DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.09.017

全球关键电子材料应用进展与我国未来发展方向

张立群[1, 2*]，李祥高[3]

（1. 西安交通大学化学工程与技术学院，西安 710049；2. 华南理工大学材料科学与工程学院，广州 510641；3. 天津大学化工学院，天津 300072）

摘要：电子材料是用于制造电子器件、集成电路、光电子设备、其他电子系统的关键功能材料，在半导体、显示技术、通信、能源存储与转换等领域具有广泛应用，也成为人工智能、物联网、先进传感、量子计算等前沿科技领域发展的关键支撑；关键电子材料技术的创新发展直接影响电子产业链的技术进步和市场竞争力，在国际科技竞争趋于激烈的背景下已经成为支撑国家战略性新兴产业发展的核心要素。本文全面梳理了全球关键电子材料应用进展情况，涉及集成电路、显示技术、光伏新能源、高端电容 / 电阻、通信技术等产业，涵盖半导体硅材料、电子特气、光刻胶、湿电子化学品、化学机械抛光材料、第三代半导体材料，液晶显示用材料、有机发光二极管材料、激光显示材料、微发光二极管材料、次毫米发光二极管材料，晶硅太阳能电池材料、钙钛矿太阳能电池材料、有机太阳能电池材料，介电陶瓷材料、聚合物薄膜材料、铝箔材料、导电聚合物材料、电极浆料，光导纤维材料、压电晶体材料等细分类型。研究认为，智能移动设备、智能穿戴、物联网等新兴技术快速发展，对电子材料的性能、可靠性、精度等提出了更高要求；我国高端电子材料与国际领先水平相比仍有差距，表现为高端材料技术自主性不足、国际影响力与标准制定权较弱等；未来需围绕电子信息行业高端化、绿色化、自主化、智能化的发展方向，攻关集成电路、新型显示、高端电容 / 电阻、未来通信行业的高端电子材料并逐步实现国产化替代，推动我国关键电子材料技术与产业高质量发展。

关键词：电子材料；半导体；显示技术；光伏；电子元器件；发展态势

中图分类号：TB3　**文献标识码：**A

Key Electronic Materials: Global Application Progress and Future Development Directions in China

Zhang Liqun[1, 2*], Li Xianggao[3]

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Electronic materials are key functional materials used in the manufacture of electronic devices, integrated circuits, optoelectronic devices, and other electronic systems. They are widely applied in fields such as semiconductors, displays, communications, and energy storage and conversion, and have become a critical support for the development of frontier technologies such as artificial intelligence,

收稿日期：2024-09-12；**修回日期：**2025-02-07

通讯作者：*张立群，西安交通大学化学工程与技术学院教授，中国工程院院士，研究方向为橡胶材料科学与工程、聚合物纳米复合材料、生物基高分子材料与聚合物加工工程；E-mail: liqunzhang@scut.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“中美欧电子材料技术与产业竞争态势分析研究及对策”(2023-DFZD-35)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

the Internet of Things (IoT), advanced sensing, and quantum computing. The innovative development of key electronic material technologies directly influences the technological progress and market competitiveness of the electronic industry chain, and in the context of increasingly fierce international technological competition, it has become a core element in supporting the development of a country's strategic emerging industries. This study comprehensively reviews the global progress in the application of key electronic materials, covering industries such as integrated circuits, display technology, photovoltaic energy, high-end capacitors/resistors, and communications technology. Specifically, it reviews semiconductor silicon materials, electronic specialty gases, photoresists, wet electronic chemicals, chemical mechanical polishing materials, and third-generation semiconductor materials from the integrated circuit industry; liquid crystal display materials, organic light-emitting diode materials, laser display materials, micro-light-emitting diode materials, and sub-millimeter light-emitting diode materials from the display industry; crystalline silicon solar cell materials, perovskite solar cell materials, and organic solar cell materials from the photovoltaic industry; dielectric ceramic materials, polymer film materials, aluminum foil materials, conductive polymer materials, and electrode pastes from the high-end capacitors/resistor industry; and optical fiber materials and piezoelectric crystal materials from the communications industry. The study suggests that the rapid development of emerging technologies such as smart mobile devices, smart wearables, and the IoT has put forward higher requirements for the performance, reliability, and precision of electronic materials. Compared with international leading levels, China's high-end electronic materials still have a gap, manifested in insufficient autonomy in high-end material technologies, weak international influences, and limited participation in standards setting. Future efforts should be focused on the high-end, green, independent, and intelligent development of the electronic information industry, with a particular emphasis on breakthroughs in high-end electronic materials for integrated circuits, new displays, high-end capacitors/resistors, and the future communications industry. This will gradually achieve domestic substitution and promote the high-quality development of key electronic material technologies and industries in China.

Keywords: electronic materials; semiconductor; display technology; photovoltaic; electronic components, development trend

一、前言

电子材料是用于制造电子器件、集成电路（IC）、光电子设备、其他电子系统的关键功能材料，其性能直接影响电子产品的功能和效率，在半导体、显示技术、通信、能源存储与转换等领域具有广泛应用。电子材料不仅是现代信息技术、通信技术、半导体制造、新能源、智能制造等高技术产业的基础，也是工业互联网、人工智能（AI）、物联网（IoT）、第六代移动通信（6G）、新能源汽车、先进传感、量子计算等前沿科技领域发展的关键支撑[1~5]。关键电子材料技术的创新发展直接影响电子产业链的技术进步和市场竞争力，在国际科技竞争趋于激烈的背景下已经成为支撑国家战略性新兴产业发展的核心要素。系统研究并全面掌握关键电子材料的技术发展趋势、产业现状和未来战略，对提高我国电子产业的自主创新能力和国际竞争力，确保国家信息安全和经济安全具有重要意义[6]。

数十年来，随着半导体产业的迅速发展，电子材料在全球范围内得到了广泛应用，从Si材料、GaAs材料到近年来受到高度关注的碳基材料、GaN材料等，新型电子材料的不断涌现为电子产业的持续创新提供了源动力。在信息技术、通信技术、新能源领域迅猛发展的背景下，IC、显示技术、光伏新能源、高端电容／电阻、通信产品等方面的电子材料需求不断增加，推动着相关产业的变革与创新[7~9]。IC材料是电子产业的核心，支撑了半导体技术的发展，如美国半导体产业协会的报告显示，2023年全球半导体行业的总销售额为5268亿美元，其中IC电子材料的占比约为12.7%。主要用于液晶显示（LCD）、有机发光二极管（OLED）的显示技术材料，市场占比约为20%，在消费电子中不可或缺。光伏新能源材料支撑着可再生能源的规模壮大，未来的市场占有率可达15%。电容／电阻材料、通信技术材料的市场占比较小，但在特定领域中具有关键性，能够支持6G、电力电子应用的发展需求。

全球经济一体化深入发展，电子材料产业逐渐形成以美国、欧洲、日本、韩国、中国为主要力量的国际竞争格局。这些国家和地区具有雄厚的科研实力、完善的产业链布局，在关键电子材料技术领域占据着主要的市场份额，主导制定了产业技术标准。然而，在新一轮科技革命、产业变革兴起的背景下，全球电子材料产业面临着新挑战、出现了新机遇。新兴技术的迅猛发展对电子材料提出了更高要求，如推广6G需要具有更高频率、更低损耗的高性能电子材料[10]，发展量子计算需要全新的材料体系来支撑量子比特的稳定性与可靠性[11]，普及AI、IoT要求更加高效的能源存储与转换材料。与

此同时，全球供应链的重塑使电子材料的安全供应上升为国际性的关注焦点，如地缘政治、贸易摩擦等因素影响了全球电子产业供应链的稳定性，驱动各国加强关键电子材料的自主研发和供应链安全管理。

面向上述背景，针对关键电子材料开展应用现状梳理与发展战略研究，明晰未来重点方向和发展路径，是保障我国科技安全和经济发展的重要任务。本文从全球视角出发，系统分析IC、显示技术、光伏新能源、高端电容 / 电阻、通信技术产业中关键电子材料技术的演进历程与未来趋势，深入探讨全球范围内关键电子材料技术研发和产业化方面的布局与策略；结合电子材料市场规模、发展前景、技术成熟度以及国家相关产业政策的重点布局，剖析关键电子材料领域的技术现状与发展瓶颈，辨识我国在全球电子材料产业中的既有优势与面临挑战，提出我国电子材料技术创新和产业发展的参考性建议。

二、集成电路产业关键电子材料应用进展

半导体材料是制作半导体器件和IC的重要材料，在精度、纯度上有严格要求，属于电子级材料[12,13]。随着半导体器件和IC产业的快速发展，半导体硅片、化学机械抛光（CMP）材料、IC制程用光刻胶、电子特气、湿电子化学品、第三代半导体材料等关键电子材料的重要性进一步提高，对提升IC性能、降低成本、优化生产效率及可靠性构成决定性的影响[14]。国外在IC产业相关的关键电子材料方面取得了显著进展，集中在硅片、光刻胶、高纯气体、靶材、CMP材料等方向。例如，在硅片方面，信越化学工业株式会社、三菱住友株式会社等日本企业主导着国际市场，实现了12 in（1 in≈25.4 mm）硅片的规模化生产，正在研发18 in硅片技术；在电子特气方面，美国空气化工产品公司、法国液化空气集团、日本大阳日酸株式会社等占据了主导地位，可提供满足先进制程需求的超高纯度气体；在光刻胶领域，日本捷时雅公司、TOK株式会社，美国陶氏化学公司处于领先地位，极紫外（EUV）光刻胶已实现商业化应用，支持7 nm及以下制程；在CMP材料方面，美国卡伯特微电子公司、日本富士美公司在抛光液、抛光垫方面具有优势，支持了先进制程对晶圆更精密的抛光需求。整体上，国外企业在关键电子材料领域处于技术领先位置，推动了IC产业的快速发展，也使我国IC产业的关键电子材料发展面临挑战。

（一）半导体Si材料

Si作为第一代半导体材料已具有成熟的制备工艺和基础设施，95%以上的半导体器件、99%以上的IC都由Si制成。Si的稳定性高，可在宽泛的温度范围内工作，具有良好的电子性能[15]。在半导体领域，纯度在11N（99.999 999 999%）以上的Si才可称为电子级多晶硅，经由直拉法或区熔法处理以及滚磨、切片、抛光等工艺，得到光滑度、洁净度均符合要求的半导体硅片，进而用于芯片的制造[16]。半导体硅片按照产品工艺分为抛光片、外延片、绝缘体上硅片，按照尺寸分为6 in及以下、8 in、12 in等，不同尺寸的硅片对应不同的制程与应用方向（见表1）。然而，Si的电子迁移率较低，在高性能应用中功耗较高且会产生大量的热量，需要复杂的冷却系统。目前，硅基IC技术已经接近物理极限，很难进一步缩小晶体管的尺寸，对制造更小、更快的芯片构成挑战。此外，在高频率应用中，Si的性能开始下降，难以匹配新一代无线通信、先进雷达系统等高频应用的要求。

三维芯片技术可在有限的空间内增加更多的晶体管数量，是硅芯片的重要发展趋势。将Si与SiGe、GaN等材料结合起来，可获得更高性能的芯片并适用于诸多应用方向。8~12 in硅片生产由日本信越化学工业株式会社、三菱住友株式会社，德国世创电子公司、中国台湾环球晶圆股份有限公司、韩国SK Siltron公司等厂商垄断，合计市场份额超过90%。上海硅产业集团股份有限公司具有8~12 in硅片量产能力，市场份额约为3%。整体上，Si在传统计算机芯片中的应用非常成熟，但在量子计算、神经网络加速器等新兴方向仍有较大的发展潜力，也将在全球半导体市场中将继续占据主要位置。

（二）电子特气

电子特气是电子材料加工制备过程中使用的特种气体，也是纯度和质量稳定性要求最高的特种气体，主要用于半导体、显示面板、太阳能电池等方

表1　不同尺寸硅片的制程及应用方向

尺寸	制程	应用方向
12 in（先进制程）	3 nm 以下	超高性能计算机、超高端显卡、量子计算、类脑智能
	3~7 nm	高端智能手机处理器、高性能计算机、超高端显卡、AI、IoT
	10 nm	高端智能手机处理器、高性能计算机、超高端显卡
	14/16 nm	高端显卡、智能手机处理器、高端存储芯片、计算机处理器、现场可编程门阵列芯片
	20~22 nm	存储芯片、中低端智能手机处理图、计算机处理器、移动端影像处理器
12 in（成熟制程）	28~32 nm	WIFI / 蓝牙通信芯片、音效处理芯片、存储芯片、现场可编程门阵列芯片、特定应用 IC 芯片
	45~65 nm	数字信号处理器、影像传感图、射频芯片、WIFI / 蓝牙 / 全球定位系统 / 近场通信芯片、存储芯片
	65~90 nm	IoT 微控制单元芯片、射频芯片、模拟芯片、功率器件、面板驱动 IC 芯片、CIS 芯片
8 in	90~130 nm	微控制单元芯片、基站通信设备、射频芯片、模拟芯片、功率图件、面板驱动 IC 芯片、CIS 芯片
	0.15~0.18 μm	指纹识别芯片、影像传感器、通信微控制单元芯片、电源管理芯片、功率器件、LED 驱动 IC、传感器芯片等
	0.18~0.35 μm	嵌入式非易失性存储芯片、MEMS、MOSFET 功率器件
6 in 及以下	0.35~0.5 μm	MOSFET 功率器件、IGBT
	0.5~1.2 μm	MOSFET 功率器件、IGBT、MEMS、分立器件

注：WIFI 表示移动热点；CIS 表示互补金属氧化物半导体图像传感器；LED 表示发光二极管；MEMS 表示微机电系统；MOSFET 表示金属 – 氧化物半导体场效应管；IGBT 表示绝缘栅双极晶体管。

向（见表 2）[17,18]。半导体和微电子技术的发展对电子特气提出了更高要求，常见的高纯化技术有精馏、吸附、耦合分离等形式。常规的精馏技术可有效应用于 CH_4、CH_3F、CH_2F_2、C_3H_9Al 等电子气体的纯化过程，但对 C_3H_6、C_4F_6、NF_3 等含有挥发度相近或能形成共沸物杂质的电子气体的分离效果并不理想，因而需要采用萃取蒸馏、变压精馏、共沸精馏、吸附精馏等更为特殊的精馏技术才能实现有效的分离和纯化。

表2　电子特种气体占比前10位情况（2021年）

气体名称	市场规模/亿美元	占比/%	应用的工艺环节
NF_3	8.80	20	清洗、刻蚀
WF_6	3.35	8	成膜
C_4F_6	3.11	7	刻蚀
NH_3	1.85	4	成膜
Xe	1.75	4	离子注入、刻蚀
SiH_4	1.68	4	成膜
N_2O	1.39	3	成膜
PH_3	1.20	3	离子注入、成膜
激光气（混合气）	1.15	3	光刻
ClF_3	1.09	2	清洗

国内的超高纯度净化技术仍然依赖进口，自主技术水准（6N）与国际先进水平（8N~9N）有明显差距。国内的电子特气市场仍由外资企业主导且市场集中度偏高，如美国空气化工产品公司、德国林德集团、法国液化空气集团、日本大阳日酸株式会社 4 家企业的市场份额合计超过 80%。例如，NF_3 作为市场容量最大的电子特气类别之一，在 IC、显示面板等领域均有广泛的应用，主要生产企业有韩国 SK Material 公司、韩国晓星株式会社、德国默克公司、日本关东电化工业株式会社等，国内的生产商有山东飞源气体有限公司、中船（邯郸）派瑞特种气体股份有限公司、昊华化工科技集团股份有限公司、江苏雅克科技股份有限公司等。

（三）光刻胶

光刻胶又称光致抗蚀剂，具有光化学敏感性，可通过光化学反应和光刻工艺将所需的微细图形从掩模版转移到待加工基片上，广泛应用于光电信息产品中微细图形线路的加工制作，如印刷电路板、LCD、IC 等[19,20]。半导体光刻胶主要包括紫外宽谱光刻胶、g 线光刻胶、i 线光刻胶、KrF 光刻胶、ArF 光刻胶、EUV 光刻胶[21]，从曝光光源波长的角

度看经历了从紫外光源到深紫外光源再到EUV光源的发展过程（见表3）。在IC领域，光刻工艺较为重要，成本约占芯片制造总成本的35%，耗费时间约占芯片工艺总耗时的40%~60%；光刻胶是光刻工艺涉及的重要材料。

随着纳米技术的发展以及智能手机、云计算、IoT、AI技术等的普及，市场对光刻胶的性能要求进一步提高。尤其是在EUV光刻技术方面，要求光刻胶能适应更短波长的光源，匹配IC线宽不断缩小、实现更高解析度和图案精度的发展趋势[22]。在此背景下，多种非金属基、金属基EUV光刻材料得到研究报道，特别是金属氧簇型光刻材料受到广泛关注，有望为2 nm及以下技术节点提供关键材料支持[23,24]。多金属簇核可提高EUV光子的吸收效率，但控制簇核数量在10个以内时才能缩小团簇尺寸，进而降低线宽粗糙度并优化光刻反应[25]。也可利用不同金属之间的协同效应来提升光刻效果，即为混金属策略。金属与配体之间的配位方式将影响图案化性能。例如，Sn—C键比Sn—O键更易断裂，有利于形成交联网络；配位数的不同则会改变网络的紧密程度，进而影响材料的溶解度。此外，合适的功能有机配体修饰可显著提升材料的灵敏度、成膜性和分辨率。

（四）湿电子化学品

湿电子化学品又称超净高纯试剂、工艺化学品，指主体成分纯度>99.99%、杂质离子和微粒数符合严格要求的化学试剂[26]。湿电子化学品是微电子、光电子湿法工艺制程中使用的液体化工材料，主要用于IC、光伏面板、显示面板行业[27~29]；其中，显示面板行业的需求量最高，IC行业的技术要求最高。湿电子化学品具有用途关键、厂商高度垄断、品种多样、行业高速增长等特点，按用途可分为通用湿电子化学品（超净高纯试剂）、功能湿电子化学品（见表4）。通用湿电子化学品指在IC、液晶显示器、太阳能电池、LED制造工艺中大量使用的液体化学品，如H_2O_2、HF、H_2SO_4、H_3PO_4、HCl、HNO_3等。功能湿电子化学品指通过复配方式达到特殊功能、满足制造中特殊工艺需求的配方类或复配类化学品，包括显影液、剥离液、清洗液、刻蚀液等。例如，超净高纯试剂在晶圆生产过程中的晶圆清洗，芯片制造光刻工艺中的刻蚀、显影、洗脱过程，芯片制造中的电镀液制造过程中均发挥了重要作用；IC内部各元件及连线相当微细，因而制造过程中如遭到尘粒、金属的污染很容易损坏晶片内的电路功能，导致IC失效并影响几何特征的形成；超净高纯试剂的纯度和洁净度对生产IC的电性能、成品率、可靠性均有显著影响。

表3 半导体光刻胶适用的制程节点

种类	波长/nm	制程节点/nm	适用晶圆	体系
紫外全谱	300~450	>2000	6 in及以下	环化橡胶–双叠氮负胶
g线	436	>500	6/8 in	酚醛树脂–重氮萘醌正性胶
i线	365	500~350	6/8/12 in	酚醛树脂–重氮萘醌正性胶、环化橡胶–双叠氮负胶
KrF	248	250~130	8/12 in	酚醛树脂–重氮萘醌正性胶
ArF（干法光刻）	193	130~65	12 in	酚醛树脂–重氮萘醌正性胶
ArF（湿法光刻）	193	65~7	12 in	酚醛树脂–重氮萘醌正性胶
EUV	<13.5	<7	12 in	酚醛树脂–重氮萘醌正性胶

表4 湿电子化学品产品分类情况

大类	小类	具体产品
通用湿电子化学品	酸类	HF、H_2SO_4、H_3PO_4、HNO_3、CH_3COOH、$H_2C_2O_4$等
	碱类	NH_4OH、KOH、NaOH等
	有机溶剂类	CH_3OH、C_2H_5OH、C_3H_6O、C_4H_8O、$C_4H_8O_2$、C_7H_8等
	其他类	H_2O_2等
功能湿电子化学品	复配类化学品	显影液、剥离液、清洗液、蚀刻液、稀释液等

湿电子化学品发展历程悠久，可追溯到20世纪60年代。目前，国内从事湿化学品研究生产的企业超过40家。中国电子材料行业协会的数据表明，2022年全球湿电子化学品市场规模为639.1亿元，预计2025年的市场规模为825.2亿元，年复合增长率约为8.9%。在我国，针对湿电子化学品行业的支持力度较大，通过一系列政策鼓励行业高质量发展，如半导体级H_2SO_4等湿电子化学品列入了《重点新材料首批次应用示范指导目录（2021年版）》，在政策导向上支持解决国内湿电子化学品相关企业规模小、投资不足、研发能力弱等问题。

（五）CMP材料

CMP是普通抛光技术的升级版本，主要由硅片夹持器、工作台、抛光液供给装置三部分组成；在工件表面进行化学反应，改变工件表面原有的化学键，产生能够去除表面杂质的反应膜，从而使硅片表面变得更加平坦，成为普遍性应用的半导体材料表面平整技术（见表5）[30]。在IC制造过程中，采用CMP工艺对晶圆表面进行高精度打磨，可达到全局平整落差100~1000 A°（相当于原子级10~100 nm）的超高平整度，以解决光刻对焦不准、电子迁移短路、线宽控制失效等问题[31,32]。

CMP材料主要包括抛光垫、抛光液，两者合计占据晶圆制造总成本的7%。国际半导体产业协会认为，抛光垫、抛光液价值量较高，分别占CMP材料成本的49%、33%，产品质量直接影响抛光效果，对提高晶圆制造质量至关重要。抛光材料还涉及抛光头、研磨盘、相关检测设备。抛光液、抛光垫的技术壁垒较高，如高品质的抛光液需要综合控制磨料硬度、粒径、形状、各成分质量浓度等要素，抛光垫更加侧重低缺陷率、长使用寿命。

随着先进半导体技术的发展，CMP工艺步骤大幅增加。2016—2021年，全球抛光垫、抛光液的市场规模分别从6.5亿美元、11亿美元增长至11.3亿美元、18.9亿美元。美国卡伯特微电子公司、日本日立化学工业公司、日本富士美公司在全球CMP抛光液市场中的合计占比超过50%。处于国内行业龙头地位的安集微电子科技（上海）股份有限公司，CMP抛光液产品的全球市场份额约为5%。湖北鼎龙控股股份有限公司是拥有自有产权并实现量产的CMP抛光垫厂商。

（六）第三代半导体材料

半导体材料是半导体产业链上游的重要组成部分，在IC、分立器件等产品的制造过程中起到关键作用。Ge、InP分别作为第一代、第二代半导体材料的代表，在特定领域中展现出独特优势：前者具有高的迁移率，在射频器件、光电探测器中受到较多关注，在SiGe异质结晶体管、近红外探测器中应用广泛；后者具有高的电子迁移率和优异的光电性能，成为光通信、高频电子器件、量子计算器件的关键材料。随着新一代移动通信、IoT、量子技术的快速发展，Ge、InP在高频、高功率、光电产品上的应用更为深入。当前处于第一代、第二代、第三代半导体均在使用和发展的阶段。第三代半导体材料包括SiC、GaN、ZnO、Al_2O_3等，禁带宽度≥2.3 eV，具有宽带隙、高热导率、高电场强度、高电子迁移率等特点，被视为超越传统硅基半导体技术的关键材料[33]；SiC、GaN等第三代半导体材料适用于高温、高频率、高功率密度产品的应用场景，如电力电子、射频通信、光电子等方向[34]。

近年来，得益于化学气相沉积（CVD）、分子束外延、GaN低缺陷生长等外延技术的进步，第三

表5　抛光液应用方向的发布情况

产品	应用方向
硅抛光液	用于单晶硅／多晶硅的抛光，位于硅晶圆初步加工阶段
铜及铜阻挡层抛光液	用于芯片中铜及阻挡层的去除和平坦化，生产逻辑／存储芯片时需大量使用
钨抛光液	用于芯片中钨塞和钨通孔的平坦化，生产存储芯片时需大量使用，生产逻辑芯片时部分工艺使用
钴抛光液	用于10 nm节点以下芯片中钴的去除和平坦化
层间介质层抛光液	用于IC制造工艺中层间电介质、金属间电介质的去除和平坦化
浅槽隔离层抛光液	用于IC制造工艺中浅槽隔离的抛光
3D封装硅通孔抛光液	用于对硅通孔的抛光

代半导体材料的晶体质量得到了显著提升。在器件方面，第三代半导体材料经成功应用于高电子迁移率晶体管、MOSFET、肖特基二极管等高性能产品。在制造工艺方面，第三代半导体材料的衬底技术取得了重要进展，具备了SiC、GaN衬底材料的大尺寸生产能力，可降低制造成本并提高材料的一致性和可靠性，在高效电源转换设备、无线通信产品、国防装备、照明与显示产品上应用广泛。

我国在半导体材料的生产与应用方面具有优势。随着“双碳”目标的推进，绿色、低碳、清洁能源等技术加速应用，第三代半导体材料作为实现高效电能转换技术的重要支撑将获得进一步发展。第三代半导体产业技术创新战略联盟的数据表明：2022年，我国第三代半导体功率电子、微波射频两个领域实现总产值141.7亿元，同比增长11.7%；2023年，我国SiC、GaN电力电子产值规模约为85.4亿元，GaN微波射频产值约为70亿元。

三、显示技术产业关键电子材料应用进展

显示技术产业是电子信息产业的重要组成部分，以面板显示技术为主导。LCD仍是市场上大尺寸显示面板主流技术，OLED、次毫米发光二极管（Mini LED）已实现商业化，Micro LED开始扩大应用；OLED具有自发光特性，不需要背光源，综合性能更优，是极具发展潜力的显示技术方向[35]。Mini LED指尺寸在100 μm量级的LED芯片，同样属于自发光显示，与LCD相比具有更好的显示效果、更快的响应速度、更轻薄的屏幕、更低的功耗。

显示技术产业的关键电子材料以OLED材料、量子点材料、液晶材料、透明导电薄膜等为主要发展方向。在OLED材料方面，美国UDC公司、日本出光兴产株式会社、德国默克公司等深入研究发光层、传输层、注入层材料，拓展了柔性OLED显示屏在智能手机、可穿戴设备上的应用。在量子点材料方面，美国Nanosys公司、QD Vision公司开发了高效且稳定的量子点材料，发展了量子点显示技术，提升了显示色彩表现和能效。日本JNC株式会社、德国默克公司发展了高响应速度、宽视角、低功耗的液晶材料，推动了4K、8K超高清液晶显示器的发展。在透明导电薄膜方面，美国康宁公司、日本日东电工株式会社发展了氧化铟锡（ITO）替代材料，用于柔性显示和触摸屏。

（一）LCD材料

主流的LCD指基于薄膜场效应晶体管（TFT）的LCD，包括上下两片玻璃基板、中间的液晶材料[36]。其中，上层玻璃基板是彩色滤光片，下层为TFT基板[37]。LCD材料主要包括液晶材料、基板材料、偏光片。液晶材料一般是由多种单体液晶调制成的混合液晶，作为液晶面板的关键核心材料而对显示质量起到重要作用。国内的液晶材料产业与国际先进水平仍然存在差距，高端混晶材料技术长期被德国默克公司、日本JNC株式会社、日本油墨株式会社等公司垄断。显示玻璃是显示行业上游的重要原材料，包括TFT LCD玻璃基板、OLED玻璃基板、柔性玻璃等。显示玻璃的投资门槛高、技术风险大、运输成本较高，国内市场较多依赖进口。LCD/OLED玻璃基板主要生产商有美国康宁公司、日本旭硝子株式会社、日本电气硝子株式会社等。

量子点背光技术、蓝相液晶技术、新型配向膜等[38~40]是全球LCD用关键电子材料的主攻方向。量子点发光技术指应用量子点的尺寸效应来调控发光颜色，进而实现更宽的色域和更高的亮度，LG显示公司、京东方科技集团股份有限公司在量子点背光技术上处于行业领先位置。蓝相液晶技术具有快速的响应时间、简化的生产工艺，日本、韩国的相关机构研发了稳定性高、温度窗口大的液晶材料，推动了相应的商业化进程。中国台湾企业开发了新型配向膜，可提供更精确的液晶分子排列，提高了LCD的显示质量。此外，发展环保型液晶材料技术成为趋势，德国、英国的相关公司致力于研发环保液晶材料以降低液晶生产和使用过程中的污染。

（二）OLED材料

OLED属于新兴显示技术，得到全球显示产业的普遍关注[41,42]。OLED显示器采用ITO透明电极、金属电极分别作为器件的阳极、阴极，在一定电压的驱动下电子、空穴分别从阴极、阳极注入到传输层、发光层，产生激子辐射发光。实现OLED发光需要红、绿、蓝3种基色的发光材料。与绿光、红光材料相比，蓝光材料（特别是深蓝光材料）的电致发光性能不够理想，存在器件效率低、器件寿命

短、色纯度差等问题，因而制备高效稳定的蓝色发光材料是OLED技术发展的挑战[43]。OLED材料主要分为发光材料、基础材料，合计约占OLED物料成本的30%。发光材料是OLED的关键核心材料，直接影响面板的显示质量，属于技术壁垒最高的细分方向之一。按照材料的发展时间、材料激子的利用方式，可将OLED材料分为3代：第一代是传统的荧光材料体系，第二代是金属配合物磷光材料体系，热活化延迟荧光材料作为具有潜力的第三代材料体系成为当前的研究热点。

OLED材料市场规模有望在近期达到30亿美元，增速较高，国外企业处于行业发展主导地位。例如，红绿磷光材料的主要供应商有美国UDC公司、陶氏化学公司，韩国三星SDI公司、德山金属公司、LG化学公司，日本保土谷化学工业株式会社、东丽株式会社等；蓝光材料的主要供应商有日本出光兴产株式会社、德国默克公司等；在掺杂发光材料方面，美国UDC公司形成了专利壁垒。目前，我国企业主要生产OLED材料的中间体和单体粗品，产业链不够完善；高性能发光材料和核心装备依赖进口，下游的面板制造环节亟待突破OLED材料技术瓶颈。国内相关企业开始构建覆盖“中间体–终端材料–面板”的技术与产业生态，加速突破关键材料的瓶颈技术，以京东方科技集团股份有限公司为代表的面板厂商也在积极布局OLED面板生产线并推进技术迭代。

（三）激光显示材料

激光显示涉及以红、绿、蓝三基色（或多基色）激光为光源的新型显示技术和产品，控制三基色激光的强度比、总强度、强度空间分布，即可实现彩色图像显示[44]。激光具有方向性好、单色性佳、亮度高的基本特性，用于显示可实现大色域、几何高清、颜色高清的高保真视频图像再现。激光显示电子材料主要用于制造激光光源、调制激光光束、构建激光显示设备的光学和电子组件。在激光显示系统中，三基色发光材料、超高清成像技术是呈现高质量图像的关键，蓝光、绿光激光器通常采用GaN基材料，红光激光器较多采用GaAs基材料。红色、蓝色激光二极管技术相对成熟，而绿色激光二极管需要通过二次谐波生成或量子点转换材料来构建，这是因为直接产生绿色光的半导体材料技术难度较高。

2010年前后，我国激光显示材料技术获得快速发展，自主研发的蓝光、红光激光材料主导了国际上这一阶段的发展。海信集团有限公司、深圳光峰科技股份有限公司等企业注重激光电视、激光投影产品及材料的研发，申请专利数快速增加。激光显示的全球市场出货量从2017年的6.9×10^5台增长到2023年的1.67×10^6台，国内市场出货量在全球市场中的占比达到50%。随着激光显示技术的发展、三基色激光器发光材料和超高清成像材料需求的增长，半导体激光材料、非线性光学材料、光学显像技术方向的技术和材料创新成为热点[45]。可以预判，在纳米技术、新材料科学的支撑下，量子点、纳米晶体等新型材料将进一步拓宽激光显示材料的应用规模。也要注意到，三基色激光器、超高清成像芯片等核心材料器件尚未实现自主可控，相关产业链的国产化进程仍需稳健推进。

（四）Micro LED材料

Micro LED具有自发光特性，是基于微米级发光二极管阵列的新型显示技术；1个微米级的LED即为显示屏上的1个像素点，这些微型LED由以GaN为主的无机材料构成。与LCD、OLED相比，Micro LED提供了更高的亮度和对比度、更宽的色域、更快的响应时间、更低的能耗，也具有更好的可靠性、更长的使用寿命，支持更薄的屏幕设计，不存在“烧屏”现象[46]。2015—2020年，Micro LED材料快速发展，尤其是制造工艺、材料集成、量产技术取得显著突破；Micro LED材料的红光效率瓶颈问题得到缓解，GaAs、InP等新材料和异质集成技术的应用成为产业化的主流[47]。

Micro LED具有优异的显示性能、灵活的应用潜力，适用于智能手机、平板电脑、高清电视、可穿戴设备、汽车显示、大型公共显示屏等[48]。随着制造技术进步、生产成本降低，预计Micro LED技术可在数年内进入商业化阶段，将与OLED、LCD技术形成有效竞争甚至在部分应用领域实现替代。尽管Micro LED技术具有优势和前景，但商业化仍面临一些挑战：高精度的微米级LED制造和转移技术成本高昂，对于小尺寸、高分辨率的显示应用而言更为突出；高效率、高产量的Micro LED芯片转

移和集成技术仍在研发，实现大规模生产被视为技术发展的优先事项，但量产难度依然较高；Micro LED技术涉及新材料、新工艺、新设备，需要供应链上各环节高度协同，而行业的供应链成熟度不高，全面提升尚需时间。

美国苹果公司、韩国三星集团等正在积极推动Micro LED在电子消费领域的应用，京东方科技集团股份有限公司、TCL华星光电技术有限公司等国内企业也在积极攻关Micro LED材料产业化应用难题。具体到材料方面，国内机构实现的蓝光、绿光GaN基Micro LED材料的发光效率达到国际先进水平，未来将继续在异质集成、量子点增强Micro LED等方面深化研究。

（五）Mini LED材料

Mini LED作为新型显示技术，使用尺寸为50~200 μm的LED芯片作为背光源或直接发光单元，相比传统的LED尺寸更小、密度更高，可实现更精细的局部调光和更高的亮度，从而提升显示效果。Mini LED技术在2010年左右开始发展，随着LED芯片制造工艺的进步、显示市场对高画质需求的提升，逐渐成为显示领域的热门方向。美国苹果公司在Pro Display XDR中采用Mini LED背光技术，加快了Mini LED技术的商业化进程。近年来，Mini LED在电视、显示器、笔记本电脑、车载显示等产品上得到广泛应用，以高亮度、高对比度、低功耗的优势在高端市场上备受青睐。

在市场层面，Mini LED正处于快速增长阶段，得益于消费电子、商用显示、汽车显示等需求的驱动，2025年的全球市场规模有望突破100亿美元。例如，国内外消费类电子品牌积极推出应用Mini LED技术的产品，推动了市场普及；Mini LED逐渐取代传统的LED显示屏，表现出高可靠性、长寿命的优势；Mini LED具有高亮度和宽温域的特性，成为新能源汽车智能座舱的理想选择。国外企业在Mini LED终端产品领域占据优势，国内企业在产业链的上游环节具有较强的竞争力。例如，三安光电股份有限公司、京东方华灿光电股份有限公司等企业在LED芯片制造方面处于全球领先地位，相关面板企业在Mini LED背光模组、显示模组方向取得重要突破。

Mini LED未来发展前景广阔，但仍面临一些技术挑战。Mini LED芯片数量多、制造工艺复杂，导致生产成本偏高，限制了低端市场的普及。Mini LED的巨量转移、驱动IC设计及散热等技术瓶颈仍待突破。Mini LED面临来自OLED、Micro LED等技术的竞争压力，如OLED凭借自发光特性和柔性显示优势仍在高端市场上占据一定的份额。然而，随着技术进步、规模效应的显现，Mini LED的成本有望稳步下降，市场渗透率也将逐步提升；Mini LED与量子点技术相结合（如QD-Mini LED）能够进一步提升显示效果，从而增强面向高端显示市场的竞争力；Mini LED在增强现实/虚拟现实、智能穿戴等新兴领域的应用也富有潜力。未来，随着产业链的更为完善，Mini LED有望在更多领域实现规模化应用，推动显示产业迈向新的高度。

四、光伏新能源产业关键电子材料应用进展

在“双碳”目标提出后，包括太阳能电池在内的清洁能源产业迎来了发展机遇期。太阳能电池的原理是光电效应，可将光能转换为电能。第一代晶硅太阳能电池以多晶硅、单晶硅为代表，仍是目前主流的电池技术路线[49,50]。第二代化学薄膜电池以铜铟镓硒、CdTe、GaAs为代表，适用于建筑集成光伏（BIPV）等应用场景[51]。薄膜太阳能电池采用直接带隙半导体材料替代晶硅，理论上具有更高的转换效率、更低的生产成本[52~54]。第三代新型薄膜电池以钙钛矿电池、染料敏化电池、有机太阳能电池（OSCs）为代表，在效率提升、成本降低等方面具有潜力[55~57]。光伏新能源材料是可再生能源领域的关键技术之一（见表6），以晶硅太阳能电池材料、钙钛矿太阳能电池材料、有机太阳能电池材料为代表[58]。

（一）晶硅太阳能电池材料

晶硅太阳能电池发展历史悠久，是应用最广泛的太阳能电池类型，在商业化应用中占据主导地位，近年来随着材料与工艺技术的优化而进一步提高了性能和成本效益。晶硅太阳能电池的核心结构是P—N结，当光线照射到单晶硅片上时，光子的能量会被Si材料吸收，使Si内部的电子获得足够的能量从价带跃迁到导带，形成自由电子和空穴；这些自由电子和空穴在内建电场的作用

下分别向N型区、P型区移动，进而形成电流。晶硅太阳能电池主要分为单晶硅、多晶硅两类：前者指Si原子以排列形式形成的物质，通常采用拉晶法、浮区法制造，在光电转化效率、稳定性、寿命方面较为优越；后者由多个晶粒组成，晶粒的取向不同并形成非均匀的晶体结构，多通过铸锭法、浇铸法制造，在成本控制上具有优势，适合大规模应用。

单晶硅太阳能电池以良好的效率和长期稳定性受到广泛关注，技术进步、生产成本降低将进一步推升市场占比[59]。对于占地面积较小、需要高发电效率的应用场景（如屋顶太阳能系统），单晶太阳能电池是最适用的面板类型之一。国内外企业持续探索单晶硅光伏电池的效率极限，采用叠层电池、钝化发射极背接触（PERC）、异质结等技术，将效率提升至25%。在PERC电池量产效率接近理论极限（24.5%）后，晶硅太阳能电池又形成了N型氧化层钝化接触（TOPCon）、n型本征薄膜异质结电池、背接触电池3条技术路径，其中TOPCon电池凭借性价比优势率先实现量产，有望在短期内接替PERC电池成为主流技术类型。虽然单晶硅光伏电池的效率占优，但是多晶硅光伏电池的生产工艺相对简单，Si材料的使用效率更高，在大规模生产中具有更低的成本。随着光伏产业的规模化发展，多晶硅电池进一步降低成本，在低预算、大规模的光伏电站中仍有广泛应用。

自2010年起，我国成为全球光伏产业的主要制造基地，国内企业完成产业链的垂直整合，大幅降低了光伏系统的综合成本。2021—2023年，全球单晶路线Si材料的需求量分别为5.89×10^5 t、7.37×10^5 t、8.85×10^5 t，预计未来将持续保持平稳增长的态势。2021—2023年，全球多晶硅料总需求量分别为6.11×10^5 t、7.56×10^5 t、8.99×10^5 t，预计2025年需求量为1.102×10^6 t。2023年，全球多晶硅产能、产量分别为2.256×10^6 t、1.597×10^6 t，我国的相应占比分别为93%、92%。近年来，多晶硅行业产能和产量快速增长，市场面临供需失衡的挑战，相关企业可关注市场动态、调整生产策略，以应对未来可能出现的市场波动。

（二）钙钛矿太阳能电池材料

钙钛矿太阳能电池利用钙钛矿结构材料作为吸光材料，是第三代薄膜电池的代表类型，可细分为单结钙钛矿电池、钙钛矿叠层电池，具有能量转化效率高、价格低、重量轻、柔性等特点。钙钛矿太阳能电池的核心材料由含有钙钛矿结构的材料组成，这类材料的一般化学式为ABX_3（A、B是阳离子，X是阴离子）。太阳能电池中常见的钙钛矿材料是卤化铅复合物（如$CH_3NH_3PbI_3$）[55]。自2009年起，钙钛矿太阳能电池的光电转换效率从3.8%提升至25%，已接近或甚至超过传统的多晶硅太阳能电池[60,61]。晶硅电池的理论效率极限为29.4%，而单结钙钛矿电池、钙钛矿叠层电池的理论效率极限分别为33.7%、44%，国内的晶硅–钙钛矿叠层电池的实验室效率达到33.89%（见表6）。

钙钛矿太阳能电池市场正处于快速发展期。随着杭州纤纳光电科技股份有限公司、昆山协鑫光电材料有限公司等企业顺利投产，2023年全球钙钛矿

表6　太阳电池的最高效率（中国，2023年）

类型	光电转化效率/%	面积/cm^2	开路电压/mV	短路电流密度/（$mA\cdot cm^{-2}$）	填充因子/%	认证时间	研发机构
HBC单晶硅太阳电池	27.09±0.46	243.1	742.5	42.62	85.6	2023年12月	隆基绿能科技股份有限公司
p-TOP单晶硅太阳电池	25.40±0.43	274.3	731.3	41.48	83.75	2023年12月	隆基绿能科技股份有限公司
单结钙钛矿太阳电池	26.00±0.50	0.074 6	1190.0	26.0	84.03	2023年3月	中国科学院半导体研究所
单结钙钛矿光伏组件	19.50±0.65	810.1	1170.0	22.61	73.71	2023年11月	极电光能有限公司
钙钛矿／Si两端叠层太阳电池	33.89±0.29	1.004	1965.7	20.76	83.0	2023年10月	隆基绿能科技股份有限公司
单结有机太阳电池	19.22±0.30	0.032 6	913.5	26.61	79.0	2023年3月	上海交通大学
单结有机光伏组件	15.70±0.35	19.31	877.1	24.37	73.4	2023年1月	浙江大学／浙江能丰光电科技有限公司

注：HBC表示背接触异质结；p-TOP表示使用p型材料作为顶部电极的单晶硅太阳电池。

电池产能约为2.11 GW，预计2030年将达158 GW。国内涌现出一批专注钙钛矿太阳能电池研发和制造的新兴企业，也吸引了传统光伏企业的参与；钙钛矿技术开发呈现企业、高校同步推进的态势，在能量转化效率方面多次突破世界纪录。例如，江苏宝馨科技股份有限公司与高校团队合作，实现钙钛矿/异质结叠层电池的自测效率超过30%；极电光能有限公司在钙钛矿光伏组件方面创造了20.5%的光电转换效率世界纪录。随着生产技术成熟、成本降低，钙钛矿太阳能电池有望在未来太阳能市场中占据重要位置。

（三）OSCs材料

OSCs指以有机电子材料作为光吸收层的太阳能电池，具有轻质、柔性、可低成本溶液加工等优势，在可穿戴设备、便携式电源、BIPV等新兴应用场景中具有潜力[62,63]。近年来，OSCs的转换效率显著提高，研究重心转移到增强材料的稳定性、降低生产成本方面。随着新型非富勒烯材料、双结或多结器件结构的发展，实验室条件下的OSCs效率超过20%[64,65]，新型添加剂、高效封端技术也成为提升OSCs环境稳定性和使用寿命的重要方式。OSCs尽管效率仍低于硅基太阳能电池，但在低光照条件下表现更优，兼有独特的机械柔性，在特定市场和应用方向上具有竞争优势。OSCs材料具有优异的性能，吸引了学术界、产业界的持续关注和资金投入，促进了基于有机光电材料的商业化产品投放市场，逐渐成为能源、信息、显示、半导体等支柱产业的技术源头。

在“双碳”目标深入发展的背景下，OSCs将迎来更大的发展机遇，在室内光伏以及建筑玻璃、新能源汽车玻璃等室外供电方面展现出良好的应用前景。国际OSCs厂商采用卷对卷印刷工艺实现了大面积有机光伏模组的产业化应用，而国内机构尽管在材料基础研究方面处于领先位置，但产业链的成熟度仍有不足。广州追光科技有限公司完成千万元级别的融资，启动了有机光伏模组中试线项目建设。东莞伏安光电科技有限公司建设了国内首条卷对卷印刷有机光伏中试线，初步形成大面积柔性有机光伏模组的生产能力。

五、高端电容/电阻产业关键电子材料应用进展

高端电容/电阻产业是电子元器件领域的重要分支，对推动现代电子技术发展具有关键作用[66]。电容器是利用两个导电板之间存在的非导电材料（介电材料）来存储电能的元件，根据介电材料的不同可分为介电陶瓷电容器[67]、钽电容器[68]、铝电解电容器[69]、固态聚合物电容器[70]等。电容器主要用于电荷储存、交流滤波或旁路、切断或阻止直流电压、提供调谐及振荡等[71~73]。全球电容器市场规模保持稳定增长，2023年约为62.7亿美元，同比增长3.27%。电阻器是限制电流流动的元件，主要用于控制电压和电流，起到降压、分压、限流、隔离、滤波（与电容器配合）、匹配、信号幅度调节等作用，也是电子产品上不可或缺的元件。电阻器根据使用材料的不同可分为金属膜电阻器、碳膜电阻器、厚膜和薄膜电阻器、线绕电阻器等[74,75]。2021年，全球电阻器市场规模约为31.26亿美元，优势品牌有美国Vishay、日本KOA、中国台湾国巨、日本松下、美国TT Electronics、日本罗姆半导体，合计市场份额约为66%。

高端电容/电阻是电子电路中的基础元件，广泛应用于消费电子、汽车电子、工业控制、航空航天装备等领域。高端电容材料主要有高介电常数的陶瓷材料、聚合物薄膜（如聚丙烯（PP）和聚酯）、电解电容用高纯度铝箔和导电高分子材料等。高端电阻材料主要有精密合金（如镍铬合金）、金属薄膜和厚膜电阻浆料等，具有高稳定性、低温度系数、高精度的特点，能够满足电子设备的小型化、高频化、高可靠性等应用需求。美国、日本企业在电容/电阻用介电陶瓷材料方面的市场占有率合计超过85%，日本企业在电极浆料方面的市场占有率超过50%。松下电器机电有限公司、贵弥功株式会社等日本企业，掌握了高性能导电聚合物（CPs）材料生产工艺，占据了高端聚合物电容器约90%的市场份额。

（一）介电陶瓷材料

介电陶瓷材料是一类具有高介电常数的无机非金属材料，可在电场作用下存储电荷，具有良好的温度稳定性、频率响应特性，广泛应用于电子和电

气工程领域[76~78]。介电陶瓷材料是光电子工业、微电子及电子工业中的基础元件，多由$BaTiO_3$、$SrTiO_3$、$PbTiO_3$等金属氧化物组成，属于国际市场上竞争激烈的高技术新材料。介电陶瓷材料在6G、新能源汽车、智能家居等领域中应用价值极大，市场需求将持续增长；中国、日本、韩国成为全球介电陶瓷材料的最大市场，北美洲、欧洲也占据着重要的市场份额。全球电子陶瓷材料市场规模将从2022年的1860亿元增长至2025年的2264亿元。

介电陶瓷成品的制备过程包括陶瓷材料合成以及后续的加工技术。合成方法分为固相合成法、溶胶–凝胶法、水热合成法等。固相合成法将氧化物或碳酸盐粉末混合、研磨，再在高温下烧结，操作简单、成本低，适合规模化生产。溶胶–凝胶法通过水解、聚合反应生成溶胶，再经过干燥、热处理过程制得陶瓷粉末或薄膜，可以精确控制材料的成分与微观结构，适用于制备高性能介电陶瓷。水热合成法在高温、高压的水溶液中合成陶瓷粉末，进而在较低的温度下获得纯净且均匀的陶瓷材料，适用于制备特种介电陶瓷。后续的加工技术根据应用场景的不同可分为烧结工艺、薄膜沉积两类：前者将介电陶瓷粉末压制成型并在高温下烧结，获得具有一定形状和尺寸的陶瓷件；后者细分为物理气相沉积、CVD、原子层沉积等。

介电陶瓷在无线通信、储能系统、微电子设备、能量转换设备上发挥着重要作用。例如，在储能系统中，介电陶瓷作为电容器的关键材料，支持储存和释放电能；在微电子设备中，介电陶瓷提供必要的绝缘和支撑功能，保障设备的稳定运行。介电陶瓷在智能手机、平板电脑等高端电子产品上也较为关键。片式多层陶瓷电容器（MLCC）是用量极大的无源元件之一，主要用于各类电子整机中的振荡、耦合、滤波旁路电路。MLCC产业链涵盖上游原材料、中游制造、下游应用：上游环节主要处理陶瓷粉末、电极材料等，中游环节主要进行MLCC的生产，下游环节涉及消费电子、汽车电子、通信等领域。全球MLCC行业的竞争格局呈现高度集中和垄断的特征。日本的村田、京瓷、太阳诱电、TDK-EPC，韩国的SEMCO，中国台湾的华新、国巨等都是知名品牌。国内其他厂商积极扩张产能，MLCC国产化将加速推进。

（二）聚合物薄膜材料

高端电容／电阻中的聚合物薄膜材料，如PP、聚酯，具有优异的电绝缘性能、稳定的化学性质、良好的机械强度，广泛应用于电容器和电阻器的制造，对电子工业发展较为重要。PP薄膜介电损耗低、耐高电压，适用于电力电子、新能源汽车等高频和高电压应用场景。聚酯薄膜具有良好的耐热性和尺寸稳定性，适用于消费电子、通信设备等应用场景。全球高端电容／电阻用聚合物薄膜材料市场呈现稳步增长态势，对高性能电容／电阻的需求持续增加，推动了聚合物薄膜材料的创新和升级。日本、美国、欧洲的化工企业在高端聚合物薄膜材料的研发和生产上占据领先地位，推出了更高性能、更加环保的聚合物薄膜产品，满足了市场对高性能电子元器件的需求。

随着电子制造业的快速发展，国内市场对高端电容／电阻用聚合物薄膜材料的需求也在增长。浙江南洋科技有限公司、江苏中天科技股份有限公司等企业正在加大研发投入，提升相关产品的质量和技术水平。然而，国内企业在原材料纯度、生产工艺控制等方面与国际先进水平存在差距，需要加强技术创新和产业链整合，提升核心竞争力并扩大市场份额。

整体上，高端电容／电阻用聚合物薄膜材料市场前景广阔，对高性能材料的需求将持续增长。国内外市场竞争将更加激烈，技术创新和产品质量将成为赢得市场的关键因素。随着环境保护、可持续发展理念的深入，开发更为环保、性能更高的聚合物薄膜材料是行业的主要发展方向。

（三）铝箔材料

铝箔材料作为高端电容／电阻的关键组件，主要用于铝电解电容器的制造。铝箔经过特殊的腐蚀和化成处理，形成高比表面积的粗糙表面（增加电极的表面积），进而提升电容器的电容量；铝箔表面的Al_2O_3层作为电介质，决定了电容器的耐压性能和稳定性。铝箔的质量直接影响电容器的性能，如容量、损耗、耐压、寿命等指标。高端铝箔材料的发展方向有：优化腐蚀和化成工艺，进一步提高铝箔的比表面积和氧化膜质量，满足高容量、低损耗电容器的需求；开发超薄铝箔，适应电子设备小型化、轻量化的趋势；研究高纯铝箔、合金铝箔，

提高电容器的耐压性能和可靠性；探索铝箔袋环保型生产工艺，减少对环境的不利影响。

在高端铝箔材料的国际市场上，日本、韩国、德国的企业占据领先地位，拥有先进的生产技术和成熟的制造工艺，可提供高质量的产品。国内铝箔材料产业进步显著，国内市场极大的需求量也激励了产业发展，但高端产品方面相较国际先进水平差距依然存在，突出表现在超薄铝箔和高纯铝箔的生产技术上。后续，国内铝箔材料企业需要加大研发投入、提升技术水平，逐步缩小能力差距，支持在国际市场上占据更高的份额。

（四）CPs 材料

聚合物最早被认为是绝缘体，但聚乙炔导电性质的发现改变了这一看法[79]，随后又发现了聚苯胺（PANI）、聚噻吩（PTh）、聚吡咯（PPy）等CPs[80,81]。CPs 的导电性多通过化学掺杂来实现，电导率约为 1×10^{-3}~1×10^{3} S/cm。CPs 材料广泛应用于智能窗口、传感器、腐蚀剂、晶体管、抗静电涂层、发光二极管、电磁干扰屏蔽、储能、太阳能电池等产品[82]。CPs 材料的传统制备方法主要分为化学氧化聚合、电化学聚合两类：前者在溶剂中添加单体和氧化剂，通过化学氧化的方式合成CPs；后者利用电化学方法在电极表面直接通过单体聚合形成CPs薄膜，可对薄膜厚度及形貌进行精准控制。CPs可以分为p型CPs、n型CPs。常见的p型CPs有PANI、PTh、PPy以及相应的衍生物。n型CPs电导率低、稳定性差，发展较为缓慢，直到2022年发现聚（苯并二呋喃二酮）并创造n型CPs电导率>2000 S/cm的纪录[83]后才得到更多关注。

CPs 材料具有高的导电性、低的等效串联电阻，广泛应用于固态电解质电容器。与传统的电解质相比，CPs材料可显著提高电容器的电容量和工作电压，也具有更好的频率响应和耐高温性能[84~87]。在超级电容器的电极材料中，CPs 材料因其高的电导率、良好的电化学性能获得较多应用。CPs 材料与石墨烯、活性炭复合后，可实现更高的能量密度和功率密度，适合高效能量存储和快速充放电的需求。此外，CPs 材料对温度具有良好的敏感性，在温度变化时可调节电阻值，广泛应用于热敏电阻器；CPs 材料在不同压力下电阻发生变化，可应用于压敏电阻器、压力传感器、应变计。

当前，全球CPs材料市场规模为数十亿美元并保持稳健增长。电子设备的小型化与轻量化、可穿戴设备和柔性电子产品蓬勃发展、高性能储能设备需求增加等构成相关市场增长的动力，CPs材料在医疗器械、智能织物、传感器方向的应用也成为新的市场增长点。全球CPs材料市场主要在中国、日本、韩国、印度，电子制造业、新能源汽车产业是主要的发展驱动力。北美洲、欧洲在CPs技术研发和高附加值应用方面具有优势，如航空航天装备、医疗器械、绿色能源等。

（五）电极浆料

电极浆料是电容器、电池、其他储能设备中的关键材料之一[88]，主要由活性材料、导电剂、黏合剂、溶剂组成，直接影响电极的电化学性能、寿命和稳定性。电极浆料可通过精确的涂覆或印刷工艺施加在介质材料之上，用于形成电容器的内外电极。内电极浆料用于形成多层陶瓷电容器内部的电极层，需有良好的导电性和适当的烧结性能，以保证在烧结过程中与介质材料的良好结合。端电极浆料用于在电容器的两端形成连接外部电路的端电极，既需要良好的导电性，还要求具有较强的附着力、与外部焊接材料的兼容性。

在二次电池的电极浆料组成成分中，传统的活性材料有石墨、锂镍钴锰氧化物、$LiFePO_4$等。随着电池技术的发展，硅基负极材料、富镍正极材料等新型材料开始用作电极浆料，以进一步提高能量密度。导电剂的选择和优化对浆料的导电性至关重要，炭黑是传统的导电剂，碳纳米管、石墨烯等纳米材料开始引入以提高浆料的导电性。聚偏氟乙烯是常见的黏合剂，而水性黏合剂、可降解黏合剂等新型黏合剂材料可同步提升环保性和电极的电化学性能。均匀分散电极浆料中的各组分是制备高性能电极的关键步骤，超声波分散、球磨等先进技术逐步取代传统的高速搅拌技术，能够有效改善浆料的均匀性、减少团聚现象并提高电极的综合性能。此外，浆料涂布的均匀性和厚度直接影响电极的性能，刮刀涂布、喷涂、流延涂布等新型涂布技术可显著改善电极的厚度控制能力、表面光滑度和附着力。

当前，全球电极浆料市场规模为数十亿美元。得益于电动汽车、可再生能源、消费电子、工业储

能需求的快速增加，预计电极浆料市场的年均增长率为6%~8%。特别是锂电池、超级电容器，对高性能电极浆料的需求仍将大幅增长。受此因素驱动，中国、日本、韩国成为全球电极浆料市场的主要增长区域。北美洲、欧洲企业在相关产品的高端应用和技术研发方面具有优势，区域内市场增长主要由新能源汽车、储能系统、先进电子设备的需求驱动。全球电极浆料市场主要由大型跨国公司主导，如德国巴斯夫股份公司、美国杜邦公司、韩国LG化学公司等。

六、通信技术产业关键电子材料应用进展

通信技术产业的核心电子材料主要有半导体材料（如Si、GaAs、GaN）、高频基板材料（如聚四氟乙烯、陶瓷基板）、光导纤维材料（如高纯度石英玻璃）、压电晶体材料等，用于制造高频器件、滤波器、天线、光模块等关键组件，对新一代移动通信、IoT、卫星通信领域的装备发展至关重要。其中，光导纤维材料、压电晶体材料作为居于核心地位的电子材料，应用前景广阔，从国际合作的大型研究项目到相关企业的创新研制，各方面均在深入探索相关材料的新特性和新应用，以支持通信技术朝着更高速度、更大容量、更广覆盖、更低能耗的方向发展，对材料的介电性能、热稳定性、信号传输效率等提出了更高要求，进而推动光导纤维材料、压电晶体材料的研发和升级。与此同时，相关材料的环境影响、可持续性问题逐步成为行业发展的重要考量因素。

（一）光导纤维材料

光导纤维是能将光从一端传输到另一端的人造纤维材料，由核心和包层构成：核心用于传导光信号，包层起到保持光信号在核心内反射传输的作用，确保光信号的有效传输[89,90]。光导纤维的直径通常在数个微米到数十个微米之间，使用的材料主要是透明的石英玻璃或塑料。这些材料的核心特性是具有高透明度和低损耗，可使光信号在长距离内传导而不显著衰减，对纯度要求极高，如通信用光导纤维的材料纯度要求达到8N甚至9N。

光导纤维的实际应用始于20世纪60年代（得益于激光技术的发展和驱动），在成功制造出低损耗的石英光导纤维（1970年）后，光导纤维通信时代开启，光导纤维获得快速发展和广泛应用。光导纤维的制备方法主要有预制棒法、CVD法：前者应用时将特定材料熔融，再在高温下通过拉丝机械拉伸成纤维，可精确控制纤维的直径和结构；后者属于在高纯度硅棒的表面通过化学反应沉积Si和其他掺杂材料的方法，主要用于制造光导纤维的预制棒。传统的CVD法衍生出多种变体，如改良的CVD、等离子体增强的CVD、气相轴向沉积等。

光导纤维的关键特性在于可在非常长的距离上传输光信号而损耗极小，并且传输的信息量远超同等条件下的电缆；使用光信号传输数据，不受电磁干扰的影响，可保证信号的稳定性和安全性。光导纤维构成了现代通信网络的基础，在高速互联网、数据中心之间的连接，远程医疗和教育等领域发挥着不可替代的作用。随着生物兼容材料和微型化技术的发展，光导纤维在医疗领域的应用更加深入，以内窥镜、激光手术、光动力治疗等为代表。光导纤维传感器具有灵敏度高、抗干扰能力强的优点，在环境监测、工业制造、航空航天装备等领域应用广泛。2022年的全球光导纤维市场规模约为58亿美元，预计到2030年将增长至115亿美元。未来，光导纤维材料和技术将进一步发展，支撑新一轮产业变革[91]。

（二）压电晶体材料

压电效应指某些电介质在沿一定方向上受到外力作用而变形时，内部产生极化并在两个相对表面上出现正负相反电荷的现象，可分为直接压电效应（机械应力产生电荷）、逆压电效应（电场引起材料形状变化）。压电晶体材料主要有两类：天然存在的压电材料，如石英；人工合成的压电材料，如$LiTaO_3$、$LiNbO_3$等。人工合成的材料通常具有更优异的压电性能，可满足特定应用的需求[92]。$LiTaO_3$、$LiNbO_3$均属于铌酸盐类，压电性能优异，兼有良好的电光特性、非线性光学特性，在光通信、激光技术、声表面波设备等领域应用前景广阔。$LiTaO_3$具有高的曲率系数、良好的化学稳定性，常用于制造声表面波器件、光学调制器等[93]。$LiNbO_3$具有$LiTaO_3$的大部分优点，还因其独特的非线性光学性在光学频率倍增、光学调制、非线性光学研究等领域得到广泛应用[94]。受电子和通信领域需求的推动，

2022 年的全球压电材料市场规模达到 200 亿美元。我国压电材料行业以陶瓷、晶体材料生产为主；在晶体材料方面，石英压电晶体是较为成熟的产品，但更高端的 $LiTaO_3$、$LiNbO_3$ 晶体发展水平不高，主要市场份额被日本企业占据。

压电晶体材料的应用领域涉及压电传感器 / 执行器、能量采集、生物医学应用、光电技术、通信技术等。在通信技术领域[95,96]，$LiNbO_3$ 等材料用于制造光学调制器，成为光导纤维通信系统中不可或缺的组件。新一代移动通信技术的发展，进一步带动高性能光学调制器的需求。在能量采集领域，压电晶体材料可将机械振动能转化为电能，为穿戴设备、无线传感器网络等提供能源解决方案。在生物医学领域，压电材料用于制造压电传感器 / 执行器，在药物递送、医学成像、病理研究等方面前景广阔。应用 $LiNbO_3$ 材料的非线性光学特性可促进激光技术发展，如作为激光频率转换的媒介、在全固态激光器中作为调 Q 开关等。尽管压电晶体材料在多个领域展现出应用潜力，但仍面临一些技术挑战，如提高材料性能、降低生产成本、优化制造工艺等。压电晶体材料特别是 $LiTaO_3$ 和 $LiNbO_3$，将在全球通信技术产业中发挥重要作用，促进经济社会发展。

七、我国关键电子材料未来发展方向与应对建议

（一）我国关键电子材料未来发展方向

智能移动设备、智能穿戴、IoT 等新兴技术的快速发展，对电子材料的性能、可靠性、精度等提出了更高要求。我国在高技术领域面临着更为激烈的国际竞争，而蓬勃发展的新技术路线可能革新甚至颠覆传统技术发展范式。以移动通信为例，当前我国第五代移动通信产业生态逐步扩大，但在网络覆盖广度 / 深度、融合应用、核心技术等方面仍存在一些不足，不完全适应经济社会高质量发展的需要；6G 技术研发业已铺开，然而 6G 理论创新、新模式生态构建等尚待突破，高端芯片的研发与制造面临诸多难题，迫切需要关键电子材料产业“补短板、填空白”，支撑新技术路线的重大创新，同步在全球产业链上构建比较优势并形成市场竞争力。

我国 IC 材料的发展方向是技术创新与产业升级。一方面，加速关键材料的国产化，特别是在高端芯片制造领域，推进硅片、光刻胶、电子特气等关键材料的国产替代。另一方面，在后摩尔时代，半导体制程节点的进步趋缓，单纯依靠工艺提升难以满足芯片性能需求，需要通过创新新型材料和器件结构来提升芯片性能，尤其是加快开发适应 IC 工艺的新型材料；同时加强我国 IC 行业关键设备的国产化能力，完善 IC 行业相关核心产业链的本土化建设，为国产 IC 产品进入高端市场确立关键基础。

国内 OLED 显示行业的发光材料仍需大量进口，关键材料的供应主要被美国、日本、韩国企业主导。我国在红、绿光材料的研发上已逐渐取得突破，但蓝光材料的发展仍然与国外企业存在显著差距。未来需聚焦蓝光材料进行突破，逐步实现我国 OLED 显示行业发光材料的国产化替代。同时积极研发新材料、新型器件结构，加快突破提升显示性能的关键材料与技术，如低功耗驱动技术、AI 系统集成技术、柔性制造技术等。以新一代高视觉维度的光场显示需求为牵引，采取涵盖材料、器件、模组、算法、整机的全链条协调和同步开发思路，推进全产业链协同创新；突破纳米 LED 显示相关的核心材料与关键技术，形成先发优势，抢占未来显示技术与产业制高点。

得益于晶硅光伏整个产业链的快速发展，我国晶硅光伏的光电转换效率不断打破纪录，成本快速降低，逐渐取得国际市场领先地位；未来需要逐步淘汰落后产能，降低晶硅光伏相关电子材料生产的能耗，发挥光伏技术的环保和节能优势。作为未来光伏技术的重要发展方向，钙钛矿太阳能电池相关材料及器件将进入快速发展阶段，我国在此领域已达到与国际同行相当的技术水平，未来将在具有更高稳定性的材料及器件工艺上获得更大进展。在有机光伏材料及器件研究方面，我国具有领先优势，未来将聚焦支撑有机光伏技术产业化的材料及器件展开研究。

电容 / 电阻产品的性能受到通信设备、计算机、汽车电子等领域的发展牵引，国内的高端电容 / 电阻行业发展水平与国际先进相比仍存在一定的差距。围绕电容 / 电阻产品微型化、高度集成化的发展趋势，加大高性能新材料、新工艺的研发投入，切实提升电容 / 电阻行业的技术水平和产品质

量，将有助于我国电容 / 电阻产业更好地参与国际市场竞争。近年来，国内在介电陶瓷、新型CPs等电容 / 电阻关键材料方面进展迅速，相关行业有望在国际市场上扩大占比。此外，在全球环保意识逐渐提高的背景下，绿色环保的电容 / 电阻产品更受市场欢迎，未来需要改善包括生产、使用、回收等环节在内的全生命周期环保性能，提高国际市场竞争力。

6G技术深入发展，未来将逐步实现“空天地”一体化的全球覆盖以及超高速率、超低时延、超大连接密度的通信能力。新型通信材料需具备极低的介电损耗、优异的机械性能、良好的加工性能，以满足高频线路板、天线等部件的制造需求；也需发展液晶聚合物、聚醚酰亚胺等高性能材料，适应高频线路板、天线、滤波器腔体等产品的技术要求。着眼通信技术产业高质量发展目标，应鼓励科研机构与生产企业开展协同创新研究，高效运用全产业链资源，全面突破产业链上的瓶颈环节。

（二）我国关键电子材料发展建议

我国关键电子材料产业基本形成了从基础研究到产业应用的完整产业链，在半导体材料、新型显示材料、动力电池材料等重点方向取得了显著成就。不可忽视的是，我国关键电子材料的整体发展与国际领先水平相比仍存在一定的差距，突出表现在高端材料技术自主性不足、产业链高端环节的核心技术掌控力不强、国际市场上的品牌影响力与标准制定权较弱。需要围绕高端化、绿色化、自主化、智能化发展方向，重点突破第三代半导体材料（SiC和GaN）、先进封装材料、新型显示材料、高性能储能材料等关键类型，推动我国关键电子材料产业高质量发展。① 突出高端化发展，突破材料性能极限。以第三代半导体应用为关键方向，加速SiC衬底缺陷控制技术攻关，推进8 in GaN同质外延晶圆产业化，开发β-Ga_2O_3、金刚石等超宽禁带半导体材料。在先进封装领域，重点突破2.5D/3D集成用low-α射线封装基板、导热系数>15 W/m·K的热界面材料、屏蔽效能≥80 dB的芯片级电磁屏蔽材料。在新型显示材料方面，着力提升Micro LED巨量转移良率、量子点电致发光材料寿命。② 追求绿色化发展，构建低碳制造体系。开发原子层沉积等原子级制造技术，将薄膜沉积材料利用率从传统CVD的30%提升至95%。推广超临界CO_2清洗工艺替代高污染酸碱清洗，实现晶圆制备废水减排90%以上。建立电子材料再生利用体系，确保Au、Pd等贵金属回收率>99%，突破La、Ce等稀土元素闭环循环技术，力争到2030年电子材料综合循环利用率超过50%。③ 实施自主化发展，增强供应链能力。针对12 in硅片用超高纯石英坩埚（纯度>99.999 9%）、光刻胶用光敏剂（深紫外光刻胶国产化率<5%）、CMP抛光垫（市场份额<10%）等亟待提升的材料类型，建立材料–设备–工艺协同创新机制，构建极端环境材料数据库，提升自主设计能力。采用集中突破的方式，合理支持被国外垄断的关键电子材料的创新性研发，推动龙头企业与科研机构之间的有组织科研，推动我国企业在该类电子材料方向上的技术突破；逐步在行业供应链体系中实现相关材料的国产化替代，最终形成覆盖材料、设备、产品的本土化供应链体系。④ 着力智能化发展，革新材料研发范式。建设电子材料基因工程平台，集成高通量计算、自动合成、智能表征等系统，将新材料研发周期从10年缩短至2~3年。开发材料数字孪生系统，实现从原子尺度模拟（密度泛函理论计算）到宏观性能预测的多尺度建模能力。

建议培育创新链强化、产业链整合、生态链协同的“三链融合”创新生态系统，即强化基础研究与应用研究创新链，构建“材料–器件–系统”垂直整合产业链，打造“产学研用”协同生态链；设立国家级电子材料创新平台，推动国产材料验证导入机制，布局颠覆性材料技术专利池，加速突破瓶颈技术；同步建设绿色制备工艺研发与循环利用体系，兼顾产业发展与“双碳”目标。① 合理加大基础研究的投入，保障高端电子材料的前沿和基础技术方向发展亟需，加强自主创新能力和技术积累。② 完善产业链协同机制，强化“产学研”合作，促进科研成果的高效转化与快速应用，建设具有国际竞争力的高端电子材料产业集群。③ 实施包括基础材料突破、装备配套突破、标准体系突破、专利布局突破在内的“四维突破”技术攻坚计划，积极参与国际标准的制定与推广，增强我国企业在全球市场中的影响力。④ 建立市场牵引、政策保障“双轮驱动”的产业推进机制，加快重点领域国产材料替代，设立电子材料产业基金，对突破“卡脖子”技术的企业提供优先支持。⑤ 人才自培和引进并举，

丰富人才培养的层次性，如建立电子材料卓越工程师学院、实施“新材料青年科学家计划”、设立国际材料人才驿站等，保障产业技术攻关和创新需求。⑥ 在开拓电子材料领域的前沿材料方向，如新型半导体材料（低k介电材料和高k栅电介质）、铁电材料（铪锆氧化物）、单壁碳纳米管材料、二维材料、纳米铜浆等，精准部署科研攻关项目，积极抢占行业未来发展制高点。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 12, 2024; **Revised date:** February 7, 2025

Corresponding author: Zhang Liqun is a professor from the School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include rubber materials science and engineering, polymer nanocomposites, bio-based polymer materials, and polymer processing engineering. E-mail: liqunzhang@scut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research and Strategies on the Competitive Situation of Electronic Materials Technology and Industry in China, the United States, and Europe” (2023-DFZD-35)

参考文献

[1] Zeydan E, Arslan S, Turk Y. 6G wireless communications for industrial automation: Scenarios, requirements and challenges [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 42: 100732.

[2] 张雅欣, 木其坚. 人工智能的能耗影响、挑战及有关建议 [J]. 中国投资, 2024 (ZA): 32–35.
Zhang Y X, Mu Q J. The impact, challenge and suggestions of energy consumption of artificial intelligence [J]. China Investment, 2024 (ZA): 32–35.

[3] Ding W P, Abdel-Basset M, Ali A M, et al. A survey of intelligent multimedia forensics for Internet of things communications: Approaches, strategies, perspectives, and challenges for a sustainable future [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 138: 109451.

[4] 刘畅, 缑珊珊, 于连超, 等. 新时期我国信息与电子领域工程科技发展研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 37–45.
Liu C, Xian S S, Yu L C, et al. Development strategies of engineering science and technologies in information and electronics in China for the new era [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(5): 37–45.

[5] 谢克昌. 新型能源体系发展思考与建议 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 1–8.
Xie K C. Strategic thinking and suggestions on new energy system [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 1–8.

[6] 赵鸿滨, 周旗钢, 李志辉, 等. 面向新兴产业和未来产业的新材料发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 23–34.
Zhao H B, Zhou Q G, Li Z H, et al. Development strategies of new materials for emerging industries and future industries [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 23–34.

[7] 彭玉鑫, 陈雪垠, 章阳坤. 柔性电子材料与器件在可穿戴传感领域的发展现状、挑战与创新策略 [J]. 材料工程, 2024, 52(8): 42–58.
Peng Y X, Chen X Y, Zhang Y K. Current status, challenges, and innovative strategies of flexible electronic materials and devices in field of wearable sensing [J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(8): 42–58.

[8] 刘帅, 张翔鸿, 刘狄, 等. 面向神经形态显示的有机电子材料与器件 [J]. 中国科学: 化学, 2024, 54(4): 510–520.
Liu S, Zhang X H, Liu D, et al. Organic electronic materials and devices for neuromorphic display [J]. Scientia Sinica Chimica, 2024, 54(4): 510–520.

[9] 叶曾瑜. 我国新型显示与战略性电子材料专利导航研究——以电子纸领域关键技术为例 [J]. 中国发明与专利, 2024, 21(1): 31–41.
Ye Z Y. Patent navigation research on new display and strategic electronic materials in China—Taking key technologies in the field of E-paper as an example [J]. China Invention & Patent, 2024, 21(1): 31–41.

[10] 张平, 陈岩, 吴超楠. 6G: 新一代移动通信技术发展态势及展望 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 1–8.
Zhang P, Chen Y, Wu C N. Six-generation mobile communication: Development trend and outlook [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 1–8.

[11] 贾玉, 张博文. 量子计算技术发展与创新研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2024 (7): 69–75.
Jia Y, Zhang B W. Research on quantum computing technology development and innovation [J]. Information and Communications Technology and Policy, 2024 (7): 69–75.

[12] Jiang Y W, Tian B Z. Inorganic semiconductor biointerfaces [J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3(12): 473–490.

[13] Ding L, Yu Z D, Wang X Y, et al. Polymer semiconductors: Synthesis, processing, and applications [J]. Chemical Reviews, 2023, 123(12): 7421–7497.

[14] 刘清, 薛德升, 高权. 世界半导体产业集群的研究进展与展望: 基于半导体组织模式视角 [J/OL]. 世界地理研究, [2024-12-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20240726.0949.002.html.
Liu Q, Xue D S, Gao Q. Research progress and prospect of world semiconductor industry clusters: From the perspective of semiconductor organization model [J/OL]. China Industrial Economics, [2024-12-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20240726.0949.002.html.

[15] Zhuang J C, Xu X, Feng H F, et al. Honeycomb silicon: A review of silicene [J]. Science Bulletin, 2015, 60(18): 1551–1562.

[16] Hausmann D, Becker J, Wang S L, et al. Rapid vapor deposition of highly conformal silica nanolaminates [J]. Science, 2002, 298(5592): 402–406.

[17] Clark J R. Chemistry of electronic gases [J]. Journal of Chemical Education, 2006, 83(6): 857.

[18] 何红振, 刘圆梦, 张金彪, 等. 电子特气的合成与纯化技术研究进展 [J]. 低温与特气, 2023, 41(1): 1–5, 46.
He H Z, Liu Y M, Zhang J B, et al. Advances in synthesis and pu-

rification of electronic special gas [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2023, 41(1): 1–5, 46.

[19] Li J, Yin Y M, Meng H. Research progress of color photoresists for TFT-LCD [J]. Dyes and Pigments, 2024, 225: 112094.

[20] Hassaan M, Saleem U, Singh A, et al. Recent advances in positive photoresists: Mechanisms and fabrication [J]. Materials, 2024, 17(11): 2552.

[21] Lin Q H. Polymeric electronic materials for microelectronics manufacturing: A review [J]. Polymer, 2023, 286: 126395.

[22] Zhang Y H, Yu H J, Wang L, et al. Advanced lithography materials: From fundamentals to applications [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 329: 103197.

[23] Cen J, Liu W, Xu J, et al. Single-component high-resolution dual-tone EUV photoresists based on precision self-immolative polymers [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64(3): e202415588.

[24] Kang Y K, Lee S J, Eom S, et al. Recent progress of inorganic photoresists for next-generation EUV lithography [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2024, 12(39): 15855–15887.

[25] Wang D H, Xu R F, Zhou D H, et al. Zn-Ti oxo cluster photoresists for EUV lithography: Cluster structure and lithographic performance [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493: 152315.

[26] 杨亮亮, 胡世明, 龚慧萍. 中国湿电子化学品发展现状与展望 [J]. 精细与专用化学品, 2023, 31(11): 1–9.
Yang L L, Hu S M, Gong H P. Development status and prospect of wet electronic chemicals in China [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2023, 31(11): 1–9.

[27] Ravi K D V, Woo K, Moon J. Promising wet chemical strategies to synthesize Cu nanowires for emerging electronic applications [J]. Nanoscale, 2015, 7(41): 17195–17210.

[28] Bong J H, Sul O, Yoon A, et al. Facile graphene n-doping by wet chemical treatment for electronic applications [J]. Nanoscale, 2014, 6(15): 8503–8508.

[29] Hu Z L, Liu J J, Zhao X L, et al. Organic anodes with nearly 100% initial coulombic efficiency enabled by wet-chemically constructed artificial solid-electrolyte interphase film toward high-energy-density organic full batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(37): 2402199.

[30] Ma J H, Xu N, Cheng J, et al. A review on the development of ceria for chemical mechanical polishing [J]. Powder Technology, 2024, 444: 119989.

[31] Lee H, Lee D, Jeong H. Mechanical aspects of the chemical mechanical polishing process: A review [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(4): 525–536.

[32] Zhao G Y, Wei Z, Wang W L, et al. Review on modeling and application of chemical mechanical polishing [J]. Nanotechnology Reviews, 2020, 9(1): 182–189.

[33] 高爽, 郑宇亭, 张志国. 第三代半导体发展现状及未来展望 [J]. 科技导报, 2024, 42(8): 29–38.
Gao S, Zheng Y T, Zhang Z G. Development status and future prospect of the wide band-gap semiconductors [J]. Science & Technology Review, 2024, 42(8): 29–38.

[34] Pan C F, Zhai J Y, Wang Z L. Piezotronics and piezo-phototronics of third generation semiconductor nanowires [J]. Chemical Reviews, 2019, 119(15): 9303–9359.

[35] 彭寿, 洪伟, 秦旭升, 等. 我国信息显示关键材料发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 85–93.
Peng S, Hong W, Qin X S, et al. Development strategy of key materials for information display in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 85–93.

[36] Kim K H, Song J K. Technical evolution of liquid crystal displays [J]. NPG Asia Materials, 2009, 1(1): 29–36.

[37] Schadt M. How we made the liquid crystal display [J]. Nature Electronics, 2018, 1: 481.

[38] 方庆, 吴有肇, 王峰, 等. 量子点液晶显示技术发展趋势与展望 [J]. 液晶与显示, 2023, 38(3): 267–275.
Fang Q, Wu Y Z, Wang F, et al. Development trend and prospect of quantum dot liquid crystal display [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2023, 38(3): 267–275.

[39] 季洪雷, 程尚君, 李鹏飞, 等. 量子点背光液晶显示技术的亥姆霍兹-科尔劳施效应 [J]. 中国光学, 2022, 15(1): 132–143.
Ji H L, Cheng S J, Li P F, et al. Illustrating the Helmholtz–Kohlrausch effect of quantum dots enhanced LCD through a comparative study [J]. Chinese Optics, 2022, 15(1): 132–143.

[40] Zheng C L, Yang W J, Chen Y J, et al. In situ characterization of thermal-induced evolution of structure/optical properties of heterogeneous 3D chiral soft photonic crystal polymer [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(2): 2412439.

[41] Tang C W, VanSlyke S A. Organic electroluminescent diodes [J]. Applied Physics Letters, 1989, 51: 913–915.

[42] Song J, Lee H, Jeong E G, et al. Organic light-emitting diodes: Organic light-emitting diodes: Pushing toward the limits and beyond [J]. Advanced Materials, 2020, 32(35): 2070266.

[43] Im Y, Byun S Y, Kim J H, et al. Recent progress in high-efficiency blue-light-emitting materials for organic light-emitting diodes [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(13): 1603007.

[44] Baker C E. Laser display technology [J]. IEEE Spectrum, 1968, 5(12): 39–50.

[45] Yamamoto K. Laser display technologies and their applications [J]. Advanced Optical Technologies, 2012, 1(6): 483–488.

[46] Parbrook P J, Corbett B, Han J, et al. Micro-light emitting diode: From chips to applications [J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(5): 2000133.

[47] An H J, Kim M S, Myoung J M. Strategy for the fabrication of perovskite-based green micro LED for ultra high-resolution displays by micro-molding process and surface passivation [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 453: 139927.

[48] Lee H E, Shin J H, Park J H, et al. Micro light-emitting diodes for display and flexible biomedical applications [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(24): 1808075.

[49] Preu R, Lohmüller E, Lohmüller S, et al. Passivated emitter and rear cell—Devices, technology, and modeling [J]. Applied Physics Reviews, 2020, 7(4): 041315.

[50] Glunz S W, Steinhauser B, Polzin J I, et al. Silicon-based passivating contacts: The TOPCon route [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2023, 31(4): 341–359.

[51] Ballif C, Perret-Aebi L E, Lufkin S, et al. Integrated thinking for photovoltaics in buildings [J]. Nature Energy, 2018, 3: 438–442.

[52] Scarpulla M A, McCandless B, Phillips A B, et al. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 255: 112289.

[53] Keller J, Kiselman K, Donzel-Gargand O, et al. High-concentration silver alloying and steep back-contact gallium grading enabling copper indium gallium selenide solar cell with 23.6% efficiency [J]. Nature Energy, 2024, 9: 467–478.

[54] Zhang D, Wang B, Gan Y, et al. New layered II–III–VI semiconductors: Promising materials for high performance solar cells [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2024, 128(4): 1582–1590.

[55] Kim J Y, Lee J W, Jung H S, et al. High-efficiency perovskite solar cells [J]. Chemical Reviews, 2020, 120(15): 7867–7918.

[56] Muñoz-García A B, Benesperi I, Boschloo G, et al. Dye-sensitized solar cells strike back [J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(22): 12450–12550.

[57] Liu C C, Shao L, Chen S H, et al. Recent progress in π-conjugated polymers for organic photovoltaics: Solar cells and photodetectors [J]. Progress in Polymer Science, 2023, 143: 101711.

[58] Tyagi V V, Rahim N A A, Rahim N A, et al. Progress in solar PV technology: Research and achievement [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 443–461.

[59] Liu W Z, Liu Y J, Yang Z Q, et al. Flexible solar cells based on foldable silicon wafers with blunted edges [J]. Nature, 2023, 617(7962): 717–723.

[60] Chen P, Xiao Y, Hu J T, et al. Multifunctional ytterbium oxide buffer for perovskite solar cells [J]. Nature, 2024, 625(7995): 516–522.

[61] Zhao K, Liu Q Q, Yao L B, et al. Peri-fused polyaromatic molecular contacts for perovskite solar cells [J]. Nature, 2024, 632(8024): 301–306.

[62] Gao F, Koster L A, Nguyen T Q, et al. Organic photovoltaics [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(28): 1802706.

[63] Karl L. Organic photovoltaics [J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(8): 16056.

[64] Chen Z Y, Ge J F, Song W, et al. 20.2% efficiency organic photovoltaics employing a π-extension quinoxaline-based acceptor with ordered arrangement [J]. Advanced Materials, 2024, 36(33): 2406690.

[65] Jiang Y Y, Sun S M, Xu R J, et al. Non-fullerene acceptor with asymmetric structure and phenyl-substituted alkyl side chain for 20.2% efficiency organic solar cells [J]. Nature Energy, 2024, 9: 975–986.

[66] 夏恒恒, 孙超, 赵重任, 等. 固态超级电容器的研究进展 [J]. 电子元件与材料, 2022, 41(12): 1272–1285.
Xia H H, Sun C, Zhao Z R, et al. Research progress of solid-state supercapacitor [J]. Electronic Components and Materials, 2022, 41(12): 1272–1285.

[67] Li D X, Zeng X J, Li Z P, et al. Progress and perspectives in dielectric energy storage ceramics [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(4): 675–703.

[68] Freeman Y, Lessner P. Evolution of polymer tantalum capacitors [J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5514.

[69] Guo Y, Wang S X, Du X F, et al. High-performance MIM-type aluminum electrolytic capacitors with durable waterproof and wide temperature window [J]. Energy Storage Materials, 2024, 71: 103685.

[70] Jia M, Zhang M G, Zeng Q, et al. High-performance solid capacitor using vapor phase polymerized PEDOT film [J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(4): 1979–1990.

[71] Allard C. High-entropy capacitors [J]. Nature Reviews Materials, 2022, 7(7): 500.

[72] Kim M H, Kim H K, Xi K, et al. Lithium-sulfur capacitors [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(7): 6199–6206.

[73] Liu R L, Wang J, Shen Z H, et al. AI for dielectric capacitors [J]. Energy Storage Materials, 2024, 71: 103612.

[74] Onen M, Emond N, Wang B M, et al. Nanosecond protonic programmable resistors for analog deep learning [J]. Science, 2022, 377(6605): 539–543.

[75] Barbi I. Series loss-free resistor: Analysis, realization, and applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12857–12866.

[76] 陈国华, 黄冰虹. 低温共烧低介电常数微波介质陶瓷的研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37(20): 28–43.
Chen G H, Huang B H. Low temperature co-fired microwave dielectric ceramics with low dielectric constant: A review [J]. Materials Reports, 2023, 37(20): 28–43.

[77] Chen D Q, Zhu X W, Yang X R, et al. A review on structure-property relationships in dielectric ceramics using high-entropy compositional strategies [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106(11): 6602–6616.

[78] 苗洋, 杨凯, 赵鹏, 等. 微波介质陶瓷产业体系发展研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 34–41.
Miao Y, Yang K, Zhao P, et al. Development of industry system of microwave dielectric ceramics [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 34–41.

[79] Shirakawa H, Louis E J, MacDiarmid A G, et al. Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene, $(CH)_x$ [J]. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, 1977(16): 578.

[80] Bharti M, Singh A, Samanta S, et al. Conductive polymers for thermoelectric power generation [J]. Progress in Materials Science, 2018, 93: 270–310.

[81] Gueye M N, Carella A, Faure-Vincent J, et al. Progress in understanding structure and transport properties of PEDOT-based materials: A critical review [J]. Progress in Materials Science, 2020, 108: 100616.

[82] 樊明如, 马德龙, 张朋龙, 等. 导电高分子材料制备及应用进展 [J]. 山东化工, 2024, 53(6): 130–132.
Fan M R, Ma D L, Zhang P L, et al. Progress in preparation and application of conductive polymer materials [J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(6): 130–132.

[83] Tang H R, Liang Y Y, Liu C C, et al. A solution-processed n-type conducting polymer with ultrahigh conductivity [J]. Nature, 2022, 611(7935): 271–277.

[84] He Q F, Sun K, Shi Z C, et al. Polymer dielectrics for capacitive energy storage: From theories, materials to industrial capacitors [J]. Materials Today, 2023, 68: 298–333.

[85] Ho J S, Greenbaum S G. Polymer capacitor dielectrics for high temperature applications [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(35): 29189–29218.

[86] Samtham M, Singh D, Hareesh K, et al. Perspectives of conducting polymer nanostructures for high-performance electrochemical capacitors [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104418.

[87] Naskar P, Maiti A, Chakraborty P, et al. Chemical supercapacitors: A review focusing on metallic compounds and conducting polymers [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(4): 1970–2017.

[88] 白碧, 李艳, 张建益, 等. 电子元器件电极浆料研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(1): 1–4.
Bai B, Li Y, Zhang J Y, et al. Study on electrode paste for electronic components [J]. Electronic Components and Information Technology, 2024, 8(1): 1–4.

[89] Markos C, Correa R A, Bang O, et al. Optical fibers: Materials and applications [J]. Optical Materials Express, 2021, 11(5): 1364.

[90] 宋向阳, 唐国武, 董国平, 等. 我国关键有源光纤材料发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 42–52.
Song X Y, Tang G W, Dong G P, et al. Development strategy of key active optical fiber materials in China [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 42–52.

[91] 项秋实, 王淼, 谢东辰, 等. 浅析光纤通信技术的原理及发展趋势 [J]. 数字通信世界, 2024 (3): 173–175.
Xiang Q S, Wang M, Xie D C, et al. Analysis of the principles and development trends of fiber optic communication technology [J]. Digital Communication World, 2024 (3): 173–175.

[92] Sekhar M C, Veena E, Kumar N S, et al. A review on piezoelectric materials and their applications [J]. Crystal Research and Technology, 2023, 58(2): 2200130.

[93] Smith R T. Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of lithium tantalate [J]. Applied Physics Letters, 1967, 11(5): 146–148.

[94] Jiang W T, Patel R N, Mayor F M, et al. Lithium niobate piezo-optomechanical crystals [J]. Optica, 2019, 6(7): 845.

[95] 周文彩, 王伟, 刘晓鹏, 等. 透明太阳能电池的研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37(8): 5–12.
Zhou W C, Wang W, Liu X P, et al. Research progress in transparent photovoltaics [J]. Materials Reports, 2023, 37(8): 5–12.

[96] 李政阳, 王彦正, 马天雪, 等. 智能压电声子晶体与超材料研究现状与展望 [J]. 科学通报, 2022, 67(12): 1305–1325.
Li Z Y, Wang Y Z, Ma T X, et al. Smart piezoelectric phononic crystals and metamaterials: State-of-the-art review and outlook [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(12): 1305–1325.