

Dsa Directed Assembly Lithography Integrated Carbon Nanotube Transistor

Xu Wang

1. Nanjing Zhihe Electronic Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 215200, China
2. Shanghai Xianzhedian Optoelectronic Technology Co., Ltd., Shanghai, 200000, China,

Abstract

DSA (Directed Self-Assembly) lithography is a nanoscale patterning technique that utilizes the phase separation principle of bulk polymer materials under light exposure, enabling precise control over material alignment. This method achieves nanoscale structures with low resolution while offering advantages like simplified processes and cost efficiency, making it highly promising for semiconductor manufacturing. The "DSA-guided self-assembly integrated carbon nanotube AI chip" represents an innovative chip fabrication solution for the post-Moore era. Using carbon nanotubes as channel materials and directed self-assembly (DSA) nanofabrication technology, it achieves ultra-high-density, low-power AI-specific computing arrays. The chip replaces silicon-based FinFETs at 3 nm and below nodes, delivering carbon-based transistor AI accelerators with 1.2 THz channel speeds and over 60% power reduction.

Keywords

DSA (Directed Self-Assembly); carbon-based transistors; silicon-based FinFET; AI accelerator

DSA 定向组组装光刻技术集成碳纳米管晶体管

王旭

1. 南京知赫电子科技有限公司, 中国 · 江苏南京 215200
2. 上海先着点光电科技有限公司, 中国 · 上海 200000

摘要

DSA (Directed Self-Assembly) 光刻技术是一种利用块状高分子材料在光照下发生相分离的原理, 通过光照控制高分子材料的排列, 从而形成纳米级图案的光刻技术。该技术能够在较低的分辨率下实现纳米级结构的制造, 具有工艺简单、成本低廉等优势, 因此在半导体制造领域具有广泛的应用前景。DSA 导向自组装集成碳纳米管AI芯片”是一种面向后摩尔时代、以碳纳米管为沟道材料利用定向自组装 (DSA) 纳米加工技术实现超高密度、低功耗、AI专用计算阵列的新型芯片制造方案。它实现在3 nm及以下节点替代硅基FinFET, 实现1.2 THz级沟道速度、功耗下降60%+的碳基晶体管AI加速器。

关键词

DSA定向自组装、碳基晶体管、硅基FinFET、AI加速器

1 引言

碳纳米管晶体管是一种基于碳纳米管材料的新型电子器件, 具有极高的载流子迁移率和热稳定性。与传统的硅基晶体管相比, 碳纳米管晶体管在高速、高频和高温等极端环境下表现出更优异的性能。此外, 碳纳米管晶体管还具有极低的功耗和极高的集成度, 因此在下一代高性能集成电路中具有重要的应用价值。

2 DSA 光刻技术实现碳纳米管晶体管的基本特性与创新性挑战

2.1 DSA 光刻技术与碳纳米管晶体管高精度图案新方法

将 DSA 光刻技术与碳纳米管晶体管集成, 可以实现碳纳米管晶体管的高精度图案化制造。具体步骤包括: 首先, 利用 DSA 光刻技术在衬底上形成高精度的纳米级图案; 然后, 通过化学气相沉积等方法在图案上生长碳纳米管; 最后, 对碳纳米管进行掺杂和电极制作, 完成晶体管的制造。通过这种方式, 可以实现碳纳米管晶体管的高效率、低成本制造, 为高性能集成电路的发展提供新的思路。

【作者简介】王旭 (1969-), 中国江苏徐州人, 博士, 从事半导体及双碳材料应用研究。

2.2 DSA 集成碳基材料晶体管图形化推动半导体跨越式发展

DSA 光刻技术与碳纳米管晶体管的集成技术在高性能集成电路、柔性电子器件和传感器等领域具有广泛的应用前景。该技术不仅可以提高集成电路的性能和集成度，还可以降低成本，为新一代电子器件的发展提供有力支持。此外，该技术在柔性电子器件和传感器等领域也具有重要的应用价值，可以推动这些领域的发展。

2.3 DSA 集成碳基材料晶体管图形化特点

自下而上的新型技术为碳基半导体提供了高分辨率、低成本、高均匀性的图案解决方案，基于嵌段共聚物 (BCPs) 内部组成不同聚合物链段之间的热力学不相容产生的微相分离现象，使得 BCPs 能够在一定条件下进行可控自组装，得到规则周期的 BCPs 纳米结构薄膜。无需或混

合使用 EUV 光刻。通过图形化的 DSA 模板 (化学或拓扑引导) 来制作纳米级的电子图形，阵列可控制 $\pm 1.2\text{nm}$ 。用于场效应晶体管、存储器件、数字图案化介质、光电子器件等的加工中，实现高密度集成和高效率低成本制造。

2.4 突破衍射成本精度极限成为延续摩尔定律最具商业落地价值的第三条技术路线

DSA 导向自组装集成碳纳米管 AI 芯片”应是一种面向后摩尔时代、以碳纳米管为沟道材料利用定向自组装 (DSA) 纳米加工技术碳基技术，它是发达国家一直研发预替代硅基的新技术。碳纳米管、石墨烯的导电、导热性能极强，远超硅和其他传统的半导体材料，科学家认为碳纳米管石墨烯未来有望取代硅成为电子元件材料。我国“十四五”材料科技创新专项规划指出重点发展领域，石墨烯碳材料技术方面，关注单层薄层石墨烯粉体、柔性电子器件大面积制备技术，石墨烯粉体高效分散与高催化活性纳米碳基材料与应用技术，产品应用在：高端芯片、超级电容器、催化剂载体 储氢材料、质子交换膜 (PEM) 燃料电池、热管理材料等方面。

2.5 碳基半导体功耗及性能

实现超高密度、低功耗、AI 专用计算阵列的新型芯片制造方案。实现在 3 nm 及以下节点替代硅基 FinFET，实现 1.2 THz 级沟道速度、功耗下降 60%+ 的碳基 AI 加速器碳基芯片，相比传统的硅基芯片，在性能和功耗方面展现出了明显的优势。根据 IBM 的研究，碳纳米管芯片在 10nm 技术节点后，在性能和功耗方面都将比硅芯片有明显改善。此外，中国科学家研制出的高性能碳纳米管晶体管，其工作速度是英特尔最先进的 14 纳米商用硅材料晶体管速度的 3 倍，而能耗只是其四分之一。这些技术进步不仅提升了芯片的性能，还显著降低了功耗，这对于提高能源效率、减少碳排放具有重要意义。

2.6 碳基半导体广泛的前景

碳基半导体芯片的这些特性使其在国防科技、卫星导

航、气象监测、人工智能、医疗器械等多个领域具有广泛的应用潜力。例如，在国防科技领域，碳基芯片的高性能和低功耗特性有助于提高军事装备的性能和可靠性；在卫星导航和气象监测领域，碳基芯片能够提供更快速的数据处理能力，从而提高监测的准确性和效率；在人工智能和医疗器械领域，碳基芯片的高性能和低功耗特性有助于提升设备的性能，为医疗诊断和治疗提供更高效的支撑。展望未来，碳基芯片有望在性能和能效方面超越传统硅基芯片，引领半导体行业进入新的发展阶段。投资机会主要集中在技术创新和市场先发优势上，潜在增长点包括数据中心、智能设备和物联网等应用领域。尽管存在技术成熟度、市场竞争和法规变化等风险，但碳基芯片技术的研发和应用前景被广泛看好。

3 解决难关痛点的采用的创新方法

碳纳米管项目在推进过程中面临的重难点，主要集中在材料制备、性能调控、应用转化三大环节。以下是基于最新资料的系统性梳理：

3.1 制备端：宏量制备与结构一致性难题

宏量制备：碳纳米管长径比大、易缠绕，导致反应器堵塞、热/质传递不均，难以实现工业化连续生产。

结构一致性：手性控制困难，金属型与半导体型混杂，影响其在电子器件中的定向应用。

催化剂与生长控制：催化剂粒径、分布及形貌直接影响管径、纯度与导电性，需精准设计。

3.2 材料处理：分散、纯化与表面改性

| | |
|---------|--|
| 团聚与分散性差 | 碳纳米管极易团聚，影响其在导电塑料、复合材料中的均匀分布。 |
| 纯化难度高 | 金属杂质需降至 $< 100 \text{ ppm}$ ，传统酸洗/离心易破坏结构。 |
| 表面活性低 | 表面能高、反应惰性大，导致与基体（如铜、塑料）界面结合弱。 |

3.3 应用端：性能 – 成本平衡与产业化瓶颈

性能 - 成本矛盾，高纯度单壁碳纳米管成本是多壁管的 10 倍，限制其在锂电、导电塑料中大规模渗透。

下游适配性差导电塑料中碳纳米管添加量需极低 ($< 1\%$)，但分散不均易导致性能波动。政策与环评限制导电塑料项目涉及化工用地、环保审批，周期长、门槛高。

3.4 前沿突破方向

分离技术突破：高分子试剂法实现金属型 / 半导体型碳纳米管高效分离。催化剂设计创新：分形结构催化剂 + 流化床反应器实现低成本宏量制备。- 复配技术：CNT+ 石墨烯 + 炭黑复配，降低添加量至 0.5%，提升性价比。

4 改性方法

4.1 催化剂合成技术

催化剂工艺（普鲁士蓝类似物络合 – 拓扑转变法 (PBA Route) 镍钴铁 (Ni–Co–Fe) 三元催化剂的络合工艺“分子级”

制备路线：先让 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Fe^{3+} 与有机配体形成均一、稳定的金属络合物 (gel)，再经“凝胶化→干燥→热解/还原”得到尺寸均一、高分散、高比表面积的活性相镍钴铁。

4.2 提纯工艺

| 阶段 | 方法 | 温度/条件 | 目的 |
|------|----------|-------------|---------------|
| 预处理 | 酸洗+焙烧 | 80-500°C | 去除表面杂质、无定形碳 |
| 高温纯化 | 石墨化+真空处理 | 1500-2400°C | 杂质挥发、晶体修复 |
| 化学纯化 | 氯气/氢气处理 | 900-1000°C | 深度除金属 |
| 物理分选 | 离心/电泳/色谱 | 常温 | 结构选择性提纯 |
| 精纯 | 多重分散/筛选 | 室温 | 碳纳米管专用, 6N级终点 |

图 1 提纯工艺与制备条件

新型催化裂解法含有较多杂质，如碳纳米颗粒、无定形碳、碳纳米球及催化剂粒子等，不能在半导体应用。利用 CNT 与羟基羧基就带有 II 电子，有机分子表面容易被碳官能团所吸附， II II 堆积效应杂化 SP2 碳原子、静电吸附原理提纯方法主要加热灼烧，酸处理或强氧化剂处理，电磁波分离法、超声分散和离心分离等实验步骤达到纯化目的。多级分压连续吸附排放 VOC 尾气

4.3 源 / 漏 (S/D) 接触工程

高纯阵列碳基材料 + DSA 芯片把“碳管极限性能”与“DSA 低成本高分辨率”合二为一，在 3 nm 以下节点同时超越硅 EUV 的功耗/性能、MoS 的迁移率、以及传统碳管 EUV 方案的成本与缺陷，成为后摩尔时代最具商业落地价值的第三条技术路线。因此成为碳纳米管集成芯片目前最具可行性的图形化路线。

目标规格

材料：碳纳米管 (CNT) 阵列 纯度 6N

栅距：18 nm (≈ 硅 7 nm 节点等效)

线宽粗糙度 LWR：< 1 nm

缺陷密度：< 0.1 cm⁻²

设备：在现有 193 nm DUV 机台上加装 DSA 模块 (无需 EUV)

把 193 nm DUV 机台升级为“DSA- 碳基 10 nm 制程”，只需加 4 个模块 (退火、刻蚀、检测、低温转移)，即可在 12" 晶圆上一次成型 < 10 nm 周期的 CNT 阵列，性能、良率、成本全面超越 EUV 多重图形方案。

4.4 n 型和 p 型 FET 的兼容性

将 1-2nm 的碳纳米管 (CNT) 做为导电沟道，替代传统的通过掺杂获得的沟道，连接源极和漏极，再在碳纳米管 (CNT) 上铺绝缘层 (可以是二氧化硅或高 K 介质)，使其与栅极绝缘隔离，电子束沉积制备优于传统硅晶体管具有优异栅极静电控制能力的碳纳米管场效应晶体管 (CNTFET)，实现 p 型和 N 型场效应晶体管构建。

采用氮化硅固态转移掺杂技术，通过预处理 CNT → 氮化硅薄膜沉积 → 将沉积有氮化硅碳纳米管置于特定的气氛

和温度下，使氮原子通过扩散到碳纳米管，实现对碳纳米管的精确掺杂均匀扩散表层。

主流叠层金属：0.3 nm Ti/30 nm Pd/30 nm Au (p 型) 或 20 nm Sc/30 nm Ti (n 型)，电子束蒸发+lift-off；退火 (200-300°C, N₂) 降低肖特基势垒。内掺杂/电荷转移掺杂：一维卤化物钙钛矿 CsPbBr, CNT 形成同轴；异质结，实现 n 型，亚阈值摆幅 35mVdec¹ 分子氧化剂 OA ([C₂H₅]₃O⁺SbCl₆⁻) 液相 p 掺杂，接触电阻降两个数量级 ION/IOFF > 10⁶。

12 英寸量产级芯片工艺流程

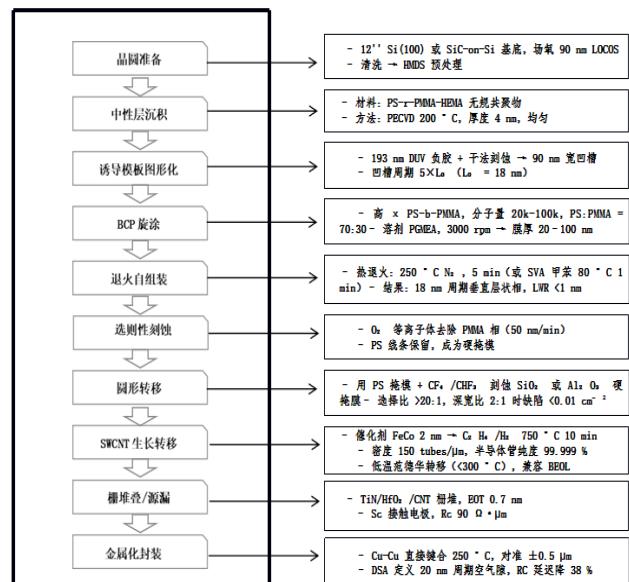


图 2 DSA 制备工艺与方法

4.5 堆叠与钝化

背栅：原衬底 Si 作栅，300 nm SiO₂ 或高 κ HfO₂ (10-20 nm) 为介电层。

顶栅：先 ALD 8-20 nm HfO₂/Y₂O₃，再电子束蒸发 Ti/Au 或 Ni 作顶栅电极；Y₂O₃ 钝化可抑制掺杂层水解，实现 8 周空气稳定。

铁电高 κ AlScN (20-30 nm) 被用于可重构 FeFET，通过极化翻转在 p 型与 n 型间切换，开关比 > 10⁵

4.6 碳化硅 SiC 衬底

分子束外延沉积 (碳纳米管) 薄膜，以乙烯+多臂碳纳米管，控制气压气流速流量材料组份，在源气被分离成单个单个原子或两个原子团，通过扩散迁移过程连续不断到达衬底表面生成所需薄膜材料。

4.7 DSA 把“自下而上”的分子自组装与传统“自上而下”光刻天然匹配结合，突破衍射极限突破传统物理极限

开发嵌段共聚物 (BCP，如高- χ 值的 PS-b-PDMS\PS-b-PGMA) 将传统的图形密度提升 2-4 倍，解决 CNT 因范德华力团聚导致排列难点。降低图形边缘粗糙度：无需复杂的光源掩膜系统，只涂胶、退火刻蚀可与现有 193nm 浸没

式光刻和EUV光刻兼容工艺。精度已提升到 $\pm 1.2\text{ nm}$ ，可把 3 nm 及以下节点的线宽粗糙度、边缘放置误差降到可量产水平。解决刻蚀选择比低的问题：碳基材料与传统光刻胶之间的刻蚀选择比低，图形转移困难。DSA结合无机硬掩膜（如 Al_2O_3 ）可将选择比提升至20:1以上，确保图形在后续刻蚀过程中保真度更高

精度均匀性：最新高- χ BCP把线宽粗糙度降到 0.8 nm （EUV为 2.5 nm ），边缘放置误差 $<1\text{ nm}$ ，正好覆盖碳管直径涨落显著优于电子束光刻和传统光刻的边缘质量

降低成本与工艺复杂度：相较于EUV光刻，DSA设备成本仅为1/5，耗材成本降低60%，18A工艺节点减少70%掩膜版突破，避免了对昂贵EUV的依赖，为碳基芯片的中试和量产提供了经济可行的路径

自修复：BCP微相分离过程中会自发填平模板缺陷，减少碳管阵列中的断点/空位，提高良率

5 总结上述技术痛点解决方案

5.1 生产成本高

湿法柠檬酸钠络合 $\text{Co}+\text{Ni}+\text{Fe}$ 两种以上催化剂技术解决了碳基材料产率良率大幅降低成本

5.2 提纯达不到半导体指标

混合型多组合的超纯化技术解决了材料纯度不够、分散难、疏水元素太活泼的技术痛点；

5.3 水平面阵列平行难度大

近静电纺丝带电的聚合物液滴在电场力的作用下被拉伸，使CNTs定向排列；

5.4 螺旋失真、管径缠绕容易团聚难分散

羟基羧基硫化基修饰、引入新的官能团，改性后独特的分散液技术和裂解生长技术解调整成份控制S8P4含量，控制快慢冷却，解决好不稳定电子空位缺陷；

5.5 结晶度低改性破坏结构

引入异相成核剂，液晶体接枝活性技术，高浓度的碳溶液接枝低浓度的碳溶液，改进悬浮催化法多元催化合成CCVD替代CVD法实现其羧基酰胺化，混酸处理，利用重氮盐化学结合，羟基和氨基实现碳管多功能化，从而减少接触电阻增加晶体管数量处理器的运算效率更高，晶体管形成可变电阻满足二进制晶体管需要。改性后独特的分散液技术和裂解生长技术解决了碳管不稳定电子空位缺陷的技术痛点。

6 结语：面临的挑战与未来发展方向

尽管DSA光刻技术与碳纳米管晶体管的集成技术具有诸多优势，但在实际应用中仍面临一些挑战，如高精度图案的形成、碳纳米管的均匀生长和掺杂等。未来的研究方向包括优化DSA光刻工艺、开发新型碳纳米管材料和改进晶体管制造工艺等。通过不断优化和改进，该技术有望在高性能集成电路、柔性电子器件和传感器等领域实现更广泛的应用。

通过试验出一种新型成核剂液晶体活性接枝技术，创

新式的形成络合催化剂实现较窄分布的直径，SWNT-PEG-NH₂碳纳米管PEG-氨基（CNT溶解性和相容性增强其分子链相互作用增加晶体管数量）极性，其性能领先，性能超越江苏天奈、广东道氏、俄罗斯OCSIAi等优质企业同类产品，成本只是其1/1.6，主要优势是纯度方面本达到了99.9999%，全球最高水平的OCSIAi碳材料纯度却只有99.99%，超高纯度的碳管有助于提高其下游应用的物理、化学和电学性能的稳定性和一致性；另外，项目的卧式阵列静电纺丝技术使其结构则使得碳纳米管在特定方向上具有良好的取向性，展现出更优越的力学性能（例如高强度和高韧性）、电学性能（例如高导电性）和热学性能（例如高热导率）。

碳纳米管可直接在硅衬底表面生长成内径 1 nm 外径 6 nm 碳纳米管，羟基羧基硫化基的修饰改性后使其带有碳纳米管基团结构结晶尺寸不变，解决好碳管不稳定电子空位缺陷，产率提高3倍。超前的分散液技术和裂解生长技术可大面积的理想气体蒸发实现CNTFET，它比硅器件体积更小韧性更高，解决了硅基芯片的隧穿、漏电、发热等短沟道技术痛点，促使从 7 nm 到 3 nm 功耗下降了40%，密度提高了1.35倍，能源效率提高了10倍。制备的超高性能碳纳米管芯片晶体管，其工作速度是英特尔最先进的14纳米商用硅材料晶体管速度的5倍，而能耗只是其四分之一。鉴于其特性，以碳基柔性材料为基础，结合微纳米加工与集成技术，设计制造可实现逻辑放大、滤波、数据存储、信号反相、数字运算、传感、5G芯片等功能的新一代柔性电子元器件，是信息技术发展的迫切需求。

碳纳米管是一种六边形含碳原子的一维量子限域效应和SP2杂化效应的材料，它具有高度纯度和规则排列结构，具备光电磁力热的特性如加以优化本征优势，其应用将是一个具备万亿级别市场。目前，随着科技技术发展进步，碳纳米管又增加了新的应用领域：人形机器人AI+无人驾驶AI+等方向，而原有的电子元件、超级电容、可穿戴设备、3C数码、储能储氢、催化、新型传感器、集成电路芯片等应用正在一步一步的投放市场。

参考文献

- [1] 陈毅龙. 酚菁铁复合碳基纳米材料的氧还原性能研究[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(12):22-27.
- [2] 王明, 高波, 李自强, 等. 碳基正极材料在锂硫电池中的研究进展[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(12):2137-2150. DOI: 10.20242/j.issn.2097-5384.2025.12.006.
- [3] 常建欢, 韩庆鑫, 宫小玉, 等. 锌-空气电池碳基氧还原催化剂的研究进展[J/OL]. 精细化工, 1-12 [2026-01-07]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20250267>.
- [4] 陈嘉琳, 胡雪敏, 蔡延庆, 等. 碳基材料太阳能界面蒸发研究进展[J/OL]. 化工新型材料, 1-6 [2026-01-07]. <https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.02.041>.
- [5] 潘明杰, 李伟, 孟令琪, 等. 基于微腔碳基复合材料的黑体靶面均

- 温性与发射率强化研究[J/OL].电光与控制,1-10[2026-01-07].
<https://link.cnki.net/urlid/41.1227.TN.20250924.1247.004>.
- [6] 吕晓炜,张家振,陈俊宇,等. 波导集成的碳基红外探测器研究进展[J].物理学报,2025,74(20):341-355.
- [7] 张乾,姚树玉,李晨,等. 静电纺碳基材料在锂离子电容器中的研究进展(英文)[J].新型炭材料(中英文),2025,40(04):782-821.
- [8] Manfo A T ,Laaksonen H. 超级电容器用碳基杂化材料综述(英文)[J].新型炭材料(中英文),2025,40(01):81-110.
- [9] 马思畅,李东阳,徐睿. 静电纺丝在制备高性能锂离子电池负极材料中的应用[J].化学进展,2024,36(05):757-770.
- [10] 陈曦,李明轩,闫金伦,等. MOF衍生碳基材料的电催化应用及其先进表征技术(英文)[J].新型炭材料(中英文),2024,39(01):78-99.
- [11] 石磊,李彦哲,尹华杰,等. 碳基无金属纳米材料用于电催化合成小分子化学品(英文)[J].新型炭材料(中英文),2024,39(01):42-63.
- [12] 夏会聪,昝灵兴,魏一帆,等. 碳基电极材料在能源存储器件中的催化效应(英文)[J].Science China(Materials),2022,65(12):3229-3242.
- [13] 孟鹏飞,张笑容,廖世军,等. 金属/非金属元素掺杂提升原子级分散碳基催化剂的氧还原性能[J].化学进展,2022,34(10):2190-2201.
- [14] 赵一蓉,刘聪聪,卢琼琼,等. 自支撑碳基柔性超级电容器电极材料研究进展(英文)[J].新型炭材料(中英文),2022,37(05):875-897.
- [15] 刘新叶,梁智超,王山星,等. 碳基材料修饰聚烯烃隔膜提高锂硫电池性能研究[J].化学进展,2021,33(09):1665-1678