

文章编号:1007-2780(2016)02-0149-08

碳纳米管在典型微纳电子器件中的应用进展

刁加加¹, 安立宝^{1*}, 常春蕊²

(1. 华北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063009;

2. 华北理工大学 理学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 优异的电学、热学、机械特性和化学稳定性以及独特的一维纳米结构, 使碳纳米管(CNT)成为应用在微纳电子器件中的理想功能材料。与传统电子器件相比, CNT 微纳电子器件性能更为优异。本文综述了近年来制备和改进基于 CNT 的场发射器、晶体管和传感器的研究进展。经过特定方法的组装和处理, 可使 CNT 场发射器获得低阈值电压、高发射电流和发射电流稳定等优异性能, 使 CNT 晶体管具有高迁移率、大跨导和大电流开闭比, 可提高各种 CNT 传感器的灵敏度。

关键词: 碳纳米管; 应用; 场发射器; 晶体管; 传感器

中图分类号: TN325 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/YJYXS20163102.0149

Progress on the application of carbon nanotubes in typical micro and nano electronic devices

DIAO Jia-jia¹, AN Li-bao^{1*}, CHANG Chun-rui²

(1. *College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China;*

2. *College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)*

Abstract: Owing to their excellent electrical, thermal and mechanical properties, chemical stability and unique one-dimensional nanostructure, carbon nanotubes (CNTs) have been ideal functional materials for application in micro and nano electronic devices. Comparing to traditional electronic devices, CNT-based electronic devices have unique properties. In this paper, recent progress on research of producing and improving CNT-based field emitters, transistors and sensors is reviewed. After assembling and processing by certain methods, CNT-based field emitters possess low threshold voltage, high emission current, and stabilized emission current. CNT-based transistors have high mobility, large transconductance and on/off switching ratio. The sensitivity of various CNT-based sensors has been improved.

Key words: carbon nanotube; application; field emitter; transistor; sensor

收稿日期: 2015-06-21; **修订日期:** 2015-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51172062, No. 51472074)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 51172062; No. 51472074)

* 通信联系人, E-mail: lan@ncst.edu.cn

1 引言

碳纳米管(CNT)在 1991 年被发现后便引起了广泛的关注和研究^[1]。CNT 可以看成是由石墨片卷曲形成的空心圆柱体,具有独特的准一维纳米结构,长径比可达 1 000 以上^[2]。极小的尺寸和高度对称的结构赋予了 CNT 独特的电学特性。例如,CNT 具有极高的电导率和迁移率^[2],能承载高达 10^7 A/cm² 的电流密度且不会发热^[3]。CNT 的机械性能也很优越,其杨氏模量可高达 1 000 GPa,拉伸强度为 100~600 GPa^[4]。此外,CNT 还具有优异的热传导性、光电子学特性、电磁学特性和化学稳定性。这些特性以及独特的微小尺寸和结构,使 CNT 成为应用在诸如晶体管、传感器、存储器、逻辑电路和场发射器等微纳电子器件中的理想材料^[2]。近年来,基于 CNT 的微纳电子器件获得了广泛的关注和研究,使 CNT 微纳电子器件的性能得到了有效改善。本文总结了 CNT 在场发射器、晶体管和传感器中的应用研究进展。

2 碳纳米管场发射器

场发射即在电场作用下从导电固体表面激发出电子。物体的场发射性能可以应用在显示器、X 射线管、电推进器和微波放大器等器件中^[2]。金属属性 CNT 的高长径比、小尖端半径、负电子亲和力和优异的化学稳定性、热稳定性、导电性及导热性使其非常适合作为场发射元件应用于场发射器中^[5-6]。CNT 场发射器相比于传统氧化物场发射器具有低阈值电压、高发射电流、大发射电流密度、发射电流稳定和长寿命等优点^[5,7]。

近年来对 CNT 场发射器有广泛的研究,这些研究使 CNT 场发射器的阈值电压进一步降低,发射电流提高且更稳定。

2.1 镀膜 CNT 点电子源场发射器

很多研究发现,将镀金属、碳化物或氮化物的 CNT 作为场发射器的点电子源,有效改善了 CNT 场发射器的发射性能^[8-10]。

在 CNT 上镀一层锂(Li)薄膜作为场发射器的功能元件,可以提高 CNT 场发射器的性能^[8]。原理为:Li 的功函数比 CNT 的低,所以镀 Li 薄

膜后 CNT 发射尖端的功函数被有效降低,且 Li 膜充当了保护膜保护 CNT 末梢不被电场中的离子气体碰撞和不受焦耳热的影响。但 Li 膜越厚 CNT 发射尖端的长径比越小,研究表明 Li 膜最佳厚度为 4.7 nm,减小了功函数的同时确保了长径比损失最小。测试表明没有镀 Li 膜的 CNT 场发射器启动电场为 0.92 V/ μ m,外加电场 1.2 V/ μ m 时发射电流为 56 μ A,100 μ A 的发射电流下 24 h 后减小到原来的 17%;镀 4.7 nm 厚 Li 膜的 CNT 场发射器启动电场为 0.65 V/ μ m,外加电场为 1.2 V/ μ m 时发射电流增长超过 10 倍为 618 μ A,100 μ A 的发射电流下 24 h 后仍为原来的 98%。由以上对比数据可以看出,与没有镀膜的 CNT 场发射器相比,镀 Li 膜后 CNT 场发射器降低了发射所需的阈值电压,提高了发射电流,且发射电流更稳定。

将镀氮化硼(BN)薄膜的 CNT 作为场发射器的点电子源,发射性能也得到了提高。因为镀 BN 膜后 CNT 场发射器的有效隧道势垒高度被大大降低,从而降低了启动电场,实验发现镀 3 nm 厚 BN 膜后 CNT 场发射器的启动电场从 1.2×10^{-2} V/ μ m 降到 0.82×10^{-2} V/ μ m^[10]。

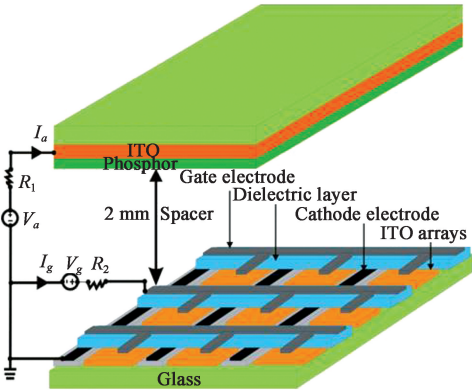
2.2 平面栅极三极管型 CNT 场发射器

随着 CNT 场发射器被成功制备且被广泛研究,三极管型 CNT 场发射器越来越受关注。普通的平面栅极三极管的阴极与栅极在同一平面上相互交叉且并联,为了减小三极管的启动电压,阴极与栅极的间隔必须足够小,增大了组装困难。

Zhang 等^[11]研究了改进的平面栅极三极管型 CNT 场发射器,相比于普通的平面栅极三极管更容易实现点矩阵的图像和动态显示。在该场发射器中使用直径低于 10 nm,长度约为 5~10 μ m 的多壁碳纳米管(MWNT),保证了长径比。其结构如图 1(a)所示,铟锡氧化物(ITO)层被蚀刻形成 ITO 电极和 ITO 阵列电极,银阴极组装在 ITO 电极上提高了 ITO 电极的导电性,与 ITO 阵列电极串联的银栅极和阴极间用 800 μ m 厚的绝缘层隔离,MWNT 沉积在阴极上。阴极与栅极虽然被绝缘层隔离,但是与栅极串联的 ITO 电极和阴极并联且在同一平面上互相交叉。

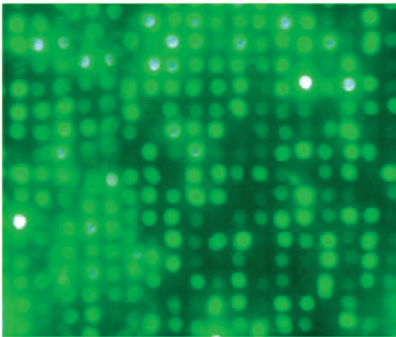
研究场发射特性的实验装置如图 1(a)所示,用覆盖一层绿磷的 ITO 玻璃作为阳极板,改进的平面栅极三极管型 CNT 场发射器作为阴极。实

验发现该场发射器容易实现点矩阵的发射图像,且图像明亮、点矩阵均匀,如图 1(b)所示。随着栅极电压增长,发射点矩阵增多且图像更明亮,说明该场发射器实现了动态显示。此外,该场发射器具有极低的阈值电压、极高和极稳定的发射电流。它的栅极启动电压仅为 55 V,阳极电流可以达到 305 μA ,且 11 h 内电流波动小于 5%。



(a)研究场发射特性的实验装置^[11]

(a)Experimental setup investigating field emission characteristics^[11]



(b)阳极电压 4 000 V 栅极电压 100 V 时的发射图像^[11]

(b)Emission image when the anode voltage is 4 000 V and the gate voltage is 100 V^[11]

图 1 改进的平面栅极三极管型 CNT 场发射器示意图及发射图像^[11]

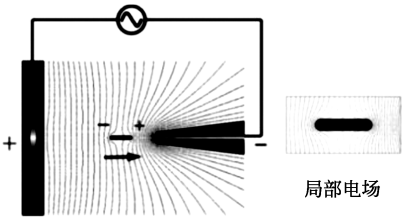
Fig. 1 Schematic diagram of improved planar-gate triode with CNT field emitters and its emission image^[11]

这种改进方法即解决了制备平面栅极三极管时的困难,又提高了发射性能。

2.3 关于 CNT 场发射器的其他方面研究

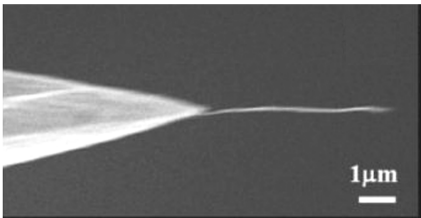
CNT 场发射器的基底不同,发射性能不同。CNT 场发射器一般以硅为基底,硅虽然适合 CNT 生长但热传导性不好。Yin 等^[12]把磨光的无氧铜作为 CNT 场发射器的基底,发现铜优异的热传导性使铜基底上的 CNT 场发射器的最大发射电流可达 4.8 mA,与硅基底上的最大发射电流 3.6 mA 相比更高,且发射电流更稳定。但硅基底上的 CNT 发射尖端场增强因子比铜基底上的大,场增强因子与场发射区域的局部电场成正比,所以硅基底上的 CNT 场发射器的启动电场比磨光的无氧铜基底上的低,分别为 1.4 V/ μm 和 2.8 V/ μm 。

改进组装方法也可以提高 CNT 场发射器的发射性能。Zhang 等^[13]发现用介电电泳(DEP)组装 CNT 场发射器时可以控制 CNT 发射尖端的长度、直径和方向,有效提高了 CNT 场发射器



(a)介电电泳组装 CNT 场发射器示意图^[13]

(a)Schematic illustration of assembly of CNT emitter by dielectrophoresis^[13]



(b)组装在钨尖上的 CNT 发射尖端扫描电子显微镜照片^[13]

(b)SEM image of a CNT tip with one end anchored on the apex of the W wire^[13]

图 2 介电电泳组装 CNT 场发射器示意图及组装结果^[13]

Fig. 2 Schematic illustration of assembly of CNT emitter by dielectrophoresis and assembly result^[13]

的发射性能。组装过程如图 2(a)所示,钨和金属架两个电极安装在 CNT 悬浮液中,在两电极间施加频率为 2 MHz、幅值为 10 V 的交流电压时,正介电电泳力驱使可极化的 CNT 移向电场梯度高的钨尖。移动钨尖可以控制 CNT 发射尖端长度,悬浮液中 CNT 的直径决定 CNT 发射尖端的直径,钨尖圆锥轴与电场方向的角度决定 CNT 发射尖端与钨尖圆锥轴的角度。且范德瓦尔斯力结合的 CNT 刚度较大,即使长度超过 30 μm 仍保持笔直。实验中限制 CNT 发射尖端长度为 4~10 μm 、直径为 50~100 nm、CNT 尖端与钨尖圆锥轴角度在 2°以内(图 2(b)),获得了 3~5 μA 的稳定发射电流和超过 105 A/cm² 的发射电流密度。

此外,Chai 等^[14]把以 MWNT 为芯的碳纤维组装到钨尖的蚀刻槽上,并沉积铂把碳纤维焊接到钨尖上,组成 CNT 场发射器。实验测得除 MWNT 之外的碳纤维的电阻、焊接接头处电阻和碳纤维与钨尖的接触电阻的总阻值仅为 2 k Ω 。并且,碳纤维壳与 MWNT 有良好的电接触。该 CNT 场发射器由于各个部分均有良好的电接触,因此不会像其他 CNT 场发射器一样在 CNT 与金属架之间的接触处发生退化。

以上对 CNT 场发射器的研究,提高了发射性能而且解决了一些现存的问题。但是,在发射的均匀性和稳定性方面以及大规模生产方面,仍有待于更好的解决。

3 碳纳米管晶体管

单壁碳纳米管(SWNT)多表现为半导体性,且具有弹道运输、电流承载能力高、迁移率高和热导率高的优异特性^[2]。所以,SWNT 可以用作晶体管的沟道材料,并于 1998 年首次出现了单壁碳纳米管场效应晶体管(SWNT-FET)^[15]。SWNT 晶体管具有能完成弹道运输和在低直流电压下保持高电流密度等优越性能^[16],它的出现进一步提高了微电子线路的集成度和微型化。

3.1 CNT 晶体管的制备

CNT 晶体管的制备是近年来的研究热点,而且制备方法对晶体管的性能有影响。化学气相沉积和介电电泳是最常用的制备方法^[17-18]。

化学气相沉积在大于 800 $^{\circ}\text{C}$ 的高温下平行排

列密度可控的 SWNT 到晶体管的源、漏电极间,组装好的 SWNT 能保持其本质的迁移率。化学气相沉积组装的晶体管启动时具有低接触电阻、高饱和电流和高迁移率的优异性能。此外,还具有大跨导和高达 4×10^4 的电流开闭比^[17]。

介电电泳在室温即可完成排列和定位 SWNT 的过程,但是排列的 SWNT 不是平行而是纠结扭曲的,导致相邻的 SWNT 间接触电阻高,降低了晶体管的电特性,导致低跨导、低最大电流和非饱和电流^[17-18]。在溶液中充分分离 SWNT 和超声波纳米焊接有助于提高介电电泳组装的 SWNT 晶体管的性能^[19]。

金属属性 SWNT 的存在降低了晶体管的性能。因为金属属性 SWNT 比半导体属性 SWNT 能承载更高的电流,所以在源、漏电极间施加电压时大部分电流从金属属性 SWNT 通过。随着电压增大金属属性 SWNT 被烧断,只剩下半导体属性 SWNT^[18]。在组装过程中移除金属属性 SWNT 可以大大提高晶体管的性能。

3.2 经过溶液处理得到的 CNT 晶体管

在介电电泳组装过程中改进使用的 CNT 悬浮液也可以改进组装后 CNT 晶体管的性能。

Stoke 等^[20]从无表面活性剂 SWNT 悬浮液中组装了 SWNT-FET。SWNT 悬浮液中没有起催化作用的微粒,保证了 SWNT 足够洁净,避免了酸性或超声波净化处理对 SWNT 电特性的影响。拉曼光谱测量出 SWNT 上有极少的瑕疵,保持了本质的电特性,所以组装的电子器件性能优越。该晶体管在导通状态时电导高至 6 μS ,而且它的场效应迁移率高达 1 380 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

由于有机半导体具有结构灵活、在低温下处理、低成本等优点,有机薄膜晶体管被广泛研究^[21]。Choi 等^[22]使用介电电泳组装了基于 CNT 全氟磺酸纳米束的有机电化学晶体管(OECT)。在 CNT 的全氟磺酸悬浮液中介电电泳合成 CNT 与全氟磺酸复合的纳米束,并把纳米束组装在源漏电极间。然后把纳米束浸入磷酸盐缓冲液中,缓冲液 PH 值为 5.6,栅极浸入纳米束周围的溶液中,组成 OECT(图 3)。纳米束在磷酸盐缓冲液中呈 P 型半导体特性。CNT 为有机材料全氟磺酸提供了机械支撑且该复合材料可以改善 CNT 的电性能,如导电性、电导率和电子输运性能。CNT 束的电阻约为 5 k Ω ,而 CNT 与

全氟磺酸复合的纳米束电阻约为 $2\text{ k}\Omega$ 。该 OECT 表现出优异的性能,而且该晶体管的漏极电流与栅极电压的比值和缓冲液 pH 值成比例,因此,这样的纳米束可以作为 pH 传感器。

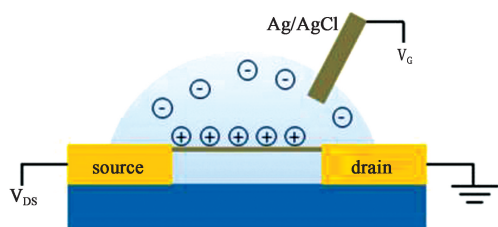


图3 有机电化学晶体管原理图^[22]

Fig. 3 Schematic of an organic electrochemical transistor^[22]

这些例子表明,在介电电泳组装过程中进行溶液处理大大提高了 CNT 晶体管的性能,获得了高品质的 CNT 电子器件。

3.3 其他类型 CNT 晶体管

应用范围广的具有大跨导、大迁移率和大电流开闭比的 CNT 晶体管也是近年来的研究热点。

Selvapraha 等^[23]对三维 CNT 场效应晶体管(3D-CNTFET)进行了研究,该晶体管的横截面积小,可用于大范围高密度的纳米电子电路。组装过程为:首先,被 $1\text{ }\mu\text{m}$ 厚的聚一氯对二甲苯绝缘层分离的源极和漏极经过两次掩膜过程组装在硅晶片上组成一个三维微加工平台;然后,用介电电泳力将一束 SWNT 垂直排列到硅晶片上的源、漏电极之间,并将该加工平台在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行退火处理,以提高 SWNT 与金属电极之间的接触;最后,沉积栅极绝缘层聚一氯对二甲苯和栅极金属,并用电破坏过程移除金属属性 SWNT。该 3D-CNTFET 表现为 P 型比 N 型明显的双极性行为,最大跨导为 $0.061\text{ }\mu\text{S}$,最高迁移率为 $227\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,电流开闭比为 3×10^4 ,说明该晶体管具有优异的性能。

此外,Selvapraha 等^[24]研究了高柔韧性的单壁碳纳米管薄膜晶体管(SWNT-TFT)。如图4所示,该 SWNT-TFT 用聚一氯对二甲苯作为柔性基板和栅极绝缘层,并密封 $1\text{ }\mu\text{m}$ 厚的聚一氯对二甲苯层隔绝环境。实验表明该 SWNT-TFT 表现为 p 型行为,有约 $55\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的迁移率和约 1×10^3 的开闭比。高柔韧性的 SWNT-TFT 经过重复弯

曲测试后性能没有任何显著的变化,在急剧弯曲后其导通电流变化仅为 $\pm 8.9\%$ 。SWNT-TFT 有潜力被用于柔性电子设备、一次性的生物传感器、以及可穿戴和植入式电子设备中。

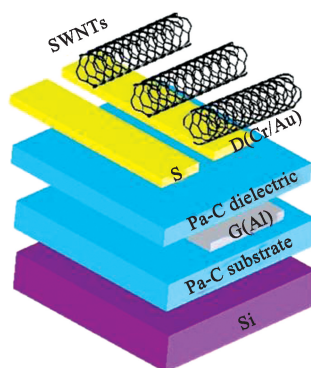


图4 高柔韧性单壁碳纳米管薄膜晶体管示意图^[24]

Fig. 4 Schematic of highly flexible SWNT thin film transistor^[24]

3D-CNTFET 和 SWNT-TFT 各有优缺点,但比较它们的迁移率和电流开闭比可以发现,3D-CNTFET 性能更优异。其原因可能是,3D-CNTFET 通过退火提高了 SWNT 与金属电极之间的接触,而且移除了金属属性 SWNT,提高了晶体管的性能。

4 碳纳米管传感器

CNT 的高比表面积及在电学、热学、化学、光学和机械等方面的优越特性使其可以广泛应用于各种传感器中^[2]。近年来研究者研究了各种 CNT 传感器,这些传感器的工作原理都是根据 CNT 某一性能的变化,如化学传感器是根据 CNT 吸附化学物质后导致了电导的变化^[2]。CNT 传感器具有灵敏度高、响应速度快、体积小、功耗低和恢复性强等优点^[25],具有传统传感器无法比拟的优势,可广泛应用在环境、农业、机械和医药等领域。

4.1 CNT 热膜传感器

CNT 的电阻随温度的改变而改变,空气流速改变导致 CNT 温度改变,所以 CNT 可以用于制作测量温度和空气流速的传感器。Hsu 等^[26]使用光学感应介电电泳组装了 CNT 热膜传感器,在恒定电流模式下操作时该传感器电压的变化可

以反映出空气流速的变化。该传感器灵敏度经测试为约 $0.4099\text{ mV}\times(\text{s/m})$,表明其具有高灵敏度。组装过程为:在光导材料非晶硅(a-Si)层上施加一个交流电压,当光源的光照射在 a-Si 层上时它的电阻降低,在光照区域形成了非均匀电场和光学感应介电电泳力。移动光源,光学感应介电电泳力把 CNT 收集到 a-Si 层上的金属电极之间,然后将预对准的 CNT 暴露于紫外线光源下使其被进一步固定。最后把组装好的传感器进行退火处理,减少了残余应力和接触电阻,使传感器的电阻更稳定,测量精度更高。使用光学感应介电电泳组装方法可以实现 CNT 热膜传感器的大规模生产。

4.2 CNT 化学传感器

由于 SWNT 对化学气体敏感,所以 SWNT 广泛应用于化学传感器。近年来出现了很多性能优异和用途广泛的 SWNT 化学传感器,如将 SWNT 薄膜或单链 DNA 装饰的 SWNT 作为传感元件的化学传感器。

Cattanach 等^[27]在柔性塑料(聚对苯二甲酸乙二醇酯,PET)基底上组装了 SWNT 束网状薄膜化学气体传感器,可用于检测有机磷类神经毒剂模拟物沙林(异丙甲酯,DIMP)和索曼(二甲酯,DMMP)。与单独的 SWNT 或 SWNT 网状物相比,SWNT 束网状薄膜能更好地吸附化学物质,该传感器暴露于 DIMP 或 DMMP 蒸汽时可检测到大的可重复的电阻变化(约为 75%~150%)。SWNT 传感器表面被旋涂了一层 $2\text{ }\mu\text{m}$ 厚的化学选择性聚合物聚异丁烯阻挡膜,高浓度的干扰物被聚异丁烯阻挡膜有效地过滤掉。所以即使存在大浓度的干扰物,仍可观察到传感器对模拟物蒸汽有很明显的响应。

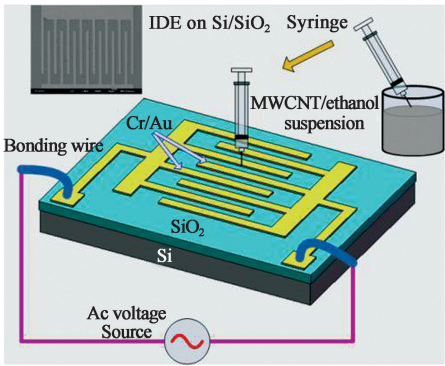
SWNT 化学传感器也可以被用于测量甲醇和异丙醇蒸汽,SWNT 化学传感器处于甲醇和异丙醇蒸汽中时电阻被测得分别增加了 $13.41\pm 1.03\%$ 和 $3.23\pm 0.5\%$ ^[28]。Chen 等^[28]利用介电电泳力将单链 DNA(SS-DNA)装饰的 SWNT 集成到互补金属氧化物半导体(CMOS)电路中,作为纳米级的化学传感器。SWNT 与生物分子复合物的官能团化进一步提高了对甲醇和异丙醇蒸汽的敏感性,实验测得装饰 SS-DNA 的 SWNT 化学传感器在甲醇和异丙醇蒸汽中电阻分别增加了 300%和 250%,与普通 SWNT 化学传感器的

灵敏度相比大大提高。所以 SS-DNA 装饰的 SWNT 集成到 CMOS 电路上有希望应用在超灵敏的电子鼻上。

CNT 束网状薄膜和生物分子复合物官能团化的 CNT 作为传感器的功能元件,提高了 CNT 对化学气体的灵敏度,改进了 CNT 传感器的性能。

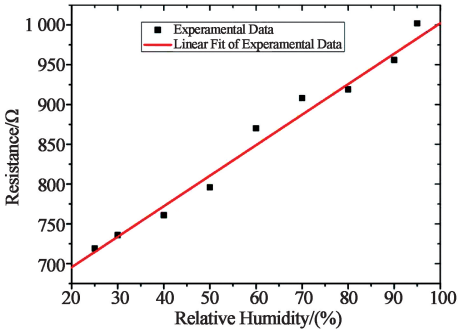
4.3 其他用途 CNT 传感器

其他用途的 CNT 传感器也得到了广泛研究,它们的性能被有效提高,应用范围也更广泛。Liu 等^[29]使用交流介电电泳在叉指电极中沉积了 MWNT 网状薄膜,组装了湿度传感器(如图 5(a)所示)。并通过热退火有效改善了 MWNT 网状



(a)介电电泳沉积 MWNT 网状薄膜到叉指电极间示意图^[29]

(a)Schematic of MWNT networks deposited onto interdigitated electrodes by dielectrophoresis^[29]



(b)室温下 MWNT 网状薄膜电阻与相对湿度的线性拟合^[29]

(b) Resistance-relative humidity linear fit of a MWNT network at room temperature^[29]

图 5 组装湿度传感器的示意图和 MWNT 网状薄膜的电阻-相对湿度线性拟合^[29]

Fig. 5 Schematic diagram of assembly of humidity sensors and resistance-relative humidity linear fit of a MWNT network^[29]

薄膜的电阻稳定性。在室温下随着相对湿度的增加 MWNT 网状薄膜的电阻增大。实验结果表明,该传感器具有 $0.5\%/ \%RH$ 的高灵敏度、3 s 的短响应时间和 25 s 的短恢复时间。此外,该传感器在 25% 至 95% 的相对湿度下,湿度与电阻保持良好的线性关系,如图 5(b) 所示。

Lu 等^[30]研究了 SWNT 薄膜作为传感元件的触觉传感器,SWNT 薄膜的电阻随着在其上施加的压力增大而增大。SWNT 薄膜通过介电泳组装到两电极间,如图 6 所示,在两个电极间有深度约 $12\ \mu\text{m}$ 的沟道,所以 SWNT 薄膜是悬空的且可再生的。然后,SWNT 薄膜被光刻图案化。最后,将聚二甲硅氧烷 (PDMS) 旋涂在 SWNT 薄膜上并固化,增强了 SWNT 薄膜的柔韧性,扩大了传感器的检测限。纳米压痕器测量出该传感器具有 $5\%/ \text{mN}$ 压阻灵敏度和 $2\ \mu\text{N}$ 检测限。与传统的触觉传感器的 $3\%/ \text{mN}$ 灵敏度相比,该传感器可以满足更多的应用需求,比如可以作为微流体系统中的嵌入式压力传感器。

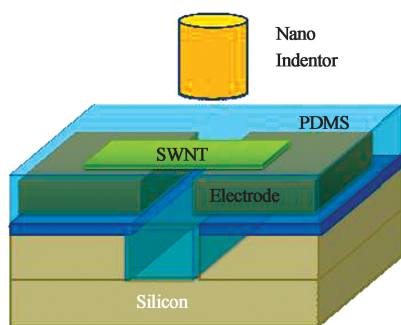


图6 触觉传感器的结构和纳米压痕器实验设置^[30]

Fig. 6 Structure of tactile sensor and experimental setup of nanoindenter^[30]

参 考 文 献:

- [1] IIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon [J]. *Nature*, 1991, 354(6348): 56-58.
- [2] MEYYAPPAN M. Carbon Nanotube: Science and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2004: 1-282.
- [3] FRANK S, PONCHARAL P, WANG Z L, *et al.* Carbon nanotube quantum resistors [J]. *Science*, 1998, 280(5370): 1744-1746.
- [4] LU J P. Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(7): 1297-1300.
- [5] DE HEER W A, CHÂTELAIN A, UGARTE D. A carbon nanotube field-emission electron source [J]. *Science*, 1995, 270(5239): 1179-1180.
- [6] CHOI W B, CHUNG D S, KANG J H, *et al.* Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(20): 3129-3131.
- [7] DAI J F, MU X W, CHEN X T, *et al.* Field emission performances of CNTs bundles array [J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2011, 44(1): 152-155.

此外,还有 CNT 光学传感器、CNT 生物传感器等。虽然这些 CNT 传感器在性能上有很大的提高,但在稳定性、检测限和消除误报等性能上仍有待进一步提高。

5 结 论

本文总结了 CNT 在场发射器、晶体管和传感器中的应用研究进展。镀膜处理、改进组装方法和改进基底都可以使 CNT 场发射器获得低阈值电压、高发射电流而且发射电流稳定的发射性能,改进的平面栅极三极管型 CNT 场发射器容易实现图像明亮的点矩阵的发射图像和动态显示。在介电泳组装过程中进行溶液处理获得的 CNT 晶体管或高柔韧性的 CNT 晶体管均表现出了高迁移率、大跨导和大电流开闭比等优异性能。用光学感应介电泳组装的 CNT 热膜传感器、装饰 SS-DNA 的 SWNT 化学传感器或各种 CNT 薄膜传感器都具有很高的灵敏度。

CNT 作为应用于高性能器件最有潜力的材料之一,有巨大的发展空间和应用前景。CNT 的特性及 CNT 微电子器件仍是目前的研究热点。基于 CNT 的微电子器件正朝着高性能、微型化和大规模生产的方向发展。但当前要实现 CNT 微电子器件的大规模生产还面临许多挑战,例如如何提高 CNT 器件制备效率和降低制备成本,如何将 CNT 制备技术与器件制备技术有效结合等,这些仍需纳米电子领域科技工作者的共同努力。

- [8] KIM J P, CHANG H B, KIM B J, *et al.* Enhancement of electron emission and long-term stability of tip-type carbon nanotube field emitters via lithium coating [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 528: 242-246.
- [9] KIM J P, NOH Y R, KIM J U, *et al.* Electron-emission properties of carbon nanotube micro-tips coated by amorphous carbon nitride films [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(22): 7899-7903.
- [10] MORIHISA Y, KIMURA C, YUKAWA M, *et al.* Improved field emission characteristics of individual carbon nanotube coated with boron nitride nanofilm [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2008, 26(2): 872-875.
- [11] ZHANG Y A, WU C X, LIN J Y, *et al.* An improved planar-gate triode with CNTs field emitters by electrophoretic deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(8): 3259-3264.
- [12] YIN X W, WANG Q L, LOU C G, *et al.* Growth of multi-walled CNTs emitters on an oxygen-free copper substrate by chemical-vapor deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(20): 6633-6636.
- [13] ZHANG J, TANG J, YANG G, *et al.* Efficient fabrication of carbon nanotube point electron sources by dielectrophoresis [J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(14): 1219-1222.
- [14] CHAI G Y, CHOW L, ZHOU D, *et al.* Focused-ion-beam assisted fabrication of individual multiwall carbon nanotube field emitter [J]. *Carbon*, 2005, 43(10): 2083-2087.
- [15] TANS S J, VERSCHUEREN A R M, DEKKER C. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube [J]. *Nature*, 1998, 393(6680): 49-52.
- [16] KIM S K, XUAN Y, YE P D, *et al.* Atomic layer deposited Al_2O_3 for gate dielectric and passivation layer of single-walled carbon nanotube transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(16): 163108-163110.
- [17] KIM S, XUAN Y, YE P D, *et al.* Single-walled carbon nanotube transistors fabricated by advanced alignment techniques utilizing CVD growth and dielectrophoresis [J]. *Solid-State Electronics*, 2008, 52(8): 1260-1263.
- [18] KWON S H, JEONG Y K, KWON S, *et al.* Dielectrophoretic assembly of semiconducting single-walled carbon nanotube transistor [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(S1): s126-s129.
- [19] CHEN C X, YAN L J, KONG E S W, *et al.* Ultrasonic nanowelding of carbon nanotubes to metal electrodes [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(9): 2192-2197.
- [20] STOKES P, KHONDAKER S I. High quality solution processed carbon nanotube transistors assembled by dielectrophoresis [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(8): 083110-1-083110-3.
- [21] BARTIC C, BORGHS G. Organic thin-film transistors as transducers for (bio) analytical applications [J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2006, 384(2): 354-365.
- [22] CHOI W S, AN T, LIM G. Organic electrochemical transistors based on a dielectrophoretically aligned nanowire array [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6: 339.
- [23] SELVARASAH S, MAKARAM P, CHEN C L, *et al.* A novel three dimensional field effect transistor based on single-walled carbon nanotubes[C]. 8th IEEE Conference on Nanotechnology, Arlington, Texas; IEEE, 2008: 18-21.
- [24] SELVARASAH S, ANSTEY K, SOMU S, *et al.* Highly flexible and biocompatible Carbon Nanotube thin film transistors[C]. 9th IEEE Conference on Nanotechnology, Genoa; IEEE, 2009: 29-32.
- [25] COLE B E, ZOOK D J. Carbon nanotube sensor; United States, US7057402[P]. 2006-06-06.
- [26] HSU M C, LEE G B. Carbon nanotube-based hot-film and temperature sensor assembled by optically-induced dielectrophoresis [J]. *IET Nanobiotechnology*, 2014, 8(1): 44-50.
- [27] CATTANACH K, KULKARNI R D, KOZLOV M, *et al.* Flexible carbon nanotube sensors for nerve agent simulants [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(16): 4123-4128.
- [28] CHEN C L, YANG C F, AGARWAL V, *et al.* DNA-decorated carbon-nanotube-based chemical sensors on complementary metal oxide semiconductor circuitry [J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(9): 095504.
- [29] LIU L T, YE X Y, WU K, *et al.* Humidity sensitivity of multi-walled carbon nanotube networks deposited by dielectrophoresis[J]. *Sensors*, 2009, 9(3): 1714-1721.
- [30] LU M, LEE D J, YEOM T, *et al.* Micro tactile sensors with a suspended and oriented single walled carbon nanotube beam embedded in polydimethylsiloxane elastomer [J]. *Sensor Letters*, 2010, 8(4): 639-644.