

内容简介

碳基材料作为材料科学领域的核心分支，凭借其多样的结构、优异的物理化学性能及广泛的应用潜力，成为推动电子信息、能源环境、生物医疗等多领域技术革新 的关键支撑。《碳基材料器件及其应用》一书以碳基材料的基础特性为起点，系统构建了从材料制备、器件构建到产业应用的完整知识体系，为相关领域的科研人员、工程技术人员及高校师生提供了全面且前沿的参考资料。

全书共十章，逻辑层次清晰，内容循序渐进。第一章作为基础开篇，系统阐述碳材料的结构与性质、分类体系、制备方法及表征分析技术，为后续章节的学习奠定理论与实验基础。第二章至第六章聚焦典型碳基材料体系，分别深入探讨石墨烯、碳纳米管、碳量子点、多孔碳及金刚石的制备工艺，详细介绍基于这些材料构建的电子器件、光电器件、传感器件等核心器件的工作原理与性能调控方法，并结合具体应用场景展现材料与器件的适配性。第七章专门论述碳基复合材料与器件，重点关注复合界面设计的关键技术，以及柔性电子、能源存储等领域的特色器件和结构功能一体化应用。第八章和第九章则从功能维度出发，分别对碳基光电器件和传感器件进行集中梳理，涵盖光电探测、发光显示、光伏转换等光电器件类型，以及物理、化学、生物三大类传感器件和智能传感系统，全面呈现碳基器件的功能多样性与技术优势。第十章作为应用展望篇，精准定位电子信息、能源环境、生物医疗三大核心应用领域，深入分析碳基器件的应用前景，并对未来技术发展趋势进行预判，为行业发展方向提供指引。

本书兼顾基础理论的系统性与应用技术的前沿性，既注重梳理碳基材料与器件的核心原理和经典方法，又及时融入领域内的最新研究成果与技术突破。通过将材料特性、器件设计与产业应用紧密结合，实现了理论知识与实践应用的有机统一，有助于读者快速掌握碳基材料器件领域的核心知识，把握行业发展动态，为相关领域的技术研发与创新应用提供有力支撑。

Carbon-based Material Devices and Their Applications

王旭 著



PRICE: \$60. 00



Carbon-based Material Devices and Their Applications

碳基材料器件及其应用

王旭 著

作者简介

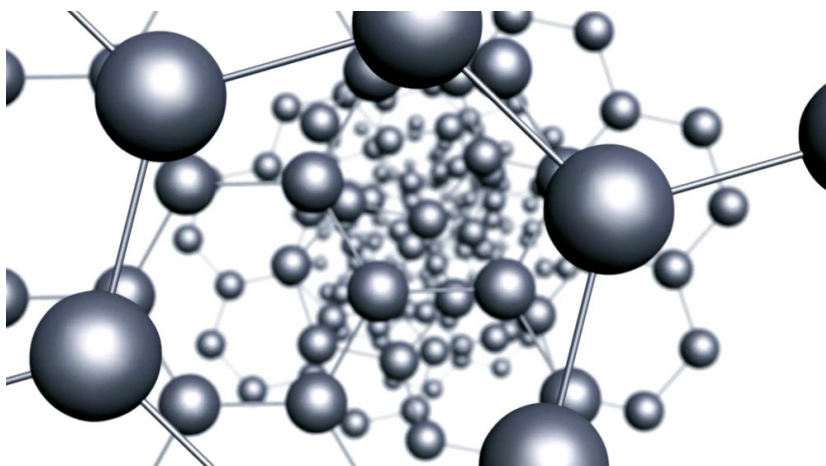


王旭
1999–11毕业于香港理工大学：应用物理学-理学博士
2000–2006 美国俄亥俄州立大学仿生与模拟工程院实验室材料科学博士后
2006–2009 美国俄亥俄州立大学(OSU)实验室材料科学与工程副研究员
专业组织会员：材料研究学会(MRS)(2007–present)；美国电镜学会(AMS)；矿物金属材料学会(TMS)
2009–2016 美国 OSU 工程院 研究员
2017–1至今上海先着点光电科技有限公司 总经理
2020–6美国XSUNX新能源公司 薄膜工艺师
2021–11上海白玉兰计划 浦江人才
2022–7 至今 工信部 高级工程师
2022–9 至今 上海市科委入库评审专家
2022–10至今 中国科学院 学术研究员
2025–6杭州拱墅区大运英才
2025–10南京市紫金山英才计划高层次人才
第36届上海市创新发明金奖获得者、第八届中国上海国际创新发明金奖金牌获得者

Carbon-based Material Devices and Their Applications

碳基材料器件及其应用

王旭 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Carbon-Based Material Devices and Their Applications

题目：碳基材料器件及其应用

Author: Xu Wang

作者：王旭

ISBN: 979-8-90040-089-1

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

Carbon-based Material Devices and Their Applications **碳基材料器件及其应用**

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 15.75

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in May 2026

Printing: First printing in May 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

前言

P R E F A C E

在全球科技革命与产业变革深度演进的当下，新材料作为引领科技创新、支撑产业升级的核心驱动力，正迎来前所未有的发展机遇。其中，碳基材料凭借其独特的原子结构与优异的物理化学性能，从基础研究到产业应用均展现出巨大的潜力，成为材料科学领域的研究热点与前沿方向。从广泛应用的活性炭，到兼具高强度与高导电性的石墨烯、碳纳米管，再到功能多样的碳量子点、多孔碳与金刚石，碳基材料的家族不断拓展，其衍生的各类器件在电子信息、能源环境、生物医药等关键领域的应用价值日益凸显，为解决全球能源短缺、环境恶化、医疗技术升级等重大挑战提供了全新的技术路径。

近年来，碳基材料器件相关的研究成果层出不穷，技术创新持续突破，但与此同时，该领域知识体系分散、前沿成果整合不足的问题也逐渐显现。无论是高校相关专业的学生、科研机构的研究人员，还是产业界的技术开发者，都亟需一本能够系统梳理碳基材料器件知识、全面涵盖前沿研究成果与应用进展的专著，以助力其快速掌握领域核心内容、把握技术发展趋势。基于此，我们组织了长期深耕碳基材料与器件领域的专家学者，历时数年完成了《碳基材料器件及其应用》一书的编撰工作。

本书遵循“基础—材料—器件—应用”的逻辑框架，构建了完整的碳基材料器件知识体系。全书共分为十章，第一章系统阐述碳基材料的基础理论，包括结构与性质、分类体系、制备方法及表征分析技术，为后续内容的学习奠定坚实基础；第二章至第七章分别聚焦石墨烯、碳纳米管、碳量子点、多孔碳、金刚石及碳基复合材料等典型碳基材料，深入探讨各类材料的制备工艺、性能调控机制及其衍生器件的设计原理与制备技术；第八章至第九章针对碳基器件的核心应用领域，分别对光电器件与传感器件进行专项梳理，细化各类器件的工作原理、性能优化及应用场景；第十章则对碳基器件在电子

信息、能源环境、生物医药等领域的应用前景进行展望，并预判未来发展趋势，为读者提供前沿研究方向的指引。

在编撰过程中，我们始终秉持“科学性、系统性、前沿性与实用性”相结合的原则。一方面，注重基础理论的严谨性，确保读者能够准确理解碳基材料与器件的核心原理；另一方面，紧密跟踪领域内的最新研究成果与产业应用进展，将诸多前沿技术与典型案例融入书中，增强内容的时效性与实践指导价值。本书既可供材料科学与工程、电子科学与技术、能源科学与工程、生物医学工程等相关专业的高校师生作为教材或参考用书，也能为科研院所的研究人员、企业的技术研发人员提供全面的知识支撑与技术参考。

本书的顺利完成，离不开各位编撰人员的辛勤付出，也得益于领域内众多专家学者的宝贵建议与支持。在此，我们向所有为本书编撰工作提供帮助的同仁表示衷心的感谢。同时，碳基材料器件领域的研究仍在快速发展，新的理论、技术与应用不断涌现，由于编撰人员的学识水平有限，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请广大读者批评指正，以便我们在后续修订中不断完善。

最后，希望本书能够为推动碳基材料器件领域的知识传播、人才培养与技术创新贡献一份力量，助力更多从业者在这一充满活力的领域实现突破与发展。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

目录

CONTENTS

第一章 碳基材料基础	1
第一节 碳材料结构与性质	1
第二节 碳基材料分类体系	8
第三节 碳材料制备方法	14
第四节 表征分析技术	19
第二章 石墨烯材料与器件	27
第一节 石墨烯制备工艺	27
第二节 石墨烯电子器件	33
第三节 石墨烯光电器件	38
第四节 石墨烯传感器	45
第三章 碳纳米管材料与器件	51
第一节 碳纳米管可控生长	51
第二节 碳纳米管电子器件	58
第三节 碳纳米管复合材料	64
第四节 碳纳米管生物传感器	70
第四章 碳量子点材料与器件	75
第一节 碳量子点合成方法	75
第二节 光学性能调控	81
第三节 碳量子点光电转换器件	87
第四节 碳量子点生物成像应用	94
第五章 多孔碳材料与器件	99
第一节 多孔碳制备技术	99
第二节 超级电容器器件	105
第三节 锂离子电池应用	111

第四节 催化转化器件	116
第六章 金刚石材料与器件	121
第一节 金刚石薄膜制备技术	121
第二节 电子发射器件	128
第三节 热管理器件	134
第四节 生物医学器件	139
第七章 碳基复合材料与器件	145
第一节 复合界面设计	145
第二节 柔性电子器件	150
第三节 能源存储器件	157
第四节 结构功能一体化	162
第八章 碳基光电器件	169
第一节 光电探测器件	169
第二节 发光显示器件	175
第三节 光伏转换器件	181
第四节 光电集成系统	188
第九章 碳基传感器件	195
第一节 物理传感器	195
第二节 化学传感器	201
第三节 生物传感器	206
第四节 智能传感系统	213
第十章 碳基器件应用展望	219
第一节 电子信息领域应用	219
第二节 能源环境领域应用	224
第三节 生物医疗领域应用	230
第四节 未来发展趋势	236
参考文献	243

第一章 碳基材料基础

第一节 碳材料结构与性质

碳元素原子序数为 6，核外电子排布为 $1s^2 2s^2 2p^2$ ，独特的电子结构使其可通过 sp 、 sp^2 、 sp^3 三种杂化方式形成稳定化学键，构建结构多样、性能迥异的碳材料体系。从传统木炭、石墨到现代石墨烯、碳纳米管、金刚石，碳材料的发展始终与人类文明进步紧密关联。进入 21 世纪，纳米科技推动新型碳材料制备技术突破，其在电子信息、能源存储、生物医疗等领域展现巨大应用潜力，成为材料科学研究热点。本节系统阐述碳材料核心结构特征、结构与性质的内在关联，为后续碳基器件制备与应用研究奠定理论基础。

结构是决定碳材料性质的根本因素，晶体结构、维度特征及微观形貌的差异，直接导致其力学、电学、热学等性能显著不同。如金刚石的 sp^3 杂化三维网状结构赋予其极高硬度与优异导热性，石墨的 sp^2 杂化层状结构则带来良好导电性与润滑性。低维碳材料凭借独特结构突破传统性能极限，深入理解碳材料结构本质与调控规律，对设计制备高性能碳基器件至关重要。本节从基本结构单元出发，依次探讨晶体与非晶体结构、维度结构特征、表面结构与缺陷，以及结构与宏观性质的构效关系，解析碳材料结构与性质的核心逻辑。

一、碳材料的基本结构单元与杂化特性

碳原子是碳材料的基本构建单元，其杂化方式决定碳材料结构类型与理化性质。碳原子价层电子构型为 $2s^2 2p^2$ ，成键时 $2s$ 轨道与不同数量 $2p$ 轨道杂化形成 sp 、 sp^2 、 sp^3 三种杂化轨道，不同杂化轨道的空间构型、成键角度及键能差异显著，进而构建不同结构特征的碳材料。碳原子间可形成稳定 σ 键与活性 π 键，这是碳材料结构多样、化学性质丰富的重要原因。本节详细阐述三种杂化方式特征及对应基本结构单元，为理解碳材料复杂结构体系提供基础。

（一） sp^3 杂化与四面体结构单元

sp^3 杂化由 1 个 2s 轨道与 3 个 2p 轨道重组形成 4 个能量等同的杂化轨道，含 1/4s 轨道与 3/4p 轨道成分，空间构型为正四面体，轨道对称轴夹角 $109^\circ 28'$ ，可最大程度降低轨道排斥力，保障结构稳定。基于 sp^3 杂化的基本结构单元为四面体，每个碳原子通过杂化轨道与周围 4 个碳原子形成 σ 键，构建三维网状晶体结构。

金刚石是典型 sp^3 杂化碳材料，晶体中每个碳原子位于正四面体中心，与相邻 4 个碳原子形成共价键，键长 0.154 nm，键能 345 kJ/mol。紧密的三维网状结构使金刚石成为自然界硬度最高物质（莫氏硬度 10），且因电子全参与成键表现为绝缘体，室温热导率达 2000 W/(m·K)，远超金属材料，在高端热管理领域具重要应用前景。无定形碳中部分碳原子存在 sp^3 杂化，但杂化程度低、结构无序，性能与金刚石差异显著。

（二） sp^2 杂化与平面六边形结构单元

sp^2 杂化是层状碳材料的主导杂化形式，由 1 个 2s 轨道与 2 个 2p 轨道杂化形成 3 个能量等同的杂化轨道，含 1/3s 轨道与 2/3p 轨道成分，空间构型为平面三角形，轨道对称轴共面且夹角 120° ，剩余 1 个未杂化 2p 轨道垂直于杂化轨道平面。

基于 sp^2 杂化的基本结构单元为平面六边形，碳原子通过杂化轨道与相邻 3 个碳原子形成 σ 键构建平面网状结构，未杂化 2p 轨道相互平行重叠形成离域 π 键， π 电子的高流动性是 sp^2 杂化碳材料良好导电的根本原因。石墨为典型层状 sp^2 杂化碳材料，由无数平行石墨片层组成，片层内为平面六边形网状结构，层间通过范德华力作用，层间距 0.335 nm。层内共价键作用强、层间范德华力弱，使石墨具良好层间滑移能力，可用作润滑剂；平行于片层方向室温电导率达 1×10^5 S/m，兼具高导热性与化学稳定性，广泛应用于电极、导热材料等领域。

石墨烯是单原子层二维碳材料，本质为石墨的单个片层，由 sp^2 杂化碳原子构成平面六边形网状结构。无层间相互作用的独特二维结构使其展现更优异性能，室温载流子迁移率达 2×10^5 cm²/(V·s)，抗拉强度 130 GPa，透光率 97.7%，是制备高性能电子、光电器件的理想材料。

（三）sp 杂化与线性结构单元

sp 杂化由 1 个 2s 轨道与 1 个 2p 轨道杂化形成 2 个能量等同的杂化轨道，含

1/2s 轨道与 1/2p 轨道成分，空间构型为线性，轨道对称轴共线且夹角 180° ，剩余 2 个未杂化 2p 轨道相互垂直且垂直于杂化轨道直线。

基于 sp 杂化的基本结构单元为线性碳链，碳原子通过杂化轨道与相邻 2 个碳原子形成 σ 键，未杂化 2p 轨道在两个垂直平面形成 π 键，赋予材料良好柔韧性、导电性与较高化学活性。碳炔是典型 sp 杂化碳材料，为线性碳链结构，分为单三键交替的累积炔烃与双键交替的共轭烯烃两类。碳炔理论抗拉强度 320 GPa，远超金刚石与石墨烯，兼具优异导电与光学性能，在纳米电子器件、超高强度材料领域具潜在价值。但 sp 杂化碳材料化学稳定性较低，高质量制备难度大，相关研究仍处探索阶段。

二、碳材料的晶体结构与非晶体结构

按原子排列有序性，碳材料分为晶体与非晶体两类。晶体碳材料原子排列具长程有序性，三维空间按规律周期性重复；非晶体碳材料仅具短程有序性，局部原子排列规律但长程无周期性。结构有序性差异导致两者性能显著不同，本节阐述典型晶体与非晶体碳材料的结构特征，分析有序性对性能的影响。

（一）典型晶体碳材料的结构特征

常见晶体碳材料包括天然存在的金刚石、石墨与人工合成的富勒烯、碳纳米管等，其结构特征由杂化方式与排列方式共同决定，进而决定独特理化性质。

富勒烯是由 60 个及以上 sp^2 杂化碳原子形成的球状分子， C_{60} 最为常见。其结构类似足球，由 12 个正五边形与 20 个正六边形组成，碳原子位于多边形顶点，通过 sp^2 杂化轨道形成 σ 键，剩余 p 轨道电子在分子表面形成离域 π 键。 C_{60} 分子直径 0.71 nm，分子间通过范德华力形成面心立方晶体，晶格常数 1.41 nm。富勒烯具良好电子接受能力，可作为有机半导体用于太阳能电池、场效应晶体管等器件，同时抗氧化性能优异，可作为生物医疗领域的抗氧化剂与药物载体。

碳纳米管属晶体碳材料，由石墨片层卷曲形成一维管状结构，按卷曲方式与管径分为单壁（管径 0.4-2 nm）与多壁（层间距约 0.34 nm）两类。碳原子以 sp^2 杂化为主，卷曲结构导致少量 sp^3 杂化缺陷。一维管状结构赋予其极高力学强度、优异导电与导热性，在纳米电子器件、复合材料、能源存储领域具重要应用价值。

（二）非晶体碳材料的结构特征

非晶体碳材料（无定形碳）来源广泛，包括木炭、活性炭、炭黑、玻璃碳等，

其核心结构特征为短程有序、长程无序，碳原子同时存在 sp^2 与 sp^3 杂化，两者比例随制备工艺与处理条件变化，直接影响材料性能。

玻璃碳由 sp^2 杂化芳香族碳环与 sp^3 杂化交联结构组成，芳香族碳环局部形成平面结构，通过 sp^3 杂化碳原子连接形成无序三维网状结构。其具优异化学稳定性、耐高温性、导电性与机械强度，表面光滑致密，广泛应用于电极材料、高温器件等领域。活性炭的核心特征是丰富孔隙结构，含微孔（ $< 2\text{ nm}$ ）、中孔（ $2\text{--}50\text{ nm}$ ）与大孔（ $> 50\text{ nm}$ ），由制备过程中原料挥发性成分去除形成，极高比表面积（ $500\text{--}2000\text{ m}^2/\text{g}$ ）使其具优异吸附性能，用于污水处理、气体吸附、催化剂载体等领域。

炭黑为粒径 $10\text{--}100\text{ nm}$ 的非晶体碳材料，由 sp^2 杂化石墨微晶聚集形成链状或葡萄状团聚体，具良好导电性、补强性与着色性，广泛应用于橡胶、塑料、油墨等领域。非晶体碳材料结构可调性强，通过调控碳化温度、气氛等工艺参数，可调节 sp^2/sp^3 杂化比例与孔隙结构，实现性能调控，使其在多领域具广泛应用前景。

三、碳材料的维度结构特征与性能调控

维度是纳米科技中描述材料结构的核心参数，按维度特征碳材料分为零维、一维、二维、三维四类。不同维度碳材料具独特结构特征，直接影响电子传输、质量传输等行为，决定其性能与应用场景。通过维度结构调控可实现性能精准优化，为高性能碳基器件制备提供核心思路。本节阐述不同维度碳材料的结构、性能特点及调控方法。

（一）零维碳材料

零维碳材料三维尺寸均处于 $1\text{--}100\text{ nm}$ 纳米尺度，无长程空间取向，呈球状、类球状或不规则纳米颗粒，典型代表为富勒烯、碳量子点、纳米金刚石。其具大比表面积与高表面能，量子尺寸效应使其电子结构与光学性能异于宏观材料。

碳量子点尺寸 $1\text{--}10\text{ nm}$ ，由 sp^2 杂化石墨微晶组成，表面含羟基、羧基等含氧官能团，具激发波长依赖性荧光、高荧光量子产率与良好光稳定性，且低毒、生物相容性好、水溶性优异，在生物成像、荧光传感、光电器件领域应用前景广泛。纳米金刚石为纳米尺度金刚石颗粒，核心结构为 sp^3 杂化碳原子，具极高硬度、优异导热性与化学稳定性，大比表面积带来高表面活性，经表面功能化修饰后可

应用于磨料磨具、复合材料等领域。零维碳材料性能调控可通过改变颗粒尺寸、表面化学状态及掺杂改性实现，如调控碳量子点粒径可调节荧光发射波长，纳米金刚石表面包覆可改善分散性与导电性。

（二）一维碳材料

一维碳材料二维尺寸为纳米尺度，第三维具宏观尺度，呈线性或管状，长径比大，典型代表为碳纳米管、碳纤维、碳纳米纤维。其具优异力学性能、电子与热传输性能，独特一维结构使其在复合材料增强、纳米电子器件等领域具重要应用价值。

碳纳米管力学性能优异，理论抗拉强度 100-200 GPa，弹性模量 1 TPa，是理想复合材料增强体；导电性可通过管径与卷曲方式调控，金属性碳纳米管电导率达 1×10^6 S/m，远超铜，适用于纳米导线、场效应晶体管等器件。碳纤维由 sp^2 杂化石墨微晶沿纤维轴向定向排列组成，具高强度、高模量、低密度、耐高温等性能，按原料分为聚丙烯腈基、沥青基、粘胶基三类，聚丙烯腈基应用最广，用于航空航天、汽车工业等领域。一维碳材料性能调控可通过调节管径、长径比、晶体取向及表面改性实现，如控制碳纳米管制备工艺可调控导电性能，碳纤维表面氧化处理可改善与基体的界面结合力。

（三）二维碳材料

二维碳材料一维尺寸为纳米尺度，另二维具宏观尺度，呈层状结构，厚度为单原子层或少数原子层，典型代表为石墨烯、氧化石墨烯、还原氧化石墨烯、二维石墨炔。其具极高比表面积、优异电子传输与力学性能，在纳米电子器件、传感器等领域具巨大应用潜力。

石墨烯为单原子层平面六边形网状结构，前文已述及其优异性能。氧化石墨烯为石墨烯氧化物，表面含羟基、羧基、环氧基等官能团，具良好水溶性与分散性，为功能化修饰提供活性位点。还原氧化石墨烯由氧化石墨烯还原制得，结构性能接近石墨烯，残留少量缺陷与官能团，可通过还原程度调控导电性与化学性能。二维石墨炔由 sp 与 sp^2 杂化碳原子组成，含炔键结构，具独特电子结构与化学活性，在催化、能源存储领域具潜在价值。二维碳材料性能调控可通过调节层数、缺陷密度、表面官能团及掺杂改性实现，如控制石墨烯层数可调节电子传输与光学性能，氧化石墨烯氮掺杂可改善导电性与催化性能。

（四）三维碳材料

三维碳材料三维均具宏观尺度，呈网状、多孔或块状结构，可由低维碳材料自组装或复合构建，典型代表为多孔碳、石墨块体、碳泡沫、碳气凝胶。其具高比表面积、良好孔隙结构与优异稳定性，在能源存储、催化转化等领域具广泛应用前景。

多孔碳核心特征为丰富孔隙结构与高比表面积，前文已述及其吸附性能与应用。碳气凝胶由纳米碳颗粒连接形成三维多孔结构，密度可低至 0.0016 g/cm^3 ，具极高比表面积与优异导热性，用于超级电容器、催化剂载体等领域。石墨块体由石墨颗粒高温烧结形成，石墨片层定向排列，具良好导电、导热与力学性能，应用于电极、导热材料等领域。三维碳材料性能调控可通过调节孔隙结构、晶体取向及界面结合实现，如改变多孔碳制备工艺可调控吸附与储能性能，调控石墨块体烧结参数可改善导热性能。

四、碳材料的表面结构、缺陷与化学性质

表面结构与缺陷是影响碳材料化学性质与应用性能的关键因素，表面结构包括表面官能团、粗糙度、比表面积等，缺陷分为点缺陷、线缺陷、面缺陷等，两者均会改变碳材料电子结构与化学活性。碳材料化学性质体现在表面反应活性、吸附性能、掺杂改性等方面，与表面结构和缺陷密切相关。本节阐述表面结构特征、缺陷类型，及两者对化学性质的影响。

（一）碳材料的表面结构特征

碳材料表面性质主要由表面官能团与比表面积决定。理想晶体碳材料表面清洁无官能团，但实际制备与应用中会吸附氧气、水分形成官能团；非晶体碳材料因结构无序与制备氧化作用，表面通常含大量含氧官能团。

表面含氧官能团包括羟基、羧基、羰基、环氧基等，由碳原子与氧气反应形成，不同官能团作用各异：羟基与羧基改善亲水性与分散性，羰基与环氧基提供反应活性位点。此外，通过掺杂或功能化可引入含氮、含硫官能团，显著改善导电性与催化性能。比表面积是单位质量碳材料的表面积，直接影响吸附与催化性能，零维、二维、三维碳材料通常具大比表面积，如活性炭 $500\text{-}2000 \text{ m}^2/\text{g}$ 、石墨烯理论比表面积 $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ ，使其具优异吸附与催化活性。

（二）碳材料的缺陷类型与结构特征

碳材料缺陷指原子排列偏离理想晶体结构的区域,按维度与形态分为点缺陷、线缺陷、面缺陷三类,会破坏原子排列长程有序性,改变局部电子结构与理化性质。

点缺陷为 1-2 个原子尺度的缺陷,包括空位、间隙原子与杂质原子缺陷。空位缺陷是碳原子缺失形成的空穴,间隙原子缺陷是碳原子位于理想结构间隙,杂质原子缺陷是氮、硼等原子取代碳原子或占据间隙。点缺陷改变局部电子云密度,提升化学活性,如石墨烯空位缺陷增强吸附与催化活性,氮掺杂引入的杂质缺陷调节电子结构、改善导电性。

线缺陷为一维宏观尺度、二维小尺度缺陷,主要为位错,包括刃型与螺型位错。位错影响力学性能,如石墨中位错增加层间滑移阻力、提高硬度,碳纳米管中位错阻碍电子传输、降低导电性。面缺陷为二维宏观尺度、三维小尺度缺陷,包括层错与晶界。层错是层状结构排列错误,晶界是不同取向晶粒的界面,原子排列无序。面缺陷影响力学与导电性能,如碳纳米管层错降低力学强度,多晶石墨烯晶界阻碍电子传输、降低导电性。

（三）表面结构与缺陷对化学性质的影响

表面官能团、比表面积、缺陷类型与密度直接决定碳材料化学性质,影响表面反应活性、吸附性能与掺杂效果。表面官能团作为反应活性位点,可参与特定化学反应,如羧基与胺类的酰胺化反应用于功能化修饰,羟基与金属离子的配位反应用于制备金属/碳复合材料;同时调节亲疏水性,如氧化石墨烯的羟基与羧基增强亲水性,未氧化石墨烯具疏水性易团聚。

比表面积越大,材料与外界物质接触面积越大,吸附容量越高,如活性炭高效吸附水中污染物,碳量子点用于气体传感与重金属检测。缺陷显著提升化学活性,缺陷位点是表面反应优先发生区域,如石墨烯空位与边缘缺陷增强气体吸附能力,碳纳米管缺陷位点作为催化活性中心提升催化性能;此外,缺陷可调节电子结构,如氮掺杂石墨烯通过缺陷调节费米能级,使半金属转变为半导体,拓宽电子器件应用范围。

第二节 碳基材料分类体系

碳元素核外电子构型为 $1s^2 2s^2 2p^2$ ，可通过 sp^3 、 sp^2 、 sp 三种杂化方式形成化学键，进而构建结构与性能迥异的碳基材料。碳基材料的多样性使其应用场景极为广泛，而科学的分类体系是系统研究、开发及应用这类材料的基础，能清晰界定材料本质特征，梳理结构与性能的内在关联，为定向设计与功能优化提供理论指引。当前学术界基于杂化方式、晶体结构、宏观形态等多维度形成了多种分类思路，尚未完全统一。本节结合碳基材料的结构本质与应用导向，构建兼具科学性与实用性的分类体系，重点阐述按晶体结构、宏观形态、制备工艺及功能特性四大核心维度的分类标准、核心特征及典型代表，为后续章节深入探讨奠定基础。

一、按晶体结构分类

晶体结构是决定碳基材料理化性能的核心因素，基于碳原子杂化方式差异，可分为 sp^3 杂化晶体结构、 sp^2 杂化晶体结构、 sp 杂化晶体结构及无定形结构四大类。该分类直接反映原子排列规律与化学键特征，是理解材料力学、电学、热学性能的关键。不同晶体结构材料因原子间作用力、晶格常数差异，宏观性能分化显著，如 sp^3 杂化的金刚石硬度极高， sp^2 杂化的石墨则导电性优良。

（一） sp^3 杂化晶体结构碳基材料

sp^3 杂化由 1 个 2s 轨道与 3 个 2p 轨道杂化形成 4 个等能轨道，夹角 $109^\circ 28'$ ，呈正四面体构型。每个碳原子通过 sp^3 杂化轨道与相邻 4 个碳原子成键，构建三维网状晶体，键能高（约 345 kJ/mol），赋予材料优异力学性能与热稳定性。典型代表为金刚石，其晶体为面心立方结构，晶格常数 0.3567 nm，莫氏硬度 10，室温导热系数达 2000 W/(m · K)，电绝缘性良好，广泛应用于超硬刀具、散热器件等。人工合成金刚石通过高温高压法、化学气相沉积法实现规模化生产，可满足不同场景需求。

（二） sp^2 杂化晶体结构碳基材料

sp^2 杂化由 1 个 2s 轨道与 2 个 2p 轨道杂化形成 3 个等能轨道，夹角 120° ，呈平面三角形构型，剩余 1 个未杂化 p 轨道垂直于杂化平面。碳原子通过 sp^2 杂化轨道形成 σ 键构建平面网状结构，未杂化 p 轨道形成 π 键，使材料具备良好导电性、导热性与柔韧性。典型材料包括石墨、石墨烯、碳纳米管。石墨由多层

石墨烯通过范德华力堆叠而成，层间距 0.335 nm，层间作用力弱，具有润滑性与导电性，用于电极、润滑剂等。石墨烯为单层石墨片层，理论比表面积 2630 m²/g，电子迁移率 200000 cm²/(V · s)，杨氏模量 1.1 TPa，是研究热点。碳纳米管由石墨烯卷曲形成一维管状结构，分单壁与多壁类型，具有独特一维导电与力学性能，应用于电子器件、能源存储等领域。

（三）sp 杂化晶体结构碳基材料

sp 杂化由 1 个 2s 轨道与 1 个 2p 轨道杂化形成 2 个等能轨道，夹角 180°，呈直线构型，剩余 2 个未杂化 p 轨道相互垂直且垂直于杂化轨道平面。碳原子通过 sp 杂化轨道成 σ 键构建线性链状结构，未杂化 p 轨道形成 2 个垂直 π 键，使材料具有良好导电性与光学性能。典型材料为碳炔、聚乙炔。碳炔是 sp 杂化形成的线性共轭聚合物，分链状与环状，理论拉伸强度 63 GPa，导电性优良，应用潜力巨大。聚乙炔由乙炔聚合而成，分子链含大量共轭 π 电子，掺杂后可实现绝缘体-导体转变，是最早研究的导电聚合物，奠定了碳基导电材料发展基础。

（四）无定形结构碳基材料

无定形碳基材料碳原子排列无固定晶体规律，以 sp² 杂化为主，含少量 sp³ 杂化与未杂化电子，呈短程有序、长程无序结构，形成与快速冷却、非平衡态反应相关，性能受制备参数影响大，可定向优化。典型材料包括无定形碳、玻璃碳、活性炭。无定形碳由石墨微晶与无定形基质组成，导电与吸附性能良好，用于电极、吸附剂等。玻璃碳呈类玻璃外观，化学与热稳定性优异，表面光滑，用于生物传感器、电化学电极等。活性炭为多孔无定形碳，比表面积 1000-3000 m²/g，吸附性能极强，广泛应用于污水处理、气体吸附、催化剂载体等领域。

二、按宏观形态分类

宏观形态是碳基材料宏观尺度的存在形式，决定加工性能、应用场景与功能发挥。基于空间维度差异，可分为零维、一维、二维、三维碳基材料四大类。该分类清晰界定尺寸特征，助力根据应用需求选择材料，为结构设计与性能调控提供空间维度思路。不同形态材料在比表面积、界面接触面积、电荷传输路径上差异显著，影响能源存储、电子器件等领域应用效果。

（一）零维碳基材料

零维碳基材料三维尺度均为纳米级（1-100 nm），尺寸小、比表面积大、表

面原子比例高，具有独特量子尺寸效应与表面效应，形态多为球形、类球形或不规则颗粒，原子排列含晶体与无定形结构。典型材料包括碳量子点、富勒烯、纳米金刚石颗粒。碳量子点尺寸小于 10 nm，水溶性与光学稳定性良好，荧光波长可调，应用于生物成像、荧光传感等。富勒烯为碳原子组成的笼状分子，典型代表 C60，呈正二十面体结构，电子结构独特，化学活性高，用于超导材料、药物载体等。纳米金刚石颗粒为纳米量级金刚石，兼具金刚石优异力学性能与纳米材料量子效应，用于纳米复合材料、生物医学材料等。

（二）一维碳基材料

一维碳基材料二维为纳米级，第三维宏观延伸，形态多为纤维状、管状或线状，具有独特一维导电、力学与传质性能，长径比大，电子与光子可定向传输，提升电子器件、能源存储等领域性能。典型材料包括碳纳米管、碳纤维、碳纳米纤维。碳纳米管直径几纳米至几十纳米，长度达微米级，长径比超 1000，力学强度高、导电性优，用于场发射器件、超级电容器电极等。碳纤维由有机纤维碳化制成，直径几微米，分聚丙烯腈基、沥青基等类型，比强度与比模量远超传统金属，应用于航空航天、体育器材等。碳纳米纤维为纳米量级碳纤维，多由静电纺丝有机纳米纤维碳化得到，比表面积大、导电性好，用于超级电容器电极、催化剂载体等。

（三）二维碳基材料

二维碳基材料一维为纳米级，另两维宏观延伸，形态多为片层状，具有超高比表面积、优异电子迁移率与良好柔韧性，电子可在二维平面自由传输，界面相容性好，易与其他材料复合。典型材料包括石墨烯、石墨片、氧化石墨烯。石墨烯为单层二维碳基材料，性能优异，是研究热点，应用于电子器件、能源存储等。石墨片由多层石墨烯堆叠而成，可通过机械或化学剥离制备，导电与导热性良好，用于电极、导热材料等。氧化石墨烯为石墨烯氧化衍生物，表面含大量含氧官能团，水溶性与分散性好，还原可制备还原氧化石墨烯，也可作为前驱体制备复合材料，应用于水处理、生物医学等领域。

（四）三维碳基材料

三维碳基材料三维均宏观延伸，形态多为块状、多孔状、泡沫状，具有良好的结构稳定性、力学性能与传质性能，通常由零维、一维或二维碳基材料自组装、复合构建，内部含丰富孔隙与连通通道，提升比表面积与界面接触面积。典型材料包括多孔碳、碳泡沫、碳凝胶。多孔碳按孔径分微孔（ $< 2\text{ nm}$ ）、介孔

(2-50 nm)、大孔(> 50 nm)碳,比表面积1000-3000 m²/g,吸附与催化性能优良,用于超级电容器、锂离子电池等。碳泡沫呈泡沫状,低密度、高比表面积,导热与吸波性能好,用于轻质复合材料、散热材料等。碳凝胶由有机凝胶碳化制成,内部含连续多孔网络,孔径分布均匀,导电性好,用于超级电容器电极、吸附剂等。

三、按制备工艺分类

制备工艺决定碳基材料结构与性能,不同工艺通过调控温度、压力、气氛等条件,实现对杂化方式、晶体结构等的精准调控。基于制备工艺差异,可分为天然碳基材料、化学合成碳基材料、物理制备碳基材料、生物质衍生碳基材料四大类。该分类反映材料制备来源与过程,助力根据性能需求选择工艺,为工艺优化与创新提供支撑。不同工艺材料在纯度、结构均匀性、成本上差异显著,影响高端应用推广。

(一) 天然碳基材料

天然碳基材料直接来源于自然界,形成受自然环境长期影响,结构性能多样,制备以开采与初步加工为主,成本低、来源广,但纯度与均匀性差,需进一步提纯改性。典型材料包括天然石墨、天然金刚石、煤炭、木炭。天然石墨产于石墨矿,分鳞片与隐晶质石墨,导电与润滑性好,提纯改性后用于电极、润滑剂等。天然金刚石产于金伯利岩等,产量稀少、价格昂贵,用于高档首饰与精密刀具。煤炭由古代植物地质作用形成,分褐煤、烟煤等,是重要能源,也可制备活性炭等。木炭由木材不完全燃烧或干馏制成,吸附性能好,用于吸附剂、燃料等。

(二) 化学合成碳基材料

化学合成碳基材料通过气相沉积、液相合成等化学反应制备,可控性强、结构均匀、纯度高,可精准调控性能,需严格控制反应条件。典型材料包括化学气相沉积法制备的石墨烯、碳纳米管,液相合成法制备的碳量子点,固相合成法制备的碳化硅等。化学气相沉积法利用气态前驱体高温分解沉积,分热化学气相沉积、等离子体增强化学气相沉积等,制备高质量石墨烯、金刚石薄膜等,应用于电子器件。液相合成法反应条件温和、易规模化,制备碳量子点等,应用于生物医学。固相合成法利用固态前驱体高温固相反应,制备碳化硅等碳化物,力学与高温稳定性好,用于高温结构材料。

（三）物理制备碳基材料

物理制备碳基材料通过机械剥离、蒸发冷凝等物理方法制备，不涉及化学反应，操作简单、周期短，但产量低、均匀性待提升。典型材料包括机械剥离法制备的石墨烯、蒸发冷凝法制备的碳纳米颗粒、离子注入法制备的掺杂碳材料等。机械剥离法利用机械力剥离层状碳材料，最早用于制备石墨烯，质量高但产量低。蒸发冷凝法高温蒸发碳源再冷凝，制备碳纳米颗粒等，纯度高但能耗高。离子注入法用高能离子掺杂，制备 N、P 掺杂碳材料，掺杂均匀、深度可控，可提升导电性与催化性能。

（四）生物质衍生碳基材料

生物质衍生碳基材料以农业废弃物、林业废弃物等生物质为原料，通过碳化、活化制备，生物质资源可再生、环境友好，实现高值化利用并减少碳排放。制备包括预处理、碳化、活化三步，预处理干燥粉碎原料，碳化在惰性气氛高温加热形成碳骨架，活化增加比表面积与孔隙。典型材料包括玉米芯、秸秆制备的多孔碳，细菌纤维素制备的碳纳米纤维，甲壳素制备的氮掺杂碳材料等。这类材料比表面积高、表面官能团丰富、导电性好，应用于超级电容器、水处理等。如玉米芯基多孔碳比表面积高、孔径均匀，作为超级电容器电极，电容性能与循环稳定性优异。

四、按功能特性分类

功能特性是碳基材料应用价值的核心，不同材料基于独特结构表现出导电、导热、吸附等特性。基于功能差异，可分为导电、导热、吸附、催化、光学碳基材料五大类。该分类以应用功能为导向，清晰界定应用领域，助力按需选择材料，为功能优化与新型材料开发提供指引。不同功能材料在性能参数、应用场景上差异显著，性能优劣决定应用效果。

（一）导电碳基材料

导电碳基材料具有良好导电性能，源于共轭 π 电子体系或电荷转移，电导率 10^2 - 10^6 S/m，分半导体型与金属型。典型材料包括石墨、石墨烯、碳纳米管、导电炭黑。石墨电导率约 10^5 S/m，用于电极、导电涂料等。石墨烯电子迁移率极高，电导率超 10^6 S/m，用于高性能电子器件、透明导电薄膜等。碳纳米管电导率与卷曲方式相关，扶手椅型为金属型，锯齿型为半导体型，用于场发射器件、导电

复合材料等。导电炭黑电导率 10^2 - 10^4 S/m, 价格低廉, 用于导电橡胶、电池电极等。导电性能可通过掺杂、复合调控, 如 N 掺杂石墨烯提升载流子浓度, 碳纳米管-聚合物复合制备柔性导电材料。

（二）导热碳基材料

导热碳基材料具有良好导热性能, 源于声子与电子传输, 导热系数 100-2000 W/(m · K), 应用于电子散热、航空航天等领域。典型材料包括金刚石、石墨、石墨烯、碳纤维。金刚石导热系数 2000 W/(m · K), 为自然界最优, 用于高端电子散热材料。石墨导热具各向异性, 层内 1500 W/(m · K), 层间 5 W/(m · K), 取向处理后用于导热垫片等。石墨烯层内导热系数 5300 W/(m · K), 为已知最优二维导热材料, 用于高性能导热复合材料。碳纤维导热系数 100-1000 W/(m · K), 兼具高强度与高导热性, 用于航空航天导热结构材料。导热性能可通过调控晶体结构、减少缺陷优化, 如提高金刚石薄膜结晶度提升导热系数。

（三）吸附碳基材料

吸附碳基材料具有良好吸附性能, 源于高比表面积与丰富孔隙, 通过物理或化学吸附实现目标物质吸附, 吸附容量大、速率快、再生好, 应用于水处理、气体吸附等。典型材料包括活性炭、多孔碳、石墨烯、碳量子点。活性炭比表面积 1000-3000 m²/g, 吸附水中有机物、重金属及空气中有害气体。多孔碳孔隙结构丰富, 孔径与表面官能团可调, 介孔碳吸附大分子有机物, 氮掺杂多孔碳提升 CO₂ 吸附容量。石墨烯与氧化石墨烯比表面积高、官能团丰富, 物理与化学吸附结合, 氧化石墨烯吸附重金属与染料, 吸附容量远超传统材料。

（四）催化碳基材料

催化碳基材料具有催化活性, 源于表面活性位点（缺陷、掺杂原子等）, 作为催化剂或载体应用于多相催化, 化学稳定性好、导电性优、成本低, 提升反应活性与稳定性, 应用于燃料电池、CO₂ 还原等。典型材料包括掺杂碳材料、碳基复合材料等。掺杂碳材料通过 N、P 等元素掺杂改变电子结构, 形成活性位点, 如 N 掺杂碳材料替代铂催化剂用于燃料电池氧还原反应。碳基复合材料将碳材料与金属等活性组分复合, 提升活性组分分散性, 如碳纳米管负载铂颗粒作为燃料电池阴极催化剂, 催化活性与循环稳定性优异。碳纳米管与石墨烯加速电子传输, 提高催化速率。

（五）光学碳基材料

光学碳基材料具有独特光学性能，源于量子尺寸效应、共轭 π 电子跃迁等，表现为吸收、发射等特性，光学稳定性好、生物相容性优，应用于生物成像、发光器件等。典型材料包括碳量子点、富勒烯、石墨烯等。碳量子点荧光性能良好，发射波长可调，低毒性，用于细胞成像、荧光传感等。富勒烯具非线性光学性能，用于非线性光学器件。石墨烯宽光谱吸收，透光率 97.7%，用于透明导电薄膜、光电探测器等。碳纳米管光学性能与管径相关，具特定吸收与发射光谱，用于荧光传感器等。光学性能可通过表面修饰、掺杂调控，如碳量子点表面钝化提升荧光量子产率。

第三节 碳材料制备方法

碳材料的微观结构（晶体形态、孔隙特征、维度尺寸等）直接决定其物理化学性能，而制备方法是调控微观结构的核心手段，对碳材料的应用价值具有决定性影响。不同维度与类型的碳材料对应差异化制备技术，从传统高温热处理、化学气相沉积到新型溶剂热合成、模板法等，各类方法在反应机理、工艺条件与产物调控精度上各具特色。本节系统梳理碳材料制备主流方法，重点阐释技术原理、工艺参数影响规律、产物结构特征及适用范围，为碳基材料定向制备与性能优化提供理论与技术支撑。

一、固相合成法：传统与改性并重的制备路径

固相合成法以固态碳源或前驱体为原料，通过高温热处理、机械研磨等方式实现碳转化与成型，具有工艺简单、成本低廉、规模化能力强等优势，早期广泛应用于活性炭、石墨等传统碳材料制备，经改性后已拓展至石墨烯等新型碳材料领域。根据工艺特点，可分为高温热解法、机械化学法等细分类型。

（一）高温热解法：碳源定向转化的经典手段

高温热解法的核心原理是碳源在惰性或还原性气氛中，经 800-2500℃ 高温热处理发生热解反应，去除非碳元素实现碳富集与石墨化转化。其关键在于碳源选择与工艺参数调控：碳源的结构稳定性、含碳量直接影响碳收率与微观结构；热处理温度、升温速率、保温时间及气氛类型决定石墨化程度、晶体完整性与表面

缺陷密度。

在传统碳材料领域，该方法应用广泛：活性炭制备以木材、椰壳等天然高分子为碳源，400-800℃低温热解去除挥发性成分后，经活化处理调控孔隙结构；石墨制备则以无定形碳为前驱体，2000-3000℃高温长时间保温促进碳原子有序排列。在新型碳材料领域，还原氧化石墨烯的制备中，氧化石墨烯前驱体在 800-1000℃惰性气氛热解，可快速脱除含氧官能团并实现片层还原剥离。

高温热解法的优势是工艺成熟、产物纯度高、可规模化生产，但存在高温能耗高、结构调控精度有限、热敏性碳源易受损等局限。目前通过引入催化剂、优化气氛组成、分步热处理等改性方式，已显著提升产物结构可控性。

（二）机械化学法：绿色高效的低维碳材料制备技术

机械化学法依托高能球磨、研磨等机械作用，使碳源在室温或低温下发生化学键断裂、重组，实现碳材料制备与改性，具有能耗低、环境友好、工艺简单等优势，适用于石墨烯、碳纳米片等低维碳材料规模化制备。

该方法的关键是机械力参数调控与碳源选择：球磨转速、球料比、时间及介质直接影响机械力传递效率，决定前驱体反应程度与产物微观结构。以石墨为碳源，高能球磨可实现片层剥离形成石墨烯片；以生物质碳为前驱体，机械研磨可破坏致密结构形成高比表面积多孔碳纳米颗粒。此外，研磨过程引入氧化剂或还原剂，可通过机械力诱导氧化还原反应调控表面官能团与电子结构，提升电化学与催化性能。

机械化学法的核心优势是绿色高效，规避了高温热解法的高能耗与污染问题，但存在产物尺寸分布宽、结构缺陷多等问题，通常需后续纯化改性优化性能。近年通过引入模板剂、调控球磨氛围等方式，其结构可控性显著提升，推动了在碳基器件制备中的应用。

二、气相沉积法：低维碳材料精准制备的核心技术

气相沉积法利用气态前驱体在特定条件下分解沉积，在基底表面形成碳材料薄膜或低维结构，具有产物结构可控性高、纯度高、与基底结合性好等优势，是石墨烯、碳纳米管、金刚石薄膜等低维碳材料的核心制备技术，适配高性能碳基电子器件、光电器件制备需求。根据沉积温度与能量来源，可分为化学气相沉积法（CVD）、物理气相沉积法（PVD）、等离子体增强气相沉积法（PECVD）

等类型。

（一）化学气相沉积法：低维碳材料定向生长的主流手段

化学气相沉积法（CVD）通过甲烷、乙炔等气态碳源高温热分解，碳原子在催化剂或基底表面重排生长形成特定结构碳材料。其核心是通过调控反应温度、碳源浓度、载气流量、催化剂类型及基底材质，实现碳材料结构、尺寸与形貌的精准调控，是高质量低维碳材料的主流制备方法。

CVD 制备过程包括碳源气化、前驱体传输、热分解及碳原子沉积生长四阶段。石墨烯制备常以铜箔 / 镍箔为基底、甲烷为碳源，1000-1100℃下甲烷热解产生的碳原子在基底表面扩散有序排列，形成单 / 多层石墨烯；碳纳米管制备需引入铁、钴、镍等过渡金属催化剂，碳原子在催化剂颗粒表面溶解析出后沿晶向生长形成管状结构，通过调控催化剂粒径与反应参数可精准控制管径、长度及壁厚。

CVD 法的优势是产物质量高、结构可控性强，可制备高结晶度、低缺陷密度的低维碳材料，且与基底结合优异，便于器件集成封装。但存在制备成本高、工艺参数敏感、规模化难度大等问题。通过开发低压 CVD、快速热 CVD 等改性技术，优化催化剂与基底处理工艺，其制备效率与产物一致性显著提升，推动了高质量碳基器件产业化。

（二）等离子体增强气相沉积法：低温高效的碳材料制备技术

等离子体增强气相沉积法（PECVD）利用等离子体能量激活气态前驱体，实现低温（室温至 600℃）下的分解与沉积反应，降低了反应活化能，避免了高温对基底的损伤，拓展了塑料、玻璃等热敏性基底的应用范围。

PECVD 的关键是等离子体参数调控与前驱体选择：等离子体功率、频率、气体压力及气氛影响活性粒子浓度与能量，决定碳源分解效率与产物微观结构。金刚石薄膜制备中，甲烷与氢气混合气体经射频等离子体激活产生氢原子，刻蚀非金刚石相碳的同时促进碳原子沉积生长；类金刚石碳（DLC）薄膜可通过室温 PECVD 制备，具有高硬度、低摩擦系数特性，广泛应用于表面防护领域。

PECVD 法的优势是低温制备、基底适用广、效率高，适配柔性碳基器件与低温电子器件制备。但产物结晶度通常低于传统 CVD 法，表面粗糙度较高，需通过优化等离子体参数、引入掺杂元素提升性能。近年与模板技术、掺杂改性的结合，使其拓展至多孔碳、掺杂碳材料制备，为高性能碳基传感器、能源存储器件开发提供了新路径。

三、液相合成法：温和条件下的功能碳材料制备路径

液相合成法利用液态前驱体在溶液体系中发生化学反应，通过调控反应条件实现碳材料制备与功能化修饰，具有反应条件温和（室温至 200℃）、产物分散性好、易于功能化、可批量制备等优势，适用于碳量子点、多孔碳、功能化石墨烯等功能碳材料制备。根据反应类型，可分为溶剂热 / 水热合成法、模板法、氧化还原法等类型。

（一）溶剂热 / 水热合成法：功能碳量子点制备的主流技术

溶剂热 / 水热合成法利用密闭反应釜的高温高压环境，使前驱体溶解、反应、成核生长形成碳材料，以水为介质的称为水热合成，以有机溶剂为介质的称为溶剂热合成。该方法温和高效、产物尺寸均匀、表面官能团丰富，是碳量子点等零维碳材料的主流制备技术。

其关键是前驱体选择与反应参数调控：前驱体多选用柠檬酸、葡萄糖等小分子有机物或蜂蜜、壳聚糖等生物质材料，在高温高压下发生脱水碳化反应形成碳核，表面保留羟基、羧基等含氧官能团，赋予良好水溶性与荧光性能。反应温度（120-250℃）、时间（2-24h）、前驱体浓度及溶剂类型直接影响产物尺寸、荧光量子产率与稳定性。例如，柠檬酸为前驱体 180℃水热反应 12h，可制备 2-5nm、荧光量子产率超 50% 的碳量子点；调控溶剂类型可进一步优化表面结构与荧光性能。

该方法的优势是一步实现制备与表面修饰，无需复杂后续处理，但存在反应釜容积有限、规模化难度大、产物纯度受前驱体影响大等问题。连续式水热合成、微波辅助水热合成等技术的开发，显著提升了制备效率，推动了碳量子点在生物成像、荧光传感领域的应用。

（二）模板法：多孔碳材料精准制备的核心手段

模板法通过模板的孔道结构引导碳源在表面或内部沉积碳化，去除模板后得到特定孔道结构的碳材料，是多孔碳材料的核心制备技术，可精准调控孔道尺寸（微孔、介孔、大孔）、结构（有序 / 无序）及比表面积，赋予优异吸附、电化学与催化性能，广泛应用于超级电容器、锂离子电池等领域。根据模板类型，可分为硬模板法与软模板法。

硬模板法以二氧化硅、沸石、金属有机框架材料（MOFs）等无机材料为模板，

通过浸渍将碳源引入孔道，碳化后经酸溶、碱溶等方法去除模板，得到与模板孔道互补的多孔碳材料。其优势是孔道结构可控性高，可制备有序孔道材料，尺寸分布均匀。例如，以 SBA-15 介孔二氧化硅为模板、蔗糖为碳源，可制备比表面积超 $1500\text{m}^2/\text{g}$ 的有序介孔碳；以 MOFs 为模板高温碳化，可制备保留骨架特征的高比表面积多孔碳。

软模板法以表面活性剂、聚合物等有机分子为模板，利用其自组装形成的胶束、囊泡引导碳源沉积碳化，模板在碳化过程中自行分解挥发，无需后续去除工艺。其优势是工艺简单、环境友好，可通过调控表面活性剂参数灵活调控孔道结构。例如，以三嵌段共聚物 F127 为软模板、酚醛树脂为碳源，经自组装 - 碳化可制备有序介孔碳，适配超级电容器电极材料需求。

模板法的核心优势是孔道调控精度高，但硬模板存在制备成本高、去除工艺复杂等问题，软模板产物孔道稳定性差、规模化难度大。近年通过开发新型模板材料、优化模板 - 碳源相互作用、多模板复合等方式，其制备效率与性能显著提升，推动了在能源存储领域的产业化应用。

四、制备方法的选择与优化策略

碳材料制备方法具有多样性与针对性，需结合应用需求选择合适方法并优化工艺，以实现产物性能提升、成本降低与环境友好。本节从选择依据、工艺优化策略及绿色制备趋势三方面，阐释制备方法的选择与优化思路。

（一）制备方法的选择依据

制备方法选择需综合考量碳材料维度结构、性能要求、应用场景、成本及规模化潜力。从维度结构看，低维碳材料优先选择气相沉积法或液相合成法，多孔碳材料优先选择模板法或改性固相合成法，块体 / 薄膜碳材料可选择固相合成法或气相沉积法。从性能要求看，高性能电子器件需选择 CVD 法制备高质量低维碳材料，能源存储器件可选择模板法制备多孔碳材料，生物医药领域碳材料优先选择溶剂热 / 水热合成等温和技术。从成本与规模化看，传统碳材料选择高温热解法等低成本技术，高端电子器件可采用 CVD 法，新兴领域碳材料需开发低成本规模化制备技术。

（二）工艺优化策略与绿色制备发展趋势

工艺优化核心是通过参数调控实现结构性能精准匹配，同时降低成本与污染。

具体策略包括：一是参数协同调控，通过正交实验、响应面法研究参数影响规律，确定最优组合；二是引入掺杂、表面修饰、复合改性等技术提升性能；三是工艺集成创新，结合不同方法优势开发新型制备技术。

绿色制备已成为碳材料领域发展趋势，核心是减少能耗、降低污染、提高资源利用率。发展方向包括：开发低温 PECVD、室温机械化学法等低能耗技术；采用生物质碳源等绿色前驱体替代化石基碳源；优化工艺路线，开发无模板、无催化剂绿色技术；推动模板材料循环利用与反应废液回收，提升资源利用率。

综上，碳材料制备方法各具优势，未来将聚焦精准调控、绿色高效、规模化制备核心维度，通过技术创新与工艺优化提升碳材料性能，推动碳基器件在高端领域产业化应用。跨科学技术融合将为制备技术突破提供新思路，助力碳基材料产业高质量发展。

第四节 表征分析技术

碳基材料的结构与性能存在紧密构效关系，精准表征其微观结构、化学组成、界面状态及宏观性能，是实现材料定向设计、制备优化及器件性能调控的核心前提。随着碳基材料向低维化、复合化、功能化发展，表征技术已形成宏观到微观、静态到动态、定性到定量的多维度体系。本节系统梳理核心表征技术，重点阐述结构表征、成分分析、性能测试及界面表征的原理与应用，为碳基材料研究与器件开发提供技术支撑。

一、碳基材料结构表征技术

碳基材料结构具有多层次性，从宏观形貌到微观晶体结构、电子结构，均直接决定物理化学性能。结构表征技术通过谱学、显微学手段捕获不同尺度结构信息，是理解构效关系的基础。以下从晶体结构、形貌与微观结构、孔结构三个维度，阐述核心表征技术及应用。

（一）晶体结构表征技术

碳基材料晶体结构多样，如金刚石面心立方结构、石墨六方层状结构、碳纳米管管状结构及无定形碳无序结构，结构差异导致性能显著分化。X 射线衍射（XRD）是核心表征技术，基于 X 射线与原子的相干散射，通过衍射峰位置、

强度及半高宽，可定量分析晶体结构类型、晶格参数、结晶度及晶粒尺寸。

在石墨类材料表征中，XRD 可通过（002）晶面峰计算层间距，借助谢乐公式求解晶粒尺寸，通过峰强比判断石墨化程度。单层石墨烯 XRD 峰强度弱，需结合掠入射技术提高灵敏度以表征层数及结晶完整性。碳纳米管的（100）、（101）峰反映管状结构有序性，峰宽化程度与直径分布、缺陷含量相关。此外，电子衍射（ED）技术常与透射电镜联用，通过衍射斑点分布直观反映晶体结构、取向关系及单晶/多晶特性，尤其适用于石墨烯、碳量子点等低维材料的微区晶体结构表征。

（二）形貌与微观结构表征技术

碳基材料的形貌（片状、管状、球状等）及微观结构（层间堆叠、缺陷分布）影响比表面积、电荷传输效率及界面作用。扫描电子显微镜（SEM）和透射电子显微镜（TEM）是主流技术。SEM 通过电子束与样品表面相互作用产生的二次电子、背散射电子成像，分辨率达纳米级，可观察碳纳米管分散性、石墨烯片层尺寸、多孔碳孔道形貌及复合材料中填料分布，结合能谱附件可同步实现微区成分定性分析。

TEM 利用透射电子信号成像，分辨率达亚埃级，可观察内部微观结构。高分辨 TEM（HRTEM）通过晶格条纹成像，直接观察石墨层状结构、石墨烯层数、碳纳米管管壁层数及空位、位错等缺陷。对于碳量子点，TEM 可精准表征粒径与尺寸分布。扫描透射电镜（STEM）结合高角环形暗场（HAADF）成像，可实现原子尺度元素衬度成像，区分轻元素与掺杂重元素，支撑杂原子掺杂碳材料结构表征。

（三）孔结构表征技术

多孔碳、石墨烯气凝胶等材料的孔结构（孔径、分布、比表面积、孔容）是吸附、催化、能源存储领域应用的核心指标，表征技术主要包括气体吸附-脱附法、压汞法及扫描探针显微镜法。气体吸附-脱附法是标准方法，以氮气（77K）、氩气（87K）为吸附质，基于物理吸附过程，通过等温线形状结合 BET 模型计算比表面积，利用 BJH、DFT 等方法分析介孔（2-50nm）和微孔（< 2nm）的孔径分布与孔容。

微孔碳材料因氮气分子扩散限制，常采用二氧化碳吸附（273K）提高表征准确性。压汞法通过测量汞进入孔道的体积计算孔径分布，适用于大孔（>

50nm) 材料, 但汞毒性及润湿性问题限制其应用。扫描探针显微镜 (SPM) 包括原子力显微镜 (AFM) 和扫描隧道显微镜 (STM), 可实现原子级分辨率孔结构成像。AFM 通过探针与样品间作用力成像, 适用于石墨烯表面孔结构及层间堆叠高度表征; STM 基于隧道电流效应, 仅适用于导电碳材料, 可观察石墨表面原子排列及缺陷。

二、碳基材料成分分析技术

碳基材料的化学组成, 包括碳元素存在形式、杂原子掺杂含量与化学态、表面官能团类型, 直接影响化学活性、导电性及界面相容性。成分分析技术通过谱学手段实现定性定量分析, 是杂原子掺杂、复合材料及表面功能化材料研究的核心。本节重点阐述元素组成、化学态与官能团及杂质含量分析技术。

(一) 元素组成分析技术

元素组成分析旨在确定各元素质量分数或原子分数, 常用技术包括元素分析仪、X 射线光电能谱 (XPS) 及电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-AES)。元素分析仪通过样品燃烧或高温分解, 将元素转化为氧化物或气体 (CO_2 、 H_2O 等), 利用热导、红外检测器检测浓度, 实现碳、氢、氮、氧等常量元素定量分析, 具有操作简便、快速精准的特点, 广泛应用于基础成分表征。

XPS 基于光电效应, 通过 X 射线激发内层电子, 测量光电子结合能与动能实现元素定性定量分析, 检测范围覆盖除氢、氦外所有元素, 具有表面敏感性 (检测深度 1-10nm), 适用于表面元素组成及杂原子掺杂含量表征。对于复合材料中金属杂质 (铁、钴等), ICP-AES 是首选技术, 通过等离子体离子化样品, 利用原子发射光谱特征波长识别元素, 结合强度定量, 检测限低、线性范围宽, 可实现 ppm 级甚至 ppb 级精准定量。

(二) 化学态与官能团分析技术

元素化学态 (碳 sp^2 、 sp^3 杂化, 氮吡啶氮等) 及表面官能团 (羟基、羧基等) 决定化学性能, 常用分析技术包括 XPS、拉曼光谱、傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 及核磁共振光谱 (NMR)。XPS 通过高分辨率谱图分峰拟合, 可识别不同化学态并定量, 如 C 1s 谱可区分 sp^2 C ($\sim 284.5\text{eV}$)、 sp^3 C ($\sim 285.0\text{eV}$) 及各类含氧官能团, N 1s 谱可识别不同化学态氮原子, 为掺杂机制研究提供数据。

拉曼光谱基于光子与分子非弹性散射, 通过拉曼位移、峰强及峰宽表征结构

有序性、缺陷含量，碳基材料中 D 峰 ($\sim 1350\text{cm}^{-1}$) 对应无序 / 缺陷结构，G 峰 ($\sim 1580\text{cm}^{-1}$) 对应 sp^2 碳面内振动， $I_{\text{D}}/I_{\text{G}}$ 比值是缺陷含量重要指标；对于低维碳材料，可通过 2D 峰、RBM 峰表征层数、直径。FT-IR 通过红外吸收特性定性分析官能团，如羟基 ($3200\text{-}3600\text{cm}^{-1}$)、羧基 ($1700\text{-}1750\text{cm}^{-1}$) 特征峰，适用于表面功能化效果表征。NMR 基于原子核自旋磁矩共振， ^{13}C NMR 可区分不同杂化碳及官能团取代碳，适用于无定形碳、聚合物衍生碳材料表征。

(三) 杂质含量分析技术

制备过程中原料残留、催化剂杂质、污染物等会影响材料性能及器件稳定性，杂质分析是质量控制关键环节。除 ICP-AES 外，还可采用原子吸收光谱 (AAS)、X 射线荧光光谱 (XRF) 及质谱 (MS)。AAS 基于原子对特定波长光的吸收定量，适用于单一金属杂质精准检测，检测限与 ICP-AES 相当，但无法多元素同时检测。

XRF 利用 X 射线激发特征荧光 X 射线实现元素定性定量，样品前处理简单、非破坏性，适用于常量、半微量金属杂质快速筛查，但检测限较高。MS 通过离子质荷比分离检测，结合不同离子源可检测各类杂质。ICP-MS 兼具高电离效率与高分辨率、高灵敏度，检测限达 ppb 级甚至 ppt 级，适用于痕量金属杂质定量；电喷雾电离质谱 (ESI-MS) 适用于有机杂质分析，可表征表面有机修饰剂残留。

三、碳基材料性能测试技术

碳基材料性能涵盖电学、力学、热学、化学等维度，性能测试通过模拟应用场景精准测量参数，是评估适用性、指导器件优化的关键。不同类型碳基材料测试侧重点不同，本节重点阐述四类性能测试的核心技术与应用。

(一) 电学性能测试技术

电学性能 (电导率、载流子迁移率、电容等) 是电子器件、能源存储领域应用的核心指标，测试方法需适配材料形态。薄膜类材料 (石墨烯、碳纳米管薄膜) 采用四探针法测试电导率，通过施加恒定电流测量电压降，结合尺寸计算，精度高且非破坏性，可避免接触电阻影响。粉体类材料 (碳黑、多孔碳) 需压片制备样品后，采用两探针或四探针法测试。

载流子迁移率测试常用霍尔效应测试和场效应晶体管 (FET) 法。霍尔效应测试通过磁场中霍尔电压计算载流子类型、浓度及迁移率，适用于块体及薄膜材料；FET 法通过构建器件，测量转移与输出特性曲线计算迁移率，更贴近实际应

用场景，适用于低维材料。能源存储领域，电容性能通过电化学工作站采用循环伏安（CV）、恒电流充放电（GCD）及电化学阻抗谱（EIS）测试，CV 分析充放电特性，GCD 计算比电容与循环稳定性，EIS 分析界面电荷转移电阻，为电极材料优化提供依据。此外，高压测试仪、阻抗分析仪可测试击穿电压、介电常数，适用于金刚石薄膜等绝缘材料。

（二）力学性能测试技术

力学性能（拉伸强度、弹性模量、硬度等）是结构材料、柔性电子器件应用的重要指标，测试方案需适配结构形态。块体材料及复合材料采用万能材料试验机测试拉伸强度与弹性模量，通过轴向拉力直至断裂，记录应力 - 应变曲线计算参数。薄膜类材料因尺寸小、厚度薄，需采用微拉伸测试系统，结合显微镜观察变形与断裂过程提升精度。

硬度测试常用维氏硬度测试和纳米压痕测试，维氏硬度通过金刚石压头压入样品，测量压痕对角线长度计算，适用于块体材料；纳米压痕通过微小载荷下载荷 - 位移曲线计算纳米硬度与弹性模量，适用于薄膜及微纳器件。断裂韧性测试采用三点弯曲法或单边缺口梁法，通过临界载荷计算韧性，评估抗裂纹扩展能力。柔性材料需进行弯曲疲劳测试，通过反复弯曲 - 恢复循环评估力学稳定性，保障柔性器件长期服役性能。

（三）热学性能测试技术

热学性能（热导率、热稳定性等）是热管理器件、高温场景应用的核心指标，测试技术包括稳态法、瞬态法及热分析技术。热导率测试中，稳态法（平板稳态法等）通过稳定温度梯度下的热量传递计算，适用于块体及厚薄膜材料；瞬态法（激光闪射法等）通过瞬时热载荷下温度响应计算热扩散系数，再结合比热容与密度求解热导率，测试快速、样品用量少，适用于各类碳基材料。

比热容测试常用差示扫描量热法（DSC）和量热计法，DSC 通过样品与参比物热流差计算比热容，同时获取相变信息；量热计法直接测量热量变化，适用于特定温度范围精准测量。热稳定性测试主要采用热重分析（TGA），在程序升温、特定气氛下测量样品质量变化，评估热分解温度、失重率，判断高温服役极限，如空气气氛下可通过 TGA 曲线确定碳氧化起始温度。

（四）化学性能测试技术

化学性能（化学稳定性、催化活性、吸附性能等）是催化、吸附、生物医疗

领域应用的关键，测试方案需结合化学作用机制设计。化学稳定性测试通过将样品置于酸、碱、高温氧化/还原等环境，定期表征质量、结构及性能变化评估稳定性，如耐腐蚀测试可结合 XRD、FT-IR 表征结构与官能团变化。

催化活性测试需搭建对应反应装置，通过气相色谱 (GC)、液相色谱 (LC)、电化学工作站等测量转化率、选择性、催化寿命，评估催化性能。吸附性能测试包括静态与动态吸附法，静态法通过平衡吸附量绘制等温线评估容量；动态法通过吸附质流体穿透曲线评估动态性能及速率，更贴近实际应用场景。

四、碳基材料界面表征技术

碳基复合材料、器件中，碳基材料与基体、电极、电解质的界面状态（结合强度、化学组成、电荷转移行为）直接影响整体性能与服役稳定性。界面表征技术捕获界面区域信息，揭示作用机制，为界面优化提供支撑。本节重点阐述界面结构与成分表征、结合强度测试及电荷转移表征技术。

（一）界面结构与成分表征技术

界面区域薄（纳米级），需高空间分辨率、表面敏感性表征技术。TEM 是核心技术，通过界面横截面样品，利用 HRTEM 观察原子排列、晶格匹配度及过渡层厚度，直观反映结合状态，如碳纳米管 / 聚合物复合材料中可判断化学键合情况。SEM 可通过界面断裂形貌间接评估结合状态，结合 EDS 可实现元素分布 mapping，观察元素扩散与界面反应。

XPS 通过深度剖析技术 (Ar 离子溅射) 分析界面不同深度元素组成与化学态，揭示化学结合机制，如石墨烯 / 金属界面可检测金属 - 碳键。拉曼光谱 Mapping 通过扫描界面拉曼信号，分析碳基材料结构变化，评估界面作用影响；FT-IR 通过特征吸收峰变化判断新化学键形成，揭示界面化学作用机制。

（二）界面结合强度测试技术

界面结合强度是界面作用能力的直接指标，测试方法需适配材料结构。拔出试验适用于纤维状碳材料（碳纳米管、碳纤维）与基体的结合强度测试，通过拔出纤维的最大载荷计算界面剪切强度，直观反映结合能力，但样品制备难度大。剥离试验适用于薄膜类材料与基底的结合强度测试，通过垂直剥离力测量剥离强度，操作简便，适用于柔性薄膜表征。

剪切试验（单搭接、双搭接）适用于块体复合材料，通过剪切载荷直至界面

破坏，测量剪切强度评估抗剪切能力。纳米压痕试验适用于微纳尺度界面，通过压头压入界面的载荷 - 位移曲线，分析剥离或裂纹扩展情况计算结合强度，适用于微纳器件。此外，EIS 可通过界面电荷转移电阻与双电层电容，间接评估碳基电极与电解质的界面结合状态。

（三）界面电荷转移表征技术

界面电荷转移行为影响器件电学性能与能量转换效率，表征技术基于电化学与谱学方法。EIS 通过不同频率交流阻抗绘制 Nyquist 图，拟合等效电路提取界面电荷转移电阻 (R_{ct})、双电层电容 (C_{dl})， R_{ct} 越小电荷转移效率越高，如碳基超级电容器中可指导电极改性与电解质优化。

光电子能谱 (XPS、UPS) 通过界面电子结合能与功函数变化，揭示电荷转移方向与数量，利用功函数差异导致的结合能偏移定量分析转移量。Kelvin 探针力显微镜 (KPFM) 通过接触电势差测量功函数分布，直观反映界面电荷转移空间分布，适用于微纳尺度碳基器件表征。

综上所述，碳基材料表征技术已形成多维度完整体系，各技术相互补充，为研究与器件开发提供全面支撑。未来表征技术将向更高分辨率、精准定量、动态原位方向突破，如原位透射电镜、原位电化学 - 谱学联用技术，实现制备与服役过程中结构性能演变的实时追踪，为材料定向设计与高效应用提供更强保障。

第二章 石墨烯材料与器件

第一节 石墨烯制备工艺

石墨烯作为单层 sp^2 杂化碳原子构成的二维晶体，自 2004 年被 Geim 与 Novoselov 团队首次剥离以来，凭借极致二维结构衍生的优异电学、热学、力学及光学性能，成为碳基材料领域核心研究方向。其载流子迁移率远超硅材料，热导率居已知材料前列，兼具超高机械强度与柔性透光特性，在高频电子、柔性光电、能源存储转换及生物传感等领域展现不可替代的应用潜力。石墨烯性能发挥依赖晶体质量、层数、尺寸及表面缺陷等关键参数，而制备工艺是调控这些参数的核心环节。因此，开发高效、可控、低成本且规模化的制备技术，是推动其从实验室走向工业化应用的关键支撑。本节系统梳理石墨烯制备工艺的发展历程、核心原理与技术特点，重点探讨各类方法的调控机制与优化路径，为后续器件构建与应用奠定基础。

一、石墨烯制备工艺的分类与发展概述

历经近二十年发展，石墨烯制备技术形成多元化体系，按制备原理与原料差异可分为自上而下法与自下而上法两大类。自上而下法以石墨等体相碳材料为原料，通过物理或化学手段破坏层间范德华作用力，实现单层或少数层石墨烯剥离；自下而上法则以小分子碳源为原料，经化学合成构建 sp^2 杂化碳骨架形成石墨烯。两类方法各有优劣，适配不同应用场景与性能需求。

早期石墨烯制备以自上而下法为主，机械剥离法作为发现方法，为基础研究提供高质量样品，但受限于制备效率与规模化能力，无法满足工业需求。为突破局限，研究者开发了氧化还原剥离法、液相剥离法等规模化潜力更强的自上而下技术，同时探索化学气相沉积、外延生长等自下而上方法。自下而上法凭借对石墨烯尺寸、层数及缺陷的精准调控能力，逐渐成为高性能石墨烯制备主流方向，尤其是化学气相沉积法，已实现大面积、高质量石墨烯薄膜可控制备，为柔性电

子、光电显示等领域提供关键技术保障。

当前，石墨烯制备工艺呈现“精准调控”与“规模化兼容”并重的发展趋势，既要精确控制层数、晶界、缺陷密度等微观结构以保障性能，又要提升效率、降低成本以适配工业化生产。不同工艺在技术成熟度、产品质量、生产成本上的差异决定其应用适配性，深入理解各类工艺核心原理与技术特点，是实现材料精准选型与应用拓展的前提。

（一）自上而下法的技术特征与适用场景

自上而下法核心优势在于原料来源广泛（天然石墨、膨胀石墨等）、制备流程简单，可快速获得石墨烯样品。其中，机械剥离法制备的石墨烯缺陷密度最低、晶体质量最优，是量子霍尔效应验证、载流子输运特性等基础研究的理想材料，但依赖人工操作与精密控制，制备效率极低、产物尺寸不均，仅适用于实验室小批量制备。氧化还原剥离法通过化学氧化破坏石墨层间作用力，形成可分散氧化石墨烯，经还原恢复部分 sp^2 结构，可实现规模化制备且成本较低，但氧化与还原过程会引入大量缺陷，导致电学与力学性能显著下降，适用于复合材料增强、吸附材料等对性能要求较低的领域。

液相剥离法通过超声、剪切等物理手段在液相介质中剥离石墨烯，无需化学氧化过程，产物缺陷密度更低、性能更优，可通过调控介质表面张力、超声参数控制剥离效率与层数。该方法适用于规模化制备中高质量石墨烯粉体，在超级电容器电极材料、复合材料等领域应用前景良好，但存在产物分散性控制难、溶剂回收成本高等问题。

（二）自下而上法的技术特征与适用场景

自下而上法以甲烷、乙炔、苯等小分子碳源为原料，通过精准调控反应条件实现碳原子有序排列与 sp^2 杂化，可从根本上控制石墨烯层数、尺寸、晶界与缺陷结构，产物晶体质量与性能一致性更高。其中，化学气相沉积法（CVD）通过高温催化分解碳源、沉积生长碳原子形成连续石墨烯薄膜，可通过调控衬底、碳源、温度等参数精准控制层数，是目前制备高质量石墨烯薄膜最成熟、应用最广泛的技术，适用于柔性电子器件、光电显示、高频器件等对性能与尺寸要求较高的领域。

外延生长法以单晶 SiC 等为衬底，经高温退火使衬底表面碳原子重构形成石墨烯，产物与衬底结合紧密、晶体质量高，适用于高性能电子器件集成，但需高

质量单晶 SiC 衬底，制备温度高、成本昂贵，限制规模化应用。有机合成法通过小分子前驱体偶联构建石墨烯片层，可精准调控尺寸、边缘结构及官能团，为功能化石墨烯制备提供途径，但合成步骤复杂、产率低，目前仍处于实验室阶段。

二、自上而下法石墨烯制备关键技术

（一）机械剥离法

机械剥离法是最原始的石墨烯制备方法，核心原理是利用外力克服石墨层间范德华作用力，从体相石墨中剥离单层或少数层石墨烯。Geim 团队最初采用的“胶带剥离法”为典型代表，操作过程为：将透明胶带粘贴于高定向热解石墨（HOPG）表面，撕拉胶带使石墨层间分离获得薄石墨片层；将粘贴石墨片层的胶带转移至 SiO₂/Si 衬底，按压剥离使石墨片层附着；通过光学显微镜观察筛选单层或少数层石墨烯样品。

该方法技术关键在于原料选择与操作控制，高定向热解石墨因层状结构有序、层间作用力均匀，是理想原料，可显著提升单层剥离成功率；胶带粘性、撕拉力度与速度、衬底平整度与清洁度等参数均影响剥离效果，需精准优化。其突出优势是制备过程简单、无需复杂设备，剥离的石墨烯保留完整 sp² 晶体结构，缺陷密度极低（通常低于 1 个缺陷/100nm²），载流子迁移率可达 200000cm²·V⁻¹·s⁻¹ 以上，是研究本征物理化学性能的最佳样品来源。

局限性同样显著：一是制备效率极低，依赖人工筛选，无法批量制备；二是产物尺寸小（微米级）且分布不均；三是难以制备大面积连续薄膜，无法满足工业化需求。因此，机械剥离法目前仅用于石墨烯量子效应、光学特性等基础研究，尚未实现工业化应用。

（二）氧化还原剥离法

氧化还原剥离法是规模化制备石墨烯的重要自上而下技术，核心流程包括石墨氧化、氧化石墨烯剥离与分散、氧化石墨烯还原三步。通过化学氧化在石墨层间引入羟基、环氧基、羧基等含氧官能团，增大层间距离、降低范德华作用力，同时提升亲水性，使其可在水溶液中分散剥离形成氧化石墨烯；再经化学或热还原去除含氧官能团，恢复 sp² 共轭结构获得还原氧化石墨烯。

石墨氧化是核心环节，直接决定氧化程度、剥离效果与还原产物质量。主流氧化方法包括 Hummers 法、改进 Hummers 法等，其中 Hummers 法因反应温和、

效率高、操作安全，应用最广泛。该方法以天然石墨为原料，浓 H_2SO_4 为插层剂， KMnO_4 为氧化剂，经低温（ 0°C 左右）、中温（ 35°C 左右）、高温（ 98°C 左右）三阶段逐步氧化，通过插层、氧化与剥离协同作用实现石墨层间充分解离。氧化过程中，氧化剂用量、反应温度与时间、搅拌速率等参数需严格控制，避免过度氧化破坏碳骨架或氧化不足无法有效剥离。

氧化石墨烯的剥离与分散多在水溶液中进行，通过超声提供机械力破坏层间作用力形成稳定分散液。超声功率与时间是关键参数：功率过低、时间过短，无法充分剥离，产物含大量多层氧化石墨烯；功率过高、时间过长，易导致片层断裂与结构破坏。分散液 pH 值影响稳定性，碱性条件下羧基解离形成负电荷，通过静电排斥提升分散效果。

还原是恢复导电性能的关键，分为化学还原与热还原。化学还原采用肼类化合物、硼氢化钠、维生素 C 等还原剂，水合肼还原效果好但剧毒易燃，限制规模化应用；维生素 C 等绿色还原剂环境友好但还原程度低、导电性差。热还原通过 $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ 高温退火使含氧官能团分解为 CO_2 、 H_2O 等，重构碳骨架恢复 sp^2 结构，还原效率高、导电性优，但高温易导致片层团聚与褶皱，影响分散性与应用性能。

该方法优势是流程简单、成本低、可规模化制备，满足复合材料、吸附材料、储能材料等领域对石墨烯粉体的批量需求；核心缺陷是氧化还原过程引入大量空位、边缘缺陷，破坏 sp^2 共轭结构，载流子迁移率显著下降（通常 $100\text{--}1000\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ），无法满足高性能电子器件需求，且残留含氧官能团与杂质影响性能稳定性。

（三）液相剥离法

液相剥离法是温和的自上而下制备技术，核心原理是在液相介质中通过超声、剪切、球磨等物理手段提供机械力，克服石墨层间范德华作用力实现剥离，同时利用介质表面张力与分子相互作用维持片层分散稳定，避免团聚。与氧化还原法相比，无需化学改性，可最大程度保留完整 sp^2 结构，产物缺陷密度更低、性能更优。

技术关键在于液相介质选择与剥离条件调控。介质表面张力需与石墨烯（约 $40\text{--}50\text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）匹配，才能降低剥离能垒、抑制团聚。常用介质包括 N-甲基吡咯烷酮、二甲基甲酰胺等有机溶剂，及添加十二烷基苯磺酸钠、吐温 80 等表面活性剂的水溶液。N-甲基吡咯烷酮因匹配度高，是应用最广泛的有机溶剂；水

溶液中表面活性剂通过静电排斥或空间位阻提升稳定性，成本低且环境友好，但残留可能影响性能。

剥离条件调控包括超声参数、剪切速率等，超声剥离应用最广泛，通过空化效应与冲击波实现剥离。适当提升超声功率与延长时间可提高单层产率，但过高功率与过长时间会导致片层断裂、尺寸减小及局部高温，需优化参数平衡剥离效率与片层完整性。剪切与球磨剥离适用于规模化制备，通过强机械力实现高效剥离，但存在片层断裂与尺寸不均问题，需调控剪切速率、球磨介质与转速优化质量。

该方法优势是制备温和、产物缺陷低、性能优且可规模化，适用于能源存储、复合材料、柔性电子等对性能要求较高的领域；局限性为剥离效率低（单层产率通常低于 30%）、产物尺寸分布宽、有机溶剂回收成本高、表面活性剂残留难解决，限制工业化经济性。

三、自下而上法石墨烯制备关键技术

（一）化学气相沉积法（CVD）

化学气相沉积法是制备高质量、大面积石墨烯薄膜最成熟且具工业化潜力的自下而上技术，核心原理是高温下碳源气体在催化剂作用下催化分解产生活性碳原子，碳原子在衬底表面迁移、吸附与重组形成 sp^2 杂化石墨烯片层，通过调控生长参数实现连续生长与层数控制。制备过程包括衬底预处理、催化剂沉积、高温生长、冷却与转移四步，每一步均显著影响石墨烯质量。

衬底与催化剂选择是核心环节，常用衬底分为金属与绝缘两类。Cu、Ni、Co 等金属衬底因催化活性与导电性良好，成为主流选择。Cu 衬底对碳溶解度极低，高温下活性碳原子无法大量溶解，仅在表面扩散重组形成单层石墨烯，可实现大面积连续制备且质量优异，是单层石墨烯首选衬底。Ni 衬底对碳溶解度高，高温下碳原子溶解、冷却时过饱和析出形成石墨烯，通常为多层且层数控制难，适用于多层制备。Cu-Ni、Cu-Co 等合金衬底通过调控成分，可精准调控碳溶解度与催化活性，优化石墨烯层数与质量。SiO₂/Si、Al₂O₃ 等绝缘衬底催化活性低，需沉积金属催化剂薄膜才能生长，适用于器件直接集成但质量略低。

生长参数调控是精准制备的关键，包括碳源、温度、气氛、时间等。碳源种类影响生长速率与质量：甲烷分解温度高（1000℃以上）但产物单一、缺陷低；乙炔分解温度低（800-900℃）、生长快但易过度沉积形成无定形碳；苯等芳香

族碳源生长的石墨烯质量高但成本高，难以规模化。碳源流量需严格控制，过低无法形成连续薄膜，过高易产生杂质与晶界。

生长温度是影响晶体质量的核心参数，Cu 衬底生长单层石墨烯通常需 1000-1050℃，此温度下碳原子迁移能力充足，可充分重组形成高质量 sp^2 结构；温度过低易形成缺陷与晶界，过高导致衬底氧化与晶粒长大，影响均匀性。生长气氛多为 Ar 与 H_2 混合气体，Ar 气保护衬底与石墨烯避免氧化， H_2 气还原衬底氧化层、抑制无定形碳形成， H_2 流量需精准调控避免过度分解或还原不足。生长时间影响层数，短时生长获单层，延长可能形成多层。

转移是关键步骤，金属衬底上的石墨烯需转移至 SiO_2/Si 、柔性聚合物等目标衬底才能制备器件。主流湿法转移流程为：在石墨烯表面旋涂 PMMA 支撑层；用 $FeCl_3$ 、过硫酸铵等刻蚀液去除金属衬底；将带石墨烯的 PMMA 薄膜转移至目标衬底；热退火或溶剂溶解去除 PMMA。转移过程中，支撑层选择、刻蚀液浓度与时间、平整度控制等参数需严格优化，避免石墨烯破损、褶皱与污染。

CVD 法优势是可制备大面积连续高质量石墨烯薄膜，单层载流子迁移率 $10000-50000\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，层数可控，是柔性电子、光电显示、高频器件等领域核心制备技术；局限性为高温生长能耗高，转移过程复杂易引入缺陷与污染，规模化生产中薄膜均匀性与一致性控制难、成本较高，是工业化应用主要瓶颈。

（二）外延生长法

外延生长法是制备高质量石墨烯的重要自下而上技术，核心原理是利用单晶 SiC、蓝宝石等衬底的晶格匹配特性，经高温退火或化学处理使衬底表面碳原子重构，形成与衬底晶格取向一致的石墨烯薄膜。产物与衬底结合紧密、晶体质量高、晶界密度低，适用于高性能电子器件集成，尤其 SiC 衬底外延生长可兼容半导体工艺，应用价值显著。

SiC 外延生长石墨烯是最成熟的技术，制备过程包括衬底预处理、高温退火与成核生长三步。预处理通过 HF 溶液腐蚀与高温真空退火去除表面氧化层与杂质，获得平整清洁表面。高温退火是核心环节，需在 10^{-6} Pa 以下超高真空或惰性气氛中进行，温度 1200-1600℃，高温下 SiC 表面 Si 原子升华导致 C 原子富集形成富碳层，随温度升高与时间延长，富碳层 C 原子重构形成 sp^2 杂化石墨烯片层。

石墨烯质量与层数由退火温度、时间、真空度及衬底取向调控。温度越高 Si 原子升华越快，C 原子富集度越高，越易形成多层，精准控制温时可制备单层、

少数层石墨烯。SiC 衬底主要有 (0001) 面 (Si 面) 与 (000-1) 面 (C 面), Si 面生长的石墨烯与衬底相互作用强, 呈层状生长易形成均匀单层; C 面相互作用弱, 呈岛状生长易形成多层且缺陷密度高。超高真空环境可避免杂质干扰, 提升晶体质量。

蓝宝石、MgO 等单晶衬底也可用于外延生长, 但晶格匹配度低, 产物质量略差。金属辅助外延生长法通过在绝缘衬底表面沉积 Ni、Co 等薄金属膜, 利用金属催化与晶格导向作用实现高质量生长, 可降低温度、提升衬底兼容性, 发展前景良好。

该方法优势是产物晶体质量高、晶界密度低、与衬底结合紧密, 载流子迁移率 $50000-100000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 适用于高性能高频电子器件、量子器件等对质量要求极高的领域, 且 SiC 外延可兼容半导体工艺, 为器件集成提供途径; 局限性为高质量单晶 SiC 衬底成本高, 生长温度高、能耗大、设备要求严, 产物与衬底相互作用强抑制部分本征性能, 且难以转移至柔性衬底, 限制柔性电子领域应用。

第二节 石墨烯电子器件

石墨烯作为首个二维原子晶体材料, 具有独特狄拉克锥电子能带结构, 展现出超高载流子迁移率 (室温达 $200000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$)、优异导热热性及良好机械柔韧性, 成为突破传统硅基器件瓶颈的核心候选材料。石墨烯电子器件以石墨烯为核心功能层, 通过调控载流子输运实现特定电子功能, 主要包括场效应晶体管、逻辑器件、射频器件及柔性电子器件等类型, 在高频放大、高速开关、可穿戴电子等领域应用前景广阔。本节系统阐述各类石墨烯电子器件的结构设计、制备技术、性能调控及应用进展, 剖析核心挑战, 为产业化提供理论与技术支撑。

一、石墨烯场效应晶体管

石墨烯场效应晶体管 (G-FET) 是石墨烯电子器件的基础核心单元, 工作原理基于电场调制石墨烯沟道载流子浓度与输运特性, 通过栅压控制源漏电流开关。相较于硅基器件, G-FET 载流子迁移率高、开关速度快、截止频率高, 适配高频与纳电子集成领域。按栅极结构可分为底部栅极、顶部栅极、环绕栅极等构型; 按载流子类型可分为 p 型、n 型及双极型。器件性能取决于石墨烯沟道质量、栅

介质绝缘性及源漏接触特性，需攻克高质量石墨烯制备转移、高 k 栅介质集成、低接触电阻构建等核心技术。

（一）器件结构设计与工作机制

G-FET 基本结构包括源极、漏极、石墨烯沟道及栅极，栅极通过介质层与沟道隔离。底部栅极结构制备简单、工艺兼容，但栅介质层厚（通常 300 nm），调控效率低、亚阈值摆幅大；顶部栅极结构将介质层与栅极沉积于沟道上方，栅沟距离近，调控效率显著提升，搭配高 k 介质可抑制栅漏电流，是高性能器件主流构型；环绕栅极结构通过介质层包裹沟道，栅极全包围调控，效率最优且抑制短沟道效应，适合超短沟道器件，但制备工艺复杂；双栅极结构结合顶底栅协同调控，可灵活调节载流子特性。

工作机制上，石墨烯本征为零带隙半导体，载流子为狄拉克费米子，G-FET 通常呈双极型导电。空气中氧气与水分子吸附会产生 p 型掺杂，器件默认 p 型导通，正向栅压降低空穴浓度使电流减小，负向栅压增加电子浓度使电流增大。实现单一载流子主导需通过化学掺杂、表面修饰或电极功函数匹配调控，如低功函数金属（铯、锂）或氮掺杂实现 n 型，高功函数金属（金、铂）或硼掺杂增强 p 型。

（二）核心制备技术

高质量石墨烯制备与转移是基础。机械剥离法制备的石墨烯晶体质量高、缺陷少，适合高性能原型制备，但产量低、尺寸小，难以规模化；化学气相沉积法（CVD）通过碳源在金属催化剂表面高温沉积，可制备大面积均匀石墨烯，是产业化核心方向，但转移过程易引入褶皱、污染，无损转移技术是关键瓶颈。

栅介质层制备需采用温和工艺避免损伤石墨烯，原子层沉积（ALD）技术可制备超薄、致密的高 k 介质层（ HfO_2 、 Al_2O_3 ），通过优化沉积温度与前驱体，减少界面态密度，提升调控性能。源漏接触需实现欧姆接触，常用金、铂等金属真空蒸镀制备，通过界面合金化（如钛与石墨烯形成 TiC ）、接触区域掺杂等策略降低接触电阻，透明导电材料电极可拓展透明器件应用。

（三）性能调控策略

性能调控围绕提升开关比、降低亚阈值摆幅与接触电阻展开，策略包括沟道质量优化、介质层改性、接触界面工程及结构创新。沟道优化通过 CVD 工艺调控（生长温度、气体比例）提升结晶度，结合高温退火、等离子体处理修复缺陷；介质层改性采用高 k 材料并引入缓冲层（ Al_2O_3 成核层）减少界面态；接触界面

工程通过电极功函数匹配、梯度掺杂降低注入势垒；结构创新方面，石墨烯纳米带借助量子限制效应引入带隙提升开关比，环绕栅极结构增强调控效率。

二、石墨烯逻辑器件

石墨烯逻辑器件基于 G-FET 集成实现逻辑运算，是构建石墨烯电子系统的核心，具有运算速度快、功耗低、集成度高的优势，适用于高性能计算、人工智能等领域。按功能可分为反相器、与非门等基本单元及算术逻辑单元、微处理器等复杂器件。性能取决于单个 G-FET 性能、集成工艺及互连技术，核心挑战为单一载流子 G-FET 可控制备、性能均匀性调控及高密度集成工艺开发。

（一）基本逻辑单元结构与工作机制

反相器是基础逻辑单元，由 p 型与 n 型 G-FET 串联组成，栅极相连为输入端，p 型源极接电源、n 型源极接地，漏极相连为输出端。输入高电平时 n 型导通、p 型关断，输出低电平；输入低电平时 p 型导通、n 型关断，输出高电平，实现非逻辑运算。性能取决于电压增益、开关速度与功耗，需匹配 p/n 型器件性能、优化尺寸比例及栅介质特性。

与非门由两个 p 型并联为负载管、一个 n 型为驱动管组成，仅双输入高电平时输出低电平；或非门由两个 n 型并联为驱动管、一个 p 型为负载管组成，仅双输入低电平时输出高电平。通过反相器与反馈电路组合可构建 SR、D 等触发器，实现数据存储，为存储器与微处理器奠定基础。

（二）器件集成工艺

集成工艺核心是实现多器件精准定位、性能匹配与高效互连，包括衬底制备、石墨烯沉积与图案化、介质层与电极制备、互连布线等步骤。衬底可选 SiO_2/Si （工艺兼容）或柔性聚合物（适配可穿戴）；石墨烯图案化采用光刻、刻蚀技术，电子束光刻可实现纳米尺度精准定义，减少刻蚀损伤需优化工艺参数；栅介质与电极采用 ALD 与真空蒸镀制备，保障大面积均匀性；互连布线采用铜、铝等金属构建多层网络，通过低电阻材料与结构优化降低延迟与功耗。

（三）发展进展与挑战

近年来石墨烯逻辑器件研究成效显著，已实现高性能反相器（电压增益 > 1.0 ，开关速度亚纳秒级，功耗较硅基低一个数量级）、与非门、或非门（开关比 $> 10^4$ ）的稳定工作，且成功制备集成上百个 G-FET 的微处理器原型，运算速度达

GHz 级别，展现高性能计算潜力。

当前挑战包括：石墨烯零带隙导致 G-FET 开关比偏低，引入带隙易降低迁移率；n 型 G-FET 稳定性差，空气中易退化；大面积集成性能均匀性难保障；与硅基工艺兼容性待提升。未来需开发高效带隙工程、稳定 n 型掺杂、高精度集成及兼容互连技术，推动器件走向实际应用。

三、石墨烯射频器件

石墨烯超高载流子迁移率与低寄生电容使其在射频（RF）领域优势显著，射频器件利用高频输运特性实现信号放大、振荡等功能，主要包括射频场效应晶体管（RF-GFET）、射频二极管、天线等。相较于硅基、GaAs、GaN 器件，具有截止频率高、功率增益大、功耗低、尺寸小等优点，适配 5G/6G 通信、雷达等高频领域。核心性能参数包括截止频率（ f_T ）、最大振荡频率（ f_{max} ）、增益及噪声系数，性能提升关键在于降低寄生参数、优化接触特性。

（一）核心性能参数与表征方法

截止频率（ f_T ）指电流增益降至 1 时的频率，取决于载流子迁移率、沟道长度及寄生参数；最大振荡频率（ f_{max} ）指功率增益降至 1 时的频率，与 f_T 、输出电阻及寄生参数相关；增益评估放大能力，噪声系数衡量噪声引入程度，低噪声系数是微弱信号检测关键。

性能表征采用射频探针台与矢量网络分析仪测量 S 参数，提取核心参数，同时表征稳定性与线性度。为获取本征性能，需采用去嵌入技术扣除测试系统、探针的寄生效应。

（二）典型射频器件结构与制备

RF-GFET 采用顶部栅极结构，沟道长度设计为几十至几百纳米，缩短载流子路径；栅极与源漏距离最小化降低寄生电容；源漏电极采用低电阻金属，设计为叉指状或共面波导结构提升阻抗匹配；栅介质采用 ALD 制备的超薄高 k 材料，保障绝缘与调控效率。

射频二极管基于金属-石墨烯肖特基结整流特性构建，制备简单无需栅极，优化接触质量可提升高频性能。石墨烯天线通过光刻刻蚀为偶极子、贴片等形状，利用优异导电性与二维结构实现高频辐射，具有尺寸小、带宽宽、可柔性等优点，适配微型通信系统。

（三）应用前景与技术瓶颈

石墨烯射频器件在 5G/6G 通信、雷达、卫星通信等领域前景广阔。RF-GFET 可制备高频功率放大器、低噪声放大器，提升通信速率与带宽；射频二极管用于信号检波与混频；柔性天线集成于可穿戴设备实现无线收发；还可构建微型无线传感网络节点。

技术瓶颈包括：接触电阻偏高影响高频性能；寄生参数控制难度大，高频下影响显著；长期稳定性待提升，恶劣环境易退化；高频封装技术不成熟，寄生效应降低性能。未来需开发低接触电阻界面技术、优化结构设计、提升稳定性及专用封装工艺，推动产业化应用。

四、石墨烯柔性电子器件

随着可穿戴电子、智能皮肤等领域发展，柔性电子器件需求激增。石墨烯兼具优异电子性能与机械柔韧性（断裂应变 $> 15\%$ ），可承受多次弯曲拉伸保持稳定，且重量轻、透明度高，是柔性器件理想材料。石墨烯柔性电子器件以柔性聚合物为衬底，通过柔性工艺构建，具有可弯曲、便携等优势，在健康监测、柔性传感等领域潜力巨大。

（一）柔性衬底选择与制备工艺

柔性衬底需具备良好柔韧性、机械强度、绝缘性及与石墨烯相容性，常用聚酰亚胺（PI，耐高温、机械强度高，适配高性能器件）、PDMS（超高拉伸性，适配可拉伸器件）、PET/PEN（低成本、透明，适配柔性显示）。

制备工艺需采用低温工艺避免衬底损伤，核心包括石墨烯转移（湿法、干法、转移印刷法，干法可减少污染损伤）、柔性电极制备（银纳米线、导电聚合物等，喷墨打印适配规模化）、低温 ALD/溅射制备栅介质及柔性光刻/激光刻蚀图案化。

（二）典型柔性器件类型与性能

柔性 G-FET 是核心单元，优化工艺后可实现与刚性器件相当性能及优异机械稳定性，如 PI 衬底柔性 G-FET 载流子迁移率 $> 10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ，开关比 $> 10^5$ ，1000 次弯曲（半径 5 mm）后性能稳定，可构建柔性逻辑器件与存储器。

柔性传感器基于石墨烯对外部刺激的敏感响应，压力传感器利用压阻效应，灵敏度达 10^{-3} Pa 、响应毫秒级，可监测脉搏血压；气体传感器通过分子吸附/脱附改变电导率，体积小、响应快，适配环境与医疗检测；生物传感器利用与生物

分子特异性作用检测蛋白质、DNA，灵敏度达 pg/mL 级别。此外，石墨烯柔性透明导电薄膜可替代 ITO，应用于柔性显示；柔性储能器件（超级电容器、锂电池）利用高比表面积提升储能性能。

（三）应用进展与未来展望

石墨烯柔性电子器件应用研究成效显著，柔性健康监测手环集成多传感器，实时采集生理参数并无线传输；柔性 OLED 显示原型实现可弯曲折叠；生物传感器成功应用于肿瘤标志物、病毒快速检测。

未来发展方向包括提升机械稳定性与长期可靠性、实现多功能集成、开发低成本规模化工艺。通过优化衬底与封装提升环境稳定性；集成传感器、处理器、储能器件构建一体化系统；发展卷对卷、喷墨打印工艺降低成本。随着技术突破，有望在更多新兴领域产业化，引领柔性电子产业发展。

综上，石墨烯电子器件凭借卓越性能，在高频、逻辑、柔性电子等领域前景广阔。尽管面临带隙工程、接触电阻、稳定性等挑战，但随着制备与集成技术进步，将逐步实现产业化。未来通过与其他材料复合创新，朝着更高性能、更低功耗、更小尺寸方向发展，为电子信息产业升级提供核心支撑。

第三节 石墨烯光电器件

石墨烯作为单原子层二维碳材料，具备独特的电子结构与光学特性，如线性色散的狄拉克电子态、宽光谱吸收响应（覆盖紫外至太赫兹波段）、高载流子迁移率（室温下可达 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ）及超快光响应速度（亚皮秒量级），这些特性使其成为构建高性能光电器件的理想材料。石墨烯光电器件通过调控光子与石墨烯中狄拉克费米子的相互作用，实现光信号的探测、调制、发射及能量转换，在光通信、光探测、显示成像、光伏能源等领域展现出巨大应用潜力。相较于传统硅基、三五族化合物光电器件，石墨烯光电器件具有宽光谱响应、超快响应速度、微型化集成及柔性兼容等显著优势，是下一代光电子技术的核心发展方向之一。本节系统梳理石墨烯光电器件的核心类型、工作机制、制备工艺及性能优化策略，重点探讨器件集成应用中的关键科学问题与技术突破路径，为石墨烯光电器件的定向设计与产业化推进提供理论与技术支撑。

一、石墨烯光探测器件：宽光谱与超快响应的协同实现

石墨烯光探测器件是基于石墨烯的光电导效应、光伏效应或光热效应实现光信号向电信号转换的核心光电器件，其核心优势在于宽光谱响应范围与超快响应速度，可突破传统光探测器的光谱响应局限，满足太赫兹通信、深空探测、生物医学成像等领域对宽光谱、高速光探测的需求。根据工作机制与结构设计的差异，石墨烯光探测器件可分为光电导型、光伏型、光热型等主要类型，不同类型器件在响应速度、探测率、工作偏压需求等方面各具特色。

（一）光电导型石墨烯光探测器

光电导型石墨烯光探测器是基于石墨烯的光电导效应工作，即光子照射石墨烯时，价带电子吸收光子能量跃迁至导带，形成电子-空穴对，载流子浓度增加导致石墨烯电导提升，通过测量电导变化实现光信号探测。该类型器件结构简单，通常采用“金属电极-石墨烯-绝缘基底”的横向结构，金属电极（如金、铂、钼等）与石墨烯形成欧姆接触或肖特基接触，用于载流子的注入与收集。

光电导型器件的关键性能参数包括响应速度、光谱响应范围、探测率及响应度。石墨烯的高载流子迁移率与超快载流子复合寿命（亚皮秒量级）赋予器件超快响应速度，目前已实现亚 100 飞秒的光响应，远超传统硅基探测器（纳秒量级）。其光谱响应范围可覆盖紫外（200 nm）至太赫兹（10 THz）波段，是少数可实现宽光谱无缝探测的器件类型之一。然而，石墨烯的原子级厚度导致光吸收效率较低（单原子层仅吸收 2.3% 的入射光），限制了器件的响应度与探测率。为解决这一问题，研究者通过构建石墨烯/介质层叠层结构、引入等离子体增强结构、与其他二维材料复合等策略提升光吸收效率。例如，利用金属纳米天线的表面等离子体共振效应，可将石墨烯的光吸收效率提升至 50% 以上；通过石墨烯与过渡金属硫族化合物（如 MoS_2 、 WS_2 ）构建范德华异质结，可利用界面光生载流子分离效应，显著提升器件的响应度与探测率。

光电导型石墨烯光探测器的制备工艺相对成熟，核心步骤包括石墨烯转移（机械剥离法、化学气相沉积法转移）、电极制备（电子束蒸发、磁控溅射结合光刻工艺）及器件封装。目前，该类型器件已在太赫兹成像、高速光通信等领域开展应用验证，但其产业化仍面临稳定性提升、规模化制备等挑战。

（二）光伏型石墨烯光探测器

光伏型石墨烯光探测器基于光伏效应工作，即通过构建具有内建电场的异质结结构，光生电子-空穴对在电场作用下分离并形成光生伏特，无需外部偏压即可实现光信号探测，具有低功耗、高信噪比等优势。由于石墨烯本身不具备带隙，无法直接产生内建电场，因此光伏型器件通常需要与其他具有带隙的材料（如半导体、绝缘体）构建异质结，常见结构包括石墨烯/硅异质结、石墨烯/过渡金属硫族化合物异质结、石墨烯/量子点异质结等。

石墨烯/硅异质结光探测器是研究最广泛的光伏型石墨烯器件之一，其利用石墨烯与硅之间的功函数差异形成肖特基势垒，构建内建电场。当光子照射时，硅吸收光子产生电子-空穴对，电子在肖特基势垒的电场作用下转移至石墨烯，空穴则留在硅中，形成光电流。该类型器件兼具石墨烯的宽光谱响应与硅基器件的成熟制备工艺，可实现紫外至近红外波段的探测，响应度可达 10^3 A/W 以上，探测率超过 10^{12} Jones，响应速度可达纳秒量级，已接近商用硅基探测器水平。此外，通过优化石墨烯转移质量、调控界面态密度、引入界面钝化层等策略，可进一步提升器件的稳定性与性能一致性。

石墨烯/过渡金属硫族化合物异质结光探测器则利用两种二维材料的范德华相互作用构建异质结，具有界面缺陷少、结构可调性强等优势。例如，石墨烯/MoS₂ 异质结光探测器可通过调控 MoS₂ 的层数实现光谱响应范围的精准调控，单层 MoS₂ 的带隙约为 1.8 eV，对应可见光波段响应，而多层 MoS₂ 的带隙逐渐减小，可实现近红外波段响应。该类型器件的响应速度可达皮秒量级，探测率超过 10^{13} Jones，适用于高速、高灵敏度光探测场景。

二、石墨烯光调制器件：高速与宽带宽的性能突破

石墨烯光调制器件是基于石墨烯的光学特性可调控性，实现光信号振幅、相位、偏振态调制的核心光电器件，是光通信系统中的关键核心组件，其性能直接决定光通信的传输速率与带宽。石墨烯的光学特性可通过电场、磁场、化学掺杂等方式灵活调控，如电场调控可改变石墨烯的费米能级，进而调控其对不同波长光子的吸收与反射特性，实现光调制功能。根据调制机制与结构形式的差异，石墨烯光调制器件可分为电光调制器、全光调制器、磁光调制器等主要类型，其中电光调制器因调控效率高、响应速度快等优势，成为研究与应用的重点。

（一）电光调制器：电场调控的高效光调制

石墨烯电光调制器基于电场调控的石墨烯光电导变化实现光调制，核心结构包括波导型与自由空间型两种。波导型调制器将石墨烯集成于光学波导（如硅波导、氮化硅波导、聚合物波导）表面或内部，利用波导束缚光场与石墨烯的强相互作用提升调制效率，是光通信系统中的主流结构；自由空间型调制器则通过石墨烯对自由空间光的吸收调控实现调制，结构简单但调制效率相对较低，适用于特定光操控场景。

硅基石墨烯电光调制器是目前研究最成熟的波导型调制器之一，其利用硅波导的高折射率对比度实现光场的强束缚，将石墨烯转移至硅波导表面，通过栅极电压调控石墨烯的费米能级。当栅极电压变化时，石墨烯的光电导发生改变，导致其对波导中传输光的吸收特性变化，从而实现光信号的振幅调制。该类型调制器具有宽带宽、高速率、小尺寸等优势，目前已实现 300 GHz 以上的调制带宽，调制速率超过 100 Gbit/s，器件尺寸仅为微米量级，远小于传统硅基调制器（毫米量级）。此外，通过采用石墨烯/电解质栅结构，可实现低驱动电压（1 V 以下）调制，降低器件功耗，适配集成光电子系统的低功耗需求。

氮化硅波导石墨烯调制器则利用氮化硅波导的低传输损耗特性（尤其在近红外通信波段），提升调制器的插入损耗性能。氮化硅的折射率介于硅与空气之间，可实现光场的有效束缚，同时其化学稳定性优异，与石墨烯的兼容性良好。该类型调制器的插入损耗可低至 1 dB 以下，调制带宽超过 200 GHz，适用于长距离光通信系统。聚合物波导石墨烯调制器则具有制备成本低、柔性兼容等优势，可用于柔性光电子系统与可穿戴设备，但其调制速率与稳定性相对硅基、氮化硅基调制器较低，需进一步优化材料性能与制备工艺。

（二）全光调制器：超快光信号操控

石墨烯全光调制器基于全光调控机制实现光信号调制，即利用泵浦光改变石墨烯的光学特性，进而调控探测光的传输特性，具有响应速度快（亚皮秒量级）、无电学瓶颈等优势，适用于超高速光通信、光计算等领域。全光调控的核心机制包括光致载流子注入、光致热效应等，其中光致载流子注入是最主要的调控方式，即泵浦光照射石墨烯产生电子-空穴对，改变载流子浓度与费米能级，进而调控探测光的吸收与传输。

石墨烯全光调制器的结构通常采用石墨烯与光学谐振腔结合的形式，利用谐

振腔的光场增强效应提升泵浦光与石墨烯的相互作用效率，降低泵浦光功率。例如，将石墨烯集成于微环谐振腔、光子晶体谐振腔等结构中，可使光场在谐振腔中多次往返，显著增强光与石墨烯的相互作用，实现低泵浦功率（微瓦量级）下的高效调制。目前，石墨烯全光调制器已实现亚 100 飞秒的响应速度，调制带宽超过 1 THz，调制深度可达 30% 以上，为超高速光信号处理提供了新的技术路径。

然而，石墨烯全光调制器目前仍面临泵浦光能量损耗大、长期稳定性差等问题。为解决这些问题，研究者通过构建石墨烯 / 二维材料异质结、优化谐振腔结构设计、提升石墨烯材料质量等策略，进一步提升调制效率与稳定性。例如，石墨烯 / MoS₂ 异质结全光调制器利用两种材料的协同作用，可显著降低泵浦光功率，同时提升调制深度与响应速度。

三、石墨烯发光器件：窄光谱与高亮度的性能优化

石墨烯发光器件是基于石墨烯的光发射特性实现光子产生与输出的光电器件，可用于显示成像、光通信、生物医学照明等领域。由于石墨烯本身是零带隙半导体，电子 - 空穴对的辐射复合概率较低，天然发光效率不高，因此石墨烯发光器件的研发核心在于通过结构设计与性能调控提升辐射复合效率。目前，石墨烯发光器件的实现路径主要包括构建异质结结构、利用等离子体增强效应、调控石墨烯边缘态与缺陷态等，根据发光机制的差异，可分为电致发光器件与光致发光器件两大类。

（一）石墨烯电致发光器件

石墨烯电致发光器件通过电场注入载流子，使电子与空穴在石墨烯中复合并辐射光子，实现电能向光能的转换。由于石墨烯的零带隙特性，单纯石墨烯难以实现高效电致发光，因此实际器件通常采用石墨烯与其他材料构建的异质结结构，利用异质结的能带工程调控载流子输运与复合过程，提升辐射复合效率。常见的异质结结构包括石墨烯 / 半导体异质结、石墨烯 / 量子点异质结、石墨烯 / 发光聚合物异质结等。

石墨烯 / 量子点异质结电致发光器件是研究较为广泛的类型之一，其利用量子点的高荧光量子产率与石墨烯的高载流子传输能力，实现高效电致发光。量子点（如 CdSe、PbS 等）具有尺寸可调的带隙，可实现不同波长的发光（从可见光到近红外），而石墨烯作为载流子传输层，可高效地将电子与空穴注入量子点，

促进电子 - 空穴对的辐射复合。该类型器件的发光亮度可达 10^3 cd/m^2 以上，发光效率超过 10 cd/A ，光谱半高宽较窄（小于 50 nm ），颜色纯度高，已在柔性显示原型器件中得到应用。此外，通过优化量子点与石墨烯的界面结合、调控量子点尺寸分布、引入电子 / 空穴阻挡层等策略，可进一步提升器件的发光效率与稳定性。

石墨烯 / 发光聚合物异质结电致发光器件则具有制备工艺简单、成本低廉、柔性兼容等优势，适用于大面积柔性显示。例如，石墨烯 / 聚芴异质结电致发光器件可实现蓝光发射，发光亮度可达 10^2 cd/m^2 ，发光效率约为 1 cd/A 。通过对石墨烯进行化学掺杂提升载流子迁移率，同时优化聚合物薄膜的成膜质量，可显著提升器件的发光性能。

（二）石墨烯光致发光器件

石墨烯光致发光器件通过泵浦光激发石墨烯产生电子 - 空穴对，电子 - 空穴对复合过程中辐射光子，实现光致发光。与电致发光器件类似，单纯石墨烯的光致发光效率较低（通常低于 1% ），需通过结构设计提升辐射复合效率。目前，提升石墨烯光致发光效率的主要策略包括构建石墨烯 / 介质层微腔结构、利用表面等离子体增强效应、调控石墨烯的化学修饰状态等。

石墨烯 / 介质层微腔结构通过微腔的光学谐振效应增强光与石墨烯的相互作用，提升辐射复合效率。例如，将石墨烯置于两个分布式布拉格反射镜之间构建微腔，当微腔的谐振波长与石墨烯的发光波长匹配时，可显著增强光致发光强度，发光效率可提升至 10% 以上。此外，通过调控微腔的厚度与折射率，可实现发光波长的精准调控，拓展器件的应用场景。

表面等离子体增强石墨烯光致发光则利用金属纳米结构（如纳米颗粒、纳米线、纳米光栅）的表面等离子体共振效应，增强局部光场强度，促进电子 - 空穴对的辐射复合。例如，金纳米颗粒修饰的石墨烯光致发光器件，其发光强度可提升一个数量级以上，发光效率可达 5% 以上。该策略具有结构简单、调控灵活等优势，为提升石墨烯发光性能提供了有效途径。

四、石墨烯光伏器件：高效能量转换的技术探索

石墨烯光伏器件是基于石墨烯的光电转换特性实现太阳能向电能转换的光电器件，是光伏能源领域的重要研究方向。石墨烯在光伏器件中的应用主要包括两

个方面：一是作为透明导电电极替代传统的氧化铟锡（ITO）电极，利用其高透光率（单原子层透光率约为 97.7%）与高导电性，提升器件的光电转换效率与柔性兼容性；二是作为光吸收层或载流子传输层，与其他光伏材料复合构建高效异质结光伏器件。相较于传统硅基光伏器件，石墨烯基光伏器件具有柔性、轻质、宽光谱响应等优势，适用于柔性光伏组件、建筑一体化光伏等新兴应用场景。

（一）石墨烯透明导电电极光伏器件

传统光伏器件通常采用 ITO 作为透明导电电极，但其存在脆性大、资源稀缺、制备成本高等问题，限制了柔性光伏器件的发展。石墨烯作为新型透明导电材料，兼具高透光率、高导电性与良好的柔性，是替代 ITO 电极的理想材料。石墨烯透明导电电极的制备方法主要包括化学气相沉积（CVD）法转移、溶液剥离法涂覆等，其中 CVD 法制备的石墨烯具有较高的导电性与透光率，方块电阻可低至 $10\ \Omega/\text{sq}$ 以下，透光率超过 90%，已接近 ITO 电极水平。

石墨烯透明导电电极在有机光伏器件、钙钛矿光伏器件中的应用研究最为广泛。在有机光伏器件中，石墨烯电极替代 ITO 电极可显著提升器件的柔性 with 机械稳定性，同时其高导电性有助于降低电极的串联电阻，提升器件的填充因子。目前，基于石墨烯透明电极的有机光伏器件的光电转换效率已超过 10%，接近 ITO 基有机光伏器件的性能水平。在钙钛矿光伏器件中，石墨烯电极不仅可提升器件的柔性，还可通过表面修饰调控与钙钛矿层的界面相互作用，提升界面载流子传输效率。例如，通过对石墨烯进行氧等离子体处理引入含氧官能团，可增强其与钙钛矿层的附着力，同时提升空穴提取效率，器件的光电转换效率可达 15% 以上。

然而，石墨烯透明导电电极目前仍面临表面粗糙度较高、与功能层界面相容性差、规模化制备成本高等问题。通过优化 CVD 生长工艺提升石墨烯的连续性与均匀性，同时采用界面修饰技术改善与功能层的相容性，可进一步提升器件的性能与稳定性。

（二）石墨烯异质结光伏器件

石墨烯异质结光伏器件以石墨烯与其他光伏材料（如硅、有机半导体、钙钛矿、量子点等）构建的异质结作为核心光吸收与载流子分离区域，利用石墨烯的宽光谱响应与高载流子迁移率，提升器件的光电转换效率。其中，石墨烯/硅异质结光伏器件、石墨烯/钙钛矿异质结光伏器件是研究的重点方向。

石墨烯/硅异质结光伏器件利用石墨烯与硅的肖特基结实现光生载流子的分

离与收集，具有制备工艺简单、成本低廉等优势。该类型器件的光电转换效率目前已超过 15%，接近传统硅基 PN 结光伏器件的性能水平。通过优化石墨烯的层数、转移质量、界面钝化层结构等，可进一步提升器件的开路电压、短路电流与填充因子，推动效率突破。例如，采用多层石墨烯作为载流子传输层，可提升载流子收集效率，同时引入 Al_2O_3 界面钝化层可降低界面复合损失，器件效率可提升至 18% 以上。

石墨烯 / 钙钛矿异质结光伏器件则利用钙钛矿材料的高光吸收系数（超过 10^5 cm^{-1} ）与石墨烯的高载流子迁移率，实现高效光电转换。钙钛矿材料的带隙可通过组分调控（如 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 等）实现 1.5-2.3 eV 的可调，适配太阳能光谱的有效利用，而石墨烯作为空穴传输层可高效提取钙钛矿中的空穴，减少载流子复合损失。目前，该类型器件的光电转换效率已超过 20%，展现出巨大的应用潜力。通过优化石墨烯与钙钛矿的界面接触、提升钙钛矿薄膜的结晶质量、引入电子传输层抑制载流子复合等策略，可进一步提升器件效率与长期稳定性。

综上，石墨烯光电器件凭借宽光谱响应、超快响应速度、柔性兼容等独特优势，在光探测、光调制、发光显示、光伏能源等领域展现出广阔的应用前景。尽管目前仍面临发光效率低、器件稳定性差、规模化制备难度大等技术瓶颈，但通过材料质量提升、结构设计创新、制备工艺优化及异质结协同调控等策略，这些问题正逐步得到解决。未来，石墨烯光电器件的发展将聚焦于高性能化、集成化、柔性化与低成本化四大核心方向，通过多学科交叉融合，推动其从实验室研究走向产业化应用，为下一代光电子技术的发展提供核心材料与器件支撑。同时，石墨烯与其他二维材料、传统半导体材料的复合集成，将进一步拓展器件的功能边界与应用场景，助力构建新型高效光电子集成系统。

第四节 石墨烯传感器

传感器作为信息获取与转换的核心器件，广泛应用于工业监测、医疗诊断等领域。传统传感器受限于敏感材料性能，存在灵敏度低、响应慢、尺寸大等瓶颈，难以满足现代检测对微型化、高精度的需求。石墨烯作为单原子层二维碳材料，具备超高比表面积、极高载流子迁移率、优良导电性与柔韧性等独特理化性能，为高性能传感器研发提供了理想平台。石墨烯传感器通过目标分析物与石墨烯表

面的相互作用调控其电学、光学等性能，实现对物理量、化学物质及生物分子的精准检测。本节系统阐述其构建原理、核心制备技术、主要类型及应用展望，为优化设计与产业化应用提供理论支撑。

一、石墨烯传感器的构建原理与核心特性

石墨烯传感器的功能实现依赖敏感层与信号转换层的协同作用，其核心优势源于石墨烯的二维结构特性。本节从构建原理、核心特性及性能评价指标三个维度，解析其基础理论体系。

（一）核心构建原理

遵循“识别 - 转换 - 检测”核心逻辑，关键在于目标分析物与石墨烯敏感层的特异性相互作用及性能调控。物理量检测依赖机械力、热振动等改变石墨烯晶格结构或载流子特性；化学物质检测通过化学吸附、电荷转移调控电子传输性能；生物分子检测则借助抗原 - 抗体结合、核酸互补配对等生物反应，改变石墨烯表面电荷分布或介电环境。信号转换环节中，石墨烯二维共轭结构对表面微环境变化极具敏感性，单个分子的吸附即可显著改变载流子浓度与迁移率，实现生物化学信号向电学等信号的高效转换。其超高比表面积提升分析物接触概率，高载流子迁移率保障响应速度与灵敏度。

（二）关键核心特性

相较于传统传感器，石墨烯传感器具备六大核心优势：一是超高检测灵敏度，比表面积达 $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ ，载流子迁移率高达 $200000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ，检测限低至皮摩尔级，满足痕量检测需求；二是优异选择性，通过精准表面功能化引入特异性识别位点，有效规避复杂基质干扰；三是快速响应与恢复，二维结构缩短分析物扩散路径，响应时间可达毫秒级，适配实时动态检测；四是宽检测范围与高稳定性，可在 -200°C 至 600°C 宽温区及复杂环境中稳定工作，储存与使用稳定性优良；五是微型化、柔性化与集成化潜力，厚度仅 0.34 nm ，可构建阵列化芯片，适配柔性基底与便携式设备；六是低功耗，良好导电性使传感器工作电压低、能耗小，符合节能趋势。

（三）性能评价指标

核心评价指标包括：检测灵敏度，化学与生物传感器以检测限（LOD）表征，通过标准曲线结合 3 倍信噪比计算，物理传感器以单位输入量的信号变化量衡量；

选择性，通过干扰物质存在下的信号变化率评估，优良传感器干扰影响低于 5%；响应与恢复时间，常规要求均不超过 30 分钟，高频场景需达毫秒级；线性检测范围，相关系数（ R^2 ）应大于 0.99；稳定性，储存 3 个月信号保留率 $\geq 80\%$ ，连续检测 20 次相对标准偏差（RSD） $\leq 5\%$ ；重现性，批次内与批次间 RSD 分别低于 3% 和 5%。柔性传感器还需评价机械形变下的性能稳定性，各指标相互制约，需综合优化。

二、石墨烯传感器的核心制备技术

石墨烯传感器制备包含石墨烯制备、敏感层功能化修饰、界面构建与集成三个关键环节，技术选择直接决定传感器性能。本节阐述各环节核心技术的原理、优缺点及应用场景。

（一）石墨烯的制备技术

主流制备技术包括：机械剥离法，通过机械力从石墨剥离高质量石墨烯，操作简便、成本低，适用于实验室基础研究，但难以规模化、均匀化制备；化学剥离法，通过化学插层破坏石墨层间作用实现剥离，可批量制备，但易引入杂质与缺陷；化学气相沉积法（CVD），以甲烷等为碳源在金属基底生长石墨烯，可制备大面积、高质量产物，产业化潜力大，但转移过程易产生破损与污染；外延生长法，在 SiC 衬底高温退火生成石墨烯，无需转移，适用于高性能器件，但衬底昂贵、工艺复杂；氧化还原法，以天然石墨为原料制备氧化石墨烯再还原，成本低、可规模化，易于功能化，适用于化学与生物传感器，但产物缺陷多、导电性较差。需根据性能需求与成本选择制备技术。

（二）石墨烯敏感层的功能化修饰技术

功能化修饰旨在引入特异性识别位点、提高分散性，分为共价与非共价两类。共价修饰通过石墨烯表面缺陷或含氧官能团与修饰分子发生酰胺化、点击反应等，结合牢固、稳定性高，但可能破坏共轭结构、降低导电性，影响生物分子活性；非共价修饰借助 π - π 堆积、静电作用等实现结合，反应温和、保留石墨烯电学性能与生物分子活性，操作简便，适用于生物传感器，但结合强度较弱，复杂环境中易脱落。实际应用中可采用复合修饰策略，兼顾选择性与稳定性。常用修饰分子包括表面活性剂、聚合物、核酸、抗体等，可按需引入特定识别基团。

（三）传感器界面的构建与集成技术

界面构建需实现敏感层与基底的高效结合，降低界面电阻与非特异性吸附，常用方法有：滴涂法操作简便、成本低，适用于快速制备，但膜均匀性与稳定性差；旋涂法可制备均匀可控厚度的薄膜，适用于高性能传感器，但需专用设备与参数调控；电化学沉积法精准控制膜厚与成分，界面电阻小，适用于高性能电化学传感器，但操作复杂；自组装法构建的界面均匀有序、非特异性吸附低，重现性好，但耗时久、对基底清洁度要求高；喷墨打印法可实现微型化、阵列化批量制备，适用于传感器芯片，需专用设备与墨水参数优化。集成技术包括与微流控系统、信号处理电路及便携式设备的集成，推动产业化应用，柔性传感器还需解决基底兼容性与机械形变稳定性问题。

三、石墨烯传感器的主要类型与检测机制

根据检测对象与信号转换方式，石墨烯传感器可分为物理、化学、生物三大类，各类检测机制与应用场景差异显著。本节重点阐述各类传感器的核心结构、检测机制及性能特点。

（一）石墨烯物理传感器

用于检测压力、温度、湿度、应变、磁场等物理量，核心机制是物理作用调控石墨烯晶格结构或载流子特性。压力传感器基于压阻效应，压力引发晶格形变改变载流子输运，检测限达帕斯卡级，适用于触觉传感、生理信号监测；温度传感器基于热载流子与声子散射效应，宽检测范围、高灵敏度，适用于极端环境与精密控制；湿度传感器基于水分子吸附-脱附引发的载流子浓度变化，响应快、范围宽，适用于环境湿度监测；应变传感器基于应变电阻效应，磁场传感器基于霍尔效应，均具备微型化、高灵敏度优势，应用于精密测量、航空航天等领域。

（二）石墨烯化学传感器

用于检测气体、重金属离子、有机污染物等，核心机制是化学吸附或电荷转移调控电子传输性能。气体传感器中，氧化性气体使石墨烯 p 型掺杂、电阻减小，还原性气体使 n 型掺杂、电阻增大，检测限达 ppb 级，适用于有害气体监测；重金属离子传感器通过表面功能化基团的配位、静电作用吸附离子，引发电荷转移，检测限达纳摩尔级，适用于水与土壤监测；有机污染物传感器借助 π - π 堆积、疏水作用吸附污染物，结合功能化实现选择性检测，操作简便、成本低，适用于

环境监测与食品安检。

（三）石墨烯生物传感器

用于检测核酸、蛋白质、酶、细胞等生物分子，核心机制是特异性生物反应改变石墨烯表面电荷或介电环境。核酸传感器基于核酸互补配对，单链 DNA 修饰于石墨烯表面，与目标链结合后改变 π - π 作用与电荷转移，实现病毒核酸、基因突变检测，适用于传染病诊断与遗传病筛查；蛋白质传感器基于抗原-抗体结合，检测肿瘤标志物、酶等，适用于肿瘤早期筛查与药物监测；酶传感器基于酶-底物催化反应产物与石墨烯的相互作用，适用于葡萄糖等小分子检测；细胞与微生物传感器分别检测细胞状态与微生物数量，应用于药物筛选与食品安检，具备高灵敏度、良好生物相容性优势。

四、石墨烯传感器的应用领域与发展展望

石墨烯传感器凭借优异性能，在多个领域展现广阔前景，同时面临产业化相关挑战。本节阐述应用领域，分析现存问题，展望发展趋势。

（一）主要应用领域

医疗诊断领域，可实现疾病标志物、病原体等精准检测，支撑肿瘤早期筛查、传染病快速确诊，实时监测血糖等生理信号，推动可穿戴医疗发展；环境监测领域，快速检测有害气体、重金属离子、致病菌等，无需复杂前处理，适用于空气、水与土壤的现场筛查；工业监测领域，实时监测生产过程中的压力、温度、气体浓度等参数，保障生产安全与产品质量；智能穿戴与消费电子领域，柔性传感器集成于穿戴设备监测生理信号，提升消费电子性能；航空航天领域，用于极端环境参数监测，保障航天器安全。

（二）当前存在的问题与挑战

产业化面临五大核心挑战：一是批量制备高质量石墨烯技术瓶颈，不同批次性能差异大，传感器重现性差；二是选择性与抗干扰能力不足，复杂基质中非特异性作用影响检测准确性，多目标同时检测难度大；三是稳定性有待提升，复杂环境中石墨烯易氧化团聚，功能化分子易脱落，柔性传感器机械形变下信号不稳定；四是信号放大与集成技术不成熟，检测信号弱，微型化阵列化集成面临封装与兼容性问题；五是成本高、产业化工艺不完善，缺乏统一性能评价标准，生物安全性需进一步评估。

（三）未来发展趋势

未来将朝着五大方向发展：高性能化，通过精准制备、异质结构设计、信号放大优化，提升灵敏度、选择性与稳定性；多功能化，开发阵列化传感器实现多目标同时检测，联用多信号转换方式提高准确性；微型化集成化，结合微纳加工、喷墨打印、微流控技术，开发微型芯片与便携式设备；柔性化，优化柔性基底兼容性，拓展智能穿戴与植入式应用；智能化，融合人工智能、大数据、物联网技术，实现智能检测、数据分析与网络监测。同时需加强生物安全性研究，优化产业化工艺，降低成本，建立统一标准，加速产业化进程。

综上所述，石墨烯传感器具备显著技术优势与广阔应用前景。尽管面临诸多挑战，但随着多学科技术融合与创新突破，其必将在医疗诊断、环境监测等领域实现产业化应用，为人类健康、环境保护与工业发展提供有力技术保障。

第三章 碳纳米管材料与器件

第一节 碳纳米管可控生长

碳纳米管（Carbon Nanotubes, CNTs）作为一维碳同素异形体的杰出代表，其独特的电学、力学及热学性能使其在纳米电子学、复合材料增强以及生物医学等领域展现出巨大的应用潜力。然而，这些优异性能的充分发挥，高度依赖于碳纳米管在生长过程中的精确控制。因此，碳纳米管的可控生长已成为该领域研究的核心与基石。本章将系统阐述碳纳米管可控生长的科学原理、关键技术路径及其在材料科学与工程中的重要应用。

一、碳纳米管生长的基础理论与动力学机制

碳纳米管的生长本质上是一个复杂的多尺度物理化学过程，涉及气相碳源的运输、催化粒子的形成、碳质前驱体的吸附与分解，以及碳纳米管管壁的逐层卷曲与延伸。对其生长机理的深入理解，是实现生长过程精确调控的前提。

（一）碳源物质的选择与运输

碳源物质是碳纳米管生长的物质基础，其种类、浓度及运输方式直接影响碳纳米管的成核与生长速率。常见的碳源物质包括碳氢化合物气体（如乙炔、甲烷、乙烯、苯等）、碳氢化合物液体（如二茂铁、镍ocene等金属有机化合物作为碳源的前驱体）以及固体碳源（如石墨粉）。气体碳源通常通过化学气相沉积（Chemical Vapor Deposition, CVD）技术，在高温惰性或还原性气氛下被催化分解，产生活性碳原子或碳基团，这些活性物种随后被运输至催化粒子表面参与生长。液体碳源则常作为金属有机化学气相沉积（Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD）的前驱体，在高温下分解产生碳源与金属组分。

碳源的运输过程遵循流体力学基本定律，主要包括层流运输、扩散运输和对流运输。在CVD系统中，载气（如氩气、氢气）的流量、流速以及反应腔体内的温度梯度和压力分布，共同决定了碳源气体在催化区域的浓度分布和停留时间，

从而对碳纳米管的生长密度和分布产生显著影响。例如，较高的载气流速有助于增加碳源气体与催化粒子的接触频率，但同时也可能降低碳源在反应区域的停留时间，导致碳纳米管生长速率的变化。

（二）催化粒子的形成与作用机制

催化粒子是碳纳米管生长的核心，其作用是提供一个异质成核位点，并通过催化分解碳源物质，为碳纳米管的生长提供活性碳原子。催化粒子通常由过渡金属（如铁、钴、镍）或其合金构成，这些金属具有较高的催化活性，能够显著降低碳源分解的活化能。

催化粒子的形成机制主要有两种：一种是通过气相金属原子的冷凝与团聚形成，另一种是通过金属前驱体在载体表面的分解与还原形成。在 CVD 过程中，当温度达到金属的蒸发温度时，金属原子从源材料中蒸发并进入气相，随后在较低温度的催化区域冷凝并聚集形成纳米级的金属粒子。这些粒子通常被支撑在载体材料（如二氧化硅、氧化铝、氧化镁、碳材料等）表面，以防止其在高温下发生团聚和烧结，从而保持其高比表面积和催化活性。

催化粒子在碳纳米管生长过程中扮演着至关重要的角色。首先，它作为碳源分解的催化剂，促进碳氢化合物分子的吸附、活化和分解，生成活性碳原子。其次，它为碳纳米管的成核提供了基底，碳原子在催化粒子的表面或边缘处有序排列，逐渐形成碳纳米管的管壁。最后，催化粒子的尺寸、形状、分布以及与载体的相互作用，直接决定了碳纳米管的直径、生长方向和生长密度。例如，较小尺寸的催化粒子通常有利于生长出直径较小的碳纳米管，而较大尺寸的粒子则可能导致碳纳米管直径的增加。

（三）碳纳米管管壁的生长与卷曲动力学

碳纳米管管壁的生长与卷曲是一个动态的过程，涉及到碳原子的吸附、扩散、成键以及管壁的逐层堆叠。根据碳纳米管的结构，主要分为单壁碳纳米管（Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNTs）和多壁碳纳米管（Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs）。

对于单壁碳纳米管的生长，普遍认为其遵循“基底生长”机制。在该机制下，碳原子首先在催化粒子的顶端表面吸附并扩散，然后在粒子的边缘处通过 sp^2 杂化键合形成六边形碳环，这些碳环逐层堆叠，最终形成单壁碳纳米管的管壁。碳纳米管的生长方向由催化粒子的取向和碳环堆叠的方向决定。

对于多壁碳纳米管的生长，其机制更为复杂，主要有两种观点：一种是“管状生长”机制，即碳纳米管从催化粒子的顶端开始，逐层向外卷曲生长；另一种是“端生长”机制，即碳纳米管的生长主要发生在催化粒子的顶端，通过碳原子在顶端的不断添加，使管壁逐层增厚。实际上，在许多情况下，这两种机制可能同时存在并相互竞争。

碳纳米管的卷曲过程是一个能量驱动的过程。在生长过程中，碳原子通过形成 sp^2 杂化键，释放出能量，促使碳环自发地卷曲成管状结构。碳纳米管的直径主要由催化粒子的尺寸和碳环堆叠的层数决定。较小的催化粒子有利于生长出直径较小的碳纳米管，而碳环堆叠层数的增加则会导致碳纳米管直径的增大。此外，碳源的种类、反应温度和气氛等因素也会对碳纳米管的直径产生影响。

二、碳纳米管生长的关键影响因素

碳纳米管的可控生长是一个多因素耦合的复杂过程，涉及到催化剂、碳源、温度、气氛、载体以及生长时间等多个变量。深入理解这些因素对碳纳米管生长的影响规律，是实现生长过程精确调控的关键。

（一）催化剂的种类与负载量

催化剂的种类是影响碳纳米管生长的最关键因素之一。不同的过渡金属催化剂具有不同的催化活性和选择性，从而导致生长出的碳纳米管的结构、性能和应用有所差异。例如，铁基催化剂通常有利于生长出高纯度的单壁碳纳米管，而钴基催化剂则更倾向于生长出多壁碳纳米管。此外，催化剂的负载量也对碳纳米管的生长产生重要影响。负载量过低，催化粒子数量不足，可能导致碳纳米管生长密度较低；负载量过高，则可能导致催化粒子团聚，影响碳纳米管的均匀分布和生长质量。

（二）生长温度与时间

生长温度是控制碳纳米管生长速率和结构的核心参数。温度过低，碳源物质的分解反应难以进行，碳纳米管生长缓慢甚至不生长；温度过高，则可能导致催化剂粒子烧结失活，同时也可能引起碳纳米管管壁的无序化和缺陷的增加。不同类型的碳纳米管对生长温度有不同的要求。一般来说，单壁碳纳米管的生长温度相对较低，通常在 700°C 至 900°C 之间，而多壁碳纳米管的生长温度则相对较高，通常在 800°C 至 1200°C 之间。

生长时间也对碳纳米管的生长产生重要影响。随着生长时间的延长，碳纳米管的长度逐渐增加，但生长时间过长可能导致碳纳米管的末端发生闭合，形成碳纳米管帽，或者导致管壁的缺陷和杂质含量增加。因此，需要根据具体的应用需求，精确控制碳纳米管的生长时间。

（三）碳源气体的流量与浓度

碳源气体的流量和浓度直接影响碳纳米管的生长速率和生长密度。流量过大，可能导致碳源气体在反应区域停留时间过短，活性碳原子浓度不足，从而影响碳纳米管的生长；流量过小，则可能导致碳源气体供应不足，生长速率缓慢。碳源气体的浓度也对碳纳米管的生长产生影响，较高的浓度有助于提高活性碳原子的浓度，从而促进碳纳米管的生长，但过高的浓度也可能导致碳纳米管管壁的无序化和缺陷的增加。

（四）反应气氛与压力

反应气氛和压力也是影响碳纳米管生长的重要因素。在 CVD 过程中，常用的气氛包括惰性气氛（如氩气、氮气）、还原性气氛（如氢气）和氧化性气氛（如氧气）。惰性气氛可以防止碳源气体的氧化和催化剂的氧化，为碳纳米管的生长提供一个稳定的环境；还原性气氛可以促进碳源气体的分解和催化剂的还原，提高碳纳米管的生长速率和质量；氧化性气氛则可以用于碳纳米管的表面修饰和后处理。

反应压力也对碳纳米管的生长产生影响。在常压 CVD 系统中，压力相对较低，有利于碳源气体的扩散和输运，但生长速率相对较慢；在高压 CVD 系统中，压力较高，有利于提高碳源气体的浓度和活性碳原子的浓度，从而加快碳纳米管的生长速率，但需要相应的高压设备和更严格的操作条件。

三、碳纳米管可控生长的主要技术路径

为了实现碳纳米管的高质量、大面积和高定向生长，研究人员开发了多种先进的可控生长技术。这些技术各有其特点和适用范围，为碳纳米管在不同领域的应用提供了技术支撑。

（一）化学气相沉积法（CVD）

化学气相沉积法是目前最常用、最成熟的碳纳米管生长技术之一。该方法通过在高温下将碳源气体通入含有催化剂的反应腔中，使碳源气体在催化剂表面分

解，产生的活性碳原子在催化剂表面沉积并生长成碳纳米管。CVD 技术具有设备简单、成本较低、生长速率快、易于实现大面积生长等优点，适用于制备各种类型的碳纳米管，包括单壁碳纳米管、多壁碳纳米管以及碳纳米管阵列。

根据反应腔的结构和工作方式，CVD 技术可以分为多种类型，如常压 CVD、低压 CVD、等离子体增强化学气相沉积（PECVD）、激光辅助化学气相沉积（LCVD）等。其中，等离子体增强化学气相沉积（PECVD）利用等离子体的高能电子轰击碳源气体，使其发生电离和分解，产生大量的活性自由基和离子，从而显著提高碳纳米管的生长速率和质量。激光辅助化学气相沉积（LCVD）则利用激光的高能量密度，在局部区域快速加热催化剂和碳源，实现碳纳米管的选择性生长和定向生长。

（二）电弧放电法

电弧放电法是最早用于制备碳纳米管的方法之一。该方法通过在两个碳电极之间施加高压直流电源，使电极之间产生电弧放电，在高温（约 3000K）和高真空环境下，碳电极表面的碳原子被激发并蒸发，然后在冷却过程中沉积并生长成碳纳米管。电弧放电法具有设备简单、成本较低、生长速率快等优点，适用于制备多壁碳纳米管。

然而，电弧放电法也存在一些不足之处，如生长出的碳纳米管纯度较低，含有大量的无定形碳和碳纳米角等杂质；碳纳米管的直径分布较宽，难以实现精确控制；生长过程中产生的大量粉尘和污染物对环境和人体健康造成一定的危害。因此，为了提高碳纳米管的质量和纯度，研究人员对电弧放电法进行了多种改进，如采用催化剂辅助电弧放电法、真空电弧放电法等。

（三）激光蒸发法

激光蒸发法是一种高效、高质量的碳纳米管生长技术。该方法利用激光的高能量密度，在短时间内将碳靶材（如石墨靶）加热至高温，使碳靶材表面的碳原子蒸发并形成碳等离子体，然后在冷却过程中沉积并生长成碳纳米管。激光蒸发法具有生长速率快、碳纳米管纯度高、直径分布窄等优点，适用于制备单壁碳纳米管和多壁碳纳米管。

激光蒸发法的关键在于激光参数的选择和控制在，如激光功率、波长、脉冲宽度和重复频率等。不同的激光参数会对碳等离子体的温度、密度和分布产生影响，从而影响碳纳米管的生长速率、结构和性能。此外，激光蒸发法的生长环境也对

碳纳米管的质量产生重要影响，如真空度、气氛等。

（四）模板辅助生长法

模板辅助生长法是一种新兴的碳纳米管生长技术，该方法利用模板的空间限制作用，实现碳纳米管的定向生长和有序排列。模板通常是具有一维或二维孔道结构的材料，如氧化铝模板、聚碳酸酯（PC）膜模板、多孔硅模板等。碳纳米管在模板的孔道内生长，其直径和长度受到模板孔道尺寸的限制，从而实现了碳纳米管的直径和长度的精确控制。

模板辅助生长法具有操作简单、成本较低、易于实现大面积生长等优点，适用于制备各种类型的碳纳米管阵列和薄膜。然而，模板辅助生长法也存在一些不足之处，如模板的制备过程较为复杂，需要高精度的加工技术；碳纳米管的生长方向受到模板孔道方向的限制，难以实现任意方向的生长；模板的去除过程可能会对碳纳米管造成损伤。

四、碳纳米管可控生长的应用与前景

碳纳米管的可控生长技术为其在电子信息、能源环境、生物医学等领域的应用提供了坚实的基础。随着碳纳米管可控生长技术的不断发展和完善，其在这些领域的应用前景将更加广阔。

（一）在电子信息领域的应用

碳纳米管具有优异的电学性能，如高导电性、高载流子迁移率、良好的机械性能和化学稳定性等，使其成为新一代纳米电子器件的理想候选材料。通过精确控制碳纳米管的生长，可以制备出高性能的碳纳米管场效应晶体管（CNTFETs）、碳纳米管存储器、碳纳米管传感器等纳米电子器件。

碳纳米管场效应晶体管（CNTFETs）具有开关比高、功耗低、集成度高、响应速度快等优点，有望取代传统的硅基场效应晶体管，实现更高性能的微处理器和存储器。碳纳米管存储器则具有读写速度快、存储密度高、非易失性等优点，有望在未来的存储领域占据重要地位。碳纳米管传感器则具有灵敏度高、选择性好、响应速度快、检测下限低等优点，有望在环境监测、生物医学检测、国家安全等领域得到广泛应用。

（二）在能源环境领域的应用

碳纳米管具有优异的力学性能、热学性能和化学稳定性，使其在能源存储和

转换、环境治理等领域具有广阔的应用前景。通过精确控制碳纳米管的生长，可以制备出高性能的碳纳米管超级电容器、碳纳米管锂离子电池、碳纳米管燃料电池等能源存储和转换器件。

碳纳米管超级电容器具有功率密度高、能量密度高、循环寿命长、充放电速度快等优点，有望在便携式电子设备、电动汽车、可再生能源等领域得到广泛应用。碳纳米管锂离子电池则具有能量密度高、循环寿命长、充放电速度快等优点，有望在电动汽车、智能手机、笔记本电脑等领域取代传统的锂离子电池。碳纳米管燃料电池则具有能量转换效率高、环境友好、运行温度低等优点，有望在燃料电池汽车、分布式发电等领域得到广泛应用。

在环境治理方面，碳纳米管具有巨大的比表面积和丰富的表面官能团，使其具有优异的吸附性能和催化性能。通过精确控制碳纳米管的生长，可以制备出高性能的碳纳米管吸附材料和碳纳米管催化材料，用于水体净化、废气处理、土壤修复等环境治理领域。

（三）在生物医学领域的应用

碳纳米管具有优异的生物相容性、生物降解性和生物活性，使其在生物医学领域具有广阔的应用前景。通过精确控制碳纳米管的生长，可以制备出高性能的碳纳米管生物传感器、碳纳米管药物载体、碳纳米管组织工程支架等生物医学器件。

碳纳米管生物传感器具有灵敏度高、选择性好、响应速度快、检测下限低等优点，有望在疾病诊断、药物筛选、环境监测等领域得到广泛应用。碳纳米管药物载体具有载药量高、药物释放速率可控、生物相容性好等优点，有望在癌症治疗、心血管疾病治疗等领域得到广泛应用。碳纳米管组织工程支架具有良好的生物相容性、生物降解性和机械性能，有望在组织工程、器官移植等领域得到广泛应用。

（四）在复合材料领域的应用

碳纳米管具有优异的力学性能，如高抗拉强度、高弹性模量、低密度等，使其成为一种理想的增强相，用于制备高性能的碳纳米管复合材料。通过精确控制碳纳米管的生长，可以制备出高取向、高分散性的碳纳米管增强相，从而显著提高复合材料的力学性能、电学性能、热学性能和化学稳定性。

碳纳米管复合材料具有优异的力学性能、电学性能、热学性能和化学稳定性，使其在航空航天、汽车制造、电子信息、新能源等领域具有广阔的应用前景。例

如，在航空航天领域，碳纳米管复合材料可以用于制备轻质、高强、耐高温的航空航天结构件；在汽车制造领域，碳纳米管复合材料可以用于制备轻质、节能、环保的汽车零部件；在电子信息领域，碳纳米管复合材料可以用于制备高性能的电子封装材料和散热材料；在新能源领域，碳纳米管复合材料可以用于制备高性能的电池电极材料和超级电容器电极材料。

第二节 碳纳米管电子器件

碳纳米管作为一维碳基纳米材料，凭借独特电子结构、超高载流子迁移率及优异力学与化学稳定性，成为下一代高性能电子器件的核心候选材料。其电子特性由 chiral 指数 (n, m) 决定，满足 $n - m = 3q$ (q 为整数) 时为金属性碳纳米管 (m -CNTs)，否则为半导体性碳纳米管 (s -CNTs)，这种结构依赖性为器件功能精准调控提供可能，但也对碳纳米管纯度分离、定向排列及集成提出严苛要求。与传统硅基器件相比，碳纳米管电子器件具有尺寸小、响应快、能耗低等优势，在高频器件、柔性电子、纳电子集成等领域应用前景广阔。本节围绕碳纳米管场效应晶体管、逻辑器件、高频器件及柔性电子器件四大核心类型，系统阐述其结构设计、制备技术、性能调控及应用进展，为产业化发展提供理论与技术支撑。

一、碳纳米管场效应晶体管

碳纳米管场效应晶体管 (CNT-FET) 是碳纳米管电子器件的基础核心类型，工作原理基于电场对碳纳米管沟道载流子输运的调制，通过栅极电压调控沟道导电状态实现电流开关控制。相较于硅基场效应晶体管，CNT-FET 载流子迁移率更高 (室温可达 $10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 以上)，亚阈值摆幅更低，尺寸缩放性更优，是突破摩尔定律限制的重要方向。根据结构差异，CNT-FET 可分为顶部栅极、底部栅极、环绕栅极等构型；按载流子类型可分为 p 型、 n 型及双极型。器件性能取决于碳纳米管沟道质量、电极接触特性及栅介质绝缘性能，需攻克精准筛选、定向排列、高质量接触及高 k 栅介质集成等关键技术。

(一) 器件结构与工作原理

CNT-FET 基本结构包括源极、漏极、沟道及栅极，碳纳米管作为沟道连接源漏电极，栅极通过栅介质与沟道隔离实现调控。底部栅极结构制备简单、兼容

性好，但栅极调控效率低、寄生电容大；顶部栅极结构将栅极与介质层沉积于沟道上方，栅沟距离近，调控效率显著提升，亚阈值摆幅更小，是当前高性能器件主流构型；环绕栅极结构通过介质层包裹碳纳米管，栅极环绕外部，调控效率最优，可抑制短沟道效应，适合超短沟道器件，但制备工艺复杂。

工作机制上，p 型 CNT-FET 在空气中制备，氧气与水分子吸附形成空穴积累层，默认导通，正向栅压耗尽空穴实现关断；n 型需通过掺杂或惰性气氛制备，抑制 p 型掺杂效应形成电子积累层，负向栅压耗尽电子关断；双极型可通过栅压正负调控实现空穴与电子交替输运，适用于逻辑电路、传感器等领域。碳纳米管一维结构减少载流子散射，是其超高开关速度的核心原因。

（二）关键制备技术

高性能 CNT-FET 制备关键技术包括 s-CNTs 精准筛选、定向排列、源漏接触优化及栅介质制备。s-CNTs 纯度直接决定器件性能，金属性碳纳米管会增大漏电流、降低开关比，常用分离方法有密度梯度离心法、凝胶电泳法、选择性化学修饰法等。密度梯度离心法可获高纯度 s-CNTs 但产量低；凝胶电泳法基于表面电荷差异实现高效分离，适合规模化；选择性化学修饰法操作简单，但可能损伤电子特性。

碳纳米管定向排列影响载流子输运效率与集成度，常用电场诱导排列法、模板辅助法等。电场诱导法利用导电性使碳纳米管沿电场定向，精度高、可控性强；模板辅助法通过光刻微纳模板引导定向生长或沉积，实现精准定位，适配高密度集成。源漏接触优化需实现无势垒输运，常用金、钼等金属真空蒸镀制备电极，通过界面掺杂、修饰优化电子结构降低接触电阻。栅介质层需保障电气隔离，高 k 介质（ HfO_2 、 Al_2O_3 ）可在薄厚度下实现良好绝缘，减少栅极漏电流，提升调控效率。

（三）性能优化策略

性能优化围绕降低漏电流、提升开关比、减小亚阈值摆幅及提高迁移率展开，策略包括沟道质量优化、接触界面工程、介质层改性及结构创新。沟道优化需减少缺陷杂质，通过生长工艺优化制备高结晶度碳纳米管，结合高效提纯确保 s-CNTs 纯度超 99%。接触界面工程可引入 TiC、TaC 过渡层形成欧姆接触，或通过化学掺杂匹配费米能级与金属功函数，降低接触电阻。

介质层改性采用高 k 材料及原子层沉积技术，提升绝缘性与界面相容性，如

ALD 制备的 HfO_2 介质层厚度均匀、界面态密度低，可有效抑制漏电流。结构创新方面，环绕栅极、多级栅极等新型结构提升调控效率，抑制短沟道效应；碳纳米管阵列化集成构建多通道器件，可显著提升驱动电流，满足高性能逻辑电路需求。

二、碳纳米管逻辑器件

碳纳米管逻辑器件基于 CNT-FET 集成实现逻辑运算，是碳纳米管电子器件实用化的核心方向，具有运算速度快、功耗低、集成度高等优势，适用于高性能计算、人工智能等领域。按功能可分为反相器、与非门等基本逻辑单元及 ALU、微处理器等复杂器件。性能取决于单个 CNT-FET 性能、集成工艺及布线技术，核心挑战为高性能 p 型与 n 型器件同步制备、均匀性控制及高密度集成技术突破。

（一）基本逻辑单元结构与工作机制

反相器由 p 型与 n 型 CNT-FET 串联组成，实现输入电压反向转换：输入高电平时 n 型导通、p 型关断，输出低电平；输入低电平时 p 型导通、n 型关断，输出高电平。性能由电压增益、开关速度和功耗决定，需通过器件性能匹配、尺寸比例优化及高 k 介质应用提升增益、加快响应、降低功耗。

与非门由两个 p 型并联与一个 n 型串联组成，仅双输入高电平时输出低电平；或非门由两个 n 型并联与一个 p 型串联组成，仅双输入低电平时输出高电平。触发器基于反相器与反馈电路构建，实现数据存储，分 SR、D、JK 等类型，具有存储速度快、功耗低等优点，是存储器与微处理器的核心单元。

（二）器件集成工艺

集成工艺包括衬底制备、碳纳米管阵列沉积、图形化、电极制备及互连布线等步骤，核心是实现多器件精准定位与性能匹配。衬底可选硅衬底（机械稳定、工艺兼容）或柔性聚合物衬底（适配可穿戴电子）。碳纳米管阵列沉积常用电场诱导定向沉积、模板辅助沉积及喷墨打印技术，分别适配大面积定向、精准定位及柔性器件低成本制备。

器件图形化采用深紫外光刻、电子束光刻实现结构精准定义，电子束光刻分辨率更高，适合纳米尺度器件。源漏电极与栅极通过真空蒸镀、溅射等技术制备，需严格控制厚度与接触质量保障均匀性。互连布线采用铜、铝等金属制备多层结

构，通过低电阻材料选择、结构优化及绝缘介质应用降低延迟与功耗。

（三）发展进展

近年来碳纳米管逻辑器件研究成效显著，已实现多种基本逻辑单元制备并向复杂集成发展。如基于碳纳米管阵列的高性能反相器，电压增益达 1.2，开关速度亚纳秒级，功耗较硅基器件降低一个数量级；与非门、或非门等复合单元通过工艺优化实现稳定逻辑输出，开关比超 10^4 ；碳纳米管微处理器原型已成功制备，基于 144 个晶体管实现简单指令集运算，速度达 1GHz，展现高性能计算潜力。

当前仍面临碳纳米管纯度与均匀性控制、n 型器件稳定性提升、高密度集成工艺优化等挑战。未来通过高效分离与定向技术、n 型掺杂工艺优化及兼容集成工艺开发，碳纳米管逻辑器件有望实现更高性能集成，逐步替代部分硅基器件，推动电子产业升级。

三、碳纳米管高频器件

碳纳米管超高载流子迁移率与极低寄生电容使其在高频电子领域具备独特优势，基于金属性或半导体性碳纳米管高频输运特性构建，可实现信号放大、振荡等功能，应用于无线通信、雷达等领域。常见类型包括射频场效应晶体管（RF-CNT-FET）、微波二极管、天线等。性能由截止频率（ f_T ）、最大振荡频率（ f_{max} ）、增益及噪声系数决定，核心挑战为降低寄生参数、优化接触特性及实现高频封装。

（一）核心性能参数与表征

截止频率（ f_T ）指电流增益降至 1 时的频率，反映高频放大能力，取决于载流子迁移率、沟道长度及寄生电容；最大振荡频率（ f_{max} ）指功率增益降至 1 时的频率，反映最大功率放大能力，与 f_T 、输出电阻及寄生电阻相关；增益评估信号放大能力，噪声系数衡量信号放大过程中噪声引入程度，低噪声系数是微弱信号检测的关键要求。

性能表征采用射频探针台、网络分析仪测量不同频率下 S 参数，计算核心性能参数，同时需表征稳定性与线性度保障可靠性。为准确获取本征高频性能，需采用去嵌入技术扣除测试系统与探针寄生效应。

（二）典型器件结构与制备

RF-CNT-FET 是主流高频器件，采用顶部栅极结构，沟道长度几十至几百纳米，栅极与源漏距离最小化降低寄生电容；源漏电极采用金、银等低电阻金属，

设计为叉指状或共面波导结构提升阻抗匹配；栅介质采用 ALD 制备的高 k 材料，保障超薄致密性与低漏电流。

碳纳米管微波二极管基于金属 - 半导体肖特基接触，利用势垒整流特性实现检波与混频，制备工艺简单，需优化接触质量降低电阻与寄生电容。碳纳米管天线利用导电性与一维结构构建，实现高频电磁波发射与接收，具有尺寸小、带宽宽等优点，通过定向阵列与光刻刻蚀定义形状尺寸，适配微型通信系统。

（三）应用前景与挑战

碳纳米管高频器件在 5G/6G 通信、雷达、微型卫星通信等领域前景广阔。RF-CNT-FET 可制备高频放大器提升通信速度与带宽；微波二极管用于雷达接收机检波混频；天线适配微型设备通信。相较于 GaAs、GaN 等传统高频材料，碳纳米管载流子迁移率更高、功耗更低，有望突破性能极限。

发展挑战包括：金属性碳纳米管分离难度大，影响性能均匀性；寄生参数控制困难，高频下对性能影响显著；高频封装技术不成熟，寄生效应降低器件性能；长期稳定性待提升，恶劣环境下性能易退化。未来通过高效分离技术、结构优化、专用封装工艺开发及稳定性提升，有望实现产业化应用，推动高频电子技术发展。

四、碳纳米管柔性电子器件

随着可穿戴电子、智能皮肤等领域发展，柔性电子器件需求激增。碳纳米管兼具优异电子性能与良好柔韧性（断裂应变超 15%），可承受多次弯曲拉伸保持性能稳定，是柔性器件理想材料。碳纳米管柔性电子器件以 PDMS、PI 等柔性聚合物为衬底，通过柔性工艺构建，具有重量轻、可弯曲、便携等优势，在健康监测、柔性传感等领域潜力巨大。本节重点阐述柔性场效应晶体管、传感器及储能器件的结构设计、制备工艺与应用进展。

（一）柔性衬底选择与制备工艺

柔性衬底需具备良好柔韧性、机械强度、化学稳定性及与碳纳米管的相容性，常用 PI、PDMS、PET 等。PI 衬底耐高温、机械强度高，可承受高温制备工艺，是高性能器件首选；PDMS 柔韧性与拉伸性优异（断裂应变超 100%），适合可拉伸器件；PET、PEN 成本低、透明度高，适配柔性显示与透明电子器件。

制备工艺需采用低温工艺避免衬底损伤，常用溶液法、喷墨打印、转移印刷等。溶液法将碳纳米管分散涂覆于衬底，工艺简单、成本低；喷墨打印通过喷嘴

精准打印墨水实现图案化，无需光刻刻蚀，适合个性化制备；转移印刷先在刚性衬底制备结构再转移至柔性衬底，保障结构完整与性能稳定；低温 ALD、溅射等技术用于制备介质层与电极，确保低温下获得高质量薄膜。

（二）典型器件类型与性能

碳纳米管柔性场效应晶体管（Flexible CNT-FET）是柔性电子核心单元，采用柔性衬底与电极，优化工艺后可实现与刚性器件相当的性能及良好机械稳定性。如 PI 衬底柔性 CNT-FET，载流子迁移率超 $10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ，开关比超 10^5 ，1000 次弯曲（半径 5mm）后性能基本稳定，可用于构建柔性逻辑器件与存储器。

碳纳米管柔性传感器基于电子特性对外部刺激的敏感响应实现检测，如压力传感器利用压阻效应检测压力，灵敏度高、响应快，可用于脉搏、血压监测；气体传感器通过气体分子吸附导致电导率变化实现检测，体积小、选择性好，适用于环境监测与医疗诊断。此外，碳纳米管可制备柔性超级电容器、锂离子电池等储能器件，凭借高比表面积与导电性提升容量与充放电速度，为柔性电子提供稳定能源。

（三）应用进展与展望

碳纳米管柔性电子器件应用研究成效显著，已在多个领域展现实用价值。如柔性健康监测系统集成压力、温度、心率传感器，实时监测生理参数并无线传输，支撑远程医疗；柔性透明导电薄膜透光率超 90%，面电阻低于 $100 \text{ } \Omega/\text{sq}$ ，可替代 ITO 电极用于柔性显示；智能皮肤集成传感器与执行器，模拟人体皮肤感知功能，适配智能机器人、假肢等领域。

未来发展方向包括提升机械稳定性与长期可靠性、实现多功能集成、开发低成本规模化工艺。通过衬底与封装优化提升复杂环境稳定性；集成传感器、处理器与储能器件构建一体化柔性系统；发展喷墨打印、卷对卷工艺降低成本。随着技术突破，碳纳米管柔性电子器件有望在更多新兴领域产业化，推动柔性电子产业快速发展。

综上，碳纳米管电子器件凭借独特性能优势，在高频、逻辑、柔性电子等领域前景广阔，是下一代电子器件重要发展方向。尽管面临纯度分离、定向排列等挑战，但随着制备技术与材料科学进步，性能将持续提升并逐步产业化。未来通过与其他材料复合集成，将朝着更高性能、更低功耗、更小尺寸、更多功能方向发展，为电子信息产业升级与新兴领域发展提供核心支撑。

第三节 碳纳米管复合材料

碳纳米管凭借优异力学性能、独特电学特性及高比表面积，成为复合材料领域核心功能增强相。碳纳米管复合材料通过特定工艺将其与金属、陶瓷、聚合物等基体结合，利用协同作用突破单一材料性能瓶颈，赋予材料高强度、高导电性等优异特性，广泛应用于航空航天、电子信息等高端领域。本节梳理其分类、界面调控机制、制备工艺及应用特性，探讨关键科学问题与技术突破方向，为定向设计与产业化应用提供支撑。

一、碳纳米管复合材料的分类与核心特性

碳纳米管复合材料可按基体类型、碳纳米管结构、复合功能等维度分类，不同类型在制备工艺、界面机制及应用场景上差异显著，但核心特性均源于碳纳米管与基体的协同增强效应。合理分类可明确材料设计方向，推动精准研发与高效应用。

（一）基于基体材料的分类体系

根据基体材料的化学组成与物理特性，碳纳米管复合材料可分为聚合物基、金属基、陶瓷基及碳基复合四大类，这是目前最主流的分类方式，直接决定了复合材料的制备工艺选择与核心性能导向。

聚合物基复合材料以塑料、橡胶、树脂为基体，是研究最广泛、应用最成熟的类型，具有制备简单、成本低廉、成型性好等优势。碳纳米管的引入可显著提升基体力学强度、导电性等性能，如碳纳米管/环氧树脂复合材料拉伸强度提升30%-50%，广泛用于电子封装、结构构件；碳纳米管/橡胶复合材料可改善耐磨性与韧性，适配轮胎、密封件等需求。

金属基复合材料以铝、铜、铁等金属及合金为基体，核心目标是提升比强度、耐磨性及高温稳定性，实现导电导热性能精准调控。因两者界面相容性差，且碳纳米管高温易与金属生成碳化物，制备难度较高。目前通过界面改性、原位复合等技术，已成功制备碳纳米管/铝基、铜基复合材料，在航空发动机零部件、高速铁路制动系统等领域展现应用前景。

陶瓷基复合材料以氧化铝、碳化硅等为基体，旨在克服陶瓷脆性大、韧性差的缺陷，提升导热性与耐磨性。碳纳米管的高长径比可阻碍裂纹扩展，显著提升

断裂韧性，如碳纳米管 / 碳化硅复合材料断裂韧性提升 40% 以上，适用于高温结构部件、切削刀具等极端环境。

碳基复合材料以石墨、活性炭等碳材料为基体，通过碳纳米管引入优化孔隙结构、导电性及力学性能，实现“碳 - 碳”协同增强。此类材料兼具碳材料耐高温、耐腐蚀特性与碳纳米管高比表面积优势，广泛用于超级电容器电极、催化载体等领域。

（二）复合材料的协同特性

碳纳米管复合材料的核心优势在于碳纳米管与基体材料的协同作用，所展现出的综合性能远超单一材料及传统复合材料，主要体现在力学增强、功能集成与性能调控三个维度。

力学协同增强是基础特性。碳纳米管拉伸强度 11-63GPa、弹性模量达 1TPa，远超传统增强相。通过合理分散与界面结合，可有效传递载荷、阻碍缺陷扩展，实现力学性能跨越式提升。如添加 0.5%-1% 质量分数的碳纳米管，聚合物基复合材料拉伸强度提升 20%-50%，金属基与陶瓷基复合材料硬度、耐磨性显著增强。

功能集成是核心竞争力。碳纳米管本身具备优异导电、导热、电磁屏蔽及催化性能，与不同基体复合可实现功能精准集成。如碳纳米管 / 聚合物复合材料可制备柔性导电薄膜，适配柔性电子器件电极；碳纳米管 / 陶瓷基复合材料可作为高温热管理材料；碳纳米管 / 金属基复合材料可实现导电与力学性能协同优化，适用于高可靠电子连接部件。

性能可调控性是适配不同场景的关键。通过调控碳纳米管类型、长径比、填充量及界面结合强度，可精准调控复合材料力学、电学等性能。如增加填充量可实现聚合物基复合材料从绝缘到导电的连续转变；选择高长径比碳纳米管可优化力学增强效果。

二、碳纳米管复合材料的界面作用机制与调控策略

界面是碳纳米管与基体的连接桥梁，结合强度与作用方式直接决定性能发挥。两者界面作用主要包括范德华力、化学键合、机械互锁等，界面过弱则载荷传递效率低，过强则降低韧性。因此，界面精准调控是核心科学问题之一。

（一）界面作用的核心机制

范德华力是最基础作用形式，源于表面原子间的静电引力、诱导力与色散力，在聚合物基中表现为与分子链的相互作用，在金属基、陶瓷基中存在与基体颗粒的接触界面。其作用强度较弱，仅适用于低载荷场景，高载荷下易发生界面剥离。

化学键合是提升界面强度的关键，通过表面改性引入羟基、羧基等活性官能团，与基体发生反应形成共价键或离子键。如氧化处理引入的羧基可与环氧树脂环氧基团反应形成共价键，金属基中官能团可与金属原子形成金属-碳键。化学键合可提升载荷传递效率，但过度结合会增加界面脆性。

机械互锁通过界面微观形貌设计实现增强，利用碳纳米管高长径比形成“缠绕”或“锚定”结构，通过机械咬合提升结合强度。长径比越大，与聚合物分子链缠绕效果越好；表面粗糙化处理可进一步提升机械咬合作用，兼具增强与增韧效果，是平衡强度与韧性的重要形式。

（二）界面调控的关键策略

碳纳米管表面改性是直接有效的调控策略，通过化学氧化、等离子体处理等改变表面化学组成与形貌，提升相容性与界面强度。化学氧化是常用方法，利用浓硝酸等强氧化剂引入含氧官能团，可与基体发生化学反应，如混酸氧化多壁碳纳米管可使羧基含量提升至 5%-8%，与环氧树脂界面结合强度提升 35% 以上。

等离子体表面改性是绿色高效的物理化学技术，利用高能粒子轰击表面实现活化与官能团接枝，具有处理时间短、无污染、效果均匀等优势，可引入氨基、羟基等，同时产生微缺陷提升机械互锁作用。如氨气等离子体处理可改善与金属基体的相容性，提升界面强度与导电性。

基体改性与添加剂调控通过优化基体组成增强界面，引入偶联剂、相容剂等改善相容性。如聚合物基中添加硅烷偶联剂，可在碳纳米管与聚合物间形成“桥梁”；金属基中添加钛、铬等活性元素，可与碳纳米管形成稳定碳化物增强冶金结合。调控基体分子量、结晶度等也可优化界面效果。

复合工艺优化通过调控制备参数改善分散状态与界面质量。如熔融共混时调控温度、剪切速率可避免碳纳米管团聚与断裂；粉末冶金时优化球磨与烧结参数，可减少碳纳米管与金属的界面反应，提升结合质量。

三、碳纳米管复合材料的典型制备工艺

制备工艺选择需结合基体特性、碳纳米管类型及性能需求，核心目标是实现均匀分散、良好界面结合与精准成型。不同基体对应的工艺差异显著，以下重点介绍聚合物基、金属基及陶瓷基复合材料的典型制备工艺及优劣。

（一）聚合物基碳纳米管复合材料的制备工艺

聚合物基碳纳米管复合材料的制备工艺相对成熟，主要包括溶液共混法、熔融共混法、原位聚合法及静电纺丝法等，其中溶液共混法与熔融共混法是工业上应用最广泛的两种工艺。

溶液共混法将碳纳米管与聚合物分别溶解或分散于溶剂，经搅拌、超声混合后，通过溶剂挥发、沉淀获得复合材料。其优势是分散均匀、界面质量高，适用于溶解性好的聚合物，如多壁碳纳米管与聚酰亚胺的溶液浇铸制备。但存在溶剂回收难、污染大、成本高及不适用于难溶性聚合物等局限，限制规模化应用。

熔融共混法在聚合物熔融温度以上，利用螺杆挤出机等剪切作用混合碳纳米管与聚合物熔体，再经挤出、注塑成型。具有工艺简单、无溶剂、效率高、可规模化等优势，适用于多数热塑性聚合物，如碳纳米管 / 聚丙烯的制备。但剪切作用易导致碳纳米管断裂，分散均匀性逊于溶液共混法，需优化参数并添加分散剂改善。

原位聚合法将碳纳米管分散于聚合物单体，通过引发剂引发聚合，使聚合物在碳纳米管表面原位生长，实现紧密结合。优势是界面强度高、分散均匀，可避免团聚，适用于环氧树脂等热固性聚合物。但反应条件苛刻、周期长、成本高，适用于高端复合材料制备。

（二）金属基与陶瓷基碳纳米管复合材料的制备工艺

粉末冶金法是金属基复合材料的主流工艺，核心步骤为粉末混合、压制成型与烧结致密化。将碳纳米管与金属粉末经高能球磨混合后压制成型，再经惰性气氛或真空烧结获得致密材料。优势是工艺成熟、可规模化、适配多种金属基体，如碳纳米管 / 铝基复合材料的制备。但存在混合时易团聚、烧结时易发生界面反应等问题，需通过表面改性与工艺优化解决。

粉末冶金法是金属基碳纳米管复合材料最主流的制备工艺，核心步骤包括粉末混合、压制成型与烧结致密化。首先将碳纳米管与金属粉末通过高能球磨、机

械混合等方式均匀混合，随后将混合粉末在一定压力下压制成型，最后在惰性气氛或真空环境下进行烧结，获得致密的复合材料。该方法的优势是工艺成熟、可规模化生产、适用于多种金属基体，通过优化球磨参数与烧结工艺，可有效控制碳纳米管的分散状态与界面反应。例如，将碳纳米管与铝粉通过高能球磨混合均匀，在 200-300MPa 压力下冷压成型，随后在 550-600℃ 真空烧结，可制备出碳纳米管 / 铝基复合材料。但粉末冶金法存在粉末混合过程中碳纳米管易团聚、烧结过程中易发生碳纳米管与金属的界面反应等问题，需通过表面改性与工艺优化解决。

原位复合工艺通过基体制备过程中原位生成碳纳米管，实现紧密结合并改善相容性。利用基体中碳源与其他元素反应生成碳纳米管，如铁基复合材料中通过铁粉、石墨粉的催化裂解反应原位生成碳纳米管。优势是界面强度高、分散均匀、无团聚，但反应条件苛刻、控制难度大，目前仍处于实验室阶段。

溶胶 - 凝胶法是陶瓷基复合材料的典型工艺，步骤包括溶胶制备、碳纳米管分散、凝胶化、干燥与烧结。将陶瓷前驱体水解形成溶胶，分散碳纳米管后调参凝胶化，经干燥、烧结获得致密材料。优势是制备温度低、分散均匀、可制复杂形状，适用于氧化铝、氧化硅等基体。但制备周期长、干燥易开裂、致密度低，需优化干燥与烧结参数。

四、碳纳米管复合材料的应用领域与发展趋势

碳纳米管复合材料凭借优异综合性能，在多个高端领域展现广泛应用前景，随制备工艺成熟与成本降低，应用范围不断拓展。其研发正朝着高性能化、功能集成化、绿色低成本化方向发展，以下梳理主要应用领域、现状及发展趋势。

（一）主要应用领域及应用现状

航空航天领域利用其高强度、轻量化、耐高温等优势，制备飞机结构部件、发动机零部件等。如碳纳米管 / 环氧树脂复合材料制备的机翼、机身，较传统碳纤维复合材料减重 10%-15%、强度提升 20% 以上；碳纳米管 / 陶瓷基复合材料制备的高温部件使用温度超 1200℃，寿命提升 3-5 倍。目前已进入工程化验证阶段，部分产品小批量应用。

电子信息领域依托其导电、导热及柔性优势，制备柔性电子器件、电子封装材料等。如碳纳米管 / 聚二甲基硅氧烷复合材料可制柔性导电薄膜，适配柔性显

示屏电极；碳纳米管/环氧树脂封装材料导热系数提升 5-10 倍，解决器件散热问题；金属基复合材料可制电磁屏蔽材料，屏蔽效能 40-60dB，适用于 5G 通信等领域。目前部分产业化，相关产品已入市。

能源存储领域利用其高比表面积、导电及电化学稳定特性，制备超级电容器电极、锂离子电池电极等。如碳纳米管/活性炭电极比电容 300-500F/g，较传统提升 50% 以上，循环寿命超 10 万次；碳纳米管/硅基负极比容量 1500-2000mAh/g，较石墨提升 2-3 倍；负载贵金属催化剂可提升燃料电池活性与稳定性，降低贵金属用量。目前处于中试阶段，部分产品小批量试产。

生物医疗领域是新兴应用方向，利用其生物相容性、光学特性及靶向性，制备组织工程支架、生物传感器等。如碳纳米管/聚乳酸支架的多孔结构利于细胞黏附增殖，力学性能适配骨组织修复；修饰后的生物传感器可高灵敏度检测生物分子，检测限达 10-9-10-12mol/L；作为药物载体可实现靶向输送与可控释放。目前仍处于实验室阶段，需解决生物相容性与安全性问题。

（二）技术瓶颈与未来发展趋势

规模化应用仍面临技术瓶颈：一是碳纳米管易团聚，分散均匀性差影响性能稳定；二是界面结合强度难以精准调控，平衡强度与韧性需深入研究；三是制备成本高，限制规模化应用；四是部分领域安全性与可靠性待验证，如生物医疗领域的生物相容性。未来将聚焦高性能化、功能集成化、绿色低碳化、应用精准化及跨学科融合方向，突破关键技术，加速产业化进程。

未来，碳纳米管复合材料的发展将聚焦于以下核心方向：一是高性能化方向，通过精准调控碳纳米管的结构参数、优化界面作用机制、开发新型复合工艺，进一步提升复合材料的力学性能、电学性能与功能特性，满足高端领域的严苛需求；二是功能集成化方向，开发兼具多种功能的复合型复合材料，如兼具力学增强、导热、电磁屏蔽、传感等功能的一体化复合材料，拓展其应用场景；三是绿色低碳化方向，开发低成本碳纳米管制备技术，优化复合工艺，减少溶剂使用，实现复合材料的绿色环保制备，降低生产成本；四是应用精准化方向，针对不同应用场景的需求，开展定制化材料设计与制备，提升材料的适配性与应用效率；五是跨学科融合方向，推动材料科学、化学工程、电子工程、生物医学等多学科的交叉融合，解决复合材料制备与应用中的关键科学问题，加速产业化进程。

综上，碳纳米管复合材料作为新型高性能材料，应用前景广阔、发展潜力巨

大。尽管面临分散、界面、成本等瓶颈，但随研究深入与技术突破，将在多个高端领域实现规模化应用，为高端装备制造与新兴产业提供核心支撑。未来研发应坚持需求导向与创新驱动，推动基础研究与工程化应用协同推进，实现从“材料”到“器件”的跨越。

第四节 碳纳米管生物传感器

生物传感器通过生物识别元件与信号转换元件的协同作用实现生物分子精准检测，在临床诊断、环境监测等领域具有核心应用价值。碳纳米管凭借超大比表面积、优异电子传输性能及良好生物相容性，成为构建高性能生物传感器的理想敏感材料。其核心原理是将抗体、酶等生物识别分子固定于碳纳米管表面，利用生物分子与目标物的特异性相互作用调控碳纳米管的电学或光学性能，实现目标物定性定量检测。本节系统阐述碳纳米管生物传感器的构建原理、核心技术、主要类型及应用展望，为其优化设计与产业化应用提供理论支撑。

一、碳纳米管生物传感器的构建原理与核心特性

碳纳米管生物传感器的功能实现依赖生物识别层与信号转换层的协同作用，需兼顾生物识别分子活性与信号转换效率。本节从构建原理、核心特性及性能评价指标三个维度，解析其基础理论体系。

（一）核心构建原理

遵循“识别 - 转换 - 放大 - 检测”核心逻辑，包含两个关键环节：一是生物识别过程，通过抗原 - 抗体结合、核酸互补配对等特异性反应捕获目标分析物，核心是保证生物识别分子活性构象，避免识别位点遮蔽；二是信号转换过程，生物识别事件引发局部电荷分布、介电环境等变化，调控碳纳米管电导率、荧光强度等性能，将生物信号转化为可检测的电信号或光信号。碳纳米管的高比表面积可提升生物识别分子固定量，优异电子传输性能则加速电荷转移，保障检测灵敏度与响应速度。

（二）关键核心特性

相较于传统生物传感器，碳纳米管生物传感器具备五大核心优势：一是超高检测灵敏度，比表面积可达数百 m^2/g ，电子传输无晶界阻碍，检测限低至皮摩尔

级，满足痕量检测需求；二是优异选择性，通过精准化学修饰实现生物识别分子定向固定，结合生物分子特异性识别能力，有效规避干扰；三是良好生物相容性与稳定性，表面功能化后可降低细胞毒性，适用于活体检测，且能在复杂体液环境中保持性能稳定；四是快速响应，电子传输速率快，响应时间可控制在分钟级甚至秒级，适配实时检测场景；五是微型化集成化潜力，尺寸微小可构建阵列化传感器芯片，易于与微流控系统集成，推动现场快速检测发展。

（三）性能评价指标

核心评价指标包括：检测灵敏度，以检测限（LOD）表征，通过标准样品校准曲线结合 3 倍信噪比计算；选择性，通过添加干扰物质对比信号变化评估，优良传感器干扰信号变化率低于 5%；响应时间，即接触目标物至信号稳定的时间，常规要求不超过 30 分钟；线性检测范围，信号与浓度线性相关的区间，相关系数（ R^2 ）需大于 0.99；稳定性，含储存稳定性（4℃冷藏 1 个月信号保留率 $\geq 80\%$ ）与工作稳定性（连续检测 10 次 $RSD \leq 5\%$ ）；重现性，批次内与批次间 RSD 分别低于 3% 和 5%。各指标相互关联，需综合优化以保障传感器实用价值。

二、碳纳米管生物传感器的核心构建技术

碳纳米管生物传感器构建包含碳纳米管预处理与功能化、生物识别分子固定、传感器界面构建与优化三个关键环节，技术选择直接影响传感器性能。本节阐述各环节核心技术的原理、优缺点及应用场景。

（一）碳纳米管的预处理与功能化修饰

原始碳纳米管表面惰性、易团聚，预处理旨在去除催化剂杂质与无定形碳，引入活性官能团，常用物理法（超声分散、等离子体处理）与化学法（强酸氧化、强碱处理）。超声分散实现初步分散，等离子体处理温和引入羟基、羧基等官能团；强酸氧化法可高效引入含氧官能团，但需控制反应条件避免管壁破损；强碱处理适用于氧化敏感碳纳米管的羟基修饰。

功能化修饰分为共价与非共价两类：共价修饰通过酰胺化、点击反应等实现修饰分子稳定结合，固定牢固但可能影响生物分子活性；非共价修饰借助 π - π 堆积、静电作用结合，反应温和、保留生物活性，但结合强度较弱。实际应用中可采用复合修饰策略，平衡稳定性与生物活性需求。

（二）生物识别分子的固定技术

固定技术需满足保留活性、高效固定、稳定留存三大要求，主要分为四类：共价结合法通过官能团反应固定生物分子，稳定性高适用于长期检测，但需严控反应条件；非共价结合法借助静电、疏水作用固定，操作简便、保留活性，适用于酶等敏感生物分子，但高离子强度环境下易脱落；包埋法将生物分子与碳纳米管共分散于聚合物基质成膜，可保护生物分子，适用于膜电极型传感器，但传质阻力较大；交联法通过戊二醛等交联剂形成三维网络，固定量大、灵敏度高，但交联剂可能影响生物活性。需根据生物分子类型与检测需求选择合适技术。

（三）传感器界面的构建与优化

界面是信号转换核心场所，需实现碳纳米管、生物分子与基底的高效结合，降低界面电阻与非特异性吸附。常用构建方式包括：滴涂法操作简便、成本低，适用于实验室快速制备，但膜均匀性与稳定性较差；电化学沉积法可精准调控膜厚与成分，信号传输效率高，适用于高性能传感器，但操作复杂；自组装法构建的界面均匀有序、非特异性吸附低，重现性好，但耗时较长、对基底清洁度要求高；喷墨打印法可实现微型化、阵列化批量制备，适用于传感器芯片，需专用设备与参数调控。

界面优化聚焦三方面：选择金电极、玻碳电极等降低界面电阻；修饰聚乙二醇、牛血清白蛋白减少非特异性吸附；构建多孔界面或结合微流控技术提升目标物传质速率。

三、碳纳米管生物传感器的主要类型与检测机制

根据信号转换方式，碳纳米管生物传感器可分为电化学型、光学型、压电型等，各类传感器检测机制与应用场景差异显著。本节重点阐述电化学型、光学型传感器的核心结构与检测机制，简要介绍压电型传感器原理。

（一）电化学型碳纳米管生物传感器

此类传感器以电信号为检测对象，是研究最广泛、应用最成熟的类型，可分为安培型、伏安型、阻抗型、电位型等，核心机制均为生物识别事件调控碳纳米管电子传输性能。安培型以电流为信号，利用酶催化作用氧化还原目标物，碳纳米管作为电子媒介体加速电子转移，增强电流信号，适用于葡萄糖等生物小分子检测，灵敏度高、响应快；伏安型通过伏安曲线峰电流、峰电位变化检测，可实

现多目标物同时检测；阻抗型通过生物结合形成绝缘层增加电子转移阻力，无需标记，适用于抗原 - 抗体等大分子检测，但灵敏度较低；电位型基于离子选择性识别改变电极电位，适用于 pH、重金属离子等检测。

（二）光学型碳纳米管生物传感器

以光学信号为检测对象，无需电极，可实现非接触式检测，空间分辨率高，适用于活体成像。分为荧光型、拉曼型、紫外 - 可见吸收型：荧光型基于荧光共振能量转移或淬灭 / 增强效应，碳纳米管近红外荧光稳定性高，通过生物结合事件调控荧光强度，适用于活体分子检测，但易受背景荧光干扰；拉曼型借助碳纳米管拉曼增强效应，通过 G 峰、D 峰强度与位置变化检测，选择性高，适用于复杂基质检测，但成本高、操作复杂；紫外 - 可见吸收型通过生物结合改变碳纳米管电子跃迁能级，导致吸收峰变化，操作简便、成本低，但灵敏度较低，不适用于痕量检测。

（三）压电型碳纳米管生物传感器

以石英晶体微天平（QCM）等压电材料为基底，基于压电效应与质量敏感效应，生物结合导致界面质量增加，改变压电材料共振频率，通过频率变化定量检测。碳纳米管高比表面积可提升生物分子固定量，增强捕获能力。此类传感器无需标记、操作简便，适用于大分子检测，但灵敏度受温度、溶液粘度等环境因素影响较大，不适用于复杂体液痕量检测，目前研究尚不成熟。

四、碳纳米管生物传感器的应用领域与发展展望

碳纳米管生物传感器凭借优异性能，在多个领域展现广阔应用前景，同时也面临产业化相关挑战。本节阐述其主要应用领域，分析现存问题，展望未来发展趋势。

（一）主要应用领域

临床诊断领域，可实现肿瘤标志物、病原体、代谢小分子等精准检测，如皮摩尔级肿瘤标志物检测支撑肿瘤早期筛查，数十分钟内完成新冠病毒等核酸检测实现传染病快速确诊，实时监测血糖助力糖尿病治疗，推动精准医疗发展；环境监测领域，可快速检测重金属离子、致病菌、有机污染物，检测限达纳摩尔级，无需复杂前处理，适用于饮用水、工业废水、土壤的现场筛查；食品安检领域，可检测兽药残留、致病菌、生物毒素，契合食品全链条安全监测需求，微型化特

性适配便携式检测设备；生物医学研究领域，可用于细胞内分子检测、药物作用机制研究，为疾病靶点发现与新药研发提供技术支撑。

（二）当前存在的问题与挑战

产业化应用面临五大核心挑战：一是碳纳米管批量制备质量不稳定，不同批次直径、纯度差异大，导致传感器重现性差；二是生物识别分子固定效率与活性难以兼顾，部分固定方法导致活性降低；三是复杂基质中易发生非特异性吸附，长期使用中生物分子易脱落、碳纳米管易团聚，稳定性与抗干扰能力不足；四是微型化、集成化技术不成熟，缺乏批量制备工艺与便携式检测设备，难以满足现场检测需求；五是生物安全性存在争议，未修饰碳纳米管可能具有细胞毒性，限制活体应用。

（三）未来发展趋势

未来将朝着高性能化、微型化集成化、智能化、绿色化方向发展：高性能化通过碳纳米管精准备、生物分子基因工程改造、复合界面构建实现；微型化集成化依托微纳加工、喷墨打印、微流控技术，开发阵列化传感器芯片与便携式设备；智能化结合人工智能、大数据、物联网技术，实现信号智能分析与实时监测网络构建；绿色化聚焦低毒性修饰材料、绿色制备技术与可重复使用传感器开发。此外，与光电子、纳米机器人技术融合，将拓展活体精准检测、靶向治疗等应用领域，推动生物医学与分析检测技术跨越式发展。

综上所述，碳纳米管生物传感器具有显著技术优势与广阔应用前景。尽管当前面临诸多挑战，但随着多学科技术融合与创新突破，其必将在临床诊断、环境监测等领域实现产业化应用，为人类健康与环境保护提供有力保障

第四章 碳量子点材料与器件

第一节 碳量子点合成方法

碳量子点（Carbon Quantum Dots, CQDs）是尺寸小于 10 nm 的零维碳基纳米材料，凭借优异光学性能、良好生物相容性、低毒性及可调电子结构，在荧光传感、生物成像、光电转换、催化与能源存储等领域极具应用前景。与传统半导体量子点相比，其兼具量子限域效应、边缘效应及原料广泛、成本低廉、环境友好等优势，已成为碳基材料领域的研究热点。碳量子点性能与其尺寸、形貌、表面官能团及晶体结构密切相关，合成方法是调控这些核心参数的关键。因此，开发高效、可控、规模化的合成技术，实现结构与性能精准调控，是推动其从基础研究走向实际应用的核心前提。本节系统梳理碳量子点合成方法的发展历程、核心原理与技术特点，重点探讨各类方法的调控机制、优化策略及适用场景，为后续器件构建与性能优化提供支撑。

一、碳量子点合成方法的分类与发展概述

自 2004 年碳量子点被发现以来，合成技术已形成多元化体系，按原料与原理可分为自上而下法与自下而上法两大类。自上而下法以石墨、碳纳米管、活性炭等体相碳材料为原料，通过物理或化学手段剥离、切割为纳米尺度碳量子点；自下而上法则以柠檬酸、葡萄糖、尿素等小分子有机物为原料，经化学合成实现碳原子有序组装形成碳量子点。两类方法在原料选择、反应条件、产物性能上各有优劣，适配不同应用需求。

早期合成以自上而下法为主，如电弧放电法、激光消融法，为基础性能研究提供了样品，但存在产物尺寸分布宽、荧光量子产率低、能耗高、难规模化等问题。为突破瓶颈，研究者转向自下而上法，开发了水热法、溶剂热法、微波辅助法等温和高效的技术。该类方法具有原料广泛、反应温和、性能易调控、易规模化等优势，已成为当前主流合成方向。

当前，碳量子点合成技术呈现“精准调控”“绿色高效”“规模化兼容”并重趋势。一方面通过优化参数、设计前驱体、引入掺杂修饰等实现结构性能精准调控；另一方面开发低能耗、无二次污染的绿色工艺，降低成本推动工业化。不同方法在成熟度、产物质量、效率及成本上的差异，决定了其应用适配性，深入理解各类方法核心原理，是实现材料精准选型与应用拓展的关键。

（一）自上而下法的技术特征与适用场景

自上而下法核心优势是原料广泛且成本低，利用廉价体相碳材料制备，无需复杂前驱体设计。其原理是通过物理或化学外力破坏碳-碳共价键，将体相碳材料剥离破碎为纳米尺度碳量子点，可分为物理剥离法与化学剥离法。

物理剥离法（电弧放电法、激光消融法等）合成速度快、产物纯度高、表面缺陷少，适用于制备高结晶度碳量子点，在光电转换器件等对晶体质量要求高的领域有应用潜力。但需高温、高压等高能量输入，能耗高，产物尺寸分布宽、难精准调控，规模化能力有限。化学剥离法（强酸氧化、电化学剥离等）通过氧化作用破坏层间作用力与碳-碳键，剥离效率高、可批量制备，适用于规模化生产低成本碳量子点。但易引入大量含氧官能团，荧光量子产率低，可能产生二次污染，需后续提纯修饰工艺。

（二）自下而上法的技术特征与适用场景

自下而上法以小分子有机物为前驱体，经脱水、碳化、聚合等反应实现碳原子有序组装成核生长为碳量子点。核心优势是结构性能可控性强，可通过调控前驱体、反应条件、掺杂及修饰剂等参数精准调控产物特性。且反应条件温和、能耗低、易规模化，是当前主流技术路径。

按反应介质与条件，自下而上法可分为水热法、溶剂热法、微波辅助法、超声辅助法、固相合成法等。其中水热法与溶剂热法反应温和、产物稳定、易调控，应用最广泛，适用于制备高性能荧光碳量子点，在生物成像、荧光传感领域优势突出。微波与超声辅助法合成效率高、反应时间短，适用于快速批量制备。固相合成法操作简单、无溶剂、环境友好，是极具潜力的绿色方法，适用于生物医学领域低毒性碳量子点制备。

二、自上而下法碳量子点合成关键技术

（一）物理剥离法

物理剥离法利用高能量输入产生的物理力破坏体相碳材料的化学键与层间作用力，实现剥离破碎，具有合成简单、产物纯度高、表面缺陷少等优点，是研究本征性能的理想制备手段，主要包括电弧放电法、激光消融法、超声剥离法。

电弧放电法以石墨棒为电极，在惰性气体或氢气氛围下施加高压电流产生电弧放电，高温下石墨电极碳原子蒸发解离，冷却后重组形成碳量子点。技术关键在于控制放电电流、电极间距、气体氛围及冷却速率。其优势是合成快、产物结晶度高，但能耗极高、成本高、产物尺寸分布宽、产量低，难以规模化，仅用于实验室基础研究。

激光消融法利用高能量激光照射体相碳材料靶材，使碳原子瞬间蒸发电离形成碳等离子体，随后在液气相介质中冷却成核生长为碳量子点，可分为液相与气相两种。技术关键在于激光功率、脉冲宽度、照射时间、靶材与介质选择。产物结晶度高、表面缺陷少，可制备高性能碳量子点，但同样存在能耗高、成本高、规模化难等问题，适用于实验室高质量样品制备。

超声剥离法利用超声波空化效应与冲击波破坏层间作用力，实现层状碳材料剥离切割。以石墨、氧化石墨等为原料，分散于水或有机溶剂中超声处理。技术关键在于超声功率、时间、分散介质及原料浓度。反应条件温和、能耗低、操作简单，适用于小批量制备，但剥离效率低、产物尺寸分布宽、产量有限，难满足规模化需求。

（二）化学剥离法

化学剥离法通过化学试剂氧化、腐蚀作用破坏体相碳材料的化学键与层间作用力，实现剥离切割形成碳量子点，具有剥离效率高、可批量制备、成本低等优点，是规模化制备的重要路径，主要包括强酸氧化剥离法、电化学剥离法。

强酸氧化剥离法利用浓硝酸、浓硫酸、高锰酸钾等强氧化剂，在高温或超声辅助下对体相碳材料氧化处理，引入含氧官能团增大层间距离，再经超声剥离或离心分离获得碳量子点，过程包括氧化、剥离、提纯三步。技术关键在于氧化剂种类、浓度、反应温度与时间。优势是剥离效率高、可批量制备、成本低；局限性是易引入表面缺陷导致荧光量子产率低，使用大量强酸易产生二次污染，提纯

过程繁琐。适用于制备对荧光性能要求不高、成本敏感的碳量子点，如废水处理吸附材料、催化剂载体等。

电化学剥离法利用电化学氧化作用，在电场驱动下使体相碳材料表面氧化引入含氧官能团，电解液离子嵌入增大层间距离，实现剥离切割。以碳材料为工作电极，铂片为对电极，在水或有机溶剂电解液中施加恒定电压或电流。技术关键在于电极材料、电解液种类、施加电压 / 电流及反应时间。优势是反应温和、氧化程度易调控、环境友好，可精准调控产物尺寸与表面官能团；局限性是制备效率低、规模化难，目前仍处于实验室研究阶段。

三、自下而上法碳量子点合成关键技术

（一）水热法

水热法是应用最广泛成熟的自下而上技术，以水为反应介质，在密闭高压反应釜中，小分子有机物前驱体在 100-250℃、1-10 MPa 条件下经脱水、碳化、聚合反应形成碳量子点。具有反应温和、产物稳定、易调控、环境友好、可规模化等优势，是高性能碳量子点合成的主流路径。

合成过程包括前驱体溶解、密封反应、冷却、提纯四步。前驱体溶解形成均匀溶液；密封反应是核心，高温高压下前驱体碳化形成碳核，表面氧化引入含氧官能团；冷却速率影响结晶度与尺寸分布；提纯通过离心、透析等去除杂质。技术关键在于前驱体选择、反应温度、时间、溶液 pH 值及表面修饰剂调控。前驱体种类决定产物结构性能，如柠檬酸为前驱体合成的碳量子点表面富含亲水官能团，荧光量子产率高；葡萄糖为前驱体的产物结晶度高。反应温度过低碳化不充分，过高则碳核过度生长；时间过短碳化不足，过长产物尺寸增大。溶液 pH 值影响前驱体反应活性，调控产物尺寸与官能团类型。表面修饰剂可提高荧光量子产率、分散稳定性及生物相容性。该方法适用于生物成像、荧光传感、光电转换等领域，局限性是反应周期较长，规模化需大型高压反应釜，设备成本较高。

（二）溶剂热法

溶剂热法以有机溶剂为反应介质，在密闭高压反应釜中，小分子前驱体经高温高压碳化聚合形成碳量子点。通过选择不同极性、沸点的有机溶剂调控反应化学环境，实现产物结构性能精准调控，适用于制备疏水性或特定表面官能团的碳量子点。

合成过程与水热法类似，包括前驱体溶解、密封反应、冷却、提纯。但有机溶剂的极性、沸点、溶解性等参数对反应影响显著：高沸点溶剂可提高反应温度，利于提升碳化程度与结晶度；低极性溶剂可制备疏水性碳量子点，适配油相应用场景；良好溶解性可提高反应效率与产物均匀性。技术关键在于有机溶剂种类、前驱体选择、反应温度与时间调控。选择低极性溶剂可制备疏水性产物，选择含胺类溶剂可实现氨基官能团修饰。该方法拓展了应用场景，适用于有机光电器件、油相荧光传感等领域；局限性是有机溶剂易挥发、有毒，环境不友好，成本较高，溶剂回收繁琐，限制规模化应用。

（三）微波辅助法

微波辅助法利用微波热效应与非热效应使小分子前驱体短时间快速升温，经脱水、碳化、聚合形成碳量子点。微波加热均匀、升温快、能量利用率高，可显著缩短反应时间、提高效率，是极具产业化潜力的合成技术。

合成过程包括前驱体溶解、微波照射、冷却、提纯。前驱体溶解形成均匀溶液；微波照射是核心，溶液快速升温使前驱体快速碳化；快速冷却可抑制产物过度生长；提纯去除杂质获得高纯度产物。技术关键在于微波功率、照射时间、反应介质及前驱体浓度调控。功率过高易导致局部过热、碳化不均；功率过低则升温缓慢、效率低。时间过短碳化不充分，过长产物尺寸增大、缺陷增加。反应介质可选水或有机溶剂，介电常数影响微波吸收能力与升温效果。前驱体浓度过高易团聚，过低则产量低。优势是反应快、加热均匀、产物尺寸均一、能耗低、操作简单、易自动化，适用于批量制备；局限性是温度难精确控制，产物性能可能波动，对微波不敏感的前驱体需添加吸收剂辅助加热。

（四）固相合成法

固相合成法将小分子前驱体与盐类、氧化物等辅助试剂混合均匀，在高温或室温下通过研磨、焙烧等固相反应，使前驱体脱水碳化形成碳量子点。无需溶剂，具有操作简单、环境友好、成本低廉、易规模化等优点，是极具潜力的绿色合成技术。

合成过程包括前驱体混合、固相反应、产物分离提纯。前驱体混合通过研磨使前驱体与辅助试剂均匀分散；固相反应分为高温焙烧法与室温研磨法，高温焙烧法在惰性氛围下 200-500℃加热保温，室温研磨法通过机械能驱动室温反应；分离提纯通过溶解、离心、过滤等去除辅助试剂与未反应前驱体。技术关键在于

前驱体选择、辅助试剂种类与比例、反应温度时间或研磨参数调控。高反应活性、高碳含量前驱体利于提高效率与产量；辅助试剂可分散前驱体、抑制团聚，盐类易水洗去除，氧化物可调控形貌。高温焙烧法温度过高或时间过长易导致过度碳化，室温研磨法需保证研磨充分以提高效率。优势是绿色环保、操作简单、成本低、易规模化、产物低毒性，适用于生物医学领域；局限性是产物尺寸分布较宽，荧光量子产率低于水热法与溶剂热法，需进一步优化工艺提升性能与效率。

四、碳量子点合成工艺的优化策略与发展趋势

（一）现有合成工艺的优化路径

针对现有工艺存在的性能调控精度低、荧光量子产率不高、规模化有限、环境友好性不足等问题，优化策略聚焦高质量、低成本、绿色化制备。自上而下法优化方向为降低能耗、提高产物均匀性、减少表面缺陷，如超声剥离法中引入表面活性剂优化参数，电化学剥离法设计新型电极与电解液。

自下而上法优化包括前驱体设计改性、反应参数精准调控、掺杂与表面修饰协同优化。前驱体设计选择特定官能团或预修饰前驱体，实现表面官能团与光学性能精准调控；采用高精度设备实现反应参数实时监测控制，提高性能一致性；引入金属或非金属元素掺杂调控电子结构，结合表面修饰提升分散稳定性、生物相容性与靶向性，拓展应用场景。

（二）新型合成技术的发展方向

未来碳量子点合成技术将朝着绿色化、精准化、规模化、多功能一体化方向迈进。绿色合成技术是核心，如室温固相合成法、太阳光辅助合成法、生物合成法，太阳光辅助法利用太阳能驱动反应，能耗低、环境友好；生物合成法利用微生物、植物提取物等可再生原料，低毒性，适配生物医学领域。

精准合成技术通过结合微流控与原位表征技术实现合成过程实时监测与精准调控。微流控技术反应体积小、混合均匀、传质传热效率高，可实现连续化精准合成，提高产物均一性；原位表征技术实时监测成核生长与结构演变，为参数优化提供依据，实现性能精准调控。

多功能一体化合成技术在合成过程中同步实现掺杂、修饰、复合等功能化处理，制备多功能复合材料。如合成中引入金属纳米颗粒、半导体量子点制备复合光催化剂，兼具荧光与催化性能；表面修饰靶向分子制备荧光探针，用于精准生

物成像与疾病诊断。

（三）合成工艺与应用需求的精准匹配

不同应用场景对碳量子点性能、成本、毒性需求差异显著，工艺精准匹配是产业化关键。生物成像与医学治疗领域要求低毒性、高荧光量子产率、良好生物相容性与靶向性，优先选择生物合成法、室温固相合成法，结合表面靶向修饰；荧光传感领域要求高稳定性、高灵敏度与特定响应性能，可选水热法、微波辅助法，通过掺杂修饰调控光学响应；能源存储与催化领域注重导电性、比表面积与催化活性，可选低成本自上而下法或固相合成法；有机光电领域需要疏水性产物，应选择溶剂热法。

未来合成技术发展将更注重与应用需求深度融合，实现“按需合成”，根据应用场景精准调控尺寸、形貌、官能团、光学性能及毒性，兼顾效率与成本。这需要跨学科协同创新，融合材料科学、化学工程、生物工程等领域成果，推动合成技术不断突破升级。

综上所述，碳量子点合成技术已形成多元化体系，自上而下法与自下而上法各有优劣。自下而上法中的水热法、微波辅助法等因反应温和、性能易调控、易规模化，成为当前主流。随着工艺优化与新型技术发展，碳量子点质量与效率将进一步提升，成本降低，推动其工业化应用。未来核心发展方向是绿色化、精准化、规模化的多功能一体化制备，深度匹配应用需求，为荧光传感、生物成像、能源存储等领域提供核心材料支撑。

第二节 光学性能调控

碳量子点是尺寸小于 10 纳米的零维碳基纳米材料，兼具碳材料的化学稳定性、低毒性、生物相容性与量子点的量子尺寸效应、表面效应，展现出可调谐的光致发光、光吸收等优异光学性能，在发光显示、光电探测、生物成像等领域应用前景广阔。其光学性能与尺寸、形貌、表面状态、元素掺杂等参数密切相关，通过精准调控可实现发光波长、强度、量子产率及光稳定性的定向优化。本节系统梳理光学性能核心调控机制，重点阐述尺寸调控、表面修饰与元素掺杂、复合结构调控等主流策略，分析调控原理与技术路径，探讨关键科学问题，为高性能碳量子点的设计制备与应用提供理论支撑。

一、光学性能调控的核心机制

碳量子点光学性能的核心调控机制包括量子尺寸效应、表面态调控、元素掺杂电子结构重构及复合界面电荷转移，各机制协同作用决定其光学响应特性，是精准调控的基础。

（一）量子尺寸效应

量子尺寸效应是零维纳米材料的核心特性，也是碳量子点光学调控的基础。当尺寸减小至纳米尺度（ < 10 纳米），电子运动受空间限制，能级由连续态分裂为离散量子化能级，间距随尺寸减小而增大。根据量子力学理论，能级间距增大使电子跃迁能量提升，光吸收与发射波长蓝移；尺寸增大则能级间距减小，跃迁能量降低，波长红移。高结晶度石墨化碳核更易体现该效应，例如尺寸从 2 纳米增至 8 纳米时，光致发光峰从 420 纳米红移至 580 纳米，实现蓝黄可调。此外，尺寸还影响荧光量子产率，3-5 纳米的适中尺寸利于形成稳定跃迁通道，尺寸过小因表面缺陷增多导致荧光猝灭，过大则量子限域效应减弱，产率下降。

（二）表面态调控机制

碳量子点高比表面积使其表面存在大量羟基、羧基、氨基等活性位点，构成丰富表面态，可作为电子/空穴捕获中心，调控电子-空穴对复合过程与路径，进而影响发光性能。表面缺陷态会成为非辐射复合中心，降低荧光量子产率与光稳定性；通过表面修饰引入特定官能团可钝化缺陷，减少非辐射复合，显著提升产率。同时，不同官能团改变表面电子云分布，调控表面态与碳核本征能级差，实现波长调谐。例如氨基修饰使表面态能级降低，跃迁能量减小，波长红移；羟基修饰则使能级升高，波长蓝移。

（三）元素掺杂机制

元素掺杂通过引入氮、磷、硫、硼等异质元素重构碳量子点电子结构，改变能带结构与电子跃迁特性。异质原子可取代部分碳原子进入碳核晶格或吸附于表面，形成新掺杂能级，调控电子-空穴对的产生、迁移与复合。氮原子因原子半径与碳相近，是最常用掺杂元素，形成的吡啶氮、吡咯氮可在禁带引入杂质能级，降低跃迁能量使波长红移；石墨氮则提升导电性，促进电荷分离，提高荧光量子产率。磷掺杂可引入 3p 轨道电子，实现红光发射并提升光稳定性；硫掺杂增强光致发光强度与量子产率。

（四）复合界面电荷转移机制

构建复合结构通过界面电荷转移调控电子-空穴对分离与复合，拓展光学调控范围。碳量子点与半导体、聚合物等材料复合时，因能带结构差异形成内建电场，驱动电子或空穴定向转移，改变光吸收范围与发光强度。若复合材料导带能级低于碳量子点，激发态电子转移至复合材料导带，实现电荷有效分离，减少非辐射复合，提升荧光量子产率，同时拓宽光吸收范围。例如碳量子点与二氧化钛复合后，电子转移至二氧化钛导带，不仅提升量子产率，还赋予优异光催化性能；若复合材料价带能级更高，碳量子点空穴转移至复合材料价带，同样实现电荷分离与光学调控。

二、尺寸调控策略

尺寸调控是碳量子点光学性能最直接的调控策略，通过控制合成工艺与后处理技术，实现尺寸精准控制与均一化分布，进而定向优化发光波长与荧光量子产率。

（一）合成工艺优化调控

合成工艺参数优化是尺寸调控的核心手段，水热法、溶剂热法、微波辅助合成等方法中，反应温度、时间、前驱体浓度、溶剂类型均显著影响尺寸生长。水热法中，温度越高、反应时间越长，前驱体碳化聚合速率越快，碳量子点尺寸越大；前驱体浓度过高易导致团聚，尺寸分布不均；溶剂极性与沸点影响前驱体溶解与反应活性，间接调控尺寸。通过精准调控参数可实现尺寸连续可调，例如以柠檬酸为前驱体，160℃下水热反应 2-8 小时，平均尺寸从 2.3 纳米增至 6.8 纳米，光致发光峰从 430 纳米红移至 550 纳米，量子产率在 4 小时、4.1 纳米时达最大值 38%。此外，小分子前驱体易合成小尺寸碳量子点，大分子前驱体更易合成大尺寸产物。

（二）后处理分离纯化调控

直接合成的碳量子点尺寸分布较宽，影响光学性能均一性，需通过后处理分离纯化实现尺寸分级。常用技术包括凝胶渗透色谱法、离心分离法、透析法等。凝胶渗透色谱法基于不同尺寸碳量子点在色谱柱中洗脱速率差异实现精准分离，分离后尺寸分布系数可降至 0.1 以下，光学均一性显著提升；离心分离法利用沉降速度差异，通过调控转速实现分级，10000 转/分钟可分离大于 5 纳米的颗粒，

20000 转 / 分钟可分离小于 3 纳米的小尺寸颗粒；透析法通过透析袋分子截留量筛选尺寸，操作简单、成本低，适合大规模分离，但精度较低。

（三）尺寸调控的影响因素与优化方向

尺寸调控效果还受前驱体纯度、反应体系酸碱度、添加剂种类影响。前驱体杂质干扰成核生长，导致尺寸分布不均；碱性条件促进前驱体聚合，增大尺寸；添加表面活性剂可吸附于表面抑制团聚，实现精准控制。当前优化方向包括开发高精度合成工艺，实现尺寸可控与均一化生长，减少后处理步骤；发展高效分离纯化技术，提升分离精度获得单分散产物；结合密度泛函理论等理论计算预测光学性能，指导实验调控。

三、表面修饰与元素掺杂调控

表面修饰与元素掺杂是实现光学性能多元化调控的重要策略，表面修饰可钝化缺陷、引入功能性官能团，优化发光强度与稳定性；元素掺杂重构电子结构，实现波长宽范围调谐，两者协同调控可进一步拓展调控范围，提升效果。

（一）表面修饰调控技术与效果

表面修饰通过化学修饰、物理吸附实现，分为小分子、聚合物、生物分子修饰三类。小分子修饰剂（醇类、胺类、羧酸类）与表面官能团发生酯化、酰胺化反应，实现官能团替换；聚合物修饰剂（聚乙二醇、聚丙烯酸等）通过吸附或化学键合形成核壳结构；生物分子修饰剂（氨基酸、DNA 等）通过特异性作用修饰，赋予生物相容性的同时调控光学性能。修饰效果主要体现在三方面：一是提升量子产率，如乙二胺修饰后产率从 12% 提升至 45%；二是调谐发光波长，如正丁胺修饰发光峰位于 480 纳米，十二胺修饰红移至 520 纳米；三是增强光稳定性，如聚乙二醇修饰的碳量子点在空气中放置 30 天，发光强度仍保持 85%，未修饰样品仅 42%。

（二）元素掺杂调控技术与效果

元素掺杂分为原位掺杂与后掺杂，原位掺杂在合成过程中加入掺杂前驱体，使掺杂元素同步进入碳核或表面，方法简单、掺杂均匀，是主流方式；后掺杂在合成后通过化学处理引入掺杂元素，可精准控制但操作复杂。常用掺杂元素包括氮、磷、硫、硼及铁、铜等金属元素，非金属元素主要调控发光性能，金属元素赋予磁学、催化特性的同时调控光学性能。氮掺杂通过调控氮源与掺杂量实现波

长调谐与产率提升,如柠檬酸为碳源、尿素为氮源水热合成,氮掺杂量从 5.2% 增至 18.6% 时,发光峰从 440 纳米红移至 560 纳米,产率从 25% 提升至 58%。磷掺杂实现红光发射,发光峰位于 620 纳米,产率 22%;铜离子掺杂使发光峰从 450 纳米红移至 530 纳米,兼具磁响应特性。

(三) 表面修饰与元素掺杂协同调控

协同调控通过元素掺杂调谐波长,表面修饰钝化缺陷、提升产率与稳定性,实现光学性能精准优化与多功能集成。例如氮掺杂与聚乙二醇修饰协同调控的碳量子点,氮掺杂实现蓝绿光调谐,聚乙二醇修饰使产率从 30% 提升至 65%,增强水溶性与生物相容性,可直接用于细胞成像。协同调控的关键是合理选择掺杂元素与修饰剂,确保协同效应,如氮掺杂碳量子点表面含氨基与羟基,选择含羧基的聚丙烯酸修饰,通过酰胺化反应形成稳定化学键;同时调控掺杂量与修饰剂用量比例,避免过量导致团聚降低性能。

四、复合结构调控与性能优化

构建复合结构可利用界面电荷转移、能量传递等作用,拓宽碳量子点光吸收范围,增强发光强度与稳定性,实现多功能集成,赋予光电转换、光催化等新功能,拓展在光电器件、能源等领域的应用。

(一) 复合结构的构建方法

复合结构构建分为原位复合与非原位复合,原位复合在碳量子点合成过程中加入复合材料前驱体,同步生长形成复合结构,具有复合均匀、界面结合牢固的优势;非原位复合先分别制备碳量子点与复合材料,再通过物理混合、化学键合、静电吸附实现复合,操作简单、灵活性高。常用构建技术包括水热/溶剂热原位复合、溶液混合自组装、化学键合修饰等。水热原位复合通过高温高压促进协同生长,如碳量子点合成中加入钛酸四丁酯,原位形成碳量子点/二氧化钛复合材料;溶液混合自组装基于静电、氢键作用自组装,如带负电碳量子点与带正电聚电解质形成层状结构;化学键合修饰通过互补官能团反应提升稳定性,如碳量子点羧基与氧化锌羟基发生酯化反应形成稳定复合结构。

(二) 典型复合体系的调控机制与性能优化

1. 碳量子点/金属纳米材料复合体系 核心调控机制为表面等离子体共振与界面电荷转移效应。金属纳米材料的表面等离子体共振增强局部电磁场,提升

光吸收效率与发光强度；界面电荷转移调控电子-空穴对分离复合，优化发光性能。例如碳量子点/金纳米粒子复合体系，光吸收强度提升3倍，荧光量子产率从28%增至52%，光稳定性显著增强，同时赋予表面增强拉曼散射等新功能。

2. 碳量子点/半导体材料复合体系 核心机制为界面电荷转移与能带匹配效应。选择能带匹配的半导体材料，实现高效电荷分离，减少非辐射复合，提升量子产率；半导体光吸收特性与碳量子点互补，拓宽光吸收范围。如碳量子点/二氧化钛复合体系，电子转移至二氧化钛导带，量子产率从15%提升至48%，兼具优异光催化降解性能。

3. 碳量子点/聚合物复合体系 核心机制为包覆钝化与能量传递效应。聚合物包覆钝化表面缺陷，减少环境侵蚀，提升光稳定性与水溶性；聚合物与碳量子点发生能量传递，实现波长调谐与强度增强。如碳量子点/聚苯胺复合体系，空气中放置60天发光强度保持90%，发光峰从450纳米红移至510纳米，产率提升至60%，聚合物的柔韧性提升成型性能，便于制备柔性光学器件。

4. 碳量子点/二维材料复合体系 核心机制为高比表面积吸附与界面电荷转移效应。二维材料超大比表面积实现碳量子点均匀分散，避免团聚；优异电子传输性能促进高效电荷转移，提升量子产率与光电转换效率。如碳量子点/氧化石墨烯复合体系，荧光量子产率从22%提升至55%，对可见光响应度达0.8 A/W，展现良好光电探测性能。

（三）复合结构调控的挑战与未来展望

当前复合结构调控面临界面结合强度不足、碳量子点易团聚、电荷转移机制不明确、规模化制备不成熟等挑战。未来发展方向包括开发高效界面修饰技术，提升界面稳定性；优化工艺参数实现均匀分散；结合理论计算与先进表征，揭示电荷转移机制，指导精准设计；开发低成本规模化制备技术，推动产业化。此外，多功能复合体系设计是重要趋势，通过多材料复合实现光学、磁学、催化等性能集成，拓展在智能光学器件、精准医疗等领域应用，如碳量子点/金属/半导体三元复合体系，可同时实现荧光成像、光热治疗与光催化杀菌，为癌症精准治疗提供新方案。

综上所述，碳量子点光学性能调控是高性能应用的关键，通过尺寸调控、表面修饰与元素掺杂、复合结构调控等策略协同作用，可实现发光波长、强度、量子产率及光稳定性的定向优化。深入理解调控机制，开发精准高效的调控技术，

是未来研究核心方向。尽管面临尺寸均一性控制、界面调控、规模化制备等挑战，但随着材料科学、纳米技术与理论计算的进步，调控技术将不断突破，为其在发光显示、光电探测、生物成像等领域的广泛应用奠定坚实基础。

第三节 碳量子点光电转换器件

碳量子点作为一类尺寸小于 10 nm 的零维碳基纳米材料，兼具碳材料的化学稳定性、生物相容性与量子点的量子限域效应、边缘效应，展现出优异的光学特性，如宽激发光谱、窄发射光谱、高荧光量子产率、光致电子转移能力及良好的光稳定性。这些独特特性使碳量子点成为构建新型光电转换器件的理想功能材料。碳量子点光电转换器件通过调控碳量子点的光吸收、光生载流子的产生、分离与传输过程，实现光子能量向电能的高效转换，在太阳能光伏、光电探测、光电催化等领域具有广阔的应用前景。相较于传统半导体量子点（如 CdS、PbS 等）光电转换器件，碳量子点光电转换器件具有毒性低、环境友好、制备成本低廉、稳定性优异等显著优势，契合绿色能源与可持续发展的战略需求。本节系统梳理碳量子点光电转换器件的核心类型、工作机制、结构设计、制备工艺及性能优化策略，重点探讨器件集成过程中的关键科学问题与技术突破路径，为碳量子点光电转换器件的定向设计与产业化推进提供理论与技术支撑。

一、碳量子点光伏器件：绿色高效的太阳能转换技术

碳量子点光伏器件是基于碳量子点的光电转换特性实现太阳能向电能转换的核心器件，是太阳能利用领域的重要研究方向。碳量子点在光伏器件中的核心作用包括光吸收层、电子/空穴传输层及敏化剂等，其宽光谱吸收特性（覆盖紫外至近红外波段）可有效利用太阳能光谱，提升器件的光捕获效率；优异的电子转移能力可促进光生载流子的分离与传输，降低载流子复合损失。根据器件结构与工作机制的差异，碳量子点光伏器件主要分为碳量子点敏化太阳能电池、碳量子点有机-无机杂化光伏器件、全碳基光伏器件等类型，不同类型器件在结构设计、制备工艺与性能表现上各具特色。

（一）碳量子点敏化太阳能电池

碳量子点敏化太阳能电池是将碳量子点作为敏化剂负载于宽禁带半导体基底

(如 TiO_2 、 ZnO 、 SnO_2 等) 表面, 通过碳量子点吸收光子产生光生电子 - 空穴对, 电子注入半导体导带并传输至外电路, 空穴则通过电解质或空穴传输材料转移, 实现光电转换。该类型器件的核心优势在于制备工艺简单、成本低廉、光谱响应范围宽, 可通过调控碳量子点的尺寸、表面官能团及元素掺杂实现光谱响应的精准调控。

碳量子点敏化 TiO_2 太阳能电池是研究最广泛的类型之一, 其核心结构包括透明导电电极、 TiO_2 纳米晶薄膜、碳量子点敏化层、电解质及对电极。碳量子点通过物理吸附或化学键合方式负载于 TiO_2 纳米晶表面, 当太阳光照射时, 碳量子点吸收光子被激发, 产生的光生电子通过界面电荷转移注入 TiO_2 导带, 随后传输至透明导电电极; 碳量子点表面的空穴则与电解质中的还原态物质发生氧化还原反应, 完成电荷循环。该类型器件的光电转换效率受碳量子点的荧光量子产率、界面电荷转移效率、电解质与电极的匹配性等因素影响。目前, 通过优化碳量子点的制备工艺(如溶剂热法、微波辅助法)提升量子产率, 调控表面官能团(如羟基、羧基、氨基)增强与 TiO_2 的界面结合, 引入元素掺杂(如 N、P、S 掺杂)拓展光谱响应范围, 器件的光电转换效率已提升至 5% 以上。

碳量子点敏化 ZnO 太阳能电池则利用 ZnO 的高电子迁移率特性, 提升载流子传输效率。 ZnO 纳米线阵列是常用的基底结构, 其一维纳米结构可提供直接的电子传输通道, 减少载流子复合。将碳量子点负载于 ZnO 纳米线阵列表面构建的敏化太阳能电池, 电子传输效率显著提升, 器件的短路电流密度可达 $10\text{mA}/\text{cm}^2$ 以上。此外, 通过构建碳量子点/ ZnO 核壳结构, 可进一步增强光吸收效率与界面电荷转移能力, 提升器件性能。

(二) 碳量子点有机 - 无机杂化光伏器件

碳量子点有机 - 无机杂化光伏器件通过碳量子点与有机半导体材料(如聚噻吩、富勒烯衍生物、茈萘亚胺等)复合构建光吸收层或载流子传输层, 利用有机材料的高载流子迁移率与碳量子点的宽光谱吸收特性, 实现协同增强的光电转换效果。该类型器件兼具无机材料的稳定性与有机材料的柔性、低成本优势, 适用于柔性光伏组件的制备。

碳量子点 / 聚合物杂化光伏器件是研究的重点方向之一, 其核心结构与有机光伏器件类似, 包括透明导电电极、空穴传输层、碳量子点 / 聚合物杂化光吸收层、电子传输层及金属对电极。碳量子点均匀分散于聚合物基质中, 形成互穿网络结

构,有利于光吸收与载流子分离。例如,碳量子点与聚(3-己基噻吩)(P3HT)、[6,6]-苯基-C61-丁酸甲酯(PCBM)复合构建的杂化光伏器件,碳量子点的引入不仅拓展了器件的光谱响应范围,还通过电荷转移作用促进了P3HT与PCBM之间的光生载流子分离,器件的光电转换效率较纯有机光伏器件提升30%以上。通过调控碳量子点的负载量、分散均匀性及与聚合物的界面相容性,可进一步优化器件的光吸收效率与载流子传输效率。

碳量子点/钙钛矿杂化光伏器件则利用钙钛矿材料的高光吸收系数与碳量子点的量子限域效应,提升器件的光电转换效率与稳定性。钙钛矿材料(如 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)的带隙可通过组分调控实现1.5-2.3 eV的可调,适配太阳能光谱的有效利用,但钙钛矿材料的长期稳定性较差,限制了其产业化应用。将碳量子点引入钙钛矿光吸收层或作为界面修饰层,可显著提升器件的稳定性。例如,碳量子点修饰的钙钛矿光伏器件,在空气环境下放置1000小时后,光电转换效率仍保持初始值的80%以上,而未修饰器件的效率仅剩余50%以下。此外,碳量子点的引入还可抑制钙钛矿薄膜的晶粒生长缺陷,提升载流子分离效率,器件的光电转换效率可达20%以上。

二、碳量子点光电探测器件：高灵敏宽光谱的光信号转换技术

碳量子点光电探测器件是基于碳量子点的光致电子转移或光电导效应实现光信号向电信号转换的器件,其核心优势在于宽光谱响应范围、高探测灵敏度、快速响应速度、低功耗及良好的生物相容性,可应用于环境监测、生物医学成像、光通信、安防监控等领域。根据工作机制与结构设计的差异,碳量子点光电探测器件主要分为光电导型、光伏型、光电化学型等类型,不同类型器件在响应速度、探测率、工作环境等方面各具适配性。

(一) 光电导型碳量子点光电探测器

光电导型碳量子点光电探测器基于碳量子点的光电导效应工作,即光子照射碳量子点时,价带电子吸收光子能量跃迁至导带,形成光生电子-空穴对,载流子浓度增加导致器件电导提升,通过测量电导变化实现光信号探测。该类型器件结构简单,通常采用“电极-碳量子点薄膜-基底”的横向或纵向结构,电极材料包括金、银、氧化铟锡(ITO)等,基底包括硅、玻璃、柔性聚合物等。

光电导型器件的关键性能参数包括响应度、探测率、响应速度及光谱响应范

围。碳量子点的量子限域效应使其光谱响应范围可通过尺寸调控实现紫外至近红外波段的覆盖,例如,尺寸 2-3 nm 的碳量子点主要响应紫外 - 可见光波段,尺寸 5-8 nm 的碳量子点则可响应近红外波段。通过元素掺杂(如 N、S、Se 掺杂)可进一步拓展光谱响应范围,提升光吸收效率。目前,光电导型碳量子点光电探测器的响应度可达 10^2 A/W 以上,探测率超过 10^{12} Jones,响应速度可达微秒量级,适用于高灵敏度光探测场景。

柔性光电导型碳量子点光电探测器是研究的热点方向之一,其以柔性聚合物(如聚二甲基硅氧烷、聚对苯二甲酸乙二醇酯)为基底,具有良好的机械柔韧性与可穿戴性,适用于柔性电子系统。例如,碳量子点 / 聚氯乙烯复合柔性光电探测器,在弯曲角度达到 180° 时,器件性能仍保持稳定,响应度仅下降 10% 以内。通过优化碳量子点薄膜的成膜质量、提升与柔性基底的界面结合强度,可进一步增强器件的机械稳定性与长期可靠性。

(二) 光伏型碳量子点光电探测器

光伏型碳量子点光电探测器基于光伏效应工作,通过构建碳量子点与其他半导体材料的异质结结构,形成内建电场,光生电子 - 空穴对在电场作用下分离并形成光生伏特,无需外部偏压即可实现光信号探测,具有低功耗、高信噪比等优势。常见的异质结结构包括碳量子点 / 硅异质结、碳量子点 / 金属氧化物异质结、碳量子点 / 二维材料异质结等。

碳量子点 / 硅异质结光电探测器利用碳量子点与硅之间的功函数差异形成肖特基势垒,构建内建电场。当光子照射时,碳量子点与硅分别吸收不同波段的光子产生光生电子 - 空穴对,电子在肖特基势垒的电场作用下转移至硅或碳量子点,形成光电流。该类型器件兼具碳量子点的宽光谱响应与硅基器件的成熟制备工艺,可实现紫外至近红外波段的全光谱探测,响应度可达 10^3 A/W 以上,探测率超过 10^{13} Jones,响应速度可达纳秒量级,已接近商用硅基探测器水平。通过优化碳量子点的覆盖度、调控界面态密度、引入界面钝化层等策略,可进一步提升器件的稳定性与性能一致性。

碳量子点 / 二维材料异质结光电探测器则利用两种低维材料的范德华相互作用构建异质结,具有界面缺陷少、结构可调性强等优势。例如,碳量子点 / MoS_2 异质结光电探测器可通过调控碳量子点的尺寸与 MoS_2 的层数实现光谱响应范围的精准调控,单层 MoS_2 的带隙约为 1.8 eV,对应可见光波段响应,而碳量子点

的引入可拓展至紫外波段响应，实现宽光谱探测。该类型器件的响应速度可达皮秒量级，探测率超过 10^{14} Jones，适用于高速、高灵敏度光探测场景。

三、碳量子点光电催化器件：光能驱动的绿色催化技术

碳量子点光电催化器件是基于碳量子点的光致电子转移能力，将光能转化为化学能，驱动氧化还原反应的器件，主要应用于光解水制氢、二氧化碳还原、污染物降解等领域，是解决能源危机与环境问题的重要技术路径。碳量子点在光电催化器件中的核心作用是作为光吸收剂与电子转移媒介，其宽光谱吸收特性可高效捕获光能，优异的电子转移能力可促进光生载流子的分离与传输，提升催化反应效率。根据催化反应类型的差异，碳量子点光电催化器件主要分为碳量子点光解水制氢器件、碳量子点二氧化碳还原器件、碳量子点光催化降解器件等类型。

（一）碳量子点光解水制氢器件

碳量子点光解水制氢器件通过碳量子点吸收光能产生光生电子-空穴对，电子转移至催化活性位点（如 Pt、Ni、Co 等），将水分子还原为氢气；空穴则氧化水分子为氧气，实现光解水制氢过程。该类型器件的核心优势在于碳量子点的光稳定性优异、电子转移效率高，可显著提升制氢反应的效率与稳定性。

碳量子点/半导体复合光解水制氢器件是研究的主流方向之一，半导体材料（如 TiO_2 、 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 、 ZnS 等）作为载流子传输载体，与碳量子点形成异质结结构，促进光生载流子的分离。例如，碳量子点/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 复合光解水制氢器件， $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 具有合适的能带结构，可吸收可见光产生光生电子-空穴对，碳量子点的引入不仅拓展了光谱响应范围，还通过电子转移作用抑制了 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 中载流子的复合，器件的产氢速率可达 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上，量子效率超过 15%。通过调控碳量子点的负载量、与半导体的界面结合强度及催化活性位点的分散性，可进一步提升制氢效率。

无金属碳量子点光解水制氢器件则避免了贵金属催化剂的使用，降低了器件成本，契合绿色可持续发展需求。通过对碳量子点进行元素掺杂（如 N、P、S 掺杂）或表面功能化修饰，可赋予其催化活性。例如，N、P 共掺杂碳量子点光解水制氢器件，其产氢速率可达 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上，且具有良好的循环稳定性，经过 10 次循环反应后，产氢效率仍保持初始值的 90% 以上。

（二）碳量子点二氧化碳还原器件

碳量子点二氧化碳还原器件通过碳量子点吸收光能产生光生电子，将二氧化碳还原为一氧化碳、甲烷、甲醇等碳氢化合物燃料，实现二氧化碳的资源化利用。该类型器件的核心挑战在于提升二氧化碳还原反应的选择性与效率，碳量子点的尺寸、表面官能团及元素掺杂可显著影响反应选择性。

碳量子点 / 金属氧化物复合二氧化碳还原器件利用金属氧化物（如 TiO_2 、 ZrO_2 、 Al_2O_3 等）的高比表面积与良好的稳定性，作为碳量子点的负载载体与电子传输通道。例如，碳量子点 / TiO_2 复合器件在可见光照射下，可将二氧化碳高效还原为一氧化碳，选择性超过 80%，产率可达 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。碳量子点表面的羟基、羧基等官能团可增强对二氧化碳分子的吸附能力，提升反应效率；元素掺杂（如 N 掺杂）可调控碳量子点的电子结构，增强光生电子的还原能力，进一步提升二氧化碳还原效率与选择性。

碳量子点 / 金属有机框架（MOFs）复合二氧化碳还原器件则利用 MOFs 材料的高比表面积、可调孔道结构及对二氧化碳的高吸附容量，提升器件的二氧化碳捕获与还原效率。MOFs 材料可作为碳量子点的负载载体，形成协同作用，促进光生载流子的分离与传输。例如，碳量子点 / UiO-66 复合器件的二氧化碳还原产率较纯碳量子点器件提升 2 倍以上，且对甲烷的选择性超过 70%，展现出良好的应用潜力。

四、碳量子点光电转换器件的性能优化策略与发展趋势

尽管碳量子点光电转换器件具有诸多优势，但目前其性能仍受限于碳量子点的光吸收效率、光生载流子分离与传输效率、器件界面相容性及长期稳定性等问题，制约了其产业化应用。针对这些关键问题，研究者提出了一系列性能优化策略，包括碳量子点的结构调控与表面修饰、器件结构设计创新、复合体系构建及制备工艺优化等。同时，随着材料科学与器件工程的发展，碳量子点光电转换器件正朝着高性能化、多功能集成化、柔性化与低成本化方向发展。

（一）核心性能优化策略

碳量子点的结构调控与表面修饰是提升器件性能的基础策略。通过调控碳量子点的尺寸、形貌、晶体结构及元素掺杂，可优化其光学特性与电子传输能力。例如，通过溶剂热法调控反应温度与时间，可制备出尺寸均一、结晶度高的碳量

子点，其荧光量子产率可提升至 60% 以上；N、P、S 等元素的共掺杂可显著拓展碳量子点的光谱响应范围，增强光吸收效率与电子转移能力。表面修饰则通过引入功能性官能团（如氨基、巯基、膦基等）或有机分子，提升碳量子点与其他材料的界面相容性，抑制载流子复合。例如，通过硅烷偶联剂修饰的碳量子点与半导体材料的界面结合强度显著提升，界面电荷转移效率提升 40% 以上。

器件结构设计创新是提升光电转换效率的关键路径。通过构建异质结、核壳结构、三维多孔结构等新型器件结构，可促进光生载流子的分离与传输，提升光吸收效率。例如，碳量子点 / 半导体核壳结构可有效抑制光生电子与空穴的复合，延长载流子寿命；三维多孔结构则可增大比表面积，提升光吸收效率与催化活性位点数量。此外，引入等离子体增强结构（如金属纳米颗粒、纳米天线）可增强局部光场强度，提升碳量子点的光吸收效率，进一步优化器件性能。

复合体系构建是实现协同增强的有效手段。将碳量子点与其他功能材料（如半导体、金属、聚合物、二维材料等）复合，可整合不同材料的优势，实现光吸收、载流子分离与传输的协同优化。例如，碳量子点与二维材料复合可利用二维材料的高载流子迁移率，提升载流子传输效率；与聚合物复合可实现器件的柔性化与低成本制备。通过调控复合比例、界面相互作用及分散均匀性，可最大化复合体系的协同增强效果。

（二）发展趋势与应用展望

高性能化是碳量子点光电转换器件的核心发展方向。未来需进一步提升器件的光电转换效率、探测灵敏度与长期稳定性，推动其达到商用器件水平。例如，碳量子点光伏器件的光电转换效率需突破 25%，才能与传统硅基光伏器件竞争；光电探测器件的探测率需提升至 10^{15} Jones 以上，以满足深空探测、生物医学成像等高端领域的需求。通过材料质量提升、结构设计创新与工艺优化，这些性能目标有望逐步实现。

多功能集成化是拓展器件应用场景的重要趋势。将碳量子点光电转换器件与传感、储能、催化等功能集成，构建一体化多功能器件，可提升器件的综合应用价值。例如，碳量子点光伏 - 储能一体化器件可实现太阳能的捕获、转换与存储，适用于分布式能源系统；碳量子点光电探测 - 催化降解一体化器件可实现环境污染物的检测与同步降解，适用于环境监测与治理领域。

柔性化与低成本化是推动器件产业化的关键支撑。柔性碳量子点光电转换器

件可适配可穿戴电子、柔性显示、便携式能源等新兴应用场景，其制备需采用柔性基底与低成本制备工艺（如溶液旋涂、喷墨打印、卷对卷制备等）。目前，基于溶液法制备的柔性碳量子点光伏器件的光电转换效率已超过 10%，具备规模化生产潜力。未来需进一步优化柔性器件的机械稳定性与长期可靠性，降低制备成本，推动其产业化进程。

第四节 碳量子点生物成像应用

生物成像技术作为可视化研究生物体内生理病理过程的核心手段，在疾病早期诊断、药物研发、细胞生物学研究等领域发挥着不可替代的作用。传统生物成像探针如有机荧光染料、量子点（CdS、CdSe 等）存在光稳定性差、生物毒性高、荧光发射波长可调范围窄等缺陷，限制了其在活体长期成像与临床诊断中的应用。碳量子点（Carbon Quantum Dots, CQDs）作为一种新型零维碳基纳米材料，具有优异的光学性能、良好的生物相容性、低毒性、水溶性好及易于功能化修饰等独特优势，成为生物成像领域极具潜力的新型荧光探针。碳量子点生物成像基于其荧光发射特性，通过精准的表面功能化修饰实现对细胞、组织及活体生物体内目标分子或靶点的特异性识别与荧光标记，借助荧光成像设备捕捉荧光信号，实现生物体内生理病理过程的可视化追踪。本节系统阐述碳量子点生物成像探针的构建原理、核心修饰策略、主要成像类型及应用展望，深入剖析其性能调控机制与发展瓶颈，为碳量子点在生物成像领域的优化设计与临床转化应用提供理论与技术支撑。

一、碳量子点生物成像探针的构建原理与核心特性

碳量子点生物成像探针的功能实现依赖于其光学特性与生物靶向性的协同作用，核心是通过合理的结构设计与修饰，兼顾荧光发射效率与生物识别能力。明确其构建原理与核心特性，是实现高效生物成像的基础。本节从构建核心原理、关键特性及性能评价指标三个维度，系统解析碳量子点生物成像探针的基础理论体系。

（一）核心构建原理

碳量子点生物成像探针的构建遵循“荧光发射 - 靶向识别 - 信号成像”的核

心逻辑, 主要包含荧光产生机制与靶向识别机制两个关键环节。荧光产生机制方面, 碳量子点的荧光发射源于其量子尺寸效应与表面态效应的协同作用。量子尺寸效应是指碳量子点尺寸微小(通常小于 10 nm), 电子与空穴被限制在有限空间内, 能级发生量子化分裂, 电子从激发态跃迁至基态时释放光子, 产生荧光; 表面态效应是指碳量子点表面富含羟基、羧基、氨基等官能团, 形成大量表面缺陷态, 这些缺陷态可作为电子或空穴的捕获中心, 调控电子跃迁过程, 进而影响荧光发射波长与强度。通过调控碳量子点的尺寸、表面官能团及掺杂元素, 可实现荧光发射波长从紫外到近红外区域的精准调控, 满足不同生物成像场景的需求。

靶向识别机制是实现特异性生物成像的核心, 通过对碳量子点表面进行功能化修饰, 引入靶向分子(如抗体、核酸适配体、多肽、糖类等), 借助靶向分子与生物体内目标靶点(如肿瘤标志物、细胞表面受体、核酸序列等)的特异性相互作用, 实现碳量子点在目标区域的精准富集。例如, 将识别肿瘤细胞表面特异性受体的抗体修饰于碳量子点表面, 抗体与肿瘤细胞受体发生特异性结合, 使碳量子点在肿瘤组织内富集, 通过荧光成像可清晰区分肿瘤组织与正常组织; 将核酸适配体修饰于碳量子点表面, 可实现对特定核酸序列的特异性识别与成像。此外, 碳量子点的良好水溶性与生物相容性保障了其在生物体内的稳定分散与代谢, 避免了对生物体正常生理过程的干扰, 为长期生物成像提供了可能。

(二) 关键核心特性

相较于传统生物成像探针, 碳量子点生物成像探针具备一系列独特的核心特性, 使其在生物成像领域具有显著优势。一是优异的光学性能, 碳量子点具有宽激发、窄发射的荧光特性, 激发波长范围宽, 可选用不同波长的激发光激发, 且发射峰对称、半峰宽窄, 荧光纯度高; 同时具有良好的光稳定性, 在长时间激发下不易发生荧光淬灭, 可实现长期动态生物成像, 而传统有机荧光染料在长时间激发下易发生光漂白, 无法满足长期成像需求。二是良好的生物相容性与低毒性, 碳量子点以碳元素为主要成分, 表面富含亲水官能团, 水溶性好, 且经适当修饰后可降低其细胞毒性, 甚至实现生物降解, 与传统重金属量子点(如 Cd 基量子点)相比, 对生物体的毒性显著降低, 适用于细胞、组织及活体成像。

三是易于功能化修饰, 碳量子点表面天然富含羟基、羧基、氨基等活性官能团, 可通过共价键、非共价键等方式便捷地引入靶向分子、荧光共振能量转移(FRET)配对分子等, 实现靶向识别、多模态成像及生物传感等功能拓展。四是荧光发射

波长可调,通过调控碳量子点的制备工艺(如碳源选择、反应温度、反应时间)、尺寸大小及掺杂元素(如N、S、P等),可实现荧光发射波长从紫外区(200-400 nm)、可见光区(400-760 nm)到近红外区(760-1700 nm)的连续可调。其中,近红外荧光成像具有组织穿透深度深、背景荧光干扰小等优势,是活体生物成像的理想选择。五是尺寸微小,碳量子点尺寸通常在1-10 nm之间,可轻易穿透细胞膜进入细胞内部,甚至穿透血脑屏障等生物屏障,实现细胞内及深层组织的成像,而传统纳米探针尺寸较大,难以穿透生物屏障,限制了其在深层组织成像中的应用。

(三)性能评价指标

碳量子点生物成像探针的性能评价需基于一系列关键指标,这些指标直接反映探针的成像质量与实用价值,也是探针设计优化的核心依据。主要包括荧光量子产率、光稳定性、靶向性、生物相容性、细胞毒性、荧光发射波长及组织穿透深度等。荧光量子产率是指碳量子点发射的荧光光子数与吸收的激发光子数之比,是衡量荧光发射效率的核心指标,量子产率越高,成像信号越强,检测灵敏度越高,通常要求生物成像探针的荧光量子产率不低于30%,近红外碳量子点的量子产率不低于10%。

光稳定性通过长时间激发下荧光强度的变化率评估,通常要求在连续激发1小时后,荧光强度保留率不低于80%,以满足长期动态成像需求。靶向性通过靶向探针在目标组织/细胞与非目标组织/细胞中的荧光强度比值(靶向富集率)评估,优良探针的靶向富集率应大于5,确保特异性成像效果。生物相容性与细胞毒性通过细胞存活率、溶血率、体内器官毒性等实验评估,细胞毒性实验中,探针浓度为100 $\mu\text{g/mL}$ 时,细胞存活率应不低于80%;溶血率应低于5%,符合生物医用材料的安全性要求。荧光发射波长需根据成像场景选择,细胞成像可选用可见光区发射的碳量子点,活体深层组织成像则需选用近红外区发射的碳量子点,组织穿透深度应不低于1 cm,以满足深层组织成像需求。此外,还需评价探针在生物体内的代谢速率与排泄途径,理想的生物成像探针应能在成像完成后快速被生物体代谢排出,减少体内蓄积,降低长期毒性风险。这些评价指标相互关联,在探针设计过程中需综合考量,实现整体性能的优化。

二、碳量子点生物成像探针的核心修饰策略

碳量子点表面功能化修饰是提升其靶向性、光学性能及生物相容性的关键手段，也是实现特定生物成像功能的核心技术。修饰策略的选择需结合碳量子点的表面化学性质、靶向分子的结构特性及成像需求，实现修饰分子与碳量子点的稳定结合，同时保留两者的原有功能。本节重点阐述碳量子点生物成像探针的主要修饰方法、靶向分子选择及功能拓展修饰策略，分析各策略的优缺点及应用场景。

（一）主要修饰方法

根据修饰分子与碳量子点表面的结合方式，碳量子点的功能化修饰方法可分为共价修饰法与非共价修饰法两大类。共价修饰法是通过碳量子点表面的活性官能团（如羧基、羟基、氨基）与修饰分子发生共价化学反应，实现修饰分子的稳定结合，常用的共价反应包括酰胺化反应、酯化反应、点击化学反应、硅烷化反应等。例如，碳量子点表面的羧基可与靶向分子（如抗体、多肽）的氨基在缩合剂（如 1-(3-二甲氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺盐酸盐，EDC）与 N-羟基琥珀酰亚胺（NHS）的作用下发生酰胺化反应，形成稳定的酰胺键，实现靶向分子的共价固定。

该方法的优势是结合牢固，修饰分子不易脱落，探针稳定性高，适用于长期生物成像与复杂生物环境中的成像应用，但反应过程需严格控制反应条件（如 pH 值、温度、反应时间），避免靶向分子因化学反应导致活性降低。非共价修饰法借助范德华力、 $\pi-\pi$ 堆积作用、静电相互作用、氢键等非共价作用力实现修饰分子与碳量子点的结合，常用的修饰分子包括表面活性剂、聚合物、核酸、芳香族化合物等。例如，带正电的聚赖氨酸可通过静电相互作用吸附于带负电的碳量子点表面，提高碳量子点的水溶性与生物相容性；单链 DNA 可通过 $\pi-\pi$ 堆积作用吸附于碳量子点表面，同时保持其与互补链的特异性结合活性。

非共价修饰法的优势是反应条件温和，操作简便，可最大程度保留靶向分子的生物活性，且不会破坏碳量子点的光学性能，适用于对活性敏感的靶向分子（如酶、抗体）的修饰，但结合强度相对较弱，在高离子强度的生物体液环境中可能发生修饰分子脱落，影响探针的靶向性与稳定性。实际应用中，可根据修饰分子的类型、成像需求及生物环境，选择合适的修饰方法，必要时可采用共价与非共价结合的复合修饰策略，兼顾探针的稳定性与生物活性。

（二）靶向分子选择与修饰

靶向分子的选择直接决定碳量子点生物成像探针的靶向性，需根据成像目标（如细胞、组织、生物分子）的特性，选择具有高特异性识别能力的分子。常用的靶向分子主要包括抗体、核酸适配体、多肽、糖类及小分子靶向药物等。抗体具有极高的特异性识别能力，可精准识别细胞表面的抗原或生物体内的蛋白质分子，是构建靶向生物成像探针的常用分子。例如，抗表皮生长因子受体（EGFR）抗体修饰的碳量子点，可特异性识别高表达 EGFR 的肿瘤细胞，实现肿瘤细胞的精准成像。但抗体分子量大、制备成本高、易发生免疫原性反应，限制了其在活体长期成像中的应用。

第五章 多孔碳材料与器件

第一节 多孔碳制备技术

多孔碳材料是一类具有发达孔隙结构、高比表面积、优良化学稳定性及导电性的碳基功能材料，其孔隙体系涵盖微孔（ $< 2\text{ nm}$ ）、介孔（ $2\text{-}50\text{ nm}$ ）与大孔（ $> 50\text{ nm}$ ），可通过调控孔隙结构、比表面积及表面官能团实现性能定制。凭借独特的结构优势，多孔碳材料在超级电容器、锂离子电池、催化转化、气体吸附分离及生物医学等领域展现出不可替代的应用价值，成为碳基材料领域的研究热点之一。制备工艺是决定多孔碳材料孔隙结构、比表面积及表面性质的核心环节，直接影响其应用性能。因此，开发高效、可控、低成本且规模化的多孔碳制备技术，实现对孔隙结构的精准调控，是推动其从实验室研究走向工业化应用的关键支撑。本节系统梳理多孔碳制备技术的发展历程、核心原理与技术特点，重点探讨各类制备方法的调控机制、优化策略及适用场景，为后续多孔碳器件的构建与性能优化奠定理论与技术基础。

一、多孔碳制备技术的分类与发展概述

历经数十年发展，多孔碳制备技术已形成多元化体系，按制备原理与工艺差异可分为活化法、模板法、聚合物碳化法、生物质衍生法及其他新型制备方法五大类。不同方法通过调控碳源选择、反应条件及后处理工艺，实现对多孔碳孔隙结构、比表面积及表面官能团的调控。早期多孔碳制备以活化法为主，凭借工艺简单、成本低廉的优势，成为工业化生产的主流技术，但存在孔隙结构调控精度低、比表面积提升受限等问题。

为突破传统方法的局限，研究者开发了模板法制备技术，通过引入刚性模板调控孔隙形成过程，实现对孔隙尺寸、形貌及分布的精准控制，显著提升了多孔碳材料的结构可控性与应用性能。随着可持续发展理念的深入，以生物质为原料的生物质衍生法因原料可再生、环境友好等优势，逐渐成为多孔碳制备的重要发

展方向。同时，聚合物碳化法通过选择特定结构的聚合物前驱体，可实现对多孔碳骨架结构与孔隙性能的定向设计。当前，多孔碳制备技术呈现“精准调控”“绿色可持续”与“规模化兼容”并重的发展趋势，既要实现对孔隙结构的精准定制以适配特定应用需求，又要兼顾制备过程的环境友好性与工业化可行性。

不同制备技术在结构可控性、制备效率、成本及产业化潜力上存在显著差异，决定了其应用适配性。深入理解各类制备技术的核心原理与技术特点，掌握孔隙结构的调控规律，是实现多孔碳材料精准选型与应用拓展的前提。

（一）传统制备技术的技术特征与适用场景

传统多孔碳制备技术以活化法为代表，包括物理活化法与化学活化法，其核心优势在于工艺简单、原料来源广泛（如煤炭、石油焦、木炭等）、制备成本低廉，可实现规模化生产。物理活化法通过高温下气体氧化作用形成孔隙，产物纯度高、化学稳定性好，适用于制备高比表面积的微孔碳材料，在气体吸附分离领域具有一定应用优势。化学活化法则通过化学试剂的刻蚀与催化作用构建孔隙，活化效率高、反应温度低，可制备兼具微孔与介孔的多孔碳材料，适用于超级电容器、锂离子电池等能源存储领域。

但传统活化法存在显著局限性：一是孔隙结构调控精度低，孔隙尺寸分布宽，难以实现特定孔径的精准制备；二是过度活化易导致碳骨架坍塌，影响材料的机械稳定性；三是化学活化法使用的化学试剂可能对环境造成污染，后续处理工艺繁琐。因此，传统活化法更适用于对孔隙结构要求不高、成本敏感的规模化应用场景。

（二）新型制备技术的技术特征与适用场景

新型多孔碳制备技术以模板法、生物质衍生法、聚合物碳化法为代表，核心优势在于孔隙结构可控性强、环境友好性高，可实现对多孔碳材料性能的精准定制。模板法通过模板的空间限域作用调控孔隙形成，能够精准控制孔隙尺寸、形貌及分布，可制备出有序介孔碳、大孔碳及多级孔碳材料，适用于催化转化、精准分离等对孔隙结构要求严苛的领域。

生物质衍生法以农业废弃物、林业副产品等可再生生物质为原料，兼具原料廉价易得、环境友好、可持续性强等优点，制备的多孔碳材料通常具有丰富的表面官能团与多级孔隙结构，适用于能源存储、环境治理等领域。聚合物碳化法以合成聚合物为前驱体，可通过分子设计调控聚合物结构，进而实现对多孔碳骨架

结构与孔隙性能的定向调控，适用于制备高性能催化碳材料、电极材料等。新型制备技术的局限性在于部分方法工艺复杂、制备成本较高、规模化生产难度大，目前仍需进一步优化工艺以提升产业化潜力。

二、传统多孔碳制备关键技术

（一）物理活化法

物理活化法又称气体活化法，是最传统的多孔碳制备技术之一，其核心原理是在高温惰性气氛下，先将碳源前驱体碳化，得到无孔或低比表面积的炭素材料；随后引入氧化性气体（如 CO_2 、水蒸气、空气等），通过氧化性气体与碳骨架的氧化还原反应（ $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO} \uparrow$ 、 $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} \uparrow + \text{H}_2 \uparrow$ ），刻蚀碳骨架形成孔隙结构。该方法的制备过程主要包括碳源预处理、碳化、活化及后处理四个关键步骤。

碳源预处理的目的是去除原料中的杂质（如灰分、水分等），提升原料纯度，通常采用粉碎、筛分、干燥等工艺。碳化过程是将预处理后的碳源在惰性气氛（如 N_2 、 Ar ）中加热至 $600\text{--}1000^\circ\text{C}$ ，使碳源中的非碳元素（ H 、 O 、 N 等）以气体形式脱除，形成富碳骨架。活化过程是物理活化法的核心环节，将碳化后的炭素材料置于氧化性气体氛围中，在 $800\text{--}1200^\circ\text{C}$ 下保温一定时间，通过氧化性气体的刻蚀作用形成孔隙。活化温度、活化时间、气体流量及气体种类是影响孔隙结构的关键参数：活化温度过高或时间过长，易导致过度刻蚀，破坏碳骨架完整性；温度过低或时间过短，则活化不充分，比表面积较低；气体流量过大可能导致局部过度氧化，流量过小则活化效率低下。

物理活化法的优势在于：一是工艺简单、操作安全，无需使用化学试剂，产物纯度高、化学稳定性好；二是原料来源广泛，可利用廉价的煤炭、石油焦、木炭等碳源；三是通过调控活化参数可实现对孔隙结构的初步调控，适用于制备微孔碳材料。其局限性在于：一是活化效率低，需要较高的活化温度与较长的活化时间，能耗较高；二是孔隙结构调控精度低，主要形成微孔，介孔与大孔含量较少，比表面积提升受限（通常低于 $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ ）；三是产物孔隙尺寸分布宽，难以满足对孔径精准要求的应用场景。物理活化法适用于制备气体吸附剂、水质净化吸附材料等对孔隙结构要求不高的产品，是目前工业化生产多孔碳材料的主要技术之一。

（二）化学活化法

化学活化法是通过化学活化剂与碳源前驱体的相互作用，在碳化过程中同步实现碳骨架的刻蚀与孔隙形成的制备技术，其核心原理是化学活化剂在高温下通过插层、催化脱水、氧化刻蚀等作用，破坏碳源的分子结构，促进非碳元素脱除，同时在碳骨架中形成丰富的孔隙。与物理活化法相比，化学活化法无需单独的碳化步骤，碳化与活化过程可同步进行，具有活化效率高、反应温度低、比表面积大等优势。

化学活化法的制备过程主要包括碳源与活化剂混合、浸渍、热解活化及后处理四个关键步骤。常用的化学活化剂包括碱金属化合物（如 KOH、NaOH、 K_2CO_3 ）、碱土金属化合物（如 $ZnCl_2$ 、 $MgCl_2$ ）及磷酸类化合物（如 H_3PO_4 ）等。其中，KOH 因活化效果优异，是应用最广泛的活化剂。碳源与活化剂的混合比例（碱碳比）是影响孔隙结构的关键参数，比例过高易导致碳骨架过度刻蚀坍塌，比例过低则活化不充分。浸渍过程是将碳源与活化剂按一定比例混合，通过搅拌、超声等方式使活化剂均匀分散在碳源中，确保活化剂与碳源充分接触。

热解活化过程在惰性气氛中进行，温度通常为 400-900℃，低于物理活化法。以 KOH 活化为例，热解过程中 KOH 先熔融并插层进入碳源分子结构，随后发生反应生成 K_2O 、K 等活性物种，这些活性物种与碳骨架发生氧化还原反应，刻蚀形成孔隙，同时促进碳源中的 H、O 等元素以 H_2O 、 CO_2 等形式脱除。后处理过程是通过酸洗、水洗等方式去除残留的活化剂与反应产物，获得高纯度的多孔碳材料。

化学活化法的优势在于：一是活化效率高、反应温度低，能耗较低；二是可制备出高比表面积（通常可达 2000-4000 m^2/g ）的多孔碳材料，且孔隙类型丰富，兼具微孔与介孔；三是孔隙结构调控性优于物理活化法，可通过调整活化剂种类、混合比例、热解温度等参数调控孔隙结构。其局限性在于：一是使用大量化学活化剂，可能对环境造成污染，后处理工艺繁琐，增加制备成本；二是部分活化剂（如 KOH）腐蚀性强，对设备要求较高；三是过度活化易导致碳骨架坍塌，影响材料的机械稳定性。化学活化法适用于制备超级电容器电极材料、锂离子电池负极材料、高效吸附剂等对高比表面积与多级孔隙结构要求较高的产品，在能源存储与环境治理领域具有广泛应用。

三、新型多孔碳制备关键技术

（一）模板法

模板法是实现多孔碳材料孔隙结构精准调控的核心技术，其核心原理是利用模板的空间限域作用，将碳源前驱体填充到模板的孔隙中，经碳化处理使碳源转化为碳骨架，随后通过物理或化学方法去除模板，得到与模板孔隙结构互补的多孔碳材料。根据模板性质的不同，模板法可分为硬模板法与软模板法两大类。

硬模板法以具有刚性结构的无机材料为模板，如介孔硅（MCM-41、SBA-15）、氧化铝、碳酸钙、金属有机框架（MOFs）等。其制备过程主要包括模板预处理、碳源填充、碳化及模板去除四个步骤。模板预处理的目的是提升模板孔隙的洁净度与分散性，通常采用干燥、焙烧等工艺。碳源填充是核心环节，可通过浸渍、涂覆、化学气相沉积等方式将碳源前驱体（如蔗糖、葡萄糖、酚醛树脂、乙炔等）填充到模板的孔隙中。碳化过程在惰性气氛中进行，温度为 600-1000℃，使碳源转化为刚性碳骨架。模板去除通过化学刻蚀（如使用 HF 溶液刻蚀介孔硅模板）或高温焙烧等方式实现，获得多孔碳材料。硬模板法的优势在于孔隙结构可控性强，可精准制备出有序介孔碳、大孔碳及多级孔碳材料，孔隙尺寸分布窄；局限性在于模板制备成本高、去除过程繁琐、环境污染风险大，规模化生产难度高。

软模板法以有机分子或聚合物为模板，如表面活性剂、嵌段共聚物等，通过分子自组装形成有序结构，作为碳源前驱体的模板。其制备过程主要包括模板与碳源混合、自组装、碳化及模板去除四个步骤。模板与碳源混合后，在特定条件下（如温度、溶剂、pH 值）发生自组装，形成有序的超分子结构；随后经碳化处理，模板发生热分解除除，碳源转化为具有有序孔隙结构的多孔碳材料。软模板法的优势在于模板制备简单、成本较低、去除过程环保（无需强酸强碱刻蚀），可实现有序介孔碳材料的规模化制备；局限性在于孔隙结构的稳定性较差，难以制备大孔碳材料，且对反应条件敏感，调控难度较大。模板法适用于制备高性能催化碳材料、精准分离材料、高能量密度超级电容器电极材料等对孔隙结构要求严苛的领域。

（二）生物质衍生法

生物质衍生法以可再生生物质为原料，经碳化、活化制备多孔碳，核心是利

用生物质天然多级结构，碳化保留天然孔隙，活化进一步拓展孔道。原料包括农林废弃物、动物废弃物及微生物等，具有原料可再生、环境友好、成本低廉的优势，契合绿色发展理念。

其制备过程含原料预处理、碳化、活化、后处理四步：预处理通过粉碎、洗涤等去除杂质提升纯度；400-800℃惰性气氛下碳化，使生物质热解脱除非碳元素形成富碳骨架并保留天然孔隙；活化可采用物理或化学法拓展孔道、提升比表面积（如玉米芯经 KOH 活化可制备比表面积超 3000 m²/g 的多级孔碳）；后处理通过酸洗、水洗去除杂质与残留活化剂，获得高纯度产品。

该方法优势为原料广且廉价、天然结构易成多级孔、环境友好、产物表面富含亲水官能团；局限性在于原料成分复杂导致产物稳定性差、孔隙调控难、部分原料灰分高影响纯度。适用于制备能源存储与环境治理领域的电极材料、吸附剂等，是多孔碳制备的重要发展方向。

（三）聚合物碳化法

聚合物碳化法以合成聚合物为前驱体，通过分子设计与碳化工艺制备多孔碳材料。其核心原理是利用聚合物可设计性，选定制备特定结构的聚合物前驱体，经碳化热解、环化等反应脱除非碳元素，形成特定孔隙与骨架结构的多孔碳。该方法优势在于结构可控性强，可定向精准调控多孔碳的孔隙、表面官能团及骨架性能。

常用聚合物前驱体有酚醛树脂、环氧树脂、聚丙烯腈、聚苯胺、聚吡咯等，其结构差异决定多孔碳性能。如酚醛树脂成碳性与结构可控性好，适用于制备有序介孔 / 多级孔碳；聚丙烯腈碳化后石墨化程度高、导电性优，适配能源存储领域；聚苯胺等导电聚合物碳化后兼具高导电性与高比表面积，可用于催化与传感领域。

该方法制备过程包括前驱体制备、成型、碳化、后处理四步：通过聚合反应合成特定聚合物前驱体，经溶液浇注等方式加工成薄膜、纤维等形态，在 600-1200℃惰性气氛下碳化形成碳骨架与孔隙，最后经活化等后处理优化性能。其优势为可精准定制性能、产物稳定性高、形态多样拓展应用；局限性是前驱体制备成本高、碳化能耗大，规模化受限。适用于制备高性能催化碳材料、高能量密度储能电极等对性能要求严苛的产品。

第二节 超级电容器器件

超级电容器作为一种新型储能器件,兼具电容器快速充放电特性与电池高能量密度优势,具有功率密度高、循环寿命长、充放电效率高、环境友好等突出特点,在新能源汽车、智能电网、便携式电子设备、应急电源等领域具有广泛应用前景。电极材料是决定超级电容器性能的核心要素,多孔碳材料因具有比表面积大、孔结构可调、导电性优异、化学稳定性好、成本低廉等独特优势,成为超级电容器最主流的电极材料之一。基于多孔碳材料的超级电容器器件,通过电极/电解液界面的双电层电容或氧化还原反应的赝电容实现能量存储,其性能与多孔碳的比表面积、孔结构、表面化学性质及器件组装工艺密切相关。本节系统阐述多孔碳基超级电容器的储能机制,重点探讨多孔碳电极材料的结构设计与性能调控、器件的组装工艺与性能优化、不同体系超级电容器的特性及应用进展,剖析当前器件发展面临的关键科学问题与技术挑战,为高性能多孔碳基超级电容器的研发与产业化提供理论指导与技术支撑。

一、多孔碳基超级电容器的储能机制

根据储能机制的差异,多孔碳基超级电容器可分为双电层电容器、赝电容器及混合型超级电容器三类。双电层电容器依靠电极/电解液界面的双电层充电存储能量,是多孔碳基超级电容器的主流类型;赝电容器通过多孔碳表面或负载的活性物质发生可逆氧化还原反应存储能量,能量密度更高;混合型超级电容器则结合双电层储能与赝电容储能机制,兼顾功率密度与能量密度。深入理解各类储能机制的本质的,是实现超级电容器性能优化的基础。

(一) 双电层储能机制

双电层储能机制的核心是电极/电解液界面双电层的形成与充电过程。当多孔碳电极浸入电解液中时,电极表面的电荷会吸引电解液中相反符号的离子,在电极与电解液的界面处形成一层紧密排列的电荷层,即双电层。双电层的结构通常采用亥姆霍兹模型描述,即电极表面为一层固定电荷,电解液一侧为一层相反电荷的离子层,两层电荷相互平行且间距极小(纳米级),类似平行板电容器。当对超级电容器施加电压时,电解液中的离子会在电场作用下快速迁移至电极表面,双电层内的电荷数量增加,实现能量存储;放电过程中,双电层内的电荷通

过外电路释放，离子返回电解液中，完成能量输出。

双电层的电容值与多孔碳电极的比表面积、电解液离子尺寸及介电常数密切相关。比表面积越大，电极与电解液的接触面积越大，可容纳的电荷数量越多，电容值越高；电解液离子尺寸越小，越容易进入多孔碳的微孔结构，充分利用电极的比表面积；电解液介电常数越高，双电层的电容值越大。此外，多孔碳的孔结构分布也会影响双电层的形成效率，合理的孔结构（如分级孔结构）可促进电解液的渗透与离子的传输，提升电容性能。双电层储能过程无电子转移，属于物理过程，因此双电层电容器具有充放电速度快、循环寿命长（通常可达 10 万次以上）、充放电效率高的特点，但能量密度相对较低。

（二）赝电容储能机制

赝电容储能机制基于电极材料表面或内部发生的可逆氧化还原反应、欠电位沉积或插层反应，通过电荷的转移实现能量存储。与双电层储能不同，赝电容储能是化学过程，具有更高的比电容与能量密度。多孔碳材料本身的赝电容效应较弱，但通过表面改性（如氧化、掺杂）或负载赝电容活性物质（如金属氧化物、导电聚合物），可显著提升其赝电容性能。

多孔碳表面改性引入的含氧官能团（如羟基、羧基、羰基、环氧基）或含氮官能团（如吡啶氮、吡咯氮、石墨氮），可在充放电过程中发生可逆氧化还原反应，产生赝电容。例如，含氧官能团中的羟基可被氧化为羰基，羰基可进一步被氧化为羧基，这些反应均伴随电子的转移，从而贡献额外的电容。氮掺杂多孔碳中的吡啶氮和吡咯氮也可通过质子吸附 / 脱附过程发生可逆氧化还原反应，提升比电容。负载金属氧化物（如 RuO_2 、 MnO_2 、 Co_3O_4 、 NiO 等）或导电聚合物（如聚苯胺、聚吡咯、聚噻吩等）的多孔碳复合材料，其赝电容主要来源于负载活性物质的可逆氧化还原反应。例如， MnO_2 与电解液中的阳离子（如 Na^+ 、 K^+ ）发生插层 / 脱插层反应，聚苯胺发生氧化还原掺杂 / 脱掺杂反应，这些反应均能存储大量电荷，显著提升超级电容器的能量密度。

（三）混合型储能机制

混合型超级电容器结合了双电层储能与赝电容储能的优势，通常由一个双电层电极和一个赝电容电极组成，或在同一电极中同时存在双电层储能与赝电容储能过程。在充放电过程中，双电层电极提供高功率密度与长循环寿命，赝电容电极提供高能量密度，两者协同作用使混合型超级电容器兼顾高功率密度与高能量

密度。

典型的混合型超级电容器体系包括“多孔碳//金属氧化物”“多孔碳//导电聚合物”“多孔碳//金属有机框架衍生碳”等。例如,以多孔碳为负极(双电层储能), MnO_2 /多孔碳复合材料为正极(赝电容储能),以中性电解液(如 Na_2SO_4 溶液)组装的混合型超级电容器,负极通过双电层存储电荷,正极通过 MnO_2 的氧化还原反应存储电荷,器件的能量密度显著高于传统双电层电容器,同时保持较高的功率密度与循环寿命。此外,通过对多孔碳电极进行表面掺杂与改性,使电极同时具备双电层储能与赝电容储能能力,也可构建混合型超级电容器,简化器件结构,提升性能稳定性。

二、多孔碳电极材料的结构与性能调控

多孔碳电极材料的结构与性能直接决定超级电容器的储能特性,合理的结构设计 with 性能调控是提升器件性能的关键。多孔碳的比表面积、孔结构(孔类型、孔径分布、孔容)、表面化学性质及导电性是影响其电极性能的核心参数。通过优化制备工艺、采用模板法、表面改性、复合改性等策略,可实现多孔碳电极材料的结构精准设计与性能定向调控。

(一) 比表面积与孔结构调控

比表面积是影响双电层电容的关键参数,通常情况下,比表面积越大,双电层电容越高。但并非比表面积越大越好,若多孔碳的微孔过多或孔径过小,电解液离子难以进入微孔内部,导致部分比表面积无法被有效利用,反而降低电容性能。因此,多孔碳的比表面积调控需与孔结构优化相结合,确保电解液离子能充分接触电极表面。

孔结构调控的核心是构建合理的分级孔结构(微孔-介孔-大孔)。微孔(孔径 $< 2\text{ nm}$)提供高比表面积,是双电层形成的主要场所;介孔($2\text{ nm} < \text{孔径} < 50\text{ nm}$)作为电解液离子传输的通道,可加速离子扩散,减少传输阻力;大孔(孔径 $> 50\text{ nm}$)可进一步提升电解液的渗透能力,缓解电极在充放电过程中的体积膨胀。通过模板法(如硬模板法、软模板法)可精准调控多孔碳的孔结构,例如以有序介孔硅(SBA-15、MCM-41)为硬模板,可制备出有序介孔碳材料,其孔径均匀、孔道规整,离子传输效率高;以表面活性剂为软模板,可通过调控表面活性剂的种类与浓度,制备出不同孔径分布的多孔碳材料。此外,通过活化工

（如物理活化、化学活化）也可调控多孔碳的孔结构，物理活化（如 CO_2 、水蒸气活化）通过刻蚀碳骨架形成微孔，化学活化（如 KOH 、 ZnCl_2 活化）可同时形成微孔与介孔，显著提升比表面积与孔容。

（二）表面化学性质调控

多孔碳的表面化学性质主要由表面官能团与元素组成决定，通过表面改性可引入功能性官能团，调控表面电子结构，提升赝电容性能与润湿性。表面改性方法主要包括氧化改性、掺杂改性、接枝改性等。氧化改性是最常用的表面改性方法，通过强氧化剂（如 HNO_3 、 H_2O_2 、 KMnO_4 ）处理或等离子体氧化，可在多孔碳表面引入大量含氧官能团，这些官能团不仅能产生赝电容，还能提升电极的亲水性，改善电极与电解液的接触性能。但过度氧化会破坏多孔碳的碳骨架结构，降低其导电性与循环稳定性，因此需严格控制氧化条件。

掺杂改性是提升多孔碳电极性能的有效手段，通过引入氮、磷、硫、硼等异质元素，可调控多孔碳的电子结构与表面化学性质。氮掺杂是最主流的掺杂方式，氮原子的引入可增加多孔碳的表面活性位点，产生赝电容；同时，氮原子的电负性高于碳原子，可增强多孔碳的导电性与润湿性。磷、硫掺杂则通过引入不同的杂化轨道与电子云分布，进一步优化多孔碳的表面活性与导电性，提升电容性能。接枝改性通过化学接枝反应将特定的有机分子或聚合物接枝到多孔碳表面，可精准调控表面官能团的种类与数量，同时增强电极与活性物质的相互作用，提升复合电极的稳定性。

（三）复合改性与性能增强

复合改性通过将多孔碳与金属氧化物、导电聚合物、二维材料等进行复合，结合不同材料的优势，实现电极性能的协同增强。金属氧化物（如 RuO_2 、 MnO_2 、 Co_3O_4 ）具有高赝电容，但导电性较差、循环稳定性不佳；将其与多孔碳复合，多孔碳可作为导电骨架与支撑载体，提升金属氧化物的导电性与分散性，缓解其体积膨胀，同时两者协同作用提升整体电容性能。例如， MnO_2 /多孔碳复合材料的比电容显著高于单一 MnO_2 或多孔碳，循环寿命可达数万次。

导电聚合物（如聚苯胺、聚吡咯）具有高导电性与高赝电容，但机械稳定性较差；与多孔碳复合后，多孔碳可增强复合材料的机械强度与循环稳定性，导电聚合物则贡献高赝电容，提升能量密度。二维材料（如石墨烯、氧化石墨烯、 MXene ）具有超高导电性与力学性能，与多孔碳复合可进一步提升电极的导电性

与结构稳定性，加速电荷传输，提升功率密度。此外，金属有机框架（MOF）衍生碳材料因具有高比表面积、规整孔结构与可调组成，与多孔碳复合后也能显著提升超级电容器性能，成为近年来的研究热点。

三、多孔碳基超级电容器的组装工艺与性能优化

除电极材料外，超级电容器的组装工艺也对器件性能具有重要影响，合理的组装工艺可确保电极、电解液、隔膜、集流体等组件的高效匹配，提升器件的电容性能、功率性能与循环稳定性。器件组装的核心步骤包括电极制备、电解液选择、隔膜选择、器件封装等，每个步骤的工艺参数均需精准调控。同时，通过器件结构与性能优化策略，可进一步提升多孔碳基超级电容器的综合性能。

（一）核心组装工艺

电极制备是器件组装的基础，主要包括活性物质、粘结剂、导电剂的混合分散、浆料涂覆、干燥与压片等步骤。活性物质（多孔碳或其复合材料）是电极的核心，决定电极的储能性能；粘结剂（如聚偏氟乙烯、羧甲基纤维素钠、天然橡胶）用于将活性物质与集流体粘结在一起，确保电极的结构完整性；导电剂（如乙炔黑、科琴黑、碳纳米管）用于提升电极的导电性，减少电荷传输阻力。电极制备过程中，需优化活性物质、粘结剂、导电剂的比例，确保浆料具有良好的分散性与涂覆性；干燥过程需控制温度与时间，避免浆料中残留水分影响器件性能；压片压力需合理调控，压力过大可能破坏多孔碳的孔结构，压力过小则电极与集流体的接触电阻过大。

电解液选择需根据超级电容器的储能机制与应用场景确定，常用的电解液包括水系电解液、有机电解液、离子液体电解液等。水系电解液（如 H_2SO_4 、 KOH 、 Na_2SO_4 溶液）具有离子电导率高、成本低、环境友好等优点，但分解电压低（通常 1.23 V 以下），能量密度受限，适用于低电压、高功率的应用场景。有机电解液（如四氟硼酸四乙基铵/碳酸丙烯酯溶液）分解电压高（通常 2.5-3.0 V），能量密度高，但离子电导率较低、成本较高、有毒性，适用于高电压、高能量密度的应用场景。离子液体电解液（如 1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐）具有分解电压高、热稳定性好、不易燃等优点，安全性高，适用于高温、高电压的极端应用场景，但成本较高，离子电导率有待提升。

隔膜是超级电容器的重要组件，用于分隔正负极，防止短路，同时允许电

液离子通过。隔膜的性能需满足透气性好、离子传输阻力低、化学稳定性好、机械强度高的要求。常用的隔膜材料包括聚丙烯、聚乙烯等聚合物隔膜，玻璃纤维隔膜，碳基隔膜等。聚合物隔膜具有成本低、机械强度高的优点，但亲水性较差；玻璃纤维隔膜亲水性好、离子传输阻力低，但机械强度相对较低；碳基隔膜（如多孔碳膜、石墨烯膜）具有导电性好、比表面积大的特点，可作为功能性隔膜，进一步提升器件性能。器件封装需确保密封性良好，防止电解液泄漏，同时减少接触电阻，提升器件的稳定性与可靠性。

（二）器件结构与性能优化

合理的器件结构设计是提升超级电容器性能的重要途径，常见的器件结构包括对称结构、非对称结构、柔性结构、微型结构等。对称结构超级电容器的正负极采用相同的多孔碳电极材料，结构简单、制备工艺简便、成本低，是最常用的器件结构，适用于对能量密度要求不高的应用场景。非对称结构超级电容器的正负极采用不同的电极材料（如正极采用赝电容材料，负极采用双电层材料），可有效拓宽器件的电压窗口，提升能量密度，同时保持较高的功率密度，适用于新能源汽车、智能电网等对能量密度要求较高的领域。

柔性超级电容器采用柔性集流体（如碳布、碳纸、金属箔网）与柔性电极材料，可实现弯曲、折叠，适用于便携式电子设备、可穿戴电子器件等柔性应用场景。基于多孔碳材料的柔性电极具有重量轻、柔韧性好、导电性优异的特点，是柔性超级电容器的理想电极材料。微型超级电容器通过微纳加工技术制备，具有体积小、功率密度高、响应速度快的特点，适用于微型电子设备、物联网传感器等微型储能场景。此外，通过构建三维电极结构、引入电解质凝胶等策略，也可进一步优化器件的离子传输效率与结构稳定性，提升综合性能。

（三）性能表征与评价方法

多孔碳基超级电容器的性能表征主要包括电化学性能表征与物理性能表征。电化学性能表征是核心，主要包括 cyclic voltammetry (CV)、galvanostatic charge-discharge (GCD)、electrochemical impedance spectroscopy (EIS) 等测试方法。CV 测试用于分析超级电容器的储能机制（双电层或赝电容），评估电容特性与可逆性；GCD 测试用于测定器件的比电容、能量密度、功率密度及循环寿命；EIS 测试用于分析电极/电解液界面的电荷转移阻力、离子传输阻力等，揭示影响器件性能的关键因素。

物理性能表征主要用于分析电极材料的结构与形貌，包括扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）、X 射线衍射（XRD）、拉曼光谱（Raman）、氮气吸附 - 脱附测试等。SEM 与 TEM 用于观察多孔碳材料的形貌与孔结构；XRD 与 Raman 用于分析多孔碳的晶体结构与石墨化程度；氮气吸附 - 脱附测试用于测定多孔碳的比表面积、孔容与孔径分布。通过物理性能与电化学性能的关联分析，可深入理解材料结构与器件性能之间的构效关系，指导电极材料的结构设计 with 性能优化。

第三节 锂离子电池应用

多孔碳材料因具有高比表面积、可调的孔道结构（微孔、介孔、大孔及多级孔）、优异的导电性、良好的化学稳定性及低成本等核心优势，已成为锂离子电池电极材料领域的研究热点。在锂离子电池中，多孔碳材料可作为负极材料直接存储锂离子，也可作为正极材料的导电添加剂或载体，通过调控孔道结构与表面化学性质，显著提升电池的比容量、充放电速率、循环稳定性及安全性。随着新能源汽车、便携式电子设备及大规模储能等领域对锂离子电池能量密度、功率密度及使用寿命要求的不断提升，传统石墨负极（理论比容量 372 mAh/g）已难以满足高端应用需求，多孔碳基负极材料凭借其更高的比容量与更快的离子传输速率，成为替代传统石墨负极的理想候选材料。本节系统梳理多孔碳材料在锂离子电池负极、正极及电解质修饰中的应用，深入探讨其储锂机制、结构设计原则、性能优化策略及产业化挑战，为高性能多孔碳基锂离子电池的研发与应用提供理论与技术支撑。

一、多孔碳材料在锂离子电池负极中的应用

多孔碳材料作为锂离子电池负极材料，主要通过锂离子的嵌入 / 脱嵌及表面吸附两种机制实现储锂功能。其高比表面积可提供丰富的锂离子吸附位点，提升比容量；合理的孔道结构（尤其是介孔与多级孔）可构建高效的锂离子传输通道，降低离子扩散阻力，提升充放电速率；优异的导电性则有利于电子传输，减少极化损失。根据孔道结构与制备工艺的差异，用于锂离子电池负极的多孔碳材料主要包括微孔碳、介孔碳、大孔碳及多级孔碳，不同类型材料在储锂性能上各具特

色，通过结构调控与表面改性可进一步优化其储锂性能。

（一）不同孔道类型多孔碳负极材料

微孔碳材料（孔径 $< 2\text{ nm}$ ）具有极高的比表面积，可通过表面吸附与微孔填充机制存储大量锂离子，理论比容量显著高于传统石墨负极。例如，以沸石咪唑酯骨架材料（ZIF-8）为模板制备的微孔碳，比表面积可达 $1500\text{ m}^2/\text{g}$ 以上，在 0.1 A/g 电流密度下的比容量可达 600 mAh/g 以上，远高于石墨负极。但微孔碳的孔径较小，锂离子扩散阻力较大，导致其倍率性能较差，在高电流密度下充放电时容量衰减严重。为改善这一问题，可通过调控微孔尺寸（将孔径控制在 $1\text{--}2\text{ nm}$ ）、引入少量介孔构建微孔 - 介孔复合结构等策略，在保证高比容量的同时提升离子传输效率。

介孔碳材料（ $2\text{ nm} < \text{孔径} < 50\text{ nm}$ ）具有规则的孔道结构与较大的孔径，可提供快速的锂离子传输通道，显著提升倍率性能。介孔碳的储锂机制以锂离子嵌入/脱嵌为主，表面吸附为辅，其比容量通常在 $400\text{--}500\text{ mAh/g}$ 之间，虽低于微孔碳，但倍率性能更为优异。例如，以 SBA-15 为模板制备的有序介孔碳，在 1 A/g 高电流密度下的比容量仍可保持 300 mAh/g 以上，循环 1000 次后容量保持率超过 90%。通过调控介孔的孔径、孔道排列方式（如二维六方、三维立方）及比表面积，可进一步优化介孔碳的储锂性能，适配不同功率密度需求的锂离子电池。

大孔碳材料（孔径 $> 50\text{ nm}$ ）的比表面积相对较低，储锂比容量有限（通常在 $300\text{--}400\text{ mAh/g}$ ），但其独特的大孔结构可作为电解液存储库，减少电解液与电极材料之间的界面阻抗，同时可缓解充放电过程中电极材料的体积膨胀。大孔碳材料单独作为负极材料的应用较少，更多用于与微孔碳、介孔碳或其他高比容量材料（如硅、锡）复合，构建多级孔复合负极材料，通过协同作用提升材料的综合储锂性能。

多级孔碳材料（同时包含微孔、介孔与大孔）整合了不同孔道类型的优势，微孔提供丰富的储锂位点，介孔构建快速离子传输通道，大孔缓解体积膨胀并存储电解液，是目前最具应用潜力的多孔碳负极材料。例如，以生物质（如木材、秸秆、坚果壳）为原料，通过活化 - 碳化工艺制备的多级孔碳，比表面积可达 $2000\text{ m}^2/\text{g}$ 以上，在 0.1 A/g 电流密度下的比容量可达 700 mAh/g 以上，在 5 A/g 高电流密度下仍可保持 400 mAh/g 的比容量，循环 2000 次后容量保持率超过 85%。多级孔碳材料的性能优势使其在高能量密度与高功率密度锂离子电池中展

现出广阔的应用前景。

（二）多孔碳负极材料的表面改性策略

表面改性是提升多孔碳负极材料储锂性能的关键手段，通过掺杂 heteroatoms（如 N、P、S、B 等）或负载金属 / 金属化合物，可调控材料的电子结构与表面化学性质，增强导电性、提升锂离子吸附能力并抑制电解液分解。氮掺杂是最常用的表面改性方法，氮原子的引入可在碳骨架中形成缺陷位点，提供额外的储锂活性位点，同时提升材料的导电性。例如，尿素为氮源制备的氮掺杂多孔碳，氮含量可达 10 at% 以上，比容量较未掺杂多孔碳提升 30% 以上，循环稳定性显著增强。

磷掺杂、硫掺杂等 heteroatoms 共掺杂可进一步优化多孔碳的储锂性能。磷原子的原子半径较大，掺杂后可在碳骨架中引入更多缺陷，同时提升材料的离子导电性；硫原子则可与碳形成 C-S 键，增强锂离子的吸附能力。例如，N、P 共掺杂的多级孔碳，在 0.1 A/g 电流密度下的比容量可达 800 mAh/g 以上，在 2 A/g 电流密度下循环 1000 次后容量保持率超过 90%。金属 / 金属化合物负载（如 Fe、Co、Ni、SnO₂、SiO₂ 等）则通过合金化反应或转换反应提供额外的储锂容量，同时金属颗粒可提升材料的导电性。例如，SnO₂ 负载的多孔碳复合材料，SnO₂ 与 Li 发生合金化反应生成 Li₄4Sn，理论比容量高达 994 mAh/g，多孔碳基体则可缓解 SnO₂ 的体积膨胀，提升循环稳定性。

二、多孔碳材料在锂离子电池正极中的应用

锂离子电池正极材料（如 LiCoO₂、LiFePO₄、LiNi_xCo_yMn_zO₂ 等）通常存在导电性差、离子扩散速率低及充放电过程中体积膨胀等问题，限制了电池的倍率性能与循环稳定性。多孔碳材料因优异的导电性与可调的孔道结构，可作为正极材料的导电添加剂或载体，通过构建导电网络、提升电解液浸润性、缓解体积膨胀等方式，显著提升正极材料的电化学性能。作为导电添加剂时，多孔碳材料可替代传统的炭黑、石墨等导电剂，形成更高效的三维导电网络；作为载体时，可将正极活性物质负载于多孔碳的孔道内或表面，提升活性物质的分散性与稳定性。

（一）多孔碳作为正极导电添加剂

传统锂离子电池正极通常添加 5%-10% 的炭黑作为导电添加剂，以提升正极的导电性，但炭黑的比表面积较小，导电网络构建效率较低。多孔碳材料（尤其

是介孔碳与多级孔碳)具有高比表面积与三维连通孔道结构,可在正极材料中形成连续的导电网络,显著降低电荷转移阻抗,提升倍率性能。例如,在 LiFePO_4 正极中添加 5% 的有序介孔碳,替代传统炭黑,电池在 10 C 高倍率下的比容量可达 120 mAh/g 以上,较炭黑添加的电池提升 40% 以上,循环 1000 次后容量保持率超过 95%。

多孔碳导电添加剂的性能与其孔道结构、比表面积及分散性密切相关。有序介孔碳因孔道规则、导电性优异,是最常用的正极导电添加剂之一;多级孔碳则因兼具高比表面积与快速离子传输通道,在高功率密度电池中表现更为优异。通过优化多孔碳的添加量(通常为 2%-5%)、提升其在正极材料中的分散均匀性,可进一步提升导电网络的构建效率,降低极化损失。此外,氮掺杂、磷掺杂等表面改性的多孔碳导电添加剂,可通过 heteroatoms 掺杂提升导电性与表面催化活性,进一步优化正极材料的电化学性能。

(二) 多孔碳作为正极活性物质载体

将正极活性物质负载于多孔碳载体表面或孔道内,可显著提升活性物质的分散性,减少颗粒团聚,同时多孔碳载体可构建高效的导电网络与离子传输通道,缓解活性物质在充放电过程中的体积膨胀。例如,将 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ (NCM811)活性物质负载于多级孔碳载体上,制备的 NCM811/多孔碳复合材料,活性物质颗粒均匀分散于多孔碳的孔道内,在 5 C 高倍率下的比容量可达 150 mAh/g 以上,循环 200 次后容量保持率超过 90%,而纯 NCM811 正极的容量保持率仅为 75%。

多孔碳载体的孔道结构与表面化学性质对复合材料的性能具有显著影响。介孔碳载体因孔径适中、孔道规则,有利于活性物质的均匀负载与离子传输;多级孔碳载体则可通过大孔存储电解液,进一步提升离子扩散速率。通过对多孔碳载体进行表面改性(如氮掺杂、羟基修饰),可增强其与正极活性物质之间的相互作用,提升界面稳定性,抑制活性物质的溶解与脱落。此外,多孔碳载体还可用于负载高比容量的硫正极、富锂锰基正极等新型正极材料,解决其导电性差、体积膨胀严重等问题,推动新型高能量密度锂离子电池的发展。

三、多孔碳材料在锂离子电池电解质修饰中的应用

电解质是锂离子电池中离子传输的媒介,其性能直接影响电池的离子电导率、

界面稳定性、安全性及低温性能。传统液态电解质存在漏液、易燃、高温稳定性差等问题；固态电解质则存在离子电导率低、界面阻抗大等缺陷。多孔碳材料可通过吸附电解液、构建固态电解质传输通道、修饰电极 - 电解质界面等方式，改善电解质的性能，提升电池的安全性与电化学性能。在液态电解质中，多孔碳材料可作为电解液吸附剂，制备凝胶聚合物电解质；在固态电解质中，多孔碳材料可作为导电与离子传输载体，提升离子电导率。

（一）多孔碳凝胶聚合物电解质

凝胶聚合物电解质通过将液态电解液吸附于聚合物基质中形成，兼具液态电解质高离子电导率与固态电解质安全稳定的优势。多孔碳材料因高比表面积与强吸附能力，可作为聚合物基质的增强填料，提升电解液的吸附量与保留能力，同时构建连续的离子传输通道，提升离子电导率。例如，将有序介孔碳添加到聚偏氟乙烯（PVDF）聚合物基质中，制备的介孔碳 / PVDF 凝胶聚合物电解质，电解液吸附量较纯 PVDF 提升 50% 以上，离子电导率可达 10^{-3} S/cm 以上，接近液态电解液水平。

多孔碳凝胶聚合物电解质的性能与多孔碳的比表面积、孔道结构及与聚合物的相容性密切相关。高比表面积的多孔碳可吸附更多的电解液，提升离子传输载体浓度；有序介孔碳的规则孔道可构建高效的离子传输通道，降低离子扩散阻力。通过对多孔碳进行表面改性（如羟基、羧基修饰），可增强其与聚合物基质的相容性，减少界面缺陷，提升凝胶聚合物电解质的力学性能与稳定性。此外，氮掺杂多孔碳凝胶聚合物电解质还可通过氮原子的催化作用，抑制电解液的分解，提升电池的循环稳定性。

（二）多孔碳基固态电解质修饰

固态电解质（如硫化物固态电解质、氧化物固态电解质、聚合物固态电解质）具有良好的安全性与稳定性，但离子电导率低、界面阻抗大等问题限制了其应用。多孔碳材料可作为固态电解质的导电与离子传输载体，通过构建三维连通的孔道结构，提升固态电解质的离子电导率，同时改善电极与固态电解质之间的界面接触。例如，将硫化物固态电解质填充到有序介孔碳的孔道内，制备的介孔碳 / 硫化物复合固态电解质，离子电导率较纯硫化物固态电解质提升 2 倍以上，界面阻抗显著降低。

多孔碳基固态电解质的性能与多孔碳的孔道尺寸、比表面积及表面化学性质

密切相关。介孔碳的孔径与固态电解质颗粒尺寸匹配，有利于固态电解质的均匀填充，构建连续的离子传输通道；多级孔碳则可通过大孔改善电极与电解质之间的界面接触，降低界面阻抗。通过对多孔碳进行表面改性（如氟修饰、氧修饰），可增强其与固态电解质之间的相互作用，提升界面稳定性，抑制界面副反应的发生。此外，多孔碳基固态电解质还可与凝胶聚合物电解质复合，构建复合固态电解质，进一步提升离子电导率与界面相容性。

第四节 催化转化器件

催化转化技术是解决能源转化、环境治理、精细化工合成等领域关键问题的核心技术，其核心在于高性能催化材料研发与催化器件精准构建。传统催化材料存在资源稀缺、成本高昂、稳定性差等缺陷，限制了产业化应用。多孔碳材料具有高比表面积、可调孔结构、良好导电性与化学稳定性，来源广泛且成本低廉，经掺杂改性或负载活性组分后可显著提升催化活性与选择性，成为构建高效催化转化器件的理想载体。多孔碳基催化转化器件通过结合多孔碳基催化材料与特定反应器结构，实现反应物高效传输、催化反应精准调控及产物快速分离，广泛应用于燃料电池、电解水制氢、CO₂还原、有机污染物降解等领域。本节系统阐述其构建原理、核心制备技术、主要类型及应用展望，剖析催化性能调控机制与发展瓶颈，为优化设计与产业化应用提供理论支撑。

一、多孔碳基催化转化器件的构建原理与核心特性

多孔碳基催化转化器件的功能实现依赖多孔碳载体结构优势与催化活性组分的协同作用，核心是通过合理结构设计与材料改性，兼顾传质效率与催化活性选择性。本节从构建原理、核心特性及性能评价指标三个维度，解析其基础理论体系。

（一）核心构建原理

构建遵循“载体 - 活性组分协同作用 - 反应 - 传输耦合”核心逻辑，包含催化反应与传质传热调控两大关键机制。催化反应机制上，多孔碳载体高比表面积可实现活性组分高度分散，减少团聚并提升活性位点数量；表面缺陷位点可作为辅助活性位点，或通过电子转移调控活性组分电子结构，增强催化活性与选择性，如 N 掺杂多孔碳通过吡啶 N、吡咯 N 与过渡金属配位，调控金属电子云密度，

提升氧还原反应活性。传质传热调控机制中，多级孔结构构建高效传质通道，微孔提供高比表面积与活性位点，介孔与大孔加速传质；良好导电性提升电子转移速率，优异导热性避免局部过热导致催化剂失活。器件结构设计需匹配反应特性，保障反应与传输高效耦合。

（二）关键核心特性

相较于传统器件，多孔碳基催化转化器件具备六大核心优势：一是高催化活性与选择性，高比表面积实现活性组分分散，杂原子掺杂与缺陷工程精准调控活性位点，孔径筛选与表面改性提升反应物选择性吸附；二是优异传质传热性能，多级孔结构降低传质阻力，良好导电导热性保障反应动力学与稳定性；三是良好化学与热稳定性，在酸碱、高温等复杂环境中结构稳定，适用范围广；四是低成本与资源可持续性，由生物质、工业废弃物等廉价碳源制备，成本远低于贵金属催化剂；五是易于功能化修饰，通过掺杂、接枝、负载等方式引入活性组分或功能基团，适配不同催化需求；六是器件结构兼容性强，可加工成多种形态，适配燃料电池、电解槽、固定床反应器等多种器件结构。

（三）性能评价指标

核心性能评价指标包括催化活性、选择性、稳定性、传质效率及能量效率。催化活性用转化率、产率、反应速率或活性位密度表征；选择性以目标产物选择性百分比表示，优良器件复杂反应中选择性需达 90% 以上；稳定性含长期运行与循环稳定性，要求连续运行 100 小时转化率衰减不超过 10%，循环 10 次活性保留率不低于 85%；传质效率通过有效扩散系数或传质阻力评估，可经孔结构与通道设计优化；能量效率针对电催化器件，优良器件能量效率不低于 60%。此外还需评价耐久性与抗中毒能力，各指标相互制约，需综合优化。

二、多孔碳基催化转化器件的核心制备技术

多孔碳基催化转化器件制备为系统工程，核心技术包括多孔碳载体制备与改性、活性组分负载、器件结构成型与集成三个关键环节，技术选择直接影响器件性能与稳定性。本节阐述各环节关键技术原理、优缺点及应用场景。

（一）多孔碳载体的制备与改性技术

主流制备技术分为模板法、活化法、水热/溶剂热法及生物质炭化法。模板法中，硬模板法可精准调控孔结构，制备高比表面积有序孔道多孔碳，但模板移

除复杂、成本高；软模板法操作简便、成本低，但孔结构有序性与稳定性较差。活化法中，化学活化法可低温制备高比表面积多级孔碳，效率高但易污染；物理活化法环境友好、过程简单，但需高温、能耗高且孔结构调控难。水热/溶剂热法操作温和，可调控形貌尺寸，但制备规模小。生物质炭化法原料廉价、环境友好，实现资源循环，但需预处理提升纯度与孔结构均匀性。改性技术主要为杂原子掺杂与缺陷工程，通过引入杂原子或缺陷提升催化活性，需平衡载体性能与制备成本。

（二）催化活性组分的负载技术

常用负载技术包括浸渍法、沉淀法、溶胶-凝胶法、化学还原法及原子层沉积法。浸渍法操作简便、成本低，适用于批量制备，但活性组分分散性差、易团聚；沉淀法可精准控制负载量、提升分散性，但沉淀条件需严格调控；溶胶-凝胶法制备的催化材料分散性好、结合牢固，但过程复杂、耗时成本高；化学还原法适用于金属活性组分负载，常温操作、可调控颗粒尺寸，但需避免杂质引入与颗粒团聚；原子层沉积法可实现原子级精准负载，分散性极佳、结合牢固，但设备专用、操作复杂、成本高，适用于高性能器件。需根据活性组分类型、负载量要求及器件需求选择负载技术，必要时采用多技术结合策略。

（三）器件的结构成型与集成技术

结构成型技术包括涂覆法、压片成型法、泡沫成型法及3D打印法。涂覆法操作简便、成本低，适用于薄膜型器件，但需调控催化层均匀性与结合强度；压片成型法制备的块体结构稳定，适用于气相反应，但可能堵塞孔道降低传质效率；泡沫成型法构建的三维结构比表面积高、传质通道好，适用于流动相反应，但需匹配泡沫基底与反应环境；3D打印法可实现个性化结构与复杂孔道精准构建，适用于微型化集成化器件，但设备专用且需调控墨水参数。集成技术需实现催化材料与电极、电解质或反应器、分离装置的高效集成，保障组件密封性与兼容性，降低接触电阻或传质阻力，提升整体性能。

三、多孔碳基催化转化器件的主要类型与应用机制

根据催化反应类型与应用场景，多孔碳基催化转化器件可分为电催化、热催化、光催化转化器件三大类，各类器件结构设计、催化机制与应用场景差异显著。本节阐述各类器件核心结构、应用机制及性能特点。

（一）电催化转化器件

以电能驱动反应，核心是集成多孔碳基电催化材料与电极、电解质，实现电能与化学能转化，应用于燃料电池、电解水制氢、 CO_2 电还原等领域。燃料电池核心为膜电极，多孔碳基催化材料负载于阴极与阳极，分别催化燃料氧化与氧气还原，实现化学能向电能转化，高比表面积与多级孔结构提升性能。电解水制氢器件中，多孔碳基催化材料可作为析氢或析氧反应催化剂，经杂原子掺杂与过渡金属负载提升活性、降低能耗。 CO_2 电还原器件中，多孔碳基催化材料通过活性位点吸附 CO_2 ，调控还原路径提升目标产物选择性，如 N 掺杂多孔碳负载 Cu 纳米颗粒可高效催化 CO_2 还原为乙醇。

（二）热催化转化器件

以热能驱动反应，核心是集成多孔碳基热催化材料与固定床、流化床等反应器，应用于有机污染物催化燃烧、工业废气处理、精细化工合成等领域。有机污染物催化燃烧器件中，多孔碳基催化材料填充于固定床，低温下将 VOCs 等氧化分解为无害物质，高比表面积提升吸附能力，多级孔结构保障传质，良好导热性提升燃烧效率。工业废气处理器件利用多孔碳基催化材料转化 NO_x 、 SO_x 等有害气体，实现净化与回收。精细化工合成器件借助其高选择性，精准调控加氢、氧化等反应，提升目标产物产率与纯度，降低反应条件要求。

（三）光催化转化器件

以光能驱动反应，核心是集成多孔碳基光催化材料与光反应器，实现光能向化学能转化，应用于有机污染物降解、光催化制氢、 CO_2 还原等领域。光催化降解器件中，多孔碳基光催化材料在光照下产生电子 - 空穴对，生成活性物种降解污染物，高比表面积提升吸附能力，良好导电性促进电子 - 空穴分离，提升降解效率。光催化制氢器件中，多孔碳基光催化材料吸收光子产生电子 - 空穴对，实现水分解制氢，高比表面积与导电性提升光催化活性。光催化 CO_2 还原器件通过活性位点吸附 CO_2 ，利用光生电子将其还原为燃料或化学品，孔结构调控吸附与传输，提升还原效率与选择性，还可构建光电极实现光 - 电协同催化。

四、多孔碳基催化转化器件的应用领域与发展展望

多孔碳基催化转化器件凭借高效催化性能、优异稳定性、低成本及结构兼容性，在能源转化、环境治理、精细化工等领域展现广阔前景，同时面临性能优化、

产业化等挑战。本节阐述应用领域，分析现存问题，展望发展趋势。

（一）主要应用领域

能源转化领域，器件支撑清洁能源生产与高效利用，应用于燃料电池、电解水制氢、光催化制氢等方向，推动新能源汽车、绿氢产业发展，为可再生能源储存提供新途径。环境治理领域，可处理大气与水污染，应用于 VOCs 催化燃烧、工业废气脱硝脱硫、有机废水降解、重金属离子去除等，净化效率高，助力解决酸雨、雾霾等环境问题。精细化工领域，实现有机合成反应精准调控，应用于加氢、氧化等反应，提升产物产率与纯度，降低成本，还可用于药物中间体合成与生物催化，推动医药、食品加工等行业的发展。

（二）当前存在的问题与挑战

实际应用与产业化过程中面临五大挑战：一是复杂反应体系中催化活性与选择性不足，如 CO_2 电还原目标产物选择性与产率偏低；二是长期稳定性与抗中毒能力差，高温、酸碱等复杂环境下易发生活性组分流失、团聚或积碳，杂质易导致催化剂中毒；三是传质效率与器件集成度待优化，传质阻力大、反应物与活性位点接触不充分，微型化集成化程度低；四是大规模制备与成本控制难，批量制备技术不成熟，组装工艺繁琐、良品率低；五是性能评价标准不统一，数据缺乏可比性，电催化与光催化器件能量效率有待提升。

（三）未来发展趋势

未来将朝着高性能化、多功能化、微型化集成化、智能化方向发展。高性能化方面，通过精准调控载体结构与表面性质、优化负载与掺杂策略，开发新型复合材料提升催化性能；多功能化方面，开发集成化器件实现反应 - 吸附 - 分离一体化，发展多场耦合催化器件突破性能瓶颈；微型化集成化方面，结合微纳加工、3D 打印技术开发微型化阵列化器件，推动与能源存储、传感等组件集成；智能化方面，融合人工智能等技术开发智能响应型器件，实现反应条件精准调控，辅助材料与器件设计。同时需加强产业化技术研究，优化制备工艺，建立统一评价标准，深化基础研究揭示反应与传质规律。

综上所述，多孔碳基催化转化器件高效、低成本且环境友好，具备显著技术优势与广阔应用前景。随着多学科技术融合创新，其必将在能源转化、环境治理、精细化工等领域实现广泛产业化应用，为解决能源危机与环境问题提供有力技术保障。

程、核心原理与技术特点，重点探讨各类方法的调控机制、优化策略及适用场景，为后续器件构建与性能优化奠定基础。

（一）传统制备技术的技术特征与适用场景

传统金刚石薄膜制备技术以高温高压法和早期化学气相沉积法（如热丝 CVD 法）为代表，其核心优势在于技术成熟度高、薄膜结晶质量稳定。高温高压法通过在高温（1200-1500℃）、高压（5-10 GPa）条件下，以石墨为碳源、金属为催化剂实现金刚石的合成，可制备出高结晶度、低缺陷的金刚石厚膜，适用于制备切削工具、磨料等对硬度与耐磨性要求较高的产品。但该方法存在设备成本高昂、难以实现大面积薄膜生长、衬底兼容性差等局限性，仅适用于小尺寸、高性能金刚石制品的制备。

早期热丝 CVD 法通过高温热丝（1800-2400℃）激活碳源气体（如甲烷）与氢气的混合气体，在衬底表面实现金刚石薄膜的沉积，具有设备结构简单、操作便捷、制备成本较低等优势，可实现中大面积薄膜的制备，适用于制备装饰涂层、切削工具涂层等对结晶质量要求相对较低的应用场景。其局限性在于热丝易损耗导致薄膜质量稳定性差、薄膜生长速率较低（通常 $0.1-1 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ）、薄膜内应力较大等问题。

（二）新型制备技术的技术特征与适用场景

新型金刚石薄膜制备技术以微波等离子体 CVD 法、射频等离子体 CVD 法、等离子体辅助 PVD 法为代表，核心优势在于薄膜生长可控性强、结晶质量高、可实现低温生长，适配电子器件、生物医学器件等对薄膜性能要求严苛的应用场景。微波等离子体 CVD 法通过微波放电激活反应气体，产生高密度、高活性的等离子体，可实现金刚石薄膜的高速、高质量生长，且薄膜均匀性优异，适用于制备高性能电子发射器件、热管理器件等核心材料。

射频等离子体 CVD 法通过射频电场激发等离子体，具有生长温度较低（400-800℃）、衬底兼容性广等优势，可在硅、金属、陶瓷等多种衬底上制备金刚石薄膜，适用于制备柔性电子器件衬底、生物医学涂层等。等离子体辅助 PVD 法则结合了 PVD 法的快速制备优势与等离子体的活性调控作用，可制备出兼具高硬度与良好附着力的金刚石薄膜，适用于制备耐磨防护涂层。新型制备技术的局限性在于部分方法设备结构复杂、制备成本较高、规模化生产工艺尚不完善，仍需进一步优化以提升产业化潜力。

二、化学气相沉积（CVD）法制备金刚石薄膜关键技术

（一）热丝化学气相沉积（HFCVD）法

热丝化学气相沉积法是最成熟的金刚石薄膜制备技术之一，其核心原理是在真空腔体中，以钨、钼、钽等耐高温金属丝为热丝，通过电流加热至 1800-2400℃，使热丝表面产生热电子发射与气体解离，将碳源气体（如甲烷、乙炔）与稀释气体（主要为氢气）解离为碳原子、氢原子、甲基等活性物种；这些活性物种在浓度梯度驱动下向衬底表面迁移，在合适的衬底温度（700-900℃）下吸附、扩散并重新组合，最终在衬底表面沉积形成金刚石薄膜。该方法的制备过程主要包括腔体抽真空、衬底预处理、热丝加热、气体通入、薄膜沉积及后处理六个关键步骤。

衬底预处理是提升薄膜附着力与结晶质量的基础环节，常用的预处理方法包括机械研磨、化学刻蚀、离子轰击等。机械研磨通常采用金刚石微粉对衬底表面进行研磨，引入金刚石形核位点，促进金刚石相的形核；化学刻蚀通过酸、碱溶液去除衬底表面的氧化层与杂质，提升衬底与薄膜的结合力；离子轰击则通过氩离子等轰击衬底表面，清洁表面并引入缺陷，进一步增强形核能力。热丝参数与气体配比是影响薄膜生长的核心参数：热丝温度过低，气体解离不充分，难以形成足够的活性物种，导致薄膜生长速率低且石墨相含量高；温度过高，热丝易挥发损耗，污染薄膜并缩短使用寿命。碳源浓度通常控制在 1%-5%（体积分数），浓度过高易导致石墨相析出，降低薄膜结晶质量；浓度过低则生长速率过慢。

HFCVD 法的优势在于：一是设备结构简单、操作便捷、制备成本较低，易于实现中大面积薄膜的制备；二是衬底兼容性较广，可在硅、钼、钨、陶瓷等多种衬底上生长；三是薄膜生长过程易于调控，通过调整热丝温度、衬底温度、气体配比等参数可实现对薄膜厚度、晶粒尺寸的初步调控。其局限性在于：一是热丝易损耗，导致薄膜质量稳定性差，批次差异较大；二是等离子体密度较低，薄膜生长速率较慢（通常 $0.1-1 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ）；三是热丝产生的热辐射使衬底温度分布不均，难以实现大面积薄膜的均匀生长；四是薄膜内应力较大，易出现开裂、脱落现象。HFCVD 法适用于制备装饰涂层、切削工具涂层、耐磨防护涂层等对结晶质量要求相对较低的产品，是目前工业化生产金刚石薄膜的主要技术之一。

（二）微波等离子体化学气相沉积（MPCVD）法

微波等离子体化学气相沉积法是当前制备高质量金刚石薄膜的核心技术，其核心原理是利用微波（常用频率为 2.45 GHz 或 915 MHz）在真空腔体中激发碳源与氢气的混合气体，产生高密度、高活性的等离子体（电子密度可达 10^{11} - 10^{13} cm^{-3} ）；等离子体中的活性物种（如碳原子、氢原子、甲基自由基等）在衬底表面吸附、扩散并发生化学反应，在衬底表面沉积形成金刚石薄膜。与 HFCVD 法相比，MPCVD 法通过微波放电激活气体，无需热丝，避免了热丝损耗带来的薄膜污染问题，同时等离子体密度更高、活性更强，可实现金刚石薄膜的高速、高质量生长。

MPCVD 法的制备过程主要包括腔体抽真空、衬底预处理、微波功率调节、气体通入、等离子体点火、薄膜沉积及后处理七个关键步骤。衬底预处理方法与 HFCVD 法类似，但对预处理精度要求更高，通常采用金刚石微粉研磨结合离子轰击的复合预处理工艺，以提升形核密度与薄膜附着力。微波功率、气体配比、腔体压力、衬底温度是影响薄膜生长的关键参数：微波功率直接决定等离子体密度与活性，功率过低难以形成稳定等离子体，功率过高则易导致等离子体溅射损伤衬底与薄膜；碳源浓度通常控制在 0.5%-3%（体积分数），低于 HFCVD 法，可有效抑制石墨相析出，提升薄膜结晶质量；腔体压力一般为 1-10 kPa，合适的压力可保证等离子体的稳定性与活性物种的有效迁移；衬底温度通常控制在 600-900℃，通过调整微波功率与气体流量实现精准调控。

MPCVD 法的优势在于：一是等离子体密度高、活性强，薄膜生长速率快（可达 $1\text{-}10\ \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ ），且结晶质量优异，可制备出接近天然金刚石的高质量单晶或多晶金刚石薄膜；二是无热丝损耗，薄膜纯度高、质量稳定性好；三是等离子体均匀性优异，可实现大面积（直径可达数十厘米）薄膜的均匀生长；四是薄膜内应力较小，结构完整性好，不易出现开裂现象。其局限性在于：一是设备结构复杂，微波源、真空腔体等核心部件成本高昂，制备成本较高；二是微波功率调节精度要求高，工艺调控难度较大；三是对衬底的平整度与清洁度要求严苛。MPCVD 法适用于制备高性能电子发射器件、热管理器件、生物医学器件等对薄膜结晶质量与性能要求严苛的产品，是目前实验室研究与高端产业化应用的主流技术。

（三）射频等离子体化学气相沉积（RF-CVD）法

射频等离子体化学气相沉积法是一种低温制备金刚石薄膜的重要技术，其核

心原理是通过射频电源（常用频率为 13.56 MHz）在真空腔体中产生射频电场，使碳源与氢气的混合气体发生电离，形成低温等离子体；等离子体中的活性物种在衬底表面发生化学反应，沉积形成金刚石薄膜。该方法的突出优势在于薄膜生长温度较低（400-800℃），可在耐热性较差的衬底上制备金刚石薄膜，显著拓展了衬底的选择范围。

RF-CVD 法的制备过程主要包括腔体抽真空、衬底预处理、射频功率施加、气体通入、等离子体激发、薄膜沉积及后处理六个关键步骤。根据等离子体产生方式的不同，RF-CVD 法可分为电容耦合射频 CVD（CCP-RF-CVD）与电感耦合射频 CVD（ICP-RF-CVD）两种。CCP-RF-CVD 通过平行板电极之间的电容耦合产生等离子体，设备结构简单、操作便捷，但等离子体密度较低；ICP-RF-CVD 通过电感线圈产生的感应磁场激发等离子体，等离子体密度更高、均匀性更好，可实现更高质量薄膜的生长。衬底预处理需根据衬底材质调整，对于耐热性较差的衬底（如玻璃、聚合物），需采用温和的预处理工艺（如等离子体清洁、化学修饰），避免高温损伤衬底。

RF-CVD 法的关键工艺参数包括射频功率、气体配比、腔体压力、衬底温度。射频功率决定等离子体的电离程度与活性，功率过低等离子体稳定性差，功率过高易导致薄膜内应力增大；碳源浓度通常控制在 1%-4%（体积分数），需根据衬底温度调整，低温下适当提高碳源浓度可提升生长速率；腔体压力一般为 0.1-5 kPa，合适的压力可保证等离子体的稳定与活性物种的迁移；衬底温度通过射频功率与气体流量调控，避免超过衬底的耐热极限。该方法的优势在于：一是生长温度低，衬底兼容性广，可在玻璃、聚合物、半导体等多种衬底上生长；二是等离子体均匀性好，可实现大面积薄膜的均匀生长；三是设备成本低于 MPCVD 法，易于规模化推广。其局限性在于：一是薄膜生长速率较慢（通常 $0.05-0.5 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ）；二是薄膜结晶质量略低于 MPCVD 法，石墨相含量相对较高；三是射频放电易产生电荷积累，导致薄膜表面粗糙度增大。RF-CVD 法适用于制备柔性电子器件衬底、低温器件涂层、生物医学涂层等对生长温度敏感的应用场景。

三、其他金刚石薄膜制备关键技术

（一）高温高压（HPHT）法

高温高压法是最早实现人工合成金刚石的技术，其核心原理是模拟天然金刚

石形成的极端条件,在高温(1200-1500℃)、高压(5-10 GPa)下,以石墨为碳源,金属(如铁、镍、钴)或合金为催化剂,通过催化相变反应使石墨转化为金刚石。将该原理拓展至薄膜制备,可通过在衬底表面预置催化剂与碳源,在高温高压条件下实现金刚石薄膜的异质生长。HPHT法制备的金刚石薄膜具有结晶质量高、缺陷密度低、硬度与导热性接近天然金刚石等突出优势。

HPHT法制备金刚石薄膜的过程主要包括衬底预处理、催化剂与碳源预置、高温高压反应、泄压降温及后处理五个关键步骤。衬底预处理需保证表面平整清洁,通常采用机械抛光与化学刻蚀工艺;催化剂与碳源预置通过溅射、蒸发或涂覆等方式,在衬底表面形成均匀的催化剂-碳源复合层;高温高压反应在专用的六面顶或年轮式高压装置中进行,精确控制温度、压力与保温时间,确保石墨充分转化为金刚石并在衬底表面生长;泄压降温过程需缓慢进行,避免因内应力过大导致薄膜开裂;后处理通过酸洗去除残留的催化剂与未反应的碳源,获得高纯度的金刚石薄膜。

HPHT法的优势在于:一是薄膜结晶质量极高,可制备出单晶金刚石薄膜,性能接近天然金刚石;二是薄膜密度大、结构致密,硬度与耐磨性优异;三是生长过程可控性强,可通过调整温度、压力、催化剂种类等参数调控薄膜性能。其局限性在于:一是设备成本高昂,高压装置的制造与维护难度大;二是难以实现大面积薄膜的生长,通常只能制备小尺寸(直径数毫米)薄膜;三是生长温度与压力极高,能耗大,制备成本高;四是衬底兼容性差,仅适用于耐高温、耐高压的硬质衬底(如钨、钼、陶瓷)。HPHT法适用于制备高端切削工具、磨料、高压器件等对性能要求极致的小尺寸产品,在高端精密制造领域具有特定应用价值。

(二) 物理气相沉积(PVD)法

物理气相沉积法通过物理手段将碳源蒸发或溅射,在真空环境中沉积到衬底表面形成金刚石薄膜,核心原理是利用高能粒子轰击碳源,使碳原子脱离碳源表面成为气相粒子,随后气相粒子在衬底表面凝结、成核并生长为薄膜。根据能量输入方式的不同,PVD法可分为溅射沉积法、蒸发沉积法、离子镀膜法等,其中溅射沉积法应用最为广泛。

溅射沉积法(如磁控溅射法)以金刚石或石墨为靶材,在氩气等惰性气体氛围中,通过射频或直流电源产生的等离子体轰击靶材表面,使碳原子被溅射出来并沉积到衬底表面形成金刚石薄膜。为提升薄膜结晶质量,通常采用等离子体辅

助溅射沉积工艺,通过引入氢气等离子体,抑制石墨相析出,促进金刚石相形核。蒸发沉积法以石墨为蒸发源,通过电子束或电阻加热使石墨蒸发,碳原子在衬底表面沉积形成薄膜,该方法生长速率快,但薄膜结晶质量较差,通常需后续退火处理优化性能。离子镀膜法通过在沉积过程中对衬底施加偏压,使气相碳原子获得额外能量,增强其在衬底表面的扩散与成核能力,可制备出附着力强、结构致密的金刚石薄膜。

PVD 法的制备过程主要包括腔体抽真空、衬底预处理、气体通入、源材料激活、薄膜沉积及后处理五个关键步骤。衬底预处理采用等离子体清洁或化学刻蚀,提升表面清洁度与附着力;气体通入需根据沉积方法调整,溅射沉积法通入惰性气体与氢气的混合气体,蒸发沉积法通常为高真空环境;源材料激活通过加热或等离子体轰击实现;后处理采用退火工艺,降低薄膜内应力,提升结晶质量。该方法的优势在于:一是设备结构简单、操作便捷、制备成本较低;二是生长温度较低(300-600℃),衬底兼容性广;三是生长速率快(可达 $0.5\text{--}5\ \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$),易于实现快速制备。其局限性在于:一是薄膜结晶质量较差,石墨相含量较高,难以达到CVD法制备的薄膜性能;二是薄膜厚度均匀性较差,大面积制备难度大;三是薄膜与衬底的附着力相对较弱,易出现脱落现象。PVD法适用于制备耐磨防护涂层、装饰涂层等对结晶质量要求不高的低成本应用场景。

(三) 新型辅助制备技术

为突破传统制备技术的局限,研究者开发了一系列新型辅助制备技术,通过引入外部能量场或改性剂,提升金刚石薄膜的生长质量与效率,主要包括等离子体增强辅助技术、掺杂改性辅助技术、衬底界面调控技术等。等离子体增强辅助技术(如电子回旋共振等离子体辅助CVD法)通过增强等离子体密度与活性,进一步提升薄膜生长速率与结晶质量,可实现金刚石薄膜的低温高速生长;掺杂改性辅助技术通过在生长过程中引入硼、氮、磷等掺杂元素,调控薄膜的电学性能,制备出p型或n型导电金刚石薄膜,拓展其在电子器件领域的应用;衬底界面调控技术通过在衬底与薄膜之间制备过渡层(如钛、铬、碳化硅过渡层),缓解衬底与薄膜之间的晶格失配与热膨胀系数差异,显著提升薄膜的附着力与结构完整性。

此外,激光辅助制备技术通过激光照射增强碳源解离与衬底形核能力,可实现金刚石薄膜的精准局部生长;超声辅助制备技术通过超声振动改善活性物种的

传输与吸附，提升薄膜的均匀性与致密性。这些新型辅助技术的发展，为金刚石薄膜的性能优化与功能拓展提供了新的途径，推动了金刚石薄膜制备技术向精准化、多功能化方向发展。

第二节 电子发射器件

电子发射器件是通过特定物理机制将电子从材料表面激发并发射到真空或介质中的功能器件，广泛应用于平板显示、真空电子器件、X射线源、太赫兹辐射源、场发射扫描电子显微镜等领域。传统电子发射材料如金属、硅、钨等，存在功函数高、发射电流稳定性差、耐高温性能不足等缺陷，难以满足高端电子发射器件对高性能的需求。金刚石作为一种具有独特物理化学性质的碳基材料，具有极低的电子亲和势（甚至可实现负电子亲和势）、超高硬度、优异的热导率、良好的化学稳定性与抗辐照性能，成为制备高性能电子发射器件的理想材料。基于金刚石材料的电子发射器件，凭借其低阈值电压、高发射电流密度、长使用寿命、优异的环境适应性等突出优势，在诸多高端应用领域展现出巨大的发展潜力。本节系统阐述金刚石材料的电子发射机制，重点探讨金刚石电子发射器件的结构设计与制备工艺、性能调控策略、典型器件类型及应用进展，剖析当前器件发展面临的关键科学问题与技术挑战，为高性能金刚石电子发射器件的研发与产业化提供理论指导与技术支撑。

一、金刚石材料的电子发射机制

金刚石材料的电子发射性能与其独特的电子结构密切相关，其电子发射机制主要包括场致发射、热致发射、光致发射及二次电子发射，其中场致发射是金刚石电子发射器件的主流工作机制。不同发射机制的核心差异在于电子获得能量的方式与激发路径，深入理解各类发射机制的本质，是实现金刚石电子发射器件性能优化的基础。

（一）场致发射机制

场致发射是指在强电场作用下，材料表面的电子通过量子隧穿效应克服表面势垒发射到真空或介质中的过程，其核心是量子隧穿效应与电场对表面势垒的调制作用。金刚石材料的场致发射机制具有独特性，这与其极低的电子亲和势密切

相关。电子亲和势是指电子从材料导带底跃迁至真空能级所需的最小能量，传统金属与半导体的电子亲和势通常为正值，而金刚石通过适当的表面处理（如氢终止）可实现负电子亲和势，即导带底能级高于真空能级，电子无需额外能量即可从导带底发射到真空。

氢终止金刚石的场致发射机制可描述为：在外部电场作用下，金刚石体内的电子被激发至导带，由于负电子亲和势特性，导带中的电子可直接隧穿通过表面势垒发射到真空，无需克服额外的能量壁垒。这使得金刚石场致发射器件具有极低的发射阈值电压（通常低于 $10\text{ V}/\mu\text{m}$ ）与高发射电流密度。此外，金刚石的高导电性（掺杂后）与优异的热导率，可确保发射过程中电荷的快速传输与热量的有效散逸，进一步提升发射电流的稳定性与器件的使用寿命。相比之下，正电子亲和势金刚石的场致发射则需要电子获得足够能量克服亲和势壁垒，发射阈值电压更高，但通过掺杂调控与表面改性，仍可实现高效电子发射。

（二）热致发射机制

热致发射是指通过加热材料，使电子获得足够的热动能克服表面势垒发射到真空的过程，其发射电流密度遵循理查森 - 德西曼方程，与材料的功函数、温度密切相关。金刚石材料的功函数较高（本征金刚石功函数约 5.5 eV ），但由于其具有极高的熔点（约 3823 K ）与优异的热稳定性，可在高温环境下稳定工作，因此适用于制备高温热致发射器件。

本征金刚石的热致发射电流密度较低，通过掺杂改性（如氮掺杂、硼掺杂）可降低其功函数，提升热致发射性能。氮掺杂可在金刚石禁带中引入杂质能级，降低电子跃迁所需能量，从而降低功函数；硼掺杂形成 p 型金刚石，通过空穴导电机制改善导电性，同时也可适度降低功函数。此外，金刚石的高导热性可确保加热过程中温度分布均匀，避免局部过热导致器件损坏，提升热致发射的稳定性。热致发射金刚石器件适用于高温、高功率真空电子器件，如高温电子管、离子源等。

（三）光致发射与二次电子发射机制

光致发射是指材料吸收光子能量后，电子被激发至高能级并克服表面势垒发射到真空的过程，其发射效率与光子能量、材料的光吸收系数及电子亲和势相关。金刚石材料的禁带宽度较宽（约 5.5 eV ），仅吸收紫外光等高能光子，因此其光致发射主要响应紫外波段。通过掺杂改性或表面修饰，可窄化金刚石的禁带宽度，拓展其光响应范围，提升光致发射效率。例如，氮掺杂可在禁带中引入杂质能级，

使电子可吸收较低能量的光子跃迁至高能级，实现可见光波段的光致发射。

二次电子发射是指高能电子或离子轰击材料表面时，材料表面的电子获得能量被激发并发射出来的过程，二次电子发射系数是衡量其性能的关键参数。金刚石材料具有较高的二次电子发射系数（通常大于2），这与其独特的电子结构及表面状态相关。氢终止金刚石的二次电子发射系数更高，可达5以上，这是因为负电子亲和势特性降低了二次电子的发射壁垒。高二次电子发射系数的金刚石材料适用于制备二次电子倍增器、光电倍增管等器件，可显著提升器件的电子倍增效率。

二、金刚石电子发射器件的结构设计与制备工艺

金刚石电子发射器件的性能与器件结构设计及制备工艺密切相关。合理的结构设计可优化电场分布、提升电子发射效率与稳定性；先进的制备工艺可确保金刚石薄膜的高质量生长、电极的良好接触及器件的精准组装。根据工作机制与应用场景的不同，金刚石电子发射器件主要包括场致发射器件、热致发射器件、光致发射器件等类型，各类器件的结构设计与制备工艺存在显著差异。

（一）场致发射器件的结构设计

金刚石场致发射器件的核心结构包括发射极、栅极与阳极，根据结构形式可分为平面型、尖端型、阵列型等。平面型结构简单，制备工艺简便，由金刚石薄膜发射极、栅极与阳极组成，电场分布均匀，但发射电流密度相对较低，适用于低功率应用场景。尖端型结构将金刚石制备成尖端形貌（如纳米针、纳米锥），尖端处可形成强电场集中效应，显著降低发射阈值电压，提升发射电流密度，是高性能场致发射器件的主流结构。阵列型结构由大量金刚石尖端组成阵列，可进一步提升发射电流密度与器件的均匀性，适用于平板显示、大面积X射线源等应用场景。

栅极的设计对场致发射性能至关重要，合理的栅极结构可优化电场分布，提升对发射电流的控制能力。常用的栅极结构包括共面栅极、叠层栅极、环形栅极等。共面栅极与发射极位于同一平面，制备工艺简单，但电场控制能力相对较弱；叠层栅极位于发射极与阳极之间，电场控制能力强，可有效调节发射电流，但制备工艺复杂；环形栅极环绕在尖端发射极周围，电场集中效应显著，可实现对单个发射尖端的精准控制，适用于高分辨率器件。此外，阳极的设计需考虑电子的

收集效率，通常采用金属薄膜或导电玻璃作为阳极，表面可涂覆荧光材料（如平板显示器件）或靶材（如 X 射线源器件）。

（二）核心制备工艺

1. 金刚石薄膜的制备 金刚石薄膜的制备是器件制备的基础，常用的制备方法包括化学气相沉积（CVD）法、物理气相沉积（PVD）法等，其中 CVD 法是主流方法，可分为热丝 CVD、微波等离子体 CVD、等离子体增强 CVD 等。热丝 CVD 法设备简单、成本低，通过高温热丝（如钨丝、钼丝）分解碳源气体（如甲烷、乙炔）制备金刚石薄膜，但薄膜的均匀性与结晶度相对较低。微波等离子体 CVD 法通过微波激发等离子体，可制备出结晶度高、均匀性好的金刚石薄膜，适用于高性能器件，但设备成本较高、制备效率较低。

金刚石薄膜的制备需严格控制工艺参数（如反应温度、压力、碳源浓度、衬底材料），以确保薄膜的高质量生长。衬底材料通常选择硅、钼、钨、氧化铝等，需进行预处理（如金刚石籽晶涂层、表面粗糙化）以提升金刚石薄膜的附着力与结晶度。掺杂金刚石薄膜的制备则通过在反应气体中加入掺杂源（如氮源、硼源）实现，氮掺杂源包括氨气、氮气等，硼掺杂源包括三氯化硼、硼烷等。

2. 表面处理工艺 表面处理是提升金刚石电子发射性能的关键步骤，核心目的是实现氢终止或其他功能性修饰，降低电子亲和势。氢终止处理通常采用氢等离子体处理，在 CVD 制备过程中通入过量氢气，或在制备后进行氢等离子体退火，使金刚石表面的碳原子与氢原子结合，形成稳定的氢终止层。氢终止处理可使金刚石实现负电子亲和势，显著降低发射阈值电压。此外，表面粗糙化处理（如等离子体刻蚀、机械研磨）可增加表面比表面积，形成尖端结构，增强电场集中效应，提升发射电流密度。

3. 电极制备与器件组装 电极制备需确保电极与金刚石薄膜的良好欧姆接触，常用的电极材料包括金、银、铂、钛等金属。电极制备方法包括真空蒸镀、溅射、电子束蒸发等，其中溅射法制备的电极附着力强、均匀性好，适用于高性能器件。为提升欧姆接触性能，可在金属电极与金刚石薄膜之间制备过渡层（如钛层、铬层），通过过渡层与金刚石的化学反应形成稳定的化学键，降低接触电阻。

器件组装需根据器件结构进行精准定位与封装，确保发射极、栅极、阳极之间的间距均匀、绝缘良好。对于真空电子发射器件，需进行真空封装，封装过程需严格控制真空度（通常低于 10^{-5} Pa），以减少电子与气体分子的碰撞，提升

发射效率与稳定性。柔性金刚石电子发射器件则采用柔性衬底与柔性封装材料，通过低温制备工艺实现器件的柔性化。

三、金刚石电子发射器件的性能调控策略

金刚石电子发射器件的性能主要取决于发射电流密度、阈值电压、发射稳定性、使用寿命等参数，通过材料改性、结构优化、工艺调控等策略，可实现器件性能的定向优化。性能调控的核心是降低电子发射势垒、提升电荷传输效率、优化电场分布、增强器件的结构稳定性与环境适应性。

（一）材料改性调控

材料改性是提升金刚石电子发射性能的核心策略，主要包括掺杂改性、复合改性与表面改性。掺杂改性通过引入异质元素（如氮、硼、磷等）调控金刚石的电子结构，降低功函数与电子亲和势，提升导电性与发射效率。氮掺杂是最常用的掺杂方式，可在金刚石禁带中引入施主能级，降低电子跃迁能量，实现 n 型导电，同时降低电子亲和势；硼掺杂形成 p 型导电金刚石，通过空穴传输改善导电性，适度降低功函数。掺杂量需精准调控，过量掺杂会导致金刚石结晶度下降，反而降低发射性能。

复合改性通过将金刚石与其他材料（如金属纳米颗粒、碳纳米管、石墨烯等）复合，结合不同材料的优势，实现性能的协同增强。金属纳米颗粒（如金、银、铂）具有良好的导电性与电场集中效应，与金刚石复合后可增强电荷传输，提升电场集中效应，降低发射阈值电压；碳纳米管、石墨烯具有超高导电性与高比表面积，与金刚石复合可形成三维导电网络，加速电荷传输，同时增加发射位点，提升发射电流密度。例如，金刚石 / 碳纳米管复合发射极的发射电流密度是单一金刚石的 3-5 倍，阈值电压降低 20%-30%。

表面改性通过改变金刚石表面的化学状态与形貌，降低电子亲和势，增强电场集中效应。除氢终止处理外，氟终止、氧终止等表面处理也可调控电子亲和势，氟终止可实现更强的负电子亲和势，进一步降低发射阈值；氧终止则使金刚石呈现正电子亲和势，适用于特定发射机制的器件。表面形貌改性通过刻蚀形成纳米尖端、纳米孔等结构，增强电场集中效应，提升发射电流密度，常用的刻蚀方法包括等离子体刻蚀、反应离子刻蚀等。

（二）结构优化调控

结构优化通过调整器件的几何结构与电极配置，优化电场分布，提升电子发射效率与控制能力。对于尖端型发射极，尖端的曲率半径、高度、间距等参数对发射性能影响显著，曲率半径越小、高度越高，电场集中效应越强，阈值电压越低，但过高的尖端易导致结构不稳定；发射极阵列的间距需合理设计，避免相邻尖端之间的电场干扰，通常间距为尖端高度的 2-3 倍。

栅极结构的优化可显著提升电场控制能力，叠层栅极的栅极 - 发射极间距越小，电场控制能力越强，但间距过小易导致短路；环形栅极的内径与宽度需与发射尖端匹配，确保电场均匀环绕尖端，实现精准控制。此外，通过引入绝缘层（如氧化铝、氧化硅）优化电极与金刚石之间的绝缘性能，可减少漏电流，提升发射稳定性。三维结构设计（如立体栅极、多孔电极）可进一步优化电场分布，提升器件的集成度与发射性能。

（三）工艺参数调控

工艺参数调控通过优化金刚石薄膜制备、表面处理、电极制备等工艺的参数，提升材料质量与器件性能。在金刚石薄膜制备过程中，调控反应温度、压力、碳源浓度可优化薄膜的结晶度与掺杂均匀性，例如适当提高反应温度可提升结晶度，但温度过高易导致衬底变形；控制碳源浓度可避免薄膜中出现石墨相杂质，确保金刚石的纯相结构。

表面处理工艺参数（如等离子体功率、处理时间、气体比例）需精准调控，以确保表面终止层的均匀性与稳定性，例如氢等离子体处理功率过高或时间过长会导致金刚石表面损伤，降低发射性能。电极制备工艺中，调控溅射功率、沉积温度可提升电极的附着力与导电性，避免高温沉积导致金刚石薄膜损伤。器件组装过程中，控制电极间距、封装真空度可优化电场分布与电子传输环境，提升发射稳定性。

第三节 热管理器件

随着电子信息技术向高集成度、高功率密度方向快速发展，电子器件的热密度持续攀升，过热问题已成为制约器件性能提升、寿命延长及可靠性保障的核心瓶颈。热管理技术的核心目标是实现热量的高效传导与散逸，而高性能热管理材料是构建先进热管理器件的基础。金刚石作为碳基材料家族的重要成员，具有极致的热学性能，其室温热导率高达 $2000\text{--}2200\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，远超传统热管理材料如铜 ($401\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)、铝 ($237\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 及碳化硅 ($490\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)，同时兼具优异的电学绝缘性、化学稳定性、机械硬度及高温稳定性，成为高端热管理领域的理想材料。基于金刚石的热管理器件通过精准的结构设计与制备工艺，可实现热量的高效传输与定向散逸，广泛应用于高功率半导体器件、航空航天电子系统、新能源装备等高端领域。本节系统梳理金刚石热管理器件的核心类型、工作机制、制备工艺及性能优化策略，深入探讨器件集成过程中的关键科学问题与技术突破路径，为金刚石热管理器件的定向设计与产业化推进提供理论与技术支撑。

一、金刚石热管理器件的核心类型与工作机制

金刚石热管理器件根据应用场景与散热需求的差异，主要分为金刚石散热片、金刚石复合散热基板、金刚石微通道散热器及金刚石热沉等核心类型。不同类型器件的结构设计与工作机制各具特色，但核心均依托金刚石的高导热特性，通过构建高效的热传导路径，实现热量从热源到散热终端的快速传输与散逸。其工作机制本质上是 phonon（声子）的高效输运过程，金刚石晶体中碳原子以 sp^3 杂化紧密结合，晶格结构规整，声子散射概率低，使得热导率处于材料体系的顶端水平，为高效热管理提供了核心支撑。

（一）金刚石散热片与热沉器件

金刚石散热片是最基础的金刚石热管理器件，通常为片状金刚石材料（天然金刚石或化学气相沉积（CVD）金刚石薄膜/厚膜），直接贴合于热源表面，通过热传导方式将热量从热源快速导出，再传递至后续散热结构。其工作机制为“热源-金刚石散热片-外部散热系统”的单向热传导，核心优势在于结构简单、热传导效率高、响应速度快，适用于高功率密度芯片、激光二极管等小型化热源的

近距离散热。例如，在高功率 GaN HEMT 器件中，将 CVD 金刚石散热片贴合于器件背面，可使器件的结温降低 30-50℃，显著提升器件的功率容量与长期稳定性。

金刚石热沉器件则是在散热片基础上发展的集成化热管理组件，通常由金刚石散热层、金属连接层及基底支撑层构成，兼具高效导热与结构支撑功能。金属连接层（如 Ti、Cr、Au 等）用于实现金刚石与基底或热源的可靠连接，降低界面热阻；基底支撑层（如铜、铝、陶瓷等）则提供机械支撑与后续散热通道。金刚石热沉的工作机制是通过多层结构的协同作用，实现热量的高效传导与分散，适用于航空航天、卫星通信等对器件可靠性与环境适应性要求极高的领域。目前，CVD 金刚石热沉的热导率可稳定达到 1500-1800 W/(m·K)，界面热阻可低至 5-10 m²·K/GW，远优于传统铜基热沉。

（二）金刚石复合散热基板与微通道散热器

金刚石复合散热基板是为解决纯金刚石材料成本高、尺寸受限等问题而发展的新型热管理器件，通过将金刚石与其他材料（如铜、铝、陶瓷、聚合物等）复合，构建兼具高导热、低成本、良好加工性的复合散热结构。其工作机制是利用金刚石的高导热网络实现热量的快速传导，复合基体则提供结构支撑与加工适配性，适用于大规模集成电路、新能源汽车功率模块等对成本与尺寸有严格要求的场景。例如，金刚石 / 铜复合散热基板的热导率可达 600-800 W/(m·K)，较传统铜基板提升 50%-100%，且成本仅为纯金刚石基板的 1/3-1/2。

金刚石微通道散热器则针对超高功率密度器件的散热需求，通过在金刚石或金刚石复合基板上制备微通道结构（通道尺寸通常为 10-100 μm），结合流体冷却技术，实现“热传导 + 对流散热”的协同散热。其工作机制为：热源产生的热量通过金刚石基板快速传导至微通道壁面，流经微通道的冷却流体（如水、乙二醇溶液、液态金属等）通过对流作用将热量带走，实现高效散热。该类型器件的散热功率密度可达 1000 W/cm² 以上，适用于超高功率激光器件、量子计算机等极端散热需求场景。

二、金刚石热管理器件的关键制备工艺

金刚石热管理器件的性能与制备工艺密切相关，核心制备环节包括金刚石材料制备、器件结构成型、界面连接与封装等。其中，CVD 金刚石薄膜 / 厚膜的制备是核心基础，界面连接技术是降低界面热阻的关键，器件结构成型则决定散热

效率的发挥。不同类型金刚石热管理器件的制备工艺存在差异，但均需兼顾金刚石材料的特性与器件的应用需求，实现材料性能与结构功能的协同优化。

（一）CVD 金刚石的制备工艺

CVD 技术是制备金刚石热管理材料的主流方法，通过在高温高压或低压等离子体环境下，使碳源气体（如甲烷、乙炔、甲醇等）分解并在衬底表面沉积形成金刚石薄膜或厚膜。根据等离子体产生方式的差异，常用的 CVD 技术包括微波等离子体化学气相沉积（MPCVD）、热丝化学气相沉积（HFCVD）、直流等离子体化学气相沉积（DC CVD）等，其中 MPCVD 技术因制备的金刚石薄膜具有结晶质量高、热导率高、表面平整度好等优势，成为高端金刚石热管理器件的首选制备技术。

MPCVD 制备金刚石热管理材料的核心工艺参数包括反应气体比例（如甲烷/氢气比例通常为 1%-5%）、反应压力（10-100 kPa）、微波功率（1-10 kW）、衬底温度（800-1200℃）及沉积时间。通过优化工艺参数，可制备出厚度从几微米到毫米级的金刚石薄膜/厚膜，热导率可达 1800-2000 W/(m·K)。衬底材料的选择也至关重要，常用衬底包括硅、钼、钨、碳化硅等，其中硅衬底因与半导体工艺兼容性好，常用于集成电路散热器件；钼、钨衬底则因耐高温、与金刚石结合性好，适用于厚膜金刚石热沉的制备。

HFCVD 技术则具有设备简单、成本低廉、沉积速率快等优势，适用于规模化制备中低端金刚石热管理材料。其通过高温热丝（如钨丝、钼丝）加热分解碳源气体，在衬底表面沉积金刚石薄膜，沉积速率可达 1-5 $\mu\text{m/h}$ ，较 MPCVD 技术更高。但 HFCVD 制备的金刚石薄膜结晶质量相对较低，热导率通常为 1000-1500 W/(m·K)，适用于对热导率要求相对较低的散热场景。

（二）界面连接与器件成型工艺

界面连接是金刚石热管理器件制备的关键环节，界面热阻的大小直接影响器件的整体散热性能。由于金刚石表面化学惰性强，与金属、陶瓷等材料的润湿性差，难以形成牢固的界面结合，因此需要通过界面改性与专用连接工艺提升界面结合强度，降低界面热阻。常用的界面连接工艺包括金属化连接、钎焊连接、扩散焊接及聚合物粘接等。

金属化连接是最常用的界面处理技术，通过在金刚石表面沉积金属过渡层（如 Ti、Cr、W、Ni 等），实现金刚石与金属基底的可靠连接。例如，采用磁控溅射

技术在金刚石表面沉积 Ti 层, Ti 与金刚石表面的氧发生反应生成 TiO_2 , 同时与碳形成 TiC , 形成牢固的化学结合, 再沉积 Au 层作为后续焊接的过渡层, 可使界面热阻降低至 $5\text{--}8 \text{ m}^2 \cdot \text{K/GW}$ 。钎焊连接则通过高温钎料(如 Ag-Cu-Ti 钎料)的熔化与凝固, 实现金刚石与金属或陶瓷基底的连接, 适用于高温环境下的热管理器件, 连接强度高, 界面热阻可低至 $3\text{--}5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/GW}$ 。

器件成型工艺则根据器件类型的差异采用不同的技术, 如金刚石散热片的成型主要包括沉积、切割、抛光等环节, 通过激光切割或金刚石砂轮切割将沉积的金刚石厚膜加工成所需尺寸, 再通过化学机械抛光(CMP)提升表面平整度, 表面粗糙度可控制在 nm 级; 金刚石微通道散热器的成型则需结合光刻、刻蚀等微纳加工技术, 在金刚石基板上制备精准的微通道结构, 常用刻蚀技术包括反应离子刻蚀(RIE)、感应耦合等离子体刻蚀(ICP)等, 可实现微通道尺寸精度控制在 $1 \mu\text{m}$ 以内。

三、金刚石热管理器件的性能优化策略

尽管金刚石热管理器件具有优异的散热潜力, 但目前其性能仍受限于金刚石材料质量、界面热阻、结构设计及制备工艺等因素, 制约了其产业化应用。针对这些关键问题, 研究者提出了一系列性能优化策略, 包括金刚石材料的质量提升、界面热阻的精准调控、器件结构的创新设计及复合体系的构建等, 通过多维度协同优化, 实现器件散热性能的最大化。

(一) 金刚石材料质量的提升策略

金刚石材料的热导率与其结晶质量、杂质含量、缺陷密度密切相关, 结晶质量越高、杂质含量越低、缺陷密度越小, 热导率越高。因此, 提升金刚石材料质量是优化热管理器件性能的基础。通过优化 CVD 制备工艺参数, 可显著提升金刚石的结晶质量, 例如, 降低甲烷浓度、提高反应温度、优化等离子体密度, 可减少金刚石中的非金刚石相(如石墨、无定形碳)含量, 降低缺陷密度; 采用高纯度碳源与氢气, 可减少氮、氧等杂质的引入, 进一步提升热导率。

此外, 通过后处理工艺也可提升金刚石材料的质量, 如高温退火处理($1500\text{--}2000^\circ\text{C}$, 惰性气氛)可消除金刚石中的内应力, 减少缺陷密度, 使热导率提升 $10\%\text{--}20\%$; 化学刻蚀处理(如使用氢等离子体、混合酸溶液)可去除金刚石表面的非金刚石相杂质, 提升表面平整度与化学惰性, 有利于后续界面连

接。对于 CVD 金刚石厚膜，通过控制晶粒尺寸与取向，制备择优取向的金刚石厚膜，可进一步提升热导率，如（100）取向的金刚石厚膜热导率较随机取向的提升 20%-30%。

（二）界面热阻的调控策略

界面热阻是影响金刚石热管理器件整体性能的关键瓶颈，其主要来源于金刚石与连接材料之间的界面间隙、化学反应层及晶格失配。针对这些问题，界面热阻的调控策略主要包括界面改性、连接材料优化及连接工艺精准控制。界面改性通过在金刚石表面引入功能性过渡层，增强与连接材料的化学结合，减少界面间隙，例如，采用等离子体处理在金刚石表面引入羟基、羧基等官能团，提升与聚合物粘接剂的相容性；沉积 Ti、Cr 等过渡金属层，形成稳定的金属碳化物结合层，增强与金属的结合强度。

连接材料的优化则通过选择与金刚石热膨胀系数匹配、导热性能优异的连接材料，减少界面热应力与热阻，例如，Ag-Cu-Ti 钎料因热导率高、与金刚石结合性好，被广泛用于高温热管理器件的连接；石墨烯、类金刚石碳（DLC）等碳基过渡层因与金刚石的晶格匹配度高，可显著降低界面热阻，将界面热阻控制在 $3 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{GW}$ 以下。连接工艺的精准控制则通过优化焊接温度、压力、保温时间等参数，减少界面反应层的厚度，避免生成低导热的反应产物，例如，钎焊温度过高会导致过渡金属与金刚石过度反应，生成厚的金属碳化物层，增加界面热阻，因此需将温度控制在合理范围。

（三）器件结构的创新设计策略

器件结构的创新设计可通过优化热传导路径、增强对流散热效率，进一步提升散热性能。对于金刚石散热片与热沉，采用异形结构设计（如曲面、凹槽）可增加与热源的接触面积，减少接触热阻；在金刚石表面制备微纳纹理结构，可增强与散热介质的相互作用，提升辐射散热效率。对于金刚石微通道散热器，通过优化微通道的尺寸、形状、排列方式及进出口结构，可提升流体的流动特性与对流散热效率，例如，采用分叉式微通道结构，可使散热效率提升 30% 以上；将微通道与 fins（翅片）结构结合，可进一步增大散热面积，提升散热性能。

此外，构建多级散热结构也是提升器件性能的有效策略，例如，金刚石散热片 + 微通道散热器的多级结构，可实现近距离导热与远距离对流散热的协同，适用于超高功率密度器件；金刚石 / 金属复合基板与热管、散热风扇的集成，可构

建主动 - 被动协同的散热系统，提升散热的稳定性与可靠性。通过有限元模拟等仿真技术，可实现器件结构的精准设计与优化，减少实验成本，提升研发效率。

第四节 生物医学器件

生物医学器件是现代医学诊断、治疗与健康监测的核心支撑，其性能直接关乎医疗效果与患者安全。传统生物医学器件材料多存在生物相容性差、抗菌性能不足、机械强度低等缺陷，难以满足复杂生理环境下的长期应用需求。金刚石作为独特碳基材料，尤其是 CVD 制备的金刚石薄膜及纳米金刚石，具备优异生物相容性、良好抗菌活性、超高机械强度、极佳化学稳定性，且可通过掺杂调控电学性能，成为构建高性能生物医学器件的理想材料。金刚石生物医学器件借助材料特性与结构设计，实现生物信号精准检测、疾病靶向治疗及生理过程长期监测，广泛应用于植入式器件、生物传感、抗菌器械等领域。本节系统阐述其构建原理、核心制备技术、主要类型及应用展望，剖析性能调控机制与临床转化瓶颈，为优化设计与产业化应用提供理论支撑。

一、金刚石生物医学器件的构建原理与核心特性

金刚石生物医学器件的功能实现依赖金刚石本征性能与表面功能化修饰的协同作用，核心是通过合理材料选择、结构与表面改性，兼顾生物相容性、生物活性与器件功能。本节从构建原理、核心特性及性能评价指标三个维度，解析其基础理论体系。

（一）核心构建原理

构建遵循“材料本征性能 - 表面功能化 - 生物功能实现”核心逻辑，包含生物相容性调控与生物功能实现两大机制。生物相容性调控上，金刚石表面惰性可减少非特异性反应与组织排斥，通过引入羟基、羧基等活性官能团，可调控表面亲疏水性与电荷性质，促进细胞粘附增殖。生物功能实现上，依需求适配材料选择与结构设计：植入式器件借助其超高机械强度保障长期稳定；生物传感器件通过掺杂调控电学性能实现信号转换；抗菌器件利用表面活性物种或纳米结构破坏细菌细胞膜；组织工程支架依托三维孔结构提供细胞生长空间。此外，其良好导热性可用于热疗，优异光学性能可用于诊疗一体化器件。

（二）关键核心特性

相较于传统材料，金刚石具备六大核心优势：一是优异生物相容性，表面惰性且可精准功能化，减少组织排斥，长期植入无明显毒性；二是高效抗菌活性，纳米金刚石或表面改性金刚石可破坏细菌细胞膜，抗菌率超 95%，降低植入感染风险；三是超高机械性能，硬度达 100 GPa，弹性模量超 1000 GPa，耐磨性极佳，承受生理载荷与摩擦；四是极佳化学稳定性，在生理体液、酸碱及酶解环境中不降解腐蚀，长期性能稳定；五是可调控电学性能，硼、氮掺杂可实现从绝缘体到导体的转变，BDD 材料导电性与电化学稳定性优异，适用于传感与电刺激器件；六是良好导热与光学性能，热导率达 2000 W/(m · K)，可用于热疗；紫外至红外区域透光性好，适用于光学成像与光动力治疗。

（三）性能评价指标

核心性能评价指标包括生物相容性、抗菌性能、机械性能、化学稳定性、功能性能及长期稳定性。生物相容性通过细胞毒性、溶血、植入实验评估，要求细胞存活率不低于 80%，溶血率低于 5%，长期植入无明显炎症；抗菌性能以抗菌率与耐久性表征，抗菌率不低于 90%，多次消毒或长期浸泡后衰减不超 10%；机械性能依器件类型评估，植入式承重器件需满足特定硬度、弹性模量要求；化学稳定性通过模拟生理环境长期浸泡验证，无明显降解腐蚀；功能性能依用途评估，如传感器的灵敏度、响应时间，电刺激器件的刺激稳定性；长期稳定性要求生理环境下连续工作 1 年以上性能保留率不低于 85%。此外还需评价加工精度、表面粗糙度及生物体适配性，综合优化保障临床价值。

二、金刚石生物医学器件的核心制备技术

金刚石生物医学器件制备为多环节协同系统工程，核心技术包括金刚石材料制备与改性、器件结构成型与加工、表面功能化修饰三个关键环节，技术选择直接影响器件性能与临床适用性。本节阐述各环节关键技术原理、优缺点及应用场景。

（一）金刚石材料的制备技术

用于生物医学器件的金刚石材料主要包括金刚石薄膜、纳米金刚石及多孔金刚石，制备以 CVD 法为主，辅以 HPHT 法、爆轰法等。CVD 法是制备金刚石薄膜的主流，通过高温低压下碳源气体分解沉积形成，常用 MPCVD、HFCVD、

DCPJ-CVD 等技术。MPCVD 法制备的薄膜纯度高、结晶好、表面平整,适用于高性能器件,但设备成本高、效率低;HFCVD 法设备简单、成本低、效率高,可制备大面积薄膜,但纯度与结晶质量略逊;DCPJ-CVD 法沉积速度快,适用于厚膜制备,但均匀性待提升。HPHT 法可制备高质量金刚石颗粒或块状体,适用于小型植入式器件,但能耗高、成本高,难制备大面积薄膜。爆轰法是制备纳米金刚石的主要方法,效率高、成本低,可批量制备,适用于抗菌涂层、药物载体等,但产物纯度低,需后续提纯。多孔金刚石通过模板法或选择性刻蚀法制备,适用于组织工程支架。

(二) 器件的结构成型与加工技术

金刚石的高硬度与高脆性增加了加工难度,常用加工技术包括激光加工、等离子体刻蚀、机械研磨抛光及精密磨削等。激光加工利用高能量激光实现切割、钻孔、刻蚀,可制备复杂精细结构,精度高、效率高,适用于微型植入器件、传感器芯片等,但易产生热损伤,需后续抛光;等离子体刻蚀通过活性粒子与金刚石化学反应实现选择性去除,可制备高精度微纳结构,加工温和损伤小,适用于微纳传感器,但效率低、设备成本高;机械研磨抛光通过金刚石磨料提升表面平整度与光洁度,适用于对表面质量要求高的植入式器件,如人工关节、牙科种植体,但加工周期长、成本高,难加工复杂结构;精密磨削采用超硬磨料砂轮实现高精度平面或曲面加工,适用于大面积器件,但易产生裂纹影响机械强度。纳米金刚石可通过分散、成型、烧结等技术制备涂层或块状器件,涂层制备常用喷涂、电泳沉积等方法,操作简便成本低。

(三) 器件的表面功能化修饰技术

表面功能化修饰是提升金刚石生物相容性、生物活性与功能特性的关键,通过引入生物活性官能团、生物分子或抗菌涂层,实现与生物体精准相互作用。常用技术包括等离子体处理、化学刻蚀、硅烷化反应、酰胺化反应及生物分子接枝等。等离子体处理通过氧气、氨气等引入羟基、氨基,提升亲水性与生物活性,操作简便快速,适用于批量处理,但官能团分布均匀性待提升;化学刻蚀通过强酸强碱或氧化剂引入官能团,调控表面粗糙度增强细胞粘附,适用于组织工程支架或植入式器件,但需严格控制条件避免过度刻蚀;硅烷化反应通过硅烷偶联剂引入氨基、环氧基,为生物分子接枝提供位点,结合牢固稳定性高,适用于生物传感器,但反应过程复杂;酰胺化反应实现抗体、多肽等生物分子共价接枝,提

升特异性识别能力,适用于传感与靶向治疗器件,但生物分子活性易受反应条件影响;抗菌涂层修饰沉积银纳米颗粒、氧化锌等,增强抗菌性能,适用于植入式器件与抗菌器械,但需保障涂层稳定性与生物安全性。

三、金刚石生物医学器件的主要类型与应用机制

根据应用场景与功能需求,金刚石生物医学器件可分为植入式医疗器件、生物传感器件、抗菌医疗器械、组织工程支架四大类,各类器件结构设计、应用机制与性能要求差异显著。本节阐述各类器件核心结构、应用机制及性能特点。

(一) 植入式医疗器件

植入式医疗器件用于替代受损组织、修复生理功能或长期监测生理信号,核心要求优异生物相容性、机械稳定性与耐腐蚀性,应用于人工关节、牙科种植体、心脏起搏器电极等领域。人工关节与牙科种植体利用金刚石超高机械强度、耐磨性与生物相容性,通过表面抛光与功能化减少磨损与组织排斥,使用寿命超15年,远高于传统金属关节。心脏起搏器与神经刺激电极采用BDD作为电极材料,利用其优异导电性、电化学稳定性与生物相容性,实现电信号精准传输与生理信号长期监测,减少生物污染与炎症反应。例如BDD神经刺激电极可精准刺激神经细胞,治疗帕金森病、癫痫等,长期植入仍保持稳定性能。此外,金刚石还可用于植入式温度、压力传感器,实现生理信号精准检测。

(二) 生物传感器件

金刚石生物传感器件利用其电学、光学性能与表面功能化,实现生物分子、细胞或生理信号精准检测,核心要求高灵敏度、高选择性、快速响应与良好生物相容性,应用于疾病标志物检测、病原体检测、血糖检测等领域。电化学生物传感器以BDD为工作电极,通过接枝抗体、核酸适配体等特异性识别分子,实现目标生物分子检测,如BDD葡萄糖传感器接枝葡萄糖氧化酶,检测限低至微摩尔级,响应时间小于10秒,抗干扰能力强。光学生物传感器利用金刚石NV色心独特荧光特性,实现单分子检测与细胞内成像,检测灵敏度达单分子水平,适用于早期疾病诊断。此外,金刚石还可用于FET生物传感器,通过生物分子与表面相互作用调控电学性能,实现快速检测,适用于便携式设备开发。

(三) 抗菌医疗器械

抗菌医疗器械利用金刚石抗菌活性,通过表面改性或涂层修饰抑制细菌粘附

增殖，降低医疗感染风险，核心要求高效持久抗菌性能与良好生物相容性，应用于医用导管、手术器械、伤口敷料等领域。纳米金刚石涂层医用导管通过物理穿刺破坏细菌细胞膜，抗菌率超 99%，显著降低导管相关感染发生率。金刚石涂层手术器械兼具优异抗菌性能与超高耐磨性、锋利度，提升手术效率，减少创伤。伤口敷料负载纳米金刚石或金刚石涂层，实现抗菌与促进伤口愈合双重功能，纳米金刚石抑制细菌生长，同时促进成纤维细胞增殖与血管再生。植入式器件表面金刚石抗菌涂层可长期抑制细菌粘附，降低植入感染风险，如人工心脏瓣膜、骨科植入物等，长期植入感染率显著低于传统器件。

（四）组织工程支架

组织工程支架利用多孔金刚石三维孔结构与生物相容性，为细胞生长提供支撑与营养传输通道，引导组织再生，核心要求合适孔径、孔隙率、生物相容性与机械稳定性，应用于骨、软骨、皮肤组织工程等领域。多孔金刚石骨组织工程支架通过模板法制备，孔径 100-500 μm ，孔隙率大于 70%，实现骨细胞粘附、增殖与分化，超高机械强度支撑骨再生过程机械载荷，加速骨缺损修复，表面接枝 BMP 等生长因子可进一步促进骨再生。软骨组织工程支架通过调控孔径与孔隙率，实现软骨细胞定向生长与软骨组织再生。皮肤组织工程支架负载纳米金刚石与生长因子，实现抗菌与促进皮肤再生，适用于烧伤、创伤等皮肤缺损修复。此外，多孔金刚石还可用于神经组织工程支架，引导神经细胞生长与轴突延伸，治疗神经损伤。

四、金刚石生物医学器件的应用领域与发展展望

金刚石生物医学器件凭借优异生物相容性、机械性能、化学稳定性及可调控功能特性，在临床诊断、治疗、组织修复等领域展现广阔前景，同时面临性能优化、临床转化、成本控制等挑战。本节阐述应用领域，分析现存问题，展望发展趋势。

（一）主要应用领域

临床治疗领域，器件可用于组织修复与替代、靶向治疗、神经调控等方向。组织修复与替代方面，金刚石人工关节、牙科种植体等提升治疗效果与患者生活质量；靶向治疗方面，纳米金刚石作为药物载体实现药物靶向递送与可控释放，减少副作用，适用于肿瘤等治疗；神经调控方面，金刚石神经刺激电极治疗帕金森病、癫痫等神经系统疾病。临床诊断领域，生物传感器件用于疾病早期诊断、

病原体检测、生理指标监测，基于 NV 色心的传感器实现单分子水平疾病标志物检测，电化学传感器快速检测病原体，血糖、心率传感器实现生理指标实时监测。健康护理与医用器械领域，抗菌医疗器械降低感染风险，口腔护理产品预防口腔疾病，伤口敷料加速愈合，还可用于医用机器人精密部件、放射治疗剂量探测器等。

（二）当前存在的问题与挑战

实际应用与临床转化中面临五大挑战：一是制备成本高昂，金刚石制备与加工需复杂设备与工艺，高质量 CVD 金刚石薄膜与精密加工器件成本远高于传统材料，制约产业化；二是加工难度大，高硬度与高脆性导致加工复杂、效率低，难制备复杂形状与大面积器件；三是长期生物安全性需深入评估，短期生物相容性已验证，但长期植入后表面功能化基团稳定性、降解产物毒性等仍需系统研究；四是表面功能化技术待优化，存在官能团分布不均、生物分子活性保留率低、修饰层稳定性差等问题；五是临床转化难度大，需严格临床试验验证，且缺乏统一性能评价标准与制备工艺规范，规模化生产技术不成熟，难以满足批量临床需求。

第七章 碳基复合材料与器件

第一节 复合界面设计

碳基复合材料由碳基材料（石墨烯、碳纳米管、多孔碳等）与金属、陶瓷、聚合物等复合而成，通过组分协同效应突破单一材料性能局限，在柔性电子、能源存储等领域应用广泛。复合界面作为连接不同组分的核心单元，直接决定结合强度、载荷 / 电荷传递效率及界面稳定性，进而影响材料力学、电学等综合性能。因此，界面精准设计与调控是制备高性能碳基复合材料的核心前提，也是其器件产业化的关键瓶颈。本节系统梳理碳基复合材料界面的结构特征与作用机制，探讨界面设计原则、调控策略及表征技术，分析界面设计与材料性能的构效关系，为高性能材料制备与器件应用奠定基础。

一、碳基复合材料界面的结构特征与作用机制

碳基复合材料界面是具有特定结构与性能的纳米至微米级过渡区域，其结构与形成机制受碳源类型、基体特性及复合工艺影响。按结合方式可分为物理结合、化学结合及物理 - 化学协同结合三类，不同类型界面的结构特征与作用机制差异显著，直接决定材料宏观性能。深入理解界面结构与作用机制，是实现精准设计的基础，先进表征技术的应用为界面机制研究与设计优化提供了有力支撑。

（一）界面的核心结构特征

物理结合界面依靠范德华力、氢键等物理作用结合，过渡区域窄，组分间无化学键连接，存在明显物理边界，结合强度较弱，结构稳定性差，易发生界面分离，如未改性碳纳米管与聚合物形成的界面。化学结合界面通过共价键、离子键连接，过渡区域存在化学键结合的过渡层，组分边界模糊，结合紧密，能高效实现载荷与电荷传递，如氧化改性石墨烯与聚合物通过共价键形成的界面。

物理 - 化学协同结合界面兼具物理吸附与化学键作用，是最常见的界面类型，结合强度与稳定性优于单一结合形式。例如碳纳米管 / 金属基复合材料中，碳纳

米管表面改性引入金属亲和性官能团，同时金属原子形成物理吸附层，通过协同作用提升界面结合强度与载荷传递效率。

（二）界面的核心作用机制

界面核心作用机制包括载荷传递、电荷转移、热传导及界面稳定，分别对应材料不同性能的调控。载荷传递机制决定力学性能，通过界面将载荷从基体传递至碳基增强相，化学结合界面依靠化学键实现高效传递，物理结合界面则依赖摩擦力，传递效率较低。电荷转移机制影响电学性能，化学结合界面电子态连续，电荷转移阻力小，物理结合界面存在电荷势垒，传递效率低。

热传导机制通过界面实现热量传递，界面结合强度越高、缺陷越少，热传导效率越高，化学结合界面热阻更小，热传导性能更优。界面稳定机制保障材料服役耐久性，通过抑制组分扩散、化学反应及结构劣化维持界面稳定，化学结合界面因强化学键作用稳定性更好，物理结合界面易在环境因素作用下分离，合理过渡层设计可缓解热膨胀系数差异，减少界面应力，提升稳定性。

二、碳基复合材料界面设计的核心原则

碳基复合材料界面设计的核心目标是通过界面结构调控实现组分协同增效，提升综合性能，需遵循相容性匹配、载荷 / 电荷高效传递、界面稳定性及功能导向四大核心原则。这些原则相互关联制约，共同指导设计策略制定与优化：相容性匹配是基础，保障组分结合效果；载荷 / 电荷传递是核心，实现性能强化；界面稳定性是关键，确保长期服役能力；功能导向明确设计方向，实现性能定制。

（一）相容性匹配原则

相容性匹配指碳基材料与基体在化学、物理及结构特性上的适配性，包括化学、物理与结构相容性。化学相容性要求组分间不发生有害化学反应，避免生成低强度产物破坏界面，如碳纳米管 / 铝基复合材料需避免高温下生成 Al_4C_3 脆性相。物理相容性重点关注热膨胀系数、密度等参数匹配，尤其是热膨胀系数差异过大会导致制备或服役过程中产生界面应力，引发开裂分离，可通过过渡层设计缓解。

结构相容性要求微观结构适配，形成连续过渡区域，如多孔碳的多孔结构可与聚合物形成互锁结构提升结合强度。实现相容性匹配可通过碳基材料表面改性、基体改性或引入过渡层，如氧化改性调整碳基材料表面化学性质，添加增塑剂优化聚合物基体物理特性。

（二）载荷 / 电荷高效传递原则

该原则要求界面实现载荷或电荷的高效传递，充分发挥组分性能优势。力学增强型复合材料需高界面结合强度，确保载荷从基体有效传递至碳基增强相，如碳纤维增强聚合物复合材料通过界面改性提升结合强度，进而增强拉伸与弯曲性能。导电 / 导热型复合材料需构建良好传输通道，减少能量损耗，如石墨烯 / 金属基复合材料通过化学结合构建电子传输通道提升导电性，碳纳米管 / 陶瓷基复合材料优化界面减少热阻提升热导率。

实现高效传递的关键是构建稳定界面结构，减少缺陷与传输阻力，化学结合界面是理想选择，梯度结构过渡层可实现载荷 / 电荷平稳传递，降低能量损耗。

（三）界面稳定性原则

界面稳定性要求界面在制备、服役及长期使用过程中保持结构与性能稳定，避免劣化导致材料性能下降，包括化学、热、力学及环境稳定性。化学稳定性避免界面氧化、腐蚀等有害变化；热稳定性保障温度变化时结构稳定，不发生热分解或相变；力学稳定性抵抗反复力学载荷，不出现开裂分离；环境稳定性抵御湿度、化学介质等侵蚀。

提升界面稳定性可通过界面改性、引入防护涂层及优化复合工艺实现，如包覆抗氧化涂层提升化学与环境稳定性，优化工艺减少界面缺陷增强力学稳定性，引入高温稳定过渡层缓解热膨胀系数差异提升热稳定性。

（四）功能导向设计原则

功能导向设计围绕具体应用需求定制界面结构与性能，不同领域对材料性能需求差异显著。柔性电子器件要求材料具备良好柔性与拉伸性能，界面需采用柔性结构减少刚性，提升变形能力；能源存储器件需高导电与离子传输性能，界面需构建高效传输通道提升储能效率；生物医学器件需良好生物相容性与抗菌性，界面需引入生物活性官能团。

功能导向设计需明确核心性能指标，制定针对性调控策略。如组织工程支架需重点提升生物相容性与细胞黏附性，可在界面引入羟基磷灰石等生物活性组分；航空航天结构材料需强化力学性能与高温稳定性，可构建高强度化学结合界面与高温稳定过渡层。

三、碳基复合材料界面的调控策略

碳基复合材料界面调控策略主要包括碳基材料表面改性、基体改性、界面过渡层引入及复合工艺优化四类，可单独或协同应用。表面改性调整碳基材料表面化学性质与微观结构，提升相容性与结合强度；基体改性优化基体成分与结构，改善匹配性；过渡层引入缓解组分差异，提升结合效果；工艺优化减少界面缺陷，优化界面结构。

（一）碳基材料表面改性策略

表面改性是常用调控手段，分为化学、物理及生物改性。化学改性通过反应引入官能团或接枝聚合物链，提升化学相容性与结合强度，常用方法包括氧化、接枝及偶联剂改性。氧化改性采用浓硝酸、高锰酸钾等强氧化剂处理，引入羟基、羧基等官能团，可与基体活性基团反应形成化学结合界面，如浓硝酸氧化碳纳米管提升其与聚合物的相容性。

接枝改性通过自由基聚合等反应接枝聚合物链，与基体聚合物缠结或反应提升结合强度，如石墨烯表面接枝聚苯胺链优化与聚苯胺基体的相容性。偶联剂改性通过硅烷、钛酸酯等偶联剂构建化学桥梁，实现碳基材料与基体的结合。物理改性通过等离子体、激光等物理手段改变表面形貌或性质，提升物理相容性与机械互锁作用，如等离子体改性使表面产生缺陷并粗糙化，增强吸附与互锁效果。生物改性固定蛋白质等生物活性分子，提升生物相容性，适用于生物医学领域。

（二）基体改性策略

基体改性通过调整基体成分、结构或性能优化与碳基材料的匹配性，分为组分掺杂、结构改性及聚合物共聚 / 共混改性。组分掺杂通过添加钛、锆等元素，与碳基材料表面官能团反应形成金属碳化物，提升界面结合强度。结构改性通过构建多孔结构、调控晶粒尺寸等改善物理相容性与机械互锁作用，如聚合物基体多孔结构可使碳基材料嵌入形成稳定互锁界面。

聚合物共聚 / 共混改性通过调整化学结构与性能提升相容性，如亲疏水单体共聚制备兼具两种特性的聚合物基体，改善与改性碳基材料的适配性；多聚合物共混优化力学性能与界面结合效果。

（三）界面过渡层引入策略

过渡层引入通过构建过渡区域缓解组分差异，减少界面应力，提升结合强度

与稳定性，分为金属、陶瓷、聚合物及复合过渡层。金属过渡层采用钛、铬等与两者均相容的金属，通过溅射、蒸发等方式沉积，与碳基材料形成碳化物，与基体形成固溶体或金属间化合物，如碳纤维增强铝基复合材料中钛过渡层可避免有害反应并提升结合强度。

陶瓷过渡层采用氧化铝、碳化硅等耐高温材料，通过溶胶-凝胶、CVD 等方式制备，提升界面高温稳定性与化学稳定性，适用于高温服役材料。聚合物过渡层采用柔性材料，提升界面柔性与拉伸性能，适配柔性复合材料。复合过渡层结合多种材料优势，如“金属-陶瓷”过渡层兼具高结合强度与高温稳定性。

（四）复合工艺优化策略

复合工艺参数显著影响界面结构，常用工艺包括熔融共混、溶液复合、原位聚合、热压烧结等，优化重点各有不同。熔融共混需调控加工温度、转速等参数，确保碳基材料均匀分散，避免过高温度导致氧化或降解。溶液复合需优化浓度、分散方式等，采用超声-机械搅拌复合分散方式，控制干燥速率避免孔隙缺陷。

原位聚合通过单体在碳基材料存在下聚合，使基体在其表面原位生长形成紧密结合，需调控单体浓度、引发剂用量等参数保障聚合均匀性。热压烧结与放电等离子体烧结适用于金属基与陶瓷基材料，需优化温度、压力等参数，放电等离子体烧结因升温快、时间短，可减少界面过度反应，提升界面完整性。

四、碳基复合材料界面设计的表征技术与发展趋势

精准界面表征是评估设计效果、揭示作用机制、优化调控策略的核心支撑，先进表征技术可从多尺度全面表征界面结构、成分及性能。同时，界面设计正朝着精准化、多功能化、智能化、绿色化方向发展，突破传统局限，为高性能材料制备与应用提供新支撑。

（一）界面设计的核心表征技术

界面表征技术分为结构、成分、结合强度及性能表征四类。结构表征技术观测微观与纳观结构，常用 SEM、TEM、AFM 等。SEM 直观观察界面形貌与缺陷，TEM 观测原子排列与过渡层晶体结构，AFM 表征粗糙度与界面作用力。成分表征分析元素组成与化学状态，常用 XPS、EDS、拉曼光谱等。XPS 识别化学键类型，EDS 分析元素分布，拉曼光谱通过特征峰变化反映碳基材料结构与界面相互作用。

结合强度表征量化界面结合能力，常用单纤维拔出试验、界面剪切强度测试

等，单纤维拔出试验通过拔出力计算界面剪切强度，是经典评估方法。性能表征评估界面对宏观性能的影响，通过力学、电学、热学性能测试验证设计有效性。

（二）界面设计的发展趋势

未来界面设计将聚焦精准化、多功能化、智能化、绿色化。精准化通过计算机模拟、原位表征及微纳加工实现原子级调控，第一性原理计算、分子动力学模拟预测结构 - 性能关系，原位表征实时监测界面演变，微纳加工实现精准制备。多功能化通过界面引入光、电、磁响应组分，实现力学增强、传感等功能集成，如界面引入光致变色分子制备光响应复合材料。

智能化设计赋予材料自修复、自感知特性，如引入微胶囊修复剂实现界面自修复，构建导电网络实现损伤自感知。绿色化设计采用环保调控策略与材料，减少污染，如生物基偶联剂替代传统试剂，水溶剂体系替代有机溶剂，可再生生物质修饰碳基材料，同时注重工艺节能化，降低成本与环境影响。

（三）界面设计与器件应用的协同优化

界面设计的最终目标是服务器件应用，未来将注重与应用需求的协同优化，实现“界面 - 材料 - 器件”一体化设计。不同器件对性能需求差异显著，界面设计需针对性优化并兼顾制备工艺与服役环境。如柔性电子器件界面需保障柔性与拉伸性能，适配印刷电子、卷对卷工艺；能源存储器件需构建高效传输通道，提升循环稳定性与安全性。

协同优化需跨学科创新，融合材料科学、电子工程等多领域成果，如材料科学家与电子工程师合作设计适配电子器件的界面结构。人工智能技术可挖掘设计参数与器件性能的关联规律，实现智能化优化，加速高性能器件研发进程。

第二节 柔性电子器件

柔性电子器件是一类基于柔性基底与功能材料，可实现弯曲、折叠、拉伸等形变且保持核心功能稳定的电子器件，凭借轻量化、便携化、可穿戴性等优势，在可穿戴健康监测、柔性显示、智能皮肤、物联网传感等领域应用前景广阔。碳基材料（石墨烯、碳纳米管、碳量子点等）因导电性优异、力学柔性好、化学稳定性强且生物相容性佳，成为构建柔性电子器件的理想材料。碳基复合材料通过多组分协同复合，可优化力学与导电性能，弥补单一材料缺陷，是提升柔性电子

器件综合性能的核心途径。本节系统阐述碳基复合材料柔性电子器件的核心设计原则，重点探讨关键制备技术、典型器件类型与性能调控、应用进展与产业化挑战，为高性能器件研发与应用提供理论指导。

一、碳基复合材料柔性电子器件的核心设计原则

碳基复合材料柔性电子器件设计需兼顾力学柔性、功能稳定性、结构兼容性与制备可行性，核心围绕材料匹配性、结构合理性、功能集成性三大维度展开。材料匹配性是器件柔性与稳定性的基础，结构合理性决定力学性能与电荷传输效率，功能集成性拓展应用场景，三者协同是精准设计高性能柔性器件的前提。

（一）材料匹配性设计原则

材料匹配性体现在碳基材料与柔性基底、粘结材料的力学性能匹配、界面相容性及功能协同性。力学匹配要求两者弹性模量、断裂应变相近，避免形变时应力集中导致界面剥离，如石墨烯（断裂应变 15%-20%）适配聚酰亚胺（PI）、聚二甲基硅氧烷（PDMS）等基底，其中 PDMS（断裂应变 100%-300%）更适用于可拉伸器件。界面相容性需增强组分间相互作用（范德华力、化学键合），通过氧化、掺杂等表面改性可提升结合强度，如氧化石墨烯表面羟基、羧基与 PI 基底氨基形成氢键或酰胺键。功能协同要求组分功能互补，如碳基材料提供导电性、聚合物保障柔性、金属纳米材料提升导电稳定性。

（二）结构合理性设计原则

结构合理性设计聚焦宏观与微观结构优化，核心是降低形变应力集中、提升电荷传输效率。宏观结构包括平面、褶皱、波浪形、网格等，褶皱与波浪形结构通过预构建周期性形变缓冲空间，拉伸率可达 50% 以上；网格结构通过微米级线宽与合理间距设计，平衡导电性与拉伸性，适用于高拉伸需求器件。微观结构优化侧重构建三维导电网络（碳纳米管交织、石墨烯堆叠），提升电荷传输连续性，降低形变时导电通路破坏概率，保障导电稳定性。

（三）功能集成性设计原则

功能集成性设计旨在实现单一器件多功能协同，核心是将碳基材料导电功能与传感、储能、发光等功能结合，如导电电极集成碳量子点实现导电 - 荧光传感双功能，储能材料与传感器集成构建“传感 - 储能”一体化器件。集成需保障模块兼容性，避免相互干扰，如优化储能 - 传感集成电极结构，确保电压变化不影响

响传感精度；选择透光材料保障发光 - 导电集成性能。同时需通过微纳加工实现器件小型化、轻量化，提升集成度。

二、碳基复合材料柔性电子器件的关键制备技术

碳基复合材料柔性电子器件制备需满足“柔性兼容”要求，即制备条件不破坏柔性基底性能，同时保障材料均匀分散、界面牢固及结构精准成型。主流技术分为基底预处理、碳基复合材料制备与图案化、器件组装与封装三类，协同应用是实现高性能器件的关键。

（一）柔性基底预处理技术

基底预处理是提升界面结合强度的基础，包括表面清洁、改性与成型三个环节。表面清洁采用超声清洗、等离子体清洗去除杂质，等离子体清洗还可形成微纳粗糙结构增大比表面积。表面改性通过化学（硅烷偶联剂、氧化）或物理（等离子体、紫外臭氧）方法引入官能团，增强与碳基材料相互作用，如 APTES 改性 PDMS 引入氨基与氧化石墨烯羧基成键。基底成型通过模板法、压印法制备褶皱等预形变结构，为碳基材料沉积提供缓冲空间。

（二）碳基复合材料制备与图案化技术

1. 复合材料制备 核心是实现碳基材料均匀分散与稳定结合，常用溶液混合法、原位聚合法、气相沉积法。溶液混合法操作简便，将碳基分散液与聚合物溶液混合后涂覆干燥，需超声分散或加分散剂避免团聚；原位聚合法通过单体在碳基分散液中聚合增强界面结合，提升性能稳定性；气相沉积法（CVD、ALD）可制备高质量碳基薄膜，可直接生长或转移至柔性基底，适用于柔性透明电极制备。

2. 图案化技术 目的是制备特定形状功能结构，常用光刻 - 刻蚀法、柔性印刷技术、模板法。光刻 - 刻蚀法精度达纳米级，需采用低温工艺适配柔性基底；柔性印刷技术（喷墨、丝网、柔版印刷）成本低、效率高，是产业化核心方向，需精准调控墨水性能或模板精度；模板法操作简单，适用于简单图案批量制备。

（三）器件组装与封装技术

组装技术通过对齐贴合、引线键合、倒装芯片等方法实现功能结构与外部组件集成，需选择柔性引线材料避免形变断裂，倒装芯片技术可提升集成密度与传输效率。封装技术核心是隔绝环境因素，保障长期稳定性，同时兼顾柔性与透气

性，常用柔性聚合物、陶瓷薄膜、生物相容性材料作为封装材料，采用涂覆、贴合、气相沉积等封装方式，适配不同应用场景需求。

三、碳基复合材料柔性电子器件的典型类型与性能调控

基于碳基复合材料的柔性电子器件主要包括柔性导电电极、传感器、储能器件、显示器件，各类器件核心性能指标与调控策略不同，核心思路是通过材料复合、结构设计与工艺优化协同提升柔性、稳定性与寿命。

（一）柔性导电电极

核心性能指标包括面电阻、透光率（透明电极）、力学稳定性，主要类型有石墨烯基、碳纳米管基复合电极。石墨烯 / 金属纳米线复合电极面电阻可低于 $10\ \Omega/\text{sq}$ ，透光率超 90%，弯曲 1000 次电阻变化率小于 5%；碳纳米管 / 聚合物复合电极拉伸率 30% 时电阻变化率小于 10%。调控策略包括优化碳基材料含量与分散性、引入柔性聚合物、表面改性提升界面结合强度。

（二）柔性传感器

基于形变 - 电学信号响应特性，检测压力、应变、温湿度、生物分子等，核心指标为灵敏度、响应 / 恢复时间、循环稳定性，分为压力 / 应变、温湿度、生物传感器等。多孔碳 / 石墨烯复合弹性体压力传感器灵敏度达 $10^{-3}\ \text{Pa}^{-1}$ ，响应时间小于 10 ms，循环 10000 次性能衰减小于 8%；氧化石墨烯湿度传感器响应时间小于 50 ms，检测范围 10%-90% RH；碳量子点 / 石墨烯生物传感器检测灵敏度达 pg/mL 级别。调控策略包括优化孔隙结构与比表面积、引入特异性功能材料、优化电极结构提升传输效率。

（三）柔性储能器件

包括柔性超级电容器、锂离子电池等，核心指标为比电容 / 比容量、能量 / 功率密度、循环与力学稳定性。多孔碳 / 石墨烯复合超级电容器比电容 200-500 F/g，能量密度 5-20 Wh/kg，弯曲 1000 次比电容保持率大于 90%；碳纳米管 / 硅复合锂离子电池负极比容量超 1500 mAh/g，循环 500 次容量保持率大于 80%。调控策略包括构建分级多孔结构、引入弹性聚合物、优化电解液体系、设计柔性集流体。

（四）柔性显示器件

包括柔性 OLED、QLED 等，碳基复合材料用于制备柔性透明电极与发光层。石墨烯 / 碳纳米管透明电极替代 ITO，面电阻低至 $20\ \Omega/\text{sq}$ ，透光率超 90%，弯

曲 5000 次电阻变化率小于 10%；碳量子点 / 聚合物复合发光层可实现三基色发光，亮度超 1000 cd/m²，色纯度高。调控策略包括优化电极堆叠方式、调控碳量子点尺寸与表面修饰、优化界面结合、采用柔性封装技术。

四、碳基复合材料柔性电子器件的应用进展与产业化挑战

近年来，在材料科学、微纳加工与电子工程等多学科技术的交叉驱动下，碳基复合材料柔性电子器件的研发进程显著加速，已在可穿戴电子、柔性显示、智能交互、物联网传感等多个前沿领域开发出功能完备的实验室原型器件，部分核心技术已完成实验室验证并进入中试阶段，逐步向产业化应用过渡。然而，受高性能碳基材料制备成本、规模化生产工艺稳定性、器件长期服役可靠性等多重因素的制约，碳基复合材料柔性电子器件的规模化产业化仍面临诸多亟待突破的瓶颈。本节将系统阐述碳基复合材料柔性电子器件的典型应用进展，深入剖析产业化进程中的核心挑战，并结合技术发展趋势展望未来突破方向，为推动器件产业化落地提供参考。

（一）典型应用进展

1. 可穿戴健康监测领域

依托碳基复合材料优异的柔性与生物相容性，集成柔性传感与柔性储能功能的可穿戴健康监测器件成为研究热点，已开发出柔性健康监测手环、智能医用绷带、人体运动监测服饰等多款原型产品。其中，柔性健康监测手环采用碳纳米管 / 石墨烯复合压力传感单元与柔性超级电容器集成设计，可实时、精准捕捉人体脉搏波、血压波动等关键生理参数，传感响应时间小于 20 ms，检测精度可达临床级标准，同时通过内置的柔性储能单元实现持续供电，监测数据可通过蓝牙模块无线传输至终端设备，为远程健康管理提供数据支撑。智能医用绷带基于氧化石墨烯 / 碳量子点复合敏感材料构建，可实时监测伤口愈合过程中的湿度、pH 值等关键环境参数，当参数异常时及时发出感染预警信号，同时集成的柔性加热单元可精准调控伤口局部温度，营造适宜的愈合环境，显著提升伤口愈合效率。

2. 柔性显示领域

碳基复合材料柔性透明电极凭借优异的柔性与透光性，成功突破传统氧化铟锡（ITO）电极的脆性限制，成为柔性显示技术的核心支撑材料。目前，碳基柔性电极已广泛应用于柔性有机发光二极管（OLED）的研发，三星、LG 等国际

电子企业推出的石墨烯柔性电极 OLED 原型产品,可实现 180° 全角度折叠,经过 10000 次循环折叠测试后,显示亮度、色域等核心性能无明显衰减,展现出优异的结构稳定性。国内科研团队开发的碳纳米管 / 导电聚合物复合柔性量子点发光二极管 (QLED),通过优化碳基复合电极与发光层的界面结合状态,实现了高亮度、高色域的柔性显示,发光亮度可达 1500 cd/m² 以上,色域覆盖率超过 100% NTSC,为柔性显示的产业化推进提供了关键技术支撑。

3. 智能皮肤领域

基于碳基复合材料的智能皮肤可模拟人体皮肤的触觉、温度感知等核心功能,已开发出具备多维度传感能力的柔性智能皮肤原型,集成了压力、温度、湿度等多种传感单元,在机器人触觉交互、假肢仿生、智能人机界面等领域展现出广阔应用前景。例如,石墨烯 / 聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 复合智能皮肤采用微纳阵列结构设计,压力检测范围覆盖 0-100 kPa,温度检测精度可达 0.1℃,可实现对微小物体的轮廓识别与重量感知,在机器人精密抓取作业中,能够精准识别物体材质与形态,有效避免抓取过程中的物体损伤,仿生适配性显著优于传统刚性传感设备。

4. 物联网传感领域

碳基复合材料柔性传感器因具备轻量化、低功耗、可大面积制备的独特优势,成为构建物联网分布式传感网络的理想选择,已开发出柔性环境监测传感器、柔性结构健康监测传感器等系列产品。其中,多孔碳 / 碳量子点复合气体传感器通过调控材料的多孔结构与表面活性位点,实现了对甲醛、苯、甲苯等多种有害气体的高灵敏度检测,检测限低至 ppb 级别,响应时间小于 100 ms,且具备良好的抗干扰能力,可集成于物联网终端节点,实现室内外空气质量的实时监测与数据上传。柔性结构健康监测传感器采用碳纳米管 / 碳纤维复合结构,可贴合于桥梁、建筑、风电叶片等大型工程结构表面,实时监测结构的应变、振动等力学参数,及时预警结构损伤风险,保障工程结构的安全服役。

(二) 产业化挑战

碳基复合材料柔性电子器件产业化进程中的核心挑战可归纳为以下五个方面:一是高性能碳基材料低成本规模化制备技术不成熟。石墨烯、碳纳米管等核心碳基材料的现有制备技术(如化学气相沉积法、电弧放电法)存在成本高、产量低的问题,且大面积制备过程中材料的厚度均匀性、导电性能一致性难以保障,

导致器件性能离散度较大,无法满足规模化应用对产品一致性的要求。二是器件长期稳定性与环境适应性欠缺。碳基材料在氧气、水分等复杂环境中易发生氧化降解,导致导电性能衰减;同时,碳基材料与柔性基底的界面结合强度不足,在长期形变或恶劣环境下易出现界面剥离现象,尤其在高温、高湿度环境中,器件性能衰减速率显著加快,封装防护技术仍需进一步优化升级。三是制备工艺自动化与精准度不足。柔性印刷、材料转移等关键制备工艺的规模化生产效率较低,现有设备的图案化精度难以满足高端柔性电子器件(如柔性微处理器)的需求,且工艺过程中的温度、湿度等参数控制精度不足,易导致器件性能波动。四是成本控制难度大。高性能碳基材料、柔性基底与专用封装材料的采购成本居高不下,加之规模化生产工艺复杂、良品率较低,导致器件整体生产成本昂贵,与传统刚性电子器件相比缺乏市场竞争力。五是行业标准体系缺失。目前,柔性电子器件的性能评价指标、测试方法尚未形成统一的行业标准,不同研究机构与企业的测试数据缺乏可比性,导致技术交流与协同创新受阻,同时也增加了下游应用企业的选型难度,制约了产业化推进进程。

(三) 未来展望

针对产业化进程中的核心挑战,结合技术发展趋势,未来碳基复合材料柔性电子器件的发展需聚焦以下关键方向:一是开发低成本规模化碳基材料制备技术。重点突破改良化学气相沉积(CVD)技术、生物质衍生碳基材料制备技术,利用农业废弃物(如秸秆、坚果壳)等低成本原料制备高性能碳基材料,同时优化制备工艺参数,提升大面积材料的均匀性与性能一致性,显著降低材料制备成本。二是优化界面设计与封装技术。通过表面改性、引入界面偶联剂等方式增强碳基材料与基底的界面结合强度;开发高性能柔性封装材料(如仿生弹性封装膜、透气防水封装材料),结合精准涂覆、真空贴合等先进封装工艺,提升器件的长期稳定性与环境适应性,延长器件服役寿命。三是研发自动化高精度柔性制备设备。重点攻关高精度喷墨打印设备、卷对卷连续制备设备,提升图案化精度与生产效率,实现制备过程的全流程自动化控制,降低人为因素对器件性能的影响,保障规模化生产的稳定性。四是推动多材料协同复合与多功能集成。开发碳基材料与金属、半导体、聚合物等多材料的协同复合技术,优化材料组分与结构设计;积极推进“传感-储能-显示-通信”一体化柔性电子系统的研发,提升器件的综合附加值,拓展应用场景。五是加强行业标准体系建设。联合科研机构、企业与

行业协会，制定统一的柔性电子器件性能评价标准、测试方法与质量控制规范，推动技术交流与产业化协同，降低下游应用门槛。随着上述关键技术的突破，碳基复合材料柔性电子器件有望在可穿戴电子、智能医疗、物联网、航空航天等领域实现规模化应用，引领电子产业向柔性化、便携化、智能化方向转型升级，构建全新的电子产业生态。

综上所述，碳基复合材料是柔性电子器件的核心材料体系，遵循材料匹配性、结构合理性、功能集成性设计原则，采用先进制备与封装技术，可实现高性能器件精准制备。尽管面临材料成本、稳定性、工艺等挑战，但随着多学科技术交叉融合与创新突破，碳基复合材料柔性电子器件研发与应用将持续推进，为柔性电子产业高质量发展提供核心支撑。

第三节 能源存储器件

碳基复合材料凭借碳材料（石墨烯、碳纳米管、多孔碳等）的高导电性、高比表面积与其他功能材料（金属氧化物、硫化物、聚合物、硅基材料等）的高理论容量优势，通过协同作用突破单一材料的性能瓶颈，已成为构建高性能能源存储器件的核心材料体系。基于碳基复合材料的能源存储器件主要包括超级电容器、锂离子电池、钠离子电池、锂-硫电池等，广泛应用于新能源汽车、便携式电子设备、大规模储能电站等领域。这类器件兼具高能量密度、高功率密度、长循环寿命及良好安全性等综合优势，契合当前能源转型对高效能源存储技术的需求。本节系统梳理碳基复合材料在主流能源存储器件中的应用形式、工作机制、结构设计及性能优化策略，深入探讨器件制备过程中的关键科学问题与技术突破路径，为碳基复合材料能源存储器件的定向研发与产业化推进提供理论与技术支撑。

一、碳基复合材料超级电容器：高功率密度的储能实现路径

超级电容器作为一种介于传统电容器与电池之间的新型储能器件，基于双电层电容或赝电容机制实现能量存储，具有功率密度高、充放电速率快、循环寿命长（通常超过 10 万次）等核心优势，在瞬时高功率供电、能量回收等场景具有不可替代的作用。碳基材料因高比表面积与高导电性，是构建超级电容器电极的经典材料，但纯碳材料存在能量密度较低的局限。碳基复合材料通过引入赝电容

活性物质（如 RuO_2 、 MnO_2 、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 、导电聚合物等）或构建多级孔结构，实现双电层电容与赝电容的协同增强，显著提升器件能量密度。

（一）碳基 / 金属氧化物复合材料超级电容器

碳基 / 金属氧化物复合材料是超级电容器电极的主流选择，金属氧化物（ MnO_2 、 RuO_2 、 Co_3O_4 等）通过氧化还原反应产生赝电容，提供高比容量，碳基材料则构建高效导电网络与离子传输通道，缓解金属氧化物充放电过程中的体积膨胀。 MnO_2 因理论比容量高（1370 F/g）、资源丰富、环境友好等优势，成为最常用的赝电容活性物质。例如，石墨烯 / MnO_2 复合材料通过水热法制备， MnO_2 纳米片均匀负载于石墨烯片层表面，复合材料的比容量可达 600-800 F/g，远高于纯石墨烯电极（200-300 F/g），在 10 A/g 高电流密度下循环 10000 次后容量保持率超过 90%。

材料的复合结构对性能具有显著影响，核壳结构、阵列结构、多孔结构等均可优化电荷传输与物质扩散效率。碳纳米管 / MnO_2 核壳结构复合材料中，碳纳米管作为核心提供电子传输通道， MnO_2 壳层提供赝电容活性位点，界面结合紧密且比表面积充足，比容量可达 750 F/g 以上，充放电响应时间小于 10 ms。 RuO_2 虽理论比容量高（1400 F/g）且导电性优异，但成本较高，限制了大规模应用，通过与多孔碳复合降低 RuO_2 用量，可在保障性能的同时控制成本，如多孔碳 / RuO_2 复合材料中 RuO_2 负载量降至 20% 时，比容量仍可达 500 F/g 以上。

（二）碳基 / 导电聚合物复合材料超级电容器

导电聚合物（如聚苯胺、聚吡咯、聚噻吩等）通过掺杂 / 脱掺杂过程产生赝电容，具有理论比容量高、制备成本低、柔韧性好等优势，与碳基材料复合可弥补其导电性差、循环稳定性不足的缺陷。聚苯胺因氧化还原活性高、环境稳定性好，是碳基 / 导电聚合物复合材料的常用组分。例如，多孔碳 / 聚苯胺复合材料通过原位聚合制备，聚苯胺均匀包覆于多孔碳表面，形成互穿导电网络，复合材料的比容量可达 400-600 F/g，在 5 A/g 电流密度下循环 5000 次后容量保持率超过 85%。

碳基材料的结构调控可进一步优化复合材料性能，石墨烯 / 聚吡咯复合材料中，石墨烯的二维片层结构为聚吡咯的生长提供支撑，同时抑制其体积膨胀，复合材料的比容量可达 550 F/g 以上，且具有良好的柔性，可用于柔性超级电容器器件。此外，碳基 / 导电聚合物 / 金属氧化物三元复合材料通过多组分协同作用，

可进一步提升能量密度与功率密度，如石墨烯 / 聚苯胺 / MnO_2 三元复合材料，比容量可达 800-1000 F/g，在 20 A/g 高电流密度下仍可保持 60% 以上的容量，展现出优异的综合性能。

二、碳基复合材料锂离子电池：高能量密度的核心技术支撑

锂离子电池是当前应用最广泛的二次电池体系，但其能量密度、循环寿命仍难以满足新能源汽车长续航、大规模储能高安全性的需求。碳基复合材料通过优化电极材料的导电性、离子传输效率及结构稳定性，成为提升锂离子电池性能的关键路径。在负极领域，碳基复合材料可解决硅基、锡基等高容量材料的体积膨胀问题；在正极领域，可改善过渡金属氧化物的导电性与结构稳定性；同时还可用于电解质修饰，提升电池安全性。

（一）碳基复合材料负极

传统石墨负极理论比容量仅 372 mAh/g，难以满足高能量密度电池需求。硅基材料理论比容量高达 4200 mAh/g，是理想的高容量负极候选材料，但充放电过程中存在 300% 以上的体积膨胀，导致循环稳定性极差。碳基 / 硅复合材料通过碳基质（石墨烯、碳纳米管、多孔碳）的空间限制作用缓解硅的体积膨胀，同时利用碳材料的高导电性提升电子传输效率。例如，石墨烯 / 硅纳米颗粒复合材料通过化学还原法制备，硅纳米颗粒均匀分散于石墨烯片层间，复合材料的比容量可达 1500-2000 mAh/g，在 0.5 A/g 电流密度下循环 500 次后容量保持率超过 80%。

碳基 / 锡基复合材料同样通过协同作用提升性能，锡的理论比容量为 994 mAh/g，碳基质可有效抑制其体积膨胀（约 260%）。碳纳米管 / 锡复合材料采用化学镀法制备，锡纳米晶负载于碳纳米管表面，形成导电网络，比容量可达 800-1000 mAh/g，循环 1000 次后容量保持率超过 75%。此外，碳基 / 过渡金属氧化物（如 Fe_3O_4 、 Co_3O_4 ）复合材料通过转换反应实现高容量储锂，碳基质提升导电性与结构稳定性， Fe_3O_4 / 多孔碳复合材料比容量可达 800-1200 mAh/g，展现出良好的应用潜力。

（二）碳基复合材料正极

锂离子电池正极材料（如 LiFePO_4 、 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ 、 LiCoO_2 ）普遍存在导电性差、离子扩散速率低及充放电过程中体积膨胀等问题，限制了电池的倍率性能与循环稳定性。碳基复合材料通过在正极材料表面包覆碳层或构建碳基导电网

络,提升电子传输效率,改善电解液浸润性,缓解体积膨胀。 LiFePO_4 因安全性高、循环寿命长被广泛应用,但导电性极差,碳包覆是其性能优化的关键技术。碳包覆 LiFePO_4 复合材料通过高温焙烧法制备,碳层厚度控制在 5-10 nm,复合材料的电子电导率较纯 LiFePO_4 提升 5-6 个数量级,在 10 C 高倍率下比容量可达 120 mAh/g 以上,循环 1000 次后容量保持率超过 95%。

高镍三元正极材料(如 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$)具有高能量密度,但循环过程中易发生结构坍塌与电解液分解。碳基复合材料通过石墨烯包覆或碳纳米管掺杂构建三维导电网络,可有效抑制结构坍塌,提升界面稳定性。石墨烯包覆 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 复合材料,在 1 C 电流密度下比容量可达 190 mAh/g,循环 200 次后容量保持率超过 90%,远优于未包覆样品(约 75%)。此外,碳基材料还可作为正极活性物质载体,负载硫、富锂锰基等新型正极材料,解决其导电性差、体积膨胀严重等问题。

三、碳基复合材料新型二次电池：高能量密度的突破方向

随着能源存储需求的不断升级,传统锂离子电池已难以满足高端应用对更高能量密度的需求,锂-硫电池、钠离子电池等新型二次电池成为研究热点。这类电池的核心瓶颈在于电极材料导电性差、活性物质流失、体积膨胀严重等问题。碳基复合材料凭借其独特的结构与性能优势,可有效解决上述瓶颈,推动新型二次电池的性能突破与产业化进程。

(一) 碳基复合材料锂-硫电池

锂-硫电池以硫为正极活性物质,理论比容量高达 1675 mAh/g,理论能量密度可达 2600 Wh/kg,是传统锂离子电池的 3-5 倍,具有极高的应用前景。但硫存在导电性极差(室温电导率仅 10^{-30} S/cm)、充放电过程中生成的多硫化物易溶解流失(穿梭效应)及体积膨胀严重(约 80%)等问题,导致电池循环稳定性差、容量衰减快。碳基复合材料通过高比表面积吸附多硫化物、高导电性提升电子传输、多孔结构缓解体积膨胀,成为锂-硫电池正极的核心材料。

多孔碳/硫复合材料是锂-硫电池正极的经典体系,多孔碳的高比表面积与丰富孔道可实现硫的均匀负载与多硫化物的物理吸附。例如,有序介孔碳/硫复合材料,硫负载量可达 60%-80%,在 0.2 C 电流密度下比容量可达 1200-1400 mAh/g,循环 500 次后容量保持率超过 80%。石墨烯/硫复合材料通过 π - π 相

互作用增强对多硫化物的化学吸附，同时二维片层结构构建高效导电网络，石墨烯/硫复合材料在 1 C 电流密度下循环 1000 次后容量保持率仍超过 75%。碳纳米管/硫复合材料则利用碳纳米管的一维导电网络提升电子传输效率，抑制多硫化物扩散，进一步优化倍率性能。

（二）碳基复合材料钠离子电池

钠离子电池因钠资源丰富、成本低廉、与现有锂离子电池工艺兼容性好等优势，成为大规模储能领域的理想候选技术。但钠离子半径大于锂离子（ Na^+ 半径 102 pm， Li^+ 半径 76 pm），导致电极材料的钠离子扩散速率低、体积膨胀更显著。碳基复合材料通过调控孔道结构、引入活性物质，可提升钠离子存储容量与扩散效率。硬碳是钠离子电池负极的主流碳基材料，理论比容量可达 300-400 mAh/g，但存在首次库仑效率低的问题。碳基复合材料通过掺杂 heteroatoms（N、P、S）或与金属氧化物复合，可优化表面活性位点，提升首次库仑效率与循环稳定性。

氮掺杂多孔碳/ Fe_3O_4 复合材料作为钠离子电池负极，氮掺杂引入的缺陷位点提供额外钠离子存储位点， Fe_3O_4 通过转换反应贡献容量，多孔结构缓解体积膨胀，复合材料的比容量可达 400-500 mAh/g，首次库仑效率超过 85%，循环 1000 次后容量保持率超过 90%。在正极领域，碳基复合材料可提升过渡金属氧化物（如 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 、 $\text{NaNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ ）的导电性，氮掺杂碳包覆 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 复合材料，电子电导率提升 4 个数量级，在 5 C 高倍率下比容量可达 90 mAh/g 以上，循环稳定性优异。

四、碳基复合材料能源存储器件的性能优化与产业化挑战

尽管碳基复合材料在能源存储器件中展现出优异的性能潜力，但要实现产业化应用，仍需解决性能优化、成本控制、规模化制备及安全性提升等一系列关键问题。针对这些问题，研究者提出了一系列性能优化策略，包括复合材料界面调控、结构精准设计、绿色制备工艺开发等。同时，随着技术的不断进步，碳基复合材料能源存储器件的产业化进程正逐步推进，但仍面临诸多挑战，需要多学科交叉融合，推动材料、结构与工艺的协同创新。

（一）核心性能优化策略

界面调控是提升碳基复合材料性能的核心。碳基材料与功能材料的界面结合强度及电荷转移效率直接影响器件性能，界面结合不紧密易致活性物质脱落，电

荷转移受阻则降低储能效率。通过等离子体处理、硅烷偶联剂修饰等表面改性引入官能团，或采用原位生长法使功能材料在碳基表面原位成核，可增强界面结合并提升电荷转移效率。如原位制备的石墨烯/ MnO_2 复合材料，界面形成 Mn-O-C 键，电荷转移电阻降低，比容量与循环稳定性较物理混合样品提升 30% 以上。

结构精准设计是优化器件性能的重要路径。调控碳基复合材料的孔道（微孔、介孔、多级孔）、维度（零维至三维）及形貌（纳米颗粒、片、管、阵列），可优化活性物质负载与传质导电效率。多级孔结构兼具高比表面积与快速传输通道，三维网络结构可实现活性物质均匀分散与高效导电网络构建，均能提升器件性能。借助有限元模拟与原位表征，可精准设计结构并预测性能，降低研发成本。

绿色制备工艺是推动产业化的重要支撑。传统制备工艺存在有毒溶剂使用、成本过高等问题，污染环境。采用生物质原料（秸秆、坚果壳等）制备碳基材料，开发水热合成等绿色方法，或采用模板剂回收/无模板合成技术，可降低成本、减少环境负担。如玉米秸秆基多孔碳/ Fe_3O_4 复合材料，成本仅为传统样品的 1/4，储锂性能优异，具备规模化潜力。

（二）产业化挑战与发展趋势

碳基复合材料能源存储器件的产业化仍面临诸多挑战：一是规模化制备过程中材料性能一致性难以保障，不同批次复合材料的成分、结构及电化学性能存在差异，影响器件批量生产质量；二是高端碳基材料（如高质量石墨烯、单壁碳纳米管）制备成本高昂，导致复合材料器件成本居高不下，限制大规模应用；三是器件长期稳定性与安全性有待提升，在高温、高湿度等复杂工况下，复合材料界面易老化，活性物质易流失，引发容量衰减与安全隐患；四是部分新型电池体系（如锂-硫电池）的电解液匹配性、负极保护等关键技术尚未突破，制约产业化进程。

第四节 结构功能一体化

结构功能一体化是先进材料器件发展的核心趋势，核心是通过组分设计、界面调控与结构优化，使器件兼具承载支撑等结构功能与传感、储能等特定功能，实现“结构-功能”协同统一。传统器件采用“结构+功能”叠加设计，存在重量大、体积大、界面兼容性差等缺陷，难以满足高端领域轻量化、高集成度需求。碳基复合材料凭借碳材料优异力学性能、导电导热性及可调控性，与金属、陶瓷

等基体协同复合，成为构建结构功能一体化器件的理想体系。此类器件突破传统设计瓶颈，轻量化、高集成度优势显著，广泛应用于航空航天、智能装备、新能源等领域。本节系统阐述其设计原理、核心制备技术、主要类型及应用展望，剖析结构-功能协同机制与发展瓶颈，为优化设计与产业化提供支撑。

一、碳基结构功能一体化器件的设计原理与核心特性

碳基结构功能一体化器件功能实现依赖组分协同、界面调控与精准结构设计，核心是调控碳基增强相与基体的组分比例及界面状态，构建结构与功能协同的一体化结构。本节从设计原理、核心特性及性能评价指标三个维度，解析其基础理论体系。

（一）核心设计原理

设计遵循“组分协同-界面调控-结构匹配-功能集成”核心逻辑，含三大关键环节。组分协同机制通过碳基增强相与基体性能互补实现增效，碳基材料提供力学性能与特定功能，基体保障成型性与环境适应性，如石墨烯/环氧树脂复合材料兼具高力学性能与导电性。界面调控机制是结构稳定与功能传递的关键，通过氧化、硅烷化等表面改性引入活性官能团，增强界面化学键合，减少缺陷，如氧化石墨烯与环氧树脂的环氧基团反应提升界面结合强度。结构匹配机制要求宏观结构（层合、多孔等）与微观结构（增强相分散、取向）适配应用需求，如航空航天器件采用层合结构实现力学与隐身功能协同。

（二）关键核心特性

相较于传统器件，碳基结构功能一体化器件具备五大核心优势：一是轻量化高比强度，碳基材料密度低，复合后比强度远超传统金属，显著减重，适配航空航天等领域；二是结构功能协同统一，无需额外叠加功能材料，缩小体积、提升集成度；三是优异力学与环境适应性，高模量高强度特性赋予良好力学性能，协同作用提升抗腐蚀、耐高温能力，适用于复杂环境；四是功能可设计性强，通过调控增强相类型、含量等精准适配不同需求，如调控碳纳米管含量实现导电性连续可调；五是良好成型加工性，可通过模压、3D 打印等多种工艺制备复杂形状器件，降低加工难度。

（三）性能评价指标

性能评价需兼顾结构与功能，核心指标包括力学性能、功能性能、环境适应

性、轻量化水平及长期可靠性。力学性能含拉伸强度、弯曲强度等，航空航天器件要求拉伸强度不低于 500 MPa，智能穿戴设备注重柔韧性与疲劳寿命；功能性能依类型而定，传感器件看灵敏度与响应时间，储能器件看比容量与循环寿命；环境适应性要求 -50℃ ~200℃性能变化率不超 10%，盐雾浸泡 1000 小时力学性能保留率不低于 85%；轻量化水平通过比强度与重量减轻率评价，减重率不低于 30%；长期可靠性要求服役 5~15 年性能保留率不低于 80%。此外还需评价加工精度、成本与可维修性。

二、碳基结构功能一体化器件的核心制备技术

碳基结构功能一体化器件制备为多环节协同工程，核心技术包括碳基增强相表面改性、复合成型、结构加工与功能集成三个关键环节，技术选择直接影响器件性能。本节阐述各环节关键技术原理、优缺点及应用场景。

（一）碳基增强相的表面改性技术

表面改性是提升界面结合强度的关键，常用技术包括化学氧化法、硅烷化改性法、等离子体处理法等。化学氧化法通过强酸或氧化剂引入活性官能团，操作简便成本低，适用于批量改性，但易破坏碳基材料晶体结构；硅烷化改性法通过偶联剂构建“桥梁”，提升与聚合物基体相容性，界面结合牢固，适用于高性能复合材料，但偶联剂用量需精准控制；等离子体处理法利用活性粒子刻蚀功能化，操作温和、对晶体结构破坏小，适用于精密器件改性，但设备成本高、难以批量处理；聚合物接枝改性法针对性强，适用于特定体系，金属粒子负载改性法可同步实现改性与功能赋予，适用于多功能器件，但粒子易团聚。

（二）碳基复合材料的复合成型技术

复合成型技术核心是将改性增强相与基体复合，常用技术包括模压成型法、注塑成型法、RTM 法、3D 打印法等。模压成型法操作简便成本低，适用于简单形状器件批量制备，但难以制备复杂结构；注塑成型法效率高、可制复杂形状，适用于汽车零部件等批量生产，但易导致增强相取向不均；RTM 法可制备复杂高精度器件，力学性能优异，适用于航空航天结构件，但成型周期长、成本高；3D 打印法无需模具，可实现复杂与个性化设计，适用于定制化与微型器件，但需调控墨水性能，精度与效率待提升；浸渍法适用于多孔层合结构，原位聚合法可实现增强相均匀分散，界面结合强，但适用范围窄。

（三）器件的结构加工与功能集成技术

结构加工技术包括机械加工、激光加工、水刀切割等。机械加工简便成本低，适用于简单结构，但易产生分层、崩边缺陷；激光加工精度高、效率高，适用于微型与精密结构，但易产生热损伤；水刀切割无热损伤，可加工复杂形状，适用于热敏感器件，但精度略低、成本高；精密磨削可提升表面平整度，适用于高表面质量需求器件，但易产生纤维拔出问题。功能集成通过嵌入式、表面、层合三种方式实现，嵌入式集成保障功能组件稳定性，表面集成操作简便，层合集成实现多功能集成，集成过程需保障组件兼容性与连接可靠性。

三、碳基结构功能一体化器件的主要类型与应用机制

根据应用场景与功能需求，碳基结构功能一体化器件可分为承载-传感、承载-储能、承载-导热/散热、承载-电磁屏蔽四大类，各类器件结构设计与应用机制差异显著。本节阐述各类器件核心结构、应用机制及性能特点。

（一）承载-传感一体化器件

核心是集成承载与应力、温度等传感功能，实现实时监测，应用于航空航天结构健康监测、智能装备等领域。结构为碳基复合材料承载基体与碳基传感单元一体化集成，传感单元利用碳基材料力敏、热敏特性将物理化学信号转化为电学信号。如碳纳米管/环氧树脂复合材料结构受应力变形时，导电网络导通状态变化导致电阻变化，实现应力监测。此类器件无额外传感元件，不影响力学性能与轻量化，响应速度快（ $< 10\text{ ms}$ ）、稳定性好，可及时发现结构损伤、保障运行安全。

（二）承载-储能一体化器件

集成承载与储能功能，应用于新能源汽车、智能穿戴设备等领域，核心结构为多孔碳基复合材料承载基体与储能活性组分一体化集成，多孔基体兼具承载与电极载体功能。如多孔碳纳米管/聚合物复合材料汽车车身部件，既承载又作为超级电容器电极供电，显著减重。性能需兼顾力学与储能，要求具备足够拉伸强度与弯曲强度，同时具备高比容量、良好充放电效率。优势是融合储能与结构件，节省空间、减轻重量，提升设备续航与集成度。

（三）承载-导热/散热一体化器件

集成承载与导热散热功能，应用于电子设备、航空航天发动机等领域，核心结构为高导热碳基复合材料承载基体，利用碳基材料优异导热性构建高效导热通

道。如石墨烯 / 铝合金复合材料动力电池外壳, 既承载防护又快速散热, 避免电池过热。核心指标为热导率 ($\geq 200 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) 与力学性能, 需兼具优异拉伸强度与耐腐蚀性。优势是替代传统金属散热件, 提升散热效率的同时显著减重, 适配轻量化与散热严苛需求。

(四) 承载 - 电磁屏蔽一体化器件

集成承载与电磁屏蔽功能, 应用于航空航天、电子设备等领域, 核心结构为导电碳基复合材料承载基体, 通过连续导电网络实现电磁波反射与吸收。如碳纳米管 / 环氧树脂复合材料雷达罩、电子设备外壳, 兼具承载防护与优异电磁屏蔽效能 ($\text{EMI SE} \geq 30 \text{ dB}$)。核心指标为电磁屏蔽效能、力学性能与轻量化, 要求 1-18 GHz 频率范围内 $\text{EMI SE} \geq 20 \text{ dB}$ (民用) 或 30 dB (国防), 比强度 $\geq 100 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$ 。优势是替代传统金属屏蔽件, 减重 30% 以上, 提升设备机动性与续航能力。

四、碳基结构功能一体化器件的应用领域与发展展望

碳基结构功能一体化器件凭借其轻量化、高集成度、结构与功能协同统一、环境适应性强等核心优势, 已在航空航天、新能源、智能装备、电子信息、土木工程、海洋工程等多个领域展现出广阔的应用前景, 成为推动高端装备技术升级与产业发展的关键核心器件。同时, 随着材料科学、智能制造、电子信息、人工智能等学科的深度融合与快速发展, 碳基结构功能一体化器件也面临着性能优化、成本控制、规模化生产、长期服役可靠性验证等方面的挑战。本节将系统阐述碳基结构功能一体化器件的主要应用领域, 深入分析当前存在的核心问题与挑战, 并对未来的发展趋势进行展望, 为推动其产业化应用与技术创新提供方向指引。

碳基结构功能一体化器件凭借轻量化、高集成度等优势, 在航空航天、新能源、智能装备等领域前景广阔, 同时面临性能优化、成本控制等挑战。本节阐述应用领域, 分析现存问题, 展望发展趋势。

(一) 主要应用领域

航空航天领域是碳基结构功能一体化器件的核心应用领域之一, 该领域对器件的轻量化、高力学性能、高集成度与高可靠性要求极为严苛, 碳基结构功能一体化器件凭借其独特优势, 已成为实现飞行器性能升级的关键技术支撑。主要应用包括机身结构件、机翼、尾翼、雷达罩、发动机部件、卫星结构件等。例如,

在民用飞机领域，波音 787、空客 A350 等先进客机大量采用碳纤维增强环氧树脂结构功能一体化器件，其中机身结构件集成了承载、电磁屏蔽、防雷击等多种功能，相较于传统铝合金结构件重量减轻 40% 以上，显著提升了飞机的续航能力与燃油经济性；在军用飞机领域，隐形战斗机的机身蒙皮采用碳纳米管 / 树脂基承载 - 电磁屏蔽一体化器件，兼具优异的结构承载性能与隐身功能，可有效降低雷达反射截面，提升作战隐蔽性。

发动机部件是航空航天领域的另一重要应用场景，石墨烯 / 碳化硅陶瓷基承载 - 散热一体化发动机叶片，兼具优异的高温力学性能、导热性能与抗腐蚀性能，能够在 1200℃ 以上的高温燃气环境中稳定工作，同时快速将热量散发，提升发动机的推力与使用寿命。此外，卫星结构件采用碳纤维 / 聚合物基承载 - 传感一体化器件，可实时监测卫星在轨道运行过程中的结构应力与温度变化，保障卫星的长期稳定运行。

新能源领域是碳基结构功能一体化器件的另一重要应用阵地，主要包括新能源汽车、动力电池、储能设备、太阳能发电等细分领域。在新能源汽车领域，碳基结构功能一体化器件广泛应用于车身框架、底盘部件、动力电池外壳、制动系统等，其中车身框架采用碳纤维 / 铝合金基承载 - 储能一体化结构，既承担车身承载功能，又集成超级电容器储能功能，可实现制动能量回收与辅助供电，同时使车身重量减轻 30%-50%，显著提升了新能源汽车的续航里程；动力电池外壳采用石墨烯 / 铝合金承载 - 导热一体化结构，能够快速将电池工作过程中产生的热量导出，避免电池过热导致的安全事故，同时具备良好的抗冲击性能，保护电池内部结构。

在储能设备领域，多孔碳基承载 - 储能一体化器件可用于大规模储能电站的结构件与储能单元，实现储能功能与结构支撑功能的协同，提升储能系统的空间利用率与集成度；在太阳能发电领域，碳基承载 - 光电转换一体化器件可用于太阳能电池组件的支撑结构，同时提升光电转换效率，降低发电成本。

智能装备与电子信息领域对器件的小型化、集成化、智能化要求不断提升，碳基结构功能一体化器件在此领域的应用日益广泛，主要包括智能穿戴设备、工业机器人、电子设备外壳、便携式电子设备、通信设备等。在智能穿戴设备领域，柔性石墨烯 / 聚合物基承载 - 传感 - 储能一体化器件可用于智能手环、智能手表、智能服装等，集成了结构支撑、健康监测（心率、体温、运动数据）与能量供给

功能,实现了设备的轻量化与小型化;在工业机器人领域,碳基承载-传感一体化关节部件可实时监测关节的应力、应变与运动状态,为机器人的精准控制提供数据支持,同时具备优异的抗疲劳性能,保障机器人的长期稳定运行。

在电子信息领域,碳基承载-电磁屏蔽-散热一体化电子设备外壳,集成了结构防护、电磁屏蔽与散热功能,可有效减少电磁干扰与辐射,保障电子设备的高性能运行,同时延长设备使用寿命;便携式电子设备(如笔记本电脑、平板电脑)采用碳基承载-散热一体化结构件,可显著提升散热效率,避免设备因过热而降频。

此外,在土木工程领域,碳基承载-传感-防腐一体化结构件可嵌入桥梁、大坝、高层建筑等混凝土结构中,实时监测结构的应力、应变与腐蚀状态,为工程结构的安全评估与维护提供数据支持;在海洋工程领域,碳基承载-抗腐蚀-电磁屏蔽一体化海洋平台结构件,能够抵御海洋

航空航天领域,应用于机身结构件、机翼、发动机部件等,如碳纤维/环氧树脂机身结构件集成承载、电磁屏蔽等功能,减重40%以上;石墨烯/陶瓷基发动机叶片实现承载与散热协同。新能源领域,应用于新能源汽车车身框架、动力电池外壳等,减轻重量同时提升续航与散热安全;储能设备领域提升集成度与空间利用率。智能装备与电子信息领域,应用于智能穿戴设备、机器人关节、电子设备外壳等,实现健康监测、精准运行与电磁防护。土木工程领域用于桥梁建筑结构健康监测,保障工程安全。

(二) 当前存在的问题与挑战

产业化过程中面临六大挑战:一是界面结合性能不足,易出现分层开裂,影响结构与功能可靠性;二是碳基增强相易团聚,导致复合材料性能均匀性差;三是制备成本高昂,碳基材料与加工设备投入大,制约产业化;四是规模化生产技术不成熟,难以批量制备复杂器件,质量控制难、良品率低;五是长期服役可靠性需验证,复杂环境下性能演变规律不明确;六是性能评价标准不统一,数据缺乏可比性,不利于技术交流。此外,回收利用技术起步晚,不符合绿色发展需求。

第八章 碳基光电器件

第一节 光电探测器件

光电探测器件作为光信号转电信号的核心光电子器件,广泛应用于图像传感、环境监测、光通信等领域。随着信息技术向高速化、微型化发展,传统半导体材料存在柔性差、成本高、光谱响应窄等局限。碳基材料(石墨烯、碳纳米管、碳量子点等)凭借宽光谱响应、高载流子迁移率等独特光电特性,为高性能光电探测器件研发提供新方向。碳基光电探测器件以碳基材料为核心,通过调控微观结构与界面特性实现高效光捕获与载流子输运,具备柔性可穿戴、低成本等优势,成为研究热点。本节梳理其工作原理与分类,探讨典型器件结构设计、制备工艺及性能调控策略,分析应用瓶颈与发展趋势,为产业化应用奠定基础。

一、碳基光电探测器件的工作原理与分类

碳基光电探测器件核心功能是光-电信号高效转换,本质是碳基材料光激发产生电子-空穴对,经分离、输运形成可检测电信号。核心过程包括光吸收、载流子产生、分离、输运及信号输出五个环节。因碳基材料类型、器件结构及工作模式差异,器件可分为多种类型,适配不同应用场景。

(一) 核心工作原理

核心工作原理基于碳基材料光致载流子特性,具体环节为:光吸收阶段,入射光子被碳基层吸收,光子能量需满足材料能隙要求,使电子跃迁至高能级产生电子-空穴对;载流子产生阶段,激发态电子-空穴对脱离束缚形成自由载流子;分离阶段,通过内置电场或外偏压实现电子-空穴分离,避免复合;输运阶段,分离后的载流子到达电极形成电流;信号输出阶段,外电路检测电流或电压变化实现光信号定量检测。

不同碳基材料机制存在差异:石墨烯为零带隙材料,载流子迁移率高但复合快,需异质结或偏压增强分离;碳量子点禁带宽度可调,载流子受量子限制,需

优化表面态减少复合；半导体型碳纳米管具有特定禁带宽度，一维通道载流子输运效率高，金属型可作为电极辅助输运。

（二）器件分类

按碳基材料类型可分为石墨烯基、碳纳米管基、碳量子点基等。石墨烯基器件宽光谱响应、响应速度快；碳纳米管基器件载流子迁移率高、光谱响应窄；碳量子点基器件光谱可调、光稳定性好且生物相容；富勒烯基常作为电子受体构建异质结。

按器件结构可分为肖特基结型、PN 结型、异质结型、FET 型及光电导型。肖特基结型结构简单、响应快；PN 结型内置电场强、分离效率高；异质结型拓宽光谱并抑制复合；FET 型通过栅压调控载流子输运，灵敏度高且可调控；光电导型结构最简单，但响应慢、暗电流高。

按工作模式可分为光伏模式与光电导模式。光伏模式无需外偏压，功耗低、暗电流小，适配便携式设备；光电导模式需外偏压，响应快、光电流大，适用于高速探测。

二、典型碳基光电探测器件的结构设计与制备工艺

典型碳基光电探测器件以石墨烯、碳纳米管、碳量子点为核心，通过合理结构设计优化光吸收与载流子输运，采用兼容工艺精准构筑。不同体系器件设计重点与工艺选择存在差异，合理设计与工艺是高性能的核心保障。

（一）石墨烯基光电探测器件

结构设计核心是构建高效载流子分离结构，常用肖特基结型、异质结型及 FET 型。肖特基结型采用“金属 - 石墨烯 - 绝缘衬底”结构，通过功函数差异形成势垒实现分离；异质结型通过石墨烯与半导体复合构建界面电场，拓宽光谱；FET 型采用“源漏极 - 石墨烯沟道 - 栅极 - 衬底”结构，通过栅压调控费米能级提升性能。

制备工艺包括石墨烯制备、转移、电极制备及封装。石墨烯常用 CVD 法制备；转移采用 PMMA 辅助湿转移或干转移，需避免缺陷；电极通过蒸发、溅射结合光刻制备，降低接触电阻；封装采用 PECVD 制备 SiO_2 或 Al_2O_3 层，减少环境影响。

（二）碳纳米管基光电探测器件

结构设计核心是保障半导体型碳纳米管光吸收与载流子输运，常用单根 FET

型、薄膜型及异质结型。单根 FET 型以单根半导体型碳纳米管为沟道，精度高；薄膜型以碳纳米管薄膜为功能层，可大面积制备；异质结型通过复合增强分离效率。

制备工艺重点是半导体型碳纳米管提纯与定向排列，包括制备提纯、功能层制备、电极制备及后处理。采用 CVD 法制备碳纳米管，通过密度梯度离心等方法提纯；功能层采用滴涂、旋涂等工艺成型；电极制备与石墨烯基类似；后处理通过等离子体刻蚀或表面修饰减少缺陷。

（三）碳量子点基光电探测器件

结构设计核心是优化薄膜光吸收与载流子输运，减少表面态复合，常用光电导型、异质结型及量子点敏化型。光电导型为“金属电极 - 碳量子点薄膜 - 衬底”结构；异质结型通过复合构建界面电场；量子点敏化型以碳量子点敏化宽带隙半导体，提升光吸收与输运速度。

制备工艺具有溶液加工特性，包括碳量子点合成、薄膜制备、电极制备及表面修饰。采用水热法、溶剂热法等合成碳量子点，调控尺寸与禁带宽度；薄膜通过旋涂、喷墨打印等工艺制备，控制厚度与孔隙率；电极采用蒸发、溅射或印刷工艺；表面修饰通过配体钝化或涂层包覆减少缺陷。

三、碳基光电探测器件的性能调控策略

碳基光电探测器件核心性能指标包括探测率、响应速度、光谱响应范围等，当前面临载流子复合快、暗电流高、界面电阻大等问题。研究者开发了碳基材料改性、器件结构优化、界面工程调控及后处理工艺优化等策略，多维度提升器件性能。

（一）碳基材料改性策略

材料改性通过调控电子结构、表面态及微观形貌优化性能。石墨烯改性包括掺杂、缺陷工程及表面功能化：氮掺杂、硼掺杂引入杂质能级增强光吸收；等离子体刻蚀引入可控缺陷捕获载流子；接枝有机分子改善相容性。

碳纳米管改性重点是半导体型提纯与定向排列，通过密度梯度离心结合电泳沉积实现，表面包覆聚合物钝化缺陷。碳量子点改性包括尺寸调控、表面钝化及掺杂：尺寸调控实现光谱精准调节；有机配体或无机涂层钝化表面缺陷；氮掺杂、硫掺杂增强光吸收与分离效率。

（二）器件结构优化策略

结构优化通过构型设计提升光吸收与载流子输运效率，包括异质结构建、微纳结构设计及电极优化。异质结构建将碳基材料与其他半导体复合，形成界面电场拓宽光谱，如石墨烯 / 硅异质结实现宽光谱高速探测。

微纳结构设计构建微纳阵列、光栅等增强光捕获效应，如碳量子点薄膜表面凸起阵列延长光传播路径。电极优化设计叉指、透明电极，提升接触面积降低电阻，减少光遮挡，如 ITO 或银纳米线透明电极提升光透过率。

（三）界面工程调控策略

界面工程通过优化界面结构与成分提升性能，包括界面修饰、过渡层引入及缺陷修复。界面修饰在碳基材料与电极间修饰有机分子或纳米粒子，改善相容性降低电阻，如酞菁铜修饰调节功函数匹配。

过渡层引入沉积氧化物、硫化物等薄过渡层，缓解能级失配增强电场，如 TiO_2 过渡层促进碳纳米管与硅的载流子分离。缺陷修复通过等离子体、退火等处理消除界面缺陷，如退火减少碳量子点 / 聚合物异质结孔洞与杂质。

（四）后处理工艺优化策略

后处理通过二次处理优化器件性能，包括退火、等离子体处理、化学钝化及封装。退火在惰性气氛或真空下加热，消除应力减少缺陷，提升载流子迁移率；等离子体处理清洁界面并引入可控缺陷，增强光吸收；化学钝化通过钝化剂修复缺陷；封装制备致密层隔绝环境，提升稳定性。

四、碳基光电探测器件的应用场景与发展趋势

碳基光电探测器件依托碳基材料独特的电子与光学特性，展现出宽光谱响应、高响应速度、柔性可穿戴、低成本及良好生物相容性等多重核心优势，在图像传感、环境监测、光通信、生物医学成像、太赫兹探测等多个关键领域展现出极具潜力的应用前景。经过多年研究攻关，基于石墨烯、碳纳米管等材料的部分原型器件，其核心性能指标（如探测率、响应速度）已逐步接近甚至在特定场景下超越传统硅基、Ⅲ - V 族化合物半导体探测器件。当前，碳基光电探测器件的发展正朝着高性能化、集成化、柔性化的核心方向推进，旨在突破现有性能瓶颈与应用局限。与此同时，该类器件在实际产业化进程中仍面临诸多关键挑战，主要集中在环境稳定性不足、规模化制备难度大等方面，未来需通过材料科学、电子工

程、工艺工程等多学科的交叉协同创新，攻克核心技术难题，推动其从实验室原型向产业化应用实现跨越。

（一）典型应用场景

在传统光电子领域，碳基光电探测器件凭借其独特性能实现了对传统器件的补充与升级。在图像传感领域，石墨烯/硅异质结图像传感器充分结合了石墨烯宽光谱响应特性与硅材料高光吸收效率的优势，成功实现了可见光至近红外波段的同步高分辨率成像，该类传感器在低光照条件下仍能保持良好的成像质量，可广泛适配安防监控、遥感探测、工业检测等应用场景；在环境监测领域，碳量子点基光电探测器件基于量子点的尺寸依赖光学特性与高表面活性，可实现对水体中重金属离子（如汞离子、铅离子）、空气有害气体（如甲醛、二氧化硫）的高灵敏度、高选择性检测，其检测限可达纳摩尔甚至皮摩尔级别，为环境污染物的实时精准监测提供了全新技术方案；在光通信领域，石墨烯基高速光电探测器凭借其极高的载流子迁移率，响应速度可达到皮秒级，能够匹配高速光通信系统对信号接收速率的要求，有望应用于 5G 及下一代光通信网络的核心信号处理单元。

在新兴智能技术领域，柔性碳基光电探测器件成为推动可穿戴电子、智能医疗等产业发展的核心器件之一。在柔性可穿戴设备领域，基于聚合物衬底的柔性碳纳米管基光电探测器件具有优异的机械柔韧性与拉伸性能，可实现弯曲、折叠甚至拉伸状态下的稳定光电探测，将其集成于智能手环、智能衣物等设备中，能够实时监测人体生理光信号（如脉搏光体积描记信号），为健康状态评估提供精准数据支撑；在生物医学领域，碳量子点基光电探测器件因具备良好的生物相容性与低细胞毒性，可作为荧光探针与光电探测单元集成，实现细胞内生物分子的精准成像与肿瘤标志物的特异性检测，为早期肿瘤诊断、细胞生物学研究提供了重要工具；在太赫兹探测领域，石墨烯基太赫兹探测器利用其零带隙特性实现了对太赫兹波段的高效响应，其探测灵敏度显著优于传统太赫兹探测器件，可广泛应用于太赫兹安检、太赫兹医学诊断、天体物理观测等前沿领域。

（二）主要挑战与优化路径

当前碳基光电探测器件实现产业化应用面临的核心挑战主要集中在三个方面：一是环境稳定性较差，碳基材料（尤其是石墨烯、碳纳米管）表面化学活性较高，在空气环境中易发生氧化，导致材料光电性能衰减；同时，器件界面在湿

度、温度变化及光照长期照射等环境因素作用下，易出现界面分离、缺陷增多等劣化现象，严重影响器件的长期服役性能。二是规模化制备难度大，高质量碳基材料（如大面积单晶石墨烯、高纯度半导体型碳纳米管）的制备成本居高不下，且现有制备工艺难以实现大面积、均匀性良好的碳基功能层制备，导致器件性能一致性差，难以满足产业化批量生产的需求。三是部分关键性能指标有待提升，例如碳量子点基器件受限于载流子迁移率较低，响应速度较慢，难以适配高速探测场景；石墨烯基器件因零带隙特性导致暗电流较高，影响器件的探测灵敏度与信噪比，制约了其在高端精密探测领域的应用。

针对上述核心挑战，对应的优化路径主要包括三个方向：一是开发多维度稳定化技术，通过表面包覆、致密封装及材料改性等手段提升器件环境稳定性。例如，采用原子层沉积技术在碳基功能层表面沉积致密的 Al_2O_3 或 SiO_2 包覆层，隔绝空气与水汽；开发惰性气氛下的器件制备与封装工艺，从源头减少氧化劣化；通过化学掺杂或表面功能化修饰，降低碳基材料表面活性，提升其抗氧化能力。二是突破规模化制备关键技术，开发低成本、高精度的碳基材料与器件制备工艺。例如，发展卷对卷化学气相沉积（CVD）技术实现大面积石墨烯、碳纳米管薄膜的连续制备；优化溶液加工工艺（如喷墨打印、刮涂），提升碳量子点薄膜的大面积均匀性；建立标准化的器件制备流程，通过工艺参数精准调控，提升器件性能一致性。三是实施多维度性能协同优化策略，结合碳基材料改性、器件结构创新与界面工程调控的协同作用，同步提升器件的核心性能指标。例如，通过碳基材料掺杂与异质结构建相结合的方式，同时降低石墨烯基器件的暗电流并提升其探测灵敏度；通过优化碳量子点尺寸与表面钝化工艺，兼顾器件的光谱响应范围与响应速度。

（三）未来发展趋势

未来朝高性能、集成化、柔性化、智能化、多功能化发展。高性能化通过原子级调控材料与界面结构实现极致性能；集成化制备微型化、模块化芯片，适配高密度集成系统；柔性化开发可拉伸器件，拓展智能穿戴应用。

智能化引入自校准、自修复机制，如栅压动态调控实现多波段自适应探测；多功能化集成光电探测与储能、传感等功能，提升设备集成度；与人工智能、物联网融合，通过数据驱动优化性能，推动光电子系统智能化发展。

综上所述，碳基光电探测器件是光电子领域重要研究方向，通过优化设计

与调控可有效提升性能。尽管面临诸多挑战，但随着技术突破，其在多领域应用前景广阔，未来跨学科创新将实现从实验室到产业化的跨越，为光电子技术注入活力。

第二节 发光显示器件

发光显示器件是现代信息显示技术的核心载体，通过将电能转化为光能实现图像与文字的可视化呈现，广泛应用于智能手机、平板电脑、电视、可穿戴设备、车载显示等领域。碳基材料（碳量子点、石墨烯、碳纳米管、富勒烯等）凭借独特的光电特性，如宽色域发光、高载流子迁移率、良好的光学透明度与力学柔性，成为突破传统发光显示器件性能瓶颈的关键材料。基于碳基材料的发光显示器件兼具高亮度、高对比度、低功耗、柔性可弯曲等优势，契合下一代显示技术轻量化、便携化、高性能化的发展需求。本节系统阐述碳基材料发光显示器件的核心发光机制，重点探讨器件的关键制备技术、典型器件类型与性能调控、应用进展与产业化挑战，为高性能碳基发光显示器件的研发与工程化应用提供理论指导与技术支持。

一、碳基材料发光显示器件的核心发光机制

碳基材料的发光特性源于其独特的电子结构，不同类型碳基材料的发光机制存在显著差异，但核心均围绕电子-空穴对的激发、传输与复合发光过程展开。电子在外界能量（电能、光能）激发下从基态跃迁至激发态，激发态电子不稳定，会通过辐射复合方式释放光子回到基态，完成发光过程。深入理解碳基材料的发光机制，是精准调控器件发光性能、优化器件结构设计的基础。

（一）碳量子点的发光机制

碳量子点的发光机制主要包括量子尺寸效应、表面态效应与边缘态效应，三者共同决定其发光特性。量子尺寸效应是碳量子点发光的核心机制，碳量子点尺寸通常在 1-10 nm 之间，当尺寸小于其玻尔激子半径时，电子能级由连续态分裂为离散能级，带隙宽度随尺寸减小而增大，发光波长随之蓝移，通过调控碳量子点尺寸可实现从紫外到近红外区域的全光谱发光。表面态效应源于碳量子点表面丰富的官能团（羟基、羧基、氨基等），这些官能团会在禁带中形成表面态能级，

激发态电子可通过表面态能级进行辐射复合，表面态的类型与数量会影响发光强度与发光稳定性，通过表面修饰调控官能团种类，可实现发光性能的优化。边缘态效应则与碳量子点的边缘结构相关，边缘缺陷会形成局部能级，电子在缺陷能级与基态之间的跃迁会产生特定波长的发光，精准控制边缘缺陷密度可调控发光波长与量子产率。

（二）石墨烯与碳纳米管的发光机制

石墨烯本身为零带隙半导体，本征发光效率较低，其发光机制主要依赖于带隙工程调控，通过化学掺杂、缺陷工程、构建石墨烯量子点等方式引入带隙，使电子-空穴对能够发生辐射复合发光。例如，掺杂 heteroatoms（氮、硼等）可破坏石墨烯的电子结构对称性，形成有限带隙，激发态电子在掺杂能级与价带之间跃迁产生发光；石墨烯量子点则通过量子尺寸效应形成离散能级，实现高效发光。碳纳米管的发光机制与自身结构密切相关，单壁碳纳米管的发光源于一维受限电子的带间辐射复合，其发光波长由管径与 chiral index 决定，通过精准调控管径可实现近红外区域的窄带发光；多壁碳纳米管因管壁间的电子相互作用，发光机制更为复杂，主要表现为缺陷态主导的发光，缺陷能级的存在为电子-空穴复合提供了辐射跃迁通道。

（三）碳基复合体系的协同发光机制

碳基复合体系通过不同材料组分的协同作用优化发光性能，其发光机制主要包括能量转移机制与电荷转移机制。能量转移机制是指激发态能量在碳基材料与其他发光材料（如有机发光分子、半导体量子点）之间的传递，例如碳量子点作为能量给体，受激后将能量转移给有机发光分子受体，受体分子通过辐射复合发光，该机制可显著提升发光效率与发光稳定性。电荷转移机制则是指电子或空穴在碳基材料与复合组分之间的转移，形成电荷分离态，随后通过电荷复合释放光子，例如石墨烯与共轭聚合物复合时，石墨烯的高载流子迁移率可促进电荷传输，减少电荷复合损耗，提升发光效率。此外，碳基材料与金属纳米材料复合时，还会产生表面等离子体共振效应，增强局部电场强度，提升激发态电子的辐射复合概率，进一步强化发光性能。

二、碳基材料发光显示器件的关键制备技术

碳基材料发光显示器件的制备技术需兼顾碳基材料的发光特性与器件结构的

完整性，核心目标是实现碳基发光层的均匀沉积、电极与发光层的良好接触、器件结构的精准成型，同时保障器件的发光效率与长期稳定性。主流制备技术可分为碳基发光材料的制备与改性技术、器件核心结构制备技术、器件封装技术三大类，各类技术的协同配合是实现高性能碳基发光显示器件的关键。

（一）碳基发光材料的制备与改性技术

1. 碳基发光材料的制备技术

碳量子点的制备技术主要包括自上而下法与自下而上法，自上而下法通过物理或化学方法将大尺寸碳材料（石墨、碳纳米管）剥离破碎为纳米级碳量子点，如激光剥离法、电化学氧化法，该方法制备的碳量子点尺寸均匀性较好，但产量较低；自下而上法以小分子碳源（葡萄糖、柠檬酸、尿素等）为原料，通过水热合成、溶剂热合成、微波合成等方法制备碳量子点，具有成本低、产量高、易于大规模制备的优势，是产业化的核心方向。石墨烯与碳纳米管的制备技术已较为成熟，石墨烯可通过化学气相沉积（CVD）、氧化还原法制备，CVD法制备的石墨烯结晶度高、透光性好，适用于高端显示器件；碳纳米管可通过电弧放电法、化学气相沉积法制备，CVD法可实现碳纳米管的定向生长与大面积制备。

2. 碳基发光材料的改性技术

为提升碳基材料的发光性能，需通过表面修饰、掺杂改性、复合改性等技术优化其电子结构与光学特性。表面修饰采用硅烷偶联剂、有机配体等对碳量子点表面进行修饰，可减少表面缺陷、提升发光量子产率与分散稳定性；掺杂改性通过引入氮、硼、硫等 heteroatoms 调控碳基材料的带隙宽度，实现发光波长的精准调谐，例如氮掺杂碳量子点的发光量子产率可提升至 50% 以上；复合改性则将碳基材料与有机聚合物、半导体材料等复合，通过协同作用提升发光效率与稳定性，如碳量子点与聚芴复合可显著增强发光强度。

（二）器件核心结构制备技术

碳基发光显示器件的核心结构包括电极、发光层、空穴传输层、电子传输层等，制备技术需保障各功能层的均匀性与界面接触良好。电极制备技术方面，阳极通常采用氧化铟锡（ITO）透明电极，也可采用石墨烯、碳纳米管等碳基透明电极，碳基透明电极通过 CVD 法生长后转移至基底，或通过溶液涂覆法制备，具有良好的柔性与透光性；阴极多采用低功函数金属（铝、银、钙等），通过真空蒸镀法制备，保障电子的高效注入。发光层制备技术是核心环节，主要包括

溶液加工法与真空沉积法，溶液加工法（旋涂、喷墨打印、刮涂）适用于碳量子点、聚合物 / 碳基复合材料等可溶性材料，具有成本低、可大面积制备的优势，喷墨打印技术可实现发光层的图案化制备，契合高分辨率显示需求；真空沉积法适用于低挥发性碳基材料，可制备致密均匀的发光层，保障器件的稳定性。空穴传输层与电子传输层通过真空蒸镀或溶液涂覆法制备，选用合适的传输材料（如 PEDOT:PSS、TPD 为空穴传输材料，TPBi、ZnO 为电子传输材料），可提升电荷传输效率，减少电子 - 空穴对的非辐射复合。

（三）器件封装技术

封装技术是保障碳基发光显示器件长期稳定性的关键，核心目标是隔绝氧气与水分，避免碳基发光材料氧化、器件界面老化，同时保障器件的光学性能与力学性能。常用的封装材料包括玻璃、柔性聚合物（聚酰亚胺、聚二甲基硅氧烷）、无机薄膜（氮化硅、氧化硅）等，玻璃封装密封性好，但柔韧性差，适用于刚性显示器件；柔性聚合物封装具有良好的柔韧性，契合柔性显示需求，但阻隔性能较差；无机薄膜封装阻隔性能优异，可通过原子层沉积（ALD）法制备超薄致密的薄膜，适用于高性能柔性显示器件。封装技术包括真空贴合封装、涂覆封装、薄膜封装等，真空贴合封装将封装材料与器件在真空环境下贴合，减少气泡产生，提升封装密封性；涂覆封装通过旋涂、喷涂等方式将封装材料涂覆在器件表面，操作简单、成本低；薄膜封装则通过多层无机 / 有机薄膜交替沉积形成阻隔层，显著提升阻隔性能，延长器件服役寿命。

三、碳基材料发光显示器件的典型类型与性能调控

基于碳基材料的发光显示器件已发展出碳量子点发光二极管（CQLED）、石墨烯增强型发光二极管（G-LED）、碳纳米管发光二极管（CNT-LED）等典型类型，各类器件的结构设计与性能特点存在显著差异。性能调控的核心思路是通过材料改性、结构优化与工艺参数调整，协同提升器件的发光亮度、发光效率、对比度与稳定性，实现全光谱、高性能的发光显示。

（一）碳量子点发光二极管（CQLED）

CQLED 以碳量子点为核心发光层，具有发光波长可调、色域宽、低功耗、生物相容性好等优势，是碳基发光显示器件的主流类型。其核心结构为“阳极 - 空穴传输层 - 碳量子点发光层 - 电子传输层 - 阴极”的多层堆叠结构，碳量子点

发光层的性能直接决定器件的发光效果。CQLED 的关键性能指标包括发光亮度、电流效率、外部量子效率 (EQE) 与寿命, 目前高性能 CQLED 的发光亮度可达 10000 cd/m^2 以上, EQE 超过 20%, 寿命突破 1000 小时。性能调控策略主要包括: 通过尺寸调控与表面修饰实现碳量子点发光波长的精准调谐, 制备红、绿、蓝三基色发光材料, 构建全彩显示器件; 优化发光层厚度与形貌, 提升电子-空穴对的复合效率; 选用高效的电荷传输材料, 减少电荷传输损耗; 通过界面修饰提升电极与传输层、传输层与发光层的界面相容性, 降低界面电阻。

(二) 石墨烯增强型发光二极管 (G-LED)

G-LED 将石墨烯作为电极或电荷传输层引入传统发光二极管结构, 利用石墨烯的高透光性、高载流子迁移率与良好的力学柔性, 提升器件性能。当石墨烯作为透明阳极时, 可替代传统 ITO 电极, 解决 ITO 电极脆性大的问题, 提升器件的柔性与透光性; 当石墨烯作为电荷传输层时, 可显著提升电荷传输效率, 减少电荷复合损耗, 增强发光亮度。G-LED 的核心性能优势在于高柔性、高透光率与低驱动电压, 柔性 G-LED 在弯曲半径 5 mm 的条件下弯曲 1000 次后, 发光性能无明显衰减; 透光率超过 90%, 对比度显著提升。性能调控策略包括: 优化石墨烯的生长工艺, 提升其结晶度与导电性能; 通过掺杂改性降低石墨烯的功函数, 提升电荷注入效率; 优化石墨烯与其他功能层的界面结合, 减少界面电荷复合; 设计多层石墨烯堆叠结构, 平衡透光性与导电性。

(三) 碳纳米管发光二极管 (CNT-LED)

CNT-LED 以碳纳米管为发光层或电荷传输层, 单壁碳纳米管的一维电子结构使其具有窄带发光特性, 适用于近红外显示、生物成像等特殊领域; 多壁碳纳米管则通过缺陷态发光实现可见光发射。CNT-LED 的核心结构包括碳纳米管发光层、电荷传输层与电极, 其发光波长可通过调控碳纳米管管径与 chiral index 实现精准调谐。目前 CNT-LED 的发光亮度可达 5000 cd/m^2 以上, EQE 超过 10%, 在近红外显示领域具有独特优势。性能调控策略主要包括: 通过定向生长技术制备高纯度、高取向的碳纳米管, 提升发光效率; 调控碳纳米管的管径分布, 实现单一波长的窄带发光; 引入掺杂剂优化碳纳米管的电子结构, 提升电荷传输与复合效率; 优化器件结构, 减少碳纳米管之间的团聚, 保障电荷传输的连续性。

四、碳基材料发光显示器件的应用进展与产业化挑战

近年来,碳基材料发光显示器件的研发取得显著进展,在全彩显示、柔性显示、近红外显示、生物医学显示等领域已开发出多款实验室原型器件,部分核心技术已进入中试阶段,展现出广阔的产业化前景。但受材料性能、制备工艺、成本控制等多重因素限制,规模化产业化仍面临诸多挑战。本节将系统阐述典型应用进展,深入分析产业化瓶颈,并展望未来发展方向。

(一) 典型应用进展

1. 全彩显示领域

基于碳量子点的全彩发光显示技术已取得突破性进展,国内科研团队开发的红、绿、蓝三基色 CQLED 器件,发光纯度高、色域宽,色域覆盖率超过 110% NTSC,显著优于传统 LCD 与 OLED 显示器件。采用喷墨打印技术制备的碳量子点全彩显示面板原型,分辨率达到 300 PPI 以上,实现了清晰的图像显示,为高端显示产品的研发提供了技术支撑。

2. 柔性显示领域

碳基柔性发光显示器件已成为柔性显示技术的重要发展方向,三星、LG 等国际企业已推出柔性 G-LED 原型产品,采用石墨烯透明电极,可实现 180° 折叠显示,折叠 10000 次后发光性能无明显衰减。国内科研机构开发的柔性 CQLED 器件,弯曲半径可达 2 mm,在动态形变过程中保持稳定的发光效果,适用于可穿戴手环、柔性手机等终端产品。

3. 近红外显示领域

碳纳米管发光显示器件在近红外显示领域具有独特优势,单壁碳纳米管 CNT-LED 可实现近红外区域的窄带发光,发光波长覆盖 800-1500 nm,适用于夜视显示、红外成像、光通信等特殊领域。已开发的近红外 CNT-LED 器件,发光亮度可达 3000 cd/m² 以上,响应速度小于 10 μs,为近红外显示技术的产业化提供了可能。

4. 生物医学显示领域

碳量子点具有良好的生物相容性与低毒性,基于碳量子点的生物医学显示器件可实现生物体内的实时成像与显示,适用于疾病诊断、药物追踪等领域。已开发的碳量子点生物发光显示器件,可在活体动物体内实现靶向发光成像,成像分

分辨率高、背景干扰小，为精准医疗提供了全新的技术手段。

（二）产业化挑战

当前，碳基材料发光显示器件的产业化进程面临四大核心挑战：一是高性能碳基发光材料的规模化制备技术尚不成熟。碳量子点的大面积制备过程中，尺寸均匀性与发光性能一致性难以保障，量子产率波动较大；高质量石墨烯、碳纳米管的制备成本较高，产量难以满足产业化需求，导致器件生产成本居高不下。二是器件发光效率与寿命仍需提升。部分碳基发光显示器件的外部量子效率、发光亮度与传统 OLED 器件相比仍有差距，尤其是蓝色碳量子点器件的寿命较短，难以满足商业显示产品的寿命要求（通常需超过 10000 小时）。三是制备工艺的精准度与自动化程度不足。溶液加工法制备发光层时，易出现膜层不均匀、针孔缺陷等问题；喷墨打印技术的图案化精度难以满足超高分辨率显示需求；规模化生产过程中的工艺参数控制精度不足，导致器件性能离散度较大。四是封装技术有待优化。碳基材料对氧气与水分较为敏感，现有柔性封装技术的阻隔性能难以完全满足器件长期稳定性需求，在高温、高湿度环境下，器件性能衰减较快，影响使用寿命。此外，行业标准体系缺失、核心专利布局不足等因素也制约了产业化推进。

第三节 光伏转换器件

光伏转换器件作为太阳能利用的核心载体，通过光生伏特效应将太阳能直接转化为电能，是应对能源危机与环境问题的关键技术路径。碳基材料凭借优异的光学吸收特性、高导电性、良好的柔韧性、低成本及环境友好等优势，逐步成为光伏转换器件领域的研究热点，有望突破传统硅基光伏器件成本高、制备工艺复杂、柔性差等局限。基于碳基材料的光伏转换器件主要包括石墨烯基光伏器件、碳纳米管基光伏器件、碳量子点基光伏器件及全碳基光伏器件等，通过精准调控材料结构与界面特性，可实现宽光谱吸收、高效光生载流子分离与传输，显著提升器件光电转换效率。本节系统梳理碳基光伏转换器件的核心类型、工作机制、结构设计、制备工艺及性能优化策略，深入探讨器件研发过程中的关键科学问题与技术突破路径，为碳基光伏转换器件的定向设计与产业化推进提供理论与技术支撑。

一、石墨烯基光伏转换器件：高效载流子传输的光伏体系

石墨烯作为二维碳纳米材料，具有超高电子迁移率、宽光谱吸收特性、良好的透光性与柔韧性，在光伏转换器件中可作为透明导电电极、电子 / 空穴传输层或光吸收层组分，通过构建高效载流子传输通道、提升光吸收效率，显著优化器件性能。石墨烯基光伏器件的核心优势在于载流子传输速率快、界面阻抗低、柔韧性优异，适用于柔性光伏组件、叠层光伏器件等新兴应用场景。根据器件结构与工作机制的差异，石墨烯基光伏转换器件主要分为石墨烯 / 硅异质结光伏器件、石墨烯 / 有机半导体光伏器件、石墨烯 / 钙钛矿光伏器件等类型。

（一）石墨烯 / 硅异质结光伏器件

石墨烯 / 硅异质结光伏器件利用石墨烯与硅之间的功函数差异构建肖特基势垒，形成内建电场，实现光生载流子的有效分离与传输。该类型器件整合了石墨烯的高导电性、宽光谱吸收与硅基器件的成熟制备工艺，具有结构简单、制备成本低、响应速度快等优势。石墨烯作为透明导电电极覆盖于硅基底表面，不仅可替代传统氧化铟锡（ITO）电极，还能通过界面修饰提升光吸收效率与载流子分离效率。

器件性能与石墨烯的层数、表面修饰状态及界面结合质量密切相关。单层石墨烯透光率高达 97.7%，可有效减少光反射损失，但导电性与机械稳定性有待提升；多层石墨烯导电性增强，但透光率下降，需在透光率与导电性之间寻求平衡。通过化学掺杂（如硝酸、金纳米颗粒掺杂）可显著提升石墨烯的导电性，优化肖特基势垒高度，提升载流子分离效率。例如，硝酸掺杂的石墨烯 / 硅异质结光伏器件，光电转换效率可达 15% 以上，较未掺杂器件提升 40% 以上。此外，通过在石墨烯与硅界面引入氧化硅缓冲层、硅量子点修饰层等，可减少界面缺陷态密度，抑制载流子复合，进一步提升器件稳定性与光电转换效率。

柔性石墨烯 / 硅异质结光伏器件通过采用柔性硅基底（如超薄硅片、硅纳米膜）与柔性石墨烯电极构建，具有良好的机械柔韧性，可适配曲面、可穿戴等特殊应用场景。例如，基于超薄硅片（厚度小于 50 μm ）的石墨烯 / 硅柔性光伏器件，在弯曲角度达到 180° 时，光电转换效率仍保持初始值的 90% 以上，展现出优异的机械稳定性与应用潜力。

（二）石墨烯 / 有机半导体光伏器件

石墨烯 / 有机半导体光伏器件以有机半导体材料作为光吸收层，石墨烯作为透明导电电极或载流子传输层，具有制备工艺简单、成本低廉、柔性好等优势，是柔性光伏器件的重要研究方向。有机半导体材料（如聚噻吩衍生物、富勒烯衍生物、茚酮亚胺等）具有宽光谱吸收特性、可调的能带结构，与石墨烯复合后可构建高效的光吸收与载流子传输体系。

石墨烯作为透明导电电极时，可替代传统 ITO 电极，解决 ITO 电极脆性大、成本高的问题。通过优化石墨烯的转移工艺、表面平整度及掺杂状态，可提升其导电性与透光性，保障器件的光电性能。例如，石墨烯基有机光伏器件的光电转换效率可达 10% 以上，接近 ITO 基有机光伏器件水平，且柔韧性显著提升。石墨烯作为电子 / 空穴传输层时，可利用其高电子迁移率构建高效载流子传输通道，减少载流子复合损失。例如，石墨烯修饰的有机光伏器件电子传输层，电子传输效率提升 30% 以上，器件的短路电流密度与填充因子显著优化。

石墨烯 / 有机半导体复合光吸收层通过将石墨烯均匀分散于有机半导体基质中，形成互穿网络结构，可增强光吸收效率与载流子分离效率。石墨烯的引入不仅拓展了有机半导体的光谱响应范围，还通过电荷转移作用促进光生载流子的分离。例如，石墨烯 / 聚(3-己基噻吩)(P3HT) / [6,6]-苯基-C61-丁酸甲酯(PCBM)复合光伏器件，光电转换效率较纯有机光伏器件提升 25% 以上，且循环稳定性显著增强。

二、碳纳米管基光伏转换器件：一维导电网络的光伏体系

碳纳米管具有独特的一维纳米结构、超高电子迁移率、宽光谱吸收特性及良好的机械稳定性，在光伏转换器件中可作为透明导电电极、电子 / 空穴传输层或光吸收层组分，通过构建三维导电网络、提升光生载流子传输效率，优化器件性能。碳纳米管基光伏器件的核心优势在于载流子传输路径明确、机械柔韧性优异、抗辐射能力强，适用于柔性光伏器件、空间光伏器件等特殊场景。根据碳纳米管类型（单壁、多壁）与器件结构的差异，碳纳米管基光伏转换器件主要分为碳纳米管 / 硅异质结光伏器件、碳纳米管 / 有机半导体光伏器件、碳纳米管敏化光伏器件等类型。

（一）碳纳米管 / 硅异质结光伏器件

碳纳米管 / 硅异质结光伏器件利用碳纳米管的高导电性与硅的高光吸收系数构建异质结结构，实现高效光电转换。碳纳米管可通过溶液旋涂、化学气相沉积等方法沉积于硅基底表面，形成均匀的导电网络，作为透明导电电极或载流子传输层。单壁碳纳米管因电子迁移率更高、透光性更好，更适用于高性能光伏器件；多壁碳纳米管则因成本较低、机械稳定性更强，适用于规模化应用场景。

器件性能与碳纳米管的分散均匀性、管径分布、表面修饰状态密切相关。碳纳米管的均匀分散可确保导电网络的连续性，减少载流子传输阻力；管径分布均匀则有利于构建稳定的异质结界面，提升载流子分离效率。通过表面功能化修饰（如羟基、羧基修饰）可增强碳纳米管与硅之间的界面结合强度，减少界面缺陷态密度。例如，羧基修饰的单壁碳纳米管 / 硅异质结光伏器件，光电转换效率可达 14% 以上，循环 1000 次后容量保持率超过 90%。

碳纳米管 / 硅纳米线复合光伏器件通过在硅纳米线阵列表面覆盖碳纳米管导电网络，进一步提升光吸收效率与载流子传输效率。硅纳米线阵列的一维结构可增强光散射与光捕获能力，碳纳米管则提供高效电子传输通道，二者协同作用使器件光电转换效率较平面结构提升 50% 以上。此外，该复合结构还可缓解硅基器件的体积膨胀问题，提升机械稳定性。

（二）碳纳米管 / 有机半导体光伏器件

碳纳米管 / 有机半导体光伏器件通过碳纳米管与有机半导体材料的复合，构建高效光吸收与载流子传输体系，具有柔性好、制备成本低、可大面积制备等优势。碳纳米管在器件中可作为透明导电电极、电子 / 空穴传输层或光吸收层组分，其一维导电网络可显著提升载流子传输效率，抑制载流子复合。

碳纳米管作为透明导电电极时，可替代 ITO 电极，解决有机光伏器件的柔性问题。通过优化碳纳米管薄膜的厚度、面电阻与透光率，可实现导电性与透光性的平衡。例如，碳纳米管透明导电电极的面电阻可低至 $10\ \Omega/\text{sq}$ ，透光率超过 90%，基于该电极的有机光伏器件光电转换效率可达 9% 以上，且在弯曲角度为 120° 时性能保持稳定。碳纳米管作为载流子传输层时，可通过调控其管径与表面修饰状态，实现电子或空穴的选择性传输，提升器件的开路电压与短路电流密度。

碳纳米管 / 有机半导体复合光吸收层通过原位聚合或溶液混合的方式制备，

碳纳米管均匀分散于有机半导体基质中,形成互穿导电网络。例如,碳纳米管/P3HT/PCBM 复合光伏器件,碳纳米管的引入使器件的载流子迁移率提升 2 倍以上,光电转换效率较纯有机器件提升 30% 以上。此外,碳纳米管还可作为模板诱导有机半导体分子定向生长,形成有序结构,进一步优化载流子传输效率。

三、碳量子点基光伏转换器件:宽光谱响应的光伏体系

碳量子点作为零维碳纳米材料,具有宽光谱吸收特性、高荧光量子产率、良好的光稳定性、低毒性及环境友好等优势,在光伏转换器件中可作为敏化剂、光吸收层组分或电子/空穴传输层修饰材料,通过拓展光谱响应范围、提升光生载流子分离效率,优化器件性能。碳量子点基光伏器件的核心优势在于光谱响应范围宽、制备成本低廉、环境兼容性好,适用于低成本光伏组件、多光谱光伏器件等场景。根据器件结构与工作机制的差异,碳量子点基光伏转换器件主要分为碳量子点敏化光伏器件、碳量子点/聚合物复合光伏器件、碳量子点/钙钛矿复合光伏器件等类型。

(一) 碳量子点敏化光伏器件

碳量子点敏化光伏器件以碳量子点作为敏化剂,负载于宽禁带半导体基底(如 TiO_2 、 ZnO 、 SnO_2 等)表面,通过碳量子点吸收光子产生光生电子-空穴对,电子注入半导体导带并传输至外电路,空穴通过电解质或空穴传输材料转移,实现光电转换。该类型器件制备工艺简单、成本低廉,可通过调控碳量子点的尺寸、表面官能团及元素掺杂实现光谱响应的精准调控。

碳量子点敏化 TiO_2 光伏器件是研究最广泛的类型之一,其核心结构包括透明导电电极、 TiO_2 纳米晶薄膜、碳量子点敏化层、电解质及对电极。碳量子点通过物理吸附或化学键合方式负载于 TiO_2 表面,当太阳光照射时,碳量子点吸收光子被激发,产生的光生电子通过界面电荷转移注入 TiO_2 导带,随后传输至透明导电电极;碳量子点表面的空穴则与电解质中的还原态物质发生氧化还原反应,完成电荷循环。通过优化碳量子点的制备工艺提升量子产率,调控表面官能团增强与 TiO_2 的界面结合,引入元素掺杂(如 N、P、S 掺杂)拓展光谱响应范围,器件的光电转换效率已提升至 5% 以上。

碳量子点敏化 ZnO 光伏器件则利用 ZnO 的高电子迁移率特性,提升载流子传输效率。 ZnO 纳米线阵列作为基底结构,其一维纳米结构可提供直接的电子传

输通道，减少载流子复合。将碳量子点负载于 ZnO 纳米线阵列表面构建的敏化光伏器件，电子传输效率显著提升，器件的短路电流密度可达 10 mA/cm^2 以上。此外，通过构建碳量子点 /ZnO 核壳结构，可进一步增强光吸收效率与界面电荷转移能力，提升器件性能。

（二）碳量子点 / 聚合物复合光伏器件

碳量子点 / 聚合物复合光伏器件通过碳量子点与导电聚合物（如 P3HT、聚乙炔、聚苯胺等）复合构建光吸收层，利用碳量子点的宽光谱吸收特性与聚合物的高载流子迁移率，实现协同增强的光电转换效果。该类型器件兼具碳量子点的宽光谱响应与聚合物的柔性、低成本优势，适用于柔性光伏组件的制备。

碳量子点均匀分散于聚合物基质中，形成互穿网络结构，有利于光吸收与载流子分离。例如，碳量子点 /P3HT/PCBM 复合光伏器件，碳量子点的引入不仅拓展了器件的光谱响应范围（从可见光延伸至近红外波段），还通过电荷转移作用促进了 P3HT 与 PCBM 之间的光生载流子分离，器件的光电转换效率较纯有机光伏器件提升 30% 以上。通过调控碳量子点的负载量、分散均匀性及与聚合物的界面相容性，可进一步优化器件的光吸收效率与载流子传输效率。

柔性碳量子点 / 聚合物复合光伏器件以柔性聚合物（如聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚二甲基硅氧烷）为基底，采用溶液旋涂、喷墨打印等低成本制备工艺，具有良好的机械柔韧性与可穿戴性。例如，基于碳量子点 /P3HT 复合薄膜的柔性光伏器件，在弯曲角度达到 180° 时，光电转换效率仍保持初始值的 85% 以上，且具有良好的长期稳定性，经过 500 次弯曲循环后性能无显著衰减。

四、碳基光伏转换器件的性能优化与产业化挑战

尽管碳基光伏转换器件具有诸多优势，但目前其光电转换效率、长期稳定性与规模化制备能力仍难以满足产业化需求，核心瓶颈在于材料质量控制、界面载流子复合、器件结构设计及制备工艺优化等方面。针对这些关键问题，研究者提出了一系列性能优化策略，包括碳基材料的精准调控、界面工程修饰、器件结构创新及绿色制备工艺开发等。同时，随着技术的不断进步，碳基光伏转换器件的产业化进程正逐步推进，但仍面临诸多挑战，需要多学科交叉融合，推动材料、结构与工艺的协同创新。

（一）核心性能优化策略

碳基材料的精准调控是提升器件性能的基础。通过优化碳基材料的制备工艺，可实现尺寸、形貌、晶体结构及表面化学性质的精准调控。例如，通过化学气相沉积工艺调控石墨烯的生长温度与气体比例，可制备出高质量单层石墨烯，提升其电子迁移率与透光率；通过模板法调控碳纳米管的管径与长度，可优化其导电网络结构；通过溶剂热法调控碳量子点的尺寸与元素掺杂，可拓展其光谱响应范围。此外，碳基材料的后处理工艺（如退火、掺杂、表面功能化）可进一步提升材料质量，优化其光学与电学性能。

界面工程修饰是抑制载流子复合、提升器件性能的关键。碳基材料与其他材料（半导体、聚合物、电解质等）之间的界面缺陷是导致载流子复合的主要原因，通过界面修饰可减少缺陷态密度，增强界面结合强度，提升电荷转移效率。常用的界面修饰方法包括引入缓冲层、表面功能化修饰、等离子体处理等。例如，在石墨烯与硅界面引入 Al_2O_3 缓冲层，可显著减少界面缺陷，提升载流子分离效率；对碳纳米管进行羟基修饰，可增强其与聚合物的界面相容性，减少载流子复合损失。

器件结构创新是实现性能突破的重要路径。通过构建叠层结构、异质结结构、三维多孔结构等新型器件结构，可提升光吸收效率与载流子传输效率。例如，石墨烯/硅叠层光伏器件可实现宽光谱吸收，显著提升器件的短路电流密度；碳量子点/钙钛矿异质结光伏器件通过协同作用，可抑制载流子复合，提升光电转换效率；三维多孔碳基光伏器件则可增大比表面积，提升光吸收效率与电荷转移效率。

（二）产业化挑战与发展趋势

碳基光伏转换器件的产业化仍面临诸多挑战：一是碳基材料质量一致性难以保障，大规模制备过程中，石墨烯、碳纳米管、碳量子点等材料的尺寸、形貌、性能易出现批次差异，影响器件的批量生产质量；二是器件光电转换效率有待提升，目前碳基光伏器件的最高光电转换效率仍低于传统硅基器件与钙钛矿器件，难以满足大规模能源应用需求；三是制备工艺成本较高，高端碳基材料（如高质量石墨烯、单壁碳纳米管）的制备工艺复杂、成本高昂，制约了其规模化应用；四是器件长期稳定性差，在高温、高湿度、强辐射等复杂环境下，碳基材料易发生氧化、剥离等问题，影响器件的使用寿命。

第四节 光电集成系统

光电集成系统通过单片或混合集成技术整合碳基光电探测、发光、调制等功能单元，实现光 - 电信号高效协同处理，核心目标是突破传统分立器件效率低、延迟大、体积大的瓶颈，构建轻量化、高集成度的功能一体化平台。碳基材料凭借优异光电特性、宽光谱响应及柔性兼容性，成为该系统的理想载体，在宽光谱探测、柔性集成等领域展现独特优势，支撑电子信息、新能源等核心领域发展。本节围绕碳基光电集成系统的集成原理、制备技术、主要类型及应用展望展开，剖析结构 - 性能机制与发展瓶颈，为优化设计与产业化提供理论技术支撑。

一、碳基光电集成系统的核心集成原理与设计准则

碳基光电集成系统的功能实现依赖单元协同工作，核心在于通过集成原理设计与结构优化保障光 - 电信号高效转换传输。明确核心原理与设计准则是性能优化的基础，以下从集成原理、设计准则及评价体系三方面构建理论框架。

（一）核心集成原理

碳基光电集成原理分为单片集成与混合集成两类。单片集成是在同一碳基衬底（石墨烯、金刚石等）上通过微纳加工直接制备多功能单元，实现物理共面与电学互联，其优势在于界面兼容性好、信号路径短、寄生参数小，可显著提升响应速度与集成度。例如石墨烯衬底上制备的光电探测 - 调制系统，信号传输延迟可达纳秒级，关键在于保障衬底适配不同单元制备工艺，避免相互干扰。

混合集成则将预制碳基功能单元（碳量子点发光管、碳纳米管探测器等）通过键合、贴装等技术与传统器件集成，核心优势是发挥不同材料器件优势，降低制备难度，提升功能扩展性。如碳量子点发光单元与硅基驱动电路的倒装键合集成，兼顾发光性能与驱动稳定性，关键在于保障界面光 - 电信号高效耦合与互联稳定。此外，信号交互原理含光耦合与电互联，通过微纳透镜、波导结构减少光损耗，依托高导电碳基线路保障电信号低损高速传输。

（二）关键设计准则

系统设计遵循“功能协同、性能匹配、工艺兼容、可靠性优先”核心准则，具体包括四方面。功能单元选型匹配需根据应用目标精准选择单元类型参数，确保功能互补，如宽光谱探测系统需选用宽响应石墨烯探测器搭配碳纳米管调制器，

避免探测范围受限。

光-电信号匹配要求光波长、功率与电频率、幅值适配,保障转换高效,如发光-探测系统需匹配发射与响应波长及光功率与探测灵敏度。工艺兼容性需避免后续工艺损伤前置单元,如单片集成中采用低温沉积制备金属电极,保护碳基发光单元。可靠性设计需考量环境因素,通过结构优化与封装提升适应性,如柔性系统采用柔性封装与弹性互联结构,同时兼顾轻量化小型化需求。

(三) 性能评价体系

建立“整体-单元-界面”三位一体评价体系,核心指标含光-电转换效率、传输速率、响应时间等。转换效率方面,探测类系统量子效率不低于80%,发光类外量子效率不低于20%;高频系统传输速率不低于100 Gbps,响应时间不超过10 ns;宽光谱系统需实现200 nm-15 μm 全响应;便携式系统功耗不超过10 mW,集成度不低于10个/ cm^2 。

环境适应性要求-40℃~85℃性能变化率 $\leq 10\%$,相对湿度30%~90%性能保留率 $\geq 85\%$;长期可靠性需保障3~10年性能保留率 $\geq 80\%$,通过加速老化等实验验证。此外还需评价制备成本、可重复性与扩展性,综合保障应用价值。

二、碳基光电集成系统的关键制备技术

碳基光电集成系统制备为多环节协同工程,核心包括功能单元制备、集成互联及封装测试三大环节,技术选择直接影响集成度、性能与可靠性,以下阐述各环节关键技术原理、优缺点及应用场景。

(一) 碳基光电功能单元制备技术

功能单元是系统基础,含探测、发光、调制、传输单元等,制备技术成熟度决定性能上限。探测单元制备随材料差异:石墨烯探测器常用CVD法(大面积批量生产)或机械剥离法(高质量),经微纳加工成型;碳纳米管探测器需精准调控管径、长度与取向,保障探测均匀性。

发光单元以碳量子点、石墨烯量子点为核心,采用旋涂、喷墨打印等溶液加工法制备发光层,兼具简便、低成本、大面积优势,适配柔性集成,喷墨打印可实现图案化提升集成精度。调制单元依托石墨烯、碳纳米管,通过电场调控光电特性,采用光刻结合离子注入技术保障高调制深度与快响应。传输单元含碳基光波导与互联线路,通过刻蚀碳基薄膜形成波导,CVD法制备碳纳米管阵列或石

墨烯导线，等离子体处理优化界面接触。

（二）集成互联技术

集成互联技术分单片与混合两类。单片互联含光刻刻蚀与原位生长技术：光刻刻蚀通过图案定义与刻蚀形成互联线路，集成精度达纳米级，适配高密度集成，但工艺复杂；原位生长在预设路径原位生长碳基材料形成线路，避免衬底损伤，适配高质量集成，但参数控制难度高。

混合互联含键合、贴装与异质集成技术：键合通过金属-金属、共晶等方式实现碳基单元与硅基等器件紧密连接，如金-金热压键合保障信号低损传输，但需控制温压；贴装依托导电胶、倒装等方式，简便低成本适配小批量生产，但稳定性差；异质集成通过原子层沉积等技术实现碳基与硅、氮化镓等无缝集成，提升性能兼容性，适配高性能系统，但工艺复杂、成本高。

（三）封装测试技术

封装技术核心是防护功能单元与互联结构，保障光-电信号传输，分刚性与柔性两类。刚性封装采用玻璃、陶瓷等材料密封防护，适配固定式系统，防护性与稳定性好，但重且柔性差；柔性封装采用聚酰亚胺、PDMS等材料，经溶液涂覆、热压封装，适配柔性穿戴设备，轻且兼容强，但防护性较弱，需结合防水防腐涂层优化，同时设计光耦合窗口保障光传输。

测试技术含光、电、整体性能及可靠性测试：光性能测试发光效率、光谱响应等；电性能测试响应时间、传输速率等；整体性能测试模拟应用场景表现；可靠性测试通过加速老化、高低温循环等评估长期稳定性。需建立标准化流程保障数据准确可比。

三、碳基光电集成系统的主要类型与应用机制

根据应用场景与功能需求，碳基光电集成系统分为探测、发光显示、光伏、光电通信四大类，各类系统结构、核心单元与应用机制差异显著，明确其特性与范围是精准应用的基础，以下阐述各类系统核心结构、应用机制及性能特点。

（一）碳基光电探测集成系统

此类系统核心功能为光信号探测、调制与处理，广泛应用于环境监测、生物成像等领域，核心结构为“探测单元+调制单元+信号处理单元+供电单元”。应用机制基于光电导、光生伏特效应，光信号照射产生电子-空穴对，改变材料

导电性实现光 - 电转换，经调制处理输出结果。

例如石墨烯 - 碳量子点复合探测系统，利用碳量子点宽光谱吸收与石墨烯高载流子迁移率实现全光谱探测，搭配碳纳米管调制单元提升信号强度，硅基处理单元解析数据，探测率达 10^{12} Jones，响应时间 < 5 ns。其优势为宽光谱响应、高灵敏度、快响应，常温红外探测无需制冷，生物成像领域可实现高分辨率活体检测。

（二）碳基发光显示集成系统

核心功能是电 - 光转换实现图像文字显示，应用于柔性显示、车载显示等领域，结构为“发光单元阵列 + 驱动单元 + 控制单元 + 封装单元”。应用机制基于电致发光效应，驱动单元施加电压使电子 - 空穴在碳基材料中复合发光，控制单元调控发光强度与开关状态形成图像。

如碳量子点柔性显示系统，喷墨打印制备发光二极管阵列，搭配碳纳米管薄膜晶体管驱动，发光效率 50 lm/W，色域超 100% NTSC，弯曲半径 5 mm，弯曲 10000 次性能保留率 $\geq 90\%$ ，适配穿戴设备与折叠屏。优势为柔性好、色域广、响应快、功耗低、成本低，在柔性透明显示领域独具优势，车载场景可适配曲面造型。

（三）碳基光伏集成系统

核心功能是太阳能 - 电能转换与存储管理，应用于分布式光伏、便携式电源等领域，结构为“光伏单元阵列 + 储能单元 + 充放电控制单元 + 防护单元”。应用机制基于光生伏特效应，太阳光照射产生电子 - 空穴对，自建电场分离形成光生电流，电能部分直供负载，部分存储备用。

如石墨烯 / 硅异质结光伏系统，利用石墨烯透光性与高载流子迁移率提升效率，搭配碳基超级电容器储能，转换效率 25%，储能比容量 150 F/g，适配分布式电站。优势为转换效率高、柔性好、环境适应性强、成本低，可柔性制备适配复杂曲面，耐腐蚀性强适配恶劣环境，便携式场景可提升设备续航。

（四）碳基光电通信集成系统

核心功能是光信号产生、调制、传输、探测与电处理协同，实现信息高效交互，应用于高速通信、数据中心等领域，结构为“发光单元 + 调制单元 + 传输单元 + 探测单元 + 信号处理单元”。应用机制为电信号控制发光单元产生光信号，经调制传输至接收端，探测单元转换为电信号，解调后完成信息传输。

如碳纳米管 - 石墨烯通信系统, 碳纳米管发光管产生高速光信号, 石墨烯调制器调制速率 100 Gbps, 碳基光波导传输损耗 $< 0.5 \text{ dB/cm}$, 石墨烯探测器响应时间 $< 2 \text{ ns}$, 适配数据中心短距通信。优势为传输速率高、延迟小、功耗低、集成度高, 可实现太赫兹频段通信提升容量, 体积小适配卫星与便携式设备。

四、碳基光电集成系统的应用领域与发展展望

碳基光电集成系统凭借高集成度、低功耗等优势, 在多领域展现广阔前景, 同时面临性能、成本等挑战。以下阐述应用领域, 分析现存问题, 展望发展趋势。

(一) 主要应用领域

电子信息领域: 高速通信中, 太赫兹频段传输速率 $> 1 \text{ Tbps}$, 适配 5G/6G 核心节点; 数据中心提升服务器交互效率; 智能终端中, 柔性显示适配折叠设备, 探测单元提升摄像头成像质量。新能源领域: 分布式光伏利用闲置空间供电, 光伏建筑一体化实现节能发电协同, 柔性光伏电源适配户外应急场景。

生物医疗领域: 生物成像实现高分辨率荧光成像辅助早期诊断, 光谱检测快速诊断肿瘤等疾病, 光动力治疗精准杀伤肿瘤细胞。航空航天领域: 卫星通信适配严苛环境, 航空探测保障飞行安全, 光伏系统提升航天器续航。

(二) 当前存在的问题与挑战

现存核心问题包括: 一是光 - 电转换效率不足, 碳量子点发光、碳纳米管光伏等单元效率低于传统材料, 制约系统性能; 二是集成度与兼容性差, 高密度集成难度大, 碳基与传统半导体材料兼容不足; 三是制备成本高, 高质量碳基材料与复杂工艺导致成本远超传统系统; 四是规模化生产不成熟, 实验室技术难以批量应用, 质量控制难、良品率低; 五是长期可靠性待验证, 恶劣环境下性能演变不明, 界面老化等可能导致失效; 六是评价标准不统一, 数据可比性差, 回收利用技术起步晚。

(三) 未来发展趋势

未来将朝着高性能化、高密度集成化、柔性智能化、低成本化与绿色化发展。高性能化通过材料改性与结构优化提升转换效率, 开发新型复合材料, 优化光 - 电耦合结构。高密度集成化依托先进微纳加工技术实现高密度单片集成, 开发高效异质集成技术提升兼容性。

柔性智能化重点发展柔性系统, 开发柔性衬底与封装技术, 融合 AI、物联

网开发智能响应系统，如自适应调节发光强度的显示系统。低成本化通过生物质基碳材料、工业级 CVD 法降本，优化工艺实现规模化生产。绿色化开发环保工艺与封装材料，研究解聚等回收技术。

此外，需加强基础研究揭示光电转换与信号交互规律，建立统一评价与工艺标准，强化产学研合作加速临床验证与产业化。碳基光电集成系统作为先进光电技术方向，必将通过多学科融合创新，实现产业化应用，推动相关产业升级。

第九章 碳基传感器件

第一节 物理传感器

物理传感器作为物理量 - 电信号转换的核心器件，广泛应用于工业自动化、智能穿戴、航空航天等领域。物联网与人工智能技术的发展，对其微型化、低功耗、高灵敏度等性能提出更高要求。传统传感器基于硅、金属氧化物等材料，存在柔性差、成本高、响应范围窄等局限，难以适配新兴场景。碳基材料（石墨烯、碳纳米管等）凭借高比表面积、高载流子迁移率、良好柔韧性等优势，为高性能物理传感器研发提供新路径。碳基物理传感器以碳基材料为敏感层，通过调控微观结构与界面特性实现高效感知，具备多方面突出优势，成为研究热点。本节梳理其工作原理与分类，探讨典型器件结构设计、制备工艺及性能调控策略，分析应用瓶颈与趋势，为产业化奠定基础。

一、碳基物理传感器的工作原理与分类

碳基物理传感器核心功能是物理量 - 电信号高效转换，本质是碳基材料对目标物理量产生敏感响应，引发电学性能变化，经信号处理实现定量检测。不同碳基材料敏感机制存在差异，但核心过程均包含物理量感知、信号转换、信号输运及检测四个环节。基于材料类型、检测物理量及器件结构，可分为多种类型，适配不同应用场景。

（一）核心工作原理

核心工作原理基于碳基材料的物理量敏感特性，具体环节为：物理量感知阶段，外界物理量作用于碳基敏感层，引发微观结构或电子态变化；信号转换阶段，该变化转化为电阻、电容等电学性能改变，如压力导致导电网络变化引发电阻改变，湿度影响介电常数引发电容改变；信号输运阶段，电学变化通过界面传递至电极形成电信号；信号检测阶段，外电路采集处理信号实现定量分析。

不同碳基材料敏感机制存在特异性：石墨烯原子级厚度与高载流子迁移率使

其对物理量变化极敏感,电阻变化源于层间作用、载流子散射或能带调控;碳纳米管一维结构与高长径比使其对机械应变、温度敏感,应变改变管径长度影响导电性,温度通过声子散射调控载流子迁移率;碳量子点的量子限制与表面效应使其对温度、湿度敏感,湿度通过吸附水分子改变表面电荷分布;多孔碳高比表面积与孔道结构使其电容性能对湿度、压力敏感,压力压缩孔道改变比表面积与介电环境。

(二) 器件分类

按检测物理量可分为温度、压力、湿度、应变等传感器。温度传感器通过电阻或电容随温度变化检测;压力传感器通过电学性能随压力变化检测;湿度传感器通过水分子吸附-脱附引发的电学变化检测;应变传感器通过电学性能随机械应变变化检测。

按碳基材料类型可分为石墨烯基、碳纳米管基、碳量子点基、多孔碳基及复合基传感器。石墨烯基传感器灵敏度高、响应快,适用于高精度高速检测;碳纳米管基传感器柔韧性与导电性优异,适用于柔性应变、压力检测;碳量子点基传感器光稳定性好、尺寸可调,适用于光学-电学联合检测;多孔碳基传感器吸附性能好,适用于湿度检测;复合基传感器实现性能协同增强。

按器件结构可分为电阻型、电容型、电感型、FET型及光电型。电阻型结构简单、成本低,应用广泛;电容型灵敏度高、功耗低,适用于微弱信号检测;电感型抗干扰能力强,适用于复杂环境;FET型灵敏度高、可调控,实现精准检测;光电型通过光-电转换特性变化检测,适用于光相关物理量检测。

二、典型碳基物理传感器的结构设计与制备工艺

典型碳基物理传感器以石墨烯、碳纳米管等为核心敏感材料,通过合理结构设计优化感知与转换效率,采用兼容工艺精准构筑。不同材料体系器件设计重点与工艺选择存在差异,合理设计与工艺是高性能的核心保障。

(一) 石墨烯基物理传感器

结构设计核心是最大化敏感响应与信号效率,常用电阻型、电容型及FET型。电阻型采用“金属电极-石墨烯-绝缘衬底”结构,通过电极与石墨烯接触实现信号检测;电容型采用“石墨烯-介电层-金属电极”平行板结构,利用介电层变化引发电容响应;FET型采用“源漏极-石墨烯沟道-栅极-衬底”结构,通

过栅压调控载流子特性提升灵敏度。

制备工艺包括石墨烯制备、转移/生长、电极制备及封装。石墨烯常用 CVD 法制备；柔性衬底采用 PMMA 辅助湿转移或干转移，避免缺陷；电极通过蒸发、溅射结合光刻制备，降低接触电阻；封装采用 PECVD 制备氧化物层或涂覆聚合物，减少环境影响。

（二）碳纳米管基物理传感器

结构设计核心是构建稳定导电网络，常用电阻型、电容型及柔性薄膜型。电阻型为“金属电极-碳纳米管薄膜-衬底”结构，通过导电网络变化实现电阻响应；电容型以碳纳米管/聚合物复合膜为介电层，利用介电常数变化引发电容响应；柔性薄膜型以柔性聚合物为衬底，适配可穿戴设备。

制备工艺重点是碳纳米管薄膜制备与导电网络构建，包括制备、薄膜成型、电极制备及后处理。采用 CVD 法或电弧放电法制备碳纳米管；通过滴涂、旋涂等溶液工艺成型薄膜，优化分散避免团聚；电极采用蒸发、溅射或印刷工艺，柔性器件用导电银浆印刷；后处理通过退火或等离子体处理减少缺陷，降低接触电阻。

（三）碳量子点基物理传感器

结构设计核心是优化成膜质量与表面态，常用电阻型、电容型及光电耦合型。电阻型为“金属电极-碳量子点薄膜-衬底”结构，通过表面电荷或接触电阻变化实现响应；电容型以碳量子点/聚合物复合膜为介电层，增强吸附能力引发电容响应；光电耦合型结合光学与电学特性，提升灵敏度与抗干扰能力。

制备工艺具有溶液加工特性，包括碳量子点合成、薄膜制备、电极制备及表面修饰。采用水热法、溶剂热法等合成碳量子点，调控尺寸与性能；通过旋涂、喷墨打印等工艺制备薄膜，控制厚度与孔隙率；电极采用蒸发、溅射或印刷工艺；表面修饰通过配体钝化或涂层包覆，增强选择性响应。

（四）多孔碳基物理传感器

结构设计核心是利用高比表面积与孔道结构增强吸附响应，常用电阻型、电容型及电化学型。电阻型为“金属电极-多孔碳薄膜-衬底”结构，通过吸附分子改变导电性实现响应；电容型以多孔碳为电极，利用双电层电容效应实现响应；电化学型结合电化学特性与物理量敏感特性，适用于高精度检测。

制备工艺重点是孔道结构调控与薄膜成型，包括多孔碳制备、薄膜制备、电

极制备及活化处理。采用模板法、活化法或炭化法制备多孔碳；通过涂覆、压片等工艺制备薄膜；电极采用混合导电剂与粘结剂制备复合电极；活化处理通过高温退火或化学蚀刻优化孔道结构，提升比表面积。

三、碳基物理传感器的性能调控策略

碳基物理传感器核心性能指标包括灵敏度、响应速度、检测范围、稳定性等，当前面临灵敏度不足、响应慢、稳定性差等问题。研究者开发了材料改性、结构优化、界面调控及信号处理优化等策略，多维度提升器件性能，各策略可单独或协同应用。

（一）碳基材料改性策略

材料改性通过调控微观结构、表面态及电子性能优化敏感响应。石墨烯改性包括掺杂、缺陷工程及表面功能化：氮掺杂、硼掺杂调控载流子特性；等离子体刻蚀引入缺陷提升灵敏度；接枝分子或纳米粒子增强选择性响应。

碳纳米管改性重点优化导电网络与表面态：提纯半导体型碳纳米管提升均匀性；定向排列增强应变响应；表面包覆钝化缺陷；与其他纳米材料复合实现性能协同。碳量子点改性包括尺寸调控、表面钝化及掺杂：尺寸调控优化敏感特性；配体钝化减少复合提升稳定性；氮掺杂、硫掺杂增强敏感响应。多孔碳改性包括孔道调控、表面功能化及复合：调整模板或活化条件调控孔道；接枝官能团增强选择性；与碳纳米管等复合构建多级孔道提升性能。

（二）器件结构优化策略

结构优化通过构型设计提升感知与转换效率，包括微纳结构设计、异质结构建、电极优化及柔性设计。微纳结构设计构建微纳阵列、褶皱等增强感知能力，如石墨烯褶皱结构提升应变响应，多孔碳纳米孔道增强湿度吸附。

异质结构建将碳基材料与金属氧化物、聚合物等复合，实现性能协同，如石墨烯 / 金属氧化物提升温度传感器灵敏度，碳纳米管 / 聚合物增强柔性应变传感器稳定性。电极优化设计叉指、透明电极，提升接触面积降低电阻，减少光遮挡。柔性设计采用柔性衬底与电极，提升机械柔韧性，适配可穿戴设备。

（三）界面工程调控策略

界面工程通过优化界面结构与成分提升信号转换输运效率，包括界面修饰、过渡层引入及缺陷修复。界面修饰在敏感层与电极间修饰分子或纳米粒子，改善

相容性降低电阻，如巯基乙酸修饰调节功函数匹配。

过渡层引入氧化物、聚合物等薄过渡层，缓解能级失配增强结合强度，如聚多巴胺过渡层提升碳纳米管与衬底结合。缺陷修复通过等离子体、退火等消除界面缺陷，如退火减少碳量子点 / 电极界面杂质。

（四）信号处理优化策略

信号处理优化通过电路设计与算法提升检测精度与抗干扰能力，包括信号放大、噪声抑制及多参数校准。信号放大采用高增益放大器放大微弱信号，如锁相放大电路提升电阻型传感器信号质量。

噪声抑制通过屏蔽、滤波等减少干扰，如金属屏蔽罩减少电磁干扰，低通滤波过滤高频噪声。多参数校准建立信号 - 物理量模型，结合温度、湿度补偿算法提升精度，数字化处理实现多参数检测与智能决策。

四、碳基物理传感器的应用场景与发展趋势

碳基物理传感器凭借高灵敏度、快响应、柔性可穿戴等优势，在工业、智能穿戴、航空航天等领域前景广阔。部分原型器件性能已接近甚至超越传统传感器，当前正朝高性能、集成化、柔性化方向发展。尽管面临稳定性不足、规模化制备困难等挑战，但通过跨学科交叉创新，有望在材料设计、制造工艺与系统集成方面取得突破，进一步推动其产业化进程。随着物联网、人工智能等技术的融合，碳基传感器将在高精度监测与智能感知系统中扮演关键角色。

（一）典型应用场景

传统工业领域中，碳基传感器可广泛应用于过程控制与设备监测。例如，碳纳米管压力传感器可实时监测工业管道压力变化，预防泄漏事故；石墨烯温度传感器能耐受高温环境，精准检测窑炉内部温度波动；多孔碳湿度传感器则用于精密控制车间湿度，保障生产工艺稳定。在环境监测领域，碳量子点传感器阵列可集成于便携设备中，同时检测大气温湿度、有害气体浓度等多种环境参数，实现网格化动态监控。

新兴智能应用方面，柔性碳基传感器因其可弯曲、可折叠特性，高度适配可穿戴设备与电子皮肤系统。例如，碳纳米管应变传感器可嵌入衣物或贴附皮肤，实时监测人体关节运动与呼吸频率；石墨烯压力传感器应用于电子皮肤，模拟触觉感知，提升机器人操作精度。在航空航天领域，微型化、低功耗的碳基传感器

可用于航天器结构健康监测，实时感知机翼形变、振动状态，并参与飞行姿态控制系统。生物医疗领域中，生物相容性良好的碳基传感器能实现体内连续温度检测、术后伤口愈合监测，甚至与组织集成实现长期生理信号追踪。

（二）主要挑战与优化路径

碳基传感器迈向产业化仍面临若干核心挑战：其一，稳定性较差，碳纳米管、石墨烯等材料在空气中易氧化，器件界面在反复形变中易剥离失效；其二，规模化制备困难，高质量碳材料合成成本高，工艺一致性低，导致器件性能波动大；其三，选择性与抗干扰能力有限，复杂环境中多种物理量易引起交叉敏感，影响信号准确性。

为应对上述挑战，当前主要优化路径包括：在材料层面，开发稳定化技术，通过原子层沉积包覆、聚合物封装、化学改性等方式提升环境耐受性；在制造层面，突破卷对卷化学气相沉积、大面积印刷工艺等规模化制备技术，建立标准化流程以控制材料质量与器件均一性；在系统层面，通过材料改性、微结构设计（如构建多级孔隙或异质结）与智能信号处理算法相结合，增强对目标参量的特异性响应，有效消除环境干扰。

（三）未来发展趋势

碳基传感器未来将向高性能化、集成化、柔性化、智能化与多功能化协同发展。高性能化聚焦于原子级精准调控碳材料缺陷与掺杂，实现检测极限与响应速度的极致提升；集成化通过异质集成与微纳加工制备微型化、模块化传感芯片，兼容物联网节点要求；柔性化致力于开发可拉伸、自愈合的器件结构，拓展其在可穿戴电子与仿生机器人中的应用场景；智能化则通过嵌入自校准、自修复机制提升设备长期可靠性；多功能化则趋向于集成传感、储能、计算等能力，构建一体化的感知-供能系统。此外，碳基传感器将与人工智能、大数据深度融合，实现复杂环境下多参量数据的实时分析、异常诊断与自主决策，推动感知系统向智能化、网络化方向演进。

第二节 化学传感器

化学传感器是将目标化学物质的浓度、组成等信息转化为可定量电信号或光学信号的功能器件，广泛应用于环境监测、食品安全、工业控制、生物医学诊断等关键领域。碳基材料（石墨烯、碳纳米管、碳量子点、多孔碳等）凭借超大比表面积、优异电子传输性能、丰富表面活性位点及良好化学稳定性，成为构建高性能化学传感器的核心敏感材料。基于碳基材料的化学传感器具备响应快、灵敏度高、选择性优、微型化潜力大等优势，契合现代检测技术高精度、现场便携的发展需求。本节系统阐述其核心传感机制，探讨关键制备技术、典型类型与性能调控策略，分析应用进展与产业化挑战，为研发与工程化应用提供理论与技术支撑。

一、碳基化学传感器的核心传感机制

碳基化学传感器的核心原理是碳基敏感材料与目标化学物质发生特异性相互作用（物理吸附、化学吸附、电荷转移等），引发材料理化特性改变，再通过信号转换单元转化为可检测信号。不同碳基材料结构差异显著，相互作用方式不同，传感机制亦有本质区别，深入解析传感机制是优化性能、拓展检测对象的基础。

（一）电学传感机制

电学传感机制是碳基化学传感器的主流类型，核心是碳基材料与目标物质相互作用引发载流子传输或界面电荷分布变化，体现为电阻、电容等可量化电学参数改变，主要分为电荷转移、电容变化、场效应调控三类机制。

电荷转移机制是电阻型传感器核心，目标物质吸附时伴随电子转移，改变碳基材料载流子浓度，使电阻/电导变化。氧化性气体夺取电子增大电阻，还原性气体释放电子减小电阻，电阻变化与浓度相关，适用于多数气体及部分极性有机分子检测。

电容变化机制适用于电容型传感器，目标物质吸附改变电极双电层结构或介电常数，导致电容变化。碳基材料大比表面积为双电层提供空间，该机制响应稳定、抗干扰强，适用于液体基质中目标物质检测。

场效应调控机制基于碳基场效应晶体管结构，目标物质吸附通过电荷转移改变沟道载流子特性，调控漏极电流，栅极电压可放大信号，实现单分子级超高灵

敏检测，适用于痕量化学物质检测。

（二）光学传感机制

光学传感机制是碳基化学传感器的重要技术路径，核心利用碳基材料与目标物质相互作用后的荧光、拉曼散射、吸收光谱等光学性质变化实现检测，具有抗电磁干扰强、可远程检测、无需复杂电极制备等优势，适用于复杂电磁环境或生物体内原位检测，主要分为荧光猝灭/增强、表面增强拉曼散射（SERS）、吸收光谱变化三类机制。

荧光猝灭/增强机制是碳量子点等发光碳基材料传感器的核心，通过目标物质与碳量子点表面官能团的电荷转移、能量转移或化学键合调控荧光发射。碳量子点量子产率高、生物相容性好，可与重金属离子、有机污染物等特异性结合，引发荧光猝灭或增强，如汞离子与巯基结合导致荧光猝灭，检测限达纳摩尔级，适用于水环境痕量检测。

SERS 机制依托碳基材料的表面等离子体共振或化学增强效应放大目标物质拉曼信号，相比传统贵金属 SERS 材料，碳基材料化学稳定性好、生物相容性优且无金属污染。目标物质吸附后通过电荷转移改变分子极化率，或借助材料表面强电场增强信号，可实现多环芳烃等痕量有机污染物皮摩尔级检测，适用于复杂基质分析。

吸收光谱变化机制核心是目标物质与碳基材料相互作用改变其电子跃迁能级，导致紫外-可见吸收光谱峰值位移或强度变化。碳基材料电子跃迁依赖共轭体系 $\pi-\pi^*$ 跃迁，目标物质通过化学吸附或化学键合改变电子云分布，调控跃迁能量，如氧化石墨烯与氨基化合物反应引发吸收峰红移，该机制操作简单、检测快速，适用于现场筛查。

（三）协同传感机制

协同传感机制是碳基复合材料传感器的核心优势，通过构建多组分复合敏感材料，实现多相互作用与多传感机制协同耦合，突破单一机制瓶颈，提升检测灵敏度、选择性与稳定性。不同组分（碳基材料、无机材料、有机材料、生物分子等）功能互补是关键，主要分为碳基-无机、碳基-有机、碳基-生物材料三类协同传感模式。

碳基-无机材料协同通过碳基材料与金属纳米粒子、金属氧化物复合实现，碳基材料提供高导电通道与大比表面积，无机材料贡献特异性吸附或光学增强效

应,协同放大信号。如石墨烯/金纳米粒子复合材料可同步增强光学与电学信号、提升选择性;碳纳米管/ZnO 复合材料能加快响应速度、提高检测灵敏度。

碳基-有机材料协同以碳基材料与导电聚合物复合为核心,利用导电聚合物的电化学活性与碳基材料的高导电性增效。导电聚合物通过官能团与目标物质特异性作用,碳基材料加速电荷传输,如石墨烯/聚苯胺 pH 传感器响应快、检测范围宽,且导电聚合物可提升器件柔韧性,适配柔性场景。

碳基-生物材料协同是高选择性检测的关键,通过碳基材料与酶、抗体等生物识别元件复合,构建“特异性识别-信号转换-放大”体系。生物元件保障选择性,碳基材料实现信号高效转换放大,如酶修饰碳纳米管葡萄糖传感器、抗体修饰石墨烯肿瘤标志物传感器,兼具高选择性与高灵敏度,在生物医学、食品安全领域应用价值突出。

综上,协同传感机制依托碳基复合材料组分功能互补,实现多信号协同放大,同时结合生物识别元件可兼顾选择性与灵敏度,显著提升传感器综合性能。

二、碳基化学传感器的关键制备技术

碳基化学传感器制备需兼顾材料特性、结构完整性与信号转换效率,核心目标是实现敏感层均匀沉积、界面良好接触、结构精准成型,保障性能与稳定性。主流技术分为碳基敏感材料制备与改性、器件核心结构制备、封装与集成三大类,各类技术协同配合是实现高性能器件的关键。

(一) 碳基敏感材料的制备与改性技术

1. 制备技术

石墨烯制备以化学气相沉积(CVD)、氧化还原法为主,CVD 法可制备大面积高结晶度薄膜,氧化还原法成本低但性能略差。碳纳米管制备以 CVD 法为核心,可实现定向生长与大面积沉积,适配产业化需求。碳量子点制备分自上而下(激光剥离、电化学氧化)与自下而上(水热、溶剂热、微波合成)法,自下而上法成本低、产量高,是产业化核心路径。多孔碳通过模板法、活化法制备,可精准调控孔道结构与比表面积。

2. 改性技术

为提升选择性与灵敏度,需通过表面官能团修饰、掺杂、复合、生物功能化等技术优化表面性质。官能团修饰接枝氨基、巯基等特异性基团,增强目标物质

吸附能力；掺杂氮、硼等杂原子，调控电子结构并增加活性位点；复合金属纳米粒子、金属氧化物等，通过协同作用强化性能；生物功能化接枝酶、抗体等，利用生物特异性识别提升选择性，适配复杂基质检测。

（二）器件核心结构制备技术

器件核心结构包括基底、电极、敏感层与信号转换单元。刚性基底（硅片、玻璃）采用光刻、刻蚀预处理，保障电极图案精准；柔性基底（聚酰亚胺、PDMS 等）采用柔性兼容工艺，适配可穿戴需求。电极制备采用真空蒸镀、溅射、溶液涂覆或喷墨打印法，金属电极保障导电性，碳基电极成本低、可大面积制备，喷墨打印适配微型化需求。

敏感层制备核心为溶液加工（旋涂、滴涂、喷墨打印、刮涂）与气相沉积（CVD、原子层沉积）法，溶液加工法适用于可溶性碳基材料，操作简单、成本低；喷墨打印可精准控制厚度与图案，适配阵列化需求；气相沉积法可制备致密均匀的敏感层，保障稳定性。信号转换单元通过微纳加工与其他结构集成，将传感信号转化为可检测信号，常用场效应晶体管、电化学工作站等。

（三）器件封装与集成技术

器件封装与集成是碳基化学传感器从实验室走向实际应用的关键环节，直接影响其长期稳定性、环境适应性与系统功能完整性。封装技术的核心目标在于实现双重平衡：一是有效隔绝外界环境中水汽、氧气、灰尘等干扰因素，保障敏感材料的结构与性能稳定；二是确保目标检测物质（如特定气体分子、离子或生物标志物）能够高效、选择性地接触敏感层，维持传感器的响应灵敏度与准确性。

在封装材料选择上，需综合考虑应用场景与性能需求。聚合物材料（如聚二甲基硅氧烷、环氧树脂）具有良好的柔韧性与生物相容性，适用于可穿戴与可植入设备，但其水氧阻隔能力相对有限；无机薄膜（如采用原子层沉积技术制备的氧化铝、氮化硅薄膜）具有致密的微观结构，能提供优异的阻隔性能，但通常柔性较差；玻璃或金属壳体则能实现近乎完全的密封，机械强度高，适用于工业监测、航空航天等恶劣环境，但体积与重量较大，难以用于柔性系统。在实际应用中，常采用多层复合封装策略，例如在柔性基底上交替堆叠聚合物与无机薄膜，兼顾柔性 with 阻隔性。

封装工艺方面，涂覆法操作简单、成本低，常用于实验室原型器件的初步保护；真空贴合技术可在较低温度下实现封装层与传感器件的紧密结合，避免高温

对敏感材料的损伤；薄膜封装技术是当前前沿方向，通过化学气相沉积、原子层沉积等方法在器件表面交替生长无机与有机多层薄膜，这种“砖-泥”结构能有效延长水氧渗透路径，显著提升封装的整体阻隔性能，同时保持器件的轻薄与一定柔性。

集成技术则致力于实现传感器的小型化、智能化与系统化。通过微纳加工技术（如光刻、喷墨打印），可在同一芯片上集成多个具有不同敏感特性的碳基传感单元，构成传感器阵列，结合模式识别算法，实现对复杂混合物中多种成分的同时识别与定量分析，即“电子鼻”或“电子舌”功能。进一步地，将传感阵列与微型信号处理电路、微处理器（负责数据解析与特征提取）以及低功耗无线传输模块（如蓝牙、LoRa）集成，可构建完整的便携式或可穿戴智能检测系统。这类系统能够实现数据的实时采集、就地分析与远程传输，极大地拓展了碳基传感器在环境现场监测、床边快速诊断、工业过程在线控制等场景中的应用潜力，是实现物联网感知层智能化的重要技术路径。三、碳基化学传感器的典型类型与性能调控

基于碳基材料的化学传感器已发展出气体、离子、有机污染物、生物小分子传感器等典型类型，各类器件检测对象与性能特点差异显著。性能调控核心是通过材料改性、结构优化与工艺调整，协同提升灵敏度、选择性、响应速度与稳定性，实现精准检测。

（一）碳基气体传感器

碳基气体传感器检测有毒有害、易燃易爆、温室等气体，核心为电阻型或场效应晶体管结构，基于气体吸附引发的电学参数变化实现检测。石墨烯基传感器对 NO_2 、 NH_3 等检测限达 ppb 级，响应时间小于 10 秒；碳纳米管基传感器对 H_2S 、 CO 等检测性能优异；多孔碳基传感器通过孔道调控增强气体吸附扩散能力。调控策略包括掺杂改性增加活性位点、与金属氧化物复合提升选择性、优化敏感层结构提升响应与恢复性能、官能团修饰增强特异性识别。

（二）碳基离子传感器

碳基离子传感器检测水溶液中重金属离子（ Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 等）与阴离子（ F^- 、 Cl^- 等），基于离子与官能团特异性结合引发的电信号或光信号变化检测，分为电化学与荧光型。电化学型以碳基材料为工作电极，通过电势或电流变化检测；荧光型以碳量子点为核心，通过荧光猝灭 / 增强检测， Hg^{2+} 检测限达纳摩尔级。

调控策略包括官能团修饰增强特异性、与金属纳米粒子复合放大电信号、优化碳量子点性能提升荧光稳定性、采用先进电化学检测技术降低背景噪声。

（三）碳基有机污染物传感器

碳基有机污染物传感器检测水体、土壤、空气中的酚类、多环芳烃、农药残留等，基于 π - π 堆积、疏水、氢键等相互作用引发信号变化。石墨烯基传感器利用超大比表面积与 π - π 作用，对芳香族污染物吸附能力强；碳量子点基传感器通过荧光信号变化快速检测；多孔碳基传感器通过孔道调控增强吸附分离能力。调控策略包括表面改性引入特异性官能团、优化比表面积与孔道结构、与导电聚合物复合增强电信号、采用光致电化学技术提升灵敏度与抗干扰性。

（四）碳基生物小分子传感器

碳基生物小分子传感器检测生物体内葡萄糖、尿酸、多巴胺等，基于生物小分子与碳基材料或修饰生物分子的特异性相互作用检测，广泛应用于生物医学诊断。如葡萄糖传感器通过葡萄糖氧化酶与葡萄糖反应生成过氧化氢，过氧化氢在碳基电极表面发生氧化还原反应产生信号；多巴胺传感器基于氧化还原或静电作用引发电学信号变化。调控策略包括生物功能化改性提升选择性、优化电极形貌与导电性提升反应效率、引入金属纳米粒子放大信号、采用柔性基底制备柔性传感器适配可穿戴监测需求。

第三节 生物传感器

生物传感器作为生物检测领域的核心技术载体，通过生物识别元件与目标分析物的特异性相互作用，将生物信号转换为可量化的物理或化学信号，实现对生物分子、细胞、微生物等目标的精准检测，广泛应用于临床诊断、食品安全、环境监测、生物医学研究等领域。碳基材料凭借高比表面积、优异的导电性、良好的生物相容性、可调的表面化学性质及低成本等独特优势，已成为构建高性能生物传感器的理想材料体系。基于碳基材料的生物传感器通过将碳基材料与生物识别元件（如酶、抗体、核酸、适配体、细胞等）高效结合，可显著提升生物识别的特异性、灵敏度与检测速率，突破传统生物传感器检测限高、响应慢、稳定性差等局限。本节系统梳理碳基生物传感器的核心类型、工作机制、结构设计、制备工艺及性能优化策略，深入探讨器件研发过程中的关键科学问题与技术突破路

径，为碳基生物传感器的定向设计与产业化推进提供理论与技术支撑。

一、石墨烯基生物传感器：二维界面的高效生物检测体系

石墨烯作为二维碳纳米材料，具有超高的电子迁移率、超大的比表面积、良好的生物相容性与透光性，其二维平面结构可提供丰富的生物分子吸附位点，同时加速电荷转移过程，显著提升生物传感器的灵敏度与响应速度。石墨烯基生物传感器通过在石墨烯表面修饰生物识别元件，利用石墨烯的电学、光学特性将生物识别信号转换为可检测信号，主要分为电化学型、光学型及场效应晶体管等类型，在蛋白质检测、核酸分析、细胞监测等领域展现出优异性能。

（一）石墨烯基电化学学生物传感器

石墨烯基电化学学生物传感器以石墨烯为电极材料或电极修饰材料，通过检测生物识别过程中产生的电化学信号（如电流、电位、阻抗等）实现目标分析物的定量检测。石墨烯的高导电性可降低电极阻抗，提升电子转移效率；高比表面积可增加生物识别元件的负载量，增强与目标分析物的相互作用，从而显著提升检测灵敏度。酶传感器是最典型的电化学学生物传感器之一，将酶固定于石墨烯电极表面，酶与底物特异性反应产生的氧化还原物质在电极表面发生电子转移，形成可检测的电流信号。

例如，葡萄糖氧化酶（GOD）固定于还原氧化石墨烯（rGO）电极表面构建的葡萄糖传感器，GOD催化葡萄糖氧化生成葡萄糖酸和过氧化氢，过氧化氢在rGO电极表面氧化产生电流信号，该传感器的检测限低至0.01 mmol/L，线性检测范围为0.05-20 mmol/L，响应时间小于5 s，且具有良好的抗干扰能力，可用于人体血液中葡萄糖的精准检测。此外，石墨烯基电化学免疫传感器通过将抗体固定于石墨烯电极表面，利用抗原-抗体特异性结合反应改变电极表面的电化学特性（如阻抗变化），实现对肿瘤标志物、病原体等目标的检测。例如，基于石墨烯/金纳米颗粒复合电极的癌胚抗原（CEA）免疫传感器，检测限可达0.1 pg/mL，线性范围为0.5 pg/mL-10 ng/mL，可满足早期癌症诊断的需求。

（二）石墨烯基光学生物传感器

石墨烯基光学生物传感器利用石墨烯的光学特性（如表面等离子体共振、荧光共振能量转移、拉曼增强等）将生物识别信号转换为光学信号，具有检测速度快、操作简便、可实时监测等优势。石墨烯的表面等离子体共振效应可通过调控

其层数、表面修饰状态实现调节,当生物分子吸附于石墨烯表面时,会引起石墨烯表面折射率变化,导致等离子体共振峰位移,通过检测峰位移量可实现目标分析物的定量检测。

例如,基于石墨烯/光纤复合结构的表面等离子体共振传感器,通过将石墨烯薄膜沉积于光纤端面,当目标抗原与光纤端面石墨烯表面的抗体特异性结合时,光纤端面的折射率发生变化,导致传输光的强度与波长发生改变,该传感器对人免疫球蛋白 G (IgG) 的检测限低至 1 ng/mL,线性范围为 5-500 ng/mL。此外,石墨烯基荧光生物传感器利用石墨烯作为荧光猝灭剂,将荧光标记的生物识别元件(如核酸探针)固定于石墨烯表面,当目标分析物与探针结合时,探针从石墨烯表面脱附,荧光信号恢复,通过荧光强度的变化实现目标检测。例如,石墨烯/核酸探针复合体系构建的 DNA 传感器,对互补 DNA 链的检测限可达 10 fmol/L,且具有良好的特异性,可有效区分单碱基错配的 DNA 链。

二、碳纳米管基生物传感器：一维导电网络的生物检测体系

碳纳米管具有独特的一维纳米结构、超高的电子迁移率、良好的生物相容性及机械稳定性,其一维导电网络可提供高效的电子传输通道,同时超大的比表面积可增强生物分子的吸附与相互作用,在生物传感器领域具有广泛的应用前景。碳纳米管基生物传感器通过将生物识别元件固定于碳纳米管表面或碳纳米管网络中,利用碳纳米管的电学、光学特性实现生物信号的转换与检测,主要分为电化学型、场效应晶体管型、光学型等类型,适用于核酸检测、蛋白质分析、微生物检测等场景。

(一) 碳纳米管基电化学生物传感器

碳纳米管基电化学生物传感器以碳纳米管为电极材料或电极修饰材料,碳纳米管的一维结构可形成连续的导电网络,显著提升电极的导电性与电子转移效率;其高比表面积可增加生物识别元件的负载量,增强与目标分析物的特异性相互作用,从而提升检测灵敏度。碳纳米管基酶传感器通过将酶固定于碳纳米管电极表面,利用酶的催化作用产生电化学信号,实现对底物的检测。例如,将辣根过氧化物酶(HRP)固定于多壁碳纳米管(MWCNT)电极表面构建的过氧化氢传感器,HRP催化过氧化氢还原产生电流信号,该传感器的检测限低至 0.1 $\mu\text{mol/L}$,线性范围为 0.5 $\mu\text{mol/L}$ -500 $\mu\text{mol/L}$,响应时间小于 3 s。

碳纳米管基免疫传感器通过抗原 - 抗体特异性结合反应实现目标检测, 将抗体固定于碳纳米管电极表面, 当目标抗原与抗体结合时, 会引起电极表面阻抗变化或电流信号变化。例如, 基于单壁碳纳米管 (SWCNT) / 聚吡咯复合电极的甲胎蛋白 (AFP) 免疫传感器, AFP 与电极表面的 AFP 抗体特异性结合后, 电极阻抗显著增加, 该传感器的检测限可达 0.05 ng/mL, 线性范围为 0.1 ng/mL-100 ng/mL, 可用于肝癌的早期诊断。此外, 碳纳米管基核酸传感器通过核酸探针与目标 DNA/RNA 的互补配对反应实现检测, 将核酸探针固定于碳纳米管电极表面, 目标核酸与探针结合后会引起电极电化学信号的变化, 检测限可低至 fmol/L 级别。

(二) 碳纳米管基场效应晶体管生物传感器

碳纳米管基场效应晶体管 (CNT-FET) 生物传感器以碳纳米管为沟道材料, 将生物识别元件固定于碳纳米管沟道表面, 当目标分析物与生物识别元件特异性结合时, 会引起碳纳米管沟道的电导率变化, 通过检测源漏电流的变化实现目标分析物的定量检测。该类型传感器具有检测灵敏度高、响应速度快、可微型化集成等优势, 适用于单细胞检测、生物分子实时监测等领域。

例如, 将 DNA 探针固定于 SWCNT-FET 沟道表面构建的 DNA 传感器, 当互补 DNA 链与探针结合时, 会引起 SWCNT 沟道的载流子浓度变化, 导致源漏电流显著改变, 该传感器对互补 DNA 链的检测限低至 1 fmol/L, 响应时间小于 10 s, 且可有效区分单碱基错配的 DNA 链。此外, 基于 CNT-FET 的细胞传感器通过将细胞特异性识别分子 (如整合素抗体) 固定于碳纳米管沟道表面, 当细胞与识别分子结合时, 细胞的粘附会引起碳纳米管沟道电导率变化, 可实现对细胞的计数与活性监测。例如, 基于 MWCNT-FET 的肝癌细胞传感器, 对 HepG2 细胞的检测限低至 10 个 /mL, 可用于肝癌细胞的早期筛查。

三、碳量子点基生物传感器：零维荧光探针的生物检测体系

碳量子点作为零维碳纳米材料, 具有宽光谱吸收、高荧光量子产率、良好的光稳定性、低毒性及生物相容性等优势, 其表面易修饰多种官能团 (如羟基、羧基、氨基等), 可与生物识别元件高效结合, 是构建荧光生物传感器的理想荧光探针材料。碳量子点基生物传感器主要通过荧光共振能量转移、荧光猝灭 / 恢复、比色变化等机制实现生物信号的转换与检测, 具有检测灵敏度高、选择性好、操作简便、对生物样品损伤小等优势, 广泛应用于生物分子检测、细胞成像、微生

物检测等领域。

（一）碳量子点基荧光生物传感器

碳量子点基荧光生物传感器通过荧光信号的变化实现目标分析物的定量检测，根据荧光信号变化机制可分为荧光猝灭型、荧光增强型及荧光共振能量转移型。荧光猝灭型传感器利用目标分析物对碳量子点荧光的猝灭作用实现检测，当目标分析物与碳量子点或其表面的生物识别元件结合时，会通过电子转移、能量转移等方式猝灭碳量子点的荧光，荧光猝灭程度与目标分析物浓度呈线性关系。例如，基于氮掺杂碳量子点的重金属离子 Hg^{2+} 传感器， Hg^{2+} 与碳量子点表面的氨基结合形成复合物，导致碳量子点荧光猝灭，检测限低至 0.1 nmol/L，线性范围为 0.5 nmol/L-50 nmol/L，可用于环境水样中 Hg^{2+} 的检测。

荧光共振能量转移型传感器利用碳量子点作为能量供体，目标分析物或其标记物作为能量受体，当供体与受体之间的距离达到荧光共振能量转移范围时，供体的荧光会转移至受体，导致供体荧光猝灭、受体荧光增强，通过检测荧光信号变化实现目标检测。例如，碳量子点 / 核酸探针 / 金纳米颗粒复合体系构建的 DNA 传感器，碳量子点为能量供体，金纳米颗粒为能量受体，当目标 DNA 与核酸探针结合时，碳量子点与金纳米颗粒之间的距离发生变化，荧光共振能量转移效率改变，导致碳量子点荧光强度变化，该传感器的检测限低至 1 fmol/L，具有良好的特异性。此外，碳量子点基荧光免疫传感器通过将抗体标记于碳量子点表面，利用抗原 - 抗体特异性结合反应实现目标检测，可用于肿瘤标志物、病原体等的精准检测。

（二）碳量子点基细胞成像与生物传感集成体系

碳量子点的低毒性、良好的生物相容性及高荧光量子产率使其可作为细胞成像探针，同时结合其传感功能，可构建细胞成像与生物传感集成体系，实现对细胞内生物分子的实时监测。例如，将叶酸修饰的碳量子点作为荧光探针，叶酸与癌细胞表面的叶酸受体特异性结合，使碳量子点进入癌细胞内，实现癌细胞的靶向成像；同时，碳量子点可作为 pH 传感器，细胞内不同区域的 pH 值变化会引起碳量子点荧光强度的变化，可实时监测细胞内 pH 值的分布与变化。

此外，基于碳量子点的细胞内活性氧传感器通过将碳量子点表面修饰活性氧响应性官能团，当细胞内产生活性氧时，响应性官能团被氧化，导致碳量子点荧光强度变化，可实时监测细胞内活性氧的水平与变化趋势。例如，羟基修饰的

碳量子点对细胞内的过氧化氢具有特异性响应,过氧化氢氧化羟基生成羰基,导致碳量子点荧光猝灭,荧光猝灭程度与过氧化氢浓度呈线性关系,检测限低至 $1\text{ }\mu\text{mol/L}$,可用于细胞氧化应激过程的实时监测。

四、碳基生物传感器的性能优化与产业化挑战

尽管碳基生物传感器具有检测灵敏度高、特异性好、响应速度快、生物相容性佳等优势,但目前其产业化应用仍面临诸多挑战,核心瓶颈在于生物识别元件的固定稳定性、器件的长期稳定性、检测环境的干扰、规模化制备能力及成本控制等方面。针对这些关键问题,研究者提出了一系列性能优化策略,包括碳基材料的表面修饰与功能化、生物识别元件的高效固定、器件结构的创新设计及检测系统的集成优化等。同时,随着技术的不断进步,碳基生物传感器的产业化进程正逐步推进,但仍需多学科交叉融合,推动材料、结构与工艺的协同创新。

(一) 核心性能优化策略

碳基材料的表面修饰与功能化是提升生物传感器性能的基础。通过表面修饰可引入功能性官能团(如羧基、氨基、巯基等),增强碳基材料与生物识别元件的结合强度,提升生物识别元件的固定稳定性;同时,表面功能化可调控碳基材料的表面亲疏水性、电荷性质,减少非特异性吸附,提升检测特异性。例如,通过等离子体处理、化学接枝等方法在石墨烯表面引入羧基,利用羧基与抗体的氨基形成酰胺键,可实现抗体的稳定固定,减少检测过程中抗体的脱落,提升传感器的长期稳定性。

生物识别元件的高效固定是保障传感器性能的关键。常用的固定方法包括物理吸附法、化学结合法、生物亲和法等。物理吸附法操作简便,但固定稳定性差;化学结合法通过化学键合实现生物识别元件的固定,稳定性好,是目前最常用的固定方法;生物亲和法(如抗原-抗体结合、生物素-亲和素结合)具有特异性高、固定效率高的优势,可实现生物识别元件的定向固定。例如,利用生物素-亲和素的特异性结合作用,将生物素修饰的抗体固定于亲和素修饰的碳纳米管表面,可实现抗体的高效、定向固定,提升传感器的检测灵敏度与特异性。

器件结构的创新设计可进一步提升传感器性能。通过构建复合结构(如碳基材料/金属纳米颗粒、碳基材料/聚合物复合结构)可协同增强碳基材料的导电性、光学性能与生物相容性;通过构建微纳结构(如微通道、纳米阵列)可实现目标

分析物的富集，提升检测灵敏度；通过集成化设计可实现多目标同时检测，提高检测效率。例如，石墨烯/金纳米颗粒复合电极通过金纳米颗粒的表面等离子体共振效应与石墨烯的高导电性协同作用，显著提升电化学生物传感器的检测灵敏度；微通道集成的碳量子点生物传感器可实现目标分析物的快速富集，检测限降低一个数量级以上。

（二）产业化挑战与发展趋势

碳基生物传感器的产业化仍面临诸多挑战：一是生物识别元件的固定稳定性不足，在复杂检测环境（如人体血液、污水）中，生物识别元件易脱落、失活，影响传感器的检测准确性与长期稳定性；二是检测环境的干扰问题突出，复杂样品基质中的共存物质易与碳基材料或生物识别元件发生非特异性相互作用，导致检测信号干扰，影响检测特异性；三是规模化制备能力不足，碳基材料的大规模制备过程中质量一致性难以保障，器件的批量生产工艺尚不成熟，导致成本居高不下；四是标准体系缺失，目前碳基生物传感器的性能评价标准、检测方法规范尚未统一，制约了其市场化推广。

未来，碳基生物传感器的发展将聚焦于以下核心方向：一是高性能化，通过碳基材料的精准调控、生物识别元件的高效固定及器件结构的创新设计，进一步提升传感器的检测灵敏度、特异性与长期稳定性，推动检测限达到 fmol/L 甚至 amol/L 级别；二是低成本化，开发高效、绿色的碳基材料规模化制备工艺，优化器件批量生产技术，降低传感器的制备成本，推动其在基层医疗、环境监测等领域的广泛应用；三是集成化与智能化，发展多目标集成检测系统，结合微流控技术、物联网技术实现检测过程的自动化、智能化，提升检测效率与便捷性；四是原位实时监测，开发可植入式、便携式碳基生物传感器，实现对人体生理指标、环境污染物的原位实时监测；五是标准体系完善化，建立统一的碳基生物传感器性能评价标准与检测方法规范，推动其市场化推广与产业化应用。

第四节 智能传感系统

碳基智能传感系统是融合碳基传感单元、信号处理、数据传输及智能决策模块的一体化体系，核心特征为碳基材料敏感特性与智能化技术深度耦合，实现目标信号精准感知、实时分析、自主决策与高效反馈。相较于传统单一传感器，其突破“仅感知不分析”局限，具备自校准、自诊断等智能特性，显著提升检测可靠性与自动化水平。石墨烯、碳纳米管等碳基材料兼具高灵敏度、宽响应范围及良好生物相容性，为系统提供优质材料基础。目前该系统已在环境监测、生物医疗等多领域展现应用前景，成为碳基传感器发展核心方向。本节系统阐述其核心构成与工作机制、关键核心技术、主要应用类型及发展展望，剖析智能化升级逻辑与技术瓶颈，为系统优化设计与产业化提供支撑。

一、碳基智能传感系统的核心构成与工作机制

碳基智能传感系统的高效运行依赖各功能模块协同，核心构成遵循“感知 - 处理 - 传输 - 决策 - 反馈”功能链，模块设计与参数直接决定系统智能化水平。明确核心构成与工作机制是优化设计的前提，以下从核心构成模块、工作机制及性能特征三维度解析基础理论框架。

（一）核心构成模块

系统由碳基传感阵列、信号预处理、数据处理与智能决策、无线传输及供电五大核心模块构成。碳基传感阵列是“感知核心”，由多类型碳基传感单元组成，可同步检测物理量、化学量及生物量等多参数，核心优势在于碳基材料高灵敏度与可调控性，通过材料改性实现目标信号高选择性识别。

信号预处理模块是关键桥梁，负责放大、滤波、降噪及信号转换，消除环境干扰，提升信噪比，集成碳基柔性电极适配柔性场景。数据处理与智能决策模块为“大脑核心”，基于 MCU、FPGA 等硬件结合机器学习算法实现信号分析，具备自校准、自诊断功能。无线传输模块实现检测结果与控制指令的远程交互，低功耗蓝牙与 NB-IoT 技术广泛适配便携式与物联网场景。供电模块提供稳定能量，碳基超级电容器可提升续航，高端系统集成反馈执行模块形成“感知 - 决策 - 调控”闭环。

无线传输模块负责将检测结果与系统状态传输至终端，同时接收控制指令实

现远程操控，常用蓝牙、Wi-Fi、LoRa 等技术，低功耗蓝牙与 NB-IoT 适配便携式与物联网场景。供电模块根据场景采用锂电池、太阳能电池等，碳基超级电容器凭借高功率密度与长循环寿命提升续航。高端系统集成反馈执行模块，可根据决策结果驱动执行机构主动调控目标环境，形成闭环控制。

（二）核心工作机制

系统核心工作机制为“多参数感知 - 信号协同处理 - 智能决策 - 远程交互 - 闭环调控”全流程协同，分五个关键环节。一是多参数同步感知，目标检测对象与传感阵列接触时，碳基材料通过电荷转移、表面吸附等敏感机制产生性质变化，转换为可检测电信号并被阵列同步捕获。二是信号预处理，对原始微弱信号进行放大、滤波、降噪及模数转换，提供高质量信号源。

三是数据处理与智能决策，通过特征提取算法提取关键参数，结合机器学习模型实现定性识别与定量分析，同时通过自校准消除误差、自诊断监测系统状态。四是无线数据传输，将检测结果与系统状态发送至终端，实现实时查看与远程操控。五是闭环调控，检测结果超阈值时，驱动执行机构动作形成闭环，全程无需人工干预，实现自动化智能化检测。

第四环节为无线数据传输，数据处理模块将信息发送至终端供用户实时查看，同时接收终端控制指令实现远程操控。第五环节闭环调控为可选功能，检测结果超预设阈值时，智能决策模块驱动执行机构动作，如甲醛超标时开启通风电磁阀，直至参数达标，形成闭环控制，全程无需人工干预，实现自动化智能化检测。

（三）关键性能特征

相较于传统传感系统，碳基智能传感系统具备五大核心性能特征。一是多参数协同感知，突破单一传感器“一器一用”局限，提升检测效率与信息获取量。二是高灵敏度与高选择性，碳基材料超大比表面积与独特电子结构，经表面功能化修饰可实现目标信号高选择性识别，检测限达 ppb 级甚至 ppt 级。

三是智能化水平高，通过自校准、自诊断等功能消除干扰与老化误差，提升检测可靠性与系统稳定性。四是柔性与兼容性强，碳基材料良好的柔性与可拉伸性适配曲面、动态场景，且与传统半导体工艺兼容，便于微型化集成。五是低功耗与长续航，经电路优化、低功耗传输及高效供电设计，系统功耗可降至毫瓦级以下，适配偏远地区、无人值守场景长期监测。

二、碳基智能传感系统的关键核心技术

碳基智能传感系统性能提升与产业化依赖碳基传感阵列精准制备、多信号协同处理、智能化算法集成及系统微型化封装四大关键核心技术。这些技术相互关联支撑，共同决定系统检测性能、智能化水平与应用范围。以下阐述各技术原理、特点、研究进展及应用瓶颈，为技术创新与系统优化指引方向。

（一）碳基传感阵列的精准制备技术

碳基传感阵列精准制备是多参数协同感知的基础，核心技术包括碳基敏感材料可控制备、阵列图案化集成及表面功能化修饰。敏感材料可控制备决定单元性能一致性，常用 CVD、溶液加工、模板法等。CVD 法可制备高质量碳基薄膜，精准控制材料参数，适用于高性能阵列，但设备成本高、工艺复杂；溶液加工法操作简便、成本低，适配柔性阵列批量生产，但材料致密度与稳定性有待提升。

模板法可制备多孔阵列化碳基材料，提升比表面积与敏感性能，但模板去除易破坏材料结构。阵列图案化集成需实现单元精准定位与电学互联，光刻 - 刻蚀技术分辨率高，适配刚性衬底，但工艺复杂、柔性兼容性差；纳米压印技术成本低、效率高，适配柔性衬底，但精度受模板质量影响；转移印刷技术兼容柔性及刚性衬底，但易产生材料破损与界面接触问题。

表面功能化修饰是提升阵列选择性的关键，通过修饰功能基团、生物分子等实现目标特异性识别。常用共价键、非共价键及生物修饰法，共价键修饰结合牢固但反应条件苛刻，非共价键修饰操作简便但结合强度低，生物修饰法特异性强但生物分子易失活，需严控储存与工作环境。

例如石墨烯表面氨基修饰可提升酸性气体吸附选择性，碳量子点抗体修饰实现特定抗原检测，碳纳米管负载金属纳米粒子增强气体催化活性。常用修饰方法包括共价键、非共价键及生物修饰法，共价键修饰结合牢固但反应条件苛刻，非共价键修饰操作简便但结合强度低，生物修饰法特异性强适用于生物传感，但生物分子易失活需严控环境。

（二）多信号协同处理技术

多信号协同处理技术核心解决阵列多参数检测中的信号干扰与交叉响应问题，通过信号分离、特征提取与融合分析实现目标信号精准识别定量，含信号去噪分离、特征提取及多源信号融合三个关键环节。去噪分离技术消除环境干扰与

交叉响应，卡尔曼滤波实时降噪，自适应滤波适配复杂环境，盲源分离可从混合信号中分离独立目标信号。

特征提取技术从预处理信号中提取关键参数，时域、频域及时频域方法分别适配静态、动态等不同类型信号。多源信号融合提升检测准确性，数据层融合保留完整信息但计算量大，特征层融合兼顾信息完整性与效率，是主流方式，决策层融合计算量小、实时性强但对特征提取准确性要求高。

不同检测信号适配不同特征提取方法，静态信号适用时域提取，动态信号适用时频域提取。多源信号融合方法分为数据层、特征层与决策层，数据层融合保留完整信息但计算量大，特征层融合兼顾信息完整性与效率，应用最广泛，决策层融合计算量小、实时性强但依赖前期特征提取准确性。

（三）智能化算法集成技术

智能化算法集成技术是实现系统智能功能的核心，通过机器学习、深度学习算法与硬件深度融合提升数据分析决策能力，含算法选型优化、硬件实现及数据适配优化三个环节。算法选型需匹配检测需求与硬件资源，传统机器学习算法计算量小、实时性强，适配简单场景模式识别；深度学习算法特征学习与复杂模式识别能力强，适配多参数复杂环境，但计算量大需优化适配嵌入式平台。

算法硬件实现将优化模型部署至 MCU、FPGA 或 ASIC，FPGA 并行计算能力强、实时性高，适配快速数据处理；MCU 功耗低、成本低，适配便携式低算力系统；ASIC 算力强、功耗低，但开发周期长、成本高，适配规模化产业化。算法与传感数据适配优化需通过实验数据训练模型，优化参数，建立映射关系消除噪声与漂移影响，高端系统集成在线学习算法持续优化参数。

算法与传感数据适配优化是提升性能的关键，需通过大量实验数据训练模型、优化参数，建立数据与模型的映射关系，消除噪声与漂移对识别精度的影响。通过采集不同环境条件下的数据训练模型提升适应性，借助数据增强技术扩充数据集提升泛化能力。高端系统集成在线学习算法，可通过实时数据持续优化参数，进一步提升检测精度与适应性。

三、碳基智能传感系统的主要应用类型与场景

基于碳基材料优势与系统智能化特性，碳基智能传感系统已发展出多种应用类型，广泛应用于环境监测、生物医疗、智能工业、智能家居等领域。不同应用

类型系统在结构设计、性能参数与功能需求上存在差异，但核心均为实现目标信号智能化感知与高效处理。以下阐述四大典型应用类型的核心设计、应用机制及典型场景，展现其应用价值与潜力。

（一）环境监测类碳基智能传感系统

环境监测类是应用最广泛的类型之一，核心功能为实时精准多参数监测大气、水、土壤中污染物，为环境评估、溯源与治理提供数据支撑。核心结构为“碳基多参数传感阵列 + 便携式信号处理模块 + 无线传输模块 + 云端平台”，传感阵列集成气体、水质、土壤等多类型传感单元。

应用机制为阵列同步捕获环境参数信号，经预处理与智能算法分析后，数据上传至云端平台汇总分析展示，具备污染预警功能。典型场景包括城市大气、工业园区污染、饮用水源地水质、农田土壤污染监测等。例如石墨烯 / 碳纳米管复合阵列大气监测系统，可同步检测多种核心污染物，检测限与响应速度优异，通过 NB-IoT 实现网格化监测。

水质监测场景中，碳量子点修饰光纤传感阵列可同步检测 pH、溶解氧等水质参数，检测限达 ppb 级；土壤监测场景中，多孔碳传感系统可埋入土壤长期监测养分与重金属含量，支撑精准农业。该类系统核心优势为多参数同步监测、响应快、精度高、可远程监控，相较于传统设备体积小、成本低、部署灵活，便于大范围网格化监测。

（二）生物医疗类碳基智能传感系统

生物医疗类凭借碳基材料良好生物相容性与高灵敏度，在疾病诊断、健康监测等领域优势显著，核心功能为精准检测生物标志物与实时监测人体生理参数，分为体外诊断与可穿戴健康监测两大类。体外诊断系统核心结构为“碳基生物传感阵列 + 微流控芯片 + 信号处理模块”，通过微流控芯片自动处理传输样品，实现生物样品快速检测。

例如石墨烯修饰免疫传感阵列可同步检测多种肿瘤标志物，检测限达 10^{-12} mol/L，检测时间短，可实现癌症早期筛查；碳纳米管核酸传感阵列可快速检测病原体核酸，灵敏度高、特异性强。可穿戴健康监测系统核心结构为“柔性碳基传感阵列 + 柔性信号处理模块 + 无线传输模块 + 智能终端”，采用柔性封装，可贴附皮肤或集成于衣物，实现生理参数实时无创监测。

例如石墨烯压阻效应柔性智能手环可监测心率、血压等参数，精度媲美商用

医疗设备；碳量子点汗液传感腕带可检测葡萄糖等成分，支撑运动健康管理与疾病辅助诊断；碳纳米管纤维智能衣物可集成多类传感单元，全面监测生命体征，适用于老人、病人远程监护。

（三）智能工业类碳基智能传感系统

智能工业类是工业 4.0 关键支撑技术，核心功能为实时监测工业生产过程中温度、压力、气体泄漏等参数并智能预警，保障生产安全高效稳定。核心结构为“工业级碳基传感阵列 + 边缘计算模块 + 工业物联网传输模块 + 工业控制平台”，具备抗干扰强、环境适应性好、实时性高的特点，适配工业制造、石油化工等复杂场景。

典型场景包括工业设备状态监测、生产环境安全监测、产品质量检测等。设备状态监测中，碳纳米管复合材料传感系统可监测设备振动与温度，预判故障避免停机损失；石油化工场景中，石墨烯有毒有害气体传感系统可实时监测泄漏，响应快、检测限低，超标时联动安全措施；产品质量检测中，碳基光电传感阵列可精准检测材料缺陷等参数，提升质量控制水平。

该类系统核心优势为抗恶劣环境能力强、实时性高、可实现工业级闭环控制，相较于传统工业传感设备体积小、安装便捷、成本低，便于实现生产过程全面感知与智能化管控。

（四）智能家居类碳基智能传感系统

智能家居类是智慧家庭核心感知单元，核心功能为实时监测室内环境参数、人体活动状态及安全隐患，联动智能家居控制系统调控设备，提升居住舒适性、安全性与节能性。核心结构为“微型碳基传感阵列 + 低功耗处理模块 + 蓝牙 / Wi-Fi 传输模块 + 智能家居网关”，具备体积小、功耗低、安装便捷、兼容性强的特点。

典型场景包括室内环境智能调控、家居安全监测、智能照明控制等。环境调控中，碳基复合传感阵列可检测多种室内参数，联动空调等设备自动调节环境；安全监测中，石墨烯烟雾与燃气泄漏传感系统可实时监测隐患，超标时报警并联动安全措施；照明控制中，碳基光电与人体红外传感系统可根据光照与人体状态自动控制灯光。

该类系统可集成于智能门锁、窗帘等设备，实现全面感知功能。核心优势为低功耗、低成本、易部署、兼容性强，可快速融入现有智能家居生态，提升家庭生活智能化水平。

第十章 碳基器件应用展望

第一节 电子信息领域应用

电子信息领域是现代科技发展的核心支柱，涵盖信息存储、通信传输、显示成像、智能传感等关键方向。随着 5G/6G 通信、人工智能、物联网、量子计算等新兴技术的快速演进，对电子信息器件的微型化、高速化、低功耗、柔性化及集成化提出了严苛要求。传统硅基电子器件受限于物理极限（如短沟道效应、载流子迁移率瓶颈），在高频高速、柔性电子等场景下逐渐显现性能短板。碳基材料（石墨烯、碳纳米管、碳量子点等）凭借独特的电子结构与优异的物理化学性能，如超高载流子迁移率、宽光谱响应、良好的力学柔韧性与化学稳定性，为突破传统技术瓶颈、推动电子信息领域革新提供了全新的材料体系与技术路径。碳基器件以碳基材料为核心功能层，通过精准调控材料微观结构与器件界面特性，实现了在高频器件、柔性电子、存储器件、显示成像等电子信息领域的高性能应用，展现出广阔的产业化前景。本节系统梳理碳基器件在电子信息领域的核心应用方向，深入探讨其在高频通信器件、柔性电子器件、信息存储器件及显示成像器件中的应用原理、技术进展与性能优势，分析当前面临的技术挑战与产业化瓶颈，提出针对性的优化路径与发展策略，为碳基器件在电子信息领域的规模化应用提供理论支撑与技术参考。

一、碳基器件在高频通信领域的应用

高频通信是 5G/6G、卫星通信、雷达探测等电子信息领域的核心技术支撑，其关键在于开发高性能的高频器件（如高频晶体管、射频开关、天线等），实现信号的高速传输与处理。传统硅基高频器件受限于载流子迁移率较低，在高频场景下存在传输延迟大、功耗高、信号衰减严重等问题；Ⅲ - V 族化合物半导体（如 GaAs、InP）虽具备较高载流子迁移率，但存在成本高昂、制备工艺复杂、柔性兼容性差等局限。碳基材料（尤其是石墨烯与碳纳米管）具有超高载流子迁移率、

低介电常数及良好的高频响应特性，成为制备高频通信器件的理想材料。碳基高频通信器件凭借高速信号处理能力、低功耗及微型化优势，在 5G/6G 基站、毫米波雷达、卫星通信等场景中展现出显著应用潜力。

（一）碳基高频晶体管

高频晶体管是高频通信系统的核心单元，负责信号的放大与调制，其性能直接决定通信系统的传输速率与带宽。碳基高频晶体管以石墨烯或半导体型碳纳米管为核心沟道材料，凭借超高载流子迁移率实现了高频高速的信号处理能力。石墨烯基高频晶体管采用“源极 - 漏极 - 石墨烯沟道 - 栅极 - 绝缘衬底”的场效应晶体管结构，石墨烯沟道的载流子迁移率可达 $10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 以上，远高于传统硅基材料（约 $1400 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ），使得器件能够在极高频率下稳定工作。研究表明，石墨烯基高频晶体管的截止频率（ f_T ）可突破太赫兹（THz）量级，具备在 6G 毫米波 / 太赫兹通信系统中应用的潜力。

半导体型碳纳米管基高频晶体管则以单根或阵列化的半导体型碳纳米管为沟道，其一维纳米结构具有优异的载流子输运特性，载流子迁移率可达 $10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 以上，且具备良好的电流驱动能力。与石墨烯基晶体管相比，半导体型碳纳米管基晶体管具有明确的禁带宽度，可有效抑制关态漏电流，降低器件功耗，更适用于数字通信系统。当前，半导体型碳纳米管基高频晶体管的截止频率已突破数百吉赫兹（GHz），接近或超越传统 III - V 族化合物半导体器件，在 5G 基站的射频前端模块中展现出替代潜力。此外，碳基高频晶体管还具备良好的低温工作性能，可适配卫星通信等极端环境下的应用需求。

（二）碳基射频开关与天线

射频开关是高频通信系统中实现信号通路切换的关键器件，要求具备低插入损耗、高隔离度、快响应速度及良好的高频稳定性。传统硅基射频开关（如 CMOS 开关）在高频场景下插入损耗较大，影响信号传输效率；GaAs 基射频开关虽性能优异，但成本较高。碳基射频开关以石墨烯或碳纳米管为核心开关材料，利用其高导电性与良好的电学调控特性，实现了低损耗、高速率的射频信号切换。石墨烯基射频开关通过栅极电压调控石墨烯的载流子浓度，实现从导通态到关断态的快速切换，插入损耗可低至 0.1 dB 以下，隔离度可达 40 dB 以上，响应速度快至纳秒级，适用于 5G/6G 通信系统的高频信号通路切换。

碳基天线是实现高频信号发射与接收的核心器件，要求具备宽频带、高增益、

小型化及柔性兼容等特性。石墨烯与碳纳米管具有良好的导电性与可加工性，可制备成微型化、柔性化的高频天线。石墨烯基天线采用化学气相沉积（CVD）法制备的大面积石墨烯薄膜为辐射单元，具备宽频带响应特性，可覆盖毫米波至太赫兹频段，且尺寸仅为传统金属天线的 1/10-1/5，适用于微型化通信终端。碳纳米管基天线则以碳纳米管阵列为核心，其高导电性与高长径比特性使得天线具备高增益与良好的辐射效率，且可与柔性衬底兼容，制备成柔性天线，适配可穿戴通信设备、柔性基站等新兴应用场景。目前，碳基高频天线已在毫米波雷达、卫星通信等领域开展原型应用，展现出优异的信号传输性能。

二、碳基器件在柔性电子领域的应用

柔性电子是电子信息领域的重要发展方向，旨在开发可弯曲、折叠、拉伸的电子器件，适配可穿戴设备、柔性显示、智能皮肤、柔性传感器等新兴应用场景。传统硅基电子器件刚性较强，难以满足柔性应用的机械性能要求；有机电子器件虽具备柔性特性，但存在载流子迁移率低、稳定性差等问题。碳基材料（石墨烯、碳纳米管、碳量子点等）具有良好的力学柔韧性 with 优异的电学性能，可在弯曲、拉伸等形变状态下保持稳定的性能输出，是制备柔性电子器件的理想材料。碳基柔性电子器件通过将碳基材料与柔性衬底（如聚酰亚胺、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚二甲基硅氧烷等）结合，实现了柔性化的信息感知、传输与处理，推动了柔性电子技术的产业化进程。

（一）柔性碳基晶体管与集成电路

柔性碳基晶体管是柔性电子系统的核心单元，负责信号的放大与逻辑运算，其性能直接决定柔性电子系统的功能实现。石墨烯基与碳纳米管基柔性晶体管是当前研究的热点方向。石墨烯基柔性晶体管采用转移印刷工艺将 CVD 生长的石墨烯转移至柔性衬底上，构建“源极 - 漏极 - 石墨烯沟道 - 栅极”结构，其载流子迁移率高，响应速度快，可在弯曲半径小至 1 mm 的情况下保持稳定性能。碳纳米管基柔性晶体管则以溶液加工工艺制备的碳纳米管薄膜为沟道，具备良好的柔性 with 可拉伸性，拉伸应变可达 20% 以上，且电流驱动能力强，适用于柔性数字集成电路。

柔性碳基集成电路是将多个柔性碳基晶体管集成，实现复杂的逻辑功能（如反相器、与非门、移位寄存器等）。目前，研究者已成功制备出基于石墨烯与碳

纳米管的柔性集成电路，其工作频率可达数百兆赫兹，可实现简单的信号处理与数据传输功能。例如，碳纳米管基柔性集成电路已应用于柔性可穿戴设备的信号处理模块，实现对人体生理信号的实时采集与处理。此外，柔性碳基集成电路还具备低成本、大面积制备的优势，可通过卷对卷印刷工艺实现规模化生产，降低柔性电子设备的制造成本。

（二）柔性碳基传感器与智能穿戴设备

柔性碳基传感器是柔性电子领域的重要应用器件，可实现对压力、应变、温度、湿度等物理量的精准感知，适配智能穿戴、智能皮肤等场景。碳纳米管与石墨烯基柔性压力/应变传感器具有高灵敏度、宽检测范围及良好的重复性，其工作原理基于碳基材料导电网络在压力/应变作用下的结构变化，导致电阻值的可检测变化。例如，碳纳米管/聚合物复合柔性压力传感器的灵敏度可达 100 kPa^{-1} 以上，可检测到微弱的人体脉搏信号与呼吸信号；石墨烯基柔性应变传感器的拉伸应变范围可达 50% 以上，可适配人体关节运动的监测需求。

基于柔性碳基传感器的智能穿戴设备已成为产业研究的热点，如柔性智能手环、智能衣物、智能头盔等。这些设备通过集成柔性碳基传感器、柔性碳基晶体管及柔性电源器件，实现对人体生理信号（如心率、脉搏、体温、运动状态）的实时监测，并通过无线通信模块将数据传输至终端设备，为健康管理、运动监测提供精准数据支撑。例如，集成碳纳米管基柔性传感器的智能衣物可实时监测人体肌肉收缩状态与呼吸频率，为运动员训练提供科学指导；石墨烯基柔性智能手环可精准检测心率变异性与睡眠质量，助力个性化健康管理。此外，柔性碳基传感器还可应用于柔性电子皮肤，实现机器人的触觉感知与人机交互，推动服务机器人、工业机器人等领域的发展。

三、碳基器件在信息存储领域的应用

信息存储是电子信息领域的核心需求之一，随着大数据、人工智能等技术的发展，对存储器件的存储密度、读写速度、功耗及稳定性提出了更高要求。传统硅基存储器件（如 DRAM、NAND Flash）受限于物理极限，存储密度提升空间有限，且存在读写速度慢、功耗高等问题。碳基材料（如石墨烯、碳纳米管、碳量子点）具有独特的电子存储特性，如电荷捕获能力、自旋输运特性等，为开发高性能信息存储器件提供了新的技术路径。碳基信息存储器件主要包括碳基阻变存储器、

碳基闪存、碳基自旋存储器等，具备高存储密度、高速读写、低功耗、长寿命等优势，有望突破传统存储技术的瓶颈。

（一）碳基阻变存储器

阻变存储器（RRAM）是一种基于材料电阻态变化实现信息存储的非易失性存储器件，具有结构简单、读写速度快、存储密度高、功耗低等优势，是下一代信息存储技术的重要候选。碳基阻变存储器以碳基材料（如石墨烯、碳纳米管、碳量子点、多孔碳）为阻变功能层，其阻变机制主要基于碳基材料在电场作用下的电荷捕获 / 释放、导电细丝的形成 / 断裂或氧化还原反应。例如，石墨烯基阻变存储器以石墨烯为阻变层，通过电场调控石墨烯的氧化程度，实现高阻态与低阻态的转换，读写速度可快至皮秒级，存储密度可达 10^{12} bit/cm² 以上，且具备良好的循环稳定性（循环次数可达 10^6 次以上）。

碳量子点基阻变存储器则利用碳量子点的量子限制效应与表面电荷捕获特性，实现高灵敏度的阻变响应。碳量子点的尺寸可调性使得器件的阻变特性可精准调控，且其良好的溶液加工特性便于实现大面积、低成本制备。多孔碳基阻变存储器则利用其高比表面积与丰富的孔道结构，增强电荷捕获能力，提升器件的存储性能。目前，碳基阻变存储器已在高密度存储阵列、嵌入式存储系统等领域开展原型应用，展现出替代传统 NAND Flash 的潜力。

（二）碳基闪存与自旋存储器

碳基闪存是基于碳基材料的电荷捕获特性实现信息存储的非易失性存储器件，其结构与传统硅基闪存类似，但以碳基材料（如石墨烯、碳纳米管、富勒烯）替代硅基电荷捕获层。石墨烯基闪存以石墨烯为电荷捕获层，其超高的电荷迁移率与良好的电荷存储能力使得器件的读写速度显著提升，且功耗降低。研究表明，石墨烯基闪存的读写速度可达到纳秒级，是传统硅基闪存的 10-100 倍，且数据保留时间可达 10 年以上，具备良好的稳定性。碳纳米管基闪存则以碳纳米管为沟道材料，其高载流子迁移率与一维纳米结构使得器件的存储密度与读写速度进一步提升，适用于高密度存储应用。

碳基自旋存储器是基于碳基材料的自旋输运特性实现信息存储的器件，具有读写速度快、功耗低、抗辐射能力强等优势，适用于量子计算、高性能计算等高端存储场景。石墨烯与碳纳米管具有良好的自旋输运特性，自旋弛豫时间长，可实现高效的自旋信号传输与操控。例如，石墨烯基自旋存储器通过调控石墨烯中

电子的自旋状态实现信息的写入与读出，读写速度可快至皮秒级，功耗仅为传统硅基存储器件的 1/100 以下。目前，碳基自旋存储器仍处于实验室研发阶段，但已展现出巨大的应用潜力，有望成为下一代高性能存储技术的核心方向。

第二节 能源环境领域应用

能源短缺与环境污染是制约全球可持续发展的核心挑战，开发高效能源存储与转换技术、精准环境监测与治理技术已成为全球科技攻关的重点方向。碳基材料凭借独特的结构特性（超大比表面积、可调孔道结构）、优异的理化性能（高导电性、良好化学稳定性、强催化活性）及环境友好特性，在能源环境领域展现出不可替代的应用价值。基于碳基材料构建的各类器件，如锂离子电池、超级电容器、燃料电池、环境传感器、水污染治理材料等，已在能源存储、清洁能源转换、环境监测、污染物去除等关键环节实现突破，为解决能源环境问题提供了核心技术支撑。本节系统阐述碳基器件在能源存储与转换、环境监测与治理领域的应用现状，分析关键技术突破方向，探讨应用过程中的核心挑战与应对策略，展望未来发展前景，为碳基器件在能源环境领域的规模化应用提供理论指导与技术参考。

一、能源存储领域的碳基器件应用

能源存储是保障能源供需平衡、推动可再生能源规模化发展的关键环节，碳基器件凭借高能量密度、高功率密度、长循环寿命等优势，已成为能源存储领域的核心技术载体。目前，基于碳基材料的能源存储器件主要包括锂离子电池、钠离子电池、超级电容器等，广泛应用于便携式电子设备、电动汽车、规模储能电站等场景。碳基材料在器件中可作为电极活性材料、导电添加剂或电极载体，通过结构设计与性能调控，显著提升器件的存储性能与循环稳定性。

（一）锂离子电池中的碳基器件应用

锂离子电池是当前应用最广泛的二次电池技术，碳基材料已成为锂离子电池负极的核心材料，同时在正极载体与导电添加剂领域也展现出重要应用价值。石墨作为传统碳基负极材料，具有层状结构稳定、锂离子嵌入脱出电位低、循环性能优异等特点，但其理论比容量较低（372 mAh/g），难以满足电动汽车、规模储能等场景对高能量密度电池的需求。为突破这一瓶颈，新型碳基负极材料（如

硬碳、软碳、多孔碳、石墨烯基复合材料)的研发与应用成为重点方向。

硬碳材料凭借无序的碳结构与丰富的微孔结构,理论比容量可达 500-700 mAh/g,且具有良好的倍率性能,适用于高能量密度锂离子电池;软碳材料则具有良好的导电性与加工性能,通过石墨化处理可进一步提升结晶度,适配不同性能需求的电池体系。多孔碳材料通过模板法、活化法等制备技术,可精准调控孔道结构与比表面积,为锂离子的快速传输提供通道,同时缓解充放电过程中的体积膨胀,显著提升器件的倍率性能与循环稳定性。石墨烯基复合材料则通过石墨烯与硅、锡等合金材料复合,利用石墨烯的高导电性与二维支撑结构,解决合金材料体积膨胀大、循环寿命短的问题,复合负极材料的比容量可提升至 1000 mAh/g 以上。

在正极材料领域,碳基材料主要作为导电添加剂与载体,提升正极材料的导电性与结构稳定性。例如,在磷酸铁锂、三元材料等正极材料中添加少量碳纳米管、石墨烯等碳基材料,可构建连续的导电网络,降低电极阻抗,提升锂离子的传输效率;将正极活性物质负载于多孔碳载体表面,可有效分散活性物质颗粒,缓解充放电过程中的体积变化,延长器件循环寿命。目前,基于碳基材料改性的锂离子电池能量密度已突破 400 Wh/kg,循环寿命超过 3000 次,为电动汽车的续航里程提升与规模储能的成本降低提供了核心支撑。

(二) 超级电容器中的碳基器件应用

超级电容器是一种介于传统电容器与二次电池之间的新型能源存储器件,具有功率密度高、充放电速度快、循环寿命长(可达 10 万次以上)、环境适应性强等优势,广泛应用于新能源汽车启停系统、轨道交通能量回收、应急电源等场景。碳基材料是超级电容器电极的核心材料,主要包括活性炭、多孔碳、碳纳米管、石墨烯等,其超大比表面积与可调孔道结构是保障超级电容器高电容性能的关键。

活性炭作为传统碳基电极材料,具有制备成本低、比表面积大(可达 1000-3000 m²/g)等优势,已实现规模化应用,但其孔道结构无序、导电性较差,限制了器件功率密度的提升。多孔碳材料通过精准调控孔道结构(微孔、介孔、大孔的协同分布),可实现电解液离子的快速传输与吸附,同时提升材料的导电性,显著提升超级电容器的功率密度与能量密度。例如,生物质衍生多孔碳通过农业废弃物(如秸秆、椰壳、核桃壳)制备,不仅成本低廉、环境友好,还可通过调

控活化工工艺实现孔道结构的精准设计，电容值可达 200-400 F/g。

碳纳米管与石墨烯等新型碳基材料则凭借优异的导电性与独特的一维、二维结构，为超级电容器性能提升提供了新路径。碳纳米管阵列电极可构建连续的导电网络与通畅的离子传输通道，功率密度可达 10 kW/kg 以上；石墨烯基电极通过片层堆叠形成多孔结构，比表面积大、导电性优异，复合电极的电容值可突破 500 F/g。此外，碳基材料与金属氧化物、导电聚合物等复合构建的复合材料电极，可结合双电层电容与法拉第赝电容的优势，进一步提升超级电容器的能量密度，推动其在更多高功率需求场景的应用。

（三）钠离子电池中的碳基器件应用

钠离子电池因钠资源丰富、分布广泛、成本低廉等优势，成为规模储能领域的重要候选技术，碳基材料在钠离子电池中同样展现出重要应用价值。与锂离子电池类似，碳基材料主要作为钠离子电池的负极材料，其层状结构或多孔结构可实现钠离子的嵌入脱出与吸附存储。石墨材料由于层间距较小（0.335 nm），钠离子嵌入难度较大，电容性能较差，因此新型碳基负极材料的研发成为钠离子电池发展的关键。

硬碳材料因层间距较大（0.37-0.40 nm）、具有丰富的微孔与缺陷结构，成为钠离子电池负极的优选材料，其理论比容量可达 300-400 mAh/g，循环寿命超过 2000 次。通过调控硬碳材料的制备工艺（如前驱体选择、碳化温度、活化处理），可进一步优化其孔道结构与表面性质，提升钠离子的传输效率与存储容量。多孔碳材料通过模板法制备，可实现孔道尺寸与分布的精准调控，适配钠离子的尺寸特性，提升器件的倍率性能与循环稳定性。

此外，石墨烯基复合材料、碳纳米管基复合材料等也在钠离子电池中展现出良好的应用潜力。例如，石墨烯与磷复合形成的负极材料，利用磷的高理论比容量（2596 mAh/g）与石墨烯的高导电性、支撑作用，可显著提升器件的能量密度；碳纳米管与金属氧化物复合则可提升电极的导电性与结构稳定性。目前，基于碳基负极材料的钠离子电池能量密度已突破 150 Wh/kg，循环寿命超过 3000 次，成本较锂离子电池降低 30% 以上，为规模储能电站的规模化应用提供了成本可控的技术方案。

二、能源转换领域的碳基器件应用

能源转换是实现能源形式高效转化、推动清洁能源替代的核心技术，碳基器件在燃料电池、光伏电池、光催化制氢、电催化分解水等能源转换领域展现出优异的催化性能与应用潜力。碳基材料通过掺杂改性、复合改性等技术调控表面电子结构，可构建高效的催化活性位点，提升能源转换效率，同时具有成本低廉、化学稳定性好、环境友好等优势，有望替代传统贵金属催化剂，推动能源转换技术的规模化应用。

（一）燃料电池中的碳基器件应用

燃料电池是一种将燃料的化学能直接转化为电能的清洁能源转换器件，具有能量转换效率高、排放污染小等优势，主要包括质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池、直接甲醇燃料电池等类型。碳基材料在燃料电池中主要作为催化剂载体与电极导电材料，其高导电性、大比表面积与良好的化学稳定性，可保障催化剂的分散性与电极的电子传输效率。

在质子交换膜燃料电池中，传统催化剂为铂基催化剂，成本高昂且资源稀缺，限制了其规模化应用。碳基材料通过氮、硼、硫等杂原子掺杂，可构建具有高催化活性的非贵金属催化剂，替代部分铂基催化剂，降低器件成本。例如，氮掺杂多孔碳催化剂具有优异的氧还原反应催化活性，催化性能接近商业铂碳催化剂，且稳定性更好、成本更低；碳基材料与铁、钴等过渡金属复合形成的 M-N-C 型催化剂，氧还原反应起始电位可达 0.95 V (vs RHE)，半波电位可达 0.85 V (vs RHE)，已成为质子交换膜燃料电池非贵金属催化剂的核心研究方向。

碳基材料作为催化剂载体，可有效分散铂基催化剂颗粒，提升催化剂的利用率与稳定性。例如，碳纳米管、石墨烯等碳基载体具有高导电性与大比表面积，可将铂颗粒分散至纳米级别，显著提升铂的利用率，降低铂的用量；通过对碳基载体进行表面改性，可增强载体与催化剂颗粒的相互作用，抑制催化剂颗粒的团聚与流失，延长燃料电池的使用寿命。目前，基于碳基材料的燃料电池催化剂已实现铂用量降低 50% 以上，器件功率密度突破 1 W/cm²，为燃料电池的产业化应用奠定了基础。

（二）光催化能源转换中的碳基器件应用

光催化能源转换技术通过半导体材料吸收太阳光，将光能转化为化学能（如

光催化制氢、光催化 CO_2 还原), 是解决能源短缺与环境污染问题的重要技术路径。碳基材料(如石墨烯、碳量子点、多孔碳)具有优异的光学性能、高导电性与大比表面积, 与半导体材料复合可构建高效的光催化体系, 提升光生载流子的分离效率与传输效率, 增强光催化性能。

在光催化制氢领域, 传统半导体光催化剂(如 TiO_2 、 ZnO)存在光生载流子复合率高、可见光响应范围窄等问题, 限制了光催化效率。石墨烯与半导体材料复合形成的复合材料, 可利用石墨烯的高导电性快速转移光生电子, 抑制载流子复合, 同时石墨烯的宽光谱吸收特性可拓展催化剂的可见光响应范围。例如, 石墨烯/ TiO_2 复合材料的光催化制氢效率较纯 TiO_2 提升 3-5 倍, 且稳定性显著增强。碳量子点作为新型碳基材料, 具有优异的荧光性能与电子转移能力, 与半导体材料复合可构建量子点敏化光催化体系, 进一步提升光催化制氢效率。

在光催化 CO_2 还原领域, 碳基材料的多孔结构与表面活性位点可增强 CO_2 的吸附与活化能力, 同时促进光生载流子的分离与传输, 提升 CO_2 还原为碳氢燃料(如 CH_4 、 CO 、 C_2H_4)的效率。例如, 氮掺杂多孔碳与半导体材料复合形成的光催化剂, 可通过氮掺杂构建的活性位点增强 CO_2 的吸附与活化, 同时利用碳基材料的高导电性提升载流子传输效率, CO_2 还原产物选择性可达 90% 以上。碳基材料在光催化能源转换领域的应用, 为实现太阳能向化学能的高效转化提供了新路径。

(三) 电催化分解水中的碳基器件应用

电催化分解水是一种将电能转化为氢能的清洁能源转换技术, 氢能作为一种清洁、高效的二次能源, 被认为是未来能源体系的重要组成部分。电催化分解水过程包括析氢反应与析氧反应两个半反应, 均需要高效的催化剂降低反应能垒。传统析氢与析氧催化剂为贵金属(如铂、铱、钌), 成本高昂且资源稀缺, 限制了电催化分解水技术的规模化应用。碳基材料通过掺杂改性、复合改性等技术, 可构建高效的非贵金属电催化剂, 替代贵金属催化剂, 推动氢能的低成本制备。

在析氢反应领域, 碳基催化剂主要通过磷、硫、硒等元素掺杂或与过渡金属硫化物、磷化物复合实现高效催化。例如, 磷掺杂石墨烯催化剂具有优异的析氢反应催化活性, 在酸性条件下的过电位仅为 50 mV (电流密度 10 mA/cm^2), 塔菲尔斜率为 40 mV/dec , 性能接近商业铂碳催化剂; 碳纳米管与硫化钼复合形成的催化剂, 可利用碳纳米管的高导电性与硫化钼的高催化活性, 实现析氢反应的

高效进行，过电位低至 80 mV（电流密度 10 mA/cm²）。

在析氧反应领域，碳基催化剂主要通过氮掺杂或与过渡金属氧化物（如钴氧化物、镍氧化物）复合构建。例如，氮掺杂多孔碳与钴氧化物复合催化剂具有优异的析氧反应催化活性，在碱性条件下的过电位为 280 mV（电流密度 10 mA/cm²），塔菲尔斜率为 60 mV/dec，且稳定性良好；石墨烯基复合氧化物催化剂可通过石墨烯的支撑作用抑制金属氧化物颗粒的团聚，提升催化剂的稳定性与催化效率。目前，基于碳基催化剂的电催化分解水器件已实现全分解水的低电压驱动（1.5 V 以下），氢能制备成本较传统贵金属催化剂降低 60% 以上，为氢能的规模化应用提供了技术支撑。

三、环境监测与治理领域的碳基器件应用

环境监测与治理是保障生态环境安全的关键环节，碳基器件凭借高灵敏度、高选择性等优势，在气、水、土污染物监测及治理领域应用价值显著。碳基环境传感器可实现痕量污染物精准检测，碳基治理材料通过吸附、催化降解实现污染物高效去除，推动治理技术升级。

（一）环境监测中的碳基器件应用

碳基环境传感器通过敏感材料与污染物的特异性相互作用转化信号，可精准检测气、水、土中痕量污染物。气体监测方面，石墨烯基、碳纳米管基、多孔碳基传感器可检测 NO₂、VOCs 等多种有毒气体，检测限达 ppb 级，响应快速。

其中石墨烯基传感器对 NO₂ 等检测限 ppb 级、响应时间 < 10 秒；碳纳米管基对 H₂S 等吸附检测性能优异；多孔碳基通过孔道调控提升灵敏度，如氮掺杂多孔碳 VOCs 传感器检测限 50 ppb，可实时监测室内外 VOCs。

水体监测中，碳基传感器可检测重金属离子、有机污染物等，碳量子点基荧光传感器对 Hg²⁺ 检测限纳摩尔级，检测简便；石墨烯基电化学传感器对酚类检测限皮摩尔级。土壤监测中，碳基传感器经表面改性可原位检测重金属与有机污染物，为修复提供数据支撑。

（二）水污染治理中的碳基器件应用

水污染治理中，碳基材料凭借大比表面积与强催化性能，在重金属去除、有机污染物降解等环节作用突出。碳基吸附材料可高效去除水体污染物，催化材料通过光、电催化将有机污染物降解为无害物质，实现水体深度净化。

重金属去除领域,碳基材料经氨基、巯基等官能团修饰后选择性与吸附容量显著提升,如巯基修饰多孔碳对 Hg^{2+} 吸附容量超 1000 mg/g 且可再生,石墨烯/氧化石墨烯对 Pb^{2+} 等去除率超 99%,已规模化应用于工业废水处理与饮用水净化。

有机污染物降解方面,石墨烯基、碳纳米管基催化材料可高效降解酚类、抗生素等难降解物质,如石墨烯/ TiO_2 复合光催化剂对苯酚降解率超 95%;氮掺杂碳纳米管电催化剂降解抗生素无二次污染。此外,碳基材料可通过光催化产生活性氧物种实现水体消毒,效率超 99.9%。

(三) 空气污染治理中的碳基器件应用

空气污染治理中,碳基材料兼具优异吸附与催化性能。颗粒物去除方面,活性炭纤维、碳纳米管膜等过滤材料孔隙率高,对 $\text{PM}_{2.5}$ 等去除率超 99%,活性炭纤维透气性好、空气阻力低,适用于空气净化器等场景。

气态污染物净化中,碳基材料通过吸附与催化氧化协同作用去除 NO_x 、VOCs 等,吸附材料实现初步去除,催化材料可在常温下将污染物氧化为无害物质。如蜂窝状多孔碳负载锰氧化物常温催化 VOCs 净化率超 90%,氮掺杂碳基催化剂还原 NO_x 为 N_2 ,净化率超 95%,为空气净化与工业废气处理提供低成本方案。

第三节 生物医疗领域应用

生物医疗领域的技术革新始终以精准诊断、高效治疗、微创干预及健康管理为核心目标,而材料科学的突破是推动该领域发展的关键驱动力之一。碳基材料凭借其独特的物理化学性质,如优异的生物相容性、可调的电子传输特性、超大比表面积及灵活的结构可设计性,衍生出的各类碳基器件在生物医疗领域展现出广阔的应用前景。从疾病的早期诊断标志物检测、活体生理参数监测,到靶向药物递送、组织工程修复,再到微创治疗器械研发,碳基器件正逐步突破传统医疗技术的局限,为精准医疗体系的构建提供核心支撑。本章第三节将系统阐述碳基器件在生物医疗领域的核心应用方向,剖析其作用机制与技术优势,探讨当前面临的挑战及未来发展路径,为相关研究与产业化应用提供理论与实践参考。

一、碳基器件在生物检测与诊断中的应用

生物检测与诊断是疾病防治的第一道防线,其核心需求是实现对生物标志物

的高灵敏度、高特异性、快速精准检测。碳基材料构建的传感器件凭借其独特的敏感机制，在核酸检测、蛋白质检测、细胞检测及活体生理参数监测等方向均取得了突破性进展，显著提升了诊断的时效性与精准度。

（一）核酸检测用碳基器件

核酸作为遗传信息的载体，其突变、甲基化等异常状态与肿瘤、遗传性疾病等多种疾病的发生发展密切相关，精准检测核酸序列及修饰状态对疾病早期诊断具有重要意义。碳基材料（如石墨烯、碳纳米管、碳量子点）具有优异的电子传输性能，其表面易通过化学修饰引入核酸探针（如 DNA、RNA 探针），基于探针与目标核酸的互补配对作用，可实现对目标核酸的特异性识别，同时通过电子信号的变化转化为可检测的电信号或光学信号。

石墨烯基核酸传感器是该领域的研究热点之一。通过化学剥离或化学气相沉积法制备的石墨烯薄膜，可通过 $\pi-\pi$ 堆积作用固定单链核酸探针，当目标核酸与探针结合形成双链结构时，会引起石墨烯表面电荷分布的改变，导致器件的电阻、电流等电学参数发生显著变化，通过检测这些参数变化可实现对目标核酸的定量检测。研究表明，石墨烯基核酸传感器对特定 DNA 序列的检测下限可低至 fM 级别，且具有良好的特异性，能够有效区分单碱基错配的核酸序列。此外，将石墨烯与量子点、贵金属纳米粒子等材料复合，可进一步提升传感器的检测灵敏度，实现对多重核酸标志物的同步检测，为多基因疾病的诊断提供技术支撑。

碳纳米管基核酸传感器则凭借其独特的一维纳米结构优势，展现出优异的电子传输效率与生物相容性。单壁碳纳米管的直径可与核酸分子尺寸匹配，通过非共价相互作用（如范德华力、 $\pi-\pi$ 相互作用）实现核酸探针的固定，目标核酸的结合会导致碳纳米管的导电性能发生改变，从而产生检测信号。碳纳米管基核酸传感器可集成于微流控芯片中，实现核酸样本的快速预处理与检测一体化，大大缩短了检测时间，适用于临床紧急诊断场景。碳量子点基核酸传感器则主要基于光学信号检测，碳量子点具有优异的荧光性能，通过核酸探针修饰后，当与目标核酸结合时，会发生荧光猝灭或增强现象，基于此可实现对核酸的高灵敏度检测，且具有操作简便、成本较低等优势，有望应用于基层医疗诊断。

（二）蛋白质检测用碳基器件

蛋白质是生命活动的主要承担者，其表达水平、修饰状态及相互作用的异常与疾病的发生发展密切相关，是重要的疾病诊断标志物。碳基器件通过对蛋白质

的特异性识别与信号转化,可实现对蛋白质标志物的精准检测,为疾病的早期筛查与诊断提供关键依据。

基于抗原-抗体特异性结合的碳基免疫传感器是蛋白质检测的主要技术路径之一。石墨烯、碳纳米管等碳基材料作为传感器的敏感基底,可通过化学修饰(如羧基化、氨基化)固定抗体分子,当样本中存在目标抗原时,抗原与抗体发生特异性结合,导致敏感基底表面的电荷分布、界面阻抗等发生变化,通过电化学或电学检测技术可实现对目标抗原的定量分析。例如,石墨烯/金纳米粒子复合基免疫传感器可通过金纳米粒子的信号放大作用,显著提升对肿瘤标志物(如癌胚抗原 CEA、甲胎蛋白 AFP)的检测灵敏度,检测下限可达 pg/mL 级别,且具有良好的抗干扰能力,能够在复杂生物样本(如血清、血浆)中实现精准检测。

除免疫传感器外,基于碳基材料的蛋白质电化学传感器也得到了广泛研究。碳基材料表面可通过吸附或共价结合方式固定酶、适配体等生物识别元件,当蛋白质与识别元件结合时,会影响识别元件的电化学活性,从而产生检测信号。例如,碳量子点修饰的电极表面固定葡萄糖氧化酶,当样本中存在特定蛋白质时,蛋白质会抑制葡萄糖氧化酶的活性,导致电极的电化学响应信号减弱,通过信号变化可实现对蛋白质的定量检测。此外,碳基材料的超大比表面积可实现对多种蛋白质识别元件的同时固定,构建多通道蛋白质检测器件,实现对多种疾病标志物的同步检测,提升诊断效率。

(三) 活体生理参数监测碳基器件

实时、精准监测活体生理参数(如温度、pH 值、血氧饱和度、血糖浓度等)是疾病诊疗与健康管理的核心需求。碳基材料具有柔性、轻量化、生物相容性好及响应速度快等优势,可构建柔性可穿戴或植入式生理参数监测器件,实现对生理参数的长期、实时监测。

柔性碳基温度传感器是活体温度监测的典型器件之一。以石墨烯、碳纳米管与柔性高分子材料(如聚二甲基硅氧烷 PDMS、聚酰亚胺 PI)复合制备的柔性温度传感器,具有良好的柔韧性与皮肤贴合性,可穿戴于人体皮肤表面,或植入体内特定部位,实时监测体温变化。该类传感器基于碳基材料的电阻随温度变化的特性,实现对温度的精准检测,响应时间可达毫秒级,检测精度可达到 0.1°C 以下,能够及时捕捉人体体温的微小变化,为感染、炎症等疾病的早期预警提供依据。在肿瘤放疗过程中,植入式碳基温度传感器可实时监测病灶区域的温度变化,为

放疗剂量的精准调控提供数据支撑，提升放疗效果并减少对正常组织的损伤。

碳基 pH 传感器则主要用于监测体内微环境的 pH 值变化，体内微环境 pH 值的异常与肿瘤、炎症、代谢性疾病等密切相关。基于石墨烯、碳量子点等碳基材料制备的 pH 传感器，通过表面修饰 pH 敏感基团（如羧基、氨基），当环境 pH 值变化时，敏感基团发生质子化或去质子化反应，导致碳基材料的电学或光学性能发生改变，从而实现对 pH 值的检测。该类传感器可植入肿瘤组织内部，实时监测肿瘤微环境的 pH 值变化，为肿瘤的早期诊断与治疗效果评估提供依据。此外，碳基材料还可用于构建血糖传感器、血氧传感器等，实现对多种生理参数的综合监测，为精准健康管理提供全面的数据支撑。

二、碳基器件在药物递送中的应用

药物递送系统的核心目标是实现药物的靶向递送、可控释放，提升药物疗效，降低毒副作用。碳基材料具有超大比表面积、可调的孔径结构及良好的生物相容性，可作为药物载体构建碳基药物递送器件，通过表面修饰靶向分子实现对病变组织的特异性识别，同时通过环境响应（如 pH 响应、温度响应、光响应）实现药物的可控释放，显著提升药物递送效率。

（一）碳基药物载体的结构与修饰

碳基药物载体的结构设计直接影响药物负载量与释放性能。多孔碳、碳纳米管、石墨烯等碳基材料具有超大比表面积与丰富的孔道结构，可通过物理吸附、化学结合等方式负载大量药物分子，提升药物负载量。例如，多孔碳材料的孔径可通过制备工艺调控，使其与药物分子尺寸匹配，增强药物与载体之间的相互作用，提高药物负载效率；碳纳米管的中空结构可作为药物储存腔，将药物分子封装于管内，减少药物在体内的提前泄漏。

为实现药物的靶向递送，需对碳基药物载体进行表面靶向修饰。通过化学修饰方法在碳基材料表面引入靶向分子，如抗体、适配体、多肽、糖类分子等，这些靶向分子可与病变组织细胞表面的特异性受体结合，实现药物载体对病变组织的精准识别与富集。例如，在碳纳米管表面修饰肿瘤特异性抗体，可使药物载体特异性识别肿瘤细胞，提升药物在肿瘤组织的浓度，降低对正常组织的毒副作用；在石墨烯表面修饰叶酸分子，可靶向识别叶酸受体高表达的肿瘤细胞，实现药物的靶向递送。此外，还可在碳基药物载体表面修饰聚乙二醇（PEG）等亲水性分子，

提升载体的生物相容性,减少体内免疫系统的清除,延长药物在体内的循环时间。

(二) 环境响应型碳基药物递送器件

环境响应型碳基药物递送器件可根据体内不同组织的微环境差异(如 pH 值、温度)或外部刺激(如光、磁场)实现药物的可控释放,进一步提升药物递送的精准性。pH 响应型碳基药物递送器件是目前研究最为广泛的类型之一,利用肿瘤组织微环境(pH 6.0-6.8)低于正常组织(pH 7.2-7.4)的特点,通过在碳基载体表面修饰 pH 敏感键(如脰键、酯键)或 pH 敏感聚合物,当药物载体到达肿瘤组织后,pH 敏感键断裂或 pH 敏感聚合物发生构象变化,实现药物的快速释放。例如,脰键修饰的石墨烯药物载体在正常组织环境中稳定存在,药物不释放;进入肿瘤组织后,脰键在酸性条件下断裂,释放出药物分子,实现药物的靶向释放。

温度响应型碳基药物递送器件则利用肿瘤组织局部温度升高(如肿瘤热疗过程中)或外部热刺激实现药物释放。通过在碳基载体表面接枝温度敏感聚合物(如聚 N-异丙基丙烯酰胺 PNIPAM),当温度升高至聚合物的最低临界溶解温度(LCST)以上时,聚合物发生疏水-亲水转变,导致载体结构破坏,释放药物。例如,碳纳米管/PNIPAM 复合药物载体在常温下稳定,当通过外部激光照射使肿瘤组织温度升高至 PNIPAM 的 LCST 以上时,PNIPAM 发生构象变化,释放出负载的药物,实现药物的可控释放。

光响应型碳基药物递送器件则通过外部光刺激(如近红外光)实现药物释放,具有响应速度快、时空可控性强等优势。碳基材料(如石墨烯、碳纳米管)具有良好的光热转换性能,在近红外光照射下可将光能转化为热能,使局部温度升高,触发药物释放;也可通过在碳基载体表面修饰光敏感基团,在光照射下光敏感基团发生断裂,释放药物。例如,近红外光响应的石墨烯药物载体,在近红外光照射下,石墨烯产生的热能使载体表面的温度敏感聚合物构象变化,释放药物,实现对药物释放的精准时空控制。

(三) 碳基药物递送器件的应用进展

碳基药物递送器件在肿瘤治疗、炎症治疗等领域已展现出良好的应用前景。在肿瘤治疗中,碳基药物递送器件可实现化疗药物、基因药物、免疫药物等多种药物的靶向递送与可控释放,提升治疗效果。例如,负载化疗药物阿霉素的碳纳米管药物载体,经肿瘤特异性抗体修饰后,可精准靶向肿瘤细胞,在肿瘤组织微环境的酸性条件下释放阿霉素,显著提升阿霉素在肿瘤组织的浓度,增强化疗效

果，同时降低阿霉素对心脏、肝脏等正常器官的毒副作用。

在基因治疗中，碳基材料可作为基因载体，将治疗性基因（如抑癌基因、siRNA）递送至靶细胞内，实现基因的有效表达。石墨烯、碳纳米管等碳基材料具有良好的基因负载能力，可通过静电相互作用与带负电的基因分子结合，保护基因免受体内核酸酶的降解，同时通过靶向修饰实现对靶细胞的精准递送。研究表明，碳基基因载体可有效将 siRNA 递送至肿瘤细胞内，沉默肿瘤相关基因的表达，抑制肿瘤细胞增殖，为肿瘤基因治疗提供了新的技术路径。此外，碳基药物递送器件还可用于抗炎药物的靶向递送，实现对炎症部位的精准治疗，降低药物的全身毒副作用。

三、碳基器件在组织工程中的应用

组织工程的核心是构建生物活性组织替代物以修复受损器官，关键在于优质支架材料。碳基材料因生物相容性佳、力学性能优异且结构可调，可作为支架构建组织工程器件，为细胞生长分化提供适宜微环境，助力组织修复再生。

（一）碳基组织工程支架的制备与性能调控

碳基支架制备方法多样（模板法、静电纺丝法、冷冻干燥法等），可精准调控孔径、孔隙率等关键参数。模板法通过前驱体填充 - 碳化 - 模板去除流程，制备出纳米至微米级孔径的多孔支架，保障细胞浸润与营养传输；静电纺丝法经预氧化、碳化可获得模拟天然细胞外基质的纳米纤维支架，力学性能与比表面积优势显著；冷冻干燥法则能制备高孔隙率、透气性良好的三维多孔支架，利于细胞均匀分布。

表面改性是提升碳基支架生物活性的关键，可通过引入生长因子、胶原蛋白等生物活性因子，或采用氮、磷等元素掺杂实现。前者能促进细胞粘附增殖与分化，如石墨烯支架修饰骨形态发生蛋白可增强成骨分化，碳纳米纤维支架修饰胶原蛋白可强化细胞相互作用；后者可调控表面化学性质，进一步优化生物相容性。

表面改性是提升碳基支架生物活性的关键，可通过引入生长因子、胶原蛋白等生物活性因子，或采用氮、磷等元素掺杂实现。前者能促进细胞粘附增殖与分化，如石墨烯支架修饰骨形态发生蛋白可增强成骨分化，碳纳米纤维支架修饰胶原蛋白可强化细胞相互作用；后者可调控表面化学性质，进一步优化生物相容性。

（二）碳基器件在不同组织修复中的应用

碳基组织工程器件在骨、软骨、神经等组织修复领域成效显著。骨修复中，多孔碳支架因力学性能与天然骨相近，可支撑骨髓间充质干细胞成骨分化，与羟基磷灰石等复合后生物活性进一步提升；软骨修复中，石墨烯/聚乳酸等柔性多孔支架可模拟软骨细胞外基质，促进软骨细胞增殖并分泌特异性基质，负载生长因子后修复效果更佳；神经修复中，碳纳米管支架凭借导电性与一维结构，可引导神经干细胞定向生长及轴突延伸，复合神经生长因子后有望用于脊髓损伤等疾病治疗。

第四节 未来发展趋势

碳基材料器件凭借碳元素独特的电子结构、理化特性及资源优势，历经数十年发展已在电子信息、能源环境、生物医疗等领域实现关键技术突破与初步产业化应用。随着全球科技革命与产业变革的深入推进，对高性能、低功耗、多功能、绿色可持续器件的需求持续攀升，碳基材料器件正迎来材料体系革新、制备工艺升级、功能集成深化及应用场景拓展的多重机遇。本节立足碳基材料器件的发展现状，结合前沿技术演进方向，从材料体系创新、制备工艺突破、功能集成升级及产业生态构建四个维度，系统剖析其未来发展趋势，展望技术突破路径与产业化前景，为相关领域的研究创新与产业布局提供参考。

一、材料体系创新：多元复合与功能定向设计

材料是器件性能的核心载体，碳基材料器件的未来发展首要依赖于材料体系的创新突破。当前单一碳同素异形体材料（如石墨烯、碳纳米管、金刚石等）的性能瓶颈逐渐显现，难以满足复杂场景下的多功能需求。未来碳基材料体系将朝着多元复合化、功能定向化、结构精准化方向发展，通过材料组分、结构与功能的协同优化，突破单一材料的性能局限，赋予器件更优异的综合性能。以下从多元碳基复合材料、功能化改性技术及新型碳基材料探索三个方面展开阐述。

（一）多元碳基复合材料的协同增效

多元碳基复合材料通过不同维度、不同类型碳材料的复合，或碳材料与金属、陶瓷、聚合物等其他材料的协同融合，实现“1+1 > 2”的增效效应，是突破单

一材料性能瓶颈的核心方向。未来复合材料的创新重点在于复合界面的精准调控与组分比例的优化设计。在碳-碳复合领域，将实现不同维度碳材料的精准组装，如零维碳量子点与二维石墨烯的层间复合、一维碳纳米管与三维多孔碳的骨架交织，通过界面电荷转移效应与结构互补性，提升材料的导电性、比表面积及机械稳定性。例如，石墨烯-碳纳米管复合薄膜可兼具石墨烯的高面内导电性与碳纳米管的三维导电网络优势，大幅提升柔性电子器件的电荷传输效率与机械柔韧性。

在碳-非碳复合领域，将聚焦于功能导向的组分选择与界面工程。碳材料与金属纳米粒子（Au、Pt、Cu等）的复合将强化催化活性位点，提升能源转换与催化器件的性能；与金属氧化物（ TiO_2 、 MnO_2 等）的复合可调控电子传输路径，优化储能器件的充放电特性；与生物相容性聚合物（壳聚糖、聚乳酸等）的复合则能提升生物医疗器件的生物安全性与界面适配性。未来的关键突破点在于发展原子级精准的界面调控技术，减少复合界面的缺陷与阻抗，实现组分间的高效协同作用，同时开发规模化、低成本的复合材料制备工艺，推动其从实验室走向产业化应用。

（二）功能化改性技术的精准化升级

功能化改性是拓展碳基材料应用场景的关键手段，未来将朝着精准化、可控化、绿色化方向升级，实现对材料表面性质、电子结构、功能基团的定向调控。在表面功能化方面，将突破传统化学修饰的随机性局限，发展基于原子层沉积、分子印迹、精准光刻等技术的定向修饰方法，实现功能基团在碳材料表面的位点选择性嫁接与密度精准调控。例如，通过分子印迹技术在碳量子点表面构建特异性识别位点，可实现对特定生物标志物的精准捕获，提升生物传感器件的检测特异性与灵敏度；通过原子层沉积技术在石墨烯表面生长超薄金属氧化物层，可精准调控其功函数，优化光电器件的光电转换效率。

在电子结构调控方面，将发展电场调控、应力调控、掺杂调控等多手段协同的精准调控技术，实现对碳基材料载流子浓度、迁移率、能带结构的动态可调。例如，通过离子液体栅极调控石墨烯的载流子类型与浓度，可制备高性能的可调谐电子器件；通过对碳纳米管进行精准的氮、硼掺杂，可调控其半导体特性，优化场效应晶体管的开关性能。同时，绿色化改性技术将成为重要发展方向，开发水相体系、室温条件下的绿色修饰工艺，减少化学试剂的使用与环境污染物的排放，契合可持续发展理念。

（三）新型碳基材料的探索与开发

除了对现有碳材料的复合与改性，新型碳同素异形体及碳基衍生物的探索与开发将为碳基器件的发展注入新的活力。当前，类石墨烯二维碳材料（如石墨炔、碳烯、蓝丝黛尔石）的研究已取得初步进展，这类材料具有独特的电子结构与理化特性，有望突破石墨烯的性能局限。例如，石墨炔具有天然的带隙结构与高电荷迁移率，无需复杂修饰即可用于高性能半导体器件，在高频电子领域具有广阔应用前景；蓝丝黛尔石作为一种六方金刚石结构材料，兼具金刚石的高硬度、高导热性与独特的半导体特性，在高压电子器件、热管理器件领域具有潜在应用价值。

未来，随着表征技术与制备工艺的进步，将实现新型碳基材料的可控制备与性能精准调控，深入探究其物理化学特性与器件应用潜力。同时，生物基碳材料作为一种绿色可持续的碳源材料，将得到更多关注，通过对生物质（如秸秆、壳聚糖、木质素等）的资源化利用，制备高性能多孔碳、碳量子点等材料，降低碳基材料的制备成本，推动碳基器件产业的绿色化发展。

二、制备工艺突破：精准可控与规模化量产

制备工艺是连接碳基材料与器件应用的关键桥梁，当前碳基器件的产业化进程受限于制备工艺的精准度不足、规模化能力薄弱及成本过高。未来，碳基材料器件的制备工艺将朝着精准可控化、规模化量产化、绿色低能耗方向突破，通过工艺创新提升器件性能的一致性与稳定性，降低生产成本，推动碳基器件的大规模产业化应用。以下从精准制备技术升级、规模化量产工艺开发及绿色低能耗工艺创新三个方面展开阐述。

（一）精准制备技术的精细化升级

精准制备技术的升级是提升碳基器件性能一致性与可靠性的核心保障，未来将聚焦于原子级、纳米级的精准调控，实现碳基材料的结构、尺寸、形貌及组分的精准控制。在二维碳材料制备方面，将突破现有化学气相沉积（CVD）技术的局限，发展常压、低温、大面积的精准生长技术，实现石墨烯、石墨炔等材料的层数可控、晶界密度可调及大面积均匀生长。例如，通过优化 CVD 生长的催化剂类型、生长温度与气体氛围，可制备出无晶界的大面积单层石墨烯，大幅提升其导电性与机械性能；发展模板辅助生长技术，可实现石墨炔的定向生长与结构

精准调控。

在一维碳材料制备方面，将实现碳纳米管的管径、长度、**chirality**（手性）及阵列密度的精准控制，突破现有生长技术的随机性局限。例如，通过设计精准的催化剂纳米颗粒尺寸与分布，可实现特定管径碳纳米管的选择性生长；发展定向生长技术，可制备高密度、高取向的碳纳米管阵列，为高性能电子器件与储能器件的制备提供支撑。在零维碳材料制备方面，将实现碳量子点的尺寸均一性、荧光性能及表面功能的精准调控，提升其在光电器件、生物成像领域的应用性能。同时，器件加工工艺将朝着精细化升级，发展纳米压印、电子束光刻、聚焦离子束刻蚀等高精度加工技术，实现碳基器件的微型化与结构精准化。

（二）规模化量产工艺的集成化开发

规模化量产是碳基器件产业化的核心前提，未来将发展集成化、连续化的量产工艺，突破现有实验室小规模制备的局限，实现碳基材料与器件的低成本、大批量生产。在二维碳材料量产方面，将推动 CVD 技术的产业化升级，开发卷对卷（Roll-to-Roll）连续生长工艺，实现石墨烯薄膜在柔性衬底上的大面积、连续化制备，大幅提升生产效率与降低成本。例如，卷对卷 CVD 工艺可实现石墨烯薄膜的批量生产，为柔性电子器件、透明导电膜的产业化提供材料支撑。

在碳纳米管量产方面，将发展流化床 CVD、电弧放电规模化制备技术，实现碳纳米管的吨级量产，同时提升产品的纯度与性能一致性。在器件集成工艺方面，将推动碳基器件与传统半导体工艺的兼容集成，开发 CMOS 兼容的碳基器件制备工艺，实现碳基器件与硅基器件的混合集成，利用现有半导体产业的成熟生产线实现碳基器件的规模化量产。例如，石墨烯场效应晶体管与硅基集成电路的兼容集成，可充分发挥石墨烯的高频特性与硅基电路的成熟工艺优势，推动高性能电子器件的产业化。同时，模块化集成工艺将得到广泛应用，通过将碳基传感单元、信号处理单元、能源供给单元等集成于同一芯片，实现器件的功能集成与规模化生产。

（三）绿色低能耗工艺的创新发展

在全球“双碳”目标引领下，绿色低能耗工艺将成为碳基器件制备的重要发展方向，未来将开发低能耗、低污染、可持续的制备工艺，减少对环境的影响。在材料制备方面，将大力发展水热合成、溶剂热合成、生物质转化等绿色制备技术，替代传统高能耗、高污染的制备工艺。例如，通过水热法制备碳量子点，无

需高温高压条件，反应条件温和且环境友好；通过生物质资源化利用制备多孔碳材料，实现“变废为宝”，降低碳材料的制备成本与环境足迹。

在器件加工方面，将发展无光刻胶、无蚀刻的绿色加工技术，减少化学试剂的使用与废液的排放。例如，发展纳米压印光刻技术替代传统的光刻 - 蚀刻工艺，可大幅降低加工过程中的能耗与污染；开发干法刻蚀技术，减少湿法刻蚀过程中产生的化学废液。同时，节能型制备设备的研发与应用将得到加强，通过优化设备结构与工艺参数，降低制备过程中的能耗。绿色回收工艺也将受到重视，开发碳基器件的高效回收技术，实现材料的循环利用，推动碳基器件产业的可持续发展。

三、功能集成升级：多效融合与智能协同

随着应用场景的日益复杂，对碳基器件的功能需求已从单一功能向多功能集成、智能协同方向转变。未来，碳基材料器件将朝着多功能融合、智能响应、人机交互的方向升级，通过功能集成与智能协同，拓展应用场景，提升器件的综合性能与用户体验。以下从多功能集成器件开发、智能响应器件创新及人机交互器件拓展三个方面展开阐述。

（一）多功能集成器件的一体化开发

多功能集成是碳基器件提升综合性能与拓展应用场景的核心方向，未来将实现传感、储能、驱动、通信等多种功能的一体化集成，开发“一站式”解决方案的集成器件。在能源 - 传感集成领域，将实现碳基储能器件与传感器件的一体化设计，例如将多孔碳超级电容器与石墨烯传感器集成于同一柔性衬底，实现器件的自我供能与实时监测功能，适用于可穿戴设备、物联网节点等场景。在光电 - 储能集成领域，将开发碳基光伏器件与储能器件的集成系统，例如石墨烯光伏电池与碳基超级电容器的集成，实现太阳能的高效转换与存储，提升能源利用效率。

在多传感集成领域，将发展碳基多参数传感阵列，实现对物理量、化学量、生物量的同步检测与集成分析。例如，集成温度、湿度、气体、生物标志物检测功能的碳基智能传感芯片，可广泛应用于环境监测、生物医疗等领域。未来的关键突破点在于解决集成过程中的功能干扰与界面兼容问题，通过结构设计 with 材料优化，实现各功能单元的高效协同工作，同时保持器件的微型化与轻量化。

（二）智能响应器件的精准化创新

智能响应器件能够根据外界环境变化自主调整性能与功能，是未来智能设备

的核心组成部分，碳基材料的高灵敏度与可调控性为智能响应器件的开发提供了优质平台。未来，碳基智能响应器件将朝着精准响应、动态可调、自主决策的方向发展，通过材料的智能设计与器件的结构创新，实现对目标信号的精准识别与快速响应。在 stimuli-responsive（刺激响应）器件领域，将开发温度、湿度、光、电、磁等多刺激响应的碳基器件，例如光响应石墨烯场效应晶体管、湿度响应碳纳米管传感器、温度响应碳量子点发光器件等，适用于智能调控、自适应光学等场景。

在自修复器件领域，将利用碳基材料的动态共价键、氢键等相互作用，开发具有自修复功能的碳基器件，提升器件的使用寿命与可靠性。例如，基于动态共价聚合物-碳纳米管复合材料的自修复柔性电子器件，在受到机械损伤后可自主修复导电性能与机械性能。在自主决策器件领域，将实现碳基器件与人工智能算法的深度融合，开发具备信号采集、分析、决策与反馈功能的智能器件。例如，集成机器学习算法的碳基生物传感芯片，可实现对生物标志物的精准检测与疾病的辅助诊断，同时自主调整检测参数以优化检测性能。

（三）人机交互器件的柔性化拓展

人机交互器件是实现人与智能设备高效沟通的桥梁，未来将朝着柔性化、轻量化、低功耗的方向发展，碳基材料的良好柔性及可拉伸性为柔性人机交互器件的开发提供了独特优势。在柔性显示器件领域，将开发基于碳量子点、石墨烯的柔性发光器件，实现柔性、透明、可折叠的显示效果，适用于柔性手机、可穿戴显示器等场景。例如，碳量子点柔性 OLED 器件具有高亮度、高色域、低功耗的优势，有望成为下一代柔性显示技术的核心。

在柔性触控器件领域，将发展基于石墨烯、碳纳米管的柔性触控传感器，实现对压力、应变、滑动等手势信号的精准检测，提升人机交互的灵敏度与舒适度。例如，石墨烯柔性触控屏具有高透光率、高导电率与良好的机械柔韧性，可应用于柔性电子设备的触控界面。在可穿戴人机交互器件领域，将开发集成传感、显示、通信功能的碳基可穿戴设备，实现人体生理信号的实时监测与智能交互。例如，基于碳纳米管纤维的智能衣物，可监测人体心率、呼吸等生理参数，同时通过无线通信与终端设备交互，实现健康管理与智能控制。未来的关键突破点在于提升柔性器件的稳定性与耐用性，解决柔性衬底与功能材料的界面结合问题，推动人机交互器件的产业化应用。

参考文献

- [1] 成会明. 新型碳材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [2] 康飞宇, 傅正文, 沈万慈. 碳材料科学与工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- [3] 刘忠范, 彭海琳. 石墨烯材料的制备与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [4] 王连洲, 朱宏伟, 谢丹. 碳纳米管材料与器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [5] 李玉良, 王雪松. 碳量子点的合成、性能及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [6] 杨全红, 李轩科, 刘洪波. 多孔碳材料: 制备、性能与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [7] 陈光华, 刘金龙, 张兵临. 金刚石薄膜制备与器件应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [8] 黄玉东, 张志谦. 碳基复合材料及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2020.
- [9] 刘敏, 王颖, 李喜德. 碳基光电器件原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2023.
- [10] 王树涛, 张莹莹. 碳基传感器技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [11] 朱俊武, 杨绪勇, 张莉莉. 石墨烯制备工艺与电子器件研究进展[J]. 无机材料学报, 2019, 34(5): 481-492.
- [12] 陈永胜, 鲍哲南. 碳纳米管可控生长与电子器件应用[J]. 物理化学学报, 2018, 34(10): 1081-1090.
- [13] 夏幼南, 李述汤. 碳量子点合成与光学性能调控[J]. 化学进展, 2020, 32(7): 987-998.
- [14] 张跃钢, 郭向欣. 多孔碳制备技术及其在超级电容器中的应用[J]. 电源技术, 2019, 43(6): 921-924.
- [15] 王波, 赵修建. 金刚石薄膜制备与热管理器件应用[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(3): 421-429.
- [16] 刘天西, 周永丰. 碳基复合材料界面设计与柔性电子器件[J]. 复合材料学报, 2021, 44(1): 1-10.

- 2020, 37(2): 257-266.
- [17] 马仁志, 吴宏滨. 碳基光电探测器件研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1523001.
- [18] 赵振宇, 陈丽娟. 碳基化学传感器的设计与应用[J]. 分析化学, 2021, 49(8): 1201-1210.
- [19] 周宏伟, 李峻柏. 碳基生物传感器在医疗检测中的应用[J]. 生物工程学报, 2020, 36(9): 1789-1802.
- [20] 谢和平, 周涛. 碳基器件在能源环境领域的应用展望[J]. 中国科学: 材料科学, 2022, 52(5): 901-918.
- [21] 俞书宏, 梁海伟. 碳纳米管生物传感器制备与性能优化[J]. 纳米技术与精密工程, 2019, 17(4): 297-305.
- [22] 徐春叶, 王如志. 碳量子点生物成像技术研究进展[J]. 影像科学与光化学, 2021, 39(2): 234-242.
- [23] 崔光磊, 李泓. 碳基材料在锂离子电池中的应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 789-798.
- [24] 王新东, 张立同. 金刚石生物医学器件研究进展[J]. 中国医疗器械杂志, 2022, 46(2): 189-194.
- [25] 黄维, 范曲立. 碳基柔性电子器件制备与应用[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(7): 1021-1038.
- [26] 戴宏杰, 刘忠范. 碳基材料在电子信息领域的应用[J]. 电子学报, 2020, 48(11): 2101-2108.
- [27] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [28] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991, 354(6348): 56-58.