

文章编号: 1007-8827(2009)01-0001-07

碳基一维纳米异质结制备的研究进展

潘春旭, 祁 祥

(武汉大学物理科学与技术学院, 教育部声光材料与器件重点实验室, 武汉大学电子显微镜中心, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 碳基一维纳米异质结由于其独特的结构与性能, 以及在纳米器件方面的应用前景, 得到了广泛的关注和大量的研究。通过详细述评碳基一维纳米异质结的各种制备方法, 主要分为气相法、液相法、模板法, 以及其他方法, 如电场诱导、放电等离子体烧结、电子束照射、微机械操作和化学键连接等。展望了碳基一维纳米异质结的发展趋势, 并认为其大批量可控制备、界面结构、物性, 以及纳米器件的组装将是未来一段时间内的研究热点。

关键词: 异质结; 一维; 纳米材料; 碳; 研究进展

中图分类号: TB 383

文献标识码: A

1 前言

多组分一维纳米材料, 由于其独特的结构和性能, 以及在纳米科学中的基础研究价值和纳米器件方面的应用潜力, 受到了广泛的关注和大量的研究。在多组分的一维纳米材料中, 不同组分和结构之间一般存在有明显的界面, 称为一维纳米异质结, 它主要包括以下几种结构: 节状(segmented, superlattices or end to end), 芯/壳状(core/shell, core/sheath or coaxial), 十字交叉状(angled cross junction or T-junction), 树枝状(hyperbranched), 刷子状(nano-brushes or multibranched)等^[1], 如图1所示。多组分一维纳米材料通常是由金属、半导体、碳和聚合物等不同成分组成。其中含碳的多组分一维纳米材料(即:碳基一维纳米异质结), 被认为具有优异和特殊的电学和光学等方面的性能, 尤其得到重视。本文重点述评最近几年人们在合成和制备碳基一维纳米异质结方面提出的各种方法和技术。

2 气相法

2.1 节状和枝状异质结

气-液-固(vapor-liquid-solid, VLS)机制是合成一维半导体及其氧化物纳米材料的常见生长机制。根据该生长机制, 在预先制备好的碳纳米管(CNTs)表面附着催化剂, 也能成功地合成具有不同组分的节状或枝状的碳基一维纳米异质结。例如, Bae等^[2]预先制备好CNTs, 然后将含有Ga或

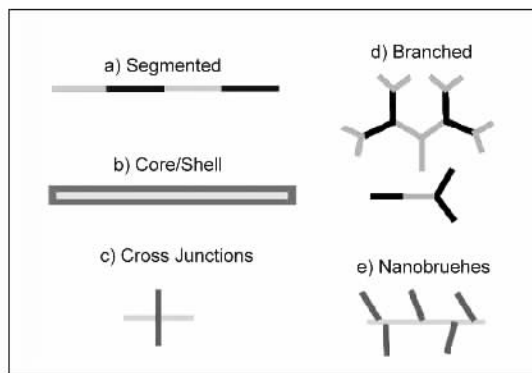


图1 一维纳米异质结的常见结构示意图^[1]

Fig. 1 Different types of one-dimensional nanoscale heterojunctions^[1]

In 的 Zn 粉末气化, 使得 Zn 液滴附着在 CNTs 表面, 随后引入氧使 ZnO 纳米棒开始生长, 最终在 CNTs 表面形成阵列的 ZnO 纳米棒, 即获得了 ZnO-C 异质结, 如图2所示。类似地, Liber 等^[3]在 CNTs 的顶端通过电化学方法沉积 Au 催化剂颗粒, 在 CNTs 端部生长出了 Si 纳米线; Lazareck 等^[4-5]通过 DNA 杂交附在 CNTs 端部的 Au 催化剂颗粒成功地合成了 ZnO-C 纳米异质结^[6]。

除了上述基于 VLS 机制的合成方法以外, 还有很多其他方法也可以用来制备碳基一维纳米异质结。如 Ma 等^[7]在化学气相沉积法(CVD)中, 先通入 CH_4/H_2 气体体制得 CNTs, 后通入 CH_4/N_2 气体体制

收稿日期: 2008-05-06; 修回日期: 2009-03-04

基金项目: 教育部高等教育博士科研基金项目(20070486016)。

作者简介: 潘春旭(1962-), 男, 河南偃师人, 教授, 博士生导师, 主要从事低维纳米材料、材料表征、材料微结构与性能关系等方面的研究。

电话: +86-27-62367023, E-mail: cxpan@whu.edu.cn

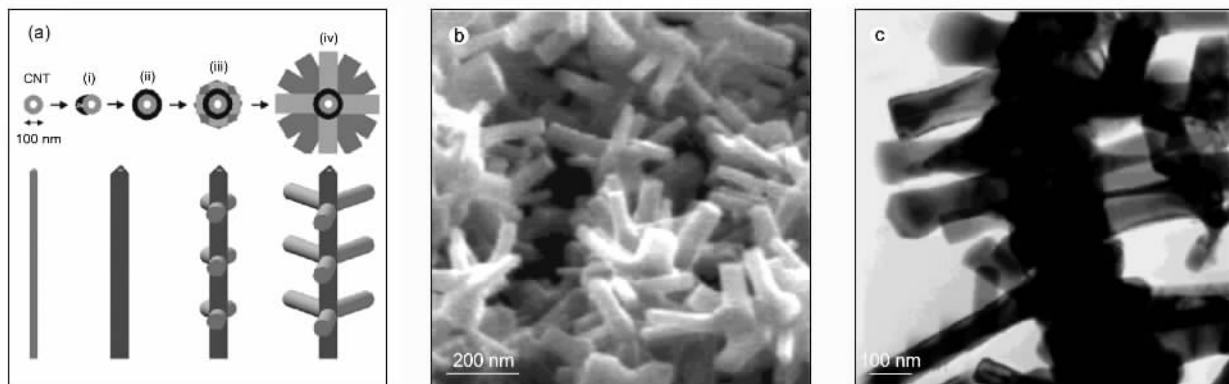


图2 ZnO-CNTs 纳米异质结的 a) 生长过程示意图: i) 形成 Zn 液滴, ii) Zn(黑色部分)将 CNTs(灰色部分)包覆, iii) ZnO 纳米棒开始在包覆层上生长, iv) 最终在 CNTs 表面形成阵列的 ZnO 纳米; b) SEM 和 c) TEM 形貌^[2]

Fig. 2 a) Schematic diagrams to show the growth process of ZnO-C nanoscale heterojunctions: i) Zn droplets form, ii) Zn outer layers (marked by black color) encapsulating the CNT, iii) ZnO nanorods start growing from the outer layers, iv) aligned ZnO nanorods surrounded by the CNT; b) SEM and c) TEM images of ZnO-C nanoscale heterojunctions^[2]

备碳氮(CN)纳米管,生成了 CN-C 结构的异质结。Chai 等^[8-9]则通过高温分解三聚氰胺(melamine)提供 N 源,制备出 CN-C 异质结。另外,在 CVD 法中简单地改变生长条件,还能实现 CN-C^[10]甚至是 BCN-C(BCN, 硼碳氮)^[11]一维纳米异质结的成功制备。

Cassel 等^[12]也用两步法制得两端微观结构不同的碳纳米管异质结。即先用 CVD 法生长出阵列 CNTs,然后在 CNTs 的顶端电镀上 Ni 催化剂颗粒,再利用等离子增强 CVD 法长出第二段 CNTs,前后两段的 CNTs 微观结构不同,即形成了微观结构不同的 C-C 异质结。Liu 等^[13]利用水辅助 CVD 法,先在 Zn 箔上制备出 CNTs,然后退火获得 ZnO-C 一维纳米异质结。

2.2 芯/壳状异质结

具有芯/壳状结构的碳基一维纳米异质结一般分为三种:1)在 CNTs 内部注入其他组分材料,2)用其他组分材料包覆 CNTs,3)用碳包覆其他非碳一维纳米材料。

利用高温分解或化学方法,已经成功地将不同组分材料注入到 CNTs 内部,得到了多种“壳”为 CNTs 的碳基一维纳米异质结,如: Elias 等^[14]高温分解二茂铁、二茂钴和甲苯混合物,将 FeCo 纳米线注入到 CNTs 内部,如图 3a 所示。Chan 等^[15]用 CVD 法在 Pd 晶簇上制备出 CNTs,由于 Pd 被 H₂等离子体活化的影响,最终导致 Pd 注入到 CNTs 的内部。

用其他材料作为“壳”包覆 CNTs 的方法也很

多。如: Sun 等^[16]在 CNTs 的制备过程中,高温分解二茂铁使得 CNTs 表面被 Fe 的氧化物包覆。Dai 等^[17]则利用电子束蒸发技术,将多种金属(包括 Au, Pd, Fe, Al 和 Pb)沉积在 CNTs 外表面,如图 3b 所示。

用非晶碳作为“壳”包覆其他一维纳米材料也被广泛地研究。Zhao 等^[18]热蒸发石墨坩锅中的 ZnS 和 SnS 粉末,获得了 ZnS-C 芯/壳状的一维纳米异质结。Cao 等^[19]利用等离子体辅助技术,将非晶态碳包覆在由模板法制得的 Au 纳米线表面。Yang 等^[20]高温分解有机分子,用碳包覆由 VLS 机制合成的 Ge 纳米线;利用类似的方法,Chen 等^[21]在 CVD 法中使 GaN 纳米线外表面被 CNTs 包覆;Yin 等^[22]则成功合成出“芯”为 InP 纳米线的碳基一维纳米异质结,如图 3c)所示。

3 液相法

液相法的基本原理是先制备好 CNTs,然后再利用液相法合成另一组分材料。

3.1 节状和枝状异质结

利用液相法合成节状和枝状碳基一维纳米异质结的报道较少。Mieszawska 等^[23]利用种核促进生长法(seed-mediated growth method),以置于单壁 CNTs 表面的 Au 颗粒为种子生长 Au 纳米棒,并使纳米棒进一步长大,最终形成具有枝状结构的 Au-C 一维纳米异质结。图 4 为该纳米异质结的生长过程示意图及相应产物的 AFM 形貌像。

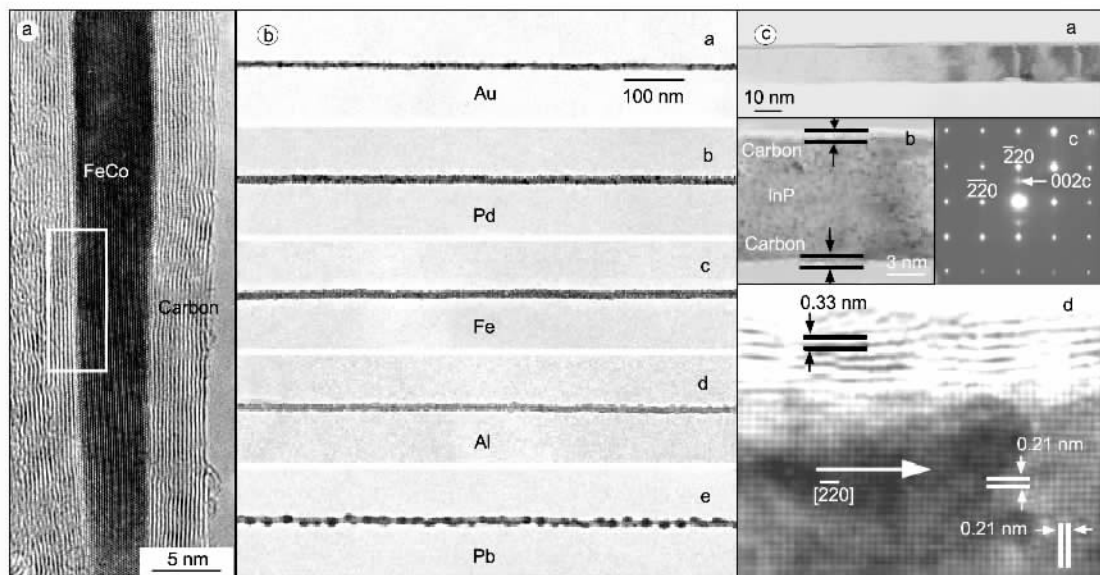


图 3 a) 三种不同芯/壳状一维纳米异质结的 TEM 和 HRTEM 形貌: a) FeCo 注入 CNTs 中^[17]; b) 金属包覆在 CNTs 表面^[14]; c) InP 纳米线被 C 包覆^[22]

Fig. 3 TEM and HRTEM images of different types of core/shell one-dimensional nanoscale heterojunctions: a) FeCo in CNTs^[17]; b) metal encapsulated by the CNT^[17]; c) carbon encapsulating the InP nanowire^[22]

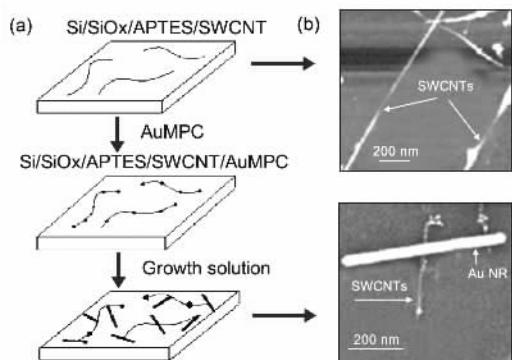


图 4 Au-C 一维纳米异质结的 a) 生长过程示意图及 b) 相应产物的 AFM 形貌^[23]

Fig. 4 a) Schematic diagrams to show the growth process of Au-C nanoscale heterojunctions and b) their AFM images^[23]

3.2 芯/壳状异质结

通过氧化还原,或者其他化学反应获得液相前驱体结晶,将多种材料包覆到 CNTs 的外表面,形成“壳”材料组分不同的壳/芯状碳基一维纳米异质结。如:用 KBH_4 还原 THF 中的 S 和 CdCl_2 生成 CdS, Cao 等^[24] 将 CdS 包覆到先期置入反应溶液中的 CNTs 表面。利用类似的方法,还有多种壳/芯状碳基一维纳米异质结也被成功合成,如: $\text{Au}(\text{Pt})\text{-C}$ ^[25], $\text{SnO}_2\text{-C}$ ^[26-27], $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ ^[28], ZnS-C ^[18, 29], CdS-C ^[24, 30] 和 Si-C ^[31] 等。

另外,通过各种不同的聚合方法,合成多种 Polymer-C 壳/芯状一维纳米异质结。如: Kong 等^[32] 利用原位原子迁移聚合反应使得 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAAm) 包覆在 CNTs 表面; Yu 等^[33] 利用反相微乳液聚合方法将聚苯胺 (PANI) 包覆在 CNTs 表面; Liu 等^[34] 通过嫁接甲基丙烯酸甲酯自由基本体聚合,使得 CNTs 表面被聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 包覆。

4 模板法

模板法是制备纳米颗粒、一维纳米材料和二维纳米阵列等各种形状纳米结构材料的一种常用方法。按照限制能力不同,一般分为硬模板和软模板两种。其中,硬模板由于其能够同时适用于气相和液相体系,被广泛应用于一维纳米材料的直径、长度和长径比的控制生长。

虽然利用模板法合成一维纳米材料,乃至多组分一维纳米材料的研究很多,但是制备碳基一维纳米异质结方面的报道却较少。清华大学朱静院士等利用模板法在这方面进行了出色的研究工作^[35-39]。她们通过巧妙地结合电化学沉积和 CVD 两种方法,以多孔阳极氧化铝 (AAO) 为模板,开发出了一种用于制备“节状”一维金属-半导体异质结阵列的普适性方法,并成功地制备多种不同种类的“节状”

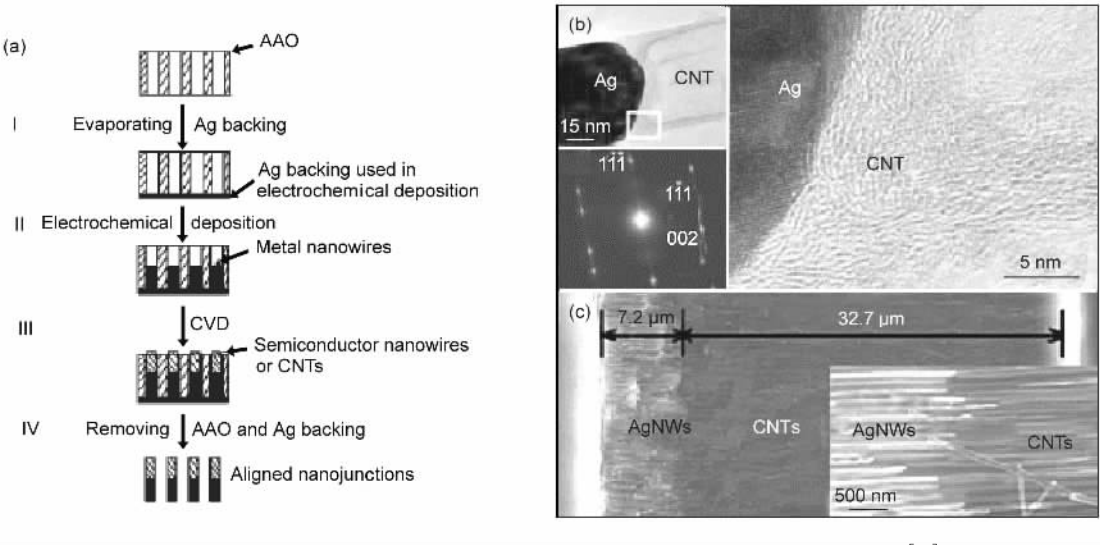


图 5 Ag-非晶态碳—维纳米异质结的 a) 生长过程示意, b) TEM 和 c) SEM 形貌^[35]
Fig. 5 a) Schematic diagrams to show the growth process of Ag-amorphous CNT nanoscale heterojunctions;
b) TEM and c) SEM images of the Ag-amorphous CNT nanoscale heterojunctions^[35]

金属-半导体一维轴向异质结的整齐阵列,其中包括 Ag-非晶态碳^[35-37], Ni-C^[37], Ni-C-非晶态碳^[38-39]等碳基一维纳米异质结,如图 5 所示。

5 其他方法

除了以上三种基于制备单组分一维纳米材料发展起来的常见方法以外,近年来,人们又发展了一些新的制备和合成碳基一维碳纳米异质结的技术和方法。例如,笔者课题组发现在 CNTs 的生长过程中外加电场可以有效地提高 CNTs 石墨层结晶度,因此提出通过施加一个“开-断”脉冲电场,获得了具有“有序-无序-有序-无序……”同质异构结构的全碳基一维纳米异质结,如图 6 所示^[40]。另外,笔者还利用放电等离子体烧结 (SPS) 系统的快速加热、真空和低电压高能脉冲放电等特点,使得在“实心”炭纳米纤维 (CNFs) 头部产生等离子放电并形成局部高温,导致 CNFs 从“非晶”-“晶态”的转变从头部开始沿着轴向逐步发展,并在之间形成了一个“晶态-非晶态”界面;初步研究认为通过调整 SPS 系统的脉冲电流的开启关断时间、烧结时间和温度等参数,可以有效地控制“晶态-非晶态”CNF 异质结的微观结构,从而调制其物理性能,初步研究表明其电输运行为表现为整流特征,如图 7、图 8 所示^[41]。

另外,一些微纳操作技术也被成功用于制备碳基一维碳纳米异质结。如: Banhart 等^[42-43]利用高能电子束提供的能量将两个碳纳米管焊接到一起,形成“十字交叉状”和“枝状”的全碳基一维纳米材

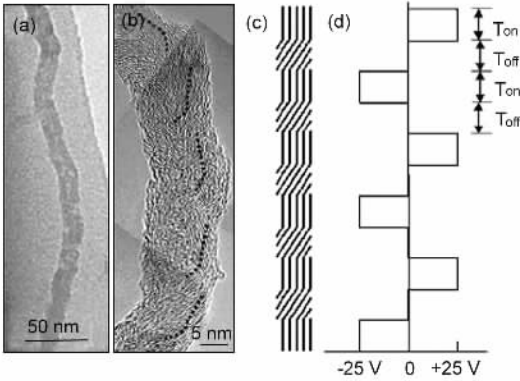


图 6 具有“有序-无序-有序-无序……”结构特征的一维碳纳米异质结 a) TEM 形貌, b) HRTEM 形貌, c) 同质异构结构模型, d) 所施加的脉冲电压^[40]
Fig. 6 a) TEM and b) HRTEM micrographs of CNTs grown in a pulsed electric field, c) schematic model of graphite layers; d) pulsed voltage output from a power supply^[40]

料; Postma 等人^[44]利用 AFM 探针将两个碳纳米管搭住,并钩连在一起; Chiu 等人^[45]则利用碳纳米管表面的化学功能团将两根 CNTs“吸”在一起。

6 结语

碳基一维纳米异质结由于其独特的微观结构和多组分特征,具有特殊的性能,被认为在纳米电子、纳米光电、传感器等领域有着广泛的应用前景。基于“节状”结构,人们分别获得了具有 Ohmic 接触^[36]和 Schottky 接触^[3, 11, 38, 41]特征的碳基一维纳

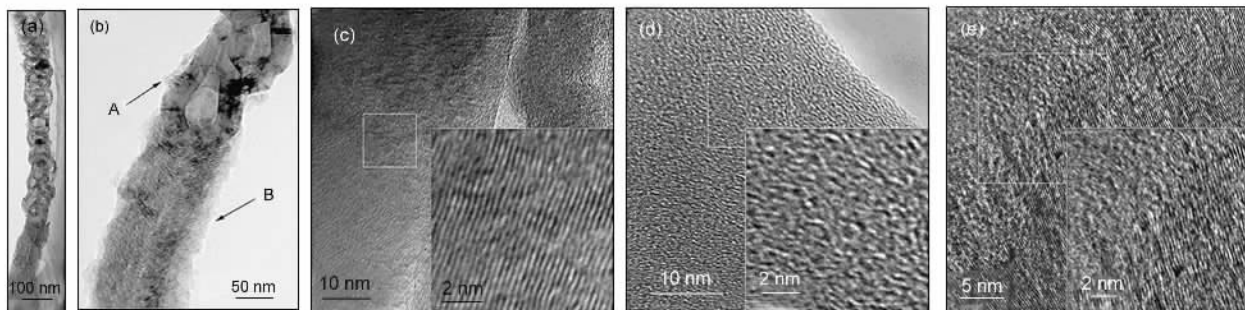


图 7 “晶态-非晶态”碳纳米异质结的 a, b) TEM 形貌以及 c) 晶态, d) 非晶态和 e) 结合部分的 HRTEM 形貌^[41]

Fig. 7 Typical TEM and HRTEM micrographs of the one-dimensional crystalline-amorphous carbon nanoscale heterojunction.

(a) and (b) TEM images of individual junction; HRTEM images of (c) “crystalline” segment, (d) “amorphous” segment, and (e) interface of the junction (the inset shows enlarged high-resolution image inside the rectangular box)^[41]

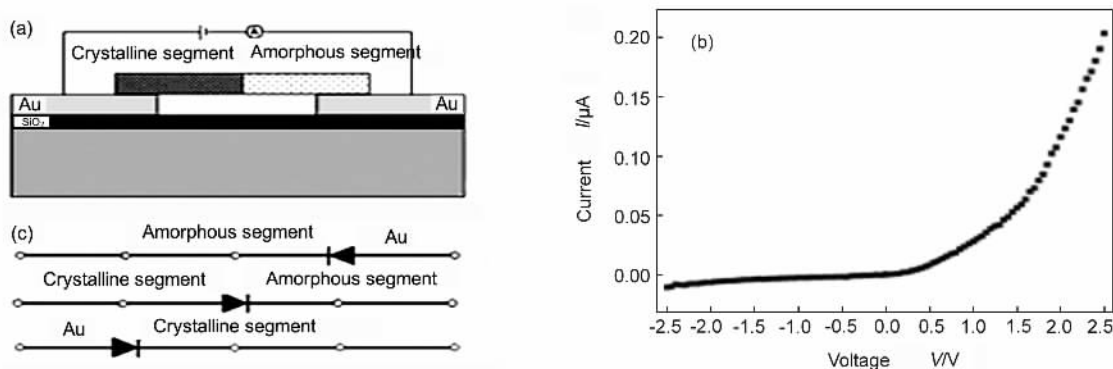


图 8 单根“晶态-非晶态”碳纳米异质结的电输运行为: a) 测试装置示意图, b) 典型 I-V 曲线,

c) 利用图 a 装置测试存在的异质结性能模型^[41]

Fig. 8 a) Scheme of the experimental setup for the electrical transport measurement; b) I-V curve of one-dimensional crystalline-amorphous carbon nanoscale heterojunction; c) Three models for the sample in the configuration in (a)^[41]

米异质结,甚至利用两根纳米异质结组装出“or”和“and”的逻辑门^[10];基于芯/壳状结构,制作出性能良好的场效应管^[28]等等。

近年来关于碳基一维纳米异质结方面的研究得到了迅猛的发展,但是还存在着一些问题有待解决。如,在合成和制备方面,如何有效地大量合成出具有相同微结构特征的碳基一维纳米异质结仍然很难实现。另外,界面结构直接影响到异质结的性能特征,如何有效控制界面微观结构的生长尤为重要;深入研究异质结的界面结构也是一个迫切需要解决的重要基础理论问题。

在性能测试和应用开发方面,研究碳基一维纳米异质结的集体性能较多。但由于受测试技术和手段的限制,对单根纳米异质结的性能测试还很少,基于纳米异质结的纳米器件的组装就更少。因此进一步的研究工作应该是如何更好地发掘碳基一维纳米异质结的性能优势,将一维纳米异质结“连接”起

来,构筑出真正具有一定功能的纳米器件。另外,对于碳基一维纳米异质结的微观结构和性能的基础理论研究也很有必要。

参考文献

- [1] Mieszawska A J, Jalilian R, Sumanasekera G U, et al. The synthesis and fabrication of one-dimensional nanoscale heterojunctions[J]. *Small*, 2007, 3(5): 722-756.
- [2] Bae S Y, Seo H W, Choi H C, et al. Heterostructures of ZnO nanorods with various one-dimensional nanostructures[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(33): 12318-12326.
- [3] Hu J T, Min O Y, Yang P D, et al. Controlled growth and electrical properties of heterojunctions of carbon nanotubes and silicon nanowires[J]. *Nature*, 1999, 399(6731): 48-51.
- [4] Lazarek A D, Cloutier S G, Kuo T F, et al. DNA-directed synthesis of zinc oxide nanowires on carbon nanotube tips[J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(10): 2661-2664.
- [5] Lazarek A D, Kuo T F, Xu J M, et al. Optoelectrical characteristics of individual zinc oxide nanorods grown by DNA direc-

- ted assembly on vertically aligned carbon nanotube tips[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(10): 103-109.
- [6] 邱介山, 孙天军. 纳米碳管/氧化锌异质结构的合成及发光性质[J]. 新型炭材料, 2007, 22(3): 206-212.
(Qiu J S, Sun T J. Synthesis and photoluminescence properties of CNT/ZnO heterostructures[J]. New Carbon Materials, 2007, 22(3): 206-212.)
- [7] Ma X C, Wang E G. CNx/carbon nanotube junctions synthesized by microwave chemical vapor deposition[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(7): 978-980.
- [8] Chai Y, Zhang Q F, Wu J L. A simple way to CNx/carbon nanotube intramolecular junctions and branches[J]. Carbon, 2006, 44(4): 687-691.
- [9] Chai Y, Zhou X L, Li P J, et al. Nanodiode based on a multi-wall CNx/carbon nanotube intramolecular junction[J]. Nanotechnology, 2005, 16(10): 2134-2137.
- [10] Hu P, Xiao K, Liu Y Q, et al. Multiwall nanotubes with intramolecular junctions (CNx/C): Preparation, rectification, logic gates, and application[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(24): 4932-4934.
- [11] Liao L, Liu K, Wang W, et al. Multiwall Boron Carbonitride/Carbon Nanotube Junction and Its Rectification Behavior[J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, 129(31): 9562-9563.
- [12] Cassell A M, Li J, Stevens R M D, et al. Vertically aligned carbon nanotube heterojunctions[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(12): 2364-2366.
- [13] Liu J W, Li X J, Dai L M. Water-assisted growth of aligned carbon nanotube-ZnO heterojunction arrays[J]. Advanced Materials, 2006, 18(13): 1740-1744.
- [14] Elias A L, Rodriguez-Manzo J A, McCartney M R, et al. Production and characterization of single-crystal FeCo nanowires inside carbon nanotubes[J]. Nano Letters, 2005, 5(3): 467-472.
- [15] Chan L H, Hong K H, Lai S H, et al. The formation and characterization of palladium nanowires in growing carbon nanotubes using microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Thin Solid Films, 2003, 423(1): 27-32.
- [16] Sun Z Y, Liu Z M, Wang Y, et al. Fabrication and characterization of magnetic carbon nanotube composites[J]. Journal of Materials Chemistry, 2005, 15(42): 4497-4501.
- [17] Zhang Y, Dai H J. Formation of metal nanowires on suspended single-walled carbon nanotubes[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(19): 3015-3017.
- [18] Zhao L P, Gao L A. Coating multi-walled carbon nanotubes with zinc sulfide[J]. Journal of Materials Chemistry, 2004, 14(6): 1001-1004.
- [19] Cao J, Matsoukas T. Nanowire coating by plasma processing[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 829-833.
- [20] Wu Y Y, Yang P D. Melting and welding semiconductor nanowires in nanotubes[J]. Advanced Materials, 2001, 13(7): 520-523.
- [21] Chen C C, Yeh C C, Liang C H, et al. Preparation and characterization of carbon nanotubes encapsulated GaN nanowires[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2001, 62(9-10): 1577-1586.
- [22] Yin L W, Bando Y, Zhu Y C, et al. Controlled carbon nanotube sheathing on ultrafine InP nanowires[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(26): 5314-5316.
- [23] Mieszawska A J, Jalilian R, Sumanasekera G U, et al. Synthesis of gold nanorod/single-wall carbon nanotube heterojunctions directly on surfaces[J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(31): 10822-10823.
- [24] Cao J, Sun J Z, Hong J, et al. Carbon nanotube/CdS core-shell nanowires prepared by a simple room-temperature chemical reduction method[J]. Advanced Materials, 2004, 16(1): 84-87.
- [25] Choi H C, Shim M, Bangsaruntip S, et al. Spontaneous reduction of metal ions on the sidewalls of carbon nanotubes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 124(31): 9058-9059.
- [26] Han W Q, Zettl A. Coating single-walled carbon nanotubes with tin oxide[J]. Nano Letters, 2003, 3(5): 681-683.
- [27] Zhao L, Gao L. Coating of multi-walled carbon nanotubes with thick layers of tin(IV) oxide[J]. Carbon, 2004, 42(8-9): 1858-1861.
- [28] Fu L, Liu Y Q, Liu Z M, et al. Carbon nanotubes coated with alumina as gate dielectrics of field-effect transistors[J]. Advanced Materials, 2006, 18(2): 181-185.
- [29] Gu F, Li C Z, Wang S F. Solution-chemical synthesis of carbon Nanotube/ZnS nanoparticle Core/Shell heterostructures[J]. Inorganic Chemistry, 2007, 46(13): 5343-5348.
- [30] Liu B, Lee J Y. Ordered alignment of CdS nanocrystals on MWCNTs without surface modification[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2005, 109(50): 23783-23786.
- [31] Colorado R, Barron A R. Silica-coated single-walled nanotubes: Nanostructure formation[J]. Chemistry of Materials, 2004, 16(14): 2691-2693.
- [32] Kong H, Li W W, Gao C, et al. Poly(N-isopropylacrylamide)-coated carbon nanotubes: Temperature-sensitive molecular nanohybrids in water[J]. Macromolecules, 2004, 37(18): 6683-6686.
- [33] Yu Y J, Che B, Si Z H, et al. Carbon nanotube/polyaniline core-shell nanowires prepared by in situ inverse microemulsion[J]. Synthetic Metals, 2005, 150(3): 271-277.
- [34] Liu Y Y, Tang J X, Jin J H. Fabrication of nanowires with polymer shells using treated carbon nanotube bundles as macro-initiators[J]. Chemical Communications, 2004(24): 2828-2829.
- [35] Luo J, Zhang L, Zhang Y J, et al. Controlled growth of one-dimensional metal-semiconductor and metal-carbon nanotube heterojunctions[J]. Advanced Materials, 2002, 14(19): 1413-1414.
- [36] Luo J, Huang Z P, Zhao Y G, et al. Arrays of heterojunctions

of Ag nanowires and amorphous carbon nanotubes[J]. Advanced Materials, 2004, 16(17): 1512-1515.

[37] Luo J, Zhu J. Arrays of one-dimensional metal/silicon and metal/carbon nanotube heterojunctions[J]. Nanotechnology, 2006, 17(11): S262-S270.

[38] Luo J, Xing Y J, Zhu J, et al. Structure and electrical properties of Ni nanowire/multiwalled-carbon nanotube/amorphous carbon nanotube heterojunctions[J]. Advanced Functional Materials, 2006, 16(8): 1081-1085.

[39] Luo J, Zhu J, Huang Z P, et al. Arrays of Ni nanowire/multiwalled carbon nanotube/amorphous carbon nanotube heterojunctions containing Schottky contacts[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(3): 033114.

[40] Bao Q L, Zhang H, Pan C X. Electric-field-induced microstructural transformation of carbon nanotubes [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(6): 063124.

[41] Qi X, Bao Q L, Li C M, et al. Spark plasma sintering-fabricated one-dimensional nanoscale "crystalline-amorphous" carbon heterojunction[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(11): 113113.

[42] Banhart F. The formation of a connection between carbon nanotubes in an electron beam[J]. Nano Letters, 2001, 1(6): 329-332.

[43] Terrones M, Banhart F, Grobert N, et al. Molecular junctions by joining single-walled carbon nanotubes[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(7): 075505.

[44] Postma H W C, de Jonge M, Yao Z, et al. Electrical transport through carbon nanotube junctions created by mechanical manipulation[J]. Physical Review B, 2000, 62(16): 10653-10656.

[45] Chiu P W, Duesberg G S, Dettlaff-Weglikowska U, et al. Interconnection of carbon nanotubes by chemical functionalization [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(20): 3811-3813.

Progress in the synthesis of one-dimensional carbon nanometer heterojunctions

PAN Chun-xu, QI Xiang

(Department of Physics and Key Laboratory of Acoustic and Photonic Materials and Devices of Ministry of Education, Center for Electron Microscopy, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: One-dimensional carbon nanometer heterojunctions (1D-CNHJs) have attracted tremendous interest owing to their distinctive microstructures, properties and potential applications in nanometer devices. The progress for various synthesizing methods for 1D-CNHJs, such as vapor-phase, solution-phase, template-based, electric-field induction, spark plasma sintering, electron beam irradiation, mechanical manipulation, and chemical interconnection, were reviewed. It is considered that future research for 1D-CNHJs should be focused on large-scale production, controllable synthesis, interfacial microstructure control, properties and device building.

Keywords: Heterojunction; One-Dimension; Nanomaterials; Carbon; Research progress

Foundation item: The Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20070486016.), Ministry of Education, China.

Author Introduction: PAN Chun-xu (1962 -), male, Professor, engaged in low dimensional nano-sized materials, materials characterization and materials microstructure property relationship, etc. Tel: +86-27-6236 7023, E-mail: cxpan@whu.edu.cn

如何写好中英文摘要

1. 文摘应包含正文的要点。一般来说,文摘应包含研究对象(目的),研究方法(所用的设备、材料),结果与结论。
2. 文摘要尽量简短,尽可能删掉课题研究的背景信息。
3. 文摘中出现的数据应该是最重要、最关键的数据。
4. 不需要自己标榜自己的研究成果。
5. 二次文献信息应脱离原文而独立存在,因此文摘中不能出现图表参数。
6. 文摘中的内容应在正文中出现,文摘不能对原文进行补充和修改。
7. 文摘中的缩写名称在第一次出现时要有全称。
8. 文摘句子应尽量简短。