引用格式：曹晨，叶茂，江洪. 专利视角下全球第三代半导体材料加工装备技术创新发展研究[J]. 中国材料进展，2026，45(10)：1106-1112.

CAO C，YE M，JIANG H. Research on the Innovation and Development of Global Third-Generation Semiconductor Material Processing Equipment Technology from a Patent Perspective[J]. Materials China，2026，45(10)：1106-1112.

专利视角下全球第三代半导体材料加工装备技术创新发展研究

曹 晨[1,2]，叶 茂[1,2]，江 洪[1,2]

（1. 中国科学院武汉文献情报中心，湖北 武汉 430071）

（2. 科技大数据湖北省重点实验室，湖北 武汉 430071）

摘 要：第三代半导体材料加工装备技术在确保材料性能优势、推动技术创新和发展、提升第三代半导体产业整体竞争力方面具有重要作用。基于 Incopat 数据库，利用 Citespace、Excel 等分析工具，结合文献调研和专家咨询，对全球第三代半导体材料加工装备技术领域依次开展了专利申请趋势与技术生命周期、技术来源地与市场分布、研发机构竞争态势、热点研究主题技术进展等分析。研究表明，第三代半导体材料加工装备技术已从成长期过渡到成熟期，但在超宽带隙材料加工、高精度表面处理等细分领域，仍存在创新空间；日本和美国是主要技术来源国，中国在专利申请数量上增长迅速但国际布局滞后；研究热点集中在高精度衬底表面处理与平整化、外延生长精确控制与均匀性提升、集成化与自动化的加工装备制造。

关键词：第三代半导体；加工装备；专利分析；衬底；外延

中图分类号：TN305；G306 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-3962(2026)10-1106-07

Research on the Innovation and Development of Global Third-Generation Semiconductor Material Processing Equipment Technology from a Patent Perspective

CAO Chen[1,2]，YE Mao[1,2]，JIANG Hong[1,2]

（1. National Science Library(Wuhan)，Chinese Academy of Sciences，Wuhan 430071，China）

（2. Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology，Wuhan 430071，China）

Abstract：The third-generation semiconductor material processing equipment technology plays an important role in ensuring material performance advantages，promoting technological innovation and development，and enhancing the overall competitiveness of the third-generation semiconductor industry. Based on the Incopat database and using analysis tools such as Citespace and Excel，combined with literature research and expert consultation，this study conducted a sequential analysis of patent application trends and technology life cycle，technology source regions and market distribution，R&D institution competition situation，and hot research topic technology progress in the field of global third-generation semiconductor material processing equipment technology. Research has shown that the third-generation semiconductor material processing equipment technology has transitioned from the growth stage to the mature stage，but there is still room for innovation in sub fields such as ultrawide bandgap material processing and high-precision surface treatment. Japan and the United States are the main source regions of technology，while China has grown rapidly in the number of patent applications but lags behind in its international layout. The research hotspots focus on high-precision substrate surface treatment and planarization，precise control and uniformity improvement of epitaxial growth，and integrated and automated processing equipment manufacturing.

Key words：the third-generation semiconductors；processing equipment；patent analysis；substrate；extension

收稿日期：2025-05-08 **修回日期**：2025-07-11

基金项目：中国科学院文献情报能力建设专项资金资助项目（E4KZ261003）

第一作者：曹 晨，女，1988 年生，副研究馆员，Email：caoc@ mail. whlib. ac. cn

DOI：10. 7502/j. issn. 1674-3962. 202505004

1 前 言

第三代半导体材料因其宽禁带、高电导率、高可靠

性等优异性能受到国防工业的重视，在可再生能源、电动汽车、5G 通信等领域应用需求旺盛。世界主要国家纷纷把发展第三代半导体提升到国家战略高度。早在 2002 年，美国国防部高级研究计划局(DARPA)就启动并实施了“宽禁带半导体技术创新计划(WBGSTI)”[1]。2023 年，DARPA 发布“超宽带隙半导体计划(UWBGS)”[2]，旨在开发高纯度的超宽带隙材料，包括高质量、大面积超宽带隙衬底、高掺杂效率器件层、同质异质结以及超低接触电阻，突破半导体的性能和效率极限。2024 年，美国商务部出台了第三轮针对中国半导体行业的大规模出口管制措施，限制了 24 种先进半导体制造设备以及 3 种生产下一代芯片(包括氮化镓和碳化硅芯片)所必需的关键软件工具的出口[3]。欧盟委员会 2019 年批准第一个欧盟共同利益重点项目(IPCEI)计划，投资 17.5 亿欧元，将化合物半导体确定为重要领域[4]。英国政府 2021 年推出 ORanGaN 项目[5]，专注于 RF-GaN 产品和设备的制造工艺研发，旨在构建一个全新的 5G 设备自主供应链。日本经济产业省 2023 年发布《半导体・数字产业战略》修正案[6]，推动宽禁带半导体(如氮化镓和氮化硅)技术的发展，有利于增强日本在全球半导体市场的竞争力；2025 年宣布修改扩大出口管制清单，新增 21 项物品，包括先进半导体制造设备、相关软件及量子计算设备[7]。韩国政府 2021 年宣布正式推动包括碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)和氧化镓(Ga_2O_3)等材料构成的下一代功率半导体技术发展[8]。我国也将第三代半导体作为重点战略科技力量，力争 2030 年全产业链进入世界先进行列。

先进的加工装备技术是充分发挥第三代半导体材料性能优势的重要保障，直接影响着材料的质量、性能和可靠性。例如：飞秒激光照射 SiC 衬底可以增强化学机械抛光效率，改善表面平坦度和粗糙度[9]；电化学腐蚀在探索第三代半导体及其相关器件制造性能方面发挥着重要作用[10]。然而，当前第三代半导体材料的加工装备技术仍面临诸多难题，如衬底失配[11]，抛光过程中存在的表面质量差和去除效率低[12]，脆性材料切割效率低与质量差[13]，不同材料外延制造的工艺复杂和成本高[14]、热场部件的耐腐蚀性待提高[15]。

在第三代半导体产业链中，衬底和外延的制造对于半导体器件的性能和质量影响重大，衬底加工装备和外延加工装备是半导体制造的基础和关键装备[16]，因而开展面向衬底和外延的第三代半导体材料加工装备技术的创新发展研究，有望突破现有技术瓶颈，实现加工技术的突破，为第三代半导体材料及器件的大规模应用奠定基础，推动相关领域的技术创新和发展。

专利作为技术创新的重要载体，通过专利分析可以了解现有技术的发展水平。本文通过分析全球第三代半导体衬底和外延加工装备技术专利数据，结合文献调研、专家咨询，从专利申请趋势、技术来源国与市场国、研发机构竞争态势、热点研究主题等多角度，全面揭示全球第三代半导体材料加工装备技术创新发展的现状，并展望未来创新发展趋势。

2　数据来源与检索策略

综合对比 Derwent 数据库、智慧芽数据库和 Incopat 数据库，兼顾数据覆盖的全面性、可得性与分析功能的多样性等，本文选择 Incopat 专利数据库作为专利数据来源。首先制定“第三代半导体衬底加工装备技术”的检索策略：((TIAB=((" wide bandgap semiconductors" OR "third generation semiconductor" OR " silicon carbide" OR "SiC" OR " gallium nitride" OR "GaN" OR " zinc oxide" OR "ZnO" OR " aluminum nitrogen" OR " AlN" OR " gallium oxide" OR "Ga_2O_3" OR "diamond") AND "substrate") AND TI=(process* OR growth* OR produc* OR dic* OR slic* OR polish* OR grind* OR lapp* OR CMP OR strip* OR clean* OR dop* OR etch*)) AND (BCLAS1=("C"))), 其次制定“第三代半导体外延加工装备技术”的检索策略：((TIAB=((" wide bandgap semiconductors" OR " third generation semiconductor" OR " silicon carbide" OR "SiC" OR " gallium nitride" OR "GaN" OR " zinc oxide" OR "ZnO" OR " aluminum nitrogen" OR " AlN" OR " gallium oxide" OR "Ga_2O_3" OR "diamond") AND "epitaxial") AND TI=(process* OR growth* OR produc* OR MBE OR "molecular beam epitaxy" OR "CVD" OR "chemical vapor deposition" OR "LPE" OR "liquid phase epitaxy" OR "lift off " OR " PTV" OR " physical vapor transport" OR "HVPE" OR " hydride vapor phase epitaxy")) AND (BCLAS1=("C"))), 采用块检索，检索日期为 2025 年 2 月 20 日，简单同族合并后共得到 11 732 件相关专利。利用 Citespace 和 Excel 进行文献计量及可视化分析。

3　专利申请趋势与技术生命周期

全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利申请趋势如图 1 所示，该领域的专利申请整体呈现稳步上升的态势。20 世纪 90 年代第三代半导体制备技术逐步突破，1993 年蓝光 LED 商业化，带动了氮化镓在照明、显示等行业光电器件中的广泛应用。1994 年美国 Cree 公司制备出 4H-SiC 晶片，引发全球碳化硅器件研发热潮。从 1995 年起，全球该领域年均专利申请量超过 120 件，到 2023 年高达 606 件，可见该技术领域的研发热情仍较高。

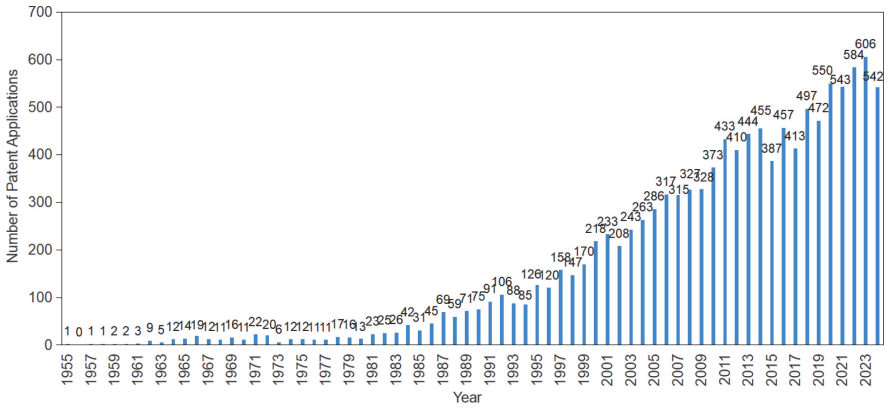


图 1 全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利申请趋势(单位：件)

Fig. 1 Global patent application trends for the third-generation semiconductor material processing equipment technology(unit：pieces)

全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利技术生命周期如图 2 所示，可以分为 4 个阶段：1959～1994 年，这一阶段专利数量和专利申请人数量均较少，技术还处于萌芽期，市场需求尚未完全形成；1995～2010 年，该领域专利数量快速增长，进入成长期；2011～2014 年，专利数量相对稳定，但申请人数量开始大幅下降，一定程度反映出技术相对成熟，市场需求趋于稳定；2015～2023 年，专利数量和专利申请人数量仍在小幅增长，说明该技术领域的创新仍在持续，但规模较小，技术的需求和价值可能逐渐体现在特定细分市场或新兴市场中。

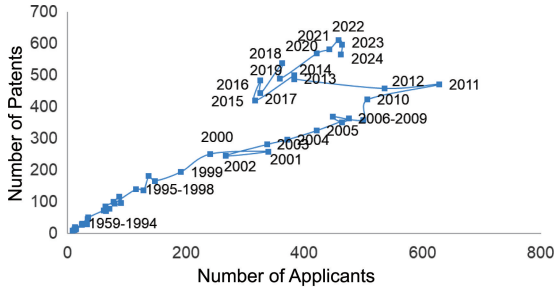


图 2 全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利技术生命周期

Fig. 2 Global patent technology life cycle for the third-generation semiconductor material processing equipment technology

4 技术来源地与市场分布

在专利申请中，优先权国别是申请人首次提出专利技术的地点，是追踪技术研发源头的关键线索；专利公开国别显示了专利信息被公开的国家或地区，反映了专利相关的技术或产品可能布局的主要地区，是判断市场目标的重要依据。全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利技术来源地与市场分布如图 3 所示，日本、美国是全球该技术领域的主要技术来源国且十分注重在其他国家/组织的市场布局，尤其日本在美国、欧洲专利

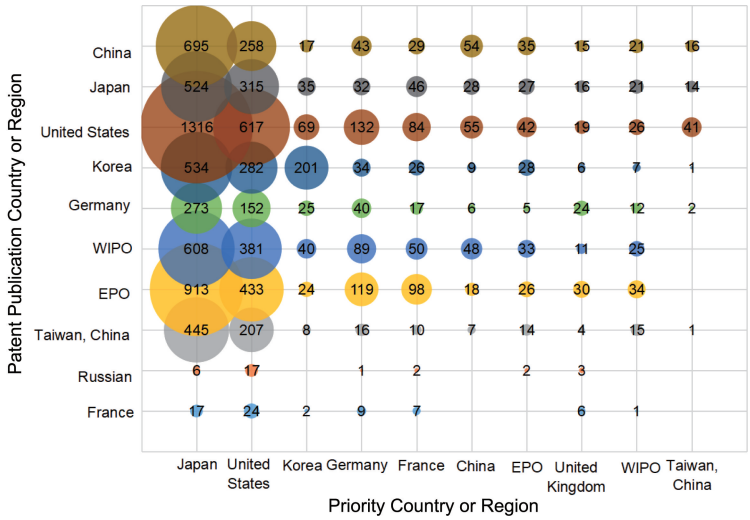


图 3 全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利技术来源地与市场分布(单位：件)

Fig. 3 Global source regions and market distribution of patent technologies for the third-generation semiconductor material processing equipment technology (unit：pieces)

局(EPO)、中国、世界知识产权组织(WIPO)均布局了较多专利，可见日本十分注重第三代半导体材料加工装备技术在全球市场的拓展，以保障其全球市场的竞争力。中国在该技术领域的创新起步晚，俄罗斯、法国是市场空白点，全球市场布局仍有待拓展。

5　研发机构竞争态势

全球第三代半导体材料加工装备技术领域 TOP10 专利权人如图 4 所示。有 7 家为日本机构，可见日本研发机构在该技术领域的实力强劲。其中，住友电气工业株式会社以绝对专利数量优势位列第一，其专利主要涉及碳化硅衬底、外延晶片的制造方法以及氮化物基板的晶体生长及制造方法等。2024 年 5 月，日本住友化学公司开发出一种制造 3 英寸独立 GaN 衬底的孔辅助分离(porous-assisted separation，PAS)方法[17]。入围 TOP10 的中国机构有湖南湘能华磊光电股份有限公司、西安电子科技大学、中国科学院半导体研究所，其中，湖南湘能华磊光电股份有限公司的专利申请量居全球第二，该公司主要从事氮化镓材料及器件相关的研发工作。

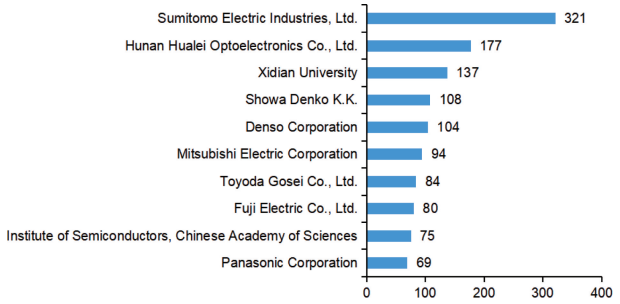


图 4　全球第三代半导体材料加工装备技术领域 TOP10 专利权人(单位：件)

Fig. 4　Top 10 global patent assignees for the third-generation semiconductor material processing equipment technology(unit：pieces)

6　热点研究主题技术进展

为了了解全球第三代半导体材料加工装备技术领域最新的专利技术进展，本文选取近 10 年的专利数据(申请日范围：20141108~20241108)，利用 Citespace 软件进行对数似然比(LLR)聚类分析，发现相关专利主要集中于“衬底”“石墨”“金刚石”“外延”“二极管”“碳化硅”“晶体”等技术主题，如图 5 所示。

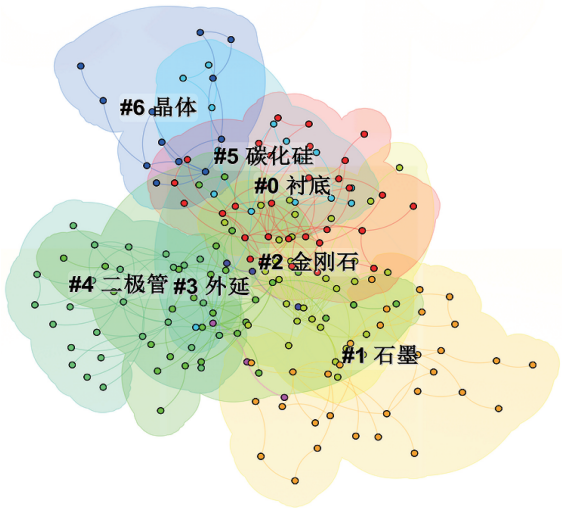


图 5　全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利热点聚类图

Fig. 5　Global patent hotspot clustering map for the third-generation semiconductor material processing equipment technology

各技术主题的关键词时间线图如图 6 所示。主题“衬底”的相关专利逐步向高效的衬底加工方向发展，包括衬底的研磨、抛光、去除、性能提升、辅助改善等工艺和方法；主题“石墨”的相关专利从基础材料制备发展到高级应用技术，尤其集中于石墨烯的制备、掺杂、以及在

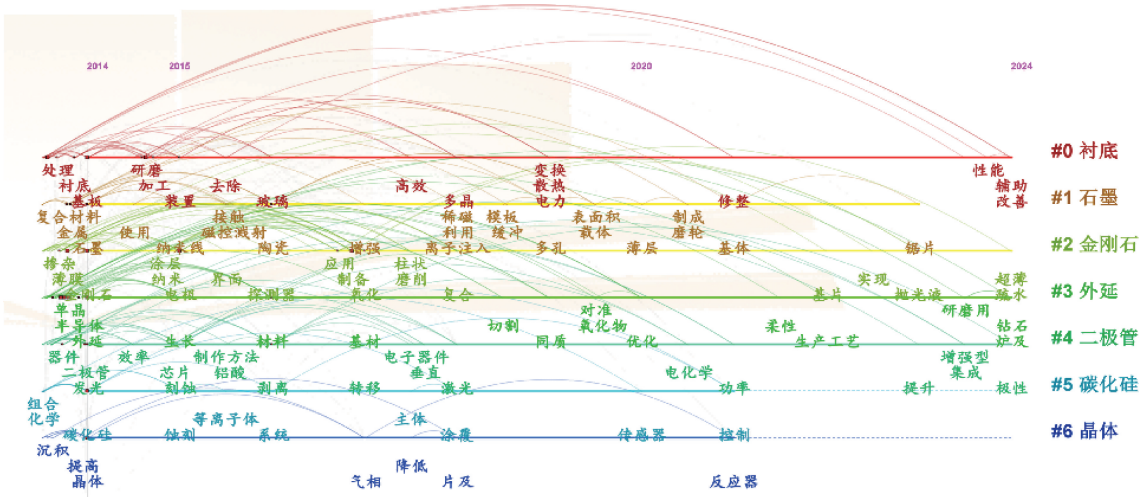


图 6　全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利关键词时间线图

Fig. 6　Global patent keyword timeline for the third-generation semiconductor material processing equipment technology

半导体器件中的应用方面；主题“金刚石”相关专利从纳米线、陶瓷复合涂层及砂轮向金刚石锯片、微波等离子体化学气相沉积(microwave plasma chemical vapor deposition，MPCVD)基片技术等方向发展；主题“外延”相关专利主要体现在 LED 制造、碳化硅基板和异质外延技术方面；主题“二极管”相关专利从氮化物和 GaN 基二极管的发光性能和制造工艺逐渐扩展到提高发光效率、优化制造过程、开发新型结构、拓展高级应用；主题“碳化硅”相关专利从基础材料加工扩展到了多晶碳化硅基板、厚膜外延以及集成器件的开发，显示出碳化硅在功率电子、高频应用等领域的应用前景不断扩大；主题“晶体”相关专利从基础晶体生长向高级晶体结构和器件制造方向转变，近年来涉及到高纯度多晶体、氮化物基板上的外延生长、晶体薄膜等技术。

全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利突现词按突现强度排序如图 7 所示。可见，“异质”“纳米”“等离子”“氧化锌”等词近年来的重要性或流行程度较高。

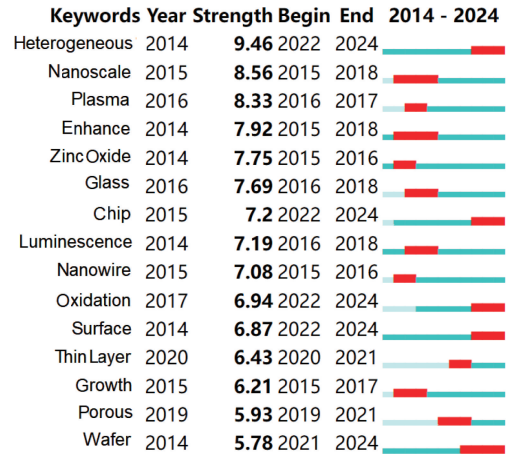


图 7 全球第三代半导体材料加工装备技术领域的专利突现词

Fig. 7 Global patent burst terms for the third-generation semiconductor material processing equipment technology

结合对专利内容的深入解读和对该领域相关文献的调研，本文认为全球第三代半导体材料加工装备技术领域的研究热点可以总结为以下 3 个方面。

6.1 高精度衬底表面处理与平整化

衬底表面的质量直接影响到外延生长的均匀性和材料的电学性能，尤其是在第三代半导体材料的应用中，衬底的表面处理尤为关键。近年来，开发高精度的衬底表面处理与平整化技术，包括精密抛光技术、表面清洁技术、表面钝化技术等，成为研究热点。Ma 等[18]总结了单晶碳化硅的精密抛光技术，包括化学机械抛光(chemical mechanical polishing，CMP)、光催化辅助化学机械抛光(photocatalysis-assisted chemical mechanical polishing，PCMP)、等离子体辅助抛光(plasma-assisted polishing，PAP)、电化学机械抛光(electrochemical mechanical polishing，ECMP)和催化剂辅助蚀刻(catalyst referred etching，CARE)，提出超声波振动辅助抛光、电解质等离子体抛光(electrolytic plasma polishing，EPP)可能是未来的研究方向。表 1 是主要精密抛光技术的效率/成本对比情况。

日本、美国在该领域申请布局了较多专利，福吉米株式会社、住友电气工业株式会社、三星电子株式会社、嘉柏微电子材料股份公司等机构是该领域的主要专利申请人，相关专利如：抛光和清洗方法、清洗剂以及抛光组合物和清洗剂组(WO2024202613A1)，SiC 多晶衬底的抛光方法(JP2022055549A)，抛光碳化硅的组合物和方法(EP3565862A1)。该领域专利的核心技术壁垒体现在研磨后的残渣清除、高效环保的清洗剂的开发、原子级平整度的控制、酸性抛光液的稳定性等方面。日本福吉米株式会社的专利 WO2024202613A1 创新性地采用螯合剂与表面活性剂复配纯水，实现对研磨后 SiC 基板表面的高效、温和清洗；日本住友电气工业株式会社的专利 JP2022055549A 采用金刚石机械抛光加胶体二氧化硅化学抛光两步法，突破多晶 SiC 全局平坦化瓶颈；美国卡博特微电子公司的专利 EP3565862A1 采用磺酸聚合物添加剂突破原有酸性体系配方，解决低 pH 下悬浮颗粒、水垢(如磷酸钙、碳酸钙、硫酸钙等)的分散难题。

表 1 精密抛光技术的效率和成本对比

Table 1 Efficiency and cost comparison of precision polishing technology

Technology	Material removal rate	Key equipments	Comprehensive cost
CMP	0.5~1.3 μm/h	Polishing machine, slurry circulation system	High
PCMP	Less than 1 μm/h	UV light source, photocatalyst device	Medium
PAP	Less than 0.2 μm/h	Plasma generator, precision irradiation system	High
ECMP	About 10 μm/h	Electrolytic power supply, electrode system	Low
CARE	0.1~0.2 μm/h	Catalyst plate, HF solution circulation	High
Ultrasonic-assisted	Increased by 30%~60%	Ultrasonic vibration module	Low
EPP	Less than 160 μm/h	High-voltage power supply, plasma reaction tank	Medium

Notes: CMP represents chemical mechanical polishing, PCMP represents photocatalysis-assisted chemical mechanical polishing, PAP represents plasma-assisted polishing, ECMP represents electrochemical mechanical polishing, CARE represents catalyst referred etching, EPP represents electrolytic plasma polishing, the material removal rate data for ultrasonic assisted indicates the incremental gain when integrated with other technologies such as CMP

6.2　外延生长精确控制与均匀性提升

提高外延生长过程的精确性和材料的均匀性也是一个研究热点领域。精确性包括对温度、压力、气体流量、反应时间等参数的优化和控制，均匀性是确保外延生长层在整个晶片表面上的一致性。Deng 等[19]将连续光谱反射率测量用于监测外延生长中的衬底温度；Gilbert 等[20]通过控制硅基材的表面拓扑，精确调节反相畴的形成与埋藏，提高 III-V 半导体的外延生长精度和晶体质量；Yang 等[21]通过金属箔前驱体供给设计以及 S 和 Mo 比例优化，实现蓝宝石基底上高效、可重复的单晶 MoS_2 外延生长。浙江芯科半导体有限公司、中国电子科技集团公司第五十五研究所、宁波合盛新材料有限公司等机构是该领域的主要专利申请人。相关专利如：改善碳化硅外延片浓度均匀性的方法(CN117976516A)、高均匀性氮化镓异质结材料结构及外延生长方法(CN115719758A)、改善碳化硅外延片掺杂均匀性的方法(CN118127620A)。

6.3　集成化与自动化的加工装备制造

集成化与自动化的第三代半导体材料加工装备制造是另一个研发热点与发展趋势，体现在工艺与设备的协同整合、模块化设计与集成、机器人与柔性加工协同、数智化系统控制等方面。例如，飞秒激光辅助刻蚀是一种新型集成加工方法[22]；Dong 等[23]在模块化高温气冷反应堆中，利用氦气作冷却剂，采用功率-压力协调控制方法提高设备性能和稳定性；Tanaka 等[24]将空间整形技术应用于激光改质剥离设备。哈尔滨工业大学、山东理工大学、潍坊凯华碳化硅微粉有限公司、福建省建瓯市富晶宝微粒有限公司、上海谷励智能设备有限公司等是该技术领域的主要专利申请人。相关专利如：应用于半导体衬底片加工的自动装卸顶出结构(CN114310530A)、全自动智能化半导体衬底片加工设备(CN114043379A)、基于柔性 GaN 薄膜的机器人系统及制备方法(CN118636165A)。

7　结　论

综合以上分析及对该领域技术发展态势的跟踪，本文得出以下结论：第三代半导体材料加工装备技术已从成长期过渡到成熟期，但部分细分领域，如超宽带隙材料加工、高精度表面处理，仍存在创新空间；日本、美国是全球第三代半导体材料加工装备技术领域的主要技术来源国，日本住友电气工业株式会社等机构在该技术领域布局大量核心专利。日本、美国通过世界知识产权组织(WIPO)、欧洲专利局(EPO)广泛布局全球市场，而中国虽然专利申请数量高且增长迅速，但专利多集中于中国本土，国际布局滞后；近年来，全球第三代半导体材料加工装备技术领域专利的研究热点主要集中在高精度衬底表面处理与平整化、外延生长精确控制与均匀性提升、集成化与自动化的加工装备制造方向。

推动我国第三代半导体材料加工装备技术产业创新发展的关键在于提升核心技术专利的排他性和产业链垂直整合能力。建议从以下几个方面着手：持续技术攻坚，强化高精度抛光技术、超宽带隙材料加工等细分领域的高价值专利培育，突破日本、美国等国家的专利封锁；强化集成装备的自主设计，推动飞秒激光辅助刻蚀设备、高温气冷反应堆控制系统等装备的国产化替代；注重数智化升级，开发 AI 驱动的工艺优化算法，如外延参数动态调节；调整专利战略，注重专利布局的攻防结合，除了在中国市场的防御性布局，还应注重在日本、美国等国家的进攻型专利布局；强化基础专利攻关，国内机构多聚焦于应用改进型专利，如抛光液配方、清洗工艺等，而核心装备技术基础原理方面的专利主要由国外机构把控；产学研联动，主攻高价值环节，逐步构建全球话语权。

参考文献　References

[1] NEWEY J. DARPA Sets Tough Goals for the Wide-Bandgap Community[EB/OL]. (2002-11-08)[2026-09-21]. https://compoundsemiconductor.net/article/82056/DARPA_sets_tough_goals_for_the_wide-bandgap_communitytechnical.

[2] DARPA Microsystems Technology Office. Ultra-Wide Bandgap Semiconductors[R/OL]. (2023-09-29)[2024-11-01]. https://www.grants.gov/search-results-detail/350399.

[3] BIS. Commerce Strengthens Export Controls to Restrict China's Capability to Produce Advanced Semiconductors for Military Applications[EB/OL]. (2024-12-02)[2025-07-06]. https://www.bis.gov/press-release/commerce-strengthens-export-controls-restrict-chinas-capability-produce-advanced-semiconductors-military.

[4] Gov. Wales. European Commission Recognises Importance of Compound Semiconductors by Unlocking up to €1.75 Billion for Industry Research and Innovation[EB/OL]. (2019-01-18)[2024-11-04]. https://www.gov.wales/european-commission-recognises-importance-compound-semiconductors-unlocking-eu175-billion-industry.

[5] Gov. UK. Future RAN: Diversifying the 5G Supply Chain Competition Winners[EB/OL]. (2022-10-13)[2024-11-01]. https://www.gov.uk/guidance/future-ran-diversifying-the-5g-supply-chain-competition-winners#orangan.

[6] 日本経済産業省. 半導体・デジタル産業戦略[EB/OL]. (2023-06-06)[2024-11-04]. https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semiconductors_and_digital.pdf.

[7] 日本経済産業省. 外為法の安全保障貿易管理に係る改正（重要・新興品目等）[EB/OL]. (2025-03-28)[2025-07-06]. https://www.meti.go.jp/policy/anpo/law_document/20250328_ristshiryou.pdf.

[8] Reuters. South Korea to Foster Local Development of Next-Generation Power Chips[EB/OL]. (2021-04-01)[2024-11-04]. https://www.reuters.com/article/technology/south-korea-to-foster-local-development-of-next-generation-power-chips-idUSKBN2BO4A6/.

[9] XIE X, PENG Q, CHEN G, *et al*. Ceramics International[J], 2021, 47(10): 13322-13330.

[10] CHEN Y, YU P, ZHONG Y, *et al*. ECS Journal of Solid State Science and Technology[J], 2023, 12(4): 045004.

[11] 张翼东. 硅基Ⅲ-Ⅴ族异质外延材料中反相畴与穿透位错抑制机理及相关测试方法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
ZHANG Y D. Investigation on the Suppression Mechanism Against Antiphase Boundaries and Threading Dislocations in Silicon-Based Ⅲ-Ⅴ Heteroepitaxial Materials and Relevant Measurement Methods[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024.

[12] ZHANG X J, SUN H B, FU Y G, *et al*. Advanced Optical Manufacturing Technologies and Applications 2022 and 2nd International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing[C]. Changchun: SPIE, 2023: 519-525.

[13] LIU B, LI X, KONG R, *et al*. Materials[J], 2022, 15(6): 2325.

[14] YU H. Comparison between GaN and SiC for Power Switching Transistor Application[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2020, 738(1): 012003.

[15] TU J X, HAO K, HUO C X, *et al*. Materials China[J], 2025, 44(7): 636-647.

[16] 杨金, 巩小亮, 何永平. 电子工业专用设备[J], 2022, 51(3): 8-13.
YANG J, GONG X L, HE Y P. Equipment for Electronic Products Manufacturing[J], 2022, 51(3): 8-13.

[17] YOKOYAMA M, HORIKIRI F, MORI H, *et al*. Applied Physics Express[J], 2024, 17(5): 1-5.

[18] MA G, LI S, LIU F, *et al*. Crystals[J], 2022, 12(1): 101.

[19] DENG S, WANG Y, CHENG J, *et al*. Journal of Manufacturing Science and Engineering[J], 2024, 146(7): 070901.

[20] GILBERT A, RAMONDA M, CERUTTI L, *et al*. Advanced Optical Materials[J], 2023, 11(15): 2203050.

[21] YANG P, LIU F, LI X, *et al*. Small Methods[J], 2023, 7(7): 2300165.

[22] WU C, FANG X, FANG Z, *et al*. Ceramics International[J], 2023, 49(18): 29467-29476.

[23] DONG Z, LI B, HUANG X, *et al*. Energy[J], 2022, 252: 124042.

[24] TANAKA A, SUGIURA R, KAWAGUCHI D, *et al*. Scientific Reports[J], 2021, 11(1): 1-8.