



碳基纳米技术

施毅^{①*}, 金智^②, 傅云义^③, 于贵^④, 吴南健^⑤, 李昀^①

① 南京大学电子科学与工程学院, 南京 210093

② 中国科学院微电子研究所, 北京 100029

③ 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

④ 中国科学院化学研究所, 北京 100190

⑤ 中国科学院半导体研究所, 北京 100083

* 通信作者. E-mail: yshi@nju.edu.cn

收稿日期: 2012-08-13; 接受日期: 2012-10-29

摘要 回顾展望了基于 π -共轭分子体系的碳基纳米技术的三个重要研究领域: 有机半导体体系、石墨烯和碳纳米管, 并重点评述了相关的基础科学和技术研究进展. 近年来, 该领域取得了令人瞩目的发展和成果, 对相关材料的结构、性质和性能等基本认识越来越深入, 基于碳基纳米技术的器件正在逐渐融入到主流电子产品, 在推动微纳电子学科的发展中起到越来越重要的作用.

关键词 碳基纳米技术 有机半导体 石墨烯 碳纳米管

1 引言

基于传统无机半导体材料 (如硅、砷化镓、氮化镓) 的微电子科学和技术及其产业, 推动着信息技术的发展和信息社会的进步. 众所周知, 微电子技术及其产品的发展长期以来遵循“摩尔定律”. 如此稳定而迅猛的发展, 主要源于电子产品性能和稳定性的持续提高, 以及单元器件生产成本的不断降低. 然而, 目前单元器件尺寸已经逼近其极限. 微电子要继续保持良好的发展趋势只能另辟蹊径, 所以开发新材料、新器件工作概念逐渐成为业界的新关注点. 自 20 世纪后叶兴起的基于 π -共轭分子体系的有机半导体、石墨烯和碳纳米管, 不断引领着一轮又一轮的科学研究和应用实践的浪潮, 国际半导体技术路线图提出了相应的发展蓝图, 为微电子产业未来的发展带来了新的曙光. 本报告重点评述了有机半导体体系、石墨烯和碳纳米管相关的基础科学和技术研究进展.

2 有机半导体体系

随着对新型信息材料及器件的深入研究和探索, 人们已意识到以有机/聚合物半导体为材料基础的新型电子及光子器件将推动信息科学和技术的高速发展. 有机/聚合物半导体材料由于其自身的特点, 如种类的多样性, 多功能性, 柔性, 低成本, 可大面积集成等^[1~5], 引起科学家和企业的极大兴趣, 越来越多的学术机构和大公司投入大量的人力和物力开展研究工作. 近年来, 经过不同研究领域的科技人员的共同努力, 有机/聚合物半导体材料与器件的研究得到了突飞猛进的发展, 无论在学术上,

还是在实际应用中都取得了丰硕的成果, 但仍有许多科学问题亟待解决, 这为人们提供了更多机遇和挑战.

2.1 有机/聚合物半导体场效应晶体管: 材料与器件

有机/聚合物场效应晶体管 (FETs) 具有许多优点, 是制备有机光电子器件和电路的关键元器件, 在智能卡、电子商标、存储器、传感器和有源矩阵显示器等将得到广泛应用^[6~8]. 经历着从真空蒸发处理的有机小分子到可溶性有机聚合物半导体, 再到通过化学合成设计得到的高性能可溶性有机半导体小分子材料, 有机电子学及其器件的发展有着令人赞叹的历程, 并且不断有新颖的、逐步完善的器件制备工艺来支撑起整个领域的持续发展. 但迄今, 具有高稳定性和高迁移率的场效应半导体材料非常少. 掌握分子结构与性能关系设计、合成高性能的有机分子材料并利用分子结构调控光电性能是突破该领域发展瓶颈的关键. 器件的稳定性是有机/聚合物 FET 器件能得到实际应用的前提, 而材料的稳定性是决定器件寿命的关键因素. 同时, 还需关注降低器件、产品的制备生产成本, 以及拓展其应用范围.

2.2 有机/聚合物电致发光材料及发光二极管

有机及聚合物电致发光 (EL) 器件具有许多优点和很强的应用背景, 其高亮度、高效率、低压直流驱动、低成本、大面积和彩色显示等优点给现代显示技术展现了辉煌的前景, 被普遍认为是最发展前景的下一代平板显示器件. 自 1987 年 C. W. Tang 报道有机/聚合物发光二极管 (O/PLED) 以来, O/PLED 无论在发光亮度、效率、颜色、寿命等发光性能方面还是在其制备技术方面都得到了迅猛的发展, 获得了世人的瞩目^[9~16]. 虽然目前在 O/PLED 的研究领域已取得了巨大的进展, 但是仍存在一些关键问题亟待解决, 如: (1) 有机/聚合物材料是构筑 O/PLED 器件的基础, 只有得到性能优良的有机/聚合物分子, 才能实现高性能的 EL; (2) 在有机/聚合物发光材料的合成及器件性能方面取得突破的同时, 器件的效率、薄膜的稳定性、材料的成膜性及蓝色和红色发光材料的性能等还有待进一步提高; (3) 材料和器件的载流子注入、能力转移、载流子传输、激子的形成及发射发光等过程的理论研究亟待加强, 为设计分子和优化器件结构提供重要的理论指导.

2.3 有机/聚合物光伏材料及其器件

有机/聚合物太阳能电池已成为当今新材料和新能源领域中最重要的前沿研究领域之一^[17~24], 但成为商业产品还有很大的距离, 面临的关键问题是效率和寿命. 从材料角度来看, 低效率的主要原因为: (1) 有机/聚合物半导体材料的载流子迁移率低; (2) 有机/聚合物半导体材料的吸收光谱与太阳发射光谱不匹配, 太阳光利用率低; (3) 缺乏综合性能优良的电子受体材料. 因此, 目前的迫切任务是设计满足要求的有机/聚合物半导体材料. 需要加深对有机/聚合物光电转换过程中的电荷转移、分离、复合和输运过程及能量转移过程等基本科学问题的认识, 为分子设计和器件优化提供重要的理论指导.

2.4 有机电子器件商业产品发展与应用

20 世纪 90 年代中期开始, 有机电子学经过多年不断探索和深入研究, 已经从基础科学实验室的科研领域步入到商业产品领域. 有机电子器件的实际应用是长期以来所备受期盼, 许多令人惊喜的商

业产品不断出现在商店的货架上. 同时, 给电子工业界带来了新的发展动态, 即基于低成本的材料和制备方式的生产工艺, 以及产品应用性的拓展. 尤其是轻薄、柔性电子产品将会极大的拓宽应用范围; 基于有机材料的溶液器件制程工艺, 包括旋涂 (spin-coating)、喷墨打印 (ink-jet printing) 和连续性卷到卷 (roll-to-roll) 制程等, 也打破了许多传统半导体行业的多个阈限, 彰显了有机电子材料和器件相较于传统无机材料的巨大优势.

目前, 有机电子的成熟应用还主要集中在美国、日本、韩国和欧洲等. 在各种有机电子产品中, 有机发光二极管因其自主发光特性而无需逆光系统使得亮度高、视野范围广而耗电量小, 同时又具有制造工艺简单、器件可制成尺寸大等优点, 成为下一代最重要的显示技术之一. 2008 年, 德国和英国合作的 PlasticLogic 公司公布了基于有机晶体管和有机发光二极管技术的超轻薄柔性电纸书产品 QUE; 2011 年日本 Sony 公司开始售卖应采用有机发光二极管的头戴式 3D 屏幕, 同时也在多个重要电子产品会议上, 展示了高弯曲性的显示器; 目前, 韩国 Samsung 公司是全球 OLED 显示领域的领导者, 建成了多条 OLED 生产线, 并应用于一些消费电子产品, 未来将很快实现可量产 40 英寸以上的大屏幕电视机. 值得欣喜的是, 我国也在近年开始关注有机电子产品的发展, 投入了大量的科研力量和资金, 大力推动科研界与工业界的良好结合, 也取得令人瞩目的成果. 特别在有机发光二极管领域.

2.5 关于有机电子学未来发展的几个问题

这里, 我们在此调研报告中首先讨论有机电子学, 是因为其近 20 年的发展过程非常值得我们在其他科研领域上借鉴. 最初在有机体系中获得导电性能, 引起了科研界的极大兴趣; 然而最先获得的器件性能总是让人失望的, 也确有一段时期人们对这一类材料的实际应用并不抱有乐观的态度; 但是通过多个学科领域的良好交叉和互相促进, 以及准确的应用定位, 使得有机电子器件的性能在短短几年就达到了非晶硅材料的性能, 并具有基于可弯折等一些传统材料无法实现的特性; 特别是有机发光和显示技术的突破, 已迅速获得了未来市场的认可; 市场份额的增长, 也就必然给整个有机电子学领域注入了更持久高速的发展动力.

自“七五”以来, 我国有机/聚合物半导体材料与器件的研究受到国家自然科学基金委员会、科技部和中国科学院的高度重视, 并得到大力资助. 经过科研人员近 30 年的不懈奋斗, 已经有了相当的基础, 在国际上具有一定的影响, 在材料的合成、分子组装、分子晶体和薄膜的光电磁性能等方面都取得很好的成果. 同时, 有机材料和器件应用的高技术企业也得到了迅速发展. 我们处在一个即将取得突破的时期, 应及时规划和加大支持力度, 组织力量, 明确攻关目标, 将使我们在分子材料及其器件的研究方面取得突破, 推动我国微电子学的发展.

3 石墨烯

石墨烯 (Graphene) 作为本世纪初最引人注目的新型材料, 由于其在未来超高性能器件上的潜在应用, 它被认为是未来电子产业界中最具有战略性的研究领域之一^[25~28]. 短短几年的时间里, 关于石墨烯的各方面研究工作都得到了异常迅速的进展. 其中, 包括有在量子科学等基本理论框架下对石墨烯材料特性的研究, 制备大尺寸高品质石墨烯薄膜的实验技术和方法, 以及多种以此为核心材料的电子器件的开发.

3.1 石墨烯电学特性的基础理论研究

关于石墨烯的电学特性的理论研究, 早在 20 世纪 40 年代就有相关科技文献^[29]. 目前, 关于石

石墨烯电学特性研究值得关注的一个领域是, 石墨烯中起到电荷载流子作用的激子是零质量且具有手性的狄拉克费米子, 从而带来了各种新奇的物理现象^[30~36]. 此外, 对石墨烯电学特性研究的另一重要性是基于狄拉克费米子的克莱恩佯谬 (Klein Paradox) 这一特殊电学行为, 即能够以数值为 1 的概率隧穿过经典电动力学架构下的高宽势垒, 并因此使得狄拉克费米子不受外加电场的影响^[37,38]. 而同时, 狄拉克费米子又会在约束势的作用下表现出 Zitterbewegung 现象, 即波函数的抖动行为^[39]. 由于材料中的缺陷能产生约束势, 因而很多研究工作在此理论模型上深入研究了缺陷对于石墨烯中电子物理行为的影响^[40]. 同时, 由于石墨烯是二维结构, 电子受到界面散射的影响很大^[41]. 理论和实验证明, 改进石墨烯的界面性质可以大幅度提高石墨烯的载流子迁移率等器件性能^[42,43]. 类似的工作有益于不断深入理解微尺度下相对论粒子的量子力学行为, 同时也为进一步提高石墨烯器件性能奠定坚实的理论基础.

3.2 新型石墨烯制备方法

微机械剥离法, 是目前最普通也是最初获得石墨烯的实验方法, 通过这样的办法获得的石墨烯样品在空气中稳定, 相应的器件性能稳定, 比较性高. 同时也存在尺寸可控性差、在衬底的沉积位置与分布性无法控制等问题. 这直接导致通过微机械分离法获得的石墨烯仅能够作为实验室的研究对象, 而无法适用于未来实际器件的开发与制备.

在此同时, 各种新型的石墨烯合成制备方法也不断的涌现, 例如晶膜生长法、加热 SiC 法^[44]、化学还原法、化学解理法^[45], 以及各种 CVD 沉积法^[46~48] 等. 对于电子器件应用而言, 石墨烯材料合成有四个值得关注的重要进展^[49~60]: (1) 大尺度石墨烯薄膜. 利用 CVD 或碳化硅高温热分解技术合成晶圆级石墨烯, 并成功用于研制高性能电子器件; 利用 roll-to-roll 转移技术, 可将 30 英寸石墨烯成功转移至任何柔性衬底上. (2) 单晶石墨烯: 在铜箔上生长石墨烯, 通过控制成核点来控制石墨烯的生长可获得毫米级的单晶石墨烯; 或利用 CVD 技术在铂片、二元金属合金上生长毫米尺度石墨烯, 室温载流子迁移率高达 $7100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 利用液态铜, 消除基底晶向的影响, 生长出厘米尺度的单晶石墨烯, 该突破表明制备晶圆级单晶石墨烯是有可能的; 利用单层硅插入石墨烯和金属衬底层之间, 获得制备出硅石墨烯异质膜结构, 直接应用于器件制备. (3) 室温合成石墨烯. 可在 $25 \sim 160^\circ \text{C}$ 温度范围内获得了石墨烯, 并可在 SiO_2 、塑料或玻璃衬底表面上直接形成、无需转移. (4) 硅基衬底上直接合成石墨烯材料等. 目前, 大量的研究工作仍然致力于新型的石墨烯制备方法. 为了使得石墨烯在未来成功成为传统无机半导体材料之后的重要功能材料, 相关研究工作的重点和目标是获得高质量的样品、低成本和高产出等. 同时我们也应该认识到, 材料是一切器件的基础, 新型器件的问世往往是根基于对新型材料足够深入的认识, 因此要抓住 21 世纪科学研究这一重要契机, 制备对实际器件适应度高的材料正是努力之所在.

3.3 基于石墨烯的晶体管器件与禁带开启问题

这里我们着重讨论基于石墨烯的晶体管器件. 尽管在短短的几年中, 石墨烯晶体管的研究就取得了显著进展, 仍然有很多尚待解决的科学问题. 其中, 禁带开启是最受关注的问题. 目前已发展出了多种方法以打开石墨烯禁带, 例如双层石墨烯上加电场、制备小尺寸的石墨烯纳米带、附加应力于石墨烯, 以及通过有机物与石墨烯相互作用^[61~78]. 通过制备高质量的小尺寸石墨烯纳米带确实可以使得禁带打开, 但是这不仅在实验设备与技术上提出了相当的难度, 同时禁带开启后, 原本锥形能带会转变为抛物线形状, 随之会带来载流子有效质量的增加以及迁移率降低等一系列的问题. 此外, 通过

有机物与石墨烯在界面上的相互作用来开启禁带的方法,也包含有有机物在空气中性质性能退化等问题^[79]. 这些问题的解决,不仅是在禁带开启大小与材料、器件性能高低之间找出一个恰当的平衡点,从而更有利于实际器件中的应用,同时更重要或者更具有挑战性的课题则是在不牺牲或者小幅度可接受程度内的性能损耗的前提下,开发出新的石墨烯制备与电子性能调控方法.

此外,石墨烯晶体管器件的结构优化一直是个繁杂的问题,也同时需要大量的人力和物力投入到相关的研究中. 这包括,栅极绝缘层材料的介电性质对载流子聚集与传输的影响、形貌与电学性质上高质量界面的制备方法以及界面对器件性能的影响、源极与漏极处的接触电阻问题,以及最终获得典型的半导体特性曲线所涉及到其他一系列相互关联的问题.

3.4 石墨烯射频场效应晶体管

石墨烯射频场效应晶体管在近年取得了重要突破^[80~83]. 目前截止频率最高的石墨烯晶体管已达到 300 GHz,与 GaAs 和 InP 等化合物半导体的射频晶体管相当. 最近 IBM 利用 CVD 技术制备的石墨烯和类金刚石碳 (DLC) 衬底,成功研制出截止频率为 155 GHz 的射频场效应晶体管. IBM 公司还制造出晶圆级石墨烯集成电路,实现了 GHz 范围的混频器,证明石墨烯可以在更复杂的功能电路中得到应用. 同时,石墨烯射频场效应晶体管的性能在液氮温区 (4.3 K) 不会退化,可在冷极端环境下 (如太空) 正常工作.

3.5 基于石墨烯复杂集成电路的设计和制备

随着石墨烯晶体管器件的发展,人们已经能够基于稳定高性能的相关器件设计并制备出更为复杂的集成电路的雏形. 例如通过从漏极偏压引起的势能叠加效应,使同一石墨烯样品在不同区域表现出 P 或 N 型的半导体性质,并由此得到了第一个基于石墨烯的反向逻辑电路^[84]. 大面积石墨烯制备对于复杂集成电路具有极为重要的意义,也决定着谁能最先占据这一领域的最高点.

3.6 石墨烯在电子器件上的其他应用

高电导性能的透明电极: 石墨烯的透明特性,使其制造的电导面板比其他材料具有更优良的透光性^[85]. 通过使用石墨烯,得到的薄膜电导率可以达到 550 S/cm,同时 1000~3000 nm 波长光的透过率高于 70%,因而可以用于太阳能电池和触摸显示屏等器件应用中^[84]. 此外,作为电极的石墨烯薄膜还具有较好的化学和热学稳定性.

柔性器件: 由于其二维结构和良好的力学性质,石墨烯器件具有良好的柔性和延展性. 目前已经有多项工作将高性能石墨烯器件集成在塑料衬底上,实现了可折叠弯曲的柔性器件^[85,86],可以预见石墨烯将在这个领域扮演重要角色.

如上所述,石墨烯在各个方面的性能,尤其是电学性能上的超高优异性,使其在被报道以来的几年时间内,就得到了各个国家的强烈关注. 迄今为止,石墨烯已经在这方面给人们带来了许多惊喜,而且随着研究的不断深入,更多的突破也将有望呈现在人们面前. 目前亟待解决许多科学问题和技术手段,包括石墨烯电学特性的基础理论研究,高质量、大面积、低成本的石墨烯制备方法的开发,为实现场效应逻辑器件的禁带开启问题,以及基于石墨烯复杂集成电路的设计和制备等. 我们今后应致力于解决以上几个问题,并得到相应进展,这将对我国未来在世界材料及电子等科学领域取的领先产生重大影响.

4 碳纳米管

碳纳米管的研究工作在 20 世纪 90 年代中后期以及 21 世纪初期的几年里, 呈现出迅猛的态势, 展示出的各种优异性能, 以及令人向往的潜在应用, 科学家们曾预测碳纳米管将成为本世纪最有前途的纳米材料之一 [87~90]. 目前, 碳纳米管研究领域所面临的问题具有一定普遍性, 即过多集中于实验室研究, 而在面对实现工业化、产品化转型必须解决各类难题时, 却采取忽视和避让的态度. 这些问题涉及到相关领域的热点难点, 有些甚至关系到碳纳米管研究的未来趋势, 倘若我们能够找到合适的解决方法, 必然带动相关学科的发展, 推动微电子学的发展.

4.1 碳纳米管的基本结构

碳纳米管可以分为单壁 (SWNTs) 和多壁 (MWNTs) 两种结构. 单壁碳纳米管的多数性质性能与手性相关, 其禁带宽度可以在到 2 eV 范围内调制, 从而使纳米管的电学性能表达为金属特性或者半导体特性 [91,92]. 基于碳纳米管小直径、大长径的特点, 期待在小尺寸的器件上获得应用, 替代传统半导体材料, 并改变传统微电子器件的工作方式, 使得微电子行业在器件性能提高和单元器件成本降低等方面保持持续发展; 多壁碳纳米管被认为是多个单壁纳米管同轴套联组成的, 其中每一个单元均有可能是金属性或者半导体性, 整体上往往表现为零带隙的金属性材料. 多壁碳纳米管的研究和应用也是一个重要领域.

4.2 碳纳米管的合成方法

碳纳米管的合成主要有石墨电弧法、激光蒸发法和化学气相沉积法 (CVD). 石墨电弧法是首次报道碳纳米管问世时所提到的实验方法 [93,94]. 通过对电弧放电条件、催化剂、电极尺寸以及电极间距等工艺条件优化, 可以得到高质量的、较薄的纳米管样品. 但存在产出率偏低、电弧放电过程可控性差、制备成本偏高等缺陷, 这些均不利于未来实现工业化生产; 激光蒸发法是通过高强度的激光束脉冲入射在样品靶上, 使得碳元素从石墨中被蒸发出来而凝聚成纳米管的形态 [95~97]. 用激光蒸发法制备的碳纳米管直径通常为 5~20 nm, 长度为几十到几百微米.

化学气相沉积法是目前应用最为广泛的方法, 且最有可能实现大规模生产的实验方法 [98~107]. 该方法得到的碳纳米管受到很多因素的影响, 例如反应温度、反应持续时间、气体流的组成以及漂移速度、催化剂的形态和尺寸、衬底材料与表面形貌等. 其中碳氢气体和催化剂的成份是最重要的因素. 催化剂导致的碳、氢分解通常只是在衬底上纳米尺寸的金属点表面上发生. 使用这种方法, 人们可以在衬底上对碳管进行可控生长, 包括位置、密度、取向等, 但手性的控制仍是最大难题. 根据生长条件不同, 碳管既可以平行于衬底, 也可以垂直于衬底生长. 选择适当的衬底 (如石英), 可以控制碳管的方向, 有利于大面积器件集成.

4.3 碳纳米管的电学性质

碳纳米管的特殊结构使其具有多种特异的性质, 并表现出在各领域的不同应用前景. 这里仅围绕电学性质进行评述. 表征碳纳米管不同构成方式的一对整数 (n, m) 往往和其材料性质有关, 特别是电学性质. 如果 $n = m$, 碳纳米管表现为金属性; 当 $(n - m)$ 为 3 的整数倍时, 纳米管为带隙极小的半导体特性; 除此之外的纳米管为一般的半导体特性, 禁带宽度大体与直径成反比关系. 因此碳管约有 1/3 为金属性, 2/3 为半导体性. 当纳米管孔径很小的时候, 曲率效应也会改变上述碳纳米管电学性质的规

则. 碳纳米管的电学特性也表现在超导性质上. 内部单元纳米管相连的多壁管能够在相对较高的转变温度下 (12 K) 表现出超导特性^[108,109].

在实际碳纳米管中, 电荷传输会受到缺陷以及晶格振动的影响, 并在宏观上表现为其电阻. 此外, 碳纳米管的一维结构特性以及碳原子之间较强的价键的作用, 使得在纳米管中不存在小角度的电荷载流子散射, 载流子只存在向前或者向后的运动方向. 考虑到宏观大小的金属电极与碳纳米管的接触界面上, 由于在纳米管边界处的电子限制效应, 会产生分立的能态, 并叠加在金属电极的连续能态上. 这种纳米管与金属电极在能态上的失配, 会导致接触电阻的量子化. 如果仅有量子接触电阻, 那么纳米管中的电荷就会呈现出弹道传输的特点. 载流子在弹道传输时的迁移率能够达到硅体材料中的一千倍以上, 因而具有深远的应用前景. 然而载流子保持弹道传输的长度取决于结构的理想度、温度以及驱动电场的大小等因素, 能够达到 100 nm 左右, 已经超过了当前小尺寸单元器件的长度.

4.4 基于碳纳米管的电子器件

1) 场效应晶体管^[110~117]

基于碳纳米管的场效应晶体管的文献最先发表于 1998 年具有半导体特性的纳米管作为构成沟道的功能材料, 由于孔径小, 使得栅极可以控制整个沟道的电势, 从而能够制备不受短沟道效应影响的更小尺寸的器件. 另一方面, 碳纳米管的良好表面也避免了界面态和粗糙度引起的电荷散射, 因而具有高的迁移率 ($10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). 单根半导体碳纳米管器件的开关比可以达到 10^6 以上, 电流密度远高于硅器件, 同时可获得极低的电压阈值. 此外, 基于碳纳米管晶体管结构器件的交流电状态下的性质也受到关注, 理论预测短纳米管可作为太赫兹发射器. 近期的实验研究通过将碳纳米管制备成混频器或者调整器, 得到了高达 50 GHz 的频率.

2) 集成电路^[118~124]

碳纳米管器件目前已经突破单一器件研究局限, 可以用来制备更为复杂电路. 已在实验研究杀过将碳纳米管晶体管作为逻辑元件, 并采用电阻-晶体管逻辑电路, 在同一芯片上组合了各种逻辑电路: 反相器、与非门、静态随机存储器和环形振荡器. 最近, 美国沃森研究中心借助电子束光刻技术, 在一根 18 μm 长的单壁碳纳米管制备了 12 个 p⁻ 和 n⁻ 型场效应晶体管, 每一对 p⁻ 和 n⁻ 型场效应晶体管组成一个反相器, 从而实现的由五级 CMOS-型反相器构成的环形振荡器, 频率响应提高 5~6 个数量级, 可应用于高频 (太赫兹) 电路. 北京大学彭练矛研究组在传输晶体管逻辑 (PTL) 电路研究上取得突破, 通过无掺杂技术在碳管上制备出高性能的 CMOS 器件, 并采用 PTL 方式构建电路, 大大提高单个晶体管的效率, 从而简化电路设计. 然而, 如果要在大规模集成电路中应用, 碳纳米管面临的最大问题是如何生长出单一手性的碳管, 以及如何定位生长. 碳管的性质和器件性能取决于其手性, 作为沟道材料, 希望使用半导体性的碳纳米管, 排除金属性. 而最理想的情况是使用单一手性的碳纳米管, 对于大规模集成电路中器件的均一性控制是必要的. 尽管人们在碳管手性分离方面取得了很大突破, 但是离大规模集成电路的要求尚有一定距离, 还有待突破.

3) 其他电子器件

碳纳米管在电子器件中的潜在应用非常的广泛, 除了上述几种常见的重要基本器件之外, 碳纳米管还被应用在交叉点结构电阻型存储器^[125~127]、电缆电线^[128]、太阳能电池^[129]、发光二极管^[130,131]等器件以及互连、热导等.

目前, 导致碳纳米管在微电子科学与技术研究工作进展逐渐缓慢以及进一步的实际应用至今未有实质性突破, 主要原因是从成熟的实验室研究探索迈入大规模生产时必须解决的一系列关键问题似乎

难以解决. 总之, 碳纳米管材料向大规模工业生产的转型, 需要主要解决以下几个问题: (1) 碳纳米管在硅晶圆尺度上的大规模生长和转移问题; (2) 碳纳米管的手性和直径等控制问题; (3) 碳纳米管器件的可控性问题; (4) 碳纳米管器件的大规模集成技术; (5) 与其他电子、半导体材料尤其与硅基材料的兼容性. 希望碳纳米管的各种优异、特殊的性质能够通过以上的技术改进, 成为新的一种重要功能性材料, 带动整个微电子工业界的发展.

5 结语

我们简单回顾了基于 π -共轭分子体系的碳基纳米技术的 3 个重要研究领域: 有机半导体体系、石墨烯和碳纳米管. 通过无数科研工作者的努力, 这一重要学科已取得了令人瞩目的发展和成果. 对于材料的结构、性质和性能等基本认识也越来越深入, 相信基于上述 3 种材料及其器件在推动微电子的发展中起到越来越重要的作用.

我国也在这一领域的最初阶段就敏感的意识其重要性, 并投入了大量的人力、物力和科研资助. 通过科研人员的不懈努力, 我们在碳基纳米学领域目前也处于世界领先地位但是未来的发展将会不断影响当前的格局, 任何一个重大突破都极有可能重新定位出新的排序. 因此, 我们应该始终保持对科研热点的敏感性, 保持对技术难点的无畏精神, 充分结合各个学科的优点, 努力在碳基纳米技术——21 世纪初颇具挑战和机遇的研究领域中, 不断进取, 为我国在这一科研领域上的进步做出贡献.

参考文献

- 1 Shirota Y, Kageyama H. Charge carrier transporting molecular materials and their applications in devices. *Chem Rev*, 2007, 107: 953–1010
- 2 Coropceanu V, Cornil J, da Silva Filho D A, et al. Charge transport in organic semiconductors. *Chem Rev*, 2007, 107: 926–952
- 3 Menard E, Meitl M A, Sun Y, et al. Micro- and nanopatterning techniques for organic electronic and optoelectronic systems. *Chem Rev*, 2007, 107: 1117–1160
- 4 Li X, Zhang G, Bai X, et al. Highly conducting graphene sheets and Langmuir-Blodgett films. *Nat Nano*, 2008, 3: 538–542
- 5 Xu Y, Bai H, Lu G, et al. Flexible graphene films via the filtration of water-soluble noncovalent functionalized graphene sheets. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 5856–5857
- 6 Xiao K, Liu Y, Qi T, et al. A highly π -stacked organic semiconductor for field-effect transistors based on linearly condensed pentathienoacene. *J Am Chem Soc*, 2005, 127: 13281–13286
- 7 Takimiya K, Kunugi Y, Konda Y, et al. 2,7-diphenyl benzoselenopheno[3,2-b] benzoselenophene as a stable organic semiconductor for a high-performance field-effect transistor. *J Am Chem Soc*, 2006, 128: 3044–3050
- 8 Videlot-Ackermann C, Ackermann J, Brisset H, et al. α ω -distyryl oligothiophenes: high mobility semiconductors for environmentally stable organic thin film transistors. *J Am Chem Soc*, 2005, 127: 16346–16347
- 9 Tang C W, VanSlyke S A. Organic electroluminescent diodes. *Appl Phys Lett*, 1987, 51: 913–915
- 10 Baldo M A, O'Brien D F, You Y, et al. Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices. *Nature*, 1998, 395: 151–154
- 11 Sakakibara Y, Okutsu S, Enokida T, et al. Red organic electroluminescence devices with a reduced porphyrin compound, tetraphenylchlorin. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 2587–2589
- 12 Yu G, Yin S, Liu Y, et al. Structures, electronic states, and electroluminescent properties of a Zinc(II) 2-(2-hydroxyphenyl)benzothiazolate complex. *J Am Chem Soc*, 2003, 125: 14816–14824

- 13 Brinkmann M, Fite B, Pratontep S, et al. Structure and spectroscopic properties of the crystalline structures containing meridional and facial isomers of tris(8-hydroxyquinoline) Gallium(III). *Chem Mater*, 2004, 16: 4627–4633
- 14 Muccini M, Loi M A, Kenevey K, et al. Blue luminescence of facial Tris (quinolin-8-olato) aluminum (III) in solution, crystals, and thin films. *Adv Mater*, 2004, 16: 861–864
- 15 Brinkmann M, Gadret G, Muccini M, et al. Correlation between molecular packing and optical properties in different crystalline polymorphs and amorphous thin films of mer-Tris (8-hydroxyquinoline) aluminum (III). *J Am Chem Soc*, 2000, 122: 5147–5157
- 16 Tamayo A B, Alleyne B D, Djurovich P I, et al. Synthesis and characterization of facial and meridional Tris-cyclometalated Iridium(III) complexes. *J Am Chem Soc*, 2003, 125: 7377–7387
- 17 Kearns D, Calvin M. Photovoltaic effect and photoconductivity in laminated organic systems. *Chem Phys*, 1958, 29: 950–951
- 18 Tang C W. Two-layer organic photovoltaic cell. *Appl Phys Lett*, 1986, 48: 183–185
- 19 Sariciftci N S, Smilowitz L, Heeger A J, et al. Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene. *Science*, 1992, 258: 1474–1476
- 20 Sariciftci N S, Braun D, Zhang C, et al. Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells. *Appl Phys Lett*, 1993, 62: 585–587
- 21 Gong X, Tong M, Xia Y, et al. High-detectivity polymer photodetectors with spectral Response from 300 nm to 1450 nm. *Science*, 2009, 325: 1665–1667
- 22 Yu G, Gao J, Hummelen J C, et al. Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*, 1995, 270: 1789–1791
- 23 Kim J Y, Lee K, Coates N E, et al. Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing. *Science*, 2007, 317: 222–225
- 24 Lee M R, Eckert R D, Forberich K, et al. Solar power wires based on organic photovoltaic materials. *Science*, 2009, 324: 232–235
- 25 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, 306: 666–669
- 26 Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene. *Nat Mater*, 2007, 6: 183–191
- 27 Geim A K. Graphene: Status and prospects. *Science*, 2009, 324: 1530–1534
- 28 Neto A H C, Guinea F, Peres N M R, et al. The electronic properties of grapheme. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 109–162
- 29 Wallace P R. The band theory of graphite. *Phys Rev*, 1947, 71: 622–634
- 30 Neto A C, Guinea F, Peres N M. Drawing conclusions from graphene. *Phys World*, 2006, 19: 33
- 31 Katsnelson M I, Novoselov K S, Geim A K, et al. Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene. *Nature Phys*, 2006, 2: 620–625
- 32 Katsnelson M I, Novoselov K S. Graphene: New bridge between condensed matter physics and quantum electrodynamics. *Solid State Commun*, 2007, 143: 3–13
- 33 Gusynin V P, Sharapov S G. Unconventional integer quantum hall effect in graphene. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 146801
- 34 Peres N M R, Neto A H C, Guinea F. Conductance quantization in mesoscopic graphene. *Phys Rev B*, 2006, 73: 125411
- 35 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 2005, 438: 197–200
- 36 Zhang Y, Lu H, Bargmann C I. Pathogenic bacteria induce aversive olfactory learning in *Caenorhabditis elegans*. *Nature*, 2005, 438: 179–184
- 37 Calogeracos A, Dombey N. History and physics of the Klein paradox. *Contemp Phys*, 1999, 40: 313–321
- 38 Itzykson C, Zuber J B. *Quantum Field Theory*. Mineola: Dover Publications, 2006
- 39 Song H S, Li S L, Miyazaki H, et al. Origin of the relatively low transport mobility of graphene grown through chemical vapor deposition. *Sci Rep*, 2012, 2: 00337
- 40 Berger C, Song Z M, Li T B, et al. Ultrathin epitaxial graphite: 2d electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics. *J Phys Chem B*, 2004, 108: 19912–19916
- 41 Das S S, Adam S, Hwang E H, et al. Electronic transport in two-dimensional graphene. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 407–470

- 42 Dean C R, Young A F, Meric I, et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics. *Nature Nanotech*, 2010, 5: 722–726
- 43 Wang X M, Xu J B, Wang C L, et al. High-performance graphene devices on SiO₂/Si substrate modified by highly ordered self-assembled monolayers. *Adv Mater*, 2011, 23: 2464–2468
- 44 Wang H M, Wu Y H, Ni Z H, et al. Electronic transport and layer engineering in multilayer graphene structures. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 053504
- 45 Chen Z P, Ren W C, Gao L B, et al. Three-dimensional flexible and conductive interconnected graphene networks grown by chemical vapour deposition. *Nat Mater*, 2011, 10: 424–428
- 46 Kim K S, Zhao Y, Jang H, et al. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 2009, 457: 706–710
- 47 Yu Q K, Lian J, Siriponglert S, et al. Graphene segregated on Ni surfaces and transferred to insulators. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 113103
- 48 Kim K B, Lee C K, Choi J W. Catalyst-free direct growth of triangular nano-graphene on all substrates. *J Phys Chem C*, 2011, 115: 14488–14493
- 49 Yan Z, Peng Z W, Sun Z Z, et al. Growth of bilayer graphene on insulating substrates. *ACS Nano*, 2011, 5: 8187–8192
- 50 Ramon M E, Gupta A, Corbet C, et al. CMOS-compatible synthesis of large-area, high-mobility graphene by chemical vapor deposition of acetylene on cobalt thin films. *ACS Nano*, 2011, 5: 7198–7204
- 51 Dai B Y, Fu L, Liu Z F, et al. Rational design of a binary metal alloy for chemical vapour deposition growth of uniform single-layer graphene. *Nature Commun*, 2011, 2: 522
- 52 Schwierz F. Industry-compatible graphene transistors. *Nature*, 2011, 472: 41–42
- 53 Wessely P J, Wessely F, Birinci E, et al. Transfer-free fabrication of graphene transistors. *J Vac Sci Technol*, 2012, B30: 03D114
- 54 Meng L, Wu R T, Zhou H T, et al. Silicon intercalation at the interface of graphene and Ir(111). *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 083101
- 55 Kim K S, Zhao Y, Jang H, et al. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 2009, 457: 706–710
- 56 Reina A, Jia X T, Ho J, et al. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition. *Nano Lett*, 2009, 9: 30–35
- 57 Gao L B, Ren W C, Cheng H M, et al. Repeated growth and bubbling transfer of graphene with millimetre-size single-crystal grains using platinum. *Nat Commun*, 2012, 3: 699
- 58 Li X S, Cai W W, An J H, et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils. *Science*, 2009, 324: 1312–1314
- 59 Ahn J H, Kim H K, Lee Y B, et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nat Nanotechnol*, 2010, 5: 574–578
- 60 Han M Y, Ozyilmaz B, Zhang Y B, et al. Energy band-gap engineering of graphene nanoribbons. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 206805
- 61 Kim P, Han M Y, Young A F, et al. Graphene nanoribbon devices and quantum heterojunction devices. In: *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, Piscataway, 2009. 241–244
- 62 Li X L, Wang X R, Zhang L, et al. Chemically derived, ultrasmooth graphene nanoribbon semiconductors. *Science*, 2008, 319: 1229–1232
- 63 Yang L, Park C H, Son Y W, et al. Quasiparticle energies and band gaps in graphene nanoribbons. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 186801
- 64 Chen Z H, Lin Y M, Rooks M J, et al. Graphene nano-ribbon electronics. *Phys E*, 2007, 40: 228–232
- 65 Evaldsson M, Zozoulenko I V, Xu H Y, et al. Edge-disorder-induced Anderson localization and conduction gap in graphene nanoribbons. *Phys Rev B*, 2008, 78: 161407
- 66 Castro E V, Novoselov K S, Morozov S V, et al. Biased bilayer graphene: Semiconductor with a gap tunable by the electric field effect. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 216802
- 67 Gava P, Lazzeri M, Saitta A M, et al. Probing the electrostatic environment of bilayer graphene using Raman spectra. *Phys Rev B*, 2009, 79: 165431

- 68 Ohta T, Bostwick A, Seyller T, et al. Controlling the electronic structure of bilayer graphene. *Science*, 2006, 313: 951–954
- 69 Zhang Y B, Tang T T, Girit C, et al. Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene. *Nature*, 2009, 459: 820–823
- 70 Rotenberg E, Bostwick A, Ohta T, et al. Origin of the energy bandgap in epitaxial graphene. *Nat Mater*, 2008, 7: 258–259
- 71 Zhou S Y, Gweon G H, Fedorov A V, et al. Substrate-induced bandgap opening in epitaxial graphene. *Nat Mater*, 2007, 6: 770–775
- 72 Kim S, Ihm J, Choi H J, et al. Origin of anomalous electronic structures of epitaxial graphene on silicon carbide. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 176802
- 73 Bostwick A, Ohta T, Seyller T, et al. Quasiparticle dynamics in graphene. *Nat Phys*, 2007, 3: 36–40
- 74 Peng X Y, Ahuja R. Symmetry breaking induced bandgap in epitaxial graphene layers on SiC. *Nano Lett*, 2008, 8: 4464–4468
- 75 Sano E, Otsuji T. Theoretical evaluation of channel structure in graphene field-effect transistors. *Jpn J Appl Phys*, 2009, 48: 041202
- 76 Pereira V M, Neto A H C, Peres N M R. Tight-binding approach to uniaxial strain in graphene. *Phys Rev B*, 2009, 80: 045401
- 77 Ni Z H, Yu T, Lu Y H, et al. Uniaxial strain on graphene: raman spectroscopy study and band-gap opening. *ACS Nano*, 2008, 2: 2301–2305
- 78 Sols F, Guinea F, Neto A H C. Coulomb blockade in graphene nanoribbons. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 166803
- 79 Raza H, Kan E C. Armchair graphene nanoribbons: Electronic structure and electric-field modulation. *Phys Rev B*, 2008, 77: 245434
- 80 Lin Y M, Dimitrakopoulos C, Jenkins K A, et al. 100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene. *Science*, 2010, 327: 662–662
- 81 Liao L, Lin Y C, Bao M Q, et al. High-speed graphene transistors with a self-aligned nanowire gate. *Nature*, 2010, 467: 305–308
- 82 Wu Y Q, Lin Y M, Bol A A, et al. High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon. *Nature*, 2011, 472: 74–78
- 83 Lin Y M, Dimitrakopoulos C, Jenkins K A, et al. 100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene. *Science*, 2011, 332: 1294–1297
- 84 Li S L, Miyazaki H, Kumatani A, et al. Low operating bias and matched input-output characteristics in graphene logic inverters. *Nano Lett*, 2010, 10: 2357–2362
- 85 Lu C C, Lin Y C, Yeh C H, et al. High mobility flexible graphene field-effect transistors with self-healing gate dielectrics. *ACS Nano*, 2012, 6: 4469–4474
- 86 Sire C, Ardiaca F, Lepilliet S, et al. flexible gigahertz transistors derived from solution-based single-layer graphene. *Nano Lett*, 2012, 12: 1184–1188
- 87 Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, 354: 56–58
- 88 Bethune D S, Kiang C H, de Vries M S, et al. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. *Nature*, 1993, 363: 605–607
- 89 Iijima S, Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 1993, 363: 603–605
- 90 Wang X S, Li Q Q, Xie J, et al. Fabrication of ultralong and electrically uniform single-walled carbon nanotubes on clean substrates. *Nano Lett*, 2009, 9: 3137–3141
- 91 Bhushan B. *Springer Handbook of Nanotechnology*. New York: Springer-Verlag, 2004. 1222
- 92 Lu X, Chen Z F. Curved Pi-conjugation, aromaticity, and the related chemistry of small fullerenes ($< C_{60}$) and single-walled carbon nanotubes. *Chem Rev*, 2005, 105: 3643–3696
- 93 Ebbesen T W, Ajayan P M. Large-scale synthesis of carbon nanotubes. *Nature*, 1992, 358: 220–222
- 94 Guo T, Nikolaev P, Rinzler A G, et al. Self-assembly of tubular fullerenes. *J Phys Chem*, 1995, 99: 10694–10697
- 95 Guo T, Nikolaev P, Thess A, et al. Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chem Phys Lett*, 1995, 243: 49–54
- 96 Thess A, Lee R, Nikolaev P, et al. Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes. *Science*, 1996, 273: 483–487

- 97 Li L, Papadopoulos C, Xu J M, et al. Highly-ordered carbon nanotube arrays for electronics applications. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 367–369
- 98 Yuan Z H, Huang H, Liu L, et al. Controlled growth of carbon nanotubes in diameter and shape using template-synthesis method. *Chem Phys Lett*, 2001, 345: 39–43
- 99 Kong J, Cassell A M, Dai H J. Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes. *Chem Phys Lett*, 1998, 292: 567–574
- 100 Li W Z, Xie S S, Qian L X, et al. Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes. *Science*, 1996, 274: 1701–1703
- 101 Lee J S, Gu G H, Kim H, et al. Growth of carbon nanotubes on anodic alumin templates: fabrication of a tube-in-tube and linearly joined tube. *Chem Mater*, 2001, 13: 2387–2391
- 102 Yun Y H, Shanov V, Tu Y, et al. Growth mechanism of long aligned multiwall carbon nanotube arrays by water-assisted chemical vapor deposition. *J Phys Chem B*, 2006, 110: 23920–23925
- 103 Yu M F, Lourie O, Dyer M J, et al. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, 2000, 287: 637–640
- 104 Sun L F, Xie S S, Liu W, et al. Creating the narrowest carbon nanotubes. *Nature*, 2000, 403: 384
- 105 Kong J, Soh H T, Cassell A M, et al. Synthesis of individual single-walled carbon nanotubes on patterned silicon wafers. *Nature*, 1998, 395: 878–881
- 106 Fan S S, Chapline M G, Franklin N R, et al. Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties. *Science*, 1999, 283: 512–514
- 107 Kang S J, Kocabas C, Ozel T, et al. High-performance electronics using dense, perfectly aligned arrays of single-walled carbon nanotubes. *Nat Nanotechnol*, 2007, 2: 230–236
- 108 Anantram M P, Leonard F. Physics of carbon nanotube electronic devices. *Rep Prog Phys*, 2006, 69: 507–561
- 109 Charlier J C, Blase X, Roche S. Electronic and transport properties of nanotubes. *Rev Mod Phys*, 2007, 79: 677–732
- 101 Tans S J, Verschueren A R M, Dekker C. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube. *Nature*, 1998, 393: 49–52
- 111 Martel R, Schmidt T, Shea H R, et al. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 2447–2449
- 112 Ding L, Liang S B, Pei T, et al. Carbon nanotube based ultra-low voltage integrated circuits: Scaling down to 0.4 V. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 263116
- 113 Castro L C, John D L, Pulfrey D L, et al. Method for predicting f_T for carbon nanotube FETs. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2005, 4: 699–704
- 114 Frank D J, Appenzeller J. High-frequency response in carbon nanotube field-effect transistors. *IEEE Electron Dev Lett*, 2004, 25: 34–36
- 115 Li S D, Yu Z, Yen S F, et al. Carbon nanotube transistor operation at 2.6 GHz. *Nano Lett*, 2004, 4: 753–756
- 116 Rosenblatt S, Lin H, Sazonova V, et al. Mixing at 50 GHz using a single-walled carbon nanotube transistor. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 153111
- 117 Bethoux J M, Happy H, Dambrine G, et al. An 8-GHz ft carbon nanotube field-effect transistor for Gigahertz range applications. *IEEE Electron Dev Lett*, 2006, 27: 681–683
- 118 Chen Z H, Appenzeller J, Lin Y M, et al. An integrated logic circuit assembled on a single carbon nanotube. *Science*, 2006, 311: 1735–1735
- 119 Bachtold A, Hadley P, Nakanishi T, et al. Logic circuits with carbon nanotube transistors. *Science*, 2001, 294: 1317–1320
- 120 Derycke V, Martel R, Appenzeller J, et al. Carbon nanotube inter- and intramolecular logic gates. *Nano Lett*, 2001, 1: 453–456
- 121 Liu X L, Lee C, Zhou C W, et al. Carbon nanotube field-effect inverters. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 3329–3331
- 122 Javey A, Wang Q, Ural A, et al. Carbon nanotube transistor arrays for multistage complementary logic and ring oscillators. *Nano Lett*, 2002, 2: 929–932
- 123 Yu W J, Kim U J, Kang B R, et al. Adaptive logic circuits with doping-free ambipolar carbon nanotube transistors. *Nano Lett*, 2009, 9: 1401–1405
- 124 Ding L, Zhang Z Y, Peng L P, et al. CMOS-based carbon nanotube pass-transistor logic integrated circuits. *Nat Commun*, 2012, 3: 677, DOI: 10.1038/ncomms1682

- 125 Pradhan B, Batabyal S K, Pal A J. Electrical bistability and memory phenomenon in carbon nanotube-conjugated polymer matrixes. *J Phys Chem B*, 2006, 110: 8274–8277
- 126 Liu G, Ling Q D, Teo E Y H, et al. Electrical conductance tuning and bistable switching in poly(N-vinylcarbazole)-carbon nanotube composite films. *ACS Nano*, 2009, 3: 1929–1937
- 127 Hwang S K, Lee J M, Kim S, et al. Flexible multilevel resistive memory with controlled charge trap B- and N-doped carbon nanotube. *Nano Lett*, 2012, 12: 2217–2221
- 128 Zhao Y, Wei J Q, Vajtai R, et al. Iodine doped carbon nanotube cables exceeding specific electrical conductivity of metals. *Sci Rep*, 2011, 1: 83
- 129 Guldi D M, Rahman G M A, Prato M, et al. Single-wall carbon nanotubes as integrative building blocks for solar-energy conversion. *Angew Chem*, 2005, 117: 2051–2054
- 130 Misewich J A, Martel R, Avouris P, et al. Electrically induced optical emission from a carbon nanotube FET. *Science*, 2003, 300: 783–786
- 131 Chen J, Perebeinos V, Freitag M, et al. Bright infrared emission from electrically induced excitons in carbon nanotubes. *Science*, 2005, 310: 1171–1174

Carbon nanotechnology

SHI Yi^{1*}, JIN Zhi², FU YunYi³, YU Gui⁴, WU NanJian⁵ & Li Yun¹

1 *School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;*

2 *Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

3 *School of Information Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;*

4 *Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

5 *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

*E-mail: yshi@nju.edu.cn

Abstract Three important research areas of the π -conjugated molecule group, organic semiconductor, graphene and carbon nanotube, are reviewed and summarized with related fundamental science and technology research progress. In recent years, with increasingly deeper understanding of the structure, property and performance of those materials, great attractive developments and results are made in those areas. Carbon nanotechnology devices are gradually integrated into the mainstream of electronic products, and will play an increasingly important role in the development of micro-nano electronics.

Keywords carbon nanotechnology, organic semiconductor, graphene, carbon nanotube



SHI Yi was born in 1962. He received the Ph.D. degree in physics from Nanjing University, in 1989. He joined Nanjing University as an Assistant Professor in 1989, became an Associate Professor in 1993, and a Professor in 1996. Currently, he serves as Dean of School of Electronic Science and Engineering. He is a recipient of the 2002 Outstanding Young Chinese Scientist Award from the National Natural Science Foundation of China. Since 2006, he is a Changjiang Professor at Nanjing University. Currently, his research interests are focused on nanostructured materials and the applications in optoelectronics and energy.



millimeter wave and terahertz devices and integrated circuits and graphene-based devices and circuits.

JIN Zhi received the Ph.D. degree in microelectronics and solid-state electronics from Jilin University, in 1999. In 2006, he was with Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences as a Professor. He has been awarded by the Hundred Talent Program of the Chinese Academy of Sciences in 2008. He is now the director of Microwave Device and Integrated Circuits Department. His recent research interests include III-V semiconductor millimeter wave and terahertz devices and integrated circuits and graphene-based devices and circuits.