

石墨烯技术及产业发展现状

张 芳¹, 史冬梅¹, 暴宁钟², 任文才³

(1. 中国科学技术部高技术研究发展中心, 北京 100044; 2. 南京工业大学, 南京 210009;
3. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 石墨烯 (graphene) 是一种新型的碳基材料, 具有极好的结晶性及电学性能, 在能源、半导体、生物医学等多个领域具有良好的应用前景, 已成为发达国家必争的战略制高点。美国在全球率先将石墨烯研究上升为国家发展战略, 欧盟投入巨资资助开发石墨烯在能源和数字技术等领域的应用, 英国拟投资 6 100 万英镑建立国家石墨烯研究所, 日本、韩国也持续开展了一系列与石墨烯相关的研究和应用。我国对石墨烯材料的基础研究处于国际领先地位, 但在器件制造和应用方面仍很欠缺。我国应加强石墨烯规模化制备技术和改性技术的研究, 加强石墨烯的应用研究, 并在石墨烯研究方面加强产学研联合研究和国际合作。

关键词: 石墨烯; 碳基材料; 二维结构; 电学性能

中图分类号: TB383-1; F416.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2014.05.008

人们一直认为, 完美二维晶体结构无法在非绝对零度下稳定存在^[1], 直到 2004 年, 英国曼彻斯特大学两位科学家 AK Geim 和 KS Novoselov 利用胶带剥离高定向石墨的方法获得了独立存在的高质量二维石墨烯晶体, 并相继发现了一系列新的物理现象^[1-2], 引发了全世界范围内石墨烯 (graphene) 研究的“淘金热”。

石墨烯是一种由 sp² 杂化碳原子按六边形呈蜂巢晶格排布的二维碳基材料, 具有优异的性质和性能, 因而受到科研和产业界的广泛重视。世界各国政府和各大公司都高度重视石墨烯材料的研究, 投入人力、物力和财力抢占这一战略高地。目前, 已有包括美国、欧盟、日本等国际发达国家地区在内的 80 多个国家地区投入石墨烯材料研究, 极大地推进了石墨烯技术发展。

据 Lux Research 预测, 2015 年石墨烯相关产品的市场将达到 530 亿美元, 并广泛应用于航空航天、汽车、能源、电子、医疗、军事和电信等

领域。也许有一天, 石墨烯会像塑料一样改变人类的生活。

本文对国内外石墨烯技术及产业发展现状进行了分析, 进而对我国发展石墨烯提出了若干建议。

1 石墨烯是性能优异的碳基材料

石墨烯是由碳的单原子层构成的二维蜂窝状网格结构, 也是构成其他碳同素异形体的基本单元。它可以折叠成零维的富勒烯, 卷曲成一维的碳纳米管, 堆垛成三维的石墨。

石墨烯是目前人类已知厚度最薄、重量最轻、强度最高 (是钢的 100 多倍)、韧性最好 (最大可承受 20% 的形变)、透光率最高 (在很宽的波段内单层石墨烯的光吸收只有 2.3%)^[3-4]、导电性最佳的材料, 具有优异的电学性能 (电子迁移率在室温下可达 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$)^[5]、突出的导热性能 ($5000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 约是铜的 10 倍)^[6]和超高的比表面积 ($2630 \text{ m}^2/\text{g}$), 其杨氏模量 (1100 GPa)

第一作者简介: 张芳 (1972—), 女, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为纳米材料、新型显示技术等。

收稿日期: 2013-12-25; 修回日期: 2014-04-17

和断裂强度（125 GPa）可以和纳米管媲美。此外，石墨烯具有完美的量子隧道效应、半整数量子霍尔效应^[7]和永不消失的电导率等物理特性。

虽然石墨烯研究已经获得了诺贝尔物理学奖，但仍有很多的宝藏尚待挖掘，没有人能够预测明天在石墨烯研究方面又会发现什么新的物理现象、新的性能和新的应用。就连诺贝尔物理学奖得主 KS Novoselov 也指出，“要准确地说石墨烯会有什么应用还为时尚早。石墨烯的性能研究和大量制备方面的进步如此之快，现在无论说什么都有可能是错误的。”

从目前的发展来看，石墨烯有望在复合材料、能量存储和转换、柔性电子等方面最先获得应用，在高速电子器件、光电子器件、自旋量子器件等信息通讯领域的实现可能需要的时间较长，而对石墨烯材料及其新奇物理、物性等基本科学问题的探索将是石墨烯领域永恒的主题。然而，毋庸置疑，石墨烯这种综合了多种优异性能的新材料有可能会带来新技术的革命，使信息通讯更加快速，使能源存储和转换更加高效，使人类生活更加便利。

2 石墨烯材料是发达国家必争的战略制高点

2.1 美国

美国在全球率先将石墨烯的研究上升为国家发展战略。据统计，美国国家自然科学基金会在 2006—2011 年期间对石墨烯相关研究的资助达 200 余项，美国国防部及其下属国防高级研究计划署也在重点围绕石墨烯基复合材料、下一代更小更快的电子器件以及在太赫兹和新型量子器件中的研发和应用等方面设置了多个研究项目。在推动石墨烯相关产业的发展方面，美国部署了俄亥俄州研究商业化资助项目，资助美国纳米技术仪器公司开展锂离子电池用的纳米石墨烯复合电极的产业化生产研究；美国能源部则在 2011 年 1 月发布的储能研发报告中明确提出，要开发基于石墨烯薄片复合材料的锂离子电池的阳极材料。

2.2 欧盟

2013 年 1 月，欧盟委员会启动了欧盟有史以来最大的研究资助类项目，宣布资助石墨烯和人脑神经化学工程两大研究达 20 亿欧元经费，旨在

开发石墨烯在能源和数字技术等领域的应用。在此之前，欧盟 FP7 框架计划、欧洲研究理事会、欧洲科学基金会也等都对石墨烯相关研究给予了持续资助。例如：2008 年 1 月，欧盟 FP7 框架计划启动了石墨烯基纳米电子器件项目，欧洲研究理事会资助了石墨烯物理性能和应用研究项目；2009 年 6 月，欧洲科学基金会启动了欧洲石墨烯项目；2011 年 5 月，欧盟启动了石墨烯旗舰项目；等等。

2.3 英国

英国也在着力推进石墨烯发展进程，计划建立国家石墨烯研究所（NGI），预算投资 6 100 万英镑，目标是在未来几十年里实现石墨烯从实验室进入生产线和市场。

2.4 日本

日本近年也持续资助了一系列石墨烯相关的研发项目。日本政府内阁办公以及日本学术振兴会运营的世界领先创新科技研发资金计划将石墨烯及石墨烯基复合材料的研发列入计划资助的重点项目。早在 2007 年，日本科学技术振兴机构就开始资助在硅基体上开发石墨烯材料和器件技术的研究项目。经济产业省则在 2011 年实施的低碳社会实现的创新融合材料项目中，将碳纳米管和石墨烯的批量合成技术作为重点支持领域。

2.5 韩国

韩国政府鼓励本国机构积极开展石墨烯相关的研究和应用。据统计，韩国教育科学技术部等部门在 2007—2009 年期间累计资助了 90 项相关研究，经费合计达 1 870 万美元。同时，预计在 2012—2018 年期间，韩国知识经济部将向石墨烯领域给予 2.5 亿美元的经费资助，其中，1.24 亿美元用于石墨烯的相关基础研究，1.26 亿美元用于其推动商业化。

3 石墨烯材料发展现状

3.1 专利和文献概况

据初步统计，目前，全球有 200 多家公司涉足石墨烯相关的研究和开发，其中包括 IBM、英特尔、美国晟碟、陶氏化学、通用、施乐以及三星等科技巨头。就产品专利数量而言，中国和美国遥遥领先于其他国家。英国科技策略机构剑桥知识产权公司（Cambridge IP）长期跟踪石墨烯行业的知识

产权方面的状况,由其提供的截至 2012 年底的最新数据显示:英国企业和院校共有相关石墨烯专利 54 个,中国和美国的相关专利数量分别是其 40 倍和 30 倍。同时,在该机构新近发布的石墨烯相关专利持有机构的排行榜上,目前,全球排名前十的机构分别是美国 IBM、韩国高级科技仪器公司(KAIST)、韩国科技仪器公司(KIST)、美国莱斯大学、韩国三星、美国晟碟、中国清华大学、韩国成均馆大学、美国施乐公司和中国浙江大学。

通过对汤森路透集团提供的数据库 Web of Science 的检索分析,美国在石墨烯研究方面的文献总量约达 6 700 份,占全球总量的 27%;我国在石墨烯研究方面的文献量为 7 050 份,占比为 28.5%,超过美国位居世界首位。

3.2 国外石墨烯发展

据有关统计,2011 年,石墨烯的全球总产量只有 200 t,其中,90% 由美国、日本等少数发达国家供应。自石墨烯被发现以来,众多研究人员都致力于发展这种新材料的商业用途,特别是在替代晶硅应用于芯片、制造锂离子电池负极材料以及超级电容器、制造可弯曲触摸屏等方面。IBM 已经研制出首款基于石墨烯圆片的集成电路;美国麻省理工学院成功研制出表面附有石墨烯纳米层的柔性光伏电池板,声称能大幅降低透明并可形变的太阳能电池的制造成本,指出,该利用石墨烯制造的太阳能电池在未来有望广泛用于夜视镜、相机等小型数码设备。

另据英国《每日邮报》在线版消息,美国科学家最近研发出一种基于石墨烯技术的“超级电容器”,充电速率远高于普通电池,仅需 5 秒钟,就能为一部 iPhone 手机充满电。该研究小组称,积极与配件生产企业联合推动该产品的市场化发展。在电子柔性显示器领域,韩国三星电子一直引领该方向的发展。石墨烯技术可以使得显示屏具有可弯曲性能,但限于手机等智能终端的产业链太长,而且产品成形必须要电路板、机身材料等整个供应链配合。此外,目前,该产品成本高得离谱,良率问题也不容乐观。

3.3 我国石墨烯发展

中国科学院、科技部、国家自然科学基金委等,自 2009 年起相继启动了多个石墨烯研究项

目,863 计划纳米材料与器件主题“石墨烯的控制制备及其在光电领域的应用”课题、973 计划“石墨烯的可控制备、物性与器件研究”课题以及一系列的自然科学基金项目,均涉足石墨烯的制备、性质和应用研究。

中科院金属研究所已经实现了对石墨烯的批量制备,每批次产量达 30 克,并掌握了 4 英寸的石墨烯透明导电薄膜的制备技术。我国环保和储能领域有望率先实现石墨烯商用:在环保领域,石墨烯涂层具有良好的防腐作用;在储能领域,石墨烯是一种优异的取代锂电池中碳的新材料。目前,国内许多厂商已能生产出石墨烯粉料和浆料等成品,是涂层和添加剂的理想替代材料。就储能领域应用而言,石墨烯的高导电性可降低锂电池电组的数量,提高产品性能,而且作为添加剂的绝对量将远远低于碳。然而,由于成本原因,锂电池厂商暂没有采用将石墨烯作为添加剂的方案。一旦成本问题获得解决,根据锂电池生产产业链较短的特点,石墨烯在锂电池领域将率先实现产业化应用。

4 石墨烯产业发展热点

4.1 在高效能源转换与存储材料器件上的应用

开发长循环寿命、高比能量和高功率密度的能量转换盒存储器件是诸多领域研究热点之一。具有超高比表面积 of 的石墨烯能有效分散纳米电催化材料,在减少贵金属用量的同时保证了电池的容量,可有效降低电池成本。此外,新型氮掺杂石墨烯可用作电池阴极材料,既作为氧化还原催化剂,又作为碳网来支撑相应的金属催化剂,可有效地提高燃料电池的稳定性、耐用性和电化学活性,对推动燃料电池的实际应用意义重大。

(1) 锂电池

锂离子电池以其相对高的能量和功率密度、高工作电压、长循环寿命、无记忆效应及无污染等独特优势,成为便携式电子设备及未来储能和车用高性能动力电池的首选。石墨烯在电导率、机械强度和柔韧性、化学稳定性、比表面积等具有的突出特性,以及用石墨为原料采用化学氧化还原方法制备成本低等优点,非常适合作为复合电极材料的基质,也即,非常适合作为锂电池的导电添加剂。石墨烯的复合不仅可以缓冲材料在充放电过程中的体

积效应,还可以形成导电网络提升电极材料的导电性、倍率性能和循环寿命。通过优化复合材料的微观结构,例如,夹层结构或石墨烯片层包覆结构,可进一步提高材料的电化学性能。通过改性石墨烯,例如,基于氮掺杂石墨烯或纳米孔石墨烯制备的复合电极,可大幅度改善锂离子的吸附、扩散和传输,从而提高锂电池的容量和充电效率。

(2) 超级电容器

超级电容器是一种高功率密度的电化学储能器件,其存储和放电的机理是基于离子在电解液和电极的静电相互作用,具有充放电时间极短、循环寿命长等优点。传统超级电容器制造用的氧化物材料和导电聚合物材料高成本、导电性低,无法广泛应用。此外,传统的电容器虽然功率非常大,但其能量密度有限,不能满足实际需要,而超级电容器兼有电池高比能量和传统电容器高比功率的特点。纳米材料间的协同增效作用使石墨烯基电容材料具有良好的功率特性、较高的能量密度和良好的电化学循环稳定性,有望克服现有电容器的不足,实现超级电容器的工业应用。进一步利用改性石墨烯,例如,氮掺杂石墨烯,制成的超级电容器比普通石墨烯电容器的电容高四倍,并且使用寿命长(>20万次),功率容量大,和基板相兼容。另外,基于直接生长的自支撑柔性碳纳米管薄膜的高导电率、高力学性能、高自吸附力等特点,可设计结构简单、重量轻、能量密度和功率密度高的碳纳米管薄膜超级电容器。通过有机溶液平铺法控制直接生长的碳纳米管薄膜的自吸附性,将任意数量的碳纳米管薄膜非常平整地、牢固地组装到超级电容器的隔膜上,可有效地减小碳纳米管薄膜之间的连接电阻,提高碳纳米管薄膜电极的功率密度。该方法突破了采用直接生长的碳纳米管薄膜来制备薄膜电极在面积和厚度方面的限制,有效消除了碳纳米管薄膜与金属集流器之间的接触电阻,简化了超级电容器的结构,减轻了超级电容器的重量,对碳纳米管薄膜超级电容器的实际应用具有重要意义。这种超级电容器将在混合动力汽车、大功率雷达、移动电话信息备份电源、笔记本电脑和无电池遥控器等方面发挥重大作用。

(3) 光能量转换

在光能量转换材料和器件方面,石墨烯量子点

不但具备石墨烯本身的透明、柔性、能带结构连续可调、电子迁移率高等一系列优异的光电特性,还具有多激子和可调带隙的特性,是制备量子点敏化电池和量子点太阳能电池的理想材料。

4.2 在新型半导体材料器件上的应用

(1) 场效应晶体管

场效应晶体管具有输入阻抗高、极限频率高、噪声小、功耗小、制造工艺简单、温度特性好等特点,广泛应用于各种放大电路、数字电路和微波电路等。场效应晶体管通常以硅或砷化镓为材料。石墨烯广泛应用于场效应晶体管领域需要解决零带隙能的难题。使用氨气淬火的石墨烯是典型的n型氮掺杂石墨烯半导体,电子迁移率高,带隙大约为0.4 eV或更高,适合于制造场效应晶体管。最近报道的掺杂2.9%氮的石墨烯的带隙能仅为0.16 eV。随着氮掺杂石墨烯的迁移率和带隙的研究进展,在不远的将来,石墨烯在场效应晶体管的应用将成为可能。

(2) 光探测器

光探测器是构成光纤传感器的重要部分,是光接收机的首要部分,它的性能指标将直接影响传感器的性能。光探测器件制造对材料本身的导电性要求极高,所以相对于现有金属导体,具有高导电性的石墨烯可极大提高光探测器的性能。此外,弱光信号在现有光纤中有损耗和失真,改性石墨烯复合特殊的官能基团即使在弱光检测条件下也能够检测出入射到其面上的光功率,并把光功率变化转化为相应的电流,提高光探测器的器件效率,保证了光探测器件的高灵敏度、低噪声和快速响应。

(3) 超快激光器

超快激光器是基于SESAM(semiconductor saturable absorber mirror)锁模技术的新型光电器件。超快激光器具有超短脉冲宽度(<15 ps)、高单脉冲能量(最大单脉冲能量30 mJ)、高重复频率(1 kHz以上)、可选的重复频率(1~100 kHz)、优异的空间模式、卓越的功率稳定性和可靠的优良输出性能等优点,能够实现高效的二倍频、三倍频、甚至四倍频光的输出。然而,制造器件中必须使用包括镓、铟、铊、铈和铼等稀有元素,制约了器件的大规模应用。石墨烯由于比表面高、导电性好,在石墨烯表面复合稀有金属基团

后,不但大大降低了原有器件对贵金属功能基底的使用量,有望降低器件成本 50% 以上,石墨烯特有的表面物理和化学特性可大幅提升器件性能。基于石墨烯材料制造的超快激光器件能够用于测试波长范围遍及红外、绿光、紫外,波长最短可以达到 266/263 nm。器件可运用在卫星测距、激光精细微加工、非线性光学、激光光谱学、生物医学、强场光学、凝聚态物理学等重要领域,是国防安全、外太空设备运行、医学检验、生物研究等领域不可缺少的重要组成部分。

(4) 光子晶体

光子晶体又称光子禁带材料,是由具有不同折射率的介质周期性排列而成的人工微结构。从材料结构上看,光子晶体是一类在光学尺度上具有周期性介电结构的人工晶体。石墨烯是由碳原子按照六边形进行排布并相互连接而成的结构非常稳定的单层碳结构。在光子晶体制备中,可以将石墨烯作为一种晶体生长的模板基底,基于石墨烯的六边形规则构型,制造出特殊的具有光子带隙特性(Photonic Band Gap, PBG)的人造周期性介电质结构。这些人造光子晶体可实现“设计”好的能带结构,实现操纵和控制光子,推动信息技术和通讯的发展。

(5) 发光二极管

发光二极管(LED)是由镓与砷、磷的化合物制成的二极管,当电子与空穴复合时能辐射出可见光。砷化镓二极管发红光,磷化镓二极管发绿光,碳化硅二极管发黄光。镓与砷、磷的化合物本身毒性大,且制造工艺复杂,应用受到限制。另外,现有 LED 显示存在蓝光、紫外和近红外光范围内的透明度较差,传统材料在酸或碱中不稳定,器件中离子容易泄漏至器件基底等缺陷。因此,开发物理化学性能稳定、制造工艺简单、生产成本较低的 LED 电极材料尤为重要。单层石墨烯具有透光性高(只吸收不到 2.3% 的太阳光)、电阻率低等优异性能,是制备 LED 理想电极材料。

4.3 在生物医学领域上的应用

功能化石墨烯有良好的生物相容性,非常适合用作药物载体。基于它们的大表面和域化的电子,石墨烯的派生物可以溶解和绑定分子,如果能实现足够高的药物加载和相匹配的活体药物分布及释放

概况,则有望成为药物传输工具。用近红外荧光染料标识但不运载任何药物,乙二醇修饰的石墨烯氧化物在静脉内异种移植的白鼠目标体内发现被动肿瘤,肿瘤在低能量最近红外激光照射后切除,显示了石墨烯派生物对辐射热癌症治疗的能力。然而,考虑到生物安全性、临床和控制的障碍以及药物开发的长周期性,石墨烯基药物运输技术的实际应用还很遥远。

石墨烯作为组织工程中一种新兴的技术领域,有少数产品进行了临床实验,并对一些疾病治疗产生了显著影响。例如,石墨烯可应用于支架材料,能改进机械性(强度和弹性)以及选择性、阻挡性,并且可能在细胞支撑,扩散和分化方面调整生物性能。

石墨烯进入生物领域应用之前,科学家必须首先认真研究它的生物分布、生物相容性、在生产制造和随后的使用中的急性和慢性的毒性等等。石墨烯在特定条件下的应用可能随着尺寸、形貌和化学结构的不同而不同,在某些条件下的石墨烯被认为会引起特殊毒性,但可能会产生生物活性。例如,一种“毒性”的石墨烯派生物作为抗生素或者抗癌治疗可能会产生很好的治疗效果。

5 对我国发展石墨烯的建议

我国在石墨烯材料基础研究方面处于国际领先地位,但在器件制造和应用方面仍很欠缺,应全面加强石墨烯的规模化制备、改性、高性能应用和产业化工作。

5.1 加强石墨烯制备技术的研究

我国应发展层数和性能可控的高质量、低成本、大规模制备技术,特别是溶液化学法规模制备石墨烯。目前,业内通常采用的石墨烯的制备方法有 4 种,即,微机械剥离法、外延生长法、氧化石墨烯还原法和气相沉积法(CVD)^[8-13]。前 3 种均以石墨作为原材料,而 CVD 法采用的原材料则是甲烷居多。微机械剥离法是最初获得石墨烯片的一种简单的物理方法,能制得晶格完好的高质量的石墨烯片,但明显受制于产量低、控制精确性难、重复性差等缺点;通过 SiC 热解外延生长法能实现石墨烯的大面积制备,而且产品质量较也高,但是制备条件比较苛刻,要求必须在高温高真空条件

下进行制备,同时还存在 SiC 价格较昂贵、制得的石墨烯片难于从 SiC 转移下来等成本和技术问题; CVD 法则首先在镍、铜等具有溶碳量的金属基体上将碳源(主要是甲烷等含碳化合物)高温分解,然后以强迫冷却的方式在基体表面形成石墨烯。CVD 法用于制备石墨烯简单易行,而且产品的质量较高并易于从基体上分离,被广泛接受用于石墨烯透明导电薄膜和晶体管的制备。目前,该方法在理论和技术方面还需要进一步深入探索,亟需解决石墨烯尺寸较小(通常只有几微米)、制备周期长、产物浓度低等问题。

5.2 加强面向应用的石墨烯改性技术研究

应加强对石墨烯功能化的研究,特别是石墨烯的化学修饰和表面改性。针对功能化石墨烯存在的导电性差、分散性差以及功能化方法复杂等缺点,发展新的改性技术和方法,推动石墨烯应用研究。氧化石墨烯表面含有大量的含氧官能团,如羟基、羧基等,这些官能团使得石墨烯改性成为可能,是实现石墨烯功能化研究的关键之一。此外,元素掺杂也是实现石墨烯新性质、新功能和新应用的重要途径。

5.3 加强石墨烯的应用研究

我国石墨烯研究正处于从实验室向产业过渡的阶段,应该着重研发石墨烯的下游产品,特别是加强石墨烯在能源存储材料和器件、光电转换材料和器件、高性能功能复合材料、生物医学、聚合物等方面基础和应用研究。

5.4 加强产学研用联合研究

目前,美国、日本和欧洲的碳纳米材料相关技术研发的主体是企业,通过与高校科研院所联合,已经初步形成了产学研结合的局面。

我国碳纳米材料相关技术的研发主体则集中在高校和科研机构,企业虽然已经申请了一定数量的相关专利,但存在研发力量薄弱的先天不足,而且研究和应用开发的方向非常分散。因此,我国亟需在国家层面上总体规划并借助高校和科研院所的技术力量,加强碳纳米材料科研机构和企业之间的密切合作。以基础研究为根本,以应用为导向,以企业为主体,以“产学研用”相结合的模式,发挥校和科研院所的技术优势以及企业的产业化能力和市场应用拓展的优势,促进我国碳纳米材料领域基础

研究与产业化的有机衔接,实现关键技术和规模应用的重点突破,研发一批在国际市场具有核心竞争力的产品,培育掌握核心技术、具有自主知识产权的高技术创新企业,实现我国石墨烯领域内的跨越式发展。

5.5 加强国际合作和人才培养

石墨烯材料的应用及产业化涉及基础研究、规模化制备、改性及应用,研究领域覆盖从自然科学到工程技术几乎所有学科领域,通过开展更广泛的国际合作和学术交流,可以了解国际前沿和研究进展,高效利用各方人力、物力和财力资源。同时,也是为石墨烯材料的基础研究、产业化和应用培养高水平人才的重要途径。■

参考文献:

- [1] Geim A K, Novoselov K S. The Rise of Graphene[J]. Nat Mater, 2007, 6(3): 183-191.
- [2] Geim A K. Graphene: Status and Prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [3] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene[J]. Science, 2008, 320(5881): 1308.
- [4] Wang Feng, Zhang Yuanbo, Tian Chuanshan, et al. Gate-Variable Optical Transitions in Graphene[J]. Science, 2008, 320(5873): 206-209.
- [5] Morozov S V, Novoselov K S, Katsnelson M I, et al. Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(1): 016602.
- [6] Balandin A A, Ghosh S, Bao W Z, et al. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene[J]. Nano Lett, 2008, 8(3): 902-907.
- [7] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene[J]. Nature, 2005, 438: 197-200.
- [8] Kim K S, Zhao Yue, Jang Houk, et al. Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable Transparent Electrodes[J]. Nature, 2009, 457(7230): 706-710.
- [9] Li Xuesong, Cai Weiwei, An Jinho, et al. Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils[J]. Science, 2009, 324(5932): 1312-1314.
- [10] Bae S, Kim H, Lee Y, et al. Roll-to-Roll Production of 30-

- inch Graphene Films for Transparent Electrodes[J]. Nat Nanotechnol, 2010, 5(8): 574–578.
- [11] Chen Zongping, Ren Wencai, Gao Libo, et al. Three-Dimensional Flexible and Conductive Interconnected Graphene Networks Grown by Chemical Vapor Deposition [J]. Nat Mater, 2011, 10(6): 424–428.
- [12] Gao Libo, Ren Wencai, Xu Huilong, et al. Repeated Growth and Bubbling Transfer of Graphene with Millimetre-Size Single-Crystal Grains Using Platinum[J]. Nat Commun, 2012, 3: 699.
- [13] 任文才, 高力波, 马来鹏, 等. 石墨烯的化学气相沉积法制备[J]. 新型炭材料, 2011, 26(1): 71–80.

Progress of Graphene Technology and Its Industrial Development

ZHANG Fang¹, SHI Dong-mei¹, PU Ning-zhong², REN Wen-cai³

(1. Hi-tech Research and Development Center, the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Beijing 100044; 2. Nanjing University of Technology, Nanjing 210009; 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: Graphene is a new C-based material and has a 2D cellular crystal lattice structure closely packed by single layered C atoms. The graphene has excellent crystallinity and electrical properties, and has a good application prospect in several areas like energy, semiconductor, and biomedicine science. The United States is the first to turn the graphene research into a national strategy; the European Union has invested heavily in graphene research and its application in the field of energy and digital technology; the UK will input 61 million pounds to set up the graphene research institute; Japan and South Korea have carried out many studies related to graphene application. China has taken the lead in basic research of graphene, however, it fall behind the developed countries in graphene-based device and its application. In this article, analysis is made to the technologies and industrial development of graphene in China and other countries, and some suggestions for development of graphene in China are proposed.

Key words: graphene; C-based material; 2D graphite; electrical properties