

# 内嵌碳纳米管的物性调控及其电子器件应用研究进展

孟婷婷<sup>1,†</sup>, 梁浩焱<sup>1,3†</sup>, 康黎星<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 苏州 215123

2. 中国科学技术大学纳米科学技术学院, 合肥 230026

3. 上海科技大学物理科学与技术学院, 上海 201210

† 同等贡献

\* 联系人, E-mail: [lxkang2013@sinano.ac.cn](mailto:lxkang2013@sinano.ac.cn)

2026-04-29 收稿, 2026-06-16 修回, 2026-06-18 接受, 2026-06-18 网络版发表

国家自然科学基金(52372055, 52402068, T2596012)、江苏省重点研发计划(BK20232009)、江苏省基础研究计划(BK20243006)、江苏省青年基金(BK20240478)和苏州市基础研究计划(SJC2023004)资助

**摘要** 碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)因其独特的一维结构、优异的机械强度及高迁移率, 是纳米电子器件中极具潜力的材料之一. 通过将有机、无机的各类功能分子封装于碳纳米管内部, 可精确调控碳纳米管的载流子浓度、能带结构和掺杂类型, 同时赋予材料新的光电、热电及自旋电子等特性. 基于上述策略, 借助对碳纳米管物理与化学性质的精确调控, 可构建功能丰富的纳米电子器件, 拓展碳纳米管在电子、光电、传感等方向的应用潜力. 本文概述了内嵌调控对碳纳米管掺杂浓度、光学、热电及磁学等性质的影响, 并进一步讨论了基于这些调控特性的电子器件应用, 包括场效应晶体管、传感、光电探测等领域. 同时, 本文也展望了将内嵌碳纳米管与人工智能结合, 通过智能设计和优化器件结构, 实现高性能、可扩展的纳米电子器件.

**关键词** 碳纳米管, 限域合成, 一维异质结, 电子器件, 场效应晶体管

随着信息时代的快速发展, 电子器件在通信<sup>[1-3]</sup>、计算<sup>[4-6]</sup>、自动控制<sup>[7-9]</sup>、医疗检测<sup>[10-12]</sup>及物联网<sup>[13]</sup>等领域发挥着核心作用, 其性能直接决定了信号处理速度、功耗水平、传感精度以及系统可靠性<sup>[14]</sup>. 伴随高性能计算<sup>[5]</sup>、人工智能训练<sup>[15]</sup>及大规模数据处理<sup>[16]</sup>需求的持续增长, 电子器件不仅需要尺寸微缩、工作频率和响应速度方面不断提升, 还必须同时具备高集成度、低功耗以及多功能协同能力, 以支撑复杂信息处理、智能分析和实时决策. 这种趋势对电子材料提出了高性能要求, 推动材料体系的探索成为实现下一代电子器件的关键动力.

传统硅基材料在晶体管尺寸持续微缩的过程中逐渐暴露出其本征性能的瓶颈<sup>[17-19]</sup>. 一方面, 随着沟道长度缩短, 载流子迁移率下降, 电子和空穴在极短距离内

的运动速度受到限制, 晶体管的开关速度和响应时间难以进一步提升. 另一方面, 器件在小尺寸下栅控能力受限, 短沟道效应和阈值电压漂移等问题加剧, 晶体管在低电压工作时难以实现稳定开关, 器件功耗增加. 此外, 器件在高密度集成条件下的热耗散效率不足, 局部热点容易引发性能退化和可靠性下降, 限制了芯片整体功率密度和工作频率的提升. 这些问题在高性能计算、人工智能训练以及大规模数据处理等对速度和稳定性要求极高的应用场景中尤为突出, 也迫使研究者寻求新型材料以突破硅基器件的性能瓶颈, 从而构建更高速度及更低功耗的下一代电子器件.

在这种背景下, 碳纳米管作为新型一维纳米材料, 在下一代电子器件中具有独特的优势<sup>[20-25]</sup>. 其一维管状结构使其具有极高的载流子迁移率和优异的栅控能

**引用格式:** 孟婷婷, 梁浩焱, 康黎星. 内嵌碳纳米管的物性调控及其电子器件应用研究进展. 科学通报, 2026, 71: 6527-6543

Meng T, Liang H, Kang L. Research progress on physical property modulation and electronic device applications of encapsulated carbon nanotubes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 6527-6543, doi: [10.1360/CSB-2026-0605](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0605)

力,可在纳米尺度下实现高速响应和稳定开关行为,因此非常适合作为高密度集成场效应晶体管的沟道材料。同时,碳纳米管的中空管状结构为功能分子的内嵌提供了天然空间。通过将有机或无机外源分子封装在管腔内,不仅可以实现载流子浓度和能带结构的精确调控,还能赋予光电、热电或磁性等多种功能特性,从而满足不同功能电子器件对材料多模态性能的综合需求。基于碳纳米管独特的结构优势和功能化潜力,内嵌碳纳米管的研究近年来成为纳米电子材料领域的热点,为高性能、多功能以及可调控的下一代电子器件设计提供了新的研究方向。Lin等人<sup>[21]</sup>制备的单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotubes, SWCNTs)场效应晶体管阵列的栅长为250 nm。这些晶体管的转移特性已经可以与90 nm工艺节点的硅基器件相当,表明碳纳米管器件在不同尺寸缩放条件下能够保持出色性能。

此外,随着生物传感器<sup>[26,27]</sup>、电子自旋器件<sup>[28,29]</sup>以及神经形态器件<sup>[30,31]</sup>等新型电子器件的快速发展,不同类型器件对材料提出了各异的独特要求。例如,生物传感器要求材料表面可功能化以实现特异性分子识别,自旋电子器件依赖材料的高自旋极化和稳定的自旋输运,而神经形态器件则强调多模态信号响应和功能协同能力。单一的材料由于其固有的电子结构和物理特性,难以满足这些差异化需求,限制了器件在多功能和高性能条件下的进一步发展。

碳纳米管的中空管状结构为材料功能化提供了天然的多功能集成平台。通过将不同类型的有机或无机分子封装入管腔内,可以在保持碳纳米管优异电子性能的同时,实现载流子浓度、能带结构以及光、电、热、磁等多种物理特性的精确调控<sup>[32~37]</sup>。这种灵活的功能嵌入能力使碳纳米管能够适应各类新型电子器件对材料性能的差异化需求,从而为生物传感、自旋电子以及神经形态器件等高性能、多功能器件的设计提供了理想的平台,有效弥补了单一材料在多功能协同方面的局限性。

1998年,Smith等人<sup>[38]</sup>通过电子显微镜报道了C<sub>60</sub>封装于单壁碳纳米管内的微观结构,验证了碳纳米管可作为分子级容器稳定存在。2003年,Takenobu等人<sup>[39]</sup>将不同电子亲和力和电离能的有机分子封装在碳纳米管内,实现了不同程度的p型和n型掺杂。该方法为碳纳米管的大规模、稳定且可控的掺杂提供了可行路线,是内嵌碳纳米管电子性质调控的早期重要实验突破。同年,Philip等人<sup>[40]</sup>在碳纳米管内部构建了CoI<sub>2</sub>的

螺旋原子链结构,指出封装的金属卤化物原子链表现出低维磁性,与碳纳米管壁存在相互作用,使得链的自旋排列和磁学行为可以被调控,为后续内嵌碳纳米管自旋电子器件研究提供了基础。2010年,Tapia等人<sup>[41]</sup>将线性碳链封装于碳纳米管内部,显著增强了其光学特性,为后续内嵌碳纳米管的光电探测研究奠定了基础。本文将着重介绍内嵌碳纳米管的物理性能及电子器件应用:首先,介绍内嵌后的电学、光学、磁学及热力学特性;其次,介绍基于不同特性的内嵌碳纳米管的电子器件应用(图1);最后,提出一些对内嵌碳纳米管电子器件领域发展方向的展望。

## 1 内嵌碳纳米管的物理特性

碳纳米管本身具有优异的载流子迁移率、极高的稳定性,通过在其管腔内填充不同的有机或无机的功能材料,可以实现对其电子结构、光吸收、磁性等物性的调控。本节主要介绍碳纳米管内嵌填充后的各种物性变化,如掺杂浓度变化、光致发射特性变化、自旋输运特性变化等。

### 1.1 掺杂调控

内嵌碳纳米管中,电荷转移是客体材料与碳纳米管之间最普遍的相互作用机制。由于碳纳米管本身与填充的客体材料之间的电子亲和能和电负性有差异,往往会发生一定程度的电荷转移。碳纳米管与客体材料间的电荷转移会改变碳纳米管的局部电子密度,从而使碳纳米管的费米能级发生偏移。因此,通过使用具有不同电子亲和能的填充客体材料,即可实现对碳纳米管的载流子浓度从p型到双极型到n型的调控。近20年来,人们通过量子理论模型以及各种光谱表征技术、扫描探针技术、电学表征技术,研究了不同的客体材料与碳纳米管之间的电子转移作用,并借此实现不同的掺杂类型。

p型掺杂是内嵌碳纳米管中最常见的掺杂类型,这是由于碳纳米管本身具有较高的电负性,大部分客体材料在进入碳纳米管管腔后会从碳纳米管中抽取电子,从而使其表现出p型导电特性。对于碳纳米管的电荷转移效应,一般使用吸收光谱、拉曼光谱、开尔文探针显微镜等技术进行研究。Kharlamova等人<sup>[45]</sup>通过将三种铽卤化物(TbCl<sub>3</sub>、TbBr<sub>3</sub>、TbI<sub>3</sub>)封装在碳纳米管管腔内,结合高分辨透射电子显微镜与多波长拉曼光谱分析,系统研究了掺杂引起的电子结构变化。径向呼吸峰

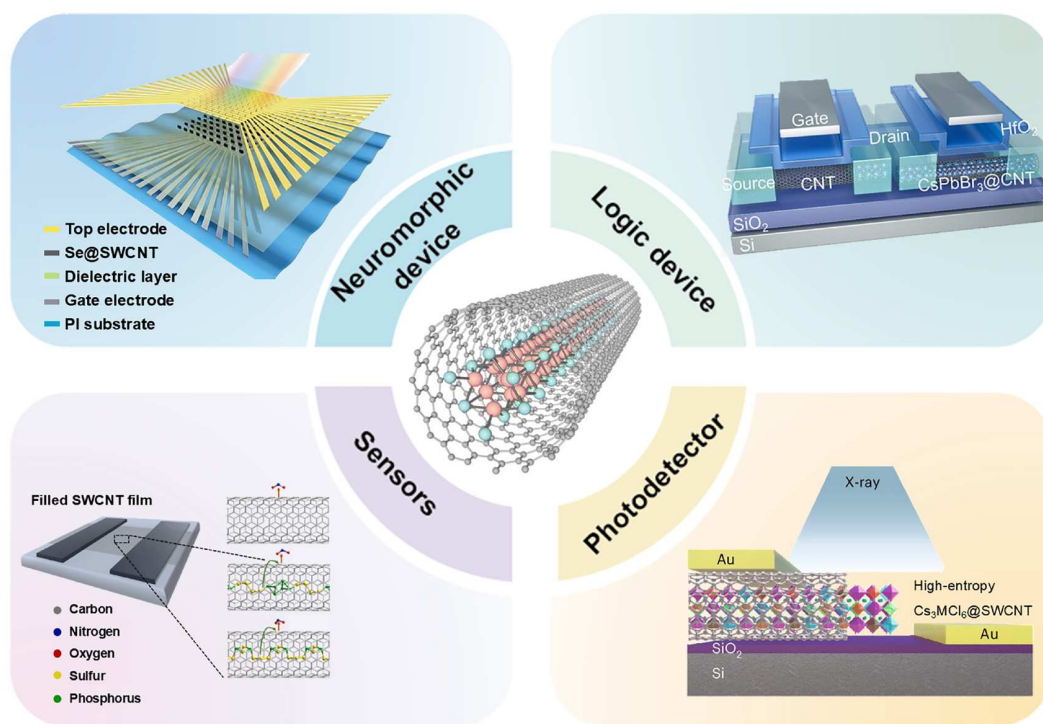


图1 基于内嵌碳纳米管的电子器件应用概述<sup>[36,42-44]</sup>

Figure 1 Overview of electronic device applications based on encapsulated carbon nanotubes<sup>[36,42-44]</sup>

(RBM峰)和G峰的位移,表明铋卤化物对SWCNTs具有p型掺杂效应。如图2(a~c)所示, Liu等人<sup>[46]</sup>将碘化银(AgI)封装入高纯半导体单壁碳纳米管内,并利用开尔文力探针显微镜测得表面电势的下降,证明了碳纳米管向AgI转移大量电子,导致载流子浓度显著增加,从而使碳纳米管呈现p型重掺杂。类似的被证实为p型掺杂的客体材料还有TCNQ<sup>[39]</sup>、F<sub>4</sub>TCNQ<sup>[39]</sup>等有机分子, C<sub>60</sub><sup>[47,48]</sup>、C<sub>70</sub><sup>[48]</sup>、C<sub>78</sub><sup>[49]</sup>、C<sub>82</sub><sup>[50]</sup>、Gd@C<sub>82</sub><sup>[51]</sup>、La@C<sub>82</sub>、K@C<sub>60</sub>、Y@C<sub>60</sub>、Ca@C<sub>60</sub><sup>[50,52]</sup>等富勒烯及富勒烯衍生物, S、Se、Te<sup>[53]</sup>等非金属单质, AgCl<sup>[54]</sup>、AgBr<sup>[33]</sup>、AgI<sup>[46]</sup>、FeI<sub>2</sub><sup>[55]</sup>、FeCl<sub>3</sub><sup>[56]</sup>、CoBr<sub>2</sub><sup>[57]</sup>、NiBr<sub>2</sub><sup>[58]</sup>、MnBr<sub>2</sub><sup>[59]</sup>、ZnCl<sub>2</sub><sup>[60]</sup>、LaCl<sub>3</sub>、LaI<sub>3</sub><sup>[61]</sup>、CuCl、CuBr、CuI<sup>[62]</sup>、CdBr<sub>2</sub>、TbX<sub>3</sub><sup>[63]</sup>、CdI<sub>2</sub>、CdCl<sub>2</sub><sup>[64]</sup>、KI<sup>[65]</sup>等金属卤化物, CrO<sub>3</sub><sup>[66]</sup>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>[67]</sup>、Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[68]</sup>等金属氧化物, 以及GaSe<sup>[69]</sup>、GaTe<sup>[70]</sup>、HgTe<sup>[71]</sup>、SnSe<sup>[72]</sup>、GeTe<sup>[73]</sup>等金属硫族化合物。

相应地, 通过在碳纳米管内部引入电子亲和能低的电子供体材料可实现n型掺杂。然而, 电子亲和能低的电子材料大多较活泼, 自身不稳定或容易与环境反应, 实验中难以实现和保持, 因此n型掺杂的相关研究较少。Meunier等人<sup>[74]</sup>将Mo纳米线封装在单壁碳纳米

管内, 并通过DFT模拟研究了其能带结构及电子态密度, 结果发现Mo与碳纳米管的能带混杂导致载流子浓度增加, 实现n型掺杂。Milligan等人<sup>[75]</sup>将[Sb<sub>4</sub>Te<sub>6</sub>]<sub>n</sub>封装于SWCNTs内, 通过密度泛函理论计算(费米能级上移靠近导带底)及差分电荷密度分析(电子从SWCNTs转移至链的边缘Te原子上)共同确认了n型掺杂特性, 如图2(d~f)所示。目前被证明为n型掺杂的客体材料还有TDAE<sup>[39]</sup>、TTF<sup>[76]</sup>等有机分子, FeCp<sub>2</sub>、CoCp<sub>2</sub>、CeCp<sub>3</sub>、NiCp<sub>2</sub><sup>[77]</sup>等有机金属配体, 以及Ag、Cu、Eu、Ti、Li、Zn、K、Co、Fe、Mo、Gd、Ni<sup>[74,78,79]</sup>等金属单质。

此外, 还有一些电子亲和能、电负性与碳纳米管接近, 掺杂效应较弱的材料, 虽然能够与碳纳米管发生一定的电荷转移, 但是所引入的载流子浓度有限。Saito等人<sup>[80]</sup>将β-胡萝卜素稳定封装在碳纳米管内, 封装后样品的拉曼光谱的G峰几乎没有位移以及其吸收光谱的微弱红移证明了封装在碳纳米管内的β-胡萝卜素较弱的掺杂作用。另外, 类似的填充在碳纳米管内掺杂效应较弱的客体材料还有SnTe<sup>[81]</sup>、POMs<sup>[82]</sup>等。

总而言之, 不同的客体材料对碳纳米管有不同的调控作用, 通过选择合适的客体材料, 可实现载流子浓

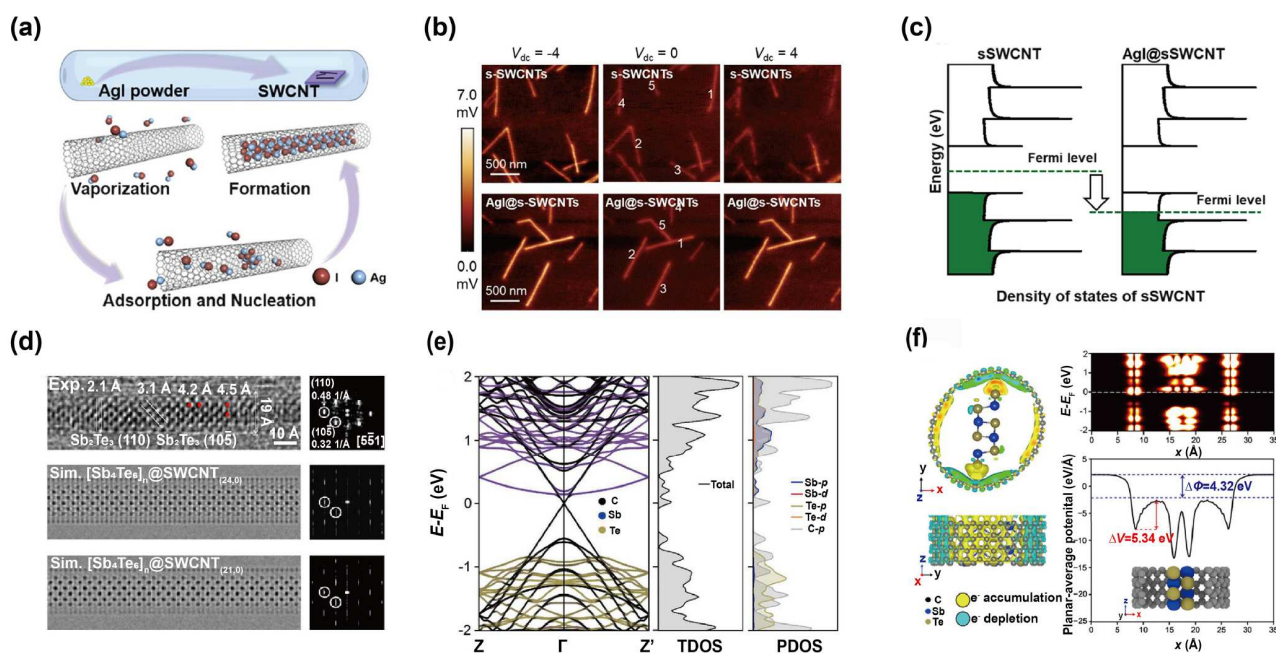


图2 不同掺杂类型的内嵌碳纳米管。(a~c) p型AgI@SWCNTs合成、表面形貌及费米能级示意图<sup>[46]</sup>。(d~f) n型[Sb<sub>4</sub>Te<sub>6</sub>]<sub>n</sub>内嵌SWCNTs的HRTEM表面形貌、态密度及静电势<sup>[75]</sup>

Figure 2 Encapsulated carbon nanotubes with different doping types. (a~c) Synthesis, surface morphology, and Fermi level schematic of p-type AgI@SWCNTs<sup>[46]</sup>; (d~f) HRTEM surface morphology, density of states (DOS), and electrostatic potential maps of n-type [Sb<sub>4</sub>Te<sub>6</sub>]<sub>n</sub>-encapsulated SWCNTs<sup>[75]</sup>

度的可控调节,从而构筑p-n结、优化晶体管性能,并为碳基集成电路的实现提供潜在技术路径。

## 1.2 光学调控

与体相材料以及二维材料相比,内嵌碳纳米管由于受到径向量子限制,激子的径向自由度被压缩,屏蔽效应减弱,束缚能增加,从而导致共振吸收和发射增强,光学非线性效应更加明显。此外,由于电子和激子沿管轴方向自由运动而径向受限,光学响应在管轴方向与径向呈现显著各向异性,即吸收和发射在不同极化方向上的强度差异明显,这使得内嵌碳纳米管表现出优异的光学各向异性。Spencer等人<sup>[83]</sup>将HgTe纳米线封装入单壁碳纳米管后,HgTe纳米线产生独特的低频振动模式,并在约1.76 eV激发光能量下显示强共振增强,同时Raman散射沿纳米线轴方向高度极化,体现出明显的各向异性。HgTe封装的碳纳米管表现出明显的激子束缚和电子-声子耦合,碳纳米管和HgTe的共振吸收和发射特性显著增强,并呈现与SWCNTs本体振动模式可区分的特征。Chernov等人<sup>[84]</sup>将石墨烯封装在碳纳米管内,封装引入的径向应变导致碳纳米管的 $E_{11}$ 吸

收峰变宽并发生红移,在光致发光光谱(photoluminescence spectroscopy, PL)中也出现了新的发射峰。此外,石墨烯纳米带内嵌碳纳米管在红外和可见光区均表现出显著的光致发光响应,表明石墨烯纳米带明显拓宽了碳纳米管的光学响应。内嵌碳纳米管通过径向约束和电子-声子耦合显著增强了碳纳米管的光学性能,为碳纳米管的高性能光电探测器、光电存储器应用奠定了基础。

## 1.3 磁学调控

由于内嵌碳纳米管具有纳米尺度的封闭空间,单分子磁体或过渡金属磁体被封装在碳纳米管内,能够防止外界对其的扰动,并增强其弛豫特性。与此同时,内嵌分子与碳纳米管的 $\pi$ -电子体系的弱电子耦合可调节分子的电子态和自旋交换作用,从而改变碳纳米管的局域电子结构,使宏观磁响应(如磁阻和磁化强度)表现出增强或可控特性。另外,由于碳纳米管的一维结构使分子沿管轴方向排列,自旋方向呈高度有序状态,进一步增强了各向异性交换耦合和对外加磁场的响应敏感性。如图3所示,Cleuziou等人<sup>[85]</sup>将钴纳米粒子封装于

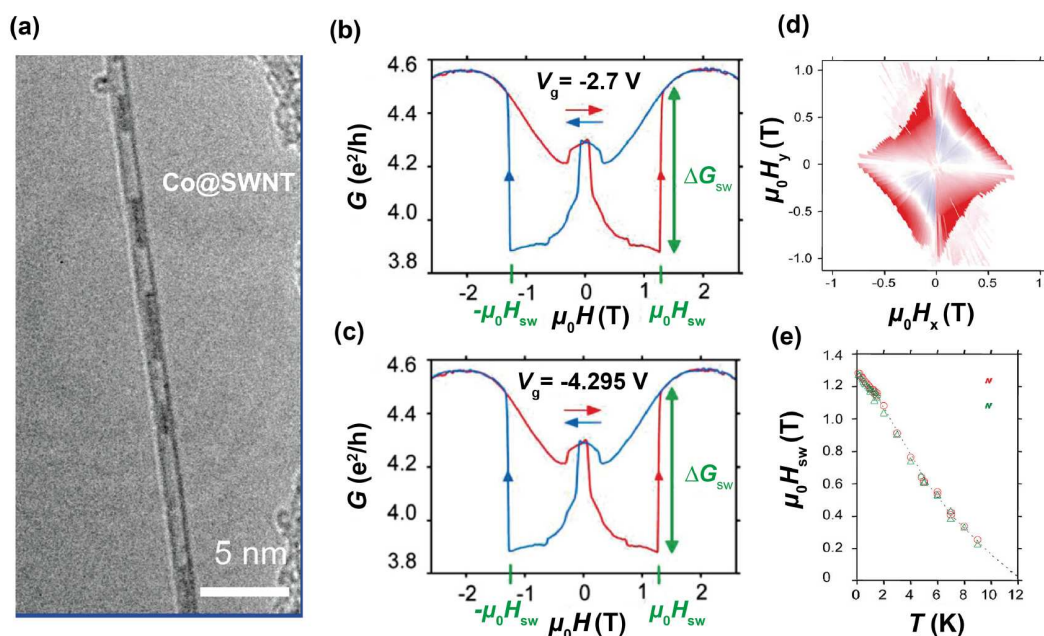


图3 内嵌碳纳米管磁性响应<sup>[85]</sup>。(a) Co被封装在碳纳米管内的HRTEM图像; (b, c) 不同栅压下的电导随外加磁场的变化; (d) 电导随平面内磁场变化; (e) 温度依赖性测试

Figure 3 Magnetic response of encapsulated carbon nanotubes<sup>[85]</sup>. (a) HRTEM image of Co encapsulated within SWCNTs; (b, c) variation of conductance with applied magnetic field under different gate voltages; (d) conductance as a function of in-plane magnetic field; (e) temperature dependence measurements

单壁碳纳米管内, 在低温条件下系统研究了其磁电输运特性。器件表现出显著的磁电导滞后行为, 该行为直接源于单个钴纳米粒子的磁化反转。封装结构使钴粒子呈现异常增强的表面磁各向异性, 易磁化轴垂直于碳纳米管轴向, 从而在较低磁场下即可实现磁状态的灵敏电学读取。这一混合体系不仅为构建高空间分辨的单纳米磁体探测器提供了可行途径, 也展示了碳纳米管应用于自旋极化晶体管和磁-库仑效应器件的潜力。在Maria等人<sup>[86]</sup>的报道中,  $\text{Mn}_{12}\text{Ac}@\text{MWCNT}$  (multi-walled carbon nanotube) 在不同磁场方向下表现出较大的正磁阻梯度, 而封装了  $\text{Ni}(\text{acac})_2$  的碳纳米管阵列总磁化强度下降, 这说明三自旋体系的超交换耦合可被精确调控。Domanov等人<sup>[87]</sup>将  $\text{Ni}(\text{acac})_2$  三聚体单分子磁体封装于单壁碳纳米管内, 由于碳纳米管的纳米尺度约束稳定了分子排列, 同时引起分子配位几何和交换路径的畸变, 导致最近邻自旋耦合由铁磁转为反铁磁。此外, 封装还降低了单原子有效磁矩, 并增强了Pauli顺磁性, 表明碳纳米管内嵌磁性分子可调控碳管分子自旋的分布和局域电子结构。内嵌碳纳米管通过空间约束、电子耦合和限域排列实现了磁性增强与多方面可调控性, 为自旋电子器件、量子信息处理和高密度磁存

储器件提供了潜在应用途径。

#### 1.4 表界面调控

内嵌客体材料通过与碳纳米管的 $\pi$ 电子体系相互作用, 可调节表面电子分布和局域电场, 从而增强碳纳米管与外界分子或离子的耦合; 另一方面, 内嵌物引入径向约束和机械支撑, 有助于稳定碳纳米管的结构并提供更多活性位点。Jordan等人<sup>[88]</sup>将多钼酸盐等分子封装入单壁碳纳米管后, 拉曼峰位移证明了多钼酸盐封装改变了碳纳米管的共振条件和电子态密度, 调控了电子/离子耦合, 通过氧化还原电位调控使界面能够实现可控的电子转移和功能调节。上述研究表明界面调控不仅改善了电子/离子传输通道和界面稳定性, 还有助于增强碳纳米管对电化学信号、气体分子的响应能力。因此, 内嵌碳纳米管在构筑高性能电化学传感器、气体传感器及多功能化学/生物传感器方面具有显著优势。

#### 1.5 热电调控

对于内嵌碳纳米管, 封装的客体材料会与碳纳米管壁产生界面相互作用, 从而增加声子散射, 改变碳纳

米管的热导率. 此外, 不同的碳纳米管内嵌客体材料会影响声子平均自由程, 从而影响碳纳米管的热输运行为. 如图4(a~d)所示, Kodama等人<sup>[89]</sup>的报道指出, C<sub>60</sub>封装引入的径向约束增加了声子散射, 降低了碳纳米管的热导率, 从而提高了塞贝克系数并优化了热电功率因子. 另外, 热导率和比热随管径、封装密度和径向应变变化呈可调趋势, 表明封装的C<sub>60</sub>能够控制碳纳米管

的热电子输运通道. Wan等人<sup>[90]</sup>同样将C<sub>60</sub>封装进入碳纳米管内, 实验结果表明C<sub>60</sub>封装增加了低频声子散射, 导致窄管径碳纳米管的热导率下降. 对较粗管径的碳纳米管, 热导率则略微增强, 因此可以控制管径实现热导率及热电性能调节(图4(e~g)). 内嵌为碳纳米管提供了一种有效途径来调节热导率和热电性能, 为高效纳米热电器件的设计与优化提供了可行策略.

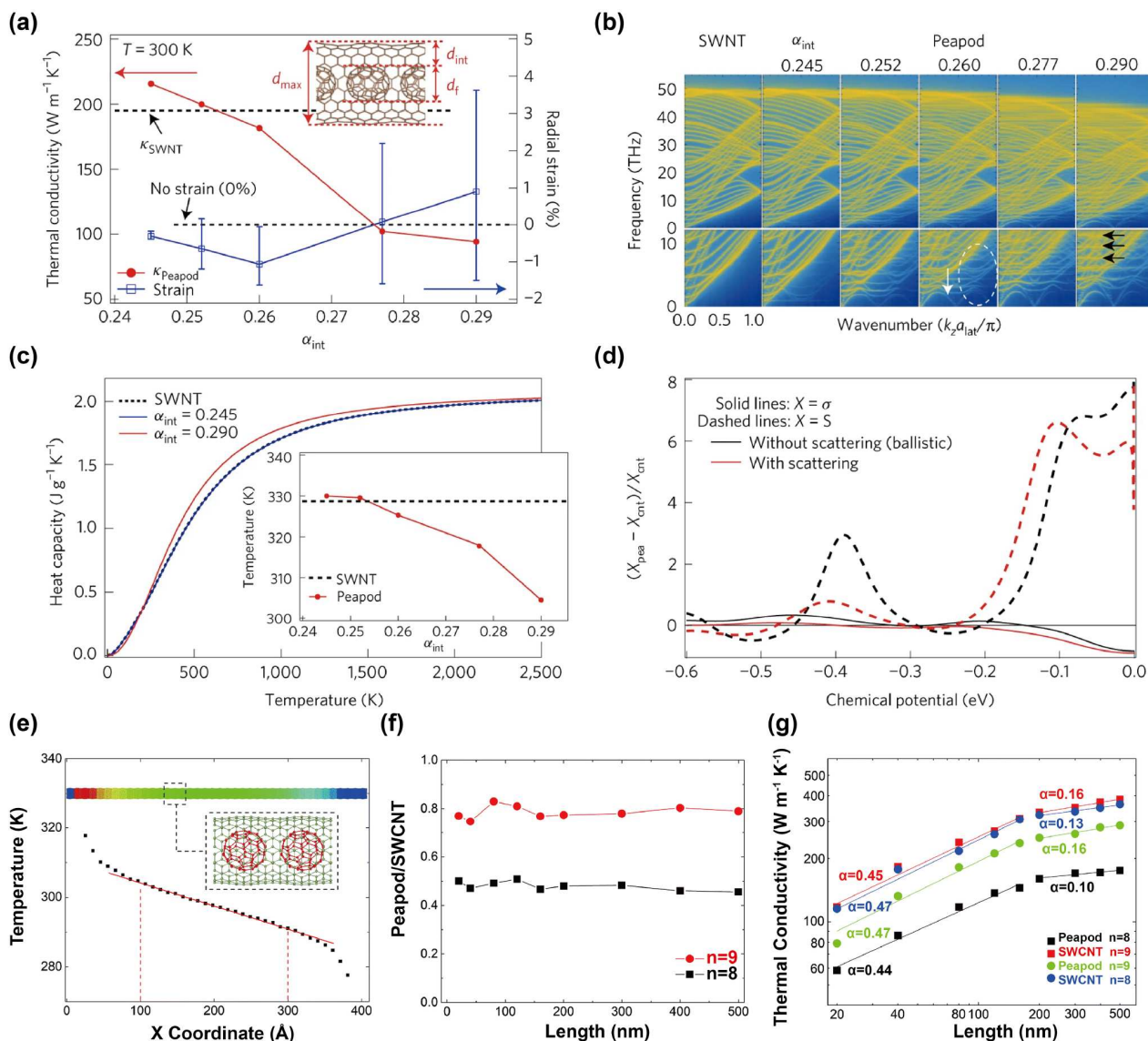


**图 4** 内嵌碳纳米管的热电性能. (a~c) C<sub>60</sub>封装的碳纳米管热导率、声子散射、比热随管径外径变化的模拟结果; (d) C<sub>60</sub>封装引起的电导和热电势相对变化比例随化学势变化结果<sup>[89]</sup>; (e) C<sub>60</sub>沿长度方向的温度分布; (f) C<sub>60</sub>封装对热导率的长度依赖曲线; (g) 热导率随碳纳米管长度变化曲线<sup>[90]</sup>

**Figure 4** Thermoelectric response of encapsulated SWCNTs. (a~c) Simulated thermal conductivity, phonon scattering, and specific heat of C<sub>60</sub>@SWCNTs as a function of outer diameter; (d) relative change in conductance and Seebeck coefficient induced by C<sub>60</sub> encapsulation versus chemical potential<sup>[89]</sup>; (e) temperature distribution along the length of C<sub>60</sub> guest; (f) length dependence of thermal conductivity influenced by C<sub>60</sub> encapsulation; (g) thermal conductivity as a function of SWCNTs length<sup>[90]</sup>

本节介绍了内嵌客体材料通过与碳纳米管的界面相互作用, 调节载流子浓度和激子束缚能, 增强电子-声子耦合, 改变磁各向异性和声子散射行为, 进而实现对碳纳米管电子结构、光学响应、磁性行为、界面特性及热电性能的调控。这种多样化且高度可控的调节能力, 为利用碳纳米管构筑高性能光电子、电化学、自旋电子及热电器件奠定了坚实基础, 也为下一步器件应用研究指明了方向。

## 2 内嵌碳纳米管的器件应用

基于各异的客体材料对碳纳米管的多方面调控, 内嵌碳纳米管已成为构筑高性能纳米器件的理想平台。通过精准调节载流子浓度、界面电子结构、光学响应、磁性行为及热电性能, 研究者可以实现内嵌碳纳米管在电学、光电子学、磁电子学及热电器件中的应用。本节将重点介绍内嵌碳纳米管在各类器件中的应用进展, 包括场效应晶体管、光电探测器、各类传感器及热电器件的设计与性能调控。

### 2.1 电子器件应用

在半导体型碳纳米管中内嵌客体材料, 可以实现掺杂类型的稳定控制和掺杂浓度的精确调节, 从而构筑高性能场效应晶体管。在此基础上, 通过在选区内嵌不同的客体材料, 还能够独立调节各区域的载流子类型与浓度, 进而实现pn结、互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)等复杂器件结构的设计。

对于提升晶体管性能而言, 一般通过内嵌掺杂增加载流子浓度, 优化接触来实现。如图5(a~c)所示, Yao等人<sup>[35]</sup>将碲纳米线封装入单壁碳纳米管实现p型掺杂, 提高了载流子浓度和电导率, 显著降低了沟道接触电阻, 使晶体管器件展现出极高的电流承载能力和优异的迁移率。如图5(e~g)所示, Guo等人<sup>[91]</sup>通过在选定区域将三碘化锑( $\text{SbI}_3$ )封装到高纯度半导体型单壁碳纳米管内, 实现局部重掺杂, 诱导半导体型向金属型的电性转变, 从而显著降低接触电阻并提升薄膜晶体管的载流子迁移率、开关比和亚阈值摆幅, 为高性能碳纳米管电子器件的构筑提供了一种简单有效的接触工程策略。

Teng等人<sup>[92]</sup>将金属乙酰丙酮配合物封装到单壁碳纳米管中, 构建了具有三个明确定义逻辑态(0、1、2)的三元晶体管。通过电场诱导的分子极化效应, 器件可

在宽温度范围内(77~446 K)稳定实现多阻态切换, 静态功耗低至8.2 pW。利用该特性进一步制备了三元反相器、MAX/MIN逻辑门以及三元权重网络, 有效降低了电路复杂度和存储需求, 展示了其在低功耗、高集成度神经形态计算领域的应用潜力。

进一步地, Zhu等人<sup>[93]</sup>将一维卤化物钙钛矿内嵌在碳纳米管中实现n型碳纳米管器件。如图6所示, 通过器件能带结构设计, 实现了低至35 mV/dec亚阈值摆幅, 高通态电流4.9  $\mu\text{A}$ /管的隧穿晶体管器件。

pn结是高性能电子设备和集成电路不可或缺的模块, 通过在不同的极性区域界面处形成具有内建电场的空间电荷区(耗尽层), 从而赋予器件独特的单向导电性与非线性整流特征。对于内嵌碳纳米管而言, 分段内嵌是构筑pn结的有效方式。Kato等人<sup>[94]</sup>通过在碳纳米管内封装电子供体材料Cs和电子受体材料 $\text{I}_2$ , 实现了局部p型掺杂和n型掺杂。在碳管轴方向上, 不同掺杂剂的分布产生耗尽层, 从而实现pn结构筑。后续进一步的电学测试验证了该方法构筑的pn结的稳定性与可控性。

CMOS技术是现代集成电路的核心基础, 其通过同时集成n型和p型的场效应晶体管, 利用栅极电压对异质衬底表面载流子强反型层的电学调制, 实现低功耗、高开关比和高速度的逻辑运算, 是推动微电子器件微缩和高性能计算发展的关键技术。目前碳纳米管CMOS相关的研究较少, 这是因为其难以实现电学性能高度对称的n型和p型晶体管。n型的碳纳米管晶体管需要依赖低功函数的活泼金属来实现能带调控, 这就导致器件具有极高的空气敏感性及热力学不稳定性。然而, 通过内嵌掺杂能够实现稳定可控的n/p型区域调控, 有利于实现高性能的CMOS器件构筑。Yin等人<sup>[42]</sup>通过钙钛矿内嵌实现了局部的n型场效应晶体管, 同时保留未填充区域的p型特性, 从而在同一碳纳米管阵列上构筑出互补的n/p型晶体管, 并以此制备对称电流电压特性的低功耗CMOS反相器。

### 2.2 光电子器件应用

碳纳米管由于其独特的一维量子限域效应, 展现出高度可调的光吸收特性。窄直径和量子约束使激子束缚能增强, 从而在特定波长下产生强烈共振吸收, 使其成为高效光吸收材料, 为碳纳米管光电子器件的构筑提供了基础。相比其他二维材料, 碳纳米管兼具优异的电子迁移率和机械柔性, 可构筑低功耗、高响应速度的光探测器、光突触器件, 是构筑高性能光电子器

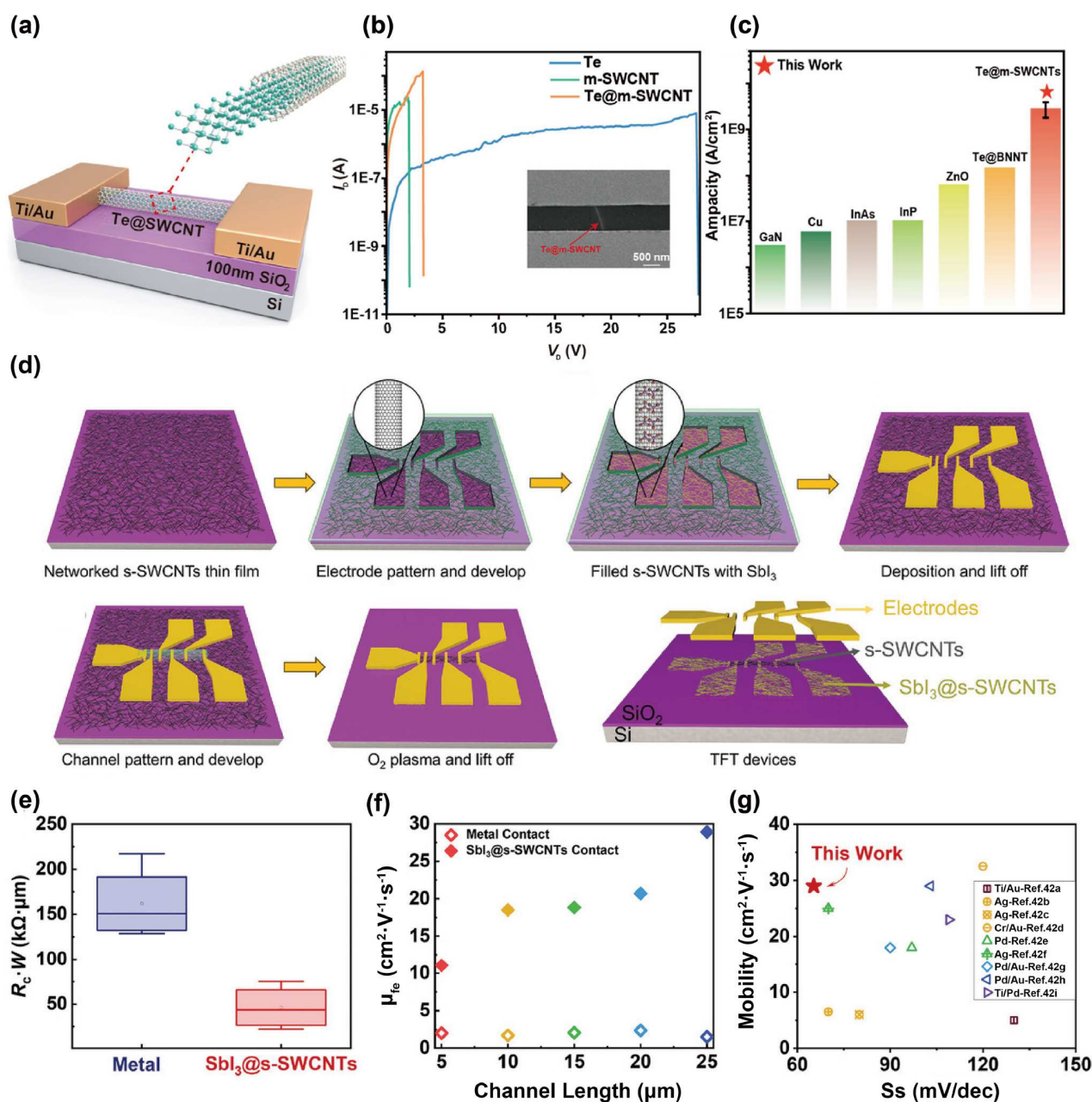


**图 5** 内嵌碳纳米管晶体管性能调节。(a) Te内嵌碳纳米管器件示意图; (b)  $I$ - $V$ 曲线; (c) 器件电流承载能力与其他材料对比<sup>[35]</sup>; (d) SbI<sub>3</sub>内嵌碳纳米管流程图; (e) 接触电阻对比; (f) 迁移率对比; (g) 迁移率及亚阈值摆幅与其他研究对比<sup>[91]</sup>

**Figure 5** Performance modulation of encapsulated carbon nanotube transistors. (a) Schematic diagram of Te@m-SWCNTs device; (b)  $I$ - $V$  curves; (c) comparison of device current-carrying capacity with other materials<sup>[35]</sup>; (d) flowchart of SbI<sub>3</sub>-encapsulated carbon nanotubes; (e) contact resistance comparison; (f) mobility comparison; (g) comparison of mobility and subthreshold swing with other studies<sup>[91]</sup>

件的理想平台<sup>[21]</sup>。

光电探测器通常通过构筑异质结实现高效光生载流子分离,通过合理设计能带结构,可以快速分离光生电子-空穴对,从而增强光电响应并提高器件开关比。内嵌掺杂提供了一种优异手段,可精确调控碳纳米管的

载流子浓度和能带结构,为光电器件中异质结的构筑和性能优化提供了有效途径。如图7(a~c)所示,内嵌钙钛矿碳纳米管与氮化镓衬底结合,可实现可编辑响应的光电器件。钙钛矿内嵌增强了器件的光生载流子分离效率,并使器件在不同的偏压下呈现正/负及零偏光

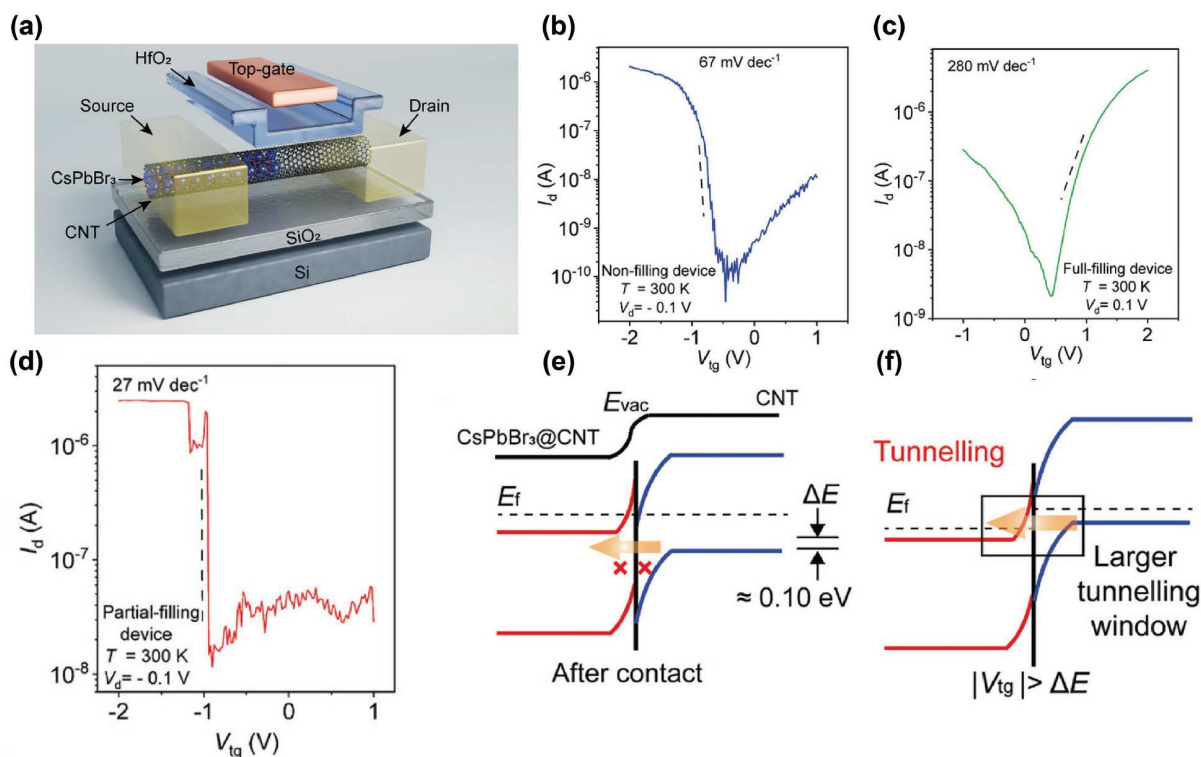


图6 内嵌碳纳米管隧穿场效应晶体管<sup>[93]</sup>。(a) 器件结构示意图；(b) SWCNTs单根器件的转移曲线；(c) 钙钛矿内嵌器件的转移曲线；(d) 隧穿晶体管的转移曲线；(e, f) 隧穿晶体管的能带结构设计

Figure 6 Encapsulated carbon nanotube tunnelling field-effect transistors<sup>[93]</sup>. (a) Schematic diagram of device structure; (b) transfer curves of individual SWCNT device; (c) transfer curves of individual perovskite encapsulated device; (d) transfer curves of the tunnelling transistor; (e, f) band structure alignments of the tunnelling transistors

响应<sup>[32]</sup>。CPB@s-SWCNTs/p-GaN器件在零偏压下的开关比高达190000(暗电流仅0.1 pA, 光电流19 nA), 远超未填充器件的10000; 在-200~350°C及20%~80%相对湿度范围内, 器件始终维持约 $1 \times 10^5$ 的开关比且无响应延迟, 表现出优异的稳定性与快速响应能力; 同时, 器件在300~500 nm波长范围内具有显著的光谱响应, 在不同偏压下光电流与暗电流相差可达两个数量级。上述结果证明, 钙钛矿内嵌不仅增强了载流子分离效率, 并在响应速度和环境稳定性等关键指标上全面提升了器件性能。如图7(d~i)所示, Teng等人<sup>[95]</sup>通过PdI<sub>2</sub>内嵌, 结合能带结构设计, 在氮化镓衬底上构筑了自供电光电探测器。除了常规光探测器, 内嵌碳纳米管异质结构还可用于构筑高性能激光探测器, 实现对单色光源的快速响应和高灵敏度检测。Mei等人<sup>[43]</sup>在碳纳米管中封装钙钛矿链(Cs<sub>4</sub>PbI<sub>5</sub><sup>+</sup>), 利用带负电的碳纳米管平衡钙钛矿链的正电荷, 从而有效抑制离子迁移, 实现高灵敏度( $1.22 \times 10^4$  C Gy<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>)、低暗电流密度(0.2 nA cm<sup>-2</sup>)

的X射线探测器, 其关态电流远低于常用于X射线探测的钙钛矿、砷化镓及氧化钾等材料。

光电突触器件是一类能够模拟生物神经突触功能的器件, 通过光信号调控电子输运, 实现短期和长期电流调制, 从而模拟突触可塑性。内嵌碳纳米管可进一步调控碳纳米管的能带结构和光生载流子行为, 实现低功耗、高响应速度和长寿命光电突触性能。Yao等人<sup>[36]</sup>提出了一种基于Se@SWCNTs—一维范德华异质结的突触晶体管, 通过化学气相传输技术将双链硒封装在单壁碳纳米管内, 规避了传统多层异质结构带来的复杂性与稳定性问题。该光电晶体管凭借其独特的I型能带排列及有效的栅极调制, 实现了高度线性( $R^2 > 0.99$ )且精确可控的正向与负向光电响应, 并在单一器件中同时实现了超过128个存储状态的线性持久光电导(persistent photoconductivity, PPC)与持久负光电导(negative photoconductivity, NPC)功能。通过调节光强与波长范围, 该器件能针对不同复杂程度的视觉任务

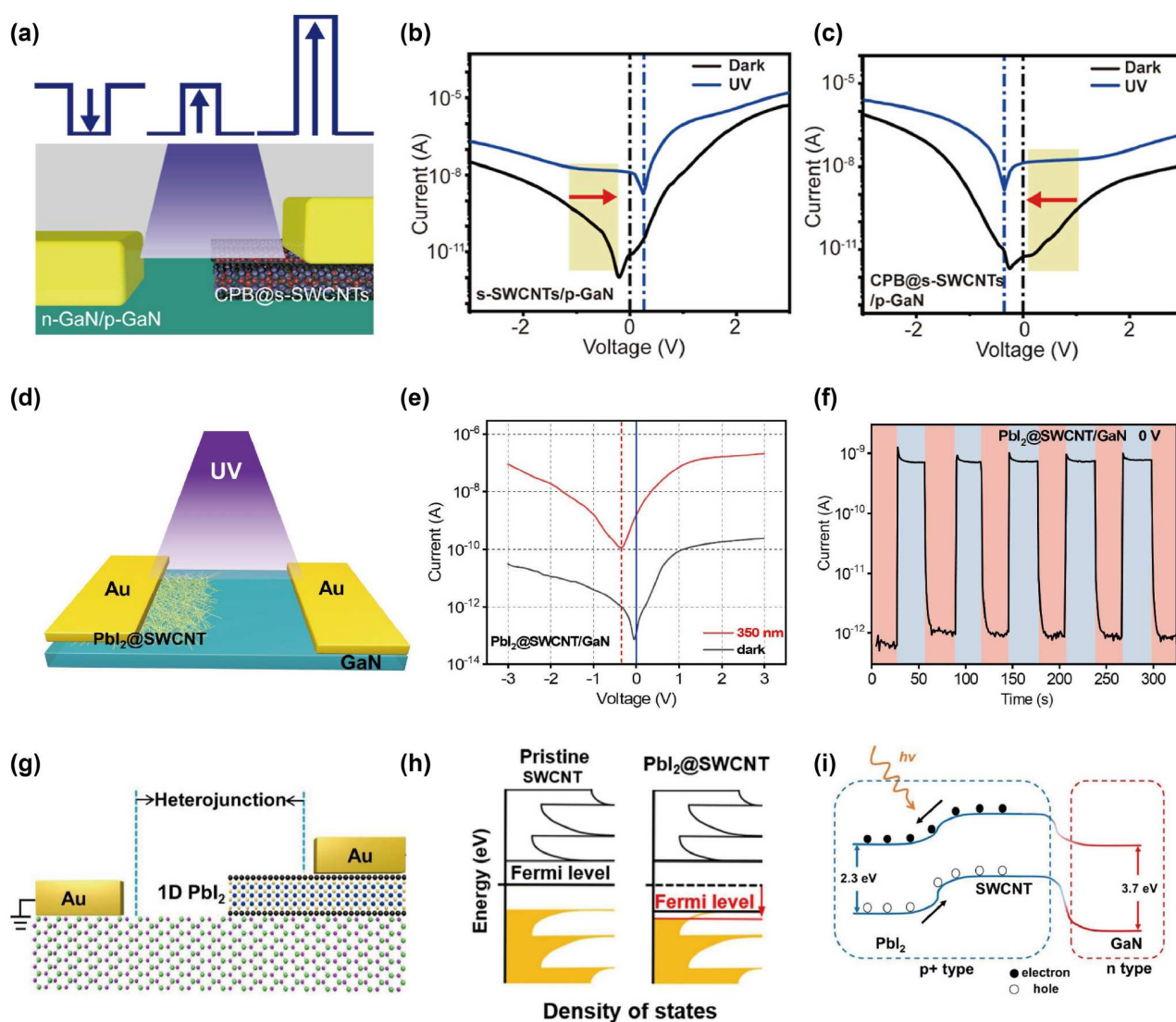


图7 内嵌碳纳米管光电探测器件。(a) 钙钛矿内嵌碳纳米管异质结光探测示意图；(b, c) 碳纳米管及内嵌碳纳米管异质结光照及黑暗中的转移曲线<sup>[32]</sup>；(d~f)  $PbI_2$ 内嵌碳纳米管异质结器件结构、转移曲线及光响应曲线；(g~i) 异质结截面结构及能带分析<sup>[95]</sup>

**Figure 7** Encapsulated carbon nanotube photodetectors. (a) Schematic diagram of perovskite encapsulated carbon nanotube heterojunction photodetection; (b, c) transfer curves of carbon nanotubes and encapsulated carbon nanotube heterojunctions under UV illumination and in darkness<sup>[32]</sup>; (d~f) device structure, transfer curves, and photoresponse curves of  $PbI_2$ -encapsulated carbon nanotube heterojunctions; (g~i) cross-sectional structure and band analysis of the heterojunction<sup>[95]</sup>

进行权重规则处理, 并能够通过光学混合编程实现类脑区域间的动态切换, 从而展现出卓越的感知准确度与动态切换模型, 为实现高效、高性能的类脑计算及生物视觉系统提供了创新路径。Hou等人<sup>[96]</sup>报道了一种基于内嵌碳纳米管的碳纳米管异质结构光电突触器件, 用于光神经形态系统。该器件利用碳纳米管与Te的能带匹配和界面结合增强了光生载流子的分离和传输, 在仅0.1 V的超低偏压下即可实现稳定的非易失性光存储。通过 $25 \times 25$ 阵列器件结合人工神经网络, 实现了图

像的预处理和识别, 包括背景去噪、前景增强及图像擦除, 使模型在仅10个训练周期后便达到了99.17%的识别精度, 显著提高了识别效率与精度。

## 2.3 自旋电子器件

自旋电子器件通过控制电子的自旋自由度实现信息的存储、传输和处理, 具有非易失性、低功耗和高处理速度等优势。碳纳米管因其极长的自旋扩散长度和可调的电子结构, 被认为是构建纳米尺度自旋输运

通道的理想材料。通过在碳纳米管管腔内封装单分子磁体(single-molecule magnets, SMMs)或磁性纳米粒子,可以实现自旋态的可控注入、检测和调控,为开发高密度磁存储、自旋场效应晶体管提供了新的平台。单分子磁体磁化的慢弛豫是自旋电子学应用中的一个关键参数。Nakanishi等人<sup>[97]</sup>将单分子磁体 $\text{DySc}_2\text{N}@\text{C}_{80}$ 封装到纯化后的单壁碳纳米管内部,形成了“豆荚”结构。磁学测量表明,封装后的 $\text{DySc}_2\text{N}@\text{C}_{80}$ 仍保持SMM特性,其矫顽力从0.5 kOe提高到4 kOe,零磁场下的磁化弛豫时间约94分钟,而游离的 $\text{DySc}_2\text{N}@\text{C}_{80}$ 的弛豫时间仅约40分钟,弛豫时间大大延长。这些性能提升主要归因于SWCNTs内的一维限域环境对磁性分子的稀释作用,有效抑制了量子隧穿磁化(quantum tunnelling of magnetization, QTM)。该工作为未来将SMMs与SWCNTs的优异电学性质结合、构建分子自旋电子器件提供了重要基础。然而,目前内嵌碳纳米管在自旋电子器件领域的研究仍处于非常初级的阶段,相关器件应用层面的报道较为有限。现有工作大多集中于材料的合成、结构表征及静态磁性质的测量<sup>[85~87]</sup>,而真正实现自旋注入、自旋极化输运、自旋操控及电学读取的完整自旋电子器件尚鲜见报道,未来仍需在碳纳米管自旋器件的制备上开展更为深入的探索。

## 2.4 传感器应用

碳纳米管相比其他低维材料,具有极高的比表面积、优异载流子迁移率以及高度敏感的表面电子结构,是各类气体和生物传感器的理想材料。对于气体传感器而言,通过内嵌功能性分子,可以在管腔内部或管壁引入可控的掺杂,调节界面电荷和表面活性位点,从而显著增强对气体分子、离子或生物分子的响应灵敏度。Chimowa等人<sup>[67]</sup>通过在双壁碳纳米管管腔内封装 $\text{ZnI}_2$ 及 $\text{ZnAc}_2$ ,提升了对甲醛气体传感的检测限度(1 ppm)和选择性。Sysoev等人<sup>[44]</sup>封装了磷、硫及其混合物,分析了不同封装材料对 $\text{NO}_2$ 传感性能的影响。如图8所示,封装的客体材料通过电荷转移,减少了碳纳米管的吸附位点数以降低吸附能,最终实现了2~7 ppb的极低检测限。Fedi等人<sup>[98]</sup>制备了基于镍封装碳纳米管的 $\text{NO}_2$ 传感器,封装Ni后的器件载流子浓度明显提升,对1~10 ppm  $\text{NO}_2$ 的响应幅度明显增强,相比初始SWCNTs器件响应增加1.5~2倍,同时检测下限达到1 ppb。

对于生物传感器而言,内嵌的客体材料不仅可以调控碳纳米管的局域载流子浓度,提高与目标生物分

子的电荷耦合,还可以在管壁形成可控的活性位点,增加分子捕获效率和特异性识别能力。Ni-Co合金封装于多壁碳纳米管内可用于非酶葡萄糖传感,具有较强的氧化还原活性及较高的峰电流<sup>[99]</sup>。另外, $\text{NiSe}_2$ 纳米簇封装于单壁碳纳米管能够实现多巴胺高效电催化检测,实现高达 $19.62 \mu\text{A} \mu\text{mol}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 的灵敏度和低至 $13 \text{nmol L}^{-1}$ 的检测限<sup>[100]</sup>。

内嵌碳纳米管在离子传感中同样具有显著优势。研究表明,Ag填充的多壁碳纳米管对氰离子( $\text{CN}^-$ )表现出近能斯特响应,灵敏度高达59.8 mV/decade,检测下限为 $13 \text{nmol L}^{-1}$ ,并在3个月内保持稳定,对于干扰离子选择性较高<sup>[101]</sup>。

另外,在磁探测领域,通过封装铁磁材料可以形成可控的纳米磁体,能够高灵敏度地探测磁场变化。Wolny等人<sup>[102]</sup>通过封装Fe,将碳纳米管的弹性与铁的强大铁磁效应结合,通过碳纳米管作为拓展磁单极子,实现了类似单极子磁探测。

## 2.5 热电子器件应用

碳纳米管因其独特的一维结构和优异的载流子输运性能,在热电材料设计中展现出显著优势。热电效应将温度梯度转化为电势差,其效率通常通过热电优值ZT描述,而ZT取决于塞贝克系数、电导率和热导率。研究表明,单壁碳纳米管在单晶或单根状态下已经表现出极高的热电功率,半导体型单壁碳纳米管(semi-conducting-SWCNTs, s-SWCNTs)的热功率可高达 $2000 \mu\text{W K}^{-1}$ ,相比金属型单壁碳纳米管(metallic-SWCNTs, m-SWCNTs)具有更高的热电性能<sup>[103]</sup>。此外,由于SWCNTs的热电性能高度依赖其电子结构和载流子浓度,通过内嵌功能分子掺杂可以进一步优化器件的热电性能。

在SWCNTs内部封装SnTe纳米线,可在保持低热导率的同时,显著提高电导率,使功率因子在1000 K时达到 $1.9 \text{W K}^{-2} \text{cm}^{-1}$ <sup>[104]</sup>。另外,研究发现硫链封装后的SWCNTs因为费米能级附近的量子干涉效应和声子散射,其热电性能提升107%,同时热导率降低90%<sup>[105]</sup>。Koley等人<sup>[106]</sup>发现碘内嵌碳纳米管后,其塞贝克系数和ZT值提升约240%。有机分子封装也会稳定内嵌碳纳米管结构,提高载流子传输效率并抑制热振动。在SWCNTs中内嵌富勒烯的相关研究表明,内嵌富勒烯分子显著地降低了器件的热导率,并提升了热电势,使器件的热电优值提升2~4倍<sup>[89,107]</sup>。

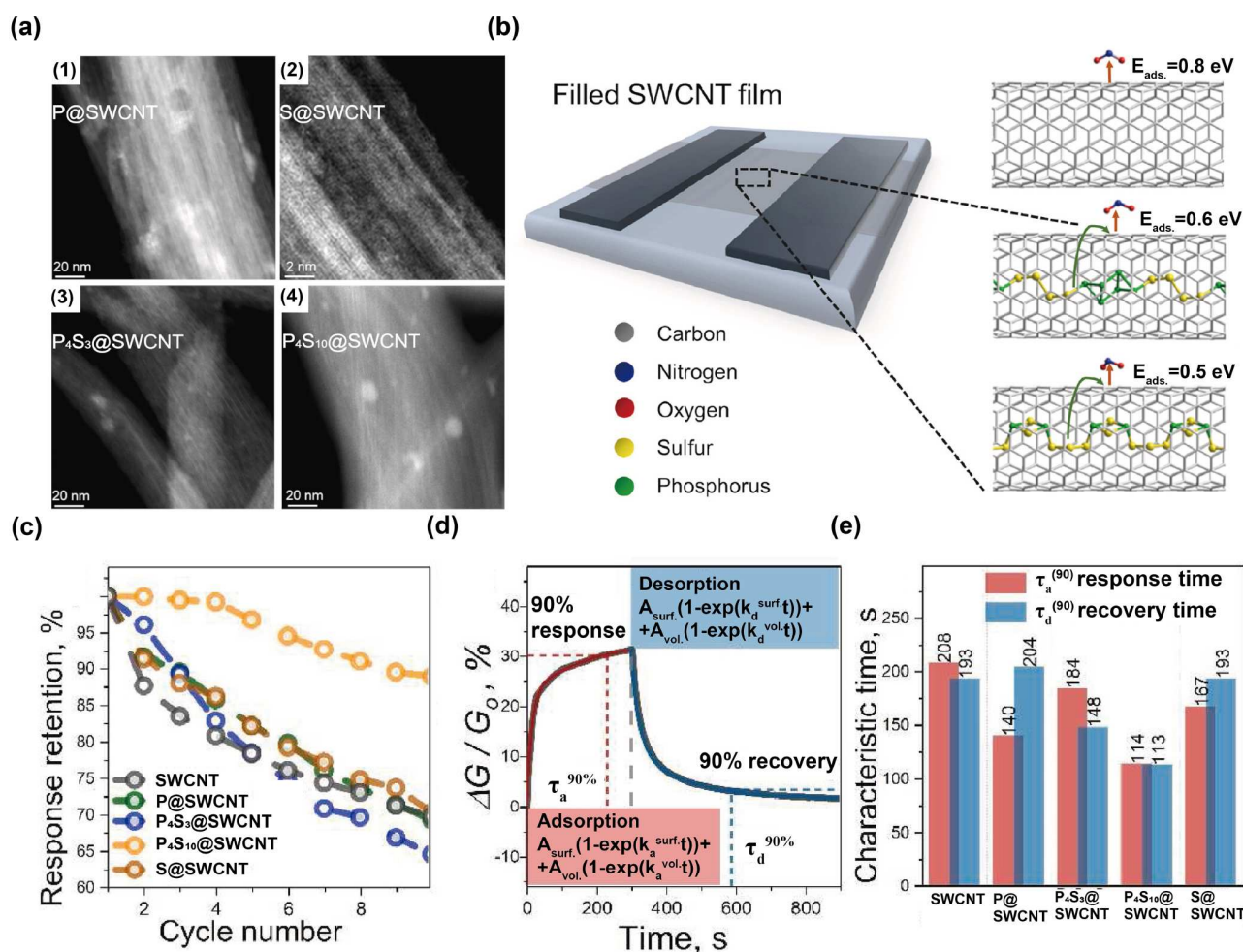


图8 内嵌碳纳米管气体传感器器件<sup>[44]</sup>. (a) 封装了不同材料的碳纳米管STEM图像; (b) 内嵌碳纳米管传感器示意图; (c) 封装了不同材料的传感器的响应度; (d) 气体的吸附脱附曲线; (e) 不同封装材料传感器的响应/恢复时间

Figure 8 Encapsulated carbon nanotube gas sensing devices<sup>[44]</sup>. (a) STEM images of carbon nanotubes encapsulated with different materials; (b) schematic diagram of the encapsulated carbon nanotube sensor; (c) responsivity of sensors encapsulated with different materials; (d) gas adsorption-desorption curves; (e) response/recovery time of sensors with different encapsulation materials

本节系统介绍了内嵌碳纳米管在电子器件中的应用。通过内嵌不同客体材料精准调控碳纳米管的电子结构, 可提升其在逻辑存储、光电探测、自旋电子、智能传感及热电转换等方面的器件性能。这种精准的调控能力, 充分展现了内嵌碳纳米管在构建高性能纳米器件的巨大潜力, 为集成电路与智能传感等领域的实用化落地指明了方向。

### 3 总结与展望

碳纳米管凭借其优异的一维结构、高载流子迁移率、可调节的电子结构和中空管腔特性, 在纳米电子器件领域显示出广泛应用潜力。从基础电子器件到功

能性传感器、光电器件以及热电器件, 内嵌碳纳米管器件均显示出独特的优势。在晶体管中, 碳纳米管兼具高迁移率与强栅控能力, 结合内嵌掺杂调控, 展现出构建高性能、低功耗CMOS及复杂逻辑器件的巨大潜力; 在传感器应用中, 管腔内客体材料通过调控活性位点, 显著提升了对气体、离子和生物分子的灵敏度、选择性与稳定性; 在热电器件方面, 内嵌客体可协同调控载流子与声子散射, 在降低热导率的同时大幅提升塞贝克系数与功率因子, 为柔性纳米热电器件奠定了材料基础。

尽管碳纳米管器件在性能上具有诸多优势, 但仍面临下述挑战。首先, 不同材料的内嵌技术仍不稳定,

这对于未来大规模内嵌碳纳米管器件的均一性及稳定性至关重要; 其次, 管腔内嵌材料与碳纳米管之间的界面耦合机制仍不清晰, 对于传感机制的研究需要进一步探讨以实现进一步的传感性能优化; 最后, 内嵌碳纳米管器件制备工艺与目前基于硅的半导体工业难以兼容, 需要进一步发展更为简单的制备工艺. 在未来发展中, 人工智能为内嵌碳纳米管器件研究提供了全新的工具和方法. 通过机器学习算法, 研究者能快速分析内

嵌碳纳米管器件的多维表征数据(如电学、电化学、光学、热电及自旋信号), 精确优化掺杂浓度、管腔内材料分布、界面耦合和复合结构. 通过AI预测不同内嵌材料对器件性能(如灵敏度、响应时间、功率因子、热导率和ZT值)的影响, 可加速实验设计并减少试错成本. 总之, 该领域正加速向多功能器件集成与工业化应用迈进, 内嵌碳纳米管独特的优势将为下一代高性能、可控电子器件奠定坚实的材料基础.

## 参考文献

- 1 He X, Wang R, Wu J, et al. Nature of power electronics and integration of power conversion with communication for talkative power. *Nat Commun*, 2020, 11: 2479–2490
- 2 Li C, Xu S, Zhao E, et al. Chip-less, self-powered electronic patch for wireless sensing and communication. *Nat Sens*, 2026, 1: 270–278
- 3 Guo L, Chen H, Chen Y, et al. A neural network for modeling human concept formation, understanding and communication. *Nat Comput Sci*, 2026, 6: 497–511
- 4 Li K, Cai C, Yan G, et al. Towards universal multi-dimensional parallelization communications by direct diverse fiber/3D/2D chip hybrid integration. *Nat Commun*, 2026, 17: 3771–3779
- 5 Yan A, Yan J, Shen P, et al. A flexible digital compute-in-memory chip for edge intelligence. *Nature*, 2026, 649: 1165–1171
- 6 Hong H, Du Z, Jiang M, et al. Memristor-based adaptive analog-to-digital conversion for efficient and accurate compute-in-memory. *Nat Commun*, 2025, 16: 9749–9759
- 7 Lee Y, Bae H J, Haque M F, et al. Converse flexoelectric two-dimensional MoS<sub>2</sub> actuator. *Nat Commun*, 2026, 17: 2519–2525
- 8 Marshall N J, Glaser J I, Trautmann E M, et al. Flexible neural control of motor units. *Nat Neurosci*, 2022, 25: 1492–1504
- 9 Shi Z, Zhang Z, Schnermann J, et al. Ultrasound-driven programmable artificial muscles. *Nature*, 2025, 646: 1096–1104
- 10 Cheng Z, Guo T, Yan G, et al. Mineral-originated bioelectronics for inhibition via lithium electrochemistry. *Nat Mater*, 2026, doi: 10.1038/s41563-026-02526-5
- 11 Horiuchi H, Agetsuma M, Ishida J, et al. CMOS-based bio-image sensor spatially resolves neural activity-dependent proton dynamics in the living brain. *Nat Commun*, 2020, 11: 712–720
- 12 Lazar J T, Haller D J, Ghaddar A, et al. A stationary phase-specific bacterial green light sensor for enhancing metabolite production. *Nat Commun*, 2025, 17: 1071–1084
- 13 Almejalli K A. Optimal deep neural network based road traffic management system for Internet of Things based smart city environment. *Sci Rep*, 2026, 16: 12136–12155
- 14 Tong B, Du T, Du J, et al. Multimodal ion-gated transistor based on 2D superionic conductor for in-memory computing in deep learning. *Nat Commun*, 2026, 17: 4127–4137
- 15 Lu C, Lu C, Lange R T, et al. Towards end-to-end automation of AI research. *Nature*, 2026, 651: 914–919
- 16 Sattar H, Al-Khasawneh M A, Shafi U F, et al. A data migration and integration approach for big data management using linked data. *Sci Rep*, 2026, 16: 12210–12229
- 17 Waldrop M M. The chips are down for Moore's law. *Nature*, 2016, 530: 144–147
- 18 Haensch W, Nowak E J, Dennard R H, et al. Silicon CMOS devices beyond scaling. *IBM J Res Dev*, 2006, 50: 339–361
- 19 Liu M, Junk Y, Han Y, et al. Vertical GeSn nanowire MOSFETs for CMOS beyond silicon. *Commun Eng*, 2023, 2: 7–15
- 20 Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, 354: 56–58
- 21 Lin Y, Cao Y, Ding S, et al. Scaling aligned carbon nanotube transistors to a sub-10 nm node. *Nat Electron*, 2023, 6: 506–515
- 22 Liu L, Han J, Xu L, et al. Aligned, high-density semiconducting carbon nanotube arrays for high-performance electronics. *Science*, 2020, 368: 850–856
- 23 Tulevski G S, Franklin A D, Frank D, et al. Toward high-performance digital logic technology with carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2014, 8: 8730–8745
- 24 Bachtold A, Hadley P, Nakanishi T, et al. Logic circuits with carbon nanotube transistors. *Science*, 2001, 294: 1317–1320
- 25 Javey A, Guo J, Wang Q, et al. Ballistic carbon nanotube field-effect transistors. *Nature*, 2003, 424: 654–657
- 26 Yogaraju D S, Shetty N S, Mohideen S, et al. Development of Quantum dot-based enzyme biosensor for the detection of dopamine in urine. *Sci Rep*, 2026, 16: 13245–13256

- 27 Kim Y J, Kwon Y, Yoo Y, et al. Demonstration of CMOS-compatible memristor-based electrochemical biosensor transducer with threshold-sensing functionality. *Nat Commun*, 2025, 16: 10851–10861
- 28 Gao F, Wang Z, Zhao R, et al. Polarity-tunable field-free room-temperature spin orbit torque switching via topological symmetry breaking in an all-vdW heterostructure for spin logic applications. *Nat Commun*, 2026, 17: 3826–3835
- 29 Tang J, Ding T S, Ding S, et al. Bistable superlattice switching in a quantum spin Hall insulator. *Nature*, 2026, 652: 68–75
- 30 Sun Y, Tong P, Shen J, et al. Data-*in-situ* computing with one-pixel-multiple-memristor architecture for neuromorphic sequential vision. *Nat Commun*, 2026, 17: 4244–4253
- 31 Guo G, Xiong T, Xie B, et al. Confined-hydrogel fluidic memristor crossbar array for neuromorphic computing. *Nat Commun*, 2026, 17: 4275–4285
- 32 Wang K, Zhao Y, Geng L, et al. Editable light response in halide perovskites encapsulated within single-walled carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2025, 19: 16110–16118
- 33 Che T, Liu S, Wang Y, et al. Interfacial charge transfer in one-dimensional agbr encapsulated inside single-walled carbon nanotube heterostructures. *ACS Nano*, 2024, 18: 32569–32577
- 34 Sun Q, Geng L, Wang L, et al. Atomically engineered encapsulation of SnS<sub>2</sub> nanoribbons by single-walled carbon nanotubes for high-efficiency lithium storage. *Nano Lett*, 2024, 24: 7732–7740
- 35 Yao J, He Y, Li X, et al. Synergistic charge engineering in tellurium-encapsulated single-walled carbon nanotubes for universal conductivity enhancement. *ACS Nano*, 2025, 19: 32909–32919
- 36 Yao J, Wang Q, Geng L, et al. Gate-tunable highly linear bipolar photoresponse in Se@SWCNT adaptive neurons for dynamically programmable neuromorphic computing. *Adv Mater*, 2025, 37: e06367
- 37 Yao J, Wang Q, Zhang Y, et al. Ultra-low power carbon nanotube/porphyrin synaptic arrays for persistent photoconductivity and neuromorphic computing. *Nat Commun*, 2024, 15: 6147–6157
- 38 Smith B W, Monthieux M, Luzzi D E. Encapsulated C<sub>60</sub> in carbon nanotubes. *Nature*, 1998, 396: 323–324
- 39 Takenobu T, Takano T, Shiraishi M, et al. Stable and controlled amphoteric doping by encapsulation of organic molecules inside carbon nanotubes. *Nat Mater*, 2003, 2: 683–688
- 40 Philp E, Sloan J, Kirkland A I, et al. An encapsulated helical one-dimensional cobalt iodide nanostructure. *Nat Mater*, 2003, 2: 788–791
- 41 Tapia A, Aguilera L, Cab C, et al. Density functional study of the metallization of a linear carbon chain inside single wall carbon nanotubes. *Carbon*, 2010, 48: 4057–4062
- 42 Yin H, Zhang L, Cao J, et al. Charge detection of perovskite nanowires filled single-walled carbon nanotubes for CMOS ICs (Small Methods 11/ 2025). *Small Methods*, 2025, 9: e70070
- 43 Song M, Zhao B, Li B, et al. Synthesis of single-unit-cell-thick perovskites by liquid-phase confined assembly for high-performance ultrastable X-ray detectors. *Nat Synth*, 2025, 4: 1056–1067
- 44 Sysoev V I, Sedelnikova O V, Vorfolomeeva A A, et al. Single-walled carbon nanotubes filled with sulfur and phosphorus compounds for real-time detection of NO<sub>2</sub> in air. *Carbon*, 2025, 233: 119915
- 45 Kharlamova M V. Rare-earth metal halogenide encapsulation-induced modifications in Raman spectra of single-walled carbon nanotubes. *Appl Phys A*, 2015, 118: 27–35
- 46 Liu S, Teng Y, Zhang Z, et al. Interlayer charge transfer induced electrical behavior transition in 1D AgI@SWCNT van der Waals heterostructures. *Nano Lett*, 2024, 24: 741–747
- 47 Liu X, Pichler T, Knupfer M, et al. Filling factors, structural, and electronic properties of C<sub>60</sub> molecules in single-wall carbon nanotubes. *Phys Rev B*, 2002, 65: 045419
- 48 Shiozawa H, Ishii H, Kihara H, et al. Photoemission and inverse photoemission study of the electronic structure of C<sub>60</sub> fullerenes encapsulated in single-walled carbon nanotubes. *Phys Rev B*, 2006, 73: 075406
- 49 Okada S, Otani M, Oshiyama A. Electron-state control of carbon nanotubes by space and encapsulated fullerenes. *Phys Rev B*, 2003, 67: 205411
- 50 Otani M, Okada S, Oshiyama A. Energetics and electronic structures of one-dimensional fullerene chains encapsulated in zigzag nanotubes. *Phys Rev B*, 2003, 68: 125424
- 51 Pichler T, Kramberger C, Ayala P, et al. Bonding environment and electronic structure of Gd metallofullerene and Gd nanowire filled single-wall carbon nanotubes. *Physica Status Solidi (b)*, 2008, 245: 2038–2041
- 52 Lu J, Nagase S, Zhang S, et al. Strongly size-dependent electronic properties in C<sub>60</sub>-encapsulated zigzag nanotubes and lower size limit of carbon nanopeapods. *Phys Rev B*, 2003, 68: 121402
- 53 Chernysheva M V, Kiseleva E A, Verbitskii N I, et al. The electronic properties of SWNTs intercalated by electron acceptors. *Physica E-Low-dimensional Syst NanoStruct*, 2008, 40: 2283–2288
- 54 Zhukov A A, Chernysheva M V, Eliseev A A. Measurements of the work function of single-walled carbon nanotubes encapsulated by AgI, AgCl,

- and CuBr using kelvin probe technique with different kinds of probes. *J Exp Theor Phys*, 2016, 123: 143–148
- 55 Kharlamova M V, Brzhezinskay M M, Vinogradov A S, et al. The formation and properties of one-dimensional FeHal<sub>2</sub> (Hal = Cl, Br, I) nanocrystals in channels of single-walled carbon nanotubes. *Nanotechnol Russia*, 2009, 4: 634–646
  - 56 Wang H Z, Sun C Y, Xie R H, et al. FeCl<sub>3</sub>-filled double-wall carbon nanotube fibers with record-high ampacity and conductivity. *Adv Fiber Mater*, 2026, 8: 303–315
  - 57 Kharlamova M V, Eliseev A A, Yashina L V, et al. Study of the electronic structure of single-walled carbon nanotubes filled with cobalt bromide. *Jetp Lett*, 2010, 91: 196–200
  - 58 Kharlamova M V, Yashina L V, Eliseev A A, et al. Single-walled carbon nanotubes filled with nickel halogenides: atomic structure and doping effect. *Physica Status Solidi (b)*, 2012, 249: 2328–2332
  - 59 Kharlamova M V, Eliseev A A, Yashina L V, et al. Synthesis of nanocomposites on basis of single-walled carbon nanotubes intercalated by manganese halogenides. *J Phys-Conf Ser*, 2012, 345: 012034
  - 60 Kharlamova M V, Yashina L V, Volykhov A A, et al. Acceptor doping of single-walled carbon nanotubes by encapsulation of zinc halogenides. *Eur Phys J B*, 2012, 85: 34–41
  - 61 Friedrichs S, Sloan J, Meyer R R, et al. Characterisation of a LaI<sub>2</sub>@(18,3)SWNT encapsulation composite: a 1D LaI<sub>2</sub> crystal fragment, adopting the ‘reduced’ structure of LaI<sub>3</sub>. *Microsc Microanal*, 2003, 9: 324–325
  - 62 Wang P, Wang C, Hu Y, et al. CuI-filled single-walled carbon nanotubes: efficient catalysts for thermal decomposition, ignition, and combustion of CL-20. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2025, 17: 35541–35551
  - 63 Kharlamova M V, Kramberger C, Mittelberger A. Raman spectroscopy study of the doping effect of the encapsulated terbium halogenides on single-walled carbon nanotubes. *Appl Phys A*, 2017, 123: 239–245
  - 64 Kharlamova M V, Kramberger C, Pichler T. Semiconducting response in single-walled carbon nanotubes filled with cadmium chloride. *Physica Status Solidi (b)*, 2016, 253: 2433–2439
  - 65 Sceats E L, Green J C, Reich S. Theoretical study of the molecular and electronic structure of one-dimensional crystals of potassium iodide and composites formed upon intercalation in single-walled carbon nanotubes. *Phys Rev B*, 2006, 73: 125441
  - 66 Corio P, Santos A P, Santos P S, et al. Characterization of single wall carbon nanotubes filled with silver and with chromium compounds. *Chem Phys Lett*, 2004, 383: 475–480
  - 67 Chimowa G, Tshabalala Z P, Akande A A, et al. Improving methane gas sensing properties of multi-walled carbon nanotubes by vanadium oxide filling. *Sens Actuat B-Chem*, 2017, 247: 11–18
  - 68 Kharlamova M V, Bal K, Hutchin K, et al. One-dimensional bismuth chalcogenide-filled single-walled carbon nanotubes: formation of solid solution and homologous nanostructures. *J Cryst Growth*, 2025, 654: 128088
  - 69 Kharlamova M V. Novel approach to tailoring the electronic properties of single-walled carbon nanotubes by the encapsulation of high-melting gallium selenide using a single-step process. *Jetp Lett*, 2013, 98: 272–277
  - 70 Kharlamova M V. Comparative analysis of electronic properties of tin, gallium, and bismuth chalcogenide-filled single-walled carbon nanotubes. *J Mater Sci*, 2014, 49: 8402–8411
  - 71 Hu Z, Breeze B, Kashtiban R J, et al. Zigzag HgTe nanowires modify the electron–phonon interaction in chirality-refined single-walled carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2022, 16: 6789–6800
  - 72 Slade C A, Sanchez A M, Sloan J. Unprecedented new crystalline forms of SnSe in narrow to medium diameter carbon nanotubes. *Nano Lett*, 2019, 19: 2979–2984
  - 73 Giusca C E, Stolojan V, Sloan J, et al. GeTe-filled carbon nanotubes for data storage applications. *MRS Proc*, 2010, 1251: 1251
  - 74 Meunier V, Muramatsu H, Hayashi T, et al. Properties of one-dimensional molybdenum nanowires in a confined environment. *Nano Lett*, 2009, 9: 1487–1492
  - 75 Milligan G M, Singen S, To S, et al. Precision synthesis of a single chain polymorph of a 2D solid within single-walled carbon nanotubes. *Adv Mater*, 2025, 37: 2502213
  - 76 Lee J, Lee W, Sim K, et al. Field emission properties of single-walled carbon nanotube with amphoteric doping by encapsulation of TTF and TCNQ. *J Vacuum Sci Tech B-MicroElectron Nanometer Struct Processing Measurement Phenomena*, 2008, 26: 847–850
  - 77 García-Suárez V M, Ferrer J, Lambert C J. Tuning the electrical conductivity of nanotube-encapsulated metallocene wires. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 106804
  - 78 Zhou J, Yan X, Luo G, et al. Structural, electronic, and transport properties of Gd/Eu atomic chains encapsulated in single-walled carbon nanotubes. *J Phys Chem C*, 2010, 114: 15347–15353
  - 79 Xie Y, Zhang J M, Huo Y P. Structural, electronic and magnetic properties of hcp Fe, Co and Ni nanowires encapsulated in zigzag carbon nanotubes. *Eur Phys J B*, 2011, 81: 459–465
  - 80 Saito Y, Yanagi K, Hayazawa N, et al. Vibrational analysis of organic molecules encapsulated in carbon nanotubes by tip-enhanced raman

- spectroscopy. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45: 9286–9289
- 81 Yashina L V, Eliseev A A, Kharlamova M V, et al. Growth and characterization of one-dimensional SnTe crystals within the single-walled carbon nanotube channels. *J Phys Chem C*, 2011, 115: 3578–3586
- 82 Zeng Y, Ying Z, Du J, et al. Effects of carbon nanotubes on processing stability of polyoxymethylene in melt–mixing process. *J Phys Chem C*, 2007, 111: 13945–13950
- 83 Spencer J H, Nesbitt J M, Trehwitt H, et al. Raman spectroscopy of optical transitions and vibrational energies of  $\sim 1$  nm HgTe extreme nanowires within single walled carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2014, 8: 9044–9052
- 84 Chernov A I, Fedotov P V, Talyzin A V, et al. Optical properties of graphene nanoribbons encapsulated in single-walled carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2013, 7: 6346–6353
- 85 Cleuziou J P, Wernsdorfer W, Ondarçuhu T, et al. Electrical detection of individual magnetic nanoparticles encapsulated in carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2011, 5: 2348–2355
- 86 del Carmen Giménez-López M, Moro F, La Torre A, et al. Encapsulation of single-molecule magnets in carbon nanotubes. *Nat Commun*, 2011, 2: 407–412
- 87 Domanov O, Weschke E, Saito T, et al. Exchange coupling in a frustrated trimetric molecular magnet reversed by a 1D nano-confinement. *Nanoscale*, 2019, 11: 10615–10621
- 88 Jordan J W, Lowe G A, McSweeney R L, et al. Host–guest hybrid redox materials self-assembled from polyoxometalates and single-walled carbon nanotubes. *Adv Mater*, 2019, 31: 1904182
- 89 Kodama T, Ohnishi M, Park W, et al. Modulation of thermal and thermoelectric transport in individual carbon nanotubes by fullerene encapsulation. *Nat Mater*, 2017, 16: 892–897
- 90 Wan J, Jiang J W. Modulation of thermal conductivity in single-walled carbon nanotubes by fullerene encapsulation: enhancement or reduction? *Nanoscale*, 2018, 10: 18249–18256
- 91 Guo Q, Wang X, Zhao P, et al. Performance enhancement of carbon nanotube network transistors via  $\text{SbI}_3$  inner-doping in selected regions. *Adv Mater*, 2025, 37: 2415442
- 92 Teng Y, Yao J, Wang Q, et al. Filled carbon nanotube ternary transistors. *Adv Mater*, 2026, 38: e23297
- 93 Zhu M, Yin H, Cao J, et al. Inner doping of carbon nanotubes with perovskites for ultralow power transistors. *Adv Mater*, 2024, 36: 2403743
- 94 Kato T, Hatakeyama R, Shishido J, et al. P-N junction with donor and acceptor encapsulated single-walled carbon nanotubes. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 083109
- 95 Teng Y, Zhang Y, Xie X, et al. Interfacial electron transfer in  $\text{PbI}_2$ @single-walled carbon nanotube van der Waals heterostructures for high-stability self-powered photodetectors. *J Am Chem Soc*, 2024, 146: 6231–6239
- 96 Hou L, Wang Z, Hu Y, et al. Toward image processing and reservoir computing: neuromorphic visual system enabled by nanotube-confined tellurium. *Adv Funct Mater*, 2026, 36: e23017
- 97 Nakanishi R, Satoh J, Katoh K, et al.  $\text{DySc}_2\text{N}@C_{80}$  single-molecule magnetic metallofullerene encapsulated in a single-walled carbon nanotube. *J Am Chem Soc*, 2018, 140: 10955–10959
- 98 Fedi F, Domanov O, Shiozawa H, et al. Reversible changes in the electronic structure of carbon nanotube-hybrids upon  $\text{NO}_2$  exposure under ambient conditions. *J Mater Chem A*, 2020, 8: 9753–9759
- 99 Ramachandran K, Raj kumar T, Babu K J, et al. Ni-Co bimetal nanowires filled multiwalled carbon nanotubes for the highly sensitive and selective non-enzymatic glucose sensor applications. *Sci Rep*, 2016, 6: 36583
- 100 Singh H, Wu J, Lagemann K A L, et al. Highly efficient dopamine sensing with a carbon nanotube-encapsulated metal chalcogenide nanostructure. *ACS Appl Nano Mater*, 2024, 7: 4814–4823
- 101 Yari A, Sepahvand R. Highly sensitive carbon paste electrode with silver-filled carbon nanotubes as a sensing element for determination of free cyanide ion in aqueous solutions. *Microchim Acta*, 2011, 174: 321–327
- 102 Wolny F, Weissker U, Mühl T, et al. Iron-filled carbon nanotubes as probes for magnetic force microscopy. *J Appl Phys*, 2008, 104: 064908
- 103 Nirmalraj P N, Lyons P E, De S, et al. Electrical connectivity in single-walled carbon nanotube networks. *Nano Lett*, 2009, 9: 3890–3895
- 104 Vasylenko A, Marks S, Wynn J M, et al. Electronic structure control of sub-nanometer 1D SnTe *via* nanostructuring within single-walled carbon nanotubes. *ACS Nano*, 2018, 12: 6023–6031
- 105 Koley S, Sen S, Chakrabarti S. Vanishing thermal conductance of carbon nanotube upon encapsulation by zigzag sulfur chain. *J Phys Chem Lett*, 2018, 9: 3105–3109
- 106 Koley S, Sen S, Chakrabarti S. Thermoelectric switching of single-walled carbon nanotubes due to encapsulation of iodine atomic chain. *J Phys Chem C*, 2019, 123: 3996–4001
- 107 Vavro J, Llaguno M C, Satishkumar B C, et al. Electrical and thermal properties of  $\text{C}_{60}$ -filled single-wall carbon nanotubes. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1450–1452

Summary for “内嵌碳纳米管的物性调控及其电子器件应用研究进展”

## Research progress on physical property modulation and electronic device applications of encapsulated carbon nanotubes

Tingting Meng<sup>1,2†</sup>, Haoyan Liang<sup>1,3†</sup> & Lixing Kang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China

<sup>2</sup> Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

<sup>3</sup> School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China

† Equally contributed to this work

\* Corresponding author, E-mail: [lxkang2013@sinano.ac.cn](mailto:lxkang2013@sinano.ac.cn)

Carbon nanotubes (CNTs) are premier candidates for next-generation nanoelectronic devices due to their unique one-dimensional (1D) structure, exceptional mechanical strength, and outstanding carrier mobility. As traditional silicon-based devices face physical limitations from short-channel effects and high power consumption at sub-nanometer scales, CNTs offer a crucial path forward. The hollow cavities of single-walled carbon nanotubes provide a natural, stable nanoscale molecular container for chemical and physical functionalization. This review describes the paradigm of inner encapsulation, demonstrating how inserting diverse organic or inorganic functional guest molecules can precisely engineer the properties of CNTs and surpass the performance limits of single-component materials.

Interfacial charge transfer between the CNTs and guest molecules is the primary mechanism for encapsulated carbon nanotubes. Driven by energy level alignment, this interaction precisely controls the Fermi level and carrier concentration, enabling p-type, ambipolar, or n-type doping. Encapsulating electron acceptors induces p-type doping, whereas confining electron donors with low ionization potentials achieves stable n-type doping. Beyond electronic doping, radial quantum confinement and enhanced electron-phonon coupling profoundly restructure the optical transitions of the hybrid materials, yielding prominent resonance absorption and sharp optical anisotropy along the tube axis. Furthermore, the 1D spatial restriction stabilizes confined magnetic structures, effectively reducing the quantum tunneling of magnetization, extending spin relaxation times, and modifying local magnetic anisotropy. Regarding thermoelectric properties, the encapsulated guest materials introduce robust phonon scattering that dramatically minimizes thermal conductivity while preserving or even elevating the Seebeck coefficient, thereby optimizing the thermoelectric figure of merit (ZT).

With these multi-modal tuning strategies, encapsulated CNTs have been successfully deployed in several high-performance nanoelectronic architectures. In digital logic circuits, localized inner doping drastically lowers contact resistance and optimizes subthreshold swing in field-effect transistors (FETs). Furthermore, partial encapsulation enables monolithic integration of robust, low-power p-n junctions and complementary logic circuits. In optoelectronics, encapsulating light-sensitive phases creates 1D heterojunction interfaces that accelerate photogenerated carrier separation. This enables self-powered photodetectors, high-stability X-ray sensors, and optoelectronic synapses for neuromorphic computing. Additionally, encapsulated CNTs provide ultra-sensitive platforms for chemical, biological, and ion sensing by tailoring gas adsorption energies and engineering precise active sites. Despite this progress, several critical challenges must be addressed, such as structural non-uniformity of the filling materials, poorly understood host-guest coupling, and scalable fabrication bottlenecks. To navigate these long-term challenges, the integration of artificial intelligence (AI) and machine learning algorithms offers a transformative path to accelerate development. By utilizing deep learning for pattern recognition across multi-dimensional characterization datasets, researchers can autonomously predict optimal host-guest pairings and intelligently design scalable, high-performance nanoelectronic devices. In summary, encapsulated CNTs provide a versatile material platform bridging fundamental physics and functional devices, paving the way for next-generation integrated electronics, smart sensors, and advanced energy technologies.

**carbon nanotubes, confined synthesis, 1-D heterojunctions, electronic devices, field-effect transistors**

doi: [10.1360/CSB-2026-0605](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0605)