

新一代铁电薄膜与器件的发展机遇和挑战

李 千, 李敬锋, 南策文

(清华大学材料学院, 新型陶瓷材料全国重点实验室, 北京 100084)

关键词: 铁电薄膜; 信息技术; 集成电路; 存储器; 电光器件

中图分类号: TB321 **文献标志码:** A **文章编号:** 0454-5648(2025)08-2419-02

当前, 新一代人工智能、无线通信、类脑计算与感知等前沿信息技术领域快速发展, 持续推动着全球经济社会的智能化变革进程。铁电薄膜凭借其优异的介电、压电、电光及多铁等丰富的功能特性, 在集成电子与光电子器件中发挥着不可替代的作用, 已成为支撑新一代信息技术发展的关键战略材料。从智能终端的存储芯片到数据中心的高速光电接口, 从神经形态计算的仿生器件到感存算一体的芯片架构, 新型铁电薄膜均展现出广阔的应用前景。然而, 该领域仍然面临诸多重大科学问题与技术瓶颈亟待突破。

在新型氧化铪(HfO_2)基铁电薄膜的研发方面, 尽管学界已通过掺杂、应变工程、氧空位调控及界面设计等手段, 成功诱导并稳定了氧化铪的亚稳铁电相, 但其铁电性的物理起源与相稳定机制的理论框架仍未完全建立。值得关注的是, 氧化铪基薄膜的铁电相具有亚稳特性且矫顽场较高, 这一特性虽有助于提升器件性能, 但也对服役稳定性与耐久性提出了挑战。其高矫顽场的本质成因、铁电畴形态演化规律、翻转动力学机制、疲劳失效机理及优化策略, 仍是当前研究的核心问题。此外, 如何在晶圆级尺寸下实现纳米尺度晶粒的性能均匀性调控? 如何通过材料设计与器件结构创新, 开发出兼具综合性能优异、可大规模集成特性的高密度存储、超低功耗逻辑、神经形态计算以及感存算一体功能器件? 这些问题亟待突破。

另一类重要的研究对象是无机钙钛矿体系铁电薄膜, 其在规模化器件应用中面临与硅基 CMOS 工艺兼容的关键挑战。如何基于分子束外延、脉冲激

光沉积、溅射等先进技术, 突破大尺寸硅晶圆衬底上的薄膜外延工艺瓶颈? 作为新一代集成光子器件的潜在材料平台, 目前钛酸钡(BaTiO_3)薄膜中普遍存在电光性能劣化现象, 其深层机制原因有待厘清; 进一步, 通过材料设计与工艺控制的协同优化, 能否同步提升其电光系数与居里温度? 更具前沿探索性的是, 如何设计制备具有新颖拓扑畴结构的铁电薄膜、超晶格, 并利用其涌现的超常规介电、电光及非线性光学特性, 开发高效率、多维度、可重构的光场调控器件? 这些问题的解答, 将有力推动无机钙钛矿铁电薄膜从实验室研究向实际应用的跨越。

为系统应对上述挑战, 促进铁电薄膜与信息器件的交叉融合创新, 深化我国在新一代信息技术领域的材料研究与创新应用, 在中国科学技术协会指导下, 中国硅酸盐学会联合相关单位, 于 2025 年 7 月 27 日在北京第二十七届中国科协年期间, 成功举办了“面向新一代信息技术应用的铁电薄膜与器件”专题论坛。本次论坛聚焦铁电薄膜的材料设计与模拟、规模化制备技术、先进表征手段及其在信息领域的器件应用等核心议题, 汇聚了包括 2 位中国科学院院士在内的 70 余位来自高校、科研机构及知名企业的专家学者, 通过十余场主旨报告与平行讨论环节, 展开了深度的学术交流与技术研讨。与会专家围绕各议题达成重要发展共识, 为中国信息安全战略保障与信息产业升级提供了材料创新的路径与策略。

为进一步传播本次论坛的学术成果, 促进铁电薄膜与器件领域的学术交流与合作, 《硅酸盐学报》特别策划并出版了“面向新一代信息技术应用的铁

电薄膜与器件专题”。本专题收录了 3 篇综述和 7 篇研究论文，内容涵盖 HfO_2 基铁电薄膜铁电性能调控、 BaTiO_3 电光薄膜制备工艺、 BiFeO_3 薄膜畴结构与光学性质表征、铁电畴壁存储器等方面的研究成果，系统呈现了铁电薄膜领域的国内外研究现状、前沿创新成果及未来发展趋势，为领域内科研工作

者提供了重要的参考资料与研究启示。

最后，衷心感谢各位作者、审稿专家及编辑团队对本专题的辛勤付出。期待本专题内容能够为中国铁电薄膜与信息器件研究领域的未来发展提供有益借鉴，共同推动我国在该领域的基础研究、技术突破与产业升级。

Opportunities and Challenges of Next-Generation Ferroelectric Thin Films and Devices

LI Qian, LI Jingfeng, NAN Cewen

(State Key Lab of New Ceramics and Fine Processing, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Keywords: ferroelectric thin film; information technology; integrated circuit; memory; electro-optic device

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



李千，清华大学材料学院副教授、博士生导师，入选教育部 U40 计划、中组部青年千人以及北京市基金委杰青。主要研究方向为铁电薄膜材料与集成光子器件。目前已在 *Nature*、*Nature Physics*、*Nature Communications* 等期刊上发表论文 140 余篇，授权发明专利 2 项。主持国家自然科学基金区域联合重点项目、原创探索计划项目、面上项目等科研项目，获得 2025 年中国电介质物理优秀青年奖（A 类）等荣誉奖励。兼任中国硅酸盐学会微纳技术分会副秘书长、中国材料研究学会材料分析表征分会副秘书长，以及 *Journal of Materiomics*、功能材料等期刊（青年）编委。



李敬锋，清华大学材料学院教授、日本工程院外籍院士、日本东北大学客座教授，兼任中国硅酸盐学会副理事长、*Journal of Materiomics* 主编、《硅酸盐学报》副主编、美国陶瓷学会会士、国际热电学会理事。主要研究铁电压电与热电材料及其微加工技术，至今在 *Science*、*Nature Materials* 等期刊上共发表 SCI 论文 590 余篇，被引约 39000 余次（H 因子 102），入选全球高被引学者，获授权专利 42 项，出版专著《Leadfree Piezoelectric Materials》（Wiley 出版社）和《热电材料及其制备技术》（科学出版社）等 4 部。获 IEEE 铁电学成就奖、北京市自然科学奖、建筑材料科学技术奖等奖项，并获国家基金委杰出青年基金和教育部长江学者特聘教授奖励计划资助。