

专题: 半导体物理与器件

基于阵列碳纳米管的射频电子学研究进展*

李玟琪¹⁾ 潘梓澎²⁾ 丁力^{1)2)†} 张志勇^{1)2)‡}

1) (湘潭大学, 湖南先进传感与信息技术创新研究院, 湘潭 411105)

2) (北京大学电子学院, 纳米器件物理与化学重点实验室, 碳基电子学研究中心, 北京 100871)

(2026 年 3 月 21 日收到; 2026 年 4 月 28 日收到修改稿)

硅基晶体管进入 3 nm 以下工艺节点后, 漏电流、寄生效应等问题严重制约其性能迭代, 碳纳米管 (carbon nanotubes, CNT) 凭借高载流子迁移率、大饱和速度及低寄生参数等本征优势, 成为突破传统半导体射频器件性能瓶颈的核心候选材料. 本文系统综述基于阵列碳纳米管的射频电子学研究进展, 阐述了涵盖阈值电压、跨导等电学指标与电流增益截止频率 (current gain cutoff frequency, f_T)、最大振荡频率 (maximum oscillation frequency, f_{max})、1 dB 增益压缩点 (1 dB gain compression point, $P_{1\text{ dB}}$)、输入三阶交调点 (IIP3) 的综合性能评估体系; 详细阐述了化学气相沉积 (CVD) 法与溶液分散法的技术演进, 实现了高取向、高纯度 (>99.9999%)、晶圆级 (10 cm/4 inch 硅片) 阵列碳纳米管的规模化制备; 梳理了碳基射频器件的结构创新 (T 形栅、Y 形栅等) 与性能突破, 2025 年 Y 形栅极器件的 f_{max} 达 1024 GHz, 首次实现太赫兹频率的突破; 深入分析了放大器、混频器、移相等碳基射频电路的工作原理与性能优势, 其中毫米波射频放大器的综合指标已初步达到商用器件水平; 最后探讨了该技术在 5G 增强/6G 通信、毫米波雷达、柔性电子等领域的应用潜力, 指出当前规模化制备中直径均匀性、接触电阻优化及高频封装等产业化挑战, 为该领域从实验室研究走向实际应用提供参考.

关键词: 阵列碳纳米管, 场效应晶体管, 射频器件, 截止频率, 毫米波**DOI:** 10.7498/aps.75.20260402**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260402

1 引言

随着传统硅基晶体管器件缩小到 3 nm 节点以下, 由于漏电流、边缘寄生电容、源极/漏极电阻、隧道电流以及其他效应, 鳍式场效应晶体管 (FinFET) 和全环绕栅极 (GAA) 等三维晶体管结构在有效控制导电沟道方面面临挑战. 这些极大地限制了工艺节点的进一步迭代^[1]. 碳纳米管 (carbon nanotubes, CNT) 自 1991 年被发现以来, 凭借其卓越的电学性能, 迅速成为构筑高性能电子器件的

核心候选材料^[2-5]. 过去二十年间, 基于碳纳米管的高性能场效应晶体管 (CNT FETs) 已引发广泛研究关注^[6-9], 其在射频领域的应用潜力也被系统梳理, 涵盖材料特性、器件设计与工艺瓶颈等关键方向, 为后续研究提供了清晰的演进脉络^[10]. 射频电子学要求器件具备卓越的载流子迁移率与饱和速度, 以减少信号延迟并提升截止频率 (f_T) 与最高振荡频率 (f_{max}). 此外, 为保证无线通信质量, 器件需具备高跨导以实现高功率增益, 具备低寄生电阻与电容以抑制噪声并优化阻抗匹配. 同时, 优异的线性度指标 (如 OIP3) 也是射频领域避免信号失真、

* 国家自然科学基金 (批准号: 62171004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lding@pku.edu.cn‡ 通信作者. E-mail: zyzhang@pku.edu.cn

实现多通道复用的核心技术要求。

碳纳米管得益于高载流子迁移率、大饱和速度和超薄体特性^[11,12], 被视为制造射频 (RF) 晶体管和电路的理想材料. 高载流子迁移率和大饱和速度对于碳纳米管场效应晶体管在导通状态下的优异性能至关重要^[13-15], 这使得碳管制备的器件具有大跨导^[8]和高速度^[16,17]的优势. 碳纳米管的小尺寸 (直径 1—3 nm) 还赋予了碳纳米管场效应晶体管优异的微缩特性和极小的本征电容^[5,16,17]. 大跨导与小本征电容的结合使碳纳米管场效应晶体管具有较高的本征频率响应. 此外, 碳纳米管具有优异的导热性和化学稳定性, 这使得射频晶体管即使在大功率条件下也能可靠工作. 因此, 基于阵列碳纳米管的器件, 具有在太赫兹 (THz) 波段应用的潜力^[18-20]. 目前已通过结构优化实现太赫兹频段晶体管的基础验证, 为高频应用奠定理论与实验基础^[21].

本文聚焦于阵列碳纳米管场效应晶体管 (align-CNT FETs, A-CNT FETs) 及其在射频领域的发展现状. 第 2 节将通过梳理核心器件指标, 明确高性能碳纳米管射频场效应晶体管的关键性能基准; 第 3 节介绍阵列碳纳米管材料的制备技术; 第 4 节探讨阵列碳纳米管晶体管在射频领域的研究进展与当前现状; 第 5 节将分析阵列碳纳米管射频电子学面临的主要挑战; 最后, 第 6 节对该领域的未来发展前景进行展望.

2 高性能阵列碳纳米管射频器件的关键器件指标

本节将通过系统阐述阈值电压、导通/关断电流、亚阈值斜率、跨导等核心电学指标, 以及电流增益截止频率、最大振荡频率、功率增益、1 dB 增益压缩点、输入三阶交调点等关键射频指标, 构建 A-CNT FETs 射频性能的综合评估体系, 为器件性能的量化分析与技术优化提供理论支撑.

2.1 电学指标

阈值电压 (threshold voltage, V_{TH}) 的定义是: 在场效应晶体管 (FET) 工作过程中, 栅源电压 (V_{GS}) 达到某一临界值时, 源极与漏极之间形成连续导电通道所需的最小栅源电压, 其数值大小直接决定了器件的开启特性与静态功耗水平. 在互补金

属氧化物半导体 (CMOS) 集成技术中, 为实现理想的逻辑输出和最低静态功耗, 需要采用具有对称 V_{TH} 且绝对值适宜的 P 型和 N 型金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)^[22].

对于 CNT 场效应晶体管而言, 阈值电压的波动是制约其性能一致性与大规模集成的关键瓶颈之一, 该现象主要源于三方面因素: 碳纳米管直径和手性的固有分布差异、沟道区域碳纳米管长度的随机起伏, 以及器件制备工艺 (如栅介质沉积、源漏接触形成) 过程中引入的界面不均匀性^[23-26]. 在传统硅基 CMOS 晶体管的制备中, 阈值电压的调控技术已发展成熟, 主要包括通过离子注入工艺对沟道区进行掺杂改性, 以及选用具有特定功函数的金属栅极材料实现阈值电压的精准校准^[27,28]. 然而, 碳纳米管材料缺乏成熟的掺杂技术, 这使得栅极功函数工程成为晶体管层面调控碳纳米管场效应晶体管阈值电压的核心途径, 尤其对于采用无掺杂工艺制备的碳纳米管互补金属氧化物半导体 (CNT-CMOS) 器件而言, 该方法更是实现阈值电压优化的唯一有效技术方案^[29].

导通电流 (I_{ON}) 与关断电流 (I_{OFF}) 是表征场效应晶体管开关性能的核心参数: 导通电流定义为当栅源电压 (V_{GS}) 与漏源电压 (V_{DS}) 均等于电源电压 (V_{DD}) 时的漏极电流 (I_D), 直接反映器件的驱动能力; 关断电流则定义为 V_{GS} 为 0 V、 V_{DS} 等于 V_{DD} 时的漏极电流, 其数值大小决定了器件的静态泄漏功耗^[30]. 碳纳米管场效应晶体管在本征速度 (I/CV , 其中 I 为驱动电流, C 为寄生电容, V 为工作电压) 方面具有显著优势, 这一优势源于其原子级超薄沟道结构带来的量子限制效应, 以及远超硅基材料的载流子迁移率^[31-33]. 然而, 碳纳米管的窄带隙特性使其场效应晶体管普遍存在明显的双极传输特性、较大的关断电流以及偏低的 (I_{ON}/I_{OFF}) 电流比等问题, 这些缺陷严重制约了其在低功耗数字集成电路与高性能射频系统中的应用^[34].

亚阈值斜率 (subthreshold swing, SS) 是描述场效应晶体管在亚阈值区 (即阈值电压以下区域) 开关过渡行为的关键参数, 其物理本质反映了栅源电压对漏极电流的调控效率, 如图 1 所示. 亚阈值斜率的定义为

$$SS = \frac{dV_{GS}}{d(\log I_{DS})}, \quad (1)$$

其中, V_{GS} 为栅源电压, I_{DS} 为漏源电流.

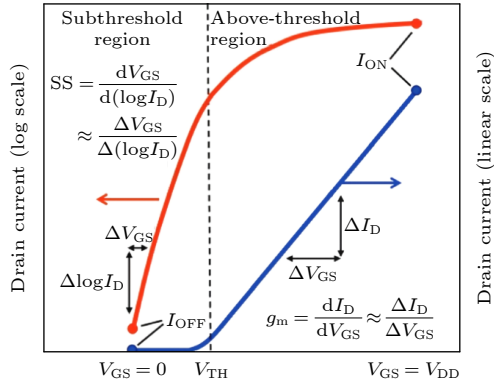


图1 场效应晶体管转移特性的示意图以及关键器件性能指标的定义

Fig. 1. Schematic illustration of transfer characteristics of an FET and definitions of key device-performance metrics.

在数字逻辑集成电路应用中,器件的开关速度与驱动电流正相关,而关态泄漏电流则与亚阈值斜率直接挂钩,更小的亚阈值斜率能够在保证高驱动电流的同时,有效抑制关态泄漏,从而实现器件速度与功耗的平衡^[35].跨导(transconductance, g_m)表征了器件在阈值电压以上区域,漏极电流随栅源电压变化的灵敏度,是评估场效应晶体管信号放大能力的核心参数,其定义式为

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}}. \quad (2)$$

在射频集成电路中,更高的跨导意味着器件能够更高效地将直流偏置功率转换为交流信号增益,为高频放大功能提供保障.值得注意的是,低亚阈值斜率与高跨导的协同特性能够实现晶体管从关态到开态的快速切换,这为器件工作电压的进一步降低提供了重要支撑,对于开发低功耗、高密度集成的射频电路具有重要意义.因此,在碳纳米管薄膜场效应晶体管的设计与制备过程中,需通过工艺优化与结构创新,实现亚阈值斜率与跨导之间的动态平衡,以满足数字与射频集成电路的多元化应用需求.

2.2 射频指标

电流增益 f_T 、 f_{max} 、功率增益(power gain)、1 dB 增益压缩点(1 dB gain compression point, $P_{1\text{ dB}}$)及输入三阶交调点(input third-order intercept point, IIP3)是评估阵列碳纳米管射频器件综合性能的核心指标体系.如图2所示,这些指标从高频工作能力、信号放大效能、线性工作范围

3个关键维度,全面反映了器件的射频性能水平,不仅决定了器件在毫米波(30—300 GHz)、太赫兹(>300 GHz)等高端射频场景中的适配性,更直接关系到碳纳米管射频技术从实验室原型验证走向产业化应用的可行性,其性能演进历程清晰展现了碳纳米管材料在替代传统硅基、化合物半导体射频器件方面的巨大潜力.

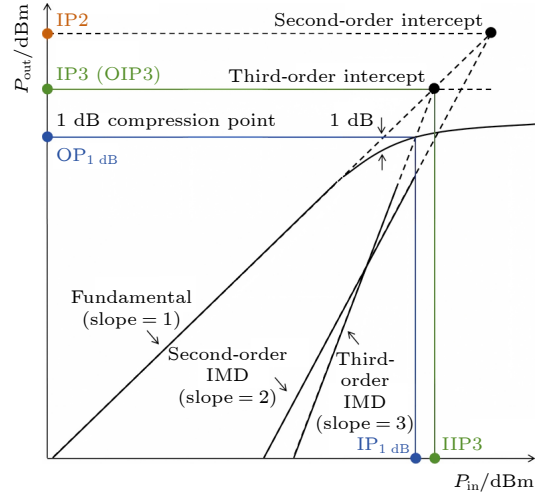


图2 射频器件线性度关键指标关系示意图

Fig. 2. Schematic diagram of relationships among key linearity indicators for radio frequency devices.

电流增益 f_T 的物理定义为:当场效应晶体管的小信号电流增益降低至1时对应的最高工作频率,该参数直观表征了器件对输入信号电流的放大能力所能达到的高频极限; f_{max} 则定义为器件的最大可用功率增益衰减至1时的最高工作频率,反映了器件在实现信号功率放大与振荡功能时的频率上限. f_T 与 f_{max} 共同构成了射频器件的高频性能上限,其数值直接决定了器件在超高速无线通信、高精度太赫兹成像、高分辨率雷达等前沿领域的应用潜力^[20,36].在传统射频技术体系中,硅基 CMOS 器件的 f_T 与 f_{max} 受限于材料本征载流子迁移率与寄生参数,难以满足太赫兹频段的应用需求;而化合物半导体(如 GaAs, InP)器件虽能实现较高的高频性能,但存在成本高昂、集成度低等瓶颈.而阵列碳纳米管射频器件凭借其高载流子迁移率、低寄生电容的本征优势,通过栅极结构微缩、界面优化等技术手段,已实现 f_T 与 f_{max} 的跨越式提升,为高端射频系统提供了全新的材料解决方案.

功率增益是指射频器件输出信号功率与输入信号功率的比值,通常以分贝(dB)为单位进行量

化表征, 其计算公式为 $G_P = 10 \log_{10}(P_{\text{out}}/P_{\text{in}})$ (其中 P_{out} 为输出功率, P_{in} 为输入功率). 该参数是射频放大器、混频器、振荡器等核心模块的关键性能指标, 直接决定了信号在传输与处理过程中的衰减补偿能力. 在实际射频系统应用中, 功率增益的数值大小与宽频段稳定性均具有重要意义: 例如在 K 波段 (18—27 GHz) 无线通信系统中, 器件需提供足够的功率增益以补偿信号在传输路径中的损耗; 而在毫米波 (30 GHz 及以上) 雷达与通信系统中, 要求器件在宽工作频段内保持稳定的增益特性, 以保障信号传输的完整性与可靠性^[37,38]. 阵列碳纳米管射频器件通过优化碳纳米管排列密度、改善源漏接触质量、设计高性能栅极结构等方式, 已实现高功率增益与宽频段稳定性的协同优化, 为实际射频系统应用奠定了基础.

1 dB 增益压缩点 ($P_{1\text{ dB}}$) 的定义为随着输入信号功率的增大, 射频器件的实际功率增益相对于小信号线性增益下降 1 dB 时对应的输出功率, 该参数是衡量器件线性工作范围的核心指标. 当输入信号功率超过 $P_{1\text{ dB}}$ 对应的临界值时, 器件内部的非线性效应会显著增强, 导致输出信号出现失真, 严重影响通信系统的信号传输质量. 在射频发射机、功率放大器等大信号应用场景中, 要求器件具备较高的 $P_{1\text{ dB}}$, 以保证其在输出大功率信号时仍能维持良好的线性放大特性. 传统硅基射频器件在高频段往往面临线性度退化的问题, 导致 $P_{1\text{ dB}}$ 偏低; 而阵列碳纳米管射频器件凭借其优异的晶体结构完整性与电子传输特性, 展现出更为优越的线性工作能力, 已实现较高的 $P_{1\text{ dB}}$ 表现, 为低失真大功率射频应用提供了有力支撑^[39,40].

输入三阶交调点 (IIP3) 是评估射频器件非线性失真抑制能力的关键指标, 其物理定义为: 当两个频率相近的正弦信号 (f_1 与 f_2) 同时输入器件时, 由于非线性效应会产生三阶交调产物 ($2f_1 - f_2$ 与 $2f_2 - f_1$), 当三阶交调产物的输出功率与基波信号输出功率相等时, 对应的输入信号功率即为 IIP3. 在多载波通信、相控阵雷达等复杂射频环境中, 多个信号的同时存在会产生大量互调产物, 若 IIP3 过低, 互调产物的功率会接近甚至超过有用信号, 从而对正常信号传输造成严重干扰. 因此, IIP3 的数值越高, 表明器件对三阶互调失真的抑制能力越强, 在复杂信号环境下的信号传输纯度越高^[37,39]. 阵列碳纳米管射频器件通过优化器件结构与制备

工艺, 有效抑制了非线性传输效应, 展现出优异的 IIP3 性能, 能够满足复杂射频系统对信号质量的严苛要求, 为高精度、高可靠性射频应用提供了保障.

阵列碳纳米管射频 FET 的核心射频性能指标间存在显著的权衡矛盾, 其中亚阈值摆幅 (SS) 直接决定器件静态功耗与能量转换效率, 跨导 (g_m) 则主导射频增益、特征 f_T 和工作速度, 二者在器件优化过程中呈现出典型的制约关系. 阵列碳纳米管凭借纳米级的尺寸优势, 具备优异的栅控特性, 理论上拥有兼顾低 SS 与高跨导的应用潜力. 但在实际研发中, 这一性能平衡仍面临严峻的工艺制备挑战, 尤其是原子层沉积 (ALD) 工艺引入的界面态问题, 会劣化栅介质界面质量, 进一步加剧 SS 与跨导之间的性能博弈. 此外, 器件性能还需同步兼顾寄生电容的削减、欧姆接触的优化等多重约束, 这些指标协同制约工艺瓶颈, 构成了阵列碳纳米管射频 FET 从实验室研究走向高性能射频电子实用化的核心技术难题. 各物理量间的协同优化是推动器件从实验室原型走向实际应用的核心前提. 通过对这些关键参数的系统表征与深入分析, 可为阵列碳纳米管射频器件的结构设计、工艺改进与应用拓展提供重要的理论与实验依据.

3 阵列碳纳米管的制备

制备高性能 CNT 阵列薄膜的核心目标是实现材料的高取向性、高半导体纯度与适宜密度, 为后续场效应晶体管 (FET) 及集成电路 (IC) 的制备提供优质衬底, 目前主流技术路径主要分为两大类. 第 1 类是通过化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 技术原位合成高度取向的单壁碳纳米管 (SWCNT) 阵列, 随后采用针对性提纯策略去除其中的金属型单壁碳纳米管 (metallic SWCNTs, m-SWCNTs), 具体包括电烧蚀 (利用金属型与半导体型碳纳米管导电差异实现选择性熔断)、选择性等离子体/气体刻蚀 (通过反应气体与金属型碳纳米管的特异性化学反应完成精准去除)^[41-43]、光照射 (基于二者光学吸收特性差异的选择性光化学刻蚀)^[44,45] 及选择性手性生长 (通过催化剂调控与生长条件优化, 直接抑制金属型碳纳米管成核)^[46-49] 等方法. 第 2 类是先对碳纳米管进行溶液相纯化处理, 再通过取向技术实现阵列化排

列, 已报道的取向技术包括交流介电泳 (利用电场力驱动碳纳米管沿电场方向定向组装)^[50,51]、液体流动诱导取向 (借助流体剪切力实现碳纳米管的定向排列)^[52]、离心力辅助取向 (通过旋涂过程中的离心力与剪切力协同作用调控排列)^[53,54]、漂浮蒸发自组装 (利用液-气界面张力与蒸发驱动力实现有序排列)^[55]、朗缪尔-布鲁斯特组装 (基于气-液界面单分子膜的定向转移技术)^[56,57] 以及真空过滤法 (通过滤膜截留与流体驱动实现阵列化)^[58]。

相较于溶液法制备的单壁碳纳米管薄膜, 化学气相沉积 (CVD) 法原位生长的单壁碳纳米管薄膜通常具备更优异的单管电学性能. 这一优势的核心原因在于, CVD 法生长的碳纳米管长度普遍更长, 且生长过程中无需引入表面活性剂进行分散, 也避免了溶液处理过程中可能产生的管束团聚与晶体结构缺陷, 能够最大程度保留碳纳米管的本质电子传输特性^[59,60]. 然而, CVD 法的固有缺陷是生长产物中不可避免地混有金属型单壁碳纳米管, 这些金属型杂质会在器件关态时形成泄漏电流通道, 导致场效应晶体管 (FET) 的关断电流 (I_{OFF}) 显著增大, 进而大幅降低导通电流/关断电流 ($I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$) 比值, 严重影响器件的开关特性与逻辑功能实现^[50]. 对于包含数十亿个场效应晶体管的高性能逻辑电路应用而言, 金属型单壁碳纳米管的杂质浓度需严格控制在 0.0001% 以下, 这一严苛要求为 CVD 法的提纯工艺带来了巨大挑战^[61].

3.1 基于化学气相沉积法的阵列碳纳米管

Rogers 等^[62–65] 开发的纳米级热毛细流动法,

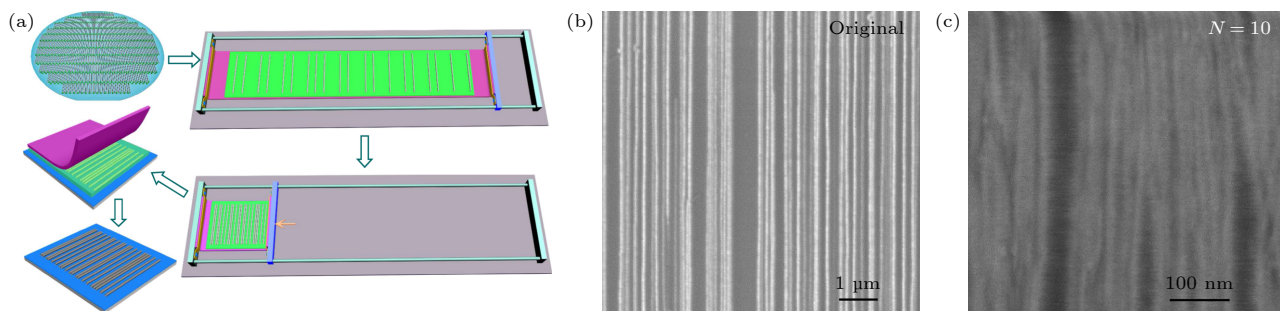


图 3 定向收缩转移法制备高密度阵列碳纳米管^[66] (a) 展示定向收缩转移法工作原理的流程图; (b) 扫描电子显微镜 (SEM) 图像, 显示化学气相沉积法生长的阵列碳纳米管, 密度为每微米 6—8 根; (c) SEM 图像, 显示与 (b) 中相同的阵列碳纳米管, 但经过 $N = 10$ 的密度放大后, 密度增至每 100 纳米 6—8 根碳纳米管

Fig. 3. Fabrication of high-density carbon nanotube arrays via the directional contraction transfer method^[66]: (a) Flowchart illustrating the working principle of the directional contraction transfer method; (b) scanning electron microscope (SEM) image showing the carbon nanotube array grown by chemical vapor deposition (CVD) with a density of 6–8 tubes per micrometer; (c) SEM image showing the same carbon nanotube array as in (b), with the density increased to 6–8 tubes per 100 nanometers after a density magnification of $N = 10$.

是 CVD 法提纯的代表性突破: 通过外加电场使 m-SWCNTs 产生焦耳热, 驱动热毛细抗蚀剂从其表面流走, 再经反应离子刻蚀 (RIE) 去除暴露的 m-SWCNTs, 最终获得半导体纯度达 99.9925% 的阵列. 但该方法存在明显局限——所得阵列密度仅约 3 根/ μm , 远低于高性能器件对驱动电流的需求 (通常需 100 根/ μm 以上). 2018 年, Si 等^[66] 开发如图 3 所示的定向收缩转移法, 通过弹性薄膜回缩力将 CVD 阵列密度提升 10 倍, 同时保留 $1600 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高载流子迁移率, 一定程度上弥补了密度短板.

总体而言, CVD 法的优势在于碳纳米管长径比大、晶体结构完整 (无溶液处理引入的缺陷), 但生长过程中不可避免混入 m-SWCNTs, 且高密度与高纯度的协同调控难度大, 难以满足晶圆级规模化制备对均匀性的要求^[59,60].

3.2 基于溶液分散法的碳纳米管取向排列

溶液分选法是通过“先分散提纯、后定向顺排”的两步策略, 实现阵列碳纳米管的高纯度、高取向与晶圆级规模化, 核心突破集中在分散过程的团聚抑制与顺排过程的取向控制, 有效解决了 CVD 法在纯度与均匀性上的瓶颈.

3.2.1 溶液相分散与提纯

为了打破传统硅基器件逐渐逼近物理与工艺极限, 碳纳米管材料的制备需要满足高纯度和高密度两个条件^[67]. 由于碳纳米管因范德瓦耳斯力易形成管束团聚, 且原始产物中 m-SWCNTs 占比约

1/3, 需通过分散与提纯实现单根分散和高半导体纯度. 分散环节的核心是选用合适的分散剂 (如表面活性剂、共轭聚合物), 通过超声或搅拌打破团聚, 使碳纳米管以单根或小束状态稳定悬浮于溶液中; 提纯环节则利用 m-SWCNTs 与半导体型碳纳米管 (s-SWCNTs) 在电学、光学或化学特性上的差异, 实现选择性分离.

早期 Arnold 团队^[55]采用简单超声分散结合过滤, 仅能获得密度 47 根/mm 的条状阵列, 且因分散不充分导致管间屏蔽效应显著, 器件跨导仅 0.1 mS/mm; 通过朗缪尔-谢弗法、真空过滤法虽能实现高密度覆盖 (>400 根/mm), 但分散剂残留与团聚问题仍未解决, 导致接触电阻增大、电流开关比偏低^[9,68].

2020 年, 北京大学 Liu 等^[69]开发的多分散分选工艺, 彻底突破分散与提纯的协同瓶颈: 通过“表面活性剂辅助超声分散-密度梯度离心-光谱表征筛选”的多步流程, 先利用十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 打破碳纳米管团聚, 再通过碘化物密度梯度离心实现 s-SWCNTs 的精准分离, 最后通过紫外-可见-近红外光谱与拉曼光谱验证纯度. 该工艺获得的碳纳米管溶液, 直径分布窄至 (1.45 ± 0.23) nm (分散均匀性显著提升), 半导体纯度突破 99.9999%, 且单根分散比例超 90%——这意味着溶液中碳纳米管几乎无团聚, 为后续顺排的取向一致性奠定基础^[69]. 此外, 该团队通过对 1300 个 FET 的电学测试验证, 分散后的阵列碳纳米管器件阈值电压波动仅 38 mV, 远低于 CVD 法制备器件 (约 100 mV), 充分证明分散均匀性对器件一致性的提升作用^[69].

3.2.2 溶液法阵列顺排

顺排是溶液分选法的核心环节, 目标是将分散后的单根碳纳米管沿特定方向定向排列, 形成高取向阵列. 其关键是利用外力 (电场、流体剪切力、界面张力等) 驱动碳纳米管克服布朗运动, 实现有序组装, 目前已发展出多种高效顺排技术, 各有侧重且逐步向晶圆级规模化演进.

交流介电泳技术通过施加高频电场 (1—10 MHz), 利用 m-SWCNTs 与 s-SWCNTs 的介电常数差异, 不仅可实现提纯, 还能驱动碳纳米管沿电场方向顺排, 美国南加州大学团队通过该技术实现排列偏差 <10° 的阵列, 且可兼容柔性衬底^[50,51]; 流动诱导取向则借助流体剪切力, 如将碳纳米管溶液通过

狭缝挤出或旋涂, 利用流体流动方向的剪切力使碳纳米管定向排列, 韩国 Kim 等^[52]通过该方法在聚酰亚胺衬底上实现取向度 95% 的阵列, 适用于柔性电子场景.

漂浮蒸发自组装技术则是利用液-气界面的张力与蒸发驱动力, 将碳纳米管溶液滴于水面, 随着溶剂蒸发, 碳纳米管在界面张力作用下沿蒸发方向顺排, 形成连续薄膜后转移至目标衬底. 美国 Arnold 团队等^[55]通过该方法实现密度 50—100 根/ μm 的阵列, 且无需光刻图案化, 制备效率高; 2016 年该团队^[39]将其与自对准 T 形栅极结合, 使器件 f_T 与 f_{max} 均突破 70 GHz, 线性度指标显著优化.

2020 年北京大學 Liu 等^[69]开发的尺寸限制自对准 (DLSA) 工艺, 是顺排技术的里程碑突破. 该工艺以硅片 (10 cm/4 inch) 为衬底, 通过光刻制备微米级沟槽结构, 将分散后的碳纳米管溶液滴涂于沟槽中——沟槽的尺寸限制 (宽度与碳纳米管长度匹配) 与毛细力协同作用, 使碳纳米管沿沟槽方向定向排列; 同时通过控制浸涂速度 (5 mm/min) 与溶液浓度 (40 mg/mL), 实现排列偏差 <9° 的高取向性, 密度可在 100—200 根/ μm 范围内精准调控. 如图 4 所示, 该工艺制备的阵列在硅片 (10 cm/4 inch) 上实现全覆盖, 且截面 TEM 显示即使密度达 200 根/ μm (间距 <5 nm), 仍保持单层特性——这一特性可避免管间电荷散射, 使器件导通电流达 1.3 mA/ μm 、跨导 0.9 mS/ μm , 核心性能超越同栅长商用硅基 MOSFET^[69].

除硅基衬底外, 新型衬底的探索也拓展了阵列碳纳米管的应用场景. 例如 2024 年 Cheng 等^[70]在玻璃晶圆上实现了高性能 A-CNT 电子器件的制备, 突破传统硅基衬底的刚性限制, 器件在透明性与柔性方面表现优异, 为透明射频系统、柔性电子设备提供了新的材料-衬底解决方案.

4 阵列碳纳米管射频器件的发展

碳基射频器件的性能突破与应用拓展, 依赖于阵列碳纳米管材料特性的精准调控、制备工艺的持续迭代, 以及器件结构的创新优化. 三者协同作用, 共同推动碳基射频器件从实验室原型走向高性能、规模化应用, 逐步突破传统硅基与化合物半导体的性能瓶颈.

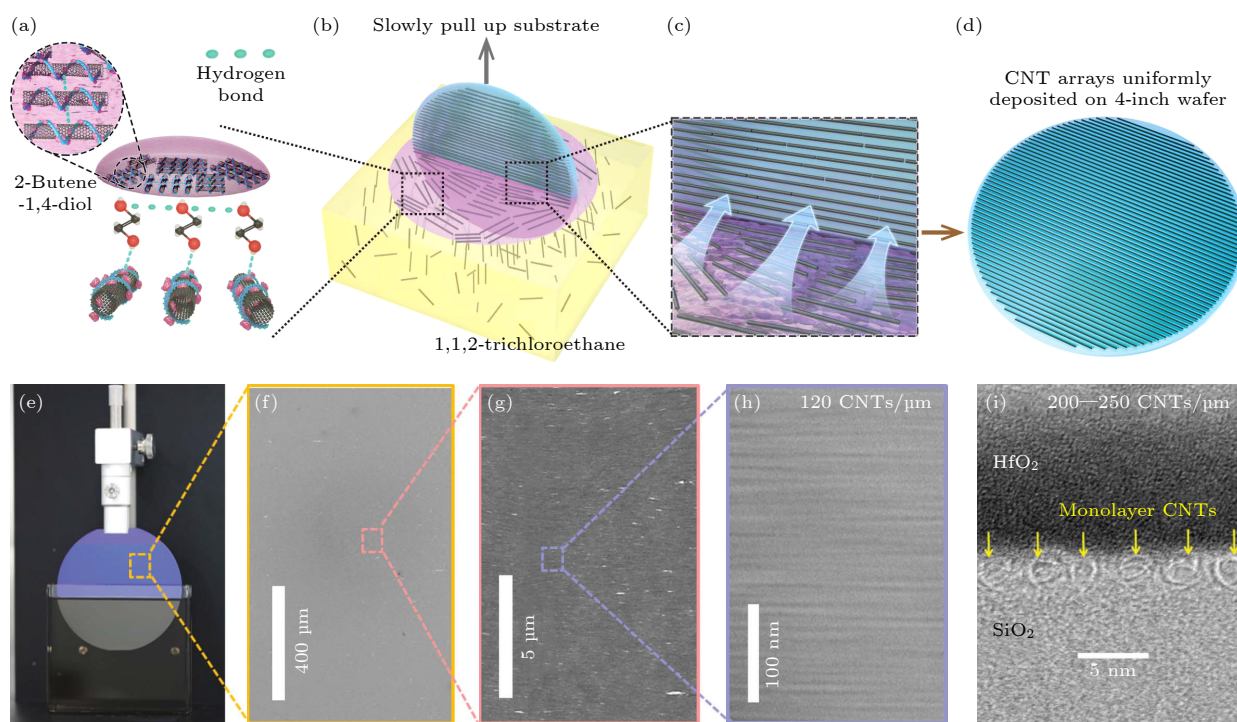


图4 阵列碳纳米管 (A-CNT) 的制备^[69] (a)–(d) 晶圆级 A-CNT 阵列制备流程的示意图; (e) 4 inch 硅片上碳纳米管浸涂装置的光学图像; (f)–(h) 最优碳纳米管溶液浓度 (40 mg/mL) 下获得的沉积态阵列碳纳米管在不同放大倍数下的 SEM 图像; (i) 碳纳米管溶液浓度为 60 mg/mL (最高浓度) 时所制备阵列碳纳米管的截面透射电子显微镜 (TEM) 图像, 该阵列碳纳米管的密度明确达到至少 200 根/mm (间距小于 5 nm); 即便在如此高的碳纳米管密度下, 所制备的阵列碳纳米管仍保持良好的单层特性, 这一特性对电子学应用至关重要

Fig. 4. Preparation and characterization of an A-CNT array^[69]: (a)–(d) Schematic images showing the process of preparing a wafer-scale A-CNT array; (e) optical image showing the dip-coating setup used for coating CNTs on a 4-inch silicon wafer; (f)–(h) SEM images showing an as-deposited CNT array obtained using an optimal CNT solution concentration (40 mg/mL) at different magnifications; (i) cross-section TEM image of a CNT array obtained using the highest CNT solution concentration of 60 mg/mL; the CNTs clearly show a density of at least 200 CNTs/mm (<5 nm pitch); even at this high CNT density, our CNT arrays still present a good monolayer property, which is crucial for electronics applications.

4.1 阵列碳纳米管材料的发展

碳纳米管 (carbon nanotube, CNT) 可视为由石墨烯 (graphene) 按照特定方向卷曲形成的准一维管状纳米材料, 其手性由卷曲矢量决定, 表现为不同的螺旋结构. 根据石墨烯层数差异, 碳纳米管可分为单壁碳纳米管 (single-walled carbon nanotube, SWCNT) 和多壁碳纳米管 (multiwalled carbon nanotube, MWCNT) 两种类型.

而从宏观材料形态来看, 如图 5 所示, 碳纳米管薄膜可根据碳纳米管的空间排列方式分为随机取向薄膜与取向排列薄膜 (即阵列碳纳米管): 随机取向薄膜通过溶液旋涂、喷涂等方式制备, 碳纳米管在衬底上无规则分布, 管间易形成交叉团聚, 载流子输运时需跨越不同方向的碳纳米管, 导致管间散射增强、导电性呈现各向同性且均匀性差; 取向排列薄膜 (阵列碳纳米管) 则通过化学气相沉积

(CVD)、定向自组装等技术, 使碳纳米管沿特定方向 (如平行于衬底表面) 有序排列, 载流子可沿取向方向高效输运, 管间散射大幅减少, 能为射频器件提供稳定的电流驱动能力与优异的高频响应特性.

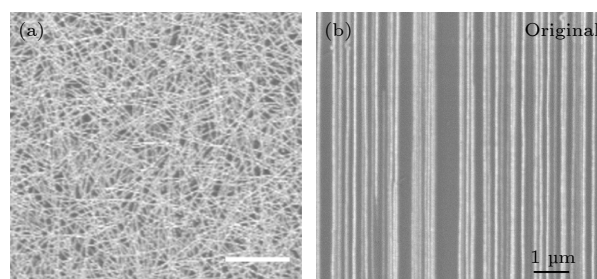


图5 碳纳米管薄膜材料的 SEM 图像 (a) 随机取向碳纳米管薄膜^[71]; (b) 取向排列碳纳米管薄膜, 即阵列碳纳米管^[66]

Fig. 5. SEM images of carbon nanotube (CNT) thin film materials: (a) Randomly oriented CNT thin film^[71]; (b) aligned CNT thin film, i.e., CNT array^[66].

阵列碳纳米管是碳基射频器件的核心活性材料,其取向性、半导体纯度、密度三大特性直接决定器件的高频响应与线性性能.1996年,中国科学院物理研究所 Li 等^[35]首次通过 CVD 法制备出与二氧化硅衬底近垂直排列的定向阵列碳纳米管,间距约 100 nm,为碳基射频器件提供了首个可用的阵列材料基础;后续通过热毛细流动法提纯,半导体纯度提升至 99.9925%,有效抑制了关态泄漏电流^[62–65],但密度仅 3 根/ μm ,难以满足高驱动电流需求.2018 年,定向收缩转移法的出现实现了密度与纯度的协同优化——将 CVD 阵列密度提升 10 倍的同时,保留 $1600\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高载流子迁移率,为器件高跨导 (g_m) 奠定基础^[66].

溶液分散法则在晶圆级规模化与密度调控上实现突破.2020 年北京大學 Liu 等^[69]团队通过多分散分选与 DLSA 工艺,在硅片 (10 cm/4 inch) 上制备出排列偏差 $<9^\circ$ 、密度 100—200 根/ μm 、半导体纯度 $>99.9999\%$ 的阵列,其单层特性避免了管间屏蔽效应,基于该阵列的器件导通电流达 $1.3\text{ mA}/\mu\text{m}$ 、跨导 $0.9\text{ mS}/\mu\text{m}$,核心电学性能超越

同栅长商用硅基 MOSFET.

此外,2023 年中国科学院微电子研究所 Zhang 等^[37]通过锗保护层技术 (如图 6 所示),在阵列碳纳米管表面构建保护层,不仅抑制器件制备过程中的污染与损伤,还将金属-碳纳米管接触电阻从 $1.66\text{ k}\Omega\cdot\mu\text{m}$ 降至 $0.123\text{ k}\Omega\cdot\mu\text{m}$ (降幅 93%),大幅降低寄生损耗,为高频性能提升提供关键支撑.

4.2 关键工艺的发展

碳基射频器件的工艺演进围绕“性能优化-批量生产”双目标展开,核心工艺可分为“阵列制备-器件集成”两大环节.在阵列制备环节,CVD 法聚焦“高取向”和“高纯度”:通过催化剂调控 (如铁纳米颗粒嵌入介孔二氧化硅^[35]) 实现定向生长,结合反应离子刻蚀^[62–65]、电烧蚀^[41]等提纯工艺去除金属型碳纳米管;溶液法则通过“分选-取向”两步法,先经密度梯度离心等技术实现半导体型碳纳米管的高效分选^[40],再通过 DLSA 工艺^[69]、漂浮蒸发自组装^[55]等实现定向排列,兼顾规模化与均匀性.

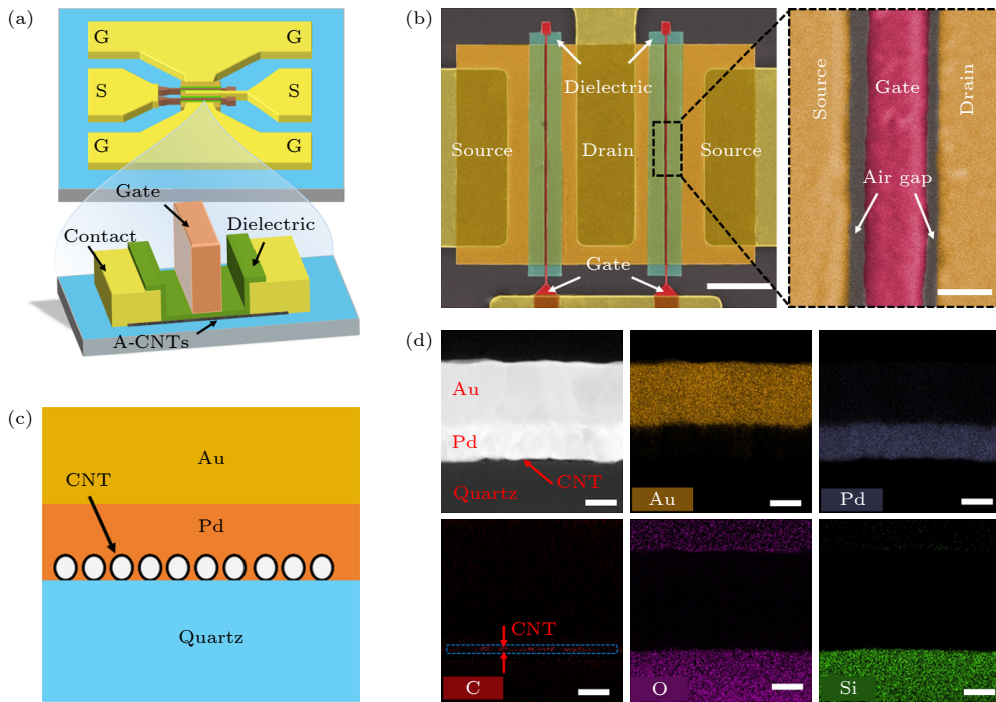


图 6 具有锗保护层的 A-CNT 晶体管射频器件^[37] (a) 带 GSG (接地-信号-接地, ground-signal-ground) 焊盘的碳纳米管射频晶体管示意图,插图为沟道区域结构; (b) 两指碳纳米管射频晶体管核心区域的伪彩色 SEM 图像; (c) 沿晶体管源极宽度方向的截面示意图; (d) 沿晶体管源极宽度方向的高角环形暗场扫描透射电子显微镜 (HAADF-STEM) 图像

Fig. 6. Structure of aligned CNT array-based RF transistors^[37]: (a) Schematic of a CNT RF transistor with GSG (ground-signal-ground) pads; inset represents structure of the channel region; (b) false-colored SEM image of the core of the two-finger CNT RF transistor; (c) cross-section schematic along the source width direction of the transistor; (d) HAADF-STEM image along the source width direction of the transistor.

在器件集成工艺方面, 栅极与源漏接触优化是核心突破方向. 2012 年 IBM 团队 Steiner 等^[72] 通过栅与源漏接触改进, 结合寄生参数去嵌入处理, 使器件本征 f_T 达 153 GHz; 2016 年美国南加州大学 Cao 等^[39] 将“自对准 T 形栅极”与“浮动蒸发自组装阵列”工艺结合, T 形栅极的垂直结构降低栅电容 (C_g), 同时提升栅控效率, 使器件 f_T 与 $f_{\max}$ 均突破 70 GHz, 且线性度指标 ($P_1 \text{ dB} = 14 \text{ dBm}$, $\text{IIP3} = 22 \text{ dBm}$) 显著优化. 规模化制造方面, 2019 年美国 Carbonics 公司 Ruthergle 等^[40] 实现晶圆级碳纳米管场效应晶体管批量生产, 栅长 110 nm 器件的 f_T 与 $f_{\max}$ 均 $>100 \text{ GHz}$, 性能超越同栅长射频 CMOS ($\sim 90 \text{ GHz}$)、接近 GaAs 水平, 且线性度优异 (归一化 1 dB 压缩功率下峰值输出三阶交调点 26.5 dB), 标志碳基射频器件进入产业化探索阶段.

4.3 器件结构的创新与优化

沟道设计的核心逻辑是“短沟道效应抑制与电流密度提升”, 通过阵列碳纳米管的高密度排列 (如 100—200 根/ μm ^[69]) 提升沟道电流密度, 同时利用阵列的有序性抑制管间散射. 2023 年北京大學 Qian 等^[73] 开发的多指结构 (10 指状晶体管^[38]), 在增大沟道宽度以提升输出功率的同时, 通过结构优化降低寄生电阻, 使器件在 30 GHz 毫米波频段实现近 7 dB 功率增益、3 dB 带宽 $>40 \text{ GHz}$, 综合性能居同类纳米材料毫米波器件之首. 该团队 Shi 等^[74] 进一步制备了 50 nm 栅长沟道器件, 实现了 $f_T = 540 \text{ GHz}$, $f_{\max} = 306 \text{ GHz}$, K 波段放大器功率增益达 23.2 dB、三阶交调点输出功率 31.2 dBm 的性能突破, 进一步验证了短沟道与高取向阵列结

合的性能优势.

器件结构设计则聚焦“降低寄生参数-提升栅控效率-优化线性工作范围”, 关键创新集中在栅极结构与沟道设计两方面. 栅极结构从平面栅逐步演进为高性能复杂结构: 2009 年美国伊利诺伊大学 Kocabas 等^[75] 采用亚微米级沟道 (栅长 700 nm), 首次证实阵列碳纳米管的射频可行性 ($f_T = 5 \text{ GHz}$, $f_{\max} = 9 \text{ GHz}$); 2016 年 Cao 等^[39] 通过增大 T 形栅极面积降低栅电阻 (如图 7 所示), 同时减小栅电容, 实现高频与线性度协同优化; 2025 年北京大學 Zhou 等^[38] 根据碳基器件 doping-free 的工艺特点, 开发了适用于碳纳米管材料的 Y 形栅极和空气桥结构 (如图 8 所示), 可以同时降低栅极电阻、栅极寄生电容和源漏接触区域寄生电阻, 并通过进一步缩减器件栅长到 35 nm, 碳基器件的非本征 f_T 超过 550 GHz, $f_{\max}$ 突破 1 THz (1024 GHz). 该工作展示了碳纳米管射频器件截止频率首次超越硅基和三五族 MOS 器件, 并且截止频率随栅长缩减的规律也超越传统半导体的水平, 推动碳基射频器件成为目前射频领域中速度最快的 MOSFET 器件.

除此之外, 器件结构与掺杂工艺的协同优化也是性能提升的重要路径. 2024 年北京大學 Ren 等^[76] 通过改进源漏接触界面修饰与离子注入精准掺杂工艺, 进一步降低寄生电阻与阈值电压波动, 使晶体管的功率增益提升 18%、 IIP3 提升 22%, 线性工作范围显著扩大.

总之, 在半导体射频电子学的广阔版图中, 阵列碳纳米管 (A-CNT) 展现出显著区别于传统材料的本征优势. 相较于成熟的硅基 CMOS 工艺, 尽管后者拥有无与伦比的集成度与稳定性, 但在进入毫

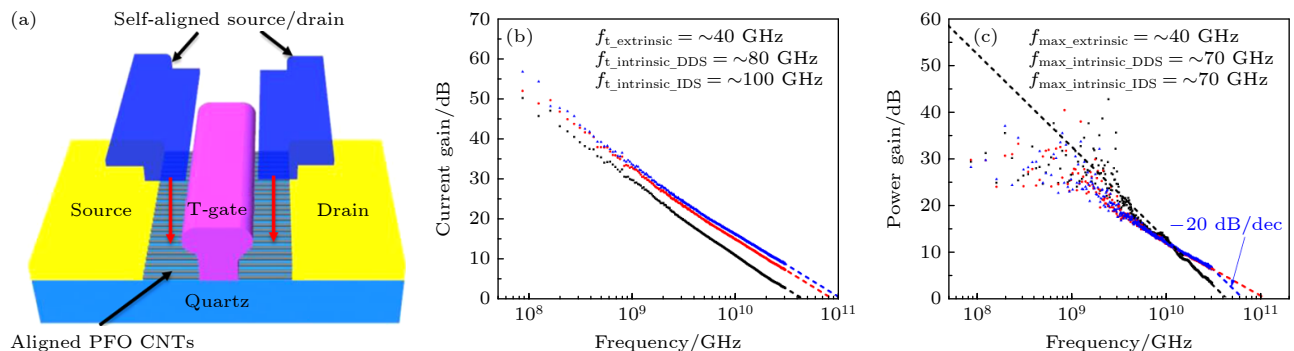


图 7 基于排列整齐的阵列碳纳米管的自对准 T 形栅极晶体管^[39] (a) 自对准 T 形栅极晶体管结构示意图; (b) Pad 去嵌入和本征去嵌入的电流增益频率响应; (c) Pad 去嵌入和本征去嵌入的功率增益频率响应

Fig. 7. Self-aligned T-shape gate transistors based on CNTs^[39]: (a) Schematic of the selfaligned T-shape gate transistor structure; (b) extrinsic and intrinsic current-gain frequency response; (c) extrinsic and intrinsic power gain frequency response.

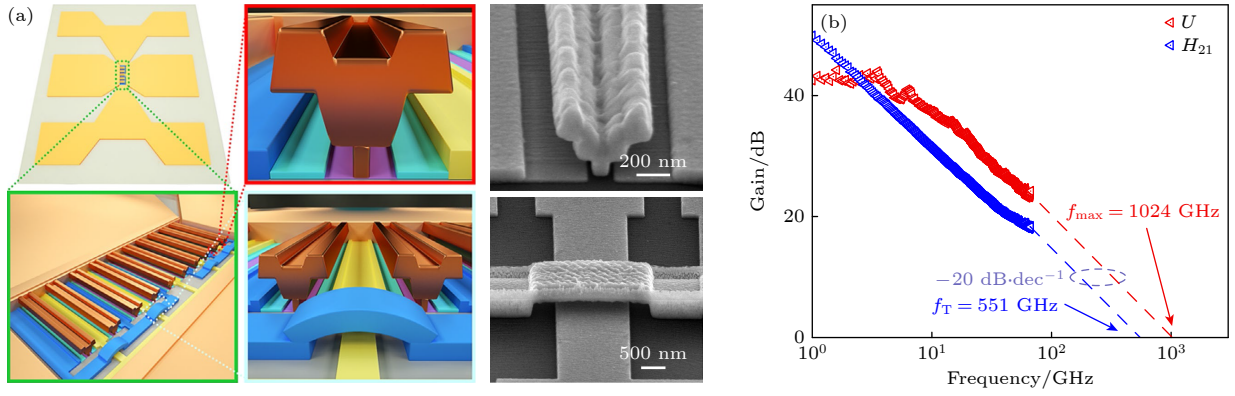


图 8 基于阵列碳纳米管 (A-CNT) 的 MOSFET 的结构与性能特性^[38] (a) 采用 Y 形栅极和空气桥结构的 10 指状碳纳米管射频晶体管示意图和 SEM 图像; (b) 栅极长度 (L_g) 为 35 nm 的最优射频晶体管的电流增益和功率增益随频率的变化, 图中延伸线的斜率为 -20 dB/10 倍频程

Fig. 8. Structure and performance characteristics of A-CNT MOSFETs^[38]: (a) Schematic and SEM images of a 10-finger CNT RF transistor with Y-gate and air-bridge; (b) current gain and power gain versus frequency of the 35 nm- L_g champion RF transistor; the slope of the extension lines is -20 dB/dec.

米波频段后, 其载流子迁移率与击穿场强之间的矛盾日益凸显, 而 A-CNT 凭借超高的饱和速度与本征线性度, 在极低功耗下即可实现与之媲美甚至超越的 f_T . 与 GaAs(砷化镓) 等高迁移率化合物半导体相比, A-CNT 在维持高频率增益的同时, 具备更优的导热潜力与机械柔性, 这使其在下一代可穿戴射频前端领域极具竞争力.

然而, 若与高功率领域的“霸主”材料 GaN(氮化镓) 相比, A-CNT 目前在绝对输出功率密度上仍显逊色, 这主要受限于大面积阵列中接触电阻的非均匀性及热界面瓶颈. 从技术成熟度来看, A-CNT 正处于从原理验证向工程优化过渡的核心窗口期: 其太赫兹量级的 $f_{\max}$ 已触及化合物半导体的天花板, 但在多片集成的一致性与射频封装的插入损耗控制上, 仍需借鉴硅基及三五族半导体的工业化经验. 这种独特的性能定位——即在高频线性度与低功耗维度上的能力, 决定了 A-CNT 是未来 6G 通信与超宽带感测领域中不可或缺的差异化技术路线.

同时, 碳基二极管的性能也同样优异. 2023 年北京 Xue 等^[77] 开发的碳纳米管二极管工作频率超过 50 GHz, 其响应速度与线性度优于同频段硅基二极管, 填补了碳基高频二极管在射频前端频率转换、信号检波模块中的应用空白, 为碳基射频系统的器件多元化提供了支撑.

5 碳基射频电路

基于阵列碳纳米管器件的高载流子迁移率、低

寄生参数及优异线性度, 研究人员已开发出覆盖毫米波至太赫兹频段的射频电路模块, 包括放大器、混频器、移相器等. 这些电路不仅在高频性能上突破传统硅基与化合物半导体限制, 还在柔性、集成化等场景展现独特优势, 其技术演进围绕“宽频段覆盖-低失真-小型化”展开, 为碳基射频系统的实际应用奠定核心基础.

5.1 碳基射频放大器

射频放大器作为信号链的核心模块, 需同时满足高功率增益、宽频段稳定性与低非线性失真. 碳基放大器依托阵列碳纳米管器件的高 $f_T/f_{\max}$ 与低功耗特性, 已在毫米波通信、柔性生理监测等领域实现性能突破, 形成“高频通信放大器”与“柔性表皮放大器”两大技术方向.

射频放大器的核心工作原理是利用有源器件的信号放大能力, 将输入的微弱射频信号转化为幅度更大的输出信号, 本质是通过直流偏置功率为载流子运动提供能量, 实现“小信号控制大电流”的能量转换. 在晶体管级, 主流采用共源极结构: 栅极作为信号输入端, 通过栅源电压 (V_{GS}) 的微小变化调控沟道载流子浓度, 进而控制 I_{DS} 的大幅变化; 漏极作为输出端, 将 I_{DS} 的变化通过负载电阻转化为输出电压 (V_{out}) 的变化, 最终实现电压/功率增益. 对于阵列碳纳米管器件, 其高载流子迁移率 ($>10^4$ cm²·V⁻¹·s⁻¹) 可提升跨导 ($g_m = dI_{DS}/dV_{GS}$)—— g_m 越大, 相同 V_{GS} 变化下 I_{DS} 变化越显著, 增益越高; 同时, 碳纳米管的纳米级尺寸 (直径 1—3 nm)

可降低寄生电容 (尤其是栅电容 C_{GS}), 而放大器的高频带宽与 $1/(2\pi C_{GS}R_{load})$ 正相关, 低 C_{GS} 可显著扩展放大器的工作频段, 这也是碳基放大器能覆盖毫米波/太赫兹频段的核心物理基础。

在 5G 增强与 6G 预研的毫米波 (30—300 GHz)、太赫兹 (>300 GHz) 频段, 碳基放大器的高频响应优势显著. 2021 年, 北京大学 Shi 等^[74] 基于 50 nm 栅长阵列碳纳米管器件 ($f_T = 540$ GHz、 $f_{max} = 306$ GHz), 设计 K 波段 (18 GHz) 小信号放大器: 采用共源极拓扑, 通过优化栅极偏置电压 ($V_{GS} = -0.8$ V) 使器件工作在饱和区, 利用器件高跨导实现 23.2 dB 的高功率增益; 同时, 通过源极退化电感与漏极匹配网络抑制寄生参数, 使放大器在 18—20 GHz 频段内增益波动 <1 dB, 解决了传统硅基放大器在该频段因寄生电容增大导致增益衰减过快的问题。

然而, 在追求极高 f_{max} 的过程中, 阵列碳纳米管的非线性寄生效应成为系统设计的核心挑战. 随着频率向太赫兹频段延伸, 栅极电阻 (R_g) 与源极接入电阻 (R_s) 的微小波动会通过反馈回路显著恶化放大器的稳定系数 (K 因子). 此外, 碳管阵列中的非半导体性杂质或管径不一会引起载流子散射, 导致大信号工作下的跨导压缩 (transconductance compression). 这直接限制了放大器的 1 dB 增益压缩点, 使得器件在高功率输出时面临线性度与效率的深度博弈, 这是未来实现宽动态范围收发机的关键攻关方向。

同年, 北京大学 Zhou 等^[78] 专门针对 K 波段 (18—27 GHz) 通信需求优化晶体管结构, 通过源极退化电感与漏极匹配网络设计, 使器件在全频段保持 >18 dB 的功率增益与 <2.5 dB 的噪声系数, 适配卫星通信、雷达探测等场景的信号放大需求。

2025 年北京大学 Zhou 等^[38] 基于 Y 形栅极阵列碳纳米管器件所制作的射频放大器, 在 30 GHz 时的最大功率增益可达 21.4 dB. 该器件在 100—300 GHz 工作时, 可稳定提供 10—15 dB 的功率增益, 而这一频段正是 6G 的预期工作频谱. 如图 9 所示, 通过频率相关功率增益对碳基射频放大器进行基准测试, 该器件性能优于所有已报道的碳基 (包括碳纳米管和石墨烯) 射频放大器, 首次达到毫米波频段, 已达到商用毫米波射频放大器的初步水平. 这意味着其在不久的将来有望实现产业化, 并具备为 5G 和 6G 通信构建太赫兹 (0.3—3 THz)

电路的潜力。

在柔性应用上, 针对可穿戴医疗设备对柔性、低功耗、高灵敏度的需求, 碳基放大器结合阵列碳纳米管的宏观柔性 with 低静态功耗特性, 可以实现生理信号的高精度放大. 其工作原理的核心是在柔性衬底上构建低偏压共源极放大电路, 利用碳纳米管器件的低关断电流降低静态功耗, 同时通过阻抗匹配适配生理信号的射频载波频段. 2025 年, 湖南大学 Zhang 等^[71] 通过在超薄塑料基板上开发高性能的碳纳米管 (CNTs) 基放大器 (如图 10 所示), 该器件实现了极高的碳纳米管晶体管均匀性, 其阈值电压标准偏差仅为 38 mV, 可与工业级硅晶体管相媲美. 在直流条件下可实现超过 341 的电压增益, 在仅 4 V 的供电电压下, 增益带宽积 (GBP) 为 200 kHz 时增益达 41 dB, 为可穿戴健康监测设备提供轻量化、低功耗的信号放大方案. 尽管上述成果基于碳纳米管薄膜制备, 阵列碳纳米管 (A-CNT) 同样可参照这一柔性器件开发思路进一步提升性能。

5.2 碳基混频器

混频器通过非线性器件实现输入信号与本振信号的频率混合, 是射频前端中频率转换的核心单元. 碳基混频器依托阵列碳纳米管器件的双极传输特性与高载流子迁移率, 已实现从毫米波通信到太赫兹光生信号转换的应用覆盖, 技术突破集中在“宽频段频率转换”与“太赫兹光混频”两大场景。

混频器的核心工作原理是利用有源器件的非线性伏安特性 ($I_{DS}-V_{GS}$ 曲线非理想线性), 使输入的射频信号 (RF, 待处理信号, 频率 f_{RF}) 与本振信号 (LO, 参考信号, 频率 f_{LO}) 在器件内相互作用, 产生包含新频率成分的输出信号, 其中有用频率成分为中频信号 (IF, $f_{IF} = |f_{RF} \pm f_{LO}|$). 通过选择合适的 f_{LO} , 可将高频 RF 信号 (如毫米波、太赫兹) 转换为易于处理的中频信号, 降低后续信号处理电路的复杂度. 阵列碳纳米管器件的独特优势在于双极传输特性——当栅压在正负区间变化时, 器件可分别工作在 N 型导电 (电子主导) 与 P 型导电 (空穴主导) 模式, 其 $I_{DS}-V_{GS}$ 曲线在阈值电压附近呈现显著的非线性, 无需额外集成 N 型/P 型分立器件即可实现高效频率转换, 大幅简化电路结构并降低寄生参数 (如寄生电感、电容), 这是碳基混频器宽频段、低损耗的核心原因。

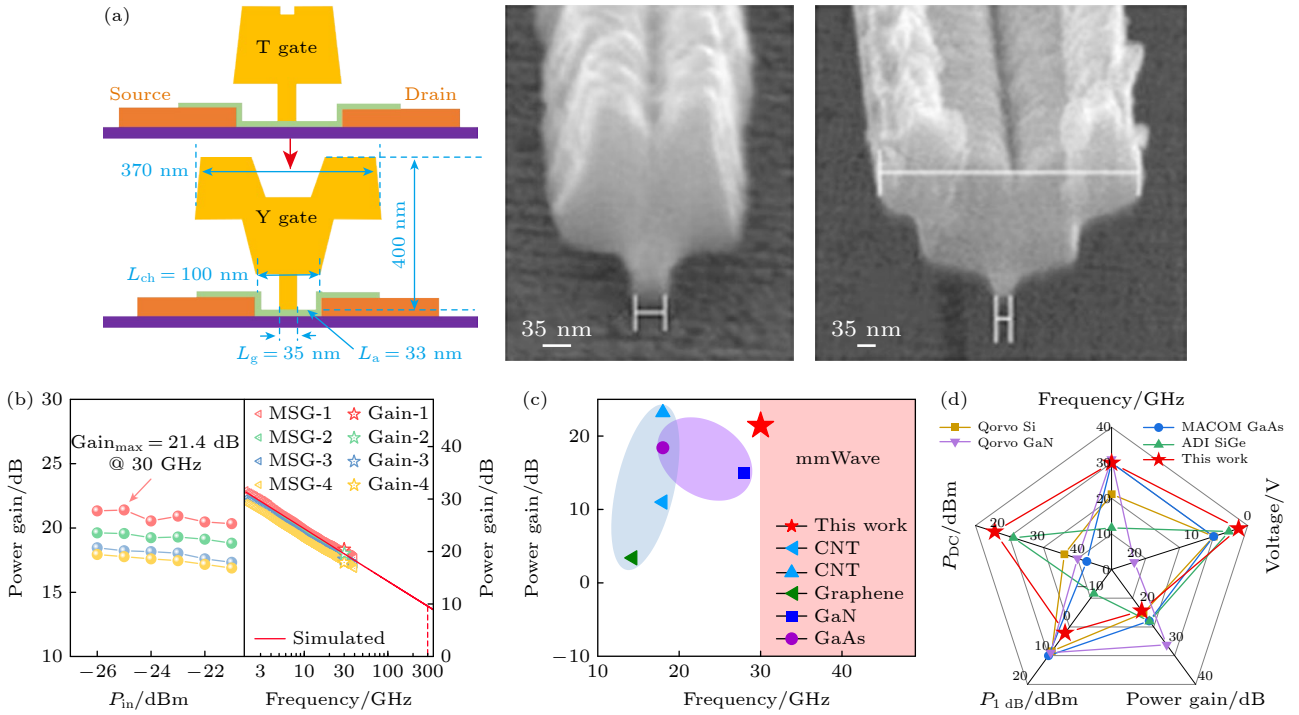


图9 基于Y形栅极A-CNT MOS FET的射频放大器性能^[38] (a) 采用Y形栅极和空气桥结构的碳纳米管射频晶体管示意图和SEM图像; (b) 左图为在30 GHz频率下对4个器件进行放大测试得到的功率增益与输入功率数据, 右图为4个放大器的功率增益以及相应的焊盘去嵌入功率增益曲线, 测量频率为30 GHz; (c) 与基于不同材料的其他放大器相比的功率增益, 红色星号代表(a)图中所示的最佳碳纳米管射频晶体管; (d) 与其他射频放大器42相比的综合射频性能, 包括频率、工作电压、增益、1 dB压缩点($P_{1\text{ dB}}$)和直流功耗(P_{DC})

Fig. 9. Structure and performance characteristics of A-CNT MOS FETs^[38]: (a) Schematic and SEM images of CNT RF transistor with Y-gate and air-bridge; (b) power gain versus input power data for amplification tests of four devices at a frequency of 30 GHz (left) and power gain of four amplifiers and corresponding pad de-embedding power gain curves (right); the measurement frequency is 30 GHz; (c) power gain compared with other amplifiers based on different materials; the red stars represent the best CNT RF transistors shown in (a); (d) comprehensive RF performance including frequency, working voltage, gain, 1 dB compression point ($P_{1\text{ dB}}$), and P_{DC} compared with that of RF amplifiers 42 made by the others.

2014年, 北京大学Wang等^[79]首次基于石英衬底原生阵列碳纳米管器件, 设计单端输入-单端输出结构混频器. 电路中, 碳纳米管晶体管同时作为非线性有源器件与开关, RF信号(41 GHz)与LO信号(40 GHz)通过耦合电容叠加后输入栅极, 利用器件双极传输特性的非线性, 在漏极输出包含 f_{RF} , f_{LO} , $f_{\text{RF}}+f_{\text{LO}}$ (81 GHz), $f_{\text{RF}}-f_{\text{LO}}$ (1 GHz)的混合信号; 通过输出端的带通滤波器(中心频率1 GHz)滤除其他频率成分, 最终实现1 GHz中频信号输出, 转换损耗(L_{C} , 输入输出功率比的分贝值, 越小性能越优)为12 dB, 且在40—45 GHz频段内损耗波动 <2 dB, 验证了碳基混频器的宽频段适配性.

2023年, Qian等^[73]为进一步提升混频器性能, 将晶体管栅长微缩至50 nm, 并制作有源混频器(如图11所示). 该器件在18—40 GHz频率下工作时, 其转换增益范围为-12.7—-17分贝, 输入三阶交调点(IIP3)超过25 dBm. 在所有纳米材料

中, 该混频器的放大和转换性能均达到最佳水平, 表明其在构建用于5G毫米波通信及其他未来电子应用的实用射频芯片方面具有潜力.

另一方面, 针对太赫兹成像、光谱分析等领域对“高功率太赫兹源”的需求, 碳基混频器可拓展至光-电转换场景, 即“光混频”——其工作原理是利用碳纳米管的高光吸收特性, 将两束频率相近的泵浦光(f_1 , f_2)转化为光生载流子, 再通过器件的非线性输运特性, 使载流子在外电场下产生差频电流, 最终输出太赫兹频段的电流信号($f_{\text{THz}} = |f_1 - f_2|$).

2014年, 贾婉丽等^[80]通过理论分析指出, 阵列碳纳米管的一维量子限制效应使其光吸收系数(10^4 cm^{-1})显著高于传统GaAs半导体(10^3 cm^{-1}), 可高效吸收泵浦光能量; 同时, 碳纳米管的高载流子迁移率($>10^4\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)可减少载流子复合损耗, 提升差频效率. 基于该理论, 该团队建立碳纳

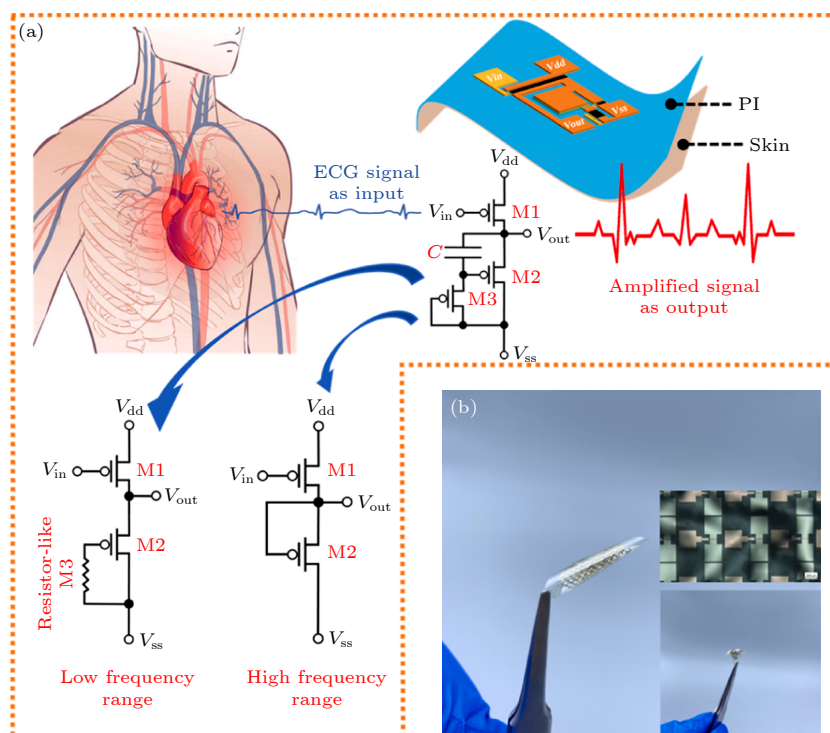


图 10 基于碳纳米管的柔性放大器器件^[71] (a) 放大器的机制示意图, 该放大器采用交流耦合负载工作, 可在不同交流信号频率范围内实现生理信号放大; (b) 所制备放大器的柔韧性验证, 插图展示了剥离器件阵列

Fig. 10. Flexible amplifier device based on carbon nanotubes^[71]: (a) Schematic diagram of the amplifier mechanism; this amplifier operates with an AC-coupled load and can achieve physiological signal amplification within different AC signal frequency ranges; (b) flexibility verification of the fabricated amplifier; the inset shows the peeled device array.

米管光混频器的功率输出模型: 当泵浦光功率 100 mW、碳纳米管密度 150 根/ μm 、外部偏压 2 V 时, 太赫兹输出功率可达 1.2 μW (为传统 GaAs 光混频器的 3 倍), 且在 0.3—1 THz 频段内功率波动 <15%.

然而在实际应用上, 基于碳纳米管的混频器和光电探测器虽均已实现, 但兼具高效光电探测与混频功能的一体化器件尚未突破, 亟待通过器件结构创新开创低功耗毫米波/太赫兹应用解决方案.

5.3 碳基移相器

移相器通过调控射频信号的相位, 实现相控阵天线的波束扫描, 其核心性能指标包括相位调控范围、插入损耗 (信号传输中的功率损耗) 与带宽. 碳基移相器依托阵列碳纳米管器件的高栅控效率与低寄生电阻, 已实现 Ka 波段的高精度相位调控, 并向单片微波集成电路 (MMIC) 方向发展, 满足相控阵雷达的集成化需求.

射频信号的相位由传输路径的电长度 (物理长度与介质介电常数的乘积) 或负载阻抗决定, 移相器的核心工作原理是通过有源器件调控电路的电

长度或负载阻抗, 使输出信号相对于输入信号产生特定相位差. 根据调控机制不同, 主流分为反射型与传输型: 反射型移相器基于“负载阻抗-反射系数相位”的关联特性进行调控——当射频信号经传输线入射至负载时, 负载阻抗的变化会改变反射信号的相位 (反射系数的相位角即相位差), 通过控制器件的导通/关断状态切换负载阻抗, 即可实现相位调控; 而传输型移相器基于“电导-传输常数”的关联特性进行调控——射频信号在传输线中传输时, 相位延迟与传输常数正相关, 而传输常数可通过有源器件的电导 ($G = dI_{DS}/dV_{DS}$) 调控 (电导变化会改变传输线的特性阻抗), 进而改变相位延迟量. 阵列碳纳米管器件的高栅控效率与宽频段响应, 使其在两种类型移相器中均具备优势. 然而, 在极高频段 (如 Ka 波段及以上), 器件的寄生电容 (C_{gs} , C_{gd}) 与沟道电阻的非线性频率响应成为制约相位精度的核心挑战. 由于阵列碳纳米管中金属性碳管的残留或半导体管的手性分布不均, 会导致移相器在不同偏置状态下的等效阻抗发生偏离, 产生非理想的相位抖动 (phase jitter). 此外, 碳基器件在切换状态时的动态电阻波动会引入额外的插入损耗

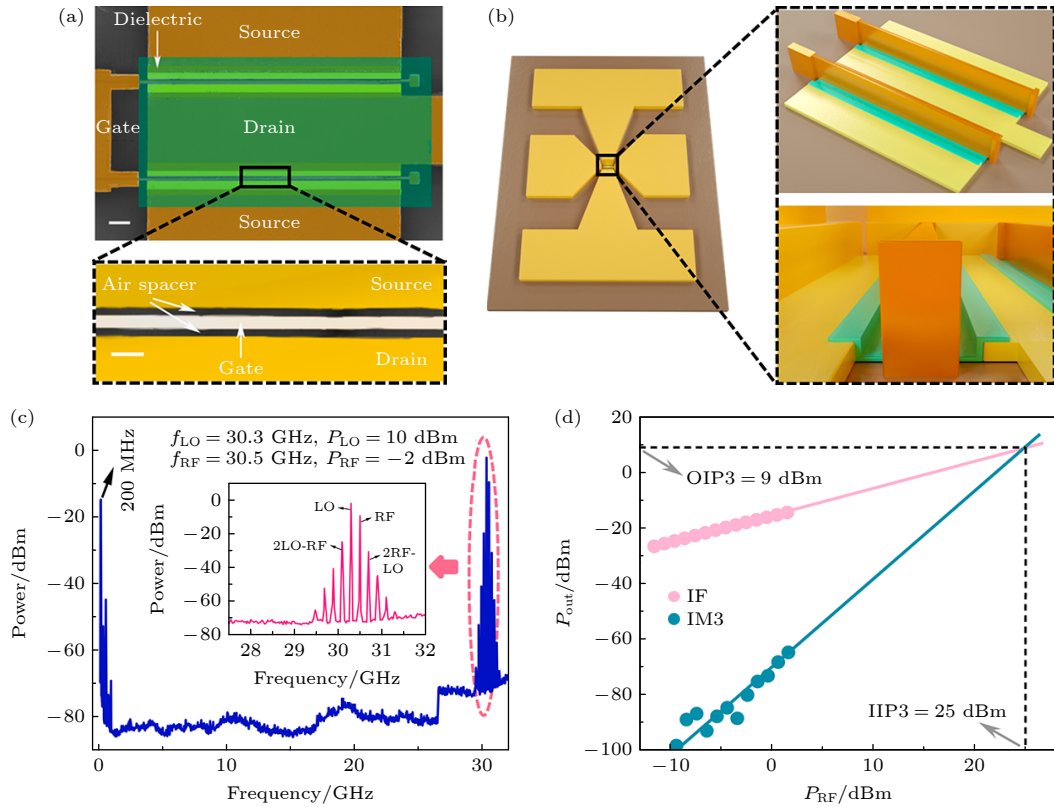


图 11 基于 ACNTs 的射频场效应晶体管混频器的结构和性能^[73] (a) 两个指状射频晶体管的 SEM 图像, 场效应晶体管沟道的总宽度为 $20\ \mu\text{m}$, 比例尺为 $1\ \mu\text{m}$; 插图显示了沟道区域的 SEM 图像, 栅极长度为 $50\ \text{nm}$, 空气间隔层约为 $35\ \text{nm}$, 比例尺为 $100\ \text{nm}$; (b) 射频晶体管示意图; (c) 在 $30\ \text{GHz}$ 频率下具有高转换增益的输出频谱; (d) $30\ \text{GHz}$ 频率下测得的中频基频和三阶互调输出功率随射频功率的变化; 为验证线性度, 测得 IIP3 为 $25\ \text{dBm}$

Fig. 11. Structure and performance of the RF field-effect transistor mixer based on ACNTs^[73]. (a) SEM image of two finger-shaped RF field-effect transistors; the total width of the field-effect transistor channel is $20\ \mu\text{m}$, scale bar = $1\ \mu\text{m}$. The inset shows the SEM image of the channel region; the gate length is $50\ \text{nm}$, the air spacer layer is approximately $35\ \text{nm}$, scale bar = $100\ \text{nm}$. (b) Schematic diagram of the RF transistor. (c) Output spectrum with high conversion gain at a frequency of $30\ \text{GHz}$. (d) Measured IF fundamental frequency and third-order intermodulation output power as a function of RF power at a frequency of $30\ \text{GHz}$. To verify linearity, the measured IIP3 is $25\ \text{dBm}$.

波动 (insertion loss variation), 这对相控阵天线的增益平坦度提出了严峻挑战。

为了应对这种集成化瓶颈, 2025 年, 北京大学 Qiu 等^[81] 成功突破 Ka 波段 ($26.5\text{--}40\ \text{GHz}$) 反射型移相器的集成化瓶颈: 如图 12 所示, 基于阵列碳纳米管器件制备单片微波集成电路 (MMIC), 可在 $40\ \text{GHz}$ 频段实现 $14\ \text{dB}$ 的回波损耗、 $4\ \text{dB}$ 的插入损耗和 55° 的相位偏移, $42\ \text{GHz}$ 频段最大相位偏移可达 65° 。在 12% 的带宽范围内, 其回波损耗优于 $10\ \text{dB}$, 芯片面积仅为 $1\ \text{mm}^2$ 。该成果为毫米波应用领域 (包括相控阵系统和无线通信系统) 提供了新的技术突破。

此外, 碳基射频电路的集成化也取得进展。2019 年北京大学团队 Liu 等^[82-84] 实现碳纳米管互补型千兆赫兹集成电路, 成功应用于无线传感器接口系统, 电压增益达 $35\ \text{dB}$, 静态功耗仅为硅基同

类电路的 $1/3$, 验证了碳基集成电路在低功耗无线传感节点中的应用优势。

由此综合来看, 碳基射频电路的核心优势体现在三方面: 一是宽频段覆盖, 依托阵列碳纳米管器件的高 f_T/f_{max} , 电路可从微波频段 ($1\text{--}30\ \text{GHz}$) 延伸至太赫兹频段 ($>300\ \text{GHz}$), 然而, 随着频率升至太赫兹量级, 器件的栅极寄生电阻与漏源接入电阻成为限制增益的关键。未来的技术路径需通过“自对准栅极工艺”和“Y 形栅结构”进一步缩减物理栅长至 $20\ \text{nm}$ 以下, 并攻克高频封装中的引线寄生电感效应, 以充分释放碳管的本质频率潜力。覆盖 $5\text{G}/6\text{G}$ 、雷达等多场景需求; 二是低非线性失真, 碳基器件优异的线性度使电路在大功率信号下仍保持低失真, 尤其适用于多载波通信; 但必须指出, 在大功率连续波工作模式下, 阵列碳管与衬底间的界面热阻 (TBR) 会导致严重的自热效应, 进

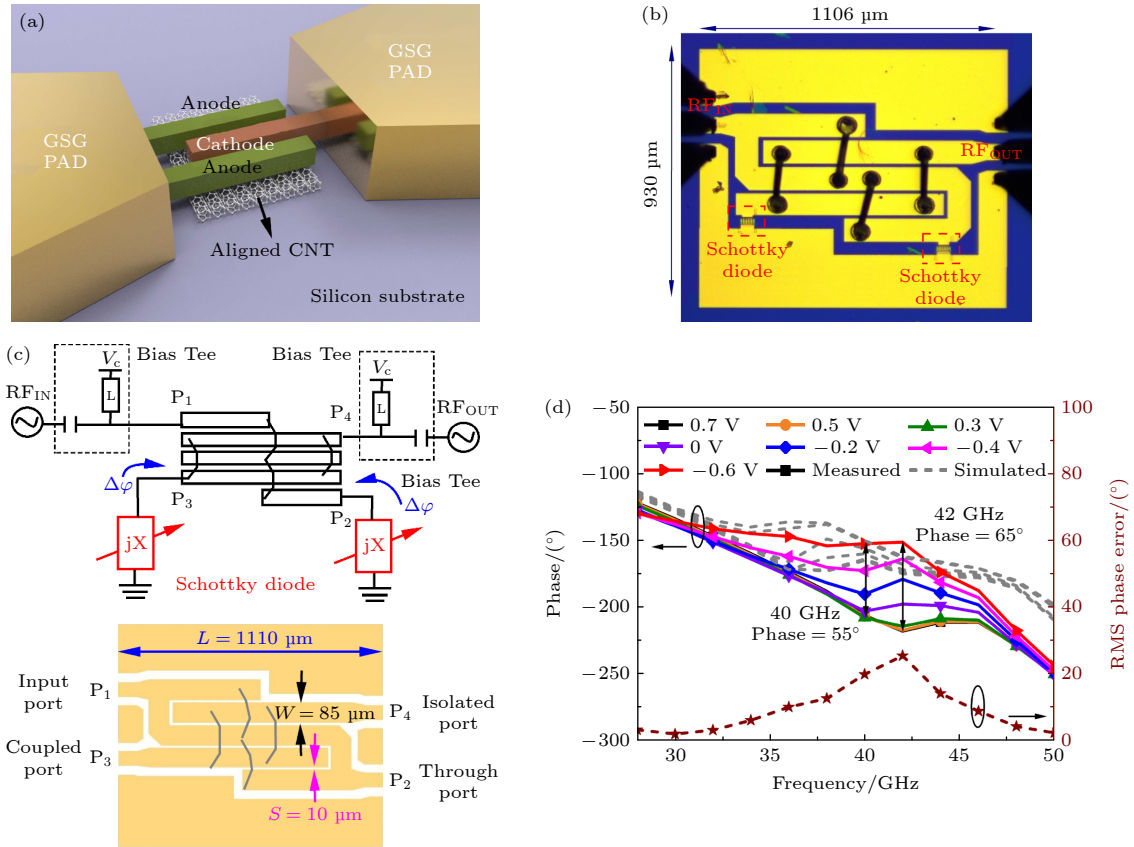


图 12 基于 A-CNT MOS FET 的移相器^[81] (a) 晶体管示意图; (b) 芯片显微照片; (c) 结构示意图与尺寸图; (d) 不同频率下实测与仿真相位偏移及均方根相位误差对比

Fig. 12. Phase shifter based on A-CNT MOS FET^[81]: (a) Schematic diagram of the transistor; (b) microscopic image of the chip; (c) schematic diagram of the structure and dimension diagram; (d) comparison of measured and simulated phase shift and root-mean-square (RMS) phase error at different frequencies.

而引发跨导压缩 (transconductance compression) 和线性度衰减. 因此, 系统级集成亟需引入高导热衬底 (如金刚石、碳化硅) 或开发微流控散热技术, 以解决大功率下的热可靠性瓶颈, 这也是实现商用 $P_{1\text{ dB}}$ 指标的先决条件. 三是多场景适配, 柔性碳基电路可满足可穿戴设备需求, 单片集成 MMIC 可实现小型化, 填补传统射频电路的场景空白. 但产业化落地仍受限于晶圆级制备的一致性. 目前碳管直径的标准差波动会导致 V_{th} 失配, 在复杂 MMIC 电路中会引起各级阻抗失配及带宽窄化. 未来的路线图应聚焦于“电子级”高纯度碳管阵列的规模化定向技术, 并建立适配碳基特性的紧凑模型 (compact model), 实现从实验室向工业化的跨越.

6 应用场景与系统集成前景

凭借太赫兹级电流增益 f_T 、超功率增益及优异线性度等核心性能突破, 基于阵列碳纳米管的射

频器件已从材料制备突破、器件结构创新逐步延伸至实际应用探索, 其原子级超薄沟道、高载流子迁移率与低寄生参数的本征优势, 使其在 5G/6G 通信、毫米波雷达、柔性电子等高端射频领域具备不可替代的应用潜力, 同时为下一代射频系统的集成化、小型化与低功耗化提供了全新解决方案, 产业化落地与系统级集成已进入关键探索阶段.

在 5G 增强与 6G 通信领域, 太赫兹频段 (0.3—3 THz) 作为满足超高速传输需求的关键窗口, 亟需高性能射频器件支撑信号收发. 阵列碳纳米管射频器件已实现优秀的射频性能^[21,38,71], 其高 f_T 与 f_{max} 特性可满足太赫兹信号的放大与频率转换需求, 优异的线性度能保障多载波通信中的信号纯度, 低功耗优势 (相比石墨烯晶体管偏置电流更小)^[20] 可缓解高频系统的能耗压力, 未来有望作为太赫兹基站核心放大器、终端射频前端芯片, 助力实现 100 Gbps 以上的超高速无线传输, 解决 5G/6G 中大容量数据交互、短距离高速连接等场景的技术瓶颈.

在毫米波雷达与传感领域, A-CNT 射频器件兼具高跨导与低噪声特性, $P_{1\text{ dB}} = 14\text{ dBm}$ 的线性工作范围^[39]可避免雷达信号放大过程中的失真, 晶圆级制造技术^[40]能满足雷达阵列的规模化集成需求. 在自动驾驶场景中, 其可用于车载毫米波雷达的信号放大模块, 提升目标探测的距离精度与抗干扰能力; 在医疗成像领域, 则可依托低功耗与高频响应优势, 实现小型化、便携式太赫兹成像设备, 助力早期病灶检测等精准医疗应用.

在柔性与可穿戴电子领域, A-CNT 阵列的宏观柔性与薄膜化特性天然适配场景需求, 基于 A-CNT 的射频晶体管可通过柔性衬底制备, 结合其优异的高频性能, 可集成于柔性通信终端、可穿戴健康监测设备中. 例如, 柔性 A-CNT 射频放大器可嵌入智能衣物实时传输生理监测数据^[71], 且在曲率弯曲状态下仍保持高射频性能^[70], 可应用于柔性通信终端、航空航天柔性传感系统.

总之, 未来的技术路线如图 13 所示, 1—3 年内实现材料标准化与中试线建立, 重点解决半导体纯度向“电子级六九标准”的跨越, 建立适配 CMOS 工艺的 8 inch 碳基射频中试线, 实现接触电阻一致性误差控制在 10% 以内. 5—7 年内实现核心器件结构突破与太赫兹初步应用. 通过 T 型、Y 形栅工艺的大规模流片, 将 f_{max} 稳定在 1.5—2 THz. 在 5G-Advanced 基站中实现低噪声放大器 (LNA) 的小规模替代, 验证其在极端温度环境下的可靠性. 7—15 年内实现全碳基射频单片集成 (RF-SoC). 摆脱“碳搭硅”的混合集成模式, 实现射频前端、基带处理电路的单片全碳集成. 目标是支撑 6G 全球覆盖的高效率、低功耗太赫兹收发系统, 并在柔性保形雷达领域形成颠覆性优势.

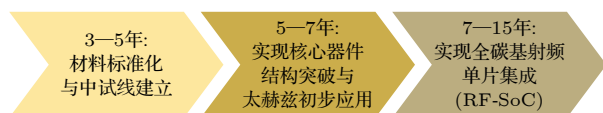


图 13 技术路线图

Fig. 13. Technical route.

综上所述, 当前 A-CNT 射频器件的产业化已具备核心性能基础, 后续需要完善晶圆级量产工艺, 解决碳纳米管直径均匀性、阵列排列精度等规模化生产问题, 并开发适配 A-CNT 特性的封装技术, 降低高频寄生效应. 随着这些技术的成熟, A-CNT 射频器件有望在 5G 增强型基站、6G 太赫

兹终端、高端毫米波雷达等场景率先实现产业化应用, 逐步替代传统硅基、砷化镓器件, 推动射频电子技术的代际升级.

参考文献

- [1] Haensch W, Nowak E J, Dennard R H, Solomon P M, Bryant A, Dokumaci O H, Kumar A, Wang X, Johnson J B, Fischetti M V 2006 *IBM J. Res. Dev.* **50** 339
- [2] Iijima S 1991 *Nature* **354** 56
- [3] Avouris P, Chen Z, Perebeinos V 2007 *Nat. Nanotech.* **2** 605
- [4] Peng L M, Zhang Z Y, Wang S 2014 *Mater. Today* **17** 433
- [5] Heller I, Kong J, Williams K A, Dekker C, Lemay S G 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 7353
- [6] Javey A, Guo J, Wang Q, Lundstrom M, Dai H 2003 *Nature* **424** 654
- [7] Javey A, Guo J, Farmer D B, Wang Q, Yenilmez E, Gordon R G, Lundstrom M, Dai H 2004 *Nano Lett.* **4** 1319
- [8] Zhang Z Y, Liang X L, Wang S, Yao K, Hu Y F, Zhu Y Z, Chen Q, Zhou W W, Li Y, Yao Y G, Zhang J, Peng L M 2007 *Nano Lett.* **7** 3603
- [9] Zhang Z Y, Wang S, Ding L, Liang X L, Pei T, Shen J, Xu H L, Chen Q, Cui R L, Li Y, Peng L M 2008 *Nano Lett.* **8** 3696
- [10] Hartmann M, Hermann S, Marsh P F, Rutherglen C, Wang D W, Ding L, Peng L M, Claus M, Schröter M 2021 *IEEE J. Microw.* **1** 275
- [11] Hartmann R R, Kono J, Portnoi M E 2014 *Nanotechnology* **25** 322001
- [12] Rutherglen C, Jain D, Burke P 2009 *Nat. Nano.* **4** 811
- [13] Pennington G, Goldsman N 2003 *Phys. Rev. B* **68** 045426
- [14] Perebeinos V, Tersoff J, Avouris P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 086802
- [15] Zhou X J, Park J Y, Huang S M, Liu J, McEuen P L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 146805
- [16] Franklin A D, Luisier M, Han S J, Tulevski G, Breslin C M, Gignac L, Lundstrom M S, Haensch W 2012 *Nano Lett.* **12** 758
- [17] Franklin A D, Chen Z 2010 *Nat. Nano.* **5** 858
- [18] Kienle D, Léonard F 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 026601
- [19] Guo J, Hasan S, Javey A, Bosman G, Lundstrom M 2005 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **4** 715
- [20] Koswatta S O, Valdes-Garcia A, Steiner M B, Lin Y M, Avouris P 2011 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **59** 2739
- [21] Ding L, Zhang Z Y 2022 *Sci. China Inf. Sci.* **65** 117301
- [22] Wakerly J F 1994 *Digital Design: Principles and Practices* (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall)
- [23] Zhao C Y, Zhong D L, Han J, Liu L J, Zhang Z Y, Peng L M 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1808574
- [24] Akinwande D, Liang J, Chong S, Nishi Y, Wong H S P 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 124514
- [25] Cao Q, Han S J, Penumatcha A V, Frank M M, Tulevski G S, Tersoff J, Haensch W E 2015 *ACS Nano* **9** 1936
- [26] Dresselhaus G, Riichiro S, Dresselhaus M S, Eklund P C 1998 *Physical Properties of Carbon Nanotubes* (Singapore: World Scientific)
- [27] Ortiz-Conde A, García Sánchez F J, Liou J J, Cerdeira A, Estrada M, Yue Y 2002 *Microelectron. Reliab.* **42** 583
- [28] Mizuno T, Okumura J, Toriumi A 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 2216
- [29] Chau R, Datta S, Doczy M, Doyle B, Jin B, Kavalieros J, Majumdar A, Metz M, Radosavljevic M 2005 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **4** 153

- [30] Dürkop T, Getty S A, Cobas E, Fuhrer M S 2004 *Nano Lett.* **4** 35
- [31] Qiu C, Zhang Z Y, Xiao M, Zhong D, Peng L M 2017 *Science* **355** 271
- [32] Ding L, Liang S, Pei T, Zhang Z Y, Wang S, Zhou W, Liu J, Peng L M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 263116
- [33] Ding L, Wang S, Zhang Z Y, Zeng Q S, Wang Z X, Pei T, Yang L J, Liang X L, Shen J, Chen Q, Cui R L, Li Y, Peng L M 2009 *Nano Lett.* **9** 4209
- [34] Solomon P M 1982 *Proc. IEEE* **70** 489
- [35] Li W Z, Xie S S, Qian L X, Chang B H, Zou B S, Zhou W Y, Zhao R A, Wang G 1996 *Science* **274** 1701
- [36] Amram Bengio E, Senic D, Taylor L W, et al. 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 203102
- [37] Zhang Z, Zhang X G, Huang Z, Chang Y K, Chang H D, Huang S, Liu H G, Sun B 2023 *ACS Appl. Nano Mater.* **6** 3293
- [38] Zhou J S, Pan Z P, Ding L, Xu L, Cheng X H, Li H T, Yao F F, Jin C H, Zhu M G, Liu L J, Shi H W, Zhang Z Y, Peng L M 2025 *Nat. Electron.* **8** 949
- [39] Cao Y, Brady G J, Gui H, Rutherglen C, Arnold M S, Zhou C W 2016 *ACS Nano* **10** 6782
- [40] Rutherglen C, Kane A A, Marsh P F, Cain T A, Hassan B I, AlShareef M R, Zhou C, Galatsis K 2019 *Nat. Electron* **2** 530
- [41] Zhang G Y, Qi P F, Wang XR, Lu Y R, Li X L, Tu R, Bangsaruntip S, Mann D, Zhang L, Dai H J 2006 *Science* **314** 974
- [42] Hassanien A, Tokumoto M, Umek P, Vrbancic D, Mozetic M, Mihailovic D, Venturini P, Pejovnik S 2005 *Nanotechnology* **16** 278
- [43] Yang C M, An K H, Park J S, Park K A, Lim S C, Cho S H, Lee Y S, Park W, Park C Y, Lee Y H 2006 *Phys. Rev. B* **73** 075419
- [44] Huang H, Maruyama R, Noda K, Kajiuura H, Kadono K 2006 *J. Phys. Chem. B* **110** 7316
- [45] Zhang Y Y, Zhang Y, Xian X J, Zhang J, Liu Z F 2008 *J. Phys. Chem. C* **112** 3849
- [46] Ding L, Tselev A, Wang J Y, Yuan D L, Chu H B, McNicholas T P, Li Y, Liu J 2009 *Nano Lett.* **9** 800
- [47] Yao Y G, Feng C Q, Zhang J, Liu Z F 2009 *Nano Lett.* **9** 1673
- [48] Wang W L, Bai X D, Liu K H, Xu Z, Golberg D, Bando Y, Wang E G 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 6530
- [49] Yang F, Wang X, Zhang D Q, Yang J A, Luo D, Xu Z W, Wei J K, Wang J Q, Xu Z, Peng F, Li X M, Li R M, Li Y L, Li M H, Bai X D, Ding F, Li Y 2014 *Nature* **510** 522
- [50] Sarker B K, Shekhar S, Khondaker S I 2011 *ACS Nano* **5** 6297
- [51] Shekhar S, Stokes P, Khondaker S I 2011 *ACS Nano* **5** 1739
- [52] Kim P, Baik S, Suh K Y 2008 *Small* **4** 92
- [53] LeMieux M C, Roberts M, Barman S, Jin Y W, Kim J M, Bao Z 2008 *Science* **321** 101
- [54] Roberts M E, LeMieux M C, Sokolov A N, Bao Z 2009 *Nano Lett.* **9** 2526
- [55] Brady G J, Way A J, Safron N S, Evensen H T, Gopalan P, Arnold M S 2016 *Sci. Adv.* **2** e1601240
- [56] Li X L, Zhang L, Wang X R, Shimoyama I, Sun X M, Seo W S, Dai H J 2007 *J. Am. Chem. Soc.* **129** 4890
- [57] Druzhinina T, Hoepfner S, Schubert U S 2011 *Adv. Mater.* **23** 953
- [58] He X W, Gao W L, Xie L J, Li B, Zhang Q, Lei S D, Robinson J M, H  roz E H, Doorn S K, Wang W P, Vajtai R, Ajayan P M, Adams W W, Hauge R H, Kono J 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 633
- [59] Cao Q, Han S J, Tulevski G S, Zhu Y, Lu D D, Haensch W 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 180
- [60] Zhang R F, Zhang Y Y, Zhang Q, Xie H H, Qian W Z, Wei F 2013 *ACS Nano* **7** 6156
- [61] Cress C D, Datta S 2013 *Science* **341** 140
- [62] Du F, Felts J R, Xie X, Song J Z, Li Y H, Rosenberger M R, Islam A E, Jin S H, Dunham S N, Zhang C X, Wilson W L, Huang Y G, King W P, Rogers J A 2014 *ACS Nano* **8** 12641
- [63] Xie X, Jin S H, Wahab M A, et al. 2014 *Nat. Commun.* **5** 5332
- [64] Xie X, Wahab M A, Li Y, et al. 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 134303
- [65] Jin S H, Dunham S N, Song J, et al. 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 347
- [66] Si J, Zhong D, Xu H, Xiao M, Yu C, Zhang Z Y, Peng L M 2018 *ACS Nano* **12** 627
- [67] Xie S S, Li W Z, Wang C Y, Xu L W, Zhang H, Zhang Y, Qian L X 1997 *Science in China Series A* **40** 971
- [68] Peng L M, Zhang Z Y, Wang S, Liang X L 2012 *AIP Adv.* **2** 041403
- [69] Liu L J, Han J, Xu L, Zhou J S, Zhao C Y, Ding S J, Shi H W, Xiao M M, Ding L, Ma Z, Jin C H, Zhang Z Y, Peng L M 2020 *Science* **368** 850
- [70] Cheng X H, Pan Z P, Fan C W, Wu Z C, Ding L, Peng L M 2024 *Sci. Adv.* **10** ead11636
- [71] Zhang H T, Wang Y W, Ye H D, Yu X G, Liu J, Hu J, Luo Z B, Wang H, Zhang C X, Xiang L, Pan A L 2025 *Appl. Mater. Today* **44** 102788
- [72] Steiner M, Engel M, Lin Y M, Wu Y, Jenkins K, Farmer D B, Humes J J, Yoder N L, Seo J W T, Green A A, Hersam M C, Krupke R, Avouris P 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 053123
- [73] Qian J L, Cheng X H, Zhou J S, Cao J X, Ding L 2023 *ACS Nano* **17** 14742
- [74] Shi H W, Ding L, Zhong D L, Han J, Liu L J, Xu L, Sun P K, Wang H, Zhou J S, Fang L, Zhang Z Y, Peng L M 2021 *Nat. Electron.* **4** 405
- [75] Kocabas C, Dunham S, Cao Q, Cimino K, Ho X, Kim H-S, Dawson D, Payne J, Stuenkel M, Zhang H, Banks T, Feng M, Rotkin S V, Rogers J A 2009 *Nano Lett.* **9** 1937
- [76] Ren L, Zhou J S, Pan Z P, Li H T, Ding L, Zhang Z Y, Peng L M 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 12813
- [77] Xue C Q, Wu W F, Yang Y J, Zhou J S, Ding L, Wang S 2023 *Small* **19** e2207628
- [78] Zhou J S, Liu L J, Shi H W, Zhu M G, Cheng X H, Ren L, Ding L, Peng L M, Zhang Z Y 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 37475
- [79] Wang Z X, Liang S B, Zhang Z Y, Liu H G, Zhong H, Ye L H, Wang S, Zhou W W, Liu J, Chen Y B, Zhang J, Peng L M 2014 *Adv. Mater.* **26** 645
- [80] Jia W L, Zhao L, Hou L, Ji W L, Shi W, Qu G H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 077201 (in Chinese) [贾婉丽, 赵立, 侯磊, 纪卫莉, 施卫, 屈光辉 2014 物理学报 **63** 077201]
- [81] Qiu H R, Zhuo M R, Ding L, Wang D F 2025 *IEEE Microw. Wireless Technol. Lett.* **35** 1839
- [82] Liu L J, Ding L, Zhong D L, Han J, Wang S, Meng Q H, Qiu C G, Zhang X Y, Peng L M, Zhang Z Y 2019 *ACS Nano* **13** 2526
- [83] Zhong D L, Shi H W, Ding L, Zhao C Y, Liu J X, Zhou J S, Zhang Z Y, Peng L M 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 42496
- [84] Liu Y F, Zhang Z Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 068503 (in Chinese) [刘一凡, 张志勇 2022 物理学报 **71** 068503]

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

Research progress in radio-frequency electronics based on aligned carbon nanotube arrays^{*}LI Wenqi¹⁾ PAN Zipeng²⁾ DING Li^{1)2)†} ZHANG Zhiyong^{1)2)‡}¹⁾ (*Hunan Institute of Advanced Sensing and Information Technology, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)²⁾ (*Key Laboratory for the Physics and Chemistry of Nanodevices, Center for Carbon-based Electronics, School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

(Received 21 March 2026; revised manuscript received 28 April 2026)

Abstract

As silicon-based transistors advance toward sub-3-nm process nodes, issues such as excessive leakage current and parasitic effects pose severe constraints on further performance scaling. Carbon nanotubes (CNTs) have emerged as a leading candidate for overcoming the performance limitations of conventional semiconductor radio-frequency (RF) devices, owing to their intrinsic advantages, including high carrier mobility, high saturation velocity, and low parasitic parameters. This paper systematically reviews recent progress in RF electronics based on aligned carbon nanotube arrays. It introduces a comprehensive performance evaluation framework encompassing key electrical metrics (e.g., threshold voltage and transconductance) as well as RF figures of merit, including current gain cutoff frequency (f_T), maximum oscillation frequency ($f_{\max}$), 1 dB gain compression point (P_{1dB}), and input third-order intercept point (IIP3). Technological advancements in chemical vapor deposition (CVD) and solution-based deposition techniques are discussed, highlighting the realization of wafer-scale (10 cm silicon wafer) aligned CNT arrays with high orientation and ultra-high purity (>99.9999%). Structural innovations in carbon-based RF devices, including T-gate and Y-gate architectures, are summarized, along with their associated performance breakthroughs. Notably, in 2025, a Y-gate CNT device achieved an $f_{\max}$ of 1024 GHz, representing the first breakthrough into the terahertz frequency regime. The operating principles and performance advantages of carbon-based RF circuits, such as amplifiers, mixers, and phase shifters, are analyzed in detail. Among these, millimeter-wave RF amplifiers have exhibited overall performance metrics that approach commercial-grade standards. Finally, the application potential of this technology in 5G-Advanced/6G communications, millimeter-wave radar, and flexible electronics is explored. The paper also addresses current industrialization challenges, including diameter uniformity, contact resistance optimization, and high-frequency packaging, that hinder the scaling of this technology from laboratory research to practical applications.

Keywords: aligned carbon nanotube arrays, field-effect transistors, radio-frequency devices, cutoff frequency, millimeter waves

DOI: [10.7498/aps.75.20260402](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260402)CSTR: [32037.14.aps.75.20260402](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260402)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62171004).

† Corresponding author. E-mail: lding@pku.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zyzhang@pku.edu.cn

基于阵列碳纳米管的射频电子学研究进展

李玟琪 潘梓澎 丁力 张志勇

Research progress in radio-frequency electronics based on aligned carbon nanotube arrays

LI Wenqi PAN Zipeng DING Li ZHANG Zhiyong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 180803 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260402

CSTR: 32037.14.aps.75.20260402

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纳米管场效应晶体管的X射线辐照效应

X-ray irradiation effects of carbon nanotube field-effect transistors

物理学报. 2025, 74(5): 058501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241670>

垂直短沟道二硫化钼场效应晶体管

Vertical short-channel MoS₂ field-effect transistors

物理学报. 2022, 71(21): 218502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220738>

非对称电极对二维SiC场效应晶体管工作性能调控与低功耗优化

Performance and low power consumption of two-dimensional SiC field effect transistors regulated and optimized with asymmetric electrodes

物理学报. 2025, 74(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250849>

径向压缩碳纳米管的电子输运性质

Electron transport properties of carbon nanotubes with radial compression deformation

物理学报. 2022, 71(2): 027301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211370>

基于金刚石氮空位色心系综可调谐毫米波受激辐射

Controllable millimeter-wave stimulated radiations from nitrogen-vacancy-centers in diamond

物理学报. 2026, 75(17): 027301 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260303>

碳纳米管和碳化硅纳米管热导率的分子动力学研究

Molecular dynamics study of thermal conductivity of carbon nanotubes and silicon carbide nanotubes

物理学报. 2022, 71(3): 030202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210969>