态栅介质^[41],工作机制是电化学过程:栅压驱动电解质离子迁移并在界面形成超大双电层电容,同时离子可能嵌入沟道材料,引起电化学掺杂,从而动态、可逆地调控电导。其优势在于允许器件在 $< 1\text{ V}$ 的超低电压下工作,单次突触事件能耗可低至飞焦(fJ)级,离子迁移的弛豫特性也能更自然地模拟生物突触的各种短时/长时可塑性。

5.4.1 感官模拟

该路径旨在模拟生物感官系统,将物理信号的感知、初步处理与记忆功能集成于单一器件或者微型回路中。

光电感知领域,利用IGZO^[42]、 WO_3 ^[43]、 Ga_2O_3 ^[44]、ITZO^[45]等材料的光电特性,光生载流子可作为栅极等效信号,直接调控电导,实现光脉冲与突触行为的融合,为视觉传感器提供基础。仿生触觉方面,OS TFT可与多种柔性传感器(压电^[10]、摩擦电、温敏)阵列集成,将外界不同的物理刺激转换为电信号,利用OS TFT的突触晶体管特性,直接将传感器信号转换成突触后电流。采用聚乙烯质子导体作为栅介质的氧化物突触晶体管,在实现 $\sim 1.16\text{ fJ}$ 超低能耗的同时,兼具生物相容性与环境友好性,为柔性生物电子接口提供了新方案^[41]。

5.4.2 类脑计算

类脑计算目标是突破“内存墙”瓶颈,实现计算效率的质变,核心是开发能够实现信息存储与处理功能的仿生突触器件。OS TFT在类脑计算领域主要通过四种突触器件实现存算一体功能,分别是:双晶体管结构器件(2T器件)^[46]、铁电突触晶体管^[47]、光电突触晶体管^[48]、浮栅突触

晶体管^[49]。

2T 器件是 OS TFT 最基础的突触实现方案,有一个写入晶体管和一个读取晶体管组成,写入晶体管负责调控电荷注入量,读取晶体管则通过栅极电容上的电荷量改变阈值电压,实现突触权重的连续调节。铁电突触晶体管通过铁电栅介质的极化翻转直接调制沟道电导。光电突触晶体管结合了光生载流子捕获和栅极电压调控两种机制:光照强度和持续时间决定了光生载流子的密度,而栅极电压则调控这些载流子的捕获/释放速率。浮栅突触晶体管的核心在于多了一个“浮栅”的结构,浮栅中存储的电荷量直接对应突触的权重,通过控制注入电荷的多少,可以实现多态存储,从而模拟生物突触权重的连续变化,并可以做到断电后权重不丢失。

尽管 OS TFT 突触器件在类脑计算领域展现出巨大潜力,但在迈向大规模商业化和实际应用时,良率和集成是绕不开的挑战。在 OS TFT 大规模阵列中,器件性能的微小差异将被急剧放大,严重劣化神经网络的计算精度。尤其对于光电突触晶体管和浮栅突触晶体管,需要精确控制陷阱态密度,要实现每一片芯片上的缺陷密度分布的高度一致性,面临着严苛挑战。而像 2T 器件这种结构,占据面积大、连线复杂,在构建大规模脉冲神经网络时,如何设计高效的互联架构以

避免引入新的互连墙问题,已成为关键瓶颈。

6 结 论

本文通过对 2016-2025 年间 OS TFT 领域的科研论文与专利数据展开系统分析,明确该技术正处于从显示驱动向多功能系统集成跨越的关键阶段。研究显示,全球 OS TFT 研发高度集聚于东亚地区,中国以 37.3% 的论文发文占比、全球首位的专利申请量位居世界前列,但行业发展仍面临显著结构性挑战:90% 以上论文源于高校及科研院所,而 81.01% 的专利由企业持有,产学研转化严重失衡;全球专利前九大申请人仅持有 48% 的专利族,技术集中度低且未形成核心壁垒;上游关键溅射靶材专利中日本占比达 54.55%,中国产业链安全存在潜在风险。未来 OS TFT 的发展需从三方面重点突破,一是构建以企业为主体、市场为导向的产学研协同创新体系,加速实验室成果向产业应用的转化;二是攻克溅射靶材等关键材料与核心工艺技术,实现上游环节自主可控,降低产业链对外依赖;三是深化 OS TFT 在传感、存储、类脑计算等新兴领域的集成应用研究,充分释放其在构建后摩尔时代低功耗、大面积集成电子系统中的技术价值,推动其从单一显示驱动器件向多功能集成化平台升级。

参 考 文 献:

- [1] TORSI L, DODABALAPUR A, SABBATINI L, *et al.* Multi-parameter gas sensors based on organic thin-film-transistors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2000, 67(3): 312-316.
- [2] TIWARI B, SHRIVASTAVA S, BAHUBALINDRUNI P G. Smart Digital Capacitance Sensing System Using IGZO TFTs on Flexible Substrate[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(1): 425-429.
- [3] YANG X Y, CAIRANG L, YIN Y, *et al.* Mechanistic insight into unusual humidity resistance enhancement in metal oxide semiconductor hydrogen sensors via crystalline ceria decoration[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2026, 447: 138781.
- [4] CHEN H T, HSIEH S I, LIN C J, *et al.* Embedded TFT nand-Type Nonvolatile Memory in Panel[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2007, 28(6): 499-501
- [5] YAN S, CONG Z, LU N, *et al.* Recent progress in InGaZnO FETs for high-density 2T0C DRAM applications[J]. *Science China Information Sciences*, 2023, 66(10): 200404.
- [6] HONG R, LIU H, XU X, *et al.* Symmetrical Ambipolar Transport in SnO Thin-Film Transistors Enabled by Dopant-Induced Preferential Crystal Orientation toward Complementary Logic [J]. *Nano Letters*, 2025, 25(43): 15698-15704.

- [7] YANG W, KAN H, SHEN G, *et al.* A Network Intrusion Detection System with Broadband WO_{3-x}/WO_{3-x}-Ag/WO_{3-x} Optoelectronic Memristor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(23): 2312885.
- [8] ZHANG J, CHENG C, ZHANG H, *et al.* Dual-Parameter and High-Density Sensor Array Based on a-IGZO Thin Film Transistors[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, 45(7): 1301-1304.
- [9] CANTLEY K D, SUBRAMANIAM A, STIEGLER H J, *et al.* Hebbian Learning in Spiking Neural Networks With Nanocrystalline Silicon TFTs and Memristive Synapses[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2011, 10(5): 1066-1073.
- [10] ARTEM B S, OLGA L A, MARIA V S, *et al.* Industrial applications of AR headsets: a review of the devices and experience[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6: 23.
- [11] XIONG J, WU ST. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications[J]. *eLight*, 2021, 1: 3.
- [12] 吴怡然, 孙勉, 曹可魁, 等. 液晶显示材料标准化发展建议[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(2): 181-187.
WU Y R, SUN M, CAO K W, *et al.* Suggestions on the development of standardization of liquid crystal display materials[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(2): 181-187. (in Chinese)
- [13] LIU C, HUANG W T, LIU R S. Stable glass-protected CsPbX₃ (X = Cl, Br, and I) perovskite quantum dots and their applications in backlight LED[J]. *Progress in Materials Science*, 2024, 143: 101243.
- [14] KIM H M, CHOI S H, JEONG H J, *et al.* Highly Dense and Stable p-Type Thin-Film Transistor Based on Atomic Layer Deposition SnO Fabricated by Two-Step Crystallization[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(26): 30818-30825.
- [15] BAE J H, LEE J H, PARK S P, *et al.* Gallium Doping Effects for Improving Switching Performance of p-Type Copper(I) Oxide Thin-Film Transistors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(34): 38350-38356.
- [16] Solution Combustion Synthesis: Low-Temperature Processing for p-Type Cu: NiO Thin Films for Transparent Electronics[J]. *Advance Materials*, 2017, 29(34): 1701599.
- [17] 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 Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(1): 152-155.
- [18] 黄湘兰, 彭俊彪. 稀土掺杂金属氧化物薄膜晶体管研究进展[J]. *发光学报*, 2025, 46(03): 436-451.
HUANG X L, PENG J B. Research Progress on Rare Earth Doped Metal Oxide Thin Film Transistors[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(03): 436-451. (in Chinese)
- [19] 初学峰, 胡小军, 张祺, 等. 氧化锌锡薄膜晶体管的制备与性能研究[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(1): 40-47.
CHU X F, HU X J, ZHANG Q, *et al.* Performances and preparation of zinc-tin oxide thin-film transistors[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(1): 40-47. (in Chinese)
- [20] WANG X, LIANG L, ZHANG H, *et al.* Huge mobility enhancement of InSnZnO thin-film transistors via Al-induced microstructure regularization[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(21): 212102.
- [21] ZHA W, FANG S, GAO X, *et al.* Tin Doping Enhanced Carrier Mobility and Stability in Amorphous IGZTO Thin Film Transistors[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2025, 54(9): 7702-7708.
- [22] CHO S I, KO J B, LEE S H, *et al.* Remarkably stable high mobility self-aligned oxide TFT by investigating the effect of oxygen plasma time during PEALD of SiO₂ gate insulator[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 893: 162308.
- [23] KIM S H, KIM Y S, HWANG T, *et al.* Reliability Improvement of High Mobility Oxide TFTs Based on Hydrogen-Resistant PEALD Al₂O₃ Gate Insulators Grown with N₂O Plasma [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(9): 14168-14178
- [24] WANG X L, CHENG Y T, WU H F, *et al.* Microstructure Control Over Low-Indium Oxide Semiconductors to Obtain Synchronous Optimization of Their TFT Mobility and Stability[J]. *Small*, 2025, 22(11): e11840.
- [25] CHEN Z, FU Z, JIN T, *et al.* High-crystallinity and enhanced mobility in In₂O₃ thin-film transistors via metal-induced method[J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(3): 033504.
- [26] KUMARESAN Y, LEE R, LIM N, *et al.* Extremely Flexible Indium-Gallium-Zinc Oxide (IGZO) Based Electronic Devices Placed on an Ultrathin Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Substrate [J]. *Advanced*

- Electronic Materials*, 2018, 4(7): 1800167.
- [27] JEONG H S, PARK M J, KWON S H, *et al.* Highly sensitive and selective room-temperature NO₂ gas-sensing characteristics of SnOX-based p-type thin-film transistor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 288: 625-633.
- [28] VIJJAPU M T, SURYA S, ZALTE M, *et al.* Towards a low cost fully integrated IGZO TFT NO₂ detection and quantification: A solution-processed approach[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 331: 129450.
- [29] YEOM G, KWON D, SHIN W, *et al.* Fast-response/recovery In₂O₃ thin-film transistor-type NO₂ gas sensor with floating-gate at low temperature[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 394: 134477.
- [30] VIJJAPU M T, SURYA S G, YUVARAJA S, *et al.* Fully Integrated Indium Gallium Zinc Oxide NO₂ Gas Detector[J]. *ACS Sensors*, 2020, 5(4): 984-993.
- [31] YANG X Y, CAIRANG L, YIN Y, *et al.* Mechanistic insight into unusual humidity resistance enhancement in metal oxide semiconductor hydrogen sensors via crystalline ceria decoration [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2026, 447: 138781.
- [32] WITKOWSKI F, SZYMANIEC M, BRÁŇKO F, *et al.* Fabrication and Optimization of Chemically Processed Zn-Sn-O TFTs with ITO Electrodes for pH Sensing[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2026, 55(1): 197-208.
- [33] KIM Y gyu, TAK Y J, KIM H J, *et al.* Facile fabrication of wire-type indium gallium zinc oxide thin-film transistors applicable to ultrasensitive flexible sensors[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5546.
- [34] LIANG L, ZHANG S, WU W, *et al.* Extended-gate-type IGZO electric-double-layer TFT immunosensor with high sensitivity and low operation voltage[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(17): 173501.
- [35] CHEN L, CUI J, SHENG X, *et al.* High-Performance Photoelectronic Sensor Using Mesostructured ZnO Nanowires[J]. *ACS Sensors*, 2017, 2(11): 1567-1572.
- [36] PEI Y, LIANG L, WANG X, *et al.* Low-Temperature-Crystallized Ga₂O₃ Thin Films and Their TFT-Type Solar-Blind Photodetectors[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2022, 13(31): 7243-7251.
- [37] CHOI H T, KANG J H, AHN J, *et al.* Zero-Dimensional PbS Quantum Dot - InGaZnO Film Heterostructure for Short-Wave Infrared Flat-Panel Imager[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(8): 1932-1941.
- [38] HAN Y, SEO J, LEE D H, *et al.* IGZO-Based Electronic Device Application: Advancements in Gas Sensor, Logic Circuit, Biosensor, Neuromorphic Device, and Photodetector Technologies [J]. *Micromachines*, 2025, 16(2).
- [39] LIAO F, ZHU Z, LI Z, *et al.* High-density three-dimensional integration of dynamic random-access memory using vertical dual-gate IGZO TFTs[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1).
- [40] LEE J M, LEE S Y, BYUN S J, *et al.* A Vertically Stackable Split-Gate Amorphous Oxide Semiconductor 2T0C DRAM for Reducing Capacitive Coupling and Sneak-Path Current[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2025, e02404.
- [41] GUO L Q, HAN H, ZHU L Q, *et al.* Oxide Neuromorphic Transistors Gated by Polyvinyl Alcohol Solid Electrolytes with Ultralow Power Consumption[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(31): 28352-28358.
- [42] DUAN H, LIANG L, WU Z, *et al.* IGZO/CsPbBr₃ -Nanoparticles/IGZO Neuromorphic Phototransistors and Their Optoelectronic Coupling Applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(25): 30165-30173.
- [43] YANG W, KAN H, SHEN G, *et al.* A Network Intrusion Detection System with Broadband WO_{3-x}/WO_{3-x}-Ag/WO_{3-x} Optoelectronic Memristor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(23): 2312885.
- [44] SA, Z., SONG K., MENG Y. *et al.* Induced fit growth of Ga-based semiconductor thin films for brain-inspired electronics and optoelectronics[J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15, 103.
- [45] GAO Z, JU X, ZHANG H, *et al.* InP Quantum Dots Tailored Oxide Thin Film Phototransistor for Bioinspired Visual Adaptation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(52): 2305959.
- [46] PARK S, JEON G, SEONG S, *et al.* 2T Neuromorphic Device based on oxide semiconductor with High Linearity and Symmetry for High-Precision Training[C]. *IEEE 2022 19th ISOC*, 2022.

- [47] YANG P, XU H, LUO X, *et al.* Tailoring Dynamic Synaptic Plasticity in FeTFT Optoelectronic Synapse for Associative Learning[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2024, 11(7): 2400732.
- [48] LIANG K, WANG R, REN H H, *et al.* Printable Coffee-Ring Structures for Highly Uniform All-Oxide Optoelectronic Synaptic Transistors[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(24): 2201754.
- [49] PARK J H, YUN Y M, BAE S Y, *et al.* High-Performance Synapse Arrays for Neuromorphic Computing via Floating Gate-Engineered IGZO Synaptic Transistors[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(21): 2500568.

作者简介:



熊雨婷,女,硕士研究生,2024年于山东大学获得学士学位,主要从事于氧化物半导体薄膜晶体管材料与器件的研究。E-mail: xiongyuting@nimte.ac.cn



梁凌燕,女,博士,研究员,2008年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事于非晶和纳米晶氧化物半导体及其在电子学/光电子学/生物电子学中的器件应用研究。E-mail: lly@nimte.ac.cn