

石墨烯材料的电学性质及其器件应用研究

裘承 薛银

南昌理工学院, 江西 南昌 330044

摘要: 石墨烯作为一种具有优异电学性质的二维材料, 近年来在电子器件、传感器、能源存储器件等领域得到广泛关注。其独特的电学性质, 如极高的载流子迁移率、低电阻率和量子霍尔效应, 使得石墨烯成为下一代电子元件的潜在基础材料。本文将从石墨烯材料的电学性质入手, 探讨其在器件应用中的现状、价值和未来的发展策略, 以期对相关领域的研究提供理论支持与应用参考。

关键词: 石墨烯材料; 电学性质; 器件应用

Research on Electrical Properties of Graphene Materials and Their Applications in Devices

Qiu, Cheng Xue, Yin

Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi, 330044, China

Abstract: As a two-dimensional material with excellent electrical properties, graphene has received widespread attention in recent years in the fields of electronic devices, sensors, energy storage devices, and more. Its unique electrical properties, such as extremely high carrier mobility, low resistivity, and the Quantum Hall effect, make graphene a potential foundational material for the next generation of electronic components. This paper will explore the current status, value, and future development strategies of graphene in device applications, starting from its electrical properties, in order to provide theoretical support and application references for research in related fields.

Keywords: Graphene material; Electrical properties; Device application

DOI: 10.62639/sspis48.20240103

引言

石墨烯是由碳原子组成的二维蜂窝状晶格结构, 其独特的结构使其在力学、热学、电学等方面展现出极为优异的性能。特别是在电学性质方面, 石墨烯具有超高的载流子迁移率、出色的导电性以及较宽的电学带隙调控能力。这些特性使石墨烯在半导体、能源、传感和柔性电子器件等领域具有巨大的应用潜力。然而, 尽管石墨烯的基础研究取得显著进展, 其大规模工业化应用仍面临诸多技术挑战, 尤其是在器件集成和性能稳定性方面。

一、石墨烯材料的电学性质及其器件应用现状

石墨烯的电学性质主要体现在其极高的载流子迁移率和电子运动的线性色散关系。与传统的半导体材料不同, 石墨烯中的电子和空穴由于其零静止质量的特性, 表现出类似于狄拉克费米子的行为。这种量子现象使得石墨烯具有许多独特的电学性质, 如量子霍尔效应、极低的电阻率和宽频带响应能力, 这些都为石墨烯在未来的电子器件中提供巨大的应用前景。正是这种独特的电学性质, 使得石墨烯在纳米电子学、微电子器件、高频器件和传感器领域得到广泛的研究和应用。

石墨烯在场效应晶体管(FET)中的应用得到广泛关注。与传统硅基场效应晶体管相比, 石墨烯FET具有更高的载流子迁移率, 使得它能够在高频和高速应用中表现出优异的性能。尤其在高速通信、数据处理等需要快速开关和大带宽的应用领域, 石墨烯FET的潜力巨大。与硅器件相比, 石墨烯FET能够在较低电压下运行, 同时保持极低的功耗, 这对于实现下一代超低功耗、高性能电子器件具有重要意义。然而, 石墨烯作为零带隙材料的特性在数字电子器件中的应用仍然面临着挑战。由于石墨烯的零带隙特性, 导致其在开关器件中的关态电流无法完全关闭, 这在传统开关器件中会影响器件的开关比, 使得石墨烯在数字电路中的应用受到限制。为了解决这个问题, 研究人员正在通过多种手段对石墨烯的带隙进行调控, 例如通过掺杂、结构修饰、外加电场等技术手段, 引入合适的带隙来改善石墨烯在场效应晶体管中的开关性能。尽管带隙调控的研究进展显著, 但仍需要进一步探索优化, 以确保石墨烯能够在未来的数字电子器件中发挥更大的作用。除了在场效应晶体管中的应用, 石墨烯的优异导电性和极大的比表面积也为其在透明导电膜和超级电容器等领域带来极大的应用潜力。在透明导电膜方面, 石墨烯由于其出色的光学透明性和导电性, 能够作为传统透明导电材料如氧化铟锡(ITO)的替代品。ITO材料由于铟的稀缺性和

(稿件编号: IS-24-3-17016)

作者简介: 裘承(1981-05), 男, 汉族, 南昌人, 裘承, 讲师职称, 本科学历, 硕士学位, 研究方向: 主要从事新能源车教学研究。薛银(1980-07), 女, 汉族, 南昌人, 薛银, 讲师职称, 本科学历, 硕士学位, 研究方向: 主要从事计算机教学研究。

其脆性限制其在柔性电子器件中的应用,而石墨烯具有柔性好、耐用性强的优势,非常适合在新型柔性显示屏、触控屏和太阳能电池等领域中应用。

二、石墨烯材料的电学性质及其器件应用价值

(一) 有效提升电子器件的性能和效率

与硅材料相比,石墨烯的电子迁移率高达 $20,000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上,而硅的迁移率仅为 $1500\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 左右。这意味着石墨烯器件在高频电子领域表现出更优越的性能,能够极大提升器件的开关速度和频率响应。尤其是在高速通信和射频电子器件中,石墨烯可以通过其优异的电子传输性能显著提高数据传输速率和信号处理效率。此外,石墨烯在柔性电子领域也具有重要的应用价值。由于其薄膜结构的柔韧性和高导电性,石墨烯能够被集成到可弯曲和可拉伸的电子器件中。这种特性使石墨烯成为柔性显示屏、可穿戴电子设备和生物传感器等新兴技术的理想材料。通过石墨烯材料的引入,未来的电子设备能够在不牺牲性能的情况下实现更高的可塑性和耐用性,显著扩展电子器件的应用范围。

(二) 不断地推动新型能源器件的创新

作为超级电容器的电极材料,石墨烯能够提供比传统碳材料更大的能量存储能力和更高的功率密度。石墨烯材料的二维结构为电荷的快速传输提供便利,能够显著提高电容器的充放电速度。此外,石墨烯在锂离子电池中的应用也得到了广泛研究。石墨烯作为锂电池的负极材料,能够提高电池的电化学性能,增强电池的能量密度和循环稳定性,延长其使用寿命。通过石墨烯材料的引入,未来的能源器件将实现更高效的能量存储和转换。例如,石墨烯与其他材料复合,能够进一步优化电极的导电性和电化学稳定性,为下一代高效电池技术提供可靠的材料解决方案。这不仅能够推动电动汽车、电网储能等领域的技术进步,还能够促进可再生能源的利用与发展。

(三) 提高传感器的灵敏度和响应速度

由于石墨烯表面原子对外界环境的变化极为敏感,任何外界气体分子的吸附或表面电子密度的微小变化都会引起石墨烯电学性质的显著变化。这种特性使得石墨烯能够用于制造高灵敏度的气体传感器、生物传感器和环境监测设备。例如,在气体传感器应用中,石墨烯能够精确检测空气中的痕量气体,甚至能够区分不同的气体分子类型。此外,石墨烯的快速电子传输特性使得传感器的响应速度显著提升,能够在极短时间内检测到外界环境的变化。这种高灵敏度和快速响应的特性使得石墨烯传感器在安全监测、医疗诊断、环境保护等领域具有广阔的应用前景。

三、石墨烯材料的电学性质及其器件应用策略

(一) 合理完善和优化石墨烯的带隙调控

石墨烯材料的电子带隙为零,这意味着其虽然具有极高的导电性和优异的电子迁移率,但作为零带隙材料,其开关行为较差,无法在数字电子器件中很好地实现逻辑操作。因此,优化石墨烯的带隙成为关键策略,以适应更多半导体领域的应用需求。一种有效的带隙调控方法是通过化学修饰或掺杂技术来改变石墨烯的电子结构。具来说,掺入杂原子(如氮或硼)可以破坏石墨烯的碳原子晶格对称性,从而引入局部的能带变化,形成有限的带隙。例如,氮掺杂石墨烯不仅可以调节带隙大小,还能提升其导电性和化学稳定性,使其更适合用作场效应晶体管(FET)和传感器的材料。硼掺杂石墨烯也表现出优异的调控潜力,硼原子引入的带隙能够有效提高石墨烯在电子器件中的关态电流和电压控制能力。另一种方法是通过层数控制进行带隙调控。单层石墨烯虽然带隙为零,但当石墨烯层数增加时,电子能带结构会发生变化。双层石墨烯在特定的电场条件下可以通过施加垂直电场诱导出带隙,这为构建可调节带隙的石墨烯电子器件提供了新思路。这种基于层数控制的带隙调控方法相对简单,且不需要进行复杂的化学修饰,因而适合大规模应用。应用外部机械应力也是一种较为新颖的带隙调控方法。通过对石墨烯施加张力或应力,可以改变其晶格常数,从而引发电子能带的变化。这种物理调控方法的优点是可逆性强,不会对材料本身的化学性质产生永久性影响,适用于需要灵活调控带隙的器件应用,如柔性电子器件和传感器等。带隙调控技术的不断进步,将进一步拓宽石墨烯在数字电子器件中的应用,尤其是在场效应晶体管、逻辑电路等需要明确开关操作的领域。通过对石墨烯的化学修饰、层数控制、应力调控等手段,研究人员能够在不牺牲其优异电学性质的前提下,优化其在不同应用中的性能。

(二) 提升石墨烯与基底材料的界面性能

石墨烯材料在器件中的应用通常需要沉积在各种基底上,而石墨烯与基底材料之间的界面性能对器件的整体性能有着重要影响。界面接触不良、界面电阻过高等问题会严重降低石墨烯器件的导电性和稳定性,因此提升石墨烯与基底材料的界面性能成为另一个重要策略。

首先,选择合适的基底材料是提升界面性能的关键。石墨烯可以沉积在多种基底上,如金属、半导体和聚合物基底。不同的基底材料具有不同的导电性、热导率和机械性能,因此针对不同的器件应用需求,研究人员可以选择相应的基底。例如,在高频电子器件应用中,金属基底如铜、金等由于其良好的导电性,能够显著降低石墨烯与基底之间的界面电阻;而对于柔性电子器件,聚合物基底如聚酰亚胺(PI)因其优良的柔韧性和化学稳定性,可以在不牺牲柔性的情况下提供

良好的机械支撑。其次,优化石墨烯的沉积工艺能够有效改善其与基底的界面接触。化学气相沉积(CVD)是一种常用的石墨烯沉积方法,通过这种工艺可以在基底表面生长出高质量的石墨烯薄膜。然而,CVD工艺中石墨烯的质量和均匀性对基底的选择和工艺参数(如温度、气体浓度等)有着较高的依赖性。因此,研究人员在优化CVD工艺时,需要综合考虑基底材料的特性和石墨烯的生长条件,以减少晶格错配、降低界面缺陷,确保石墨烯薄膜的完整性和导电性。在实际应用中,等离子体处理也被广泛用于改善石墨烯与基底的界面性能。通过在沉积前或沉积过程中对基底进行等离子体处理,可以提高石墨烯与基底的结合力,增强界面的稳定性。等离子体处理可以在基底表面引入活性官能团,这些官能团可以与石墨烯表面的碳原子形成更强的化学键合,从而减少界面电阻。最后,开发无损石墨烯转移技术也是提升界面性能的重要策略。石墨烯在沉积过程中通常需要从基底上转移到目标基底上进行器件集成,传统的湿法转移工艺容易引入污染物或缺陷,影响石墨烯与基底的接触性能。近年来,干法转移技术、滚动转移技术等新型转移工艺的发展,能够有效避免这些问题,并保持石墨烯材料的完整性,显著提升其在器件中的界面性能和电学表现。

(三) 积极地推进石墨烯复合材料的研发

为了进一步提升石墨烯材料的电学性能及其在不同应用中的适用性,石墨烯与其他材料的复合是当前研究的重要方向之一。石墨烯复合材料的研发不仅能够保留石墨烯的优异电学性质,还能够通过与其他功能材料的结合,优化材料的整体性能,解决单一石墨烯材料在某些应用中存在的局限性。例如,石墨烯与金属纳米颗粒的复合能够增强其导电性和电学活性,从而提升其在传感器和储能器件中的应用效果。石墨烯与聚合物的复合材料则能够显著提高材料的机械强度和柔韧性,适用于柔性电子器件和可穿戴设备。石墨烯与其他二维材料(如硫化钼、氮化硼等)的异质结复合结构,能够进一步改善电子传输特性,实现带隙调控和器件性能优化。通过复合材料的研发,石墨烯不仅可以克服自身的局限,还能在更广泛的应用领域展现出卓越的性能。例如,在超级电容器领域,石墨烯与金属氧化物的复合能够提升电极材料的比电容和循环寿命;在生物传感器领域,石墨烯与生物分子的结合能够实现高灵敏度的生物检测。因此,石墨烯复合材料的研发将为其在多功能器件中的应用带来更广泛的可能性。

(四) 推动材料的规模化制备与工艺优化

石墨烯的规模化制备和高质量工艺控制是其商业化应用的关键挑战之一。尽管实验室中制备出高质量石墨烯的技术已经相对成熟,但如何在工业生产中实现大规模、高效率的石墨烯生产仍然是一个亟待解决的问题。石墨烯的制备方法包括机械剥离、化学气相沉积(CVD)、氧化还原

法等,各种方法在制备效率、质量和成本方面各有优缺点。在规模化制备过程中,化学气相沉积法(CVD)被认为是最有前景的工业化制备技术之一。CVD方法能够在大面积基底上生长出高质量的单层或多层石墨烯,适用于大规模集成器件的生产。然而,CVD制备石墨烯的均匀性和基底剥离工艺仍然需要进一步优化,以提高石墨烯的质量和制备效率。石墨烯的转移工艺也是影响其应用的关键环节之一。当前的转移工艺通常会引入缺陷或污染,影响石墨烯器件的电学性能。未来的研究应当致力于开发无损转移技术,并通过工艺优化降低生产成本,确保石墨烯材料在大规模生产中保持优异的性能。只有通过制备技术的优化,才能真正推动石墨烯材料在商业化应用中的普及。

四、结语

石墨烯材料以其独特的电学性质和广泛的应用潜力,在电子器件、能源存储、传感器等领域展现出巨大的发展前景。尽管石墨烯的基础研究已经取得显著进展,但其大规模工业化应用仍然面临诸多技术挑战。通过对石墨烯带隙调控、界面性能优化、复合材料研发及规模化制备工艺的不断完善,石墨烯材料将在更多领域中发挥出关键作用。

参考文献:

- [1] 袁佳琪, 纪哲, 李强, 等. 氧化石墨烯材料联合人脂肪间充质干细胞修复糖尿病创面效果及机制研究[J]. 徐州医科大学学报, 2023, 43(12): 859-868.
- [2] 胡文博. 低共熔活性熔盐体系 KOH-K₂CO₃ 制备氮硫共掺三维石墨烯及超电容性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2023.
- [3] 谢锋. 碳基量子点辅助二维/三维石墨烯材料制备及其应用研究[D]. 宁波大学, 2022.
- [4] 柏利. 羟基、羧基和磺基改性氟化石墨及其电化学储能研究[D]. 浙江理工大学, 2022.
- [5] 樊焱. 石墨烯材料的阻抗调控技术及其在微波器件与天线中的应用研究[D]. 西安电子科技大学, 2021.
- [6] 梁涛, 王斌. 层间共价增强石墨烯材料的构筑、性能与应用[J]. 物理化学学报, 2022, 38(01): 103-118.
- [7] 封路. 基于石墨烯材料的隧穿场效应管的设计与研究[D]. 杭州电子科技大学, 2019.