

碳纳米管介电电泳精确及可控组装技术

李 文, 安立宝*

(华北理工大学机械工程学院, 河北省无机非金属材料重点实验室, 唐山 063009)

摘要:碳纳米管(CNTs)具有优良的电学、热学、光学、力学性能和大的长径比,使得碳纳米管在能源存储、生物医药学、催化剂载体、水气过滤、复合材料等领域存在极大的应用价值。碳纳米管在金属电极之间的精确可控组装是实现其诸多应用的前提,介电电泳法是目前最常用且最具前景的组装方法之一。文中介绍了介电电泳法组装碳纳米管的原理,分析了介电电泳组装碳纳米管的影响因素,分别从碳纳米管的精确定位组装和数量可控组装两个方面进行了综述。

关键词:碳纳米管; 介电电泳; 组装; 控制

引言

碳纳米管(CNTs)是一种具有特殊结构、径向尺寸为纳米级、轴向尺寸为微米级的一维纳米材料,与金刚石、石墨、富勒烯一样,是碳的一种同素异形体。碳纳米管是在 1991 年由日本物理学家饭岛纯雄使用高分辨率分析电镜从电弧法生产的碳纤维中发现的^[1]。由于具有独特的结构和优良的性能,研究人员不断地探究碳纳米管在电子、能源、化工、生物、航空航天等领域的应用^[2~5]。在微纳电子等领域,碳纳米管的组装是指将碳纳米管集成到芯片或微纳装置所需的位置上,使其作为功能元器件或互连线成为系统的组成部分。因此,组装是实现碳纳米管诸多应用的前提。完成碳纳米管组装的方法很多,主要包括原子力显微镜探针和扫描隧道显微镜探针组装^[6,7]、直接生长组装^[8]和介电电泳(DEP)组装^[9]。原子力显微镜和扫描隧道显微镜探针组装效率低,并且容易破坏碳纳米管的结构与性能^[6]。直接生长组装利用化学气相沉积方法完成碳纳米管的水平或者竖直方向生长组装,所需要的温度一般在 800℃~1000℃左右,基质材料容易产生性能变化^[8]。介电电泳组装法是在碳纳米管制备后完成、可经碳纳米管属性选择和分类之后的独立组装方法,可以组装性能优异同时又需要特殊制备条件要求的碳纳米管,组装过程中通常不会对碳纳米管造成损坏和污染。所以,介电电泳已经成为目前最常用和最具前景的碳纳米管组装方法^[9]。文中首先介绍了介电电泳的原理和介电电泳组装碳纳米管的影响因素,然后对几种利用介电电泳法对碳纳米管的组装位置和组装数量进行控制的新技术进行了综述,最后简述了降低碳纳米管接触电阻的方法。

1 介电电泳法组装碳纳米管简介

1.1 介电电泳原理

将悬浮有中性粒子的介电液置于外加电场中,由于粒子和介电液的极化率不同,介电液中的正负电荷以及粒子表面的离子团等微粒在电场作用下将向粒子与介电液的交界面运动,出现正、负电荷积聚于界面两侧的极化效应^[10],如图 1 所示。在非均匀电场中这些极化电荷所受的电场力不可相互抵消,产生净力促使粒子发生运动的现象称为介电电泳现象^[11]。当粒子的极化率大于介电液的极化率时,在粒子

10.14028/j.cnki.1003-3726.2016.08.005

收稿:2015-11-13;修回:2016-04-15;

基金项目:国家自然科学基金(51172062,51472074);河北省“百人计划”资助项目(E2012100005);

作者简介:李文(1991—),男,硕士研究生,研究方向为碳纳米管介电电泳组装技术及接触电阻的研究;

* 通讯联系人:安立宝,博士,教授,研究方向为微纳制造技术、先进纳米材料特性及应用。E-mail:lan@ncst.edu.cn.

与介电液交界面的粒子一侧积聚的电荷多于介电液一侧积聚的电荷,介电电泳力会驱使粒子向电场强度相对较高的区域运动,此时为正介电电泳(如图 1 所示);反之,当粒子的极化率小于介电液的极化率时,交界面介电液一侧积聚的电荷多,介电电泳力会驱使粒子向电场强度相对较低的区域运动,此时为负介电电泳。对碳纳米管进行介电电泳组装时,在金属电极两端施加交变电压,使碳纳米管悬浮液处于非均匀电场中,当碳纳米管的极化率大于介电液的极化率时,碳纳米管受到正介电电泳作用,向电场强度大的方向运动,即向电极间隙(两金属电极之间的空当处)方向运动^[12](如图 1 所示),并在运动过程中保持与电场线相切。当碳纳米管长度大于电极间距时,碳纳米管最终运动到电极间隙,并将两个金属电极连接起来,完成组装。当外加交变电场方向改变时,碳纳米管与介电液界面上诱导出的极化电荷的正负也相应变化,因此,碳纳米管的运动方向不会随外加电场方向的变化而变化。

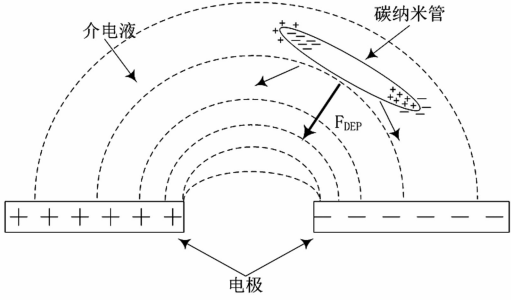


图 1 碳纳米管在电场作用下的极化与组装示意图
Figure 1 Schematic of CNT polarization and assembly under electric field

1.2 组装影响因素

外加交变电压的幅值和频率、碳纳米管悬浮液浓度、外加电场作用时间、电极形状等都会对碳纳米管介电电泳组装产生影响^[13,14]。An 等^[14]在介电电泳组装时对不同外加电压幅值和频率、悬浮液浓度及外加电场作用时间等对碳纳米管组装的影响做了分析与比较。

(1)外加交变电压幅值和频率

外加交变电压的幅值决定了电场强度。在碳纳米管悬浮液浓度和外加电场作用时间等因素不变的情况下,增加交变电压幅值,介电电泳力随之增加,更多的碳纳米管会被吸引到电极间隙。增大交变电压频率,组装后碳纳米管排布的方向性更强,但不会影响碳纳米管的组装数量^[14]。An 等^[14]在悬浮液浓度为 1 μ g/mL、外加交变电场作用时间为 50s 的条件下,分别对金属电极两端施加 1.5 V 和 3V 的交变电压。外加电压为 1.5V 时,实现了碳纳米管在金属电极间隙的单根搭接;外加电压为 3V 时,在电极间隙搭接的碳纳米管数量明显增加。Boote 等^[15]也对外加交变电压幅值和频率对组装碳纳米管数量的影响进行了实验研究,表明碳纳米管的组装数量随着施加在电极上交变电压幅值的增加而增加。

(2)碳纳米管悬浮液浓度

在电场强度和作用时间不变时,随着碳纳米管悬浮液浓度的增加,更多的碳纳米管会在电极间隙完成组装。当需要组装少量碳纳米管时,应使用低浓度的悬浮液^[14]。Han 等^[16]对悬浮液浓度的影响进行了实验研究。结果表明:在交变电压为 10V、电场作用时间为 30s 的条件下,浓度为 1 μ g/mL 时很难观察到碳纳米管在电极间隙搭接;浓度为 5 μ g/mL 时最适合碳纳米管在电极间隙的单根搭接;浓度为 10 μ g/mL 时,大量的碳纳米管搭接在电极间隙。

(3)外加交变电场作用时间

外加电场的作用时间决定整个组装时间。长的电场作用时间允许更多的碳纳米管向电极间隙移动,并最终在电极间隙完成组装。当需要大批量组装碳纳米管时,可以通过增加交变电场的作用时间来实现^[17]。An 等^[14]在电压幅值为 2V、悬浮液浓度为 2 μ g/mL 的条件下,控制外加电场的作用时间分别为

50s 和 90s 进行组装实验。结果表明:在外加电场作用时间为 50s 时,碳纳米管在金属电极间隙完成单根搭接;外加电场作用时间为 90s 时,电极间隙搭接的碳纳米管数量增加。Zhang 等^[18]也发现组装的碳纳米管数量会随着组装时间的增加而增加。

综上所述可知,金属电极间隙组装的碳纳米管数量随着外加电压幅值、碳纳米管悬浮液浓度、外加交变电场作用时间的增加而增加。此外,碳纳米管长度的一致性、金属电极形状、悬浮液种类等也会对组装结果造成影响^[14],仅对实验参数进行控制很难实现精确位置和精确数量的组装。针对该问题,近年来出现了一些碳纳米管介电电泳组装新技术,包括浮动金属电极辅助介电电泳组装、光诱导介电电泳组装、间隙阻抗实时监测介电电泳组装和自限制性电阻介电电泳组装等,为纳米传感器、场发射晶体管、纳米互连线、灵敏电子元件等的制作奠定基础,提高了碳纳米管的实际应用价值。

2 碳纳米管精确定位和数量可控组装

2.1 碳纳米管精确定位组装

在多电极或多元器件的复杂电路中,仅在介电电泳力作用下,碳纳米管可能在相邻电极或相邻元器件之间搭接,无法发挥其特定功能。因此,制作基于碳纳米管的传感器和场效应晶体管等纳米器件以及碳纳米管互连线仍然是一个挑战^[19]。为了精确控制碳纳米管在复杂电路中的组装位置,可采用碳纳米管精确定位组装的方法。碳纳米管精确定位组装是利用浮动金属电极、光诱导等方法引导碳纳米管在特定元器件之间组装,为复杂电路中碳纳米管的连接、组装和纳米元器件的研究开启了新思路。

2.1.1 浮动电极辅助介电电泳组装 当存在如图 2(a)所示的四个对称布置的单个金属电极,且仅需在水平方向上的一对相对电极之间组装碳纳米管,由于施加电压的水平两电极与其相邻电极(未施加电压的竖直方向上的一对电极)之间的距离小于水平方向上两通电相对电极之间的距离,因而水平两电极与竖直两电极(相邻电极)之间会产生比水平方向施加电压的两相对电极之间更强烈的电场,碳纳米管会趋于在两个相邻电极之间完成组装(如图 2(a)所示)^[20]。为了防止碳纳米管在相邻电极上搭接,可以采用沿着两水平通电电极间隙设置浮动金属电极块的方法,如图 2(b)所示^[20]。浮动金属电极块的存在增强了局部电场强度,使得电场更加集中,局部介电电泳力至少会增加三个数量级^[21]。此时,碳纳米管在电极间隙组装过程中的运动会受到引导,完成在施加电压的两电极间精确组装(如图 2(b)所示)。碳纳米管在没有浮动金属电极块的情况下会在四个电极间场强最大的位置排列,设置浮动金属电极块后,碳纳米管在电极间的沉积受到引导,完成在相对电极之间的排列、组装^[22]。

浮动金属电极对碳纳米管的引导不是因为金属块的黏着作用,而是因为浮动金属块的存在影响了电极之间的电场分布,改变了介电电泳力的大小和方向^[20]。浮动金属块电极法在控制碳纳米管的精确定位时经济、简单,在单独控制外加交变电压幅值不足以直接控制组装的情况下,可以采用该方法提高对碳纳米管的操控能力,达到组装要求^[23]。

2.1.2 光诱导介电电泳组装 光诱导介电电泳作为一种新技术,已经被应用到操控血细胞、纳米线和碳纳米管当中。光诱导介电电泳可以使碳纳米管在两个电极之间完成精确组装,形成以碳纳米管为基础的纳米传感器和纳米电路。

光诱导介电电泳的实现需要图 3 所示的三层结构装置^[24]:顶层与底层是间距为 $30\mu\text{m}$ 的氧化铟锡(ITO)玻璃层,中间层是由硅材料(a-Si)制成的光电导层,金属电极设置在光电导层上,其间加入碳纳米管悬浮液,整个装置安置在透明玻璃基底上。金属电极通电后,用设计光源照射光电导层,光照区域可以看做成虚拟电极,光电导层上会产生电子空穴对,使阻抗急剧减小,光照区域从而会产生非均匀电场^[24]。在介电电泳力的作用下,可以通过缓慢移动光源或变换光源形状对碳纳米管进行操控^[19]。悬浮液中的杂质对介电电泳力不敏感,在施加电压后杂质将与碳纳米管分离。此法可以用来控制碳纳米管的收集、组装、提纯,并能使碳纳米管在电极间重新排列^[25]。

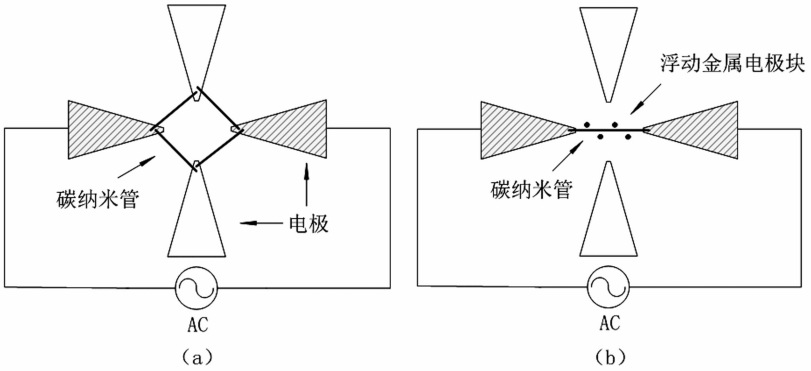


图 2 (a)设置浮动金属电极块前,最大场强位置出现在相邻电极之间,碳纳米管在相邻电极之间搭接;(b)设置浮动金属电极块后,增强了局部电场,最大场强位置出现在水平相对电极之间,碳纳米管在水平相对电极之间完成组装

Figure 2 (a) The largest electric field appeared between the adjacent electrodes before positioning floating metal electrode posts, and CNTs were assembled between the adjacent electrodes^[20]; (b) The largest electric field appeared between the horizontal electrode pairs after positioning floating metal electrode posts between them due to the enhancement of the local electric field, and CNTs were assembled between the horizontal electrode pairs

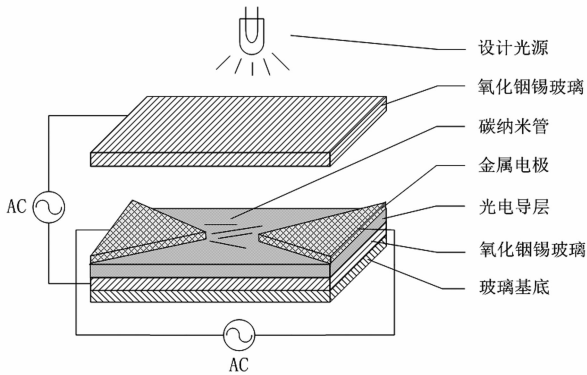


图 3 光诱导介电电泳组装碳纳米管结构示意图

Figure 3 Structural schematic of CNT assembly by optical induced DEP

浮动电极辅助介电电泳组装和光诱导法介电电泳组装碳纳米管的原理和优点比较见表 1。

表 1 浮动电极辅助介电电泳和光诱导介电电泳的比较

Table 1 Comparison between floating electrode assisted DEP and optical induced DEP

组装方法	原理	优点
浮动电极辅助介电电泳组装	浮动金属电极块增强了局部电场强度,增加了局部介电电泳力,使碳纳米管在电极间隙的组装受到引导。	1. 增加了对碳纳米管的操控范围; 2. 提高了基于介电电泳的碳纳米管器件制备精度; 3. 有助于减缓碳纳米管的布朗运动。
光诱导介电电泳组装	光源照射后光电导层形成电子空穴对,阻抗降低,光照区域产生非均匀电场,碳纳米管受到引导完成组装。	1. 虚拟电极的形状可以进行动态改变; 2. 碳纳米管的组装和收集过程更具有灵活性; 3. 可以对组装的碳纳米管进行提纯处理。

2.2 碳纳米管数量可控组装

在基于碳纳米管的复杂电路组装中,有时需要在电极或元器件之间完成特定数量碳纳米管的搭接。为了实现组装要求,可采用碳纳米管数量可控组装的方法。碳纳米管数量可控组装是用间隙阻抗实时监

测、自限制性电阻等方法控制介电电泳组装时碳纳米管的数量。控制碳纳米管在电极间隙组装的数量尤为重要,是制作灵敏电子元器件、纳米传感器等纳米器件的基础^[26]。

2.2.1 间隙阻抗实时监测介电电泳组装 用介电电泳法组装碳纳米管时,组装结果通常是多个碳纳米管沉积在电极间隙,并需要用扫描电子显微镜来检查组装结果,组装过程缺少实时信号反馈来终止进程^[27]。用间隙阻抗实时监测法,可以有效地解决以上三个难题,对完成组装的碳纳米管数量进行有效控制。

完成组装的碳纳米管数量与间隙电信号的大小存在着对应关系。LCR 测试仪可以为介电电泳组装提供交变电场,同时,通过 LCR 测试仪对间隙阻抗的连续监测,能对组装做出实时判断。在碳纳米管浓度较低时,阻抗瞬间减小,且持续 4s 以上,可以认为碳纳米管在电极间隙完成了单根组装,此时可以关闭 LCR 测试仪从而停止提供电场^[27]。当大量的碳纳米管(超过 5 根)在电极间隙组装后,继续组装时阻抗的变化不明显,系统很难识别后续完成组装的碳纳米管数量^[28]。碳纳米管组装时,如果是电极间隙电阻的变化主导着阻抗的变化,也可以通过同样的方式监测电极间隙的电阻,从而对碳纳米管的组装数量进行控制^[29]。

2.2.2 自限制性电阻介电电泳组装 用介电电泳法组装碳纳米管时,可在回路串联一个阻值较高的外加电阻,该电阻被称作自限制性电阻,如图 4 所示。在电压幅值、碳纳米管悬浮液浓度和外加电场作用时间等组装条件不变时,设置自限制性电阻后,电极间可以俘获单根碳纳米管,避免了碳纳米管在电极间隙的大量沉积^[30]。这是因为单根碳纳米管完成组装后,会与金属电极形成有效的电接触,导致电极间隙电阻急剧下降^[31]。在自限制电阻足够高的情况下,自限制性电阻两端的电压降会在整个电路中占主要地位,而分配在电极两端的电压降很小,电极间隙的电场因此也大大减小,从而阻止了碳纳米管的进一步组装,使得组装进程自动停止^[31]。

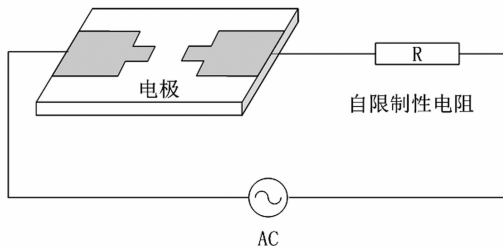


图 4 自限制性电阻电路原理图

Figure 4 Circuit diagram with a self-limiting resistor

Arun 等^[32]对碳纳米管在电极间隙完成组装之后的场强变化进行了实验研究。观察表明:随着组装时间的增加,俘获的碳纳米管的数量仍会有微量的增加,但在一段时间后趋于饱和状态,这可能是由于碳纳米管在电极间隙的平行排列大大减弱了局部电场,使组装过程停止。该实验表明,碳纳米管组装之后的电场在很大程度上得到降低,但并非被完全切断。

用自限制性电阻介电电泳法组装碳纳米管时,金属电极之间电场强度和梯度、电场作用时间、以及外加自限制性电阻和碳纳米管电阻(包括接触电阻)的大小和比例都会对组装结果造成影响。相对于传统的介电电泳组装方法而言,自限制性电阻介电电泳组装提高了俘获单根或小数量碳纳米管的操控能力,为今后纳米器件、纳米电路的设计和制作提供了借鉴^[31]。

3 降低碳纳米管接触电阻的方法

以上技术的研究,使碳纳米管的组装朝着准确、可控和稳定的方向发展,但组装后碳纳米管与金属电极之间较高的接触电阻成为碳纳米管应用的极大障碍。因此,如何降低碳纳米管的接触电阻成为探索和研究碳纳米管应用的当务之急^[33]。

目前常用的降低碳纳米管接触电阻方法有:

(1)高温退火法:在真空或惰性气体中对碳纳米管进行退火处理,使碳纳米管与金属电极接触处的气体、杂质等物理吸附物在高温下脱落,从而改善其接触性能,降低了接触电阻^[34];

(2)局部焦耳热法:由于碳纳米管与金属电极的接触处电阻较高,通电后,接触位置会产生大量的焦耳热,使水汽、杂质等物理吸附物脱落^[35]。同时,碳纳米管会在接触位置发生一定程度的形变,增加了碳纳米管和金属电极的连接强度,并改善了接触性能^[35];

(3)电子束辐照法:通过电子束对碳纳米管与金属接触部位进行轰击,碳纳米管会产生缺陷,接触位置的电子散射会增加,使碳纳米管与金属电极之间的电子传导更容易^[36]。该方法的缺点是效率低,并且长时间的电子束辐照会对碳纳米管的结构造成损伤^[37];

(4)超声纳米焊接法:用超声波焊接法降阻时,在一定的超声波频率范围内,与金属电极接触处的碳纳米管两端的电阻会随着超声波功率的增大而减小^[35]。碳纳米管在超声波的作用下,焊接在金属电极上,使金属电极与碳纳米管之间形成长期稳定的低电阻接触和牢固的机械连接^[37]。

此外,用电子束辐照分解金属化合物和化学镀等方法,在碳纳米管和金属电极接触位置形成金属沉积,也可以有效地提高接触性能,达到降低接触电阻的效果^[37,38]。

高温退火法和局部焦耳热法操作简便,提高了碳纳米管与金属电极之间的表面接触性能,但高温会破坏碳纳米管的结构并对碳纳米管器件性能产生影响,降阻处理后还有可能会出现电阻逆转现象^[37,39]。电子束辐照法增大了电子在碳纳米管与金属电极之间的输运能力,但对实验条件要求苛刻,需要在扫描电子显微镜腔体中操作^[36]。超声纳米焊接法可在常温下进行,降阻过程快速可靠,但在自动化程度、处理精度等方面有待提高^[36]。通过不断提高和完善降低碳纳米管接触电阻技术的实用性和可行性,减少接触电阻带来的不利影响,对碳纳米管器件性能的提高起到了极大的促进作用^[36]。

4 结论

碳纳米管在电极之间的精确、可控组装是实现其诸多应用的前提。介电电泳法是目前最具前景也是最常用的组装方法,组装过程中交变电压幅值、碳纳米管浓度、电场作用时间、电极形状等因素都会对组装结果产生影响。在仅控制电压等参数不足以直接控制组装的情况下,通过在电场中特定位置设置浮动金属电极的方法提高了对碳纳米管的操控能力,过程经济、简单。光诱导介电电泳通过改变光源形状能够动态改变虚拟电极的形状,使碳纳米管的组装和收集过程更具有灵活性。间隙阻抗实时监测反馈技术可以实现小数量碳纳米管的自动化组装,减少了后续扫描电子显微镜检查过程。自限制性电阻介电电泳组装也可以自动控制组装数量,实现单根碳纳米管组装。这些新技术增强了组装时对碳纳米管的操控能力,能够满足碳纳米管精确组装时的不同要求。

通过对碳纳米管组装及后处理技术的不断研究和积极探索,人们对碳纳米管的精确可控组装和接触电阻的改善向着准确、稳定、实用的方向发展,促进了碳纳米管在各个领域的应用,有效地提升了碳纳米管的应用价值。

参考文献:

- [1] Iijima S. Nature, 1991, 354(6348): 56~58.
- [2] 费飞,曲艳丽,李文荣. 计算机仿真, 2008, 25(2): 314~318.
- [3] Li J, Zhang Q, Yang D, Tian J. Carbon, 2004, 42(11): 2263~2267.
- [4] 李峰,白朔. 新型炭材料, 2000, 15(3): 79~80.
- [5] Baughman R H, Zakhidov A A, Heer W A D. Science, 2002, 297(2): 787~792.
- [6] Hertel T, Martel R, Avouris P. J Phys Chem B, 1998, 102(6): 910~915.
- [7] Yu M F, Lourie O, Dyer M J, Moloni K, Kelly T F, Ruoff R S. Science, 2000, 287(5453): 637~640.
- [8] Dai H, Hafner J H, Rinzler A G, Colbert D T, Smalley R E. Nature, 1996, 384(6605): 147~150.

- [9] Ismach A, Joselevich E. Nano Lett, 2006, 6(8): 1706~1710.
- [10] Huang L, Jia Z, O'Brien S. J Mater Chem, 2007, 17(37): 3849~3948.
- [11] Pohl H A. Dielectrophoresis. New York: Cambridge University Press, 1978.
- [12] Lai K W C, Xi N, Fung C K M, Zhang J B, Chen H Z, Luo Y L. Int J Robot Res, 2009, 28(4): 523~536.
- [13] Seo H W, Han C S, Choi D G, Kim K S, Lee Y H. Microelectron Eng, 2005, 81(1): 83~89.
- [14] An L, Friedrich C. Prog Nat Sci Mater Int, 2013, 23(4): 367~373.
- [15] Boote J J, Evans S D. Nanotechnology, 2005, 16(9): 1500~1505.
- [16] Han C S, Seo H W, Lee H W, Kim S H, Kwak Y K. Int J Precis Eng Man, 2006, 7(1): 42~46.
- [17] An L, Friedrich C R. J Appl Phys, 2009, 105(7): 074314.
- [18] Li J, Zhang Q, Peng N, Zhu Q. Appl Phys Lett, 2005, 86(15): 153116.
- [19] Raychaudhuri S, Dayeh S A, Wang D, Edward T Y. Nano Lett, 2009, 9(6): 2260~2266.
- [20] Banerjee S, White B E, Huang L, Rego B J, Rrien S O, Herman I P. J Vac Sci Technol B, 2006, 24(6): 3173~3178.
- [21] Golan S, Elata D, Dinnar U. Sensor Actuat A-Phys, 2008, 142(1): 138~146.
- [22] Sorgenfrei S, Meric I, Banerjee S, Akey A, Rosenblatt S, Herman I P, Shepard K L. Appl Phys Lett, 2009, 94(5): 053105.
- [23] 韩子旭, 安立宝. 微电子学, 2015, 45(3): 382~386, 390.
- [24] Wu P F, Lee G B. Adv Optoelectron, 2011, 2011, 6348.
- [25] Lee M W, Lin Y H, Lee G B. Microfluid Nanofluid, 2010, 8(5): 609~617.
- [26] Banerjee S, White B, Huang L, Rego B J, Brien S O, Herman I P. Appl Phys A, 2007, 86(4): 415~419.
- [27] An L, Friedrich C R. Appl Phys Lett, 2008, 92(17): 173103.
- [28] An L, Cheam D D, Friedrich C R. J Phys Chem Lett C, 2009, 113(1): 37~39.
- [29] An L, Friedrich C R. Nucl Instrum Meth B, 2012, 272(2): 169~172.
- [30] Freer E M, Grachev O, Duan X, Martin S, Stumbo D P. Nat Nanotechnol, 2010, 5(7): 525~530.
- [31] Saito R, Dresselhaus G, Dresselhaus M S. Physical properties of carbon nanotubes. London: Imperial college press, 1998.
- [32] Arun A, Salet P, Ionescu A M. J Electron Mater, 2009, 38(6): 742~749.
- [33] 谭苗苗, 叶雄英, 王晓浩. 功能材料与器件学报, 2008, 14(1): 227~230.
- [34] Reddy V R, Umapathi A, Rao L D. Curr Appl Phys, 2013, 13(8): 1604~1610.
- [35] 孟岭超, 曾永彬, 曲宁松. 光学精密工程, 2014, 22(3): 679~686.
- [36] 陈长鑫, 金铁宁, 张亚非. 无机材料学报, 2012, 27(5): 449~457.
- [37] An L, Yang X, Chang C. Int J Theor Appl Nanotechnol, 2013, 1(2): 30~40.
- [38] Woo Y, Duesberg G S, Roth S. Nanotechnology, 2007, 18(9): 095203.
- [39] Yang X X, An L B, Ding C. Mater Sci Forum, 2013, 745: 447~452.

A Technical Review of Precise and Controllable Assembly of Carbon Nanotubes by Dielectrophoresis

LI Wen, AN Li-bao*

(College of Mechanical Engineering, Hebei Provincial Key Laboratory of Inorganic Nonmetallic Materials, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)

Abstract: Due to their excellent electrical, thermal, optical, mechanical properties and high aspect ratio, carbon nanotubes (CNTs) have great application potentials in energy storage, biomedicine, catalyst supports, air and water filtration, and composites, among others. Precise and controllable positioning of CNTs between a pair of electrical conductors is the prerequisite for many of their applications. As a promising way, dielectrophoresis (DEP) has been frequently used for this purpose. This paper introduces the theory of DEP and analyzes the effect of DEP parameters on the results of CNT assembly. The research progress on DEP control with respect to the position and quantity of assembled CNTs has been reviewed.

Key words: Carbon nanotube; Dielectrophoresis; Assembly; Control