

我国化学合成高纯石英材料产业发展机遇与挑战

张联盟^{1,2}, 涂溶^{1,2*}, 李其仲³

(1. 武汉理工大学新材料研究所, 武汉 430070; 2. 材料复合新技术全国重点实验室, 武汉 430070;
3. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070)

摘要: 化学合成高纯石英是支撑半导体、光通信、航空航天等领域的关键基础材料, 可摆脱高品质天然石英矿资源约束, 成为我国实现高纯石英材料产业自主可控的重要路径。本文总结了全球化学合成高纯石英材料技术与产业发展现状和趋势, 分析了我国的发展现状和面临的挑战。研究发现, 我国已实现合成石英中高端产品规模化量产, 但因极紫外光刻、超高精度光学等领域仍受海外寡头垄断, 存在多重短板: 极限工艺机理研究不足, 多物理场耦合、微观缺陷与内应力调控能力薄弱, 高端产品均匀性与良品率不足; 核心沉积装备及精密控制系统受制于人, 国产化迭代能力有限; 缺少极端工况验证平台, 标准评价体系不完善, 高端产品验证周期长、准入门槛高。研究建议, 强化国家战略牵引与长期稳定投入, 系统研判产业特有技术壁垒, 明确关键核心技术攻关路线图; 构建以重大应用需求为牵引的深度融合创新生态, 聚焦极限工艺窗口下核心装备与工艺工程化的协同突破; 引育兼具材料、装备与工程视野的高端人才, 深化高水平国际合作; 建设国家级极端工况检测验证平台与自主标准评价体系, 健全上下游协同创新与风险共担机制, 打通“基础研究-工程放大-应用验证”全链条, 推动高端合成石英产业自主可控与高质量发展。

关键词: 化学合成石英; 高纯石英材料; 化学气相沉积; 半导体材料

中图分类号: F426.7 **文献标识码:** A

Opportunities and Challenges for China's High-Purity Synthetic Quartz Industry

Zhang Lianmeng^{1,2}, Tu Rong^{1,2*}, Li Qizhong³

(1. Institute of New Materials, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan 430070, China; 3. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: High-purity synthetic quartz is a pivotal foundational material underpinning semiconductors, optical communications, aerospace and other sectors. It circumvents resource limitations of high-quality natural quartz ores and provides a critical pathway for China to realize industrial self-reliance in high-purity quartz materials. This study summarizes the current status and trends in the global technology and industry development of high-purity synthetic quartz, and analyzes the development status and challenges faced by China. China has achieved mass production of mid-to-high-end synthetic quartz products; however, top-tier scenarios including extreme ultraviolet lithography and ultra-high-precision optics remain monopolized by overseas giants. Moreover, multiple bottlenecks still exist. First, there is a lack of in-depth understanding of extreme-regime process mechanisms, coupled with insufficient capabilities to modulate multi-physics-field coupling, micro-defects, and internal stress, leading to unsatisfactory uniformity and yield

收稿日期: 2026-07-20; 修回日期: 2026-08-30

通讯作者: *涂溶, 材料复合新技术全国重点实验室教授, 研究方向为材料科学与工程; E-mail: turong@whut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“关键材料体系自立自强战略研究”(2025-PP-02)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

of high-end products. Second, core deposition equipment and precision control systems are heavily reliant on imports, restricting domestic iterative upgrading. Third, there is a shortage of validation platforms for extreme operating conditions together with imperfect evaluation standards, resulting in prolonged qualification cycles and high entry thresholds for high-end products. Furthermore, this study proposes the following recommendations: strengthening national strategic guidance and sustained long-term investment, to assess industry-specific technological barriers and define roadmaps for key technological breakthroughs; fostering an integrated innovation ecosystem driven by major application demands while focusing on the coordinated advancement of core equipment and engineering process within extreme conditional windows; cultivating interdisciplinary talents spanning materials, equipment, and engineering, and deepening high-level international collaboration; establishing national testing platforms for extreme operating conditions together with indigenous evaluation standards systems, while improving upstream-downstream collaborative innovation and risk-sharing mechanisms, thus to integrate the entire chain spanning fundamental research, engineering scale-up, and application validation. These measures are expected to drive the self-reliant and high-quality development of the high-end synthetic quartz industry.

Keywords: synthetic quartz; high-purity quartz; chemical vapor deposition; semiconductor material

一、前言

高纯石英材料（如4N级： SiO_2 纯度 $\geq 99.99\%$ ，4N5级： SiO_2 纯度 $\geq 99.995\%$ ，4N8级： SiO_2 纯度 $\geq 99.998\%$ ）^[1]凭借其极致的化学惰性、优异的热稳定性及低膨胀系数，被公认为高端制造的“基石材料”，在半导体晶圆制造（如石英舟、扩散管）、单晶硅生长坩埚、光纤预制棒、精密光学元件及航空航天高温窗口等领域中的应用具有不可替代性^[2]。当前，全球高纯天然石英供应高度集中，尤其是美国凭借北卡罗来纳州Spruce Pine优质花岗伟晶岩矿的资源垄断，占据全球主要高端市场份额，使高纯石英成为典型的战略稀缺资源^[3]。

我国是全球最大的高纯石英消费国，2023年，全球高纯石英砂需求量达 $2.7 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ t，而我国高纯石英需求量约占全球需求量的65.01%，其中半导体、光伏及光通信领域占比超70%^[4]。然而，受限于国内天然石英矿源品质不足，高端产品长期依赖进口，2018—2023年的高纯石英进口依存度超90%^[4]。尤其是在半导体级石英材料领域，高纯石英被美国列入出口管制清单，使我国相关产业链面临严重的“卡脖子”风险，成为制约半导体、光伏等战略性新兴产业自主可控的关键短板。

在此背景下，化学合成高纯石英技术因可从源头规避天然矿物的杂质污染，被视为突破资源约束与技术封锁的战略方向。与传统物理提纯法相比，化学合成法通过气相沉积（CVD）^[5]、溶胶-凝胶法^[6]、四氯化硅氢氧焰水解^[7]等技术，以高纯硅源（如 SiCl_4 、有机硅单体）为原料，在可控反应环境中直接合成高纯石英材料，可实现杂质含量 < 1 ppm（1 ppm=0.000 1%）的超纯目标，并具备结构可设

计性与原料来源多元化等优势^[8]。目前，日本东曹（Tosoh）株式会社、德国贺利氏（Heraeus）公司已实现化学合成石英的规模化生产，产品覆盖半导体级与光伏级市场，而我国虽在光通信级化学合成石英领域取得初步进展，但在半导体级产品的纯度稳定性、大尺寸制备（ > 300 mm）的良品率及成本控制等方面仍存在显著差距^[9-10]。

尽管化学合成技术在实验室阶段已取得突破，但产业化进程仍面临多重挑战：一是高温反应工程难题；二是精密装备依赖进口；三是超净环境控制成本高昂；四是工程放大效应显著。与此同时，在全球半导体产业东移与我国“双碳”目标驱动下，2023年我国光伏装机量达到609 GW^[4]，到2030年将达到1200 GW；截至2026年6月底，我国算力规模达2185 EFLOPS（FP16），同比增长177%^[11]，同时加快“枢纽-区域-边缘”算力设施协同布局，进一步催生了对高性能、定制化高纯石英材料的爆发式需求^[12]。这一供需矛盾既凸显了我国发展化学合成高纯石英的紧迫性，也为技术攻关与产业升级提供了历史性机遇^[13]。

本文立足我国半导体、光伏等关键领域的战略需求，针对天然矿源短缺与高端产品进口依赖的双重困境，结合近年来我国高纯石英产业发展现状，综合梳理化学合成高纯石英的技术路径与产业化瓶颈，重点分析其在材料自主保障、产业链协同及新兴应用场景拓展中的作用。结合国内外技术发展动态与我国政策、市场优势，提出从核心技术突破、装备国产化替代到产业集群建设的全链条发展路径，并给出针对性的发展建议，以期为我国化学合成高纯石英材料的战略布局与工程实践提供参考。

二、全球化学合成高纯石英材料技术与产业发展现状与趋势

(一) 主流技术路径与演进

化学合成高纯石英技术历经多年发展，演进核心在于对材料纯度、结构均一性及光学性能极限的持续突破。进入 21 世纪，为满足极紫外光刻（EUV）、高能激光器、超高精度光学系统等尖端需求，技术重点从早期的杂质控制发展到对光学均匀性、本征吸收、缺陷密度及微观结构的精准调控，实现了从 4N 级到 6N 级以上的本质跨越。目前，化学合成石英产业化的主流技术路径为 CVD 法，其核心优势在于可实现原子 / 分子级别的纯度与结构控制。矿物提纯法与化学合成法（液相法、气相法）的适应场景和用途如图 1 所示。化学合成高纯石英技术的主流技术路径具体如下。

1. CVD/等离子体化学气相沉积（PCVD）路线

CVD/PCVD 是当前化学合成高纯石英产业化较为成熟的技术体系。该路线包括 SiCl₄ 高温水解、八甲基环四硅氧烷（D4）氢氧焰燃烧、等离子体氧化 3 类不同反应机制。SiCl₄ 高温水解指在 1600℃ 以上高温条件下发生气相反应直接沉积生成非晶态 SiO₂^[14]。D4 氢氧焰燃烧同样为高温火焰沉积，靠气相原位反应规避矿物原料带入的 Al、Fe 及碱金属杂质，产品可稳定达到 6N 级以上。与 SiCl₄ 相比，D4 前驱体具备低毒、无强腐蚀性，尾气不含 HCl、Cl₂

等腐蚀性组分，无需配套碱洗尾气处理装置，设备与环保成本更低，但燃烧不充分易引入微量碳残留。PCVD 主要用于光纤预制棒内腔沉积，能够实现光纤芯层折射率剖面的精确调控，是制备低损耗复杂结构光纤芯棒的关键技术^[15]；受限于腔内沉积的装备构型，并不适用于大尺寸块体高纯石英的制备；整体技术体系对反应腔室洁净度、气流与温度场均匀性、前驱体纯度要求苛刻，存在装备复杂度高、沉积速率与成本平衡难度大的问题。

2. 两步气相法

以高纯 SiCl₄ 或 D4 为前驱体，在 800~1200℃ 下，通过与氧气反应先沉积生成多孔 SiO₂ 烟尘预制体，再经高温脱水脱羟基、烧结致密化得到高纯石英。其中，轴向气相沉积适合制备大尺寸、高均匀性光纤预制棒；外部气相沉积（OVD）多用于大口径石英玻璃及光纤预制棒外层；改进化学气相沉积（MCVD）则侧重光纤芯层高纯度掺杂与高纯度控制。该路线可实现超低羟基与超高纯度，是半导体、高端光学及光纤领域的主流化学制备技术，但关键难点在于需严格控制杂质、气泡与应力。

3. 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法以正硅酸甲酯、正硅酸乙酯等金属醇盐为前驱体，在室温下通过水解-缩聚反应形成三维 SiO₂ 网络凝胶，再经干燥、排胶、脱羟基和高温致密化获得石英^[16]。此路线的核心优势在于分子水平的化学均匀性、易于实现多组分均匀掺杂，

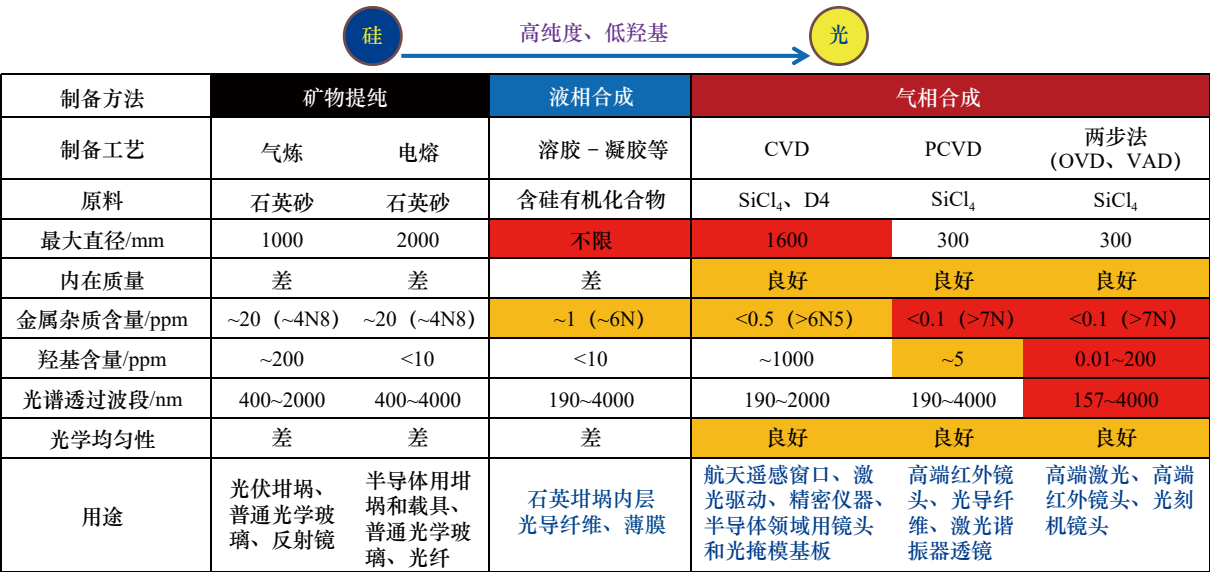


图1 矿物提纯法、液相法与气相法的性能指标及用途

并可成型复杂几何形状；但其技术瓶颈在于凝胶干燥和烧结过程中巨大的体积收缩易导致开裂，工艺周期长，难以实现大尺寸、无缺陷块体材料的规模化生产。

4. 水热法

以高纯硅溶胶、硅酸钠或有机硅源为前驱体，在密闭高压反应釜内，借助矿化剂构建高温、高压液相环境，完成 SiO_2 的溶解、溶质输运、籽晶表面再结晶过程，可直接生长结晶态石英单晶^[17]。该工艺依托液相环境实现离子级组分调控，可有效规避矿物原料晶格包裹杂质，能够制备低缺陷、低内应力、光学均匀性优异的石英单晶，是高端谐振晶体、偏振光学元件的主流制备路线。但该路线受高压反应釜设备限制，属于批次式间歇生产，单炉生长周期长达数十天，生产效率低、设备与时间成本高；同时，大尺寸块体石英玻璃直接成型难度大，现阶段更多用于单晶石英与高纯石英粉体制备，难以直接规模化制备大尺寸石英构件。

5. 气溶胶合成法

该工艺以 SiCl_4 、有机硅等液态硅前驱体为原料，经载气雾化形成微纳级气溶胶液滴，送入高温反应腔后，液滴在悬浮飞行过程中完成溶剂挥发、热解及氧化水解反应，原位生成单分散高纯 SiO_2 粉体^[18-19]。收集的 SiO_2 粉体经脱羟基纯化、压制成型、高温烧结致密化后，即可制得高纯石英坯体。这属于连续化粉体合成工艺，颗粒于气相环境中成核生长，团聚度低、粒径分布均匀，可精准调控粉体形貌与比表面积，依托纯净气相反应体系实现高纯度，金属杂质可控，能够低成本批量制备高纯石英粉，适配半导体石英器件、石英坩埚原料需求。该工艺的缺陷在于，粉体收集易混入设备磨损杂质，粉体残留羟基需进行严苛的高温氯化脱水处理，烧结控温排气不当易产生气泡、孔隙缺陷；目前主要用于量产高纯石英粉体，难以一步制备大块透明石英玻璃，多作为中间工序配套烧结工艺使用^[20]。

当前技术竞争焦点集中于更低的本征缺陷、更精确的羟基含量控制、更大的尺寸与更优的光学均匀性、更低的制造成本。未来，技术演进将向低能耗沉积工艺、原位监测与智能化控制、原子层沉积等界面与薄膜精准制备技术延伸^[21]。全球技术格局正从少数企业垄断核心技术，向以中国为代表的新兴力量实现高端产品量产突破的多

元化竞争阶段过渡^[13]。

（二）全球产业竞争格局与供应链分析

全球高端化学合成石英市场呈现出典型的技术与资本双密集型寡头垄断格局^[22]（见表1），其核心竞争力主要体现在多年积累的工艺诀窍、设备自研能力、应用数据库等方面。

美国 Corning 公司依托在光纤通信领域的领导地位，其化学合成石英技术（PCVD、OVD）与产品（光纤预制棒、光刻透镜坯料）成为全球最高水平的代表，形成了从超高纯硅源到终端光学系统的垂直技术链条。德国 Heraeus 公司作为全球最大的综合性石英材料供应商，产品线覆盖从半导体工艺用石英器件到光通信、高端光学基材的全领域，核心竞争力体现在大规模、高一致性制造能力以及对高温下材料析晶行为、金属杂质扩散的深刻理解等方面。日本 Shin-Etsu Quartz 株式会社、Tosoh 株式会社、Ohara 株式会社在半导体制造用化学合成高纯石英部件领域技术精深，尤其是在光掩膜基板、精密加工的石英环、窗片等方面占据主导地位；并与 TEL 株式会社、佳能株式会社、尼康株式会社等本土半导体设备企业深度协同，形成了难以复制的产业链闭环。上述企业在化学合成石英市场的垄断地位不仅体现在其产品上，更体现在其构建的供应链壁垒方面。① 核心装备自控：关键沉积设备（如大型 CVD 炉、PCVD 沉积台）多为自行设计制造，且不外售，因此构筑了第一道物理壁垒。② 工艺数据闭环：拥有长期积累的“材料工艺参数-微观结构-应用性能”庞大数据库，能针对 EUV 光学、深紫外激光等极端工况进行材料定制与性能预测。③ 垂直整合与标准制定：从高纯硅化工原料的定制到精密热加工、冷加工、纯化处理（如氯气脱羟），再到基于下游应用的严格检测标准（如激光损伤阈值、荧光背景、均质性），实现了全链条控制^[23]。

在合成石英领域，全球重点企业的专利布局如图2所示。来自日本的10家企业发明专利占比高达99.8%，未包含实用新型。来自中国的12家企业的发明专利总量占比为57.3%，近十年申请中的发明专利占比为57.7%，约43%为实用新型。中国企业整体呈现“基础材料研发以发明专利为主、工程化与装备改进以实用新型为辅”的二元结构，具有从实验

表1 全球化学合成高纯石英龙头企业核心竞争力对比

公司名称	所在国家	核心合成技术	关键产品	主要终端市场	战略化差异优势
Heraeus 公司	德国	火焰熔融法、CVD	合成石英锭、光纤预制棒、紫外光学元件	半导体、光通信、特种光学、医疗	垂直整合的材料科学创新能力；人工智能（AI）驱动的质量控制；广泛的定制化材料组合
Corning 公司	美国	火焰熔融法、CVD	EUV 光刻、高端光掩模材料、光通信预制棒	光通信、半导体、光掩模基板	支持英特尔、台积电、三星等芯片制造商 EUV 光刻、光掩模材料需求
Shin-Etsu Quartz 株式会社	日本	气相水解法等	合成大尺寸石英、大型光纤预制棒、光掩模基板	半导体、光通信、光掩模基板	全球领先的大尺寸石英锭 / 预制棒规模化制造能力；与硅片业务的强大协同效应
尼康株式会社	日本	专有气相合成技术	高纯石英、光学元件	半导体光刻	垄断光刻系统所需最高等级光学材料
三菱化学集团株式会社	日本	专有液相合成技术	实现 7N 级合成石英量产	半导体硅锭制造石英坩埚	占据全球主要高端合成石英砂市场份额
QSIL SE 公司	德国	等离子体熔融、低羟基石英加工	半导体蚀刻用石英、光伏高纯石英	半导体、光伏	半导体设备石英，获得泛林集团、应用材料公司等认证；欧洲本土高纯石英制品的主要供应商

室走向批量化生产过程中的阶段性专利特征。日本以 52.4% 的专利存量维持历史优势，但中国以 62.5% 的近十年增量宣告创新势能的转移。日本、德国传统巨头的“休眠”实为从专利扩张向秘密锁定的战略转型，中国企业的挑战在于将量的优势转化为新兴赛道质的壁垒，并在基础材料科学专利上补足与日本和德国的根本性差距。

因此，我国企业亟待突破的难点不仅在于实验室实现某一纯度指标，更在于能否建立稳定、可重复、低成本的规模化制造体系，并经受住下游严苛工况的长周期验证。当前，全球供应链正经历动态调整，在高端领域垄断依旧的背景下，我国的产业突破正在重塑中高端市场的竞争版图。

（三）技术发展趋势

1. 极限性能的协同突破

近年来，受 EUV 光刻、高能脉冲激光装置、空间光学载荷、核工业精密器件等尖端设备的快速发展驱动，核心部件对高纯石英的性能要求不断提高，并推向物理与化学极限。在纯度层面，需将关键金属杂质控制在亚 ppb 量级、羟基含量降至 0.1 ppm 以下，以抑制杂质－缺陷诱发的光束散射、紫外吸收与热致形变，满足高端 EUV 光刻石英体系的基础用材。针对 EUV 光学系统严苛的波前畸

变约束，TiO₂ 掺杂超低膨胀石英米级构件在室温测试区间内的热膨胀系数绝对值需控制≤20 ppb/K^[24]；同时，该类特种掺杂石英需配备极端辐照服役环境，在累计辐照量>10⁸ Gy 的高能射线作用下，折射率漂移量稳定控制在 Δn<5×10⁻⁸ 范围内，保障长期在轨与持续曝光工况下的光学稳定性^[25]。这依赖于对沉积 / 熔融过程中温度场、流场、反应动力学的超精密原位监测与闭环控制，实现毫开尔文温控与层流级流场调控，以抑制条纹、旋涡等微观不均匀性缺陷。借助原位氯掺杂与后退火工艺消除氧空位缺陷，可使材料在纳秒多脉冲工况、标准测试波长条件下，激光损伤阈值提升至 20 J/cm² 量级^[26]。发展单原子层精度掺杂技术，在 SiO₂ 网络中精准植入 F、Ge 等元素，可实现折射率与辐照硬化性能的主动调控^[27]。

2. 大尺寸精密制造与近净成形

随着半导体晶圆产线向 12 in（1 in=2.54 cm）规模化普及以及 450 mm 下一代制程研发推进，叠加光刻机光刻镜头、航天光学载荷等领域的需求，化学合成石英逐渐向大尺寸、高精度、复杂构型近净成形发展^[28]。制备直径>1.5 m、厚度>0.3 m 且内部无残余应力、无双折射的光学级均匀坯体是当前的工程极限，其挑战在于超大型沉积 / 熔融装备的设计制造、多物理场耦合的模拟与验证以及防止重

序号	申请人	专利申请 总量	近10年专利 申请总量	近10年专利 申请占比	发明专利 申请总量	近10年发明 专利申请总量	近10年发明 专利申请占比	国家
1	信越化学工业株式会社	1091	390	35.75%	1,089	390	35.81%	日本
2	Heraeus公司	888	132	14.86%	886	132	14.90%	德国
3	赫罗伊斯石英玻璃 股份有限两合公司	786	129	16.41%	785	129	16.43%	瑞士
4	Shin-Etsu Quartz株式会社	769	61	7.93%	766	61	7.96%	日本
5	尼康株式会社	375	0	0.00%	375	0	0.00%	日本
6	旭硝子株式会社	333	8	2.40%	333	8	2.40%	日本
7	精工爱普生株式会社	297	2	0.67%	297	2	0.67%	日本
8	湖北菲利华石英玻璃 股份有限公司	249	202	81.12%	134	105	78.36%	中国
9	宁夏盾源聚芯半导体 科技股份有限公司	191	178	93.19%	140	132	94.29%	中国
10	江苏太平洋石英股份有限公司	185	128	69.19%	81	60	74.07%	中国
11	三菱化学株式会社	185	35	18.92%	185	35	18.92%	日本
12	HOYA株式会社	181	10	5.52%	181	10	5.52%	日本
13	江苏亨芯石英科技有限公司	151	145	96.03%	110	104	94.55%	中国
14	浙江美晶新材料股份有限公司	147	147	100.00%	80	80	100.00%	中国
15	日本超精石英株式会社	145	0	0.00%	145	0	0.00%	日本
16	北京凯德石英股份有限公司	119	109	91.60%	72	72	100.00%	中国
17	科发伦材料株式会社	116	0	0.00%	114	0	0.00%	日本
18	Corning股份有限公司	97	2	2.06%	97	2	2.06%	美国
19	内蒙古欧晶科技股份有限公司	93	90	96.77%	32	21	65.63%	中国
20	连云港神汇硅材料 科技有限公司	90	90	100.00%	34	34	100.00%	中国
21	凯盛石英材料(黄山) 有限公司	80	71	88.75%	23	23	100.00%	中国
22	Tosoh株式会社	60	0	0.00%	60	0	0.00%	日本
23	长飞石英技术(武汉) 有限公司	57	57	100.00%	52	52	100.00%	中国
24	中国建筑材料科学 研究总院有限公司	49	26	53.06%	40	25	62.50%	中国
25	蚌埠玻璃工业设计研究院	41	39	95.12%	34	32	94.12%	中国

图2 合成石英全球重点企业专利布局图
注：数据截至2026年8月，来源于himmPat黑马数据库。

力变形与开裂的退火工艺^[29]。相关技术解决方案趋向于多源同步沉积、自适应分区加热与基于数字孪生的工艺预测^[30]。在复杂构型方面，针对非球面透镜、自由曲面集成等复杂构件，采用精密热压成型、光固化增材制造与溶胶-凝胶等复合工艺，能够实现近净成形，保持较高曲面轮廓精度，规避传统加工与装配的误差累积。未来，将向更大尺寸与高精度突破，同时探索结构-功能一体化集成与AI驱动的工艺优化，持续适配高端制造的严苛需求。

3. 功能化改性与多性能集成

当前，半导体、航空航天、高端光学等领域对

材料的需求逐渐从单一性能向多性能协同升级。通过微量改性元素掺杂调控、异质复合与结构-功能一体化设计，可实现化学合成石英材料的功能拓展与性能协同集成。例如，通过微量TiO₂、GeO₂、P₂O₅等单一或复合元素改性强化，可使其热膨胀系数精准调控至0.1~1.0 ppm/K^[31-32]，同时提升抗辐照性能与力学强度，协同拓展激光增益、紫外屏蔽等光学功能，实现从光学功能到结构支撑再到耐环境防护等多功能融合，大幅减少装配误差与失效风险，适配EUV光刻、航天光学载荷等场景。目前，仍需攻克微量改性掺杂带来的均匀性、界面相容性以及

工艺兼容性等挑战；未来将向光致变色、温敏等智能响应型材料，从宏观结构到微观功能再到纳米涂层跨尺度集成方向演进，持续适配高端装备的复杂需求。

4. 绿色智能制造与全流程成本优化

在高端产业绿色转型政策、“双碳”目标及高端制造业成本管控需求的多重驱动下，化学合成石英行业正朝着“能耗降低-资源循环-成本优化”协同体系演进，依托全流程技术革新实现环境与经济效益的有效统一。行业积极研发微波等离子体、感应耦合等离子体等低热惯性、高能量利用率的沉积-熔融技术，用以替代传统电阻加热工艺，将单位产品能耗降至 5 (kW·h)/kg 以下^[33]；推动建立以绿电为主体的供能体系，配套余热回收系统并探索碳捕获前瞻技术。建立全物质流分析的生产循环系统体系，提升 Si、Cl 等关键元素的厂内回收率；借助数字孪生、AI、机器学习，结合生产大数据与第一性原理计算，实现优化工艺参数与产品性能预判，降低化学合成高端石英的综合成本。目前，Heraeus 公司、Tosoh 株式会社、湖北菲利华石英玻璃股份有限公司等企业已通过在生产中部署 AI、机器学习与先进分析技术，实现了产品能耗的降低。未来，随着全链条工艺迭代以及算力基础设施的全面发展，化学合成高纯石英成本有望进一步降低，推动产业向零碳、高效、低成本方向发展。

三、我国化学合成高纯石英材料发展现状与深度剖析

化学合成高纯石英领域的技术攻关是从基础理论突破到工程工艺验证，再到产业化集成的系统性工程。经过多年的持续投入，我国已经跨越了从无到有的历史阶段，部分产品实现了对国际垄断的突破，但整体上仍处于由中高端向极限性能追赶的关键时期，呈现出技术突破、产业扩张与深层制约并存的复杂图景。我国化学合成高纯石英的主要用途与核心指标如表 2 所示。

(一) 技术研发进展

我国的化学合成高纯石英进展体现在基础研究与工程化技术两个相互支撑的维度上。在基础研究与前沿工艺探索方面，国内高校及科研院所已有深

厚积累，研究焦点已从早期的仿制跟踪，逐步深入到成核机理、缺陷形成动力学、高温熔体结构演变等本质科学问题。例如，通过先进的光谱学和模拟计算手段，对羟基、氯基等关键杂质在 SiO₂ 网络中的结合状态与扩散行为有了更清晰的认识，为设计新型脱羟工艺与缺陷钝化方案提供了理论指导。在工艺路线方面，不仅对传统的 CVD / 火焰水解路径进行了深度优化^[30]，还在溶胶-凝胶^[31]、粉末烧结^[34-36]等非传统路线上开展了特色鲜明的创新工作，为复杂构件制备开辟了新思路。

积极进行处于实验室阶段的相关创新思路的工程化放大以实现产业化。目前，湖北菲利华石英玻璃股份有限公司、长飞石英技术（武汉）有限公司、南通晶体有限公司等企业已实现 6N~7N 级合成石英锭的稳定量产，并在光纤预制棒外包层、半导体扩散管等方面完成规模化落地应用。工程化突破的核心在于产品批次稳定性和一致性控制，通过反应器结构优化、多物理耦合精密调控、在线监测与闭环反馈等系统性工程手段，将实验室样品的优异性能转化为生产线上可重复实现的产品性能^[37]。但现阶段工程化能力主要覆盖中高端应用场景；面对 8N 级超高纯度、极高光学均匀性的装备需求，材料制备工艺窗口十分狭窄，实现稳定量产面临工程挑战^[38]。

面向不同应用领域，国内化学合成高纯石英工程化技术呈现分层突破格局。在光纤领域，通过 OVD 工艺引进、消化、再创新，依托多喷嘴架构，使沉积速率可达 150 g/min 以上^[39]；制备的光纤外包层 SiO₂ 纯度 ≥ 99.999%、羟基含量 ≤ 1 ppm，可满足 G.652D 常规通信光纤及 G.654E 超低损耗光纤量产需求^[40]。但在光纤芯棒制备的 PCVD 技术方面仍存在短板，如精密高频等离子体发生器、高精度气体配比控制系统等关键装备仍部分依赖海外厂商，制约了高纯度单模光纤芯棒的完全自主供给能力^[15]。据行业调研，在半导体领域，国内已建成规模化 CVD 合成石英产线，可批量供应刻蚀设备用石英反应管、晶圆承载环等部件，产品金属杂质 ≤ 5 ppb (1 ppb=10⁻⁹)、羟基含量 ≤ 10 ppm，并完成中芯国际集成电路制造有限公司、华虹宏力半导体有限公司等晶圆厂 500 h 以上刻蚀工艺兼容性考核^[10]。在光学领域，已实现部分规格合成石英毛坯的工程化供货，可生产直径为 50~200 mm、厚度为 5~50 mm 的

表2 我国化学合成高纯石英的主要用途与核心指标

应用场景	石英需求	制备难点	核心指标	单位	国内现有水平	国际领先水平
EUV 光刻	光学系统反射镜、掩模基板	掺 Ti 均匀性	膨胀系数（5~30 ℃）	ppb	±20	±10
			膨胀系数均匀性（20 ℃）	ppb	30	≤10
			直径	mm	900	1500
DUV 光刻（ArFi）	物镜与照明系统镜头	沉积温度均匀性、精密退火、高浓度掺氢	光学均匀性 PV-power	ppm	0.3	0.2~0.3
			应力双折射	nm/cm	0.3	0.2~0.3
			辐照后透过率下降	%	0.5	0.1~0.2
			直径	mm	400	400
光掩模基板（ArFi）	光掩模基板	沉积结构控制、高浓度掺氢	193 nm 内部透过率	%/cm	≥99.8	≥99.8
			累计 100 kJ/cm ² @193 nm	%	≤0.2	≤0.1
			辐照剂量后透过率衰减			
			应力双折射@632.8 nm	nm/cm	≤1	≤0.5
新型显示	显示生产用光掩模基板	超大尺寸石英槽沉	边长	mm	G10.5, 1620×1780	G11, 3000×3320
			透过率（300~500 nm）	%	>90	>90
新型光通信	石英管、石英棒	低过渡金属杂质含量、低羟基含量控制	羟基含量	ppb	1	1
			过渡金属杂质含量	ppb	1	1
精密光学	精密测量光学元器件	沉积温度均匀性、精密退火	应力双折射	nm/cm	1	0.5~0.8
			光学均匀性 PV	ppm	1	0.8~1.0
			直径	mm	600	1200
石英晶圆	光分路器用石英晶圆	低羟基含量、低应力双折射	羟基	ppm	1~50	≤15
			应力双折射	nm/cm	<3	<1
可控核聚变	石英窗口	高光学均匀性、高损伤阈值	光学均匀性 PV-power	ppm	4	2~3
			355 nm 体损伤阈值	J/cm ²	90	120
			边长	mm	450	800
深空探测	耐 60Co γ 辐照石英窗口	低微观缺陷控制	累计耐辐照剂量（400~2400 nm 透过率变化率 <1%）	Gy	1.97×10 ⁵	1.97×10 ⁵
			金属杂质	ppm	≤0.01	≤0.01
			直径	mm	1000	1200
高能激光	红外窗口	低金属杂质含量	@1064 nm 吸收	ppm/cm	1	0.3~0.5
			羟基	ppm	≤1	≤1
			>0.1 mm 的气泡数	个	0	0
合成石英腔体 / 环 / 炉管	LPCVD 设备用腔体、沉积密度控制、低金刻蚀环等部件	属杂质控制、低羟基控制	羟基	ppm	<30	<0.2
			金属杂质含量	ppm	<0.01	<0.01

注：本表对象为化学法合成石英，包含 Ti 掺杂超低膨胀合成石英、高氢改性合成石英等改性合成石英品种，区别于天然熔融石英，EUV 光刻掩模基板等场景采用 Ti 掺杂超低膨胀改性合成石英，归属于化学合成石英材料体系；国内现有水平为国内工程化试制、小批量生产条件下可稳定实现的性能，国际先进水平为海外头部厂商公开量产产品可达到的标杆性能上限，部分指标为行业公认区间归纳值，并非单一产品实测报告；2035 年远景目标参考国家关键战略材料专项、光刻材料、核聚变与深空探测材料相关发展规划，属于技术攻关预期指标；%/cm 代表单位长度样品的光学透过率衰减；热膨胀系数测试区间为-50~30 ℃，膨胀系数均匀性、应力双折射基准测试温度为 20 ℃，应力双折射特征测试波长为 632.8 nm，辐照类指标均在表格对应标注的辐照源、剂量条件下测得；本表数据来源于国内外石英厂商公开技术手册、SEMI 行业白皮书、相关领域综述与会议文献；已对原始数据有效数字进行规范化处理。LPCVD 表示低压化学气相沉积法。

坯体，折射率均匀性 $\Delta n < 1 \times 10^{-6}$ ；193 nm 深紫外波段外部透过率 >90%/cm，内部透过率超 98%/cm，已应用于紫外激光窗口片、普通成像光学透镜等中

低端场景，但高端深紫外光刻（DUV）镜头毛坯依旧依赖进口。面向航空航天与高功率激光需求，定制抗辐照合成石英样品经 10⁶ Gy γ 射线辐照后，

200~800 nm 波段透过率衰减 $\leq 2\%$ ，已实现卫星环境模拟^[41-43]；超低膨胀石英的热膨胀系数控制在 ≤ 1 ppb/K，适配高功率激光器谐振腔镜片的温度稳定性需求^[44]。

本研究数据源于 Web of Science 核心合集，为确保样本文献对化学合成高纯石英材料及其制备工艺演进的高效表征，构建了多维度复合检索策略：以“合成石英 / 二氧化硅”等核心主题词为基准，联合气相沉积工艺（如 CVD、MCVD、OVD、气相轴向沉积法（VAD）、PCVD）与关键前驱体（如 SiCl_4 、四乙氧基硅烷等）限定条件，通过布尔逻辑严格排除了介孔二氧化硅、碳纳米管、薄膜、涂层及石墨烯等异质文献干扰；经文献类型（研究论文与综述）筛选与系统化清洗，最终获取高质量有效英文样本文献 355 篇。合成石英研究重点主要聚焦于实现高纯度、低羟基、低缺陷、高光学均匀性以及大尺寸稳定制备。结合文献计量学与演进图谱分析，该领域的研究热点从早期的基础工艺探索，逐步向中后期的羟基消光系数、熔融石英陶瓷等微观结构缺陷演化方向深化，核心研究体系主要围绕 3 个层面展开。

1. 杂质控制与化学提纯机制

重点探究前驱体中的金属元素、氯、氢及各类杂质在反应、沉积、烧结全流程中的传递规律与去除机制。例如，通过调节 SiCl_4 水解工艺可有效优化 SiO_2 微观结构与烧结致密化，降低硅羟基浓度^[7]。在面向半导体大尺寸石英坩埚及光掩模基板的应用中，基于溶胶-凝胶法的超高纯合成石英粉体低成本化学合成已成为突破产业链壁垒的关键^[45]。

2. 微观结构缺陷与环境演化机制

主要针对氧空穴、非桥氧缺陷等微观结构缺陷开展研究。研究表明，通过控制玻璃虚构温度可有效减少结构应变键并提高光纤预制件的抗辐射损伤能力^[46]。同时，开展本征氧空位缺陷的探测与表征，对提升石英表面光学损伤阈值具有重要意义^[47]。

3. 宏观质量控制、成型工艺与功能复合

聚焦烟炱密度、残余应力及折射率均匀性等宏观质量难题。除传统熔制与 CVD 外，研究人员广泛采用先进成型技术，如基于溶胶-凝胶技术的增材制造稀土共掺杂磷酸盐玻璃成型方法^[48]、从溶液中增材制造透明石英玻璃工艺^[49]，以及用于制备复

杂形状光学元件的无压放电等离子烧结技术^[50]。

（二）产业化现状

随着技术的不断突破，我国化学合成石英产业进入产能快速扩张期。从产能和产品结构来看，国内企业已能供应满足光通信、半导体设备（部分环节）、特种光源等领域需求的大量中高端石英材料及制品，市场占有率稳步提升^[51-52]；产品结构正从单一的管、棒、板坯向复杂的舟、腔体、预成型件延伸。然而，产品矩阵呈现金字塔结构：底部和中部的产品供应充足，但用于 EUV 光刻、准分子激光、极高精度航天光学系统的高端材料依然主要依赖进口，相关产品大多处于送样、验证或小批量试用阶段^[33]。

2023 年，我国超 75% 的石英产能聚焦于技术门槛较低的光纤外包层用合成石英，主要适配常规光伏、通信光纤需求；约 25% 的产能分散于半导体与光学领域，可小批量生产 8 in 晶圆产线用石英舟、普通工艺管等部件，仅能满足国内中低端芯片制造企业的部分需求，且因单厂年产能多在百吨级别，缺乏千吨级规模化龙头，致使我国石英进口量常年维持在 90% 以上^[53]。在高端领域，面向 14 nm 及以下先进制程半导体的高精度反应腔、EUV 光刻光掩模基板等核心部件，要求金属杂质总量 < 0.5 ppb、羟基含量 ≤ 1 ppm、尺寸公差为 ± 5 μm ，相关产品多被日本 Shin-Etsu Quartz 株式会社、Tosoh 株式会社、德国 Heraeus 公司等企业垄断^[54]，国内仅少数科研机构能制备实验室样品，尚未完成国际先进产线认证^[55-56]。EUV 镜头级石英要求热膨胀系数变化 < 10 ppb/K、激光损伤阈值 ≥ 15 J/cm^2 ^[57-59]，全球仅日本尼康株式会社、德国肖特集团具备量产能力，国内尚未实现实验室级制备突破，采购成本远高于中低端产品；超高均匀性光学合成石英则被美国 Corning 公司、日本 Shin-Etsu Quartz 株式会社主导^[60]，国内现阶段仅完成小批量试样，未完全进入工程化应用^[23]。这种石英产业发展格局，不仅导致国内化学合成石英产业在全球竞争中缺乏话语权，更直接制约了我国半导体、高端光学、航天等战略产业的自主化进程，使核心装备关键材料供应面临严重“卡脖子”风险，下游企业承担高昂进口成本，供应链安全受国际环境波动影响显著。

当前，国内多家龙头企业已成为产业中坚力量，致力于打通“合成-热加工-冷加工”全链

条。同时，一批在沉积技术、精密加工、装备制造等领域的专精特新企业快速发展，初步形成了产业集群效应。但对比国际优势企业，国内企业多聚焦于特种工艺、装备配套或细分产品，以“小而专”填补细分市场，普遍存在体量小、抗风险能力不足、技术路线单一等短板，产业生态纵深度不足，规模化产能尚未完全形成。当前，日本 Shin-Etsu Quartz 株式会社、Tosoh 株式会社、德国 Heraeus 公司等企业已构建起涵盖超纯原料、核心装备、工艺软件、终端应用数据库的垂直封闭生态^[61-62]，而国内企业在生产规模、技术积累、产品谱系、品牌影响力及产业链协同上均存在系统性差距，与高端下游用户的协同研发机制仍不完善，短期内难以打破海外的垄断格局。

（三）面临的核心挑战

1. 工艺困境：极限工艺窗口掌控不足、机理认知欠缺与动态调控体系缺失

在工艺方面，国内虽已掌握化学合成石英基础工艺原理，但对高端制备的极限工艺窗口掌控薄弱。例如，在米级大尺度沉积过程中，每一处的温度、气流和化学反应的全域精准协同调控难度极大，难以同时实现亚 ppb 级杂质控制、超高均匀性与超低残余应力的严苛指标。这涉及海量工艺参数的协同优化，其复杂程度呈指数级增长。现阶段工艺优化多依赖试错积累，对多物理场耦合下石英的成核、生长、致密化的核心机制缺乏系统性认知，无法精准调控石英颗粒演化过程；对气泡、条纹、羟基等缺陷的形成与演化规律研究不足，缺乏针对性抑制手段，造成产品缺陷密度高、光学均匀性差^[63]。同时，国内对热应力与结构应力的生成及消除规律研究不深，传统退火工艺难以有效释放材料内应力，严重影响产品服役可靠性。此外，行业缺乏长期工程经验积累，尚未建立动态化工艺与环境调控体系，最终导致高端合成石英成品率偏低，难以适配半导体、高端光学等领域对材料稳定性与可靠性的极致需求。

2. 装备制约：核心制备装备与工业软件受到西方国家出口管制的制约、国产迭代能力不足

在装备方面^[64]，用于制备顶级合成石英的大型沉积炉、超精密退火炉、智能控制系统以及工业软件等核心技术产品，其设计制造存在极高的技术壁垒。

近年来，以美国为首的发达国家，通过其行政管制体系，对上述核心产品实施选择性出口限制^[12,65]，导致国内化学合成石英企业即便掌握了基础工艺原理，也无法将理论参数精准转化为实际产品性能，制约了产品的一致性、高端产品成品率。此外，国产装备因缺乏长期技术积累与工业数据沉淀、人才、足够的工业验证场景等，导致难以通过实际生产数据迭代优化来提高精度、稳定性和智能化水平。

3. 验证困局：验证周期长、服役业绩与信任缺失，极端环境验证平台、标准体系与风险共担机制缺位

在验证方面，高端石英材料是典型的资格认证型产品，其验证周期长、成本高、风险大。下游的光刻机、太空望远镜制造商对于更换材料供应商极为审慎，需要长达数年的数据积累和严苛的可靠性测试。国内材料缺乏在顶级装置中长期服役的历史业绩，难以获得用户的初始信任。下游用户与材料企业之间缺乏常态化的协同创新机制与风险共担体系，客户既不参与前期研发，也不愿分担验证过程中的潜在风险，致使材料企业独自承担研发投入、样品制备与验证失败的成本，且验证周期长达数年，资金与时间压力大。行业内缺乏统一的技术标准与检测评价体系，高校与企业“产学研”之间的数据共享、成果互认难度大，进一步加剧了成果转化的壁垒。同时，国内也缺乏能够模拟 EUV、强激光、强辐照等极端环境的权威验证平台，导致产品评价体系不完整，无法为材料改进提供精准反馈。此外，人才匮乏与创新体系低效使国内高纯石英产业发展长期陷入从基础研究难以突破、到工程化转化难落地、再到核心技术难以迭代的重重困境，制约了产业的高端化升级。

四、我国发展化学合成高纯石英产业的战略契机

当前，我国化学合成高纯石英产业正处在一个历史性的战略窗口期，这一机遇并非简单的市场增长，而是由内生性需求牵引、系统性能力积淀以及国家战略需求牵引三者共同塑造的、足以支撑产业实现从“跟跑”到“并跑”乃至局部“领跑”的结构性条件。

（一）庞大的内需市场与国家战略需求牵引

我国已成为全球高端制造需求最集中、升级最迅猛的单一市场，为化学合成高纯石英产业发展提供了广阔的市场规模、应用场景和迭代通道。在半导体领域，从成熟制程到 14 nm 乃至更先进工艺的产能扩张，都对化学合成高纯石英产生了刚性的、持续增长的需求^[9]。国内晶圆厂与设备商深度绑定与协同开发，为国产高端石英材料提供了从实验室参数达标到产线长期稳定运行的宝贵试炼场，正在改变全球供应链的验证逻辑。

我国将关键材料自主可控提升至战略高度，通过揭榜挂帅、制造业强基等机制，将分散的研发力量凝聚到诸如 EUV 级内透材料、超高均匀性大尺寸坯体制备等明确且艰巨的产业命题上。这种有组织的创新能够显著降低企业在攀登技术最高峰时所面临的不确定性和长周期投入风险，形成了国家引导、企业主导、“产学研”协同的攻坚格局。各地围绕龙头企业形成的特色产业集群，进一步加速了人才、资本与技术的本地化循环，降低了全产业链的协同成本。

（二）技术追赶的后发优势

当前，我国在原始创新和顶尖工艺上与国际巨头存在差距，但也需看到，我们具备在相对短周期内实现快速追赶的独特后发优势。在系统性复现与再创新能力方面，化学合成石英的核心科学原理与工艺路径清晰，国际专利布局也为我们勾勒了明确的技术发展路线图。现在的挑战更多是复杂的系统工程问题，即如何将热力学、流体力学、化学反应工程与精密控制技术融合，稳定地体现在大规模制造中。而我国在光伏、光纤、显示面板等泛半导体领域所积累的大规模精密制造经验、跨学科工程团队以及庞大的装备集成能力，可助力解决此类系统工程问题。例如，光纤预制棒制造中对气相沉积流场与温度场耦合的深刻理解，可以直接迁移至合成石英 CVD 工艺的放大设计中。

后发优势更体现在聚焦突破的可能性上。我们无需再经历从原理探索到工艺雏形的漫长试错，而可以基于清晰的产业目标，精准识别“卡脖子”环节，如特定杂质元素的深度脱除路径、沉积过程中微观缺陷的在线监测与抑制方法、大型装备核心热场与流场模块的设计等，集中优势力量进行定点攻

关。这种聚焦策略配合国家层面的资源协调，能够有效加速从技术突破到产品成熟的进程。

（三）产业生态的逐步完善

围绕合成石英产业的自主生态正在我国加速形成，并开始显现出强大的内生动力。这种生态完善首先表现为上下游深度绑定研发的新模式。国产半导体设备商、晶圆厂在自身发展过程中，对材料性能与成本有着极致追求，与国产石英材料企业之间的合作进入“共同定义产品-联合开发-同步验证”的深度协同阶段。这种基于国内产业升级真实需求产生的拉力是技术迭代最有效的催化剂。同时，上游的高纯硅源、特种气体、精密耗材供应商也在同步进步，其本地化供应不仅带来了成本和供应链安全优势，更重要的是建立了快速响应的技术沟通渠道，能够针对材料企业的具体工艺问题，进行定制化的原料开发与优化。

资本市场的加持为长周期、高投入的产业发展注入了至关重要的信心。获得融资的企业得以有能力布局更前瞻的研发、投资更昂贵的验证平台、吸引全球顶尖人才。更重要的是，成功的资本案例可以形成示范效应，引导更多社会资源关注并投入硬科技赛道，逐步扭转了材料研发投入大、产出慢的传统观念，开始形成“技术突破-资本认可-资源汇聚-进一步技术突破”的良性循环。

五、构建我国化学合成高纯石英材料产业发展体系的建议

面对全球供应链重构与科技竞争加剧的态势，我国在化学合成高纯石英材料领域要实现从保障安全到赢得领先的跨越，需构建以深度创新为内核、全链条协同为骨架、开放合作为外延的新型发展体系。这要求我们摒弃简单的跟踪模仿思维，从国家战略、产业生态、技术攻坚到人才培养进行系统性重塑。锚定自主可控与高端突破双重目标，搭建“产学研”协同架构与供需适配调节机制，将发展体系深度融入全产业链生态布局。一方面，对标国际前沿技术，推动材料应用向半导体、光伏等核心赛道延伸，建立性能迭代导向的动态研发模型，依托校企合作和智能化实现全流程质量管控。另一方面，规避海外技术封锁与产能断供风险，打造“原

料自主—工艺攻坚—场景验证”三位一体的能力纵深，最终形成兼具关键领域供应保障力与高端市场标准定义权的新型发展范式，为高端制造筑牢材料支撑。面向2035年，我国化学合成高纯石英产业的发展规划如图3所示。

（一）加强产业独特壁垒与技术攻关优先级研判

相较于半导体硅片、常规光学材料等成熟产业，化学合成高纯石英产业具有鲜明的差异化工程化壁垒，其核心障碍主要表现为多物理场强耦合、工艺窗口极度狭窄、大尺寸材料均匀性与超低缺陷难以协同控制、行业缺乏统一工程适配标准。该产业的发展瓶颈并非源自基础反应原理的理论局限，而是受制于高纯、均质、低缺陷、大尺寸石英构件的稳态量产精准调控能力，属于典型的系统性工程难题。研究表明，高纯前驱体精准调控、大尺寸全域均匀沉积、低缺陷烧结致密化、残余应力精准调控是制约高端合成石英产业化的第一性核心瓶颈，国外无成熟通用工艺可供借鉴，无法依靠技术引进实现突破，必须依托原始创新自主攻关；而成型加工、常规尾气处理、通用检测等配套支撑技术壁垒相对较低，可通过引进、消化、吸收、跨产业技术迁移快速补齐短板。在国产替代布局层面，结合供应链安全风险与国家战略需求，各应用场景替代优先级依次为：半导体光刻配套高纯石英、高能激光用精密光学石英构件、空间抗辐照特种石英、光伏

及通用工业石英。其中，半导体光刻与高能激光领域“卡脖子”风险突出、技术壁垒最高，是现阶段亟需重点突破的核心方向；空间抗辐照石英为战略保障性材料，需同步布局发展；光伏及通用工业石英技术成熟度较高，可依托现有产业基础稳步推进规模化替代。

（二）强化国家战略牵引与长期投入

作为支撑电子信息、精密光学、新能源和航空航天等万亿级产业集群的基石材料，建议确立化学合成高纯石英的战略地位，并制定跨越多个五年规划、目标清晰的长期发展路线图，明确各阶段的技术里程碑、产能布局和自主化率目标。构建国家主导的“政产学研用”深度融合平台；聚焦底层工艺科学、开发行业共性关键技术、搭建权威的测试评价与失效分析平台；将下游龙头企业的极端工况需求、科研机构的机理研究能力、材料企业的工程化经验进行融合，集中力量攻克诸如“8N级纯度稳定化工艺”“米级口径光学均匀性控制”等系统性难题，避免低水平重复和资源碎片化。

积极出台针对相关企业的支持政策，除了税收优惠和首台（套）保险，更应探索建立针对高端材料的长期采购承诺、应用风险共担等机制，由国家重大工程和下游龙头用户牵头，为经过验证的国产高端材料提供初始市场入口，实质性降低“不敢用、不愿用”的门槛，让创新成果能在真实场景中持续迭代。

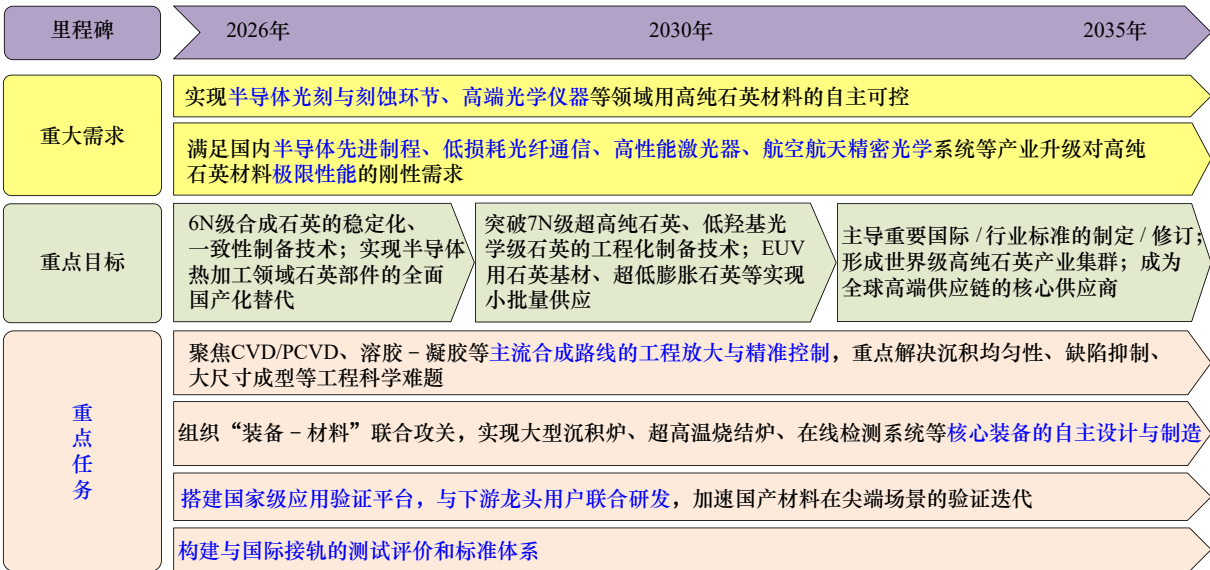


图3 我国化学合成高纯石英产业十年发展规划

（三）打造以需求为驱动的深度融合创新生态

为破解从应用验证难到协同创新弱的困局，建议以需求端牵引到供给端协同再到机制端保障为核心，打造从材料到核心器件再到系统的全链条创新生态。应由芯片制造、高端设备等下游领军企业牵头，联合材料龙头和顶尖科研机构，组建跨主体创新联合体，围绕半导体先进制程、EUV 光刻、精密光学等多应用核心场景，设立一体化攻关项目。下游用户提前明确材料的极端工况需求，科研院所聚焦基础机理与工艺优化，材料企业负责工程化转化，形成“需求指标共定、研发投入共担、技术成果共享、市场风险共扛”的协同机制，通过知识产权交叉许可、收益分成等方式，保障各方积极性，避免单向送样以及被动检测的低效模式。

充分发挥国家重大科技基础设施和重点项目的牵引作用，推动其优先采用国产合成石英材料，并开展联合开发。一方面，以国家项目的严苛标准倒逼材料性能迭代，如针对航天抗辐照需求定制开发超低缺陷石英部件，通过太空环境验证加速技术成熟。另一方面，借助项目资金与场景资源，为国产材料提供真实工况中试验验证机会，缩短从实验室样品到量产产品的转化周期。通过协议明确知识产权共享与利益分配机制，形成真正的责任共同体和利益共同体。

高质量的产业体系离不开坚实的基础支撑。在标准建设上，我们应主动布局、积极引领，围绕新材料、新工艺、新应用，快速形成具有技术先进性的团体和国家标准，积极参与国际标准制定，推动我国技术规范与国际行业规则的衔接适配，在全球产业标准体系中争夺更多话语权，将我们的技术创新成果转化为规则优势。同时，积极整合国内顶尖检测资源，制定统一的测试标准与认证流程，提供权威且公正的性能检测、可靠性验证与资质认证服务，既为材料企业提供标准化的性能反馈，帮助其精准迭代优化，也为下游用户降低验证成本、规避试用风险，打破因缺乏权威认证而不敢用的壁垒。同时，应积极推动国产认证体系与国际接轨，为国产材料进入全球供应链奠定基础，通过从需求牵引到最终规模化应用的闭环，高效破解验证困局，加速技术成果向产业转化。

（四）聚焦核心装备与工艺工程化的协同突破

建议设立化学合成高纯石英专用装备国家级重大专项，支持装备制造、材料企业和软件公司组成联合体，针对大尺寸 CVD 沉积炉、超高温超净均化炉等关键装备进行攻关，重点突破核心模块，如高精度多区温控系统、保证层流状态的流场设计、适用于腐蚀性气氛的长寿命关键部件。材料企业将多年积累的工艺需求转化为精确的装备控制参数，与装备商共同定义设备规格。对于首台（套）产品，优先在国家级中试平台、龙头企业产线推广试用时，给予更大力度的应用激励，形成“研制—试用—迭代—推广”的快速循环。

大力推动数字孪生、AI 技术与传统材料制备的深度融合。针对沉积均匀性控制、气泡 / 条纹 / 羟基基团等缺陷抑制、大尺寸石英锭成型等具体工艺难题，构建从微观反应机理到宏观“热—流—质”传递的跨尺度计算模型，在虚拟空间中反复优化工艺参数，大幅减少实物实验的试错成本。同时，在保护企业核心机密的前提下，借鉴面向全民的千兆智能接入与互操作等经验^[66]，推动建立国家级工业数据库，利用 AI 挖掘隐藏在海量生产数据中的优化规律，推动行业整体从经验驱动迈向数据与模型驱动的精准制造，全面提升核心工艺的工程化水平与稳定性。

（五）引育高端人才与拓展国际合作

重视人才培养，系统性培养跨学科的工程科技人才。推动高校联合头部企业共建现代产业学院，设立交叉学科，与企业共建联合实验室和实习基地，让学生早期接触真实产业难题。同时，深化科技评价体系改革，在企业与高校建立以创新实绩为导向的分类评价体系，设计长效激励机制，提升实际工程问题解决在评价中的权重。

在自主创新的同时，保持高水平的开放与合作。通过配套科研经费、落地创新平台等政策，吸引海外在高端材料制备领域的顶尖专家及创新团队回国开展技术攻关。支持企业在遵守国际规则的前提下，通过技术许可、联合研发、海外并购等方式，整合全球创新资源。在合规框架内吸收国际先进的生产管理与质量控制经验，同时推动国产技术与产品的国际化场景验证，逐步提升在全球高端材料供应链中的参与度与影响力。鼓励国产材料进入

国际主流用户的供应链进行验证,在开放竞争中提升品质、建立声誉。

六、结语

作为全球高技术竞争的战略必争领域,化学合成高纯石英材料的研发与产业化不是孤立的技术攻关,而是关乎国家高端制造体系自主性与完整性的战略竞逐。高纯石英是现代信息社会重要的物理基石——从将芯片蓝图刻入硅晶圆的光刻机镜头,到承载全球数据洪流的光纤内核,其性能边界直接定义了众多下游产业的创新高度。当前,外部技术封锁与供给压力的倒逼效应,叠加内部产业升级的迫切需求和国家重大战略的需求牵引,为我国化学合成高纯石英材料产业提供了难得的发展机遇。为抓住这一机遇,一是要有“十年磨一剑”的战略沉潜,甘于在基础科学、核心装备与工艺工程化等需要长期投入却难见短期回报的环节深耕;二是要有“只争朝夕”的主动作为,敏锐地捕捉国家需求与市场场景的演变,并将其转化为技术迭代的驱动力,在开放合作中加快追赶与超越。

面向未来,我国化学合成高纯石英材料的发展路径已然清晰,近期突破气相、液相主流程的批次一致性与工程化稳定性,实现半导体、光学、激光领域规模替代;中期攻克EUV光刻机、超高均匀性光学、8N级超高纯度等塔尖材料,补齐极限工艺窗口与核心装备短板;远期构建“基础机理—工艺装备—标准评价—应用验证”完整创新体系,形成全球竞争力。在自主可控的前提下,构建以深度创新和全链条协同为核心的新型产业生态,推动产业向价值链高端跃升,破解我国高端制造的高纯石英材料供给约束,为筑牢产业链供应链安全韧性、塑造全球产业竞争新优势注入核心动能。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 20, 2026; **Revised date:** August 30, 2026

Corresponding author: Tu Rong is a professor from State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing. His major research field is materials science and engineering. E-mail: turong@whut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Self-Reliance and Self-Improvement of Critical Material System” (2025-PP-02)

参考文献

- [1] 包申旭,刘建磊,张联盟,等.高纯石英原料杂质赋存形式与提纯技术研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2026(2):257-274.
 Bao S X, Liu J L, Zhang L M, et al. Occurrence forms of impurities in high-purity quartz raw materials and research progress in purification technologies[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(2):257-274.
- [2] 彭寿,秦旭升,洪伟,等.功能玻璃关键材料体系发展战略研究[J].中国工程科学,2024,26(3):10-18.
 Peng S, Qin X S, Hong W, et al. Development strategy of key functional glass material system[J]. Strategic Study of CAE, 2024,26(3):10-18.
- [3] 李菲,喇培清,易欣,等.我国硅能源材料产业高质量发展研究[J].中国工程科学,2026,28(2):205-217.
 Li F, La P Q, Yi X, et al. High-quality development of silicon-based energy materials industry of China[J]. Strategic Study of CAE, 2026,28(2):205-217.
- [4] 张亮,朱黎宽,李建国,等.我国高纯石英资源勘查开发现状及思考[J].中国矿业,2025,34(7):8-17.
 Zhang L, Zhu L K, Li J G, et al. The situation and thoughts on the exploration and development of high-purity quartz resources in China[J]. China Mining Magazine, 2025,34(7):8-17.
- [5] 中国建筑材料科学研究总院.超纯石英玻璃的制备方法:CN201610019268.9[P].2018-08-24:1-7.
 China Building Materials Academy Co., Ltd. Method for Preparing Ultra-Pure Quartz Glass: CN201610019268.9[P]. 2018-08-24:1-7.
- [6] El Hamzaoui H, Bouwmans G, Capoen B, et al. Sol-gel silica glass-cladding semiconductor-core optical fiber[J]. Materials Today Communications, 2017, 11: 179-183.
- [7] Wang H B, Wang K, Yang D R, et al. Tuning silicon tetrachloride hydrolysis to optimize silica microstructure and sintering densification[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2025, 663: 123586.
- [8] Shao H L, Zhang X L, Li W B, et al. Review of advanced purification technologies for high-purity quartz materials[J]. Materials Research Bulletin, 2026, 196: 113904.
- [9] 贾德龙,张万益,陈丛林,等.高纯石英全球资源现状与我国发展建议[J].矿产保护与利用,2019,39(5):111-117.
 Jia D L, Zhang W Y, Chen C L, et al. Global resource status and China's development suggestions of high purity quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 111-117.
- [10] 孙绯,刘俊龙,樊明轩,等.低吸收高均匀合成石英玻璃研究进展[J].玻璃,2025(3):7-13
 Sun F, Liu J L, Fan M X, et al. Research progress on low-absorption and high-homogeneity synthetic quartz glass[J]. Glass, 2025(3):7-13.
- [11] 王政,刘温馨.截至6月底我国智能算力规模同比增长177%[N].人民日报,2026-07-26(1).
 Wang Z, Liu W X. China's intelligent computing capacity grew 177% year-on-year by end-June[N]. People's Daily, 2026-07-26(1).
- [12] 蒙海章,梁富强,甘勇,等.高纯石英制备技术研究进展及市场分析[J].广州化工,2025,53(18):8-11.

- Meng H Z, Liang F Q, Gan Y, et al. Research progress and market analysis of high-purity quartz preparation technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2025, 53(18): 8-11.
- [13] 吴西顺, 高曦, 赵睿, 等. 欧美高纯石英勘探开发新进展[C]// 第三届全国矿产勘查大会, 2025: 130-132.
- Wu X S, Gao X, Zhao R, et al. New progress in the exploration and development of high-purity quartz in Europe and America[C]// Metallic Mineral Exploration Committee, Chinese Geophysical Society. Proceedings of the Third National Conference on Mineral Exploration. Nanchang: Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, National Geological Library of China, 2025: 130-132.
- [14] Huang Y S. Formation and optimization of deposition surface shape during fused silica glass synthesis by chemical vapor deposition[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2020, 11(2): 307-319.
- [15] 宋学富, 孙元成, 钟海, 等. 等离子体化学气相沉积法合成石英玻璃[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 531-534.
- Song X F, Sun Y C, Zhong H, et al. Synthesis of silica glass by plasma chemical vapor deposition method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4): 531-534.
- [16] Moreno Y P, Cardoso M B, Ferrão M F, et al. Effect of SiCl_4 on the preparation of functionalized mixed-structure silica from monodisperse sol-gel silica nanoparticles[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 292: 233-245.
- [17] Sun R, Zhou J G, Wang W. A boric acid-assisted hydrothermal process for preparation of mesoporous silica nanoparticles with ultra-large mesopores and tunable particle sizes[J]. Ceramics International, 2023, 49(12): 20518-20527.
- [18] Jiang X M, Bao L H, Cheng Y S, et al. Aerosol-assisted synthesis of monodisperse single-crystalline α -cristobalite nanospheres[J]. Chem Commun, 2012, 48(9): 1293-1295.
- [19] Jiang X M, Jiang Y B, Brinker C J. Hydrothermal synthesis of monodisperse single-crystalline α -quartz nanospheres[J]. Chemical Communications, 2011, 47(26): 7524.
- [20] 常州大学. 一种气溶胶辅助制备单晶纳米颗粒的方法: CN201410097004.6[P]. 2016-08-17: 1-11.
- ChanZhou University. An aerosol-assisted method for preparing single-crystal nanoparticles: CN201410097004.6[P]. 2016-08-17: 1-11.
- [21] Kajihara K. Recent advances in sol-gel synthesis of monolithic silica and silica-based glasses[J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2013, 1(2): 121-133.
- [22] 管青, 赵昱蓉, 沈俊杰. 全球高纯石英贸易依赖路径和依赖度演化态势[J]. 资源科学, 2025, 47(7): 1588-1597.
- Guan Q, Zhao Y R, Shen J J. Evolutionary trends of dependence paths and degree of external dependence in global high-purity quartz trade[J]. Resources Science, 2025, 47(7): 1588-1597.
- [23] 管青, 刘韬略, 赵峥行, 等. 全球高纯石英的双边和多边贸易格局演化研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 503-511.
- Guan Q, Liu T L, Zhao Z X, et al. Research on the evolution of bilateral and multilateral trade patterns of global high-purity quartz[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 503-511.
- [24] 张寒, 刘俊龙, 耿爱霞, 等. 超低膨胀合成石英玻璃关键制造工艺研究[J]. 玻璃, 2024, 51(8): 7-12.
- Zhang H, Liu J L, Geng A X, et al. Study on key manufacturing process of ultra-low thermal expansion synthetic quartz glass[J]. Glass, 2024, 51(8): 7-12.
- [25] 赵春霞, 范仕刚, 刘杰, 等. 超低膨胀微晶玻璃热处理工艺优化研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(11): 3870-3876.
- Zhao C X, Fan S G, Liu J, et al. Heat treatment process optimization of ultra-low expansion glass-ceramics[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(11): 3870-3876.
- [26] 杨李茗, 黄进, 刘红婕, 等. 熔石英元件紫外脉冲激光辐照损伤特性研究进展综述[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1714004.
- Yang L M, Huang J, Liu H J, et al. Review of research progress on damage characteristics of fused silica optics under ultraviolet pulsed laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 1714004.
- [27] 汪灵. 石英提纯定律研究[J]. 岩石学报, 2025, 41(10): 3302-3320.
- Wang L. Research on quartz purification law[J]. Acta Petrologica Sinica, 2025, 41(10): 3302-3320.
- [28] 中国大尺寸高性能合成石英玻璃取得突破[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(5): 44.
- China made a breakthrough in synthesizing Shi Ying glass with large size and high performance[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(5): 44.
- [29] 聂兰舰, 王玉芬, 向在奎, 等. 高性能光学合成石英玻璃的制备和应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2916-2924.
- Nie L J, Wang Y F, Xiang Z K, et al. Preparation and application of high-performance synthetic optical fused silica glass[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2916-2924.
- [30] Huang Y S, Zheng L L, Zhang H, et al. Design and optimization of substrate placement for large-sized and high-quality fused silica glass by SiCl_4 flame hydrolysis deposition[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 111: 917-932.
- [31] 创昇光电科技(苏州)有限公司. 一种超低膨胀系数氟化石英玻璃及其制备方法: CN202410201842.7[P]. 2025-09-23: 1-7.
- ChuangSheng Optoelectronic Technology (SuZhou) CO., LTD. Ultra-low-expansion-coefficient fluorinated quartz glass and preparation method thereof: CN202410201842.7[P]. 2025-09-23: 1-7.
- [32] 湖北戈碧迦光电科技股份有限公司. 一种高强度高透率零膨胀微晶玻璃的制备方法及产品: CN202610338660.3[P]. 2026-06-12: 1-11.
- Hubei Gabrielle-Optech Co., Ltd. Preparation method of high-strength, high-transmittance, zero-expansion microcrystalline glass and product thereof: CN202610338660.3[P]. 2026-06-12: 1-11.
- [33] 连云港金成石英制品有限公司. 一种微波和等离子体协同熔融石英管的工艺方法: CN202511383629.3[P]. 2025-11-18: 1-6.
- Lianyungang Jincheng Quartz Products Co., Ltd. A method for synergistic microwave- and plasma-assisted melting of quartz tubes: CN202511383629.3[P]. 2025-11-18: 1-6.
- [34] 王丹, 张丽娜, 侯鹏坤, 等. 纳米 SiO_2 在水泥基材料中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1003-1015.
- Wang D, Zhang L N, Hou P K, et al. Research progress in modifi-

- cation of cement-based materials using nano-silica[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(4): 1003-1015.
- [35] 王玉芬, 宋学富, 孙元成, 等. 超纯石英玻璃制备工艺研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(22): 98-101.
Wang Y F, Song X F, Sun Y C, et al. Research on preparation of super purity silica glass[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(22): 98-101.
- [36] 聂兰舰, 王玉芬, 向在奎, 等. 液相水解法制备高纯石英粉体团聚状态的控制[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(4): 15-19.
Nie L J, Wang Y F, Xiang Z K, et al. Control of the agglomerates during the preparation of quartz powder by aqueous solution hydrolysis method[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(4): 15-19.
- [37] Huang Y S. Modeling and analysis of SiO₂ deposition during high-purity fused silica glass synthesis by SiCl₄ chemical vapor deposition[J]. Ceramics International, 2019, 45(8): 10740-10745.
- [38] Takke R, Kuehn B, Thomas S. State of the art optical materials for lithographic systems for semiconductor manufacturing [C]// 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)—Laser Science to Photonic Applications, 2014: JTh4J.5.
- [39] 张健, 王华平. 一种大尺寸石英衬套管制备方法: CN202311151139.2[P]. 2023-11-30: 1-6.
Zhang J, Wang H P. A preparation method for large-size quartz bushing tubes: CN202311151139.2[P]. 2023-11-30: 1-6.
- [40] 长飞石英技术(武汉)有限公司. YT-2120 光纤级合成石英管产品技术说明[R]. 武汉: 长飞石英技术(武汉)有限公司, 2025: 1-2.
YOFC Quartz Technology (Wuhan) Company Limited. YT-2120 fiber grade synthetic quartz tube product technical [R]. Wuhan: YOFC Quartz Technology (Wuhan) Company Limited, 2025: 1-2.
- [41] 王蕾, 邵竹锋, 贾亚男, 等. 石英玻璃辐照诱导缺陷结构的研究[J]. 中国建材科技, 2019, 28(1): 55, 56-58.
Wang L, Shao Z F, Jia Y N, et al. Irradiation-induced defect structure of silica glass[J]. China Building Materials Science & Technology, 2019, 28(1): 55, 56-58.
- [42] 邵冲云, 于春雷, 胡丽丽. 面向空间应用耐辐照有源光纤研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500014.
Shao C Y, Yu C L, Hu L L. Radiation-resistant active fibers for space applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500014.
- [43] 胡雯, 廖梅松, 邓路, 等. 特种光纤抗辐照性能的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 2300007.
Hu W, Liao M S, Deng L, et al. Research progress on anti-radiation properties of specialized optical fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(23): 2300007.
- [44] 商春利, 孙凯, 樊明轩, 等. 超低膨胀石英玻璃制造研究进展[J]. 玻璃, 2026, 53(4): 8-15, 25.
Shang C L, Sun K, Fan M X, et al. Research progress on the manufacturing of ultra-low expansion quartz glass[J]. Glass, 2026, 53(4): 8-15, 25.
- [45] Choi J H, Lee W G, Shim T H, et al. Fumed silica-based ultra-high-purity synthetic quartz powder via sol-gel process for advanced semiconductor process beyond design rule of 3 nm[J]. Nanomaterials, 2023, 13(3): 390.
- [46] Hari Babu B, Lancry M, Ollier N, et al. Radiation hardening of sol gel-derived silica fiber preforms through fictive temperature reduction[J]. Applied Optics, 2016, 55(27): 7455-7461.
- [47] McCrate J M, Ekerdt J G. Detection of low-density surface sites on silica: Experimental evidence of intrinsic oxygen-vacancy defects[J]. Chemistry of Materials, 2014, 26(6): 2166-2171.
- [48] Wang J H, Zheng B L, Wang P. 3D printed Er³⁺/Yb³⁺ Co-doped phosphosilicate glass based on sol-gel technology[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2020, 550: 120362.
- [49] Cooperstein I, Shukrun E, Press O, et al. Additive manufacturing of transparent silica glass from solutions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(22): 18879-18885.
- [50] Du X T, Wang Z H, Zhu L M, et al. Pressureless spark plasma sintering of pre-shaped silica nanopowder for fabricating complex-shaped fused silica optics[J]. Ceramics International, 2026, 52(13): 21475-21483.
- [51] 张萱, 孙一, 包申旭, 等. 长江流域石英产业高端化发展路径与战略应对[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版), 2024, 37(6): 68-76.
Zhang X, Sun Y, Bao S X, et al. Development path and strategic countermeasures of High-end quartz industry in Yangtze River Basin[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Social Sciences Edition), 2024, 37(6): 68-76.
- [52] 王自国. 我国高纯石英产业战略布局思考[J]. 中国矿业, 2021, 30(S2): 1-3.
Wang Z G. Thoughts on the strategic layout of China's high purity quartz industry[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S2): 1-3.
- [53] Kühn B, Uebbing B, Schröder S, et al. Intrinsic optical properties of synthetic fused silica for 193 nm immersion lithography [C]// The 3th International Symposium on Immersion Lithography, 2006: 1.
- [54] Thürer M, Lehmann W, Trommer M. Method for the manufacture of synthetic quartz glass: EP4015469A1[P]. 2022-06-22: 1-14.
- [55] 张果虎, 肖清华, 马飞. 我国半导体硅片发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 68-78.
Zhang G H, Xiao Q H, Ma F. Progress and prospect of semiconductor silicon wafers in China[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 68-78.
- [56] JC/T 2392.3—2023 石英玻璃锭 第3部分: 等离子化学气相沉积法[S]. 2023: 1-2.
JC/T 2392.3—2023. Silica glass ingot—Part 3: Chemical vapor deposition method with plasma flame[S]. 2023: 1-2.
- [57] Barkusky F, Bayer A, Döring S, et al. Damage threshold measurements on EUV optics using focused radiation from a table-top laser produced plasma source[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 4346.
- [58] Moore L A, Smith C M. Fused silica as an optical material[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(8): 3043.
- [59] Sabia R, Edwards M J, VanBrocklin R, et al. Corning 7972 ULE material for segmented and large monolithic mirror blanks [C]// Optomechanical Technologies for Astronomy, SPIE, 2006: 627302.
- [60] Maida S, Matsuo K, Otsuka H, et al. Synthetic quartz glass and method of production: EP1188723B1[P]. 2009-11-04.
- [61] 刘庆伟. 半导体智能设备的市场发展前景[J]. 中国科技投资, 2024(16): 40-42, 79.
Liu Q W. Market development prospect of semiconductor intelli-

- gent equipment[J]. China Venture Capital, 2024(16):40-42, 79.
- [62] 叶甜春,朱煜,张国铭,等. 面向“十五五”的半导体装备的挑战与机遇[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(5):844-851.
- Ye T C, Zhu Y, Zhang G M, et al. Challenges and opportunities for semiconductor equipment facing 15th Five-Year Plan[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40 (5) : 844-851.
- [63] Zhou H L, Zheng G Y, Hu Z C, et al. Evolution mechanisms of gas bubbles in high-purity quartz glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2026, 672:123856.
- [64] 邓素华. 我国高端设备制造业现状及问题[J]. 企业管理, 2020(6):121-123.
- Deng S H. Present situation and problems of China's high-end equipment manufacturing industry [J]. Enterprise Management, 2020(6):121-123.
- [65] Allen G C. The true impact of allied export controls on the U.S. and Chinese semiconductor manufacturing equipment industries [R]. Washington, DC: Center for Strategic and International Studies(CSIS), 2024:2-4.
- [66] 房殿军,郑卓远,洪晟,等. 数据主权交换平台方案模式研究[J]. 网络安全与数据治理, 2022, 41(4):2-10.
- Fang D J, Zheng Z Y, Hong S, et al. Research on the scheme model of data sovereignty exchange platform[J]. Cyber Security and Data Governance, 2022, 41(4):2-10.