面向未来高性能电子器件的石墨烯纳米带*

日博赛^{1,2} 娄 硕¹ 沈沛约¹ 史志文^{1,↑}
(1 上海交通大学物理与天文学院 人工结构及量子调控教育部重点实验室 上海 200240)
(2 日内瓦大学量子材料物理系 瑞士日内瓦 1211)

Graphene nanoribbons for next-generation high-performance electronics

LYU Bo-Sai^{1,2} LOU Shuo¹ SHEN Pei-Yue¹ SHI Zhi-Wen^{1,†} (1 Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China) (2 Department of Quantum Matter Physics, University of Geneva, Geneva 1211, Switzerland)

摘要 石墨烯纳米带具有可调节的带隙和较高的载流子迁移率,是未来高性能纳 米电子器件的理想候选材料之一。然而,可用于电子器件的高质量石墨烯纳米带的制备一 直是一个巨大挑战。文章关注高质量石墨烯纳米带的制备,重点介绍近年来采用金属纳米 颗粒催化生长纳米带方面的重要进展,尤其是运用该技术在六方氮化硼层间嵌入式生长超 高质量石墨烯纳米带的最新成果。基于这种层间纳米带的场效应晶体管表现出优异的性能, 有望在将来的碳基纳米电子器件中扮演重要的角色。最后讨论该领域未来可能面临的机遇 与挑战。

关键词 石墨烯纳米带,纳米颗粒,催化生长,氮化硼封装,碳基纳米电子学

Abstract Graphene nanoribbons possess a tunable bandgap and high carrier mobility, making them an ideal candidate for future high-performance nanoelectronic devices. However, the preparation of high-quality nanoribbons suitable for electronic applications has been a significant challenge. This article focuses on their nanoparticle-catalyzed fabrication and the use of this technique in growing high-quality nanoribbons embedded within hexagonal boron nitride stacks. Field-effect transistors based on this structure demonstrate excellent performance, showing promise for future carbon-based nanoelectronics. Finally, we explore the potential opportunities and challenges in this field.

Keywords graphene nanoribbons, nanoparticle, catalytic growth, hBN encapsulation, carbon-based nanoelectronics

2024-06-20收到

† email: zwshi@sjtu.edu.cn DOI: 10.7693/wl20241003 CSTR: 32040.14.wl20241003

^{*} 国家重点基础研发计划(批准号: 2022YFA1402702; 2021YFA1202902)、国家自然科学基金(批准号: 1207040057; 1237042375)资助项目

1 引言

硅,元素周期表中的第14号元素,是现代 集成电路与电子芯片的核心材料。随着微纳加工 技术的迅猛发展,硅基半导体器件的性能已经非 常接近其理论极限。半导体器件的极限性能主要 取决于半导体材料中载流子的迁移率。然而,硅 材料的载流子迁移率并不高(小于1000 cm²V⁻¹s⁻¹), 严重制约了硅基器件的响应频率和运算速度,难 以满足人们日益增长的大规模高速计算的需求。

与硅处在同一主族的第6号元素碳的一种二 维新结构——石墨烯,于2004年被首次实验发 现,为高性能电子器件的开发带来了曙光^[1]。石 墨烯由单层碳原子以蜂窝状排列而成(图1),具有 独特的电子能带结构和优异的电子学特性。在石 墨烯中,电子表现为无质量的狄拉克费米子,可 以用极快的速度穿梭,其载流子迁移率可达硅的 100倍以上^[2]。超高的载流子迁移率使电子器件运 行频率更高,同时功耗更低。此外,一维碳纳米



图1 石墨烯、碳纳米管和石墨烯纳米带的原子结构



结构,如碳纳米管和石墨烯纳米带(图1),也具备 这些优势,基于这些低维材料的"碳基纳米电子 学"有望开启信息社会的新时代。

2 石墨烯纳米带的优势

尽管石墨烯的载流子迁移率很高,达到硅的 百倍以上,但其零带隙的电子结构限制了其在电 子器件中的应用(图2)。相比之下,一维碳纳米管 和石墨烯纳米带中由于量子限域效应的存在,可 以打开带隙,从而表现出半导体特性^[3]。然而, 碳纳米管的电子性质依赖于其手性结构,如果不 进行筛选,实验制备的碳纳米管中三分之一将表 现为金属性^[4]。大规模集成电路的制造要求半导 体性碳纳米管的纯度必须达到99.9999%以上,目 前只有极少数实验室可以达到这个要求^[5]。因此, 在碳纳米管手性筛选和可控生长方面的研究依然 任重道远。

相比之下,石墨烯纳米带的能隙与其宽度成 反比,因此更容易进行精细调控³³,从而便于根

> 据电子学中的特定应用(例如晶体管、传 感器和量子器件)进行定制^[6]。比如,宽度 小于 5 nm 的"超窄石墨烯纳米带"具有 与硅相当的带隙,适合应用于晶体管^[7]。 此外,石墨烯纳米带的电子结构还可以通 过边缘结构、应变以及外加电场等方式进 行进一步调控,从而制备出功能性电子器 件和量子器件^[8]。

3 早期石墨烯纳米带制备方法

为了获得高质量的石墨烯纳米带,人 们已经发展出多种制备方法。这些方法大 致可以分为"自上而下"和"自下而上" 两大类。

自上而下法是通过对前体材料(比如 石墨块材、石墨烯、碳纳米管等)进行减 材加工来得到纳米条带。先进刻蚀法是 一种最常用且直观的将二维石墨烯加工 成一维石墨烯纳米带的方法^[9]。该方法通 常借助电子束曝光等技术在目标区域(绿色)加工 出一维的掩模板,然后通过反应离子刻蚀来去除 不需要的石墨烯部分,最终留下一维纳米带结构, 如图3(a)所示。然而受限于微纳加工的精度,刻 蚀获得的纳米带宽度通常大于10 nm,且边缘比 较粗糙,因此带隙很小,迁移率较低。研究人员 还发现,利用氢等离子体对石墨烯进行各向异性 刻蚀可以得到特定边缘结构的纳米带^[10]。这种方 法流程简单且与现有半导体制程工艺契合,非常 适合于晶圆级石墨烯纳米带的制备。

碳纳米管可以看作是卷曲的石墨烯纳米带, 因此可以利用等离子体刻蚀和超声等方法剪开碳 纳米管的管壁,使其展开成石墨烯纳米带,即 "碳纳米管解锁法"^[11,12],如图3(b)所示。这种巧 妙的方法可以制备出边缘光滑、宽度均匀且长度 达到微米量级的高质量石墨烯纳米带^[13]。然而, 碳纳米管解锁法并非完美。首先,通过该方法获 得的纳米带产率低,且纯度不高(通常是纳米带和 碳纳米管的混合物),不利于大规模工业应用。另 外,该方法难以制备出宽度小于10 nm的超窄石 墨烯纳米带,带隙太小,因此难以满足场效应晶 体管的要求。

相较于"自上而下"方法,"自下而上"的方 法往往可以实现更可控的规模化制备,有机会获 得能满足实际应用的超窄石墨烯纳米带。目前在 该类方法中,最具代表性的是分子合成法。在贵 金属衬底辅助下,通过把精确设计的有机化学分 子聚合和脱氢成环,合成石墨烯纳米带^[14],如图3 (c)所示。这种方法最大的优势在于可以实现原子 级精确的超窄石墨烯纳米带的规模化制备。但是 该方法也存在显著缺陷。首先,得到的石墨烯纳 米带长度只有20 nm 左右,制备晶体管器件的工 艺难度很高;且由于接触面积小,器件的接触电 阻较大。此外,合成过程需要贵金属表面的辅助, 导致纳米带牢固附着在金属表面,难以直接用于 晶体管器件制备;要制备晶体管必须先将纳米带 转移到绝缘衬底上,但转移过程引入的污染、应 力等会严重影响纳米带质量。

此外,还可以利用高温裂解产生的碳原子来 生长石墨烯纳米带。然而,如果不对生长方向加



图3 石墨烯纳米带的制备方法 (a)先进刻蚀法; (b)碳纳 米管解锁法; (c)分子合成法; (d)模板法

以限制,碳原子在基底上自由组合会形成二维石 墨烯结构。研究人员发现,可以用金属纳米颗粒 在氮化硼上刻蚀出的一维纳米沟槽作为模板,来 限制石墨烯的生长方向^[15],从而获得石墨烯纳米 带,如图3(d)所示。这种方法可实现了宽度小于 5 nm,长度达到2 μm的纳米带制备^[16]。模板法生 长的纳米带宽度取决于纳米沟槽的宽度,因此纳 米带宽度比较随机,一般在3—100 nm范围。

4 纳米颗粒催化生长石墨烯纳米带

4.1 六方氮化硼表面生长单层石墨烯纳米带

相较于石墨烯纳米带,碳纳米管的生长制备 已经非常成熟。在众多生长方法中,基于纳米颗 粒催化的化学气相沉积技术是制备碳纳米管最重 要的技术之一。自20世纪90年代首次应用于碳纳 米管生长以来,经过30多年的发展,该技术已经 能够生长出超长、高质量、低缺陷密度的碳纳米 管。受到这种催化生长技术的启发,我们于2022 年成功实现了在绝缘六方氮化硼基底上通过纳 米颗粒催化生长超长石墨烯纳米带^[17]。生长获 得的石墨烯纳米带长度达到微米量级,宽度约为 2 nm,具有0.5—1.5 eV的带隙,且边缘原子级平 整,如图4所示。这些特征使其有希望应用于碳 基半导体芯片的规模化制备。

在催化生长石墨烯纳米带的过程中, 原子级 平整的六方氮化硼基底起到了至关重要的作用。 通常情况下,在碳源气氛中,金属纳米颗粒会催 化生长出碳纳米管这种一维管状结构。而这里引 入的原子级平整的氮化硼基底, 使得催化生长平 面纳米带结构成为可能。在这种基底上,相较干 管状的碳纳米管,平面结构的纳米带与基底之间 的范德瓦尔斯相互作用更强, 使得生长自由能更 低。此外,理论上,由于石墨烯纳米带边缘上氢 原子的存在,其形成自由能还受到生长温度和氢 气分压的影响。根据这一思路,我们与合作者计 算了石墨烯纳米带和碳纳米管的生长相图^[17]。相 图表明,在高氢气分压和较低温度条件下,碳纳 米管的形成被抑制,更容易形成石墨烯纳米带; 相反在低氢气分压和高温环境中,纳米带则很难 形成, 生长产物主要为碳纳米管。理论预测与实



图4 催化生长超长石墨烯纳米带^[17] (a)纳米颗粒催化生长石墨烯纳米带的示意图;(b)生 长获得的石墨烯纳米带的原子力显微镜形貌图;(c)一条扶手椅形纳米带的扫描隧道显微 镜形貌图;(d)纳米带宽度统计图;(e)典型的纳米带扫描隧道谱,表明该纳米带带隙约为 0.5 eV

验结果符合得非常好。

另一方面,通过实验观测,我们发现纳米带 的生长符合"底端生长"模型:生长过程中,催 化剂颗粒的位置保持不变,因此微米级长度纳米 带的生长必然伴随着纳米带在基底上的滑移运动。 结合分子动力学模拟的结果,我们发现石墨烯纳 米带与氮化硼基底之间的超润滑特性使得微米级 长度的纳米带能够在氮化硼基底上自由滑移,从 而生长出长达10 μm的超长单层石墨烯纳米带。 这些理论分析为深入理解一维碳纳米材料生长, 并进而实现结构调控提供了重要依据。

4.2 顶端生长模式生长双层扶手椅形石墨烯 纳米带

石墨烯纳米带的电子能带结构不仅与纳米带 宽度相关,还会受到边缘结构和层数的影响,因 此进一步获得边缘手性可控和层数可控的纳米带

> 对实现其应用至关重要。 针对这一问题,我们利用 金属颗粒催化生长,成功 制备了纯度达到97.3%的扶 手椅形双层石墨烯纳米 带^[18]。相较于单层石墨烯纳 米带遵从的"底端生长" 模式,扶手椅形双层纳米 带的生长遵从"顶端生长" 模式。如图5(a)所示,在生 长纳米带的过程中,纳米 带的起点根部固定不动, 而纳米带顶端的催化剂颗 粒随着生长的进行不断向 前运动(图5(a))。由于氮化 硼基底和纳米带中存在的 面内三重旋转对称性, 生 长过程中纳米颗粒的运动 方向可能会发生改变,最 终产生120°和60°转角、正 三角形、六边形以及自陷

生长等新奇结构,如图 5 (b),(c)所示。更进一步的 表征发现,这些纳米带主 要为扶手椅手性。如图 5 (d)所示,铁、钴、镍金属 颗粒催化均能生长出高纯 度的扶手椅手性纳米带, 尤其是采用镍颗粒催化生 长的纳米带,其扶手椅手 性的纯度最高可达 97.3%。 理论分析发现,这种优异 的手性选择性来源于不同 手性纳米带边缘及纳米带/ 催化剂界面形成能的显著 差异(图 5(e))。

我们将生长的双层扶 手椅形石墨烯纳米带加工 成器件并进行了电学测 试。电输运的结果显示, 双层扶手椅形纳米带具有 准金属性,这与单层石墨 烯纳米带有显著差异。第 一性原理计算的能带结构 显示,双层纳米带相较于 同等宽度的单层石墨烯纳



(b, c)顶端生长模式生长石塗炖纳木带² (d)顶端生长石塗炖纳木带的过程示息菌; (b, c)顶端生长获得的石墨烯纳米带的原子力显微镜形貌图和对应的形成示意图; (d)采用 铁、钴和镍纳米颗粒催化生长得到的扶手椅形纳米带占比; (c)锯齿形(ZZ)和扶手椅形 (AC)边缘(氢饱和)的形成自由能对比(左),锯齿形和扶手椅形端点与镍的界面形成自由能 对比(右)

米带在带隙上有显著减小,支持实验上观测到的 准金属性结果。单层和双层石墨烯纳米带带隙大 小的差异源于它们本征能带结构的不同:单层石 墨烯表现出线性色散关系,而双层石墨烯则表现 出抛物线型色散关系。

5 氮化硼层间锯齿形石墨烯纳米带及 其高性能晶体管

为满足未来电子器件应用的需求,除了制 备超长、手性统一的半导体性石墨烯纳米带外, 还需要进一步提高纳米带原型器件的性能。理 论上,宽度小于5 nm的石墨烯纳米带不仅具有合 适的带隙,其载流子迁移率可达单晶硅的十倍(约 10000 cm²V⁻¹s⁻¹),是未来集成电路的理想沟道材 料^[19]。然而,现有实验报道的石墨烯纳米带场效 应晶体管的迁移率远低于理论预测^[16,20-26]。这种 差异主要来自纳米带样品制备和微纳加工等过程 中引入的吸附、晶格缺陷、应变、表面粗糙度以 及衬底中电荷杂质等无序效应^[27]。而且,由于石 墨烯纳米带的低维属性,其电子性质更容易受到 外界无序效应的影响,从而显著降低其电学性能。

为了减少无序效应,使碳基纳米器件性能逼 近理论极限,研究人员发展了多种实验技术,包 括热退火、电退火、等离子体清洁、基于扫描探 针的表面清洁、氮化硼封装和悬浮器件制备等, 其中最成功的方法是六方氮化硼封装法^[28]。多项 研究表明,被封装的二维材料器件表现出超高的 电荷均匀度、出色的载流子迁移率和百微米级的 平均自由程。然而,由于这种封装结构需要通过



图6 层间嵌入式生长的石墨烯纳米带^[29] (a)层间嵌入式生长纳米带的示意图; (b)层 间纳米带的扫描电子显微镜图像; (c-e)分别为高分辨扫描透射电子显微镜图像、理论 计算的原子结构图和将两图叠放的效果图



图7 超长锯齿形层间石墨烯纳米带^[29] (a)大范围 SEM 图像;(b)表明纳米带是沿氮化 硼锯齿形方向的 SEM 图像;(c)层间纳米带的长度统计图;(d)不同方法获得的纳米带的 长宽比对比图;(c)层间纳米带长度和锯齿形手性比例的关系

机械封装来实现,器件制备效率较低,且只能用 于制备微米级尺寸的样品,因此目前仅用于科研 领域,难以满足未来先进微电子产业的需要。

5.1 层间纳米带的生长和表征

针对这一问题,我们开发出了一种全新的制备方法,实现了在氮化硼层间嵌入式生长石墨烯纳米带^[29]。这种层间石墨烯纳米带的生长是通过纳米颗粒催化的化学气相沉积(CVD)实现的。纳米带的催化生长过程如图 6(a)所示:首先,催化

剂纳米颗粒在高温作用下运 动并附着在氮化硼的台阶处; 通入气源后,甲烷分子会在 金属颗粒的催化下裂解,释 放出碳原子,碳原子随后会 溶解到催化剂中;当催化剂 颗粒中的碳含量达到一定的 过饱和度后,碳原子从颗粒 中析出,形核成纳米带并嵌 入氮化硼的层间。

即使石墨烯纳米带被原位 封装在氮化硼中,我们仍然可 以通过扫描电子显微镜(SEM) 观察到这些一维纳米结构,如 图 6(b)所示。借助扫描透射电 子显微镜,我们对纳米带的截 百进行了直接成像。如图 6(c) —(e)所示,镶嵌在氮化硼层间 的纳米带具有规则的原子结 构,边界清晰,与理论计算结 果完美吻合,说明生长获得的 纳米带品质很高。此外,纳米 带宽度仅为3—5 nm,这预示 着它们可能具有较大的带隙, 表现出良好的半导体性。

出人意料的是,嵌入氮 化硼层间的石墨烯纳米带的 长度可达亚毫米量级,如图7

(a)—(c)所示,远远超过在氮化硼表面生长的结 果。结合其亚5nm的宽度,这些层间纳米带的 长宽比达到了10⁵,比之前报道的石墨烯纳米带的 长宽比至少高出两个数量级(图7(d))。更重要的 是,绝大多数层间纳米带为锯齿形纳米带。统计 结果表明(图7(e)),锯齿形纳米带的占比随长度不 断增加,并且长度在20μm以上的纳米带均为锯 齿形手性。这种长度与手性结构之间的依赖关系 预示着生长过程中可能存在对锯齿形纳米带的 "自筛选",为了验证这个猜想,我们对层间纳米 带的生长机理进行了深入研究。

5.2 层间纳米带的生长机理

这种层间纳米带的形成是在生长驱动力的作 用下不断嵌入到氮化硼层间的结果,涉及纳米带 与氮化硼之间的相对滑移以及纳米带和氮化硼的 不断形变。为了揭示生长的微观物理机理,我们 与合作者进行了系统的分子动力学模拟和第一性 原理计算,发现了锯齿形纳米带在氮化硼层间运 动的超润滑特性。模拟计算结果表明,在施加相 同大小推力的情况下,锯齿形纳米带嵌入氮化硼 层间的长度最大,扶手椅形纳米带次之,而纳米 带在氮化硼表面上的运动距离最短,如图 8(a), (b)所示。

进一步的理论计算发现,纳米带在氮化硼 表面滑移的势能面中仅存在局域化的低能区, 因此纳米带嵌入过程中必须不断越过较大的能 垒,导致显著的能量耗散和较大的摩擦力(图 8 (c));而纳米带在氮化硼层间的滑移势能面中存 在连续的低能谷,因此纳米带可以沿着这些连续 低能谷进行近乎无摩擦的滑动(图 8(d),(e))。这 一分析很好地解释了实验上氮化硼层间纳米带长 度远大于在表面上生长的纳米带长度这一反直觉 结果。

此外, 在沿着连续低 能谷滑动时,扶手椅形和 锯齿形纳米带都会发生一 定的侧向位移,而连续低 能谷位置的差异使得扶手 椅形纳米带的侧向位移显 著大于锯齿形纳米带(图8 (d), (e)), 造成了摩擦力的 差异。除此之外, 第一性 原理计算结果也表明,扶 手椅形纳米带嵌入导致的 氮化硼在垂直方向弯曲的形 变能比锯齿形纳米带更大。 这些结果很好地解释了层 间嵌入式生长过程中对纳 米带手性的自筛选现象。

5.3 高性能纳米带晶体管

氮化硼层间生长的超长石墨烯纳米带可直 接用于制备高性能电子器件。值得注意的是, 由于纳米带沟道始终被绝缘氮化硼保护,而氮 化硼具有出色的稳定性,纳米带可以免受加工 过程中氧化、环境污染和光刻胶接触的影响, 从而使得器件获得更稳定、更理想的性能。

为了证实这一点,我们通过微纳加工方法为 层间纳米带制作了电极,构造出场效应晶体管原 型器件(图9(a)),并对器件在室温下的性能进行了 测试。大量电学测量结果表明,纳米带器件都表 现出典型的半导体器件输运特性,在室温下器件 的开关比可达10⁶,说明这种层间纳米带具有较大 的带隙(图9(b),(c))。更值得关注的是,器件的载 流子迁移率可达4600 cm²V⁻¹s⁻¹,是目前在超窄纳 米带中实现的最高纪录(图9(d))。这些出色的性能 说明层间纳米带有望在未来的纳米电子器件中扮 演重要角色。

6 总结与展望

针对石墨烯纳米带在微电子领域的应用,本 文回顾了现有的纳米带制备方法,重点讨论了纳



图8 石墨烯纳米带的层间嵌入式生长机理^[29] (a)用来模拟纳米带嵌入氮化硼层间的示意 图;(b)施加不同大小的推力时纳米带的移动距离(嵌入深度);(c-e)纳米带的滑移势能面和 滑移轨迹



图9 基于层间纳米带的高性能场效应晶体管^[29] (a)基于层间纳米带制备的场效应晶体 管的结构示意图;(b)器件源漏电流随源漏电压和栅极电压的变化;(c)纳米带器件的转 移特性曲线;(d)层间纳米带器件迁移率与以往结果(由不同颜色方块表示)的对比图

米颗粒催化生长石墨烯纳米带的技术。该方法不 仅能够批量制备超长、超窄、高质量的石墨烯纳 米带,还可以实现对生长产物和纳米带结构的精 确调控。利用这种技术实现的被氮化硼原位封装 的石墨烯纳米带,为碳基微电子器件提供了重要 材料基础。这种嵌入式生长模式为制备其他高质 量低维材料,以及实现化学性质活泼的低维材料 提供了新思路。在生长方面,通过设计衬底结构、

参考文献

- [1] Geim A K. Science, 2009, 324:1530
- [2] Schwierz F. Nat. Nanotechnol., 2010, 5:487
- [3] Son Y W, Cohen M L, Louie S G. Phys. Rev. Lett., 2006, 97: 216803
- [4] Laird E A, Kuemmeth F, Steele G A et al. Rev. of Mod. Phys., 2015,87:703
- [5] Liu L J, Han J, Xu L et al. Science, 2020, 368:850
- [6] Lou S, Lyu B, Zhou X et al. Quantum Front., 2024, 3:3
- [7] Saraswat V, Jacobberger R M, Arnold M S et al. ACS Nano, 2021,15:3674
- [8] Wang H, Wang H S, Ma C et al. Nat. Rev. Phys., 2021, 3:791
- [9] Han M Y et al. Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 206805
- [10] Shi Z, Yang R, Zhang L et al. Adv. Mater., 2011, 23: 3061
- [11] Jiao L, Zhang L, Wang X et al. Nature, 2009, 458:877
- [12] Kosynkin D V et al. Nature, 2009, 458:872
- [13] Tao C, Jiao L, Yazyev O et al. Nat. Phys., 2011, 7:616

是非常优秀的一维材料,也为研究一维相互作用 拉廷格电子液体提供了理想的材料体系。

致 谢 感谢深圳先进技术研究院丁峰教授、 武汉大学欧阳稳根教授、以色列特拉维夫大学 Michael Urbakh教授和Oded Hod教授等对研究工 作的贡献;感谢上海交通大学优秀博士毕业生发 展奖学金的支持。

- [14] Jiao L, Wang X, Diankov G *et al*. Nat. Nanotechnol., 2010, 5:321
 [15] Chen L, He L, Wang H *et al*. Nat. Comm., 2017, 8:14703
- [16] Wang H S, Chen L, Elibol K *et al*. Nat. Mater., 2021, 20:202
- [17] Lyu B, Chen J, Lou S *et al*. Adv. Mater., 2022, 34: 2200956
- [18] Lou S, Lyu B, Chen J *et al*. Nano Lett., 2023, 24:156
- [19] Fang T, Konar A, Xing H et al. Phys. Rev. B, 2008, 78: 205403
- [20] LiX, Wang X, Zhang L et al. Science, 2008, 319:1229
- [21] Wang X et al. Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 206803
- [22] Li H et al. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13: 52892
- [23] Wang G et al. Appl. Phys. Lett., 2016, 109:053101
- [24] Wang X, Ouyang Y, Jiao L et al. Nat. Nanotechnol., 2011, 6:563
- [25] Lin M W et al. Phys. Rev. B, 2011, 84:125411
- [26] Lu X et al. Appl. Phys. Lett., 2016, 108: 113103
- [27] Rhodes D et al. Nat. Mater., 2019, 18: 541
- [28] Wang L, Meric I, Wang PY et al. Science, 2013, 342:614
- [29] Lyu B, Chen J, Wang S et al. Nature, 2024, 628:758

在器件及电输运方面, 通过改进微纳加工工艺和调 整接触金属等方式,可进一 步提高纳米带器件的性能。 当接触足够好时,可出现量 子化的电导。在低温下,由 于散射减少,电子平均自由 程增加,当平均自由程超过 器件沟道长度时,该纳米带 器件有望展现出量子输运特 性,比如像单量子点器件那 样表现出库仑阻塞及单电子 输运。此外,该纳米带宽度 仅3—5 nm,长宽比高达10⁵,