

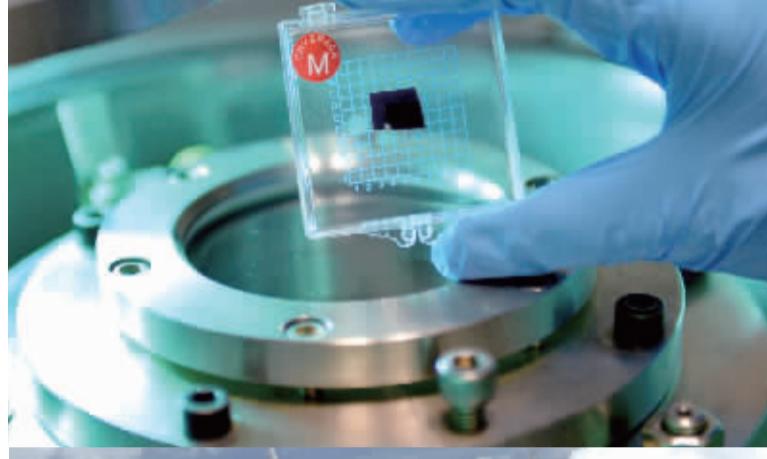
# 石墨烯处于产业化攻坚阶段

□ 招商证券 张士宝 孙恒业

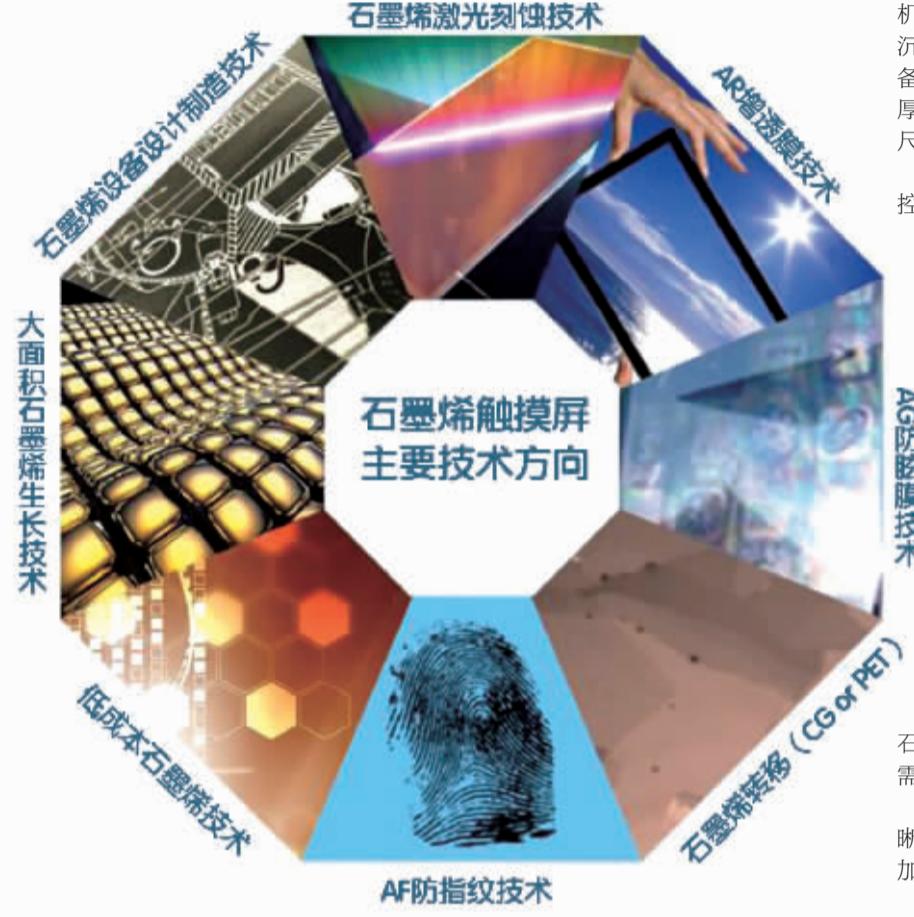
石墨烯是新材料领域一颗耀眼的新星。由于具备众多优异的力学、光学、电学和微观量子性质，石墨烯有望在电子、新能源、高端制造、医疗等领域展开多种应用。未来下游应用市场有望达到万亿元级别，预计最先将应用于太阳能透明电极、散热材料和触摸屏等领域。

石墨烯目前处于产业化攻坚阶段，在技术、工艺和产业链对接方面需要投入大量资源。产业化的关键和难点是相关材料的制备、转移技术和上下游产业链整合。美国、英国、中国、日本和韩国等国家的产业化开发处于相对前列。

涉及石墨烯业务的上市公司较多，但均处于研发试验或新涉阶段，尚未对业绩构成实质性影响。



新华社图片



## 新材料领域的重大突破

石墨烯是由单层碳原子构成的六角形蜂巢晶格的平面二维材料，结构稳定，各项物理性质优异。石墨烯的发现颠覆了凝聚态物理学界既往的二维材料不能在有限温度下存在的观念。

石墨烯具备众多优异的力学、光学、电学和微观量子性质，是目前最薄也是最坚硬的纳米材料，同时具备透光性好、导热系数高、电子迁移率高、电阻率低、机械强度高等众多普通材料不具备的性能，未来有望在电极、电池、晶体管、触摸屏、太阳能、传感器、超轻材料、医疗、海水淡化等众多领域应用，是最有前景的先进材料之一。

石墨烯材料分为两类，一类是由单层或多层次石墨烯构成的薄膜，另一种是由多层石墨烯构成的微片。石墨烯薄膜又分为单晶薄膜和多晶薄膜。其中单晶薄膜可以用于集成电路等电子领域，但是产业化尚待时日。而多晶薄膜有望在5-10年内实现产业化应用，替代ITO玻璃用于制造触摸屏（特别是柔性制造屏）和其他需要透明电极的领域。除了纯石墨烯之外，另外还有很多石墨烯衍生物，未来也会有较为广泛的应用。

总体而言，石墨烯应用领域将主要集中在电

子、新能源、生物医疗、高精度制造业、水处理等高精尖技术领域。

传感器方面，纳米传感器尺寸小、精度高。原子级别的传感器与普通传感器相比，具备多种独有的微观性质，显著拓宽了传感器的应用领域。纳米传感器可广泛应用于生物、化学、机械、航空、军事等方面。纳米传感器主要包括纳米磁敏传感器、纳米生物传感器和纳米光纤传感器。纳米传感器尺寸主要取决于探针针头大小，传感器尺寸可显著减小，同时响应时间大大缩短，满足微观高精度测量需要。随着工业生产和环境监测的需要，纳米气敏传感器的研发获得了长足的进展，未来有望率先实现商业化应用。

目前已经用化学气相沉积法在分散有催化剂的SiO<sub>2</sub>/Si基片上制得的单个的单壁碳纳米管。此种碳纳米管使得传感器在复杂的气体环境中具有选择性，区分度和灵敏度较之传统的传感器显著提升。

单壁碳纳米管具有优异的电子、机械、力学等性能，但是纳米管制备一直是难点。实现结构和性质可控的制备是单壁碳纳米管应用的基础和关键，同时也成为碳纳米管研究和应用发展的

瓶颈。

石墨烯良好的电导性能和透光性能，使其在透明电极方面有非常好的应用前景。试验证明，石墨烯比表面积高达2600平方米/克，导电性极高，且储能效率是现有材料的近两倍，是理想的电极材料。石墨烯在取代其他电极材料方面有广阔的应用前景，即便是目前商用超级电容器使用的活性炭等材料，比表面积也不过1000-1800平方米/克，石墨烯的电学综合性能显著超越当前的各种材料。

传统电极材料多采用ITO（铟锡氧化物）。铟元素价格昂贵，且较为稀有。行业正在寻找一种成本更低的材料以替代ITO。石墨烯以其独有的导电透明性质成为备选材料。采用石墨烯制成的透明电极，不仅具备传统电极的导电特性，同时还可以弯曲折叠，在搭建过程中可与建筑结构成一体化，更加经济和实用。透明导电电极不仅应用于太阳能领域，同时还可应用于触摸屏、液晶屏、发光LED和超级电容等多种光电领域。目前全球实验室将石墨烯电极应用至上述多类产品，包括触摸屏和超级电容。若能成功商业化，未来有望改变电子行业制造格局。

石墨烯材料是超级电容器的关键所在，决定着电容器的主要性能指标，如能量密度、功率密度和循环稳定性等。目前，纳米结构的活性炭、碳化物转化炭、碳纳米管、氧化钌、聚苯胺和聚吡咯等均已用于微型超级电容器的电极材料。但是上述材料整体性能不能满足微型能源系统的要求。同时，制造微型超级电容的光刻工艺复杂，生产周期长，成本高昂，一定程度上制约了超级电容商业化进程。

近期有报道称，IBM公司研制出首款由石墨烯圆片制成的集成电路。科学家预测，这项突破可能预示着未来有望采用石墨烯圆片来替代硅晶片。这块集成电路建立在一块碳化硅上，并且由一些石墨烯效应晶体管组成。最新的石墨烯集成电路混频最多可达10G赫兹，承受125摄氏度的高温。

未来石墨烯集成电路有望使智能手机、平板电脑和可穿戴电子设备等电子终端运行速度更高、能效更低、成本更低。生物传感器是生命分析化学及生物医学领域中的重要研究方向，已广泛应用于临床疾病诊断和治疗研究。石墨烯制成的生物传感器对生命分析领域的快速发展具有重要现实意义。在基因组测序技术领域，最近成功开发出来的DNA测序器，是一种以石墨烯为基础的场效应晶体管设备，能探测DNA链的旋转和位置结构。该传感器利用石墨烯的电学性质，成功实现检测DNA序列的微观功能。

苏州纳米研究所研究出使用PEG包被荧光标签的纳米石墨烯片（NGS）在体内的作用，在活体内异种皮肤肿瘤移植荧光成像中，NGS表现出了高肿瘤细胞摄取率。尽管对这种新型碳纳米材料在体内表现还需要更多的认知以及长期的毒性研究，但是这种方法为石墨烯在诸如肿瘤治疗的生物医学领域提供了方向。

此外，石墨烯由于其超高的载流子迁移率和导热效率，未来有望成为LED导热领域的新型应用材料。作为一种新型储能装置，超级电容器具有体积小、输出功率高、充电时间短、使用寿命长、工作温度范围宽、安全且无污染等优点，有望成为未来新型的电源装置。要制造出高性能的超级电

## 应用领域不断拓宽

石墨烯是目前所知最薄、最强和导电性最好的材料。研究发现，通过建立三维堆叠多层次异质结构的石墨烯能够制成具备极为敏感的高效光伏设备，可以利用太阳能产生电力。未来有望采用石墨烯制成转换效率更高的新一代太阳能电池。

从当前的研究进展来看，石墨烯不仅可以制成太阳能电池用的透明电极，同时还可以用作插入半导体层之间的中间电极。石墨烯最能发挥威力的领域是有机薄膜太阳能电池领域。在太阳能电池中使用石墨烯作为中间电极的优点在于，石墨烯是透明的，而且与半导体层的相容性较高。

化学掺杂可以大大降低石墨烯面电阻并调整石墨烯的功函数，制成柔性更高的透明导电薄膜。石墨烯制成的透明导电薄膜，不仅具备导电、透明等太阳能转换器件所必备的性质，还具备金属材料所不具备的柔性。同时，此种薄膜具备对中远红外线高透性质，能显著提升太阳能的转换效率，是新一代太阳能电池的理想材料。

目前，石墨烯光伏材料研究领域处于领先地位的厂商之一是富士电机。该公司正在积极开发采用石墨烯制成的太阳能电池透明导电膜。

超级电容器是基于高比表面积炭电极/电解液界面上的电容、或者基于过渡金属氧化物/导电聚合物的表面及体相所发生的氧化还原反应来实现能量存储和转换的电子元件。其构造和电池类似，主要包括正负电极、电解液、隔膜和集流体。

作为一种新型储能装置，超级电容器具有体积小、输出功率高、充电时间短、使用寿命长、工作温度范围宽、安全且无污染等优点，有望成为未来新型的电源装置。要制造出高性能的超级电

容器，电极材料是超级电容器的关键所在，决定着电容器的主要性能指标，如能量密度、功率密度和循环稳定性等。目前，纳米结构的活性炭、碳化物转化炭、碳纳米管、氧化钌、聚苯胺和聚吡咯等均已用于微型超级电容器的电极材料。但是上述材料整体性能不能满足微型能源系统的要求。

同时，制造微型超级电容的光刻工艺复杂，生产周期长，成本高昂，一定程度上制约了超级电容商业化进程。

近期有报道称，IBM公司研制出首款由石墨烯圆片制成的集成电路。科学家预测，这项突破可能预示着未来有望采用石墨烯圆片来替代硅晶片。这块集成电路建立在一块碳化硅上，并且由一些石墨烯效应晶体管组成。最新的石墨烯集成电路混频最多可达10G赫兹，承受125摄氏度的高温。

未来石墨烯集成电路有望使智能手机、平板电脑和可穿戴电子设备等电子终端运行速度更高、能效更低、成本更低。

生物传感器是生命分析化学及生物医学领域中的重要研究方向，已广泛应用于临床疾病诊断和治疗研究。石墨烯制成的生物传感器对生命分析领域的快速发展具有重要现实意义。在基因组测序技术领域，最近成功开发出来的DNA测序器，是一种以石墨烯为基础的场效应晶体管设备，能探测DNA链的旋转和位置结构。该传感器利用石墨烯的电学性质，成功实现检测DNA序列的微观功能。

苏州纳米研究所研究出使用PEG包被荧光标签的纳米石墨烯片（NGS）在体内的作用，在活体内异种皮肤肿瘤移植荧光成像中，NGS表现出了高肿瘤细胞摄取率。尽管对这种新型碳纳米材料在体内表现还需要更多的认知以及长期的毒性研究，但是这种方法为石墨烯在诸如肿瘤治疗的生物医学领域提供了方向。

此外，石墨烯由于其超高的载流子迁移率和导热效率，未来有望成为LED导热领域的新型应用材料。

## 产业化尚待时日

技术问题是石墨烯商业化应用的主要制约因素。如何低成本和高效率地制备大面积、高质量石墨烯，并快速高效转移至下游需求领域，是石墨烯大规模商业化应用主要致力的方向。

当前制备石墨烯的方法有很多，主要有物理和化学两大类。物理的方法主要是采取机械剥离方法，而化学方法主要集中在化学沉积和化学合成两大方向。上述物理方法制备石墨烯共同的缺点就是生产出的石墨烯厚度不一，可操作性差，并且无法生长出大尺寸的石墨烯。

化学沉积气相法（CVD）提供了一种可控制的石墨烯方法。首先将平面基底（如金属薄膜和金属单晶）等置于高温可分解的前驱体（一般多为甲烷和乙炔等烃类）中，通过高温退火的方式使碳原子沉积在基底表面形成石墨烯，最后用化学方法去除金属基底之后得到石墨烯。此方法可以形成较大面积的石墨烯片，但合成过程必须在高温下进行，石墨烯的良品率一般无法保证。此外，还有化学溶液直接剥离法、高温石墨膨胀法等。

上述石墨烯化学制备方法制得的石墨烯同样也不稳定，且石墨烯片状面积有限，商业化尚待时日。

整体而言，化学气相沉积法（CVD）在规模化制备石墨烯的问题方面有新的突破，也是目前制备石墨烯的主流技术之一，但大规模商业化还需要进一步提升工艺空间。

近两年来，石墨烯产业化方向逐渐清晰，各有关石墨烯产业支持政策也进一步加大。

2013年1月，欧盟委员会将石墨烯列为未来新兴技术旗舰项目之一。该项目的研究范围十分广泛，其中石墨烯的制备是核心。欧盟委员计划十年提供10亿欧元资助，将石墨烯研究提升至战略高度。

英国在之前投入5000万英镑支持石墨烯商业化应用之后，接着追加投资2150万英镑资助石墨烯研究项目，推进石墨烯商业化进程，并建立国家石墨烯研究所（NGI），该机构有望成为世界领先的石墨烯研究和开发中心。

2002-2013年，美国国家自然科学基金会关于石墨烯的资助达到500项。重点方向包括复合材料、石墨烯电子器件、CMOS晶体管、存储器件开发、生物传感器和石墨烯制备等方面。同时，美国国防部及其下属机构国防高级研究计划署开展多项石墨烯研究项目，重点开发更轻更小、更快和更高频的电子器件。2008年7月，计划署发布碳电子射频应用项目，项目投资为2200万美元。IBM研制出截至频率高达155GHz的石墨烯晶体管，是碳电子射频应用研发的里程碑。

作为颇有前景的高新技术材料，石墨烯有望在半导体、光伏、锂电池、航天、军工、LED和触控屏等领域带来一次材料革命，一旦实现产业化，其市场规模有望达到万亿元级别以上。

不过，从实际情况看，石墨烯产业化尚待时日，制造工艺不稳定，成本居高不下，仍是石墨烯走向产业化的主要制约因素。从制造工艺来看，目前业内通行的方法均有各自的优势和缺陷，产业技术路径仍在探讨之中。

目前开展石墨烯研究的主要是高校科研院所等研究单位和少数企业，研究力量比较分散，要尽快实现石墨烯产业化，必须通过技术创新和产学研协作，建立一条完整的石墨烯研发、生产、应用的全产业链，打造公共科技服务平台和测试平台，优化研究和产业化生产环境。

## 多家公司加速布局

2013年初，中科院重庆研究院制成国内首片15英寸单层石墨烯和7英寸石墨烯触摸屏，未来可用于手机和电脑等电子产品。研究院制备15英寸铜箔衬底，均匀单层石墨烯，并成功将其完整地转移到柔性PET衬底和其他基底表面。

上海南江集团与中科院重庆研究院共同推进大面积单层石墨烯产业化项目，前期投资达2.67亿元。石墨烯产业基地已成功落户重庆，将力争尽快建成首期生产线并投产，形成1000万片石墨烯产能。

2013年5月，常州二维碳素科技、无锡格菲电子薄膜科技、深圳力合光电传感联合江南石墨烯研究院宣布，国内首条年产3万平方米的石墨烯薄膜生产线正式投产。常州二维碳素科技率先将石墨烯薄膜应用于手机电容式触摸屏，并实现4英寸石墨烯触摸屏手机小批量生产。无锡格菲电子薄膜科技表示，公司计划生产50万件石墨烯手机触摸屏，并计划再融资1亿元，扩大石墨烯手机触摸屏生产规模。

二维碳素的核心技术是采用CVD工艺在铜基底上生长石墨烯薄膜的工艺。将甲烷（及辅助气体）通入反应炉中，经过1000摄氏度以上的高温加热，甲烷碳氢键断裂，碳原子在金属催化剂基底上形成晶核，进而形成多晶薄膜。

上市公司方面，中国宝安旗下的贝特瑞公司在2011年11月完成石墨烯中试线建设并投入生产，目前公司有关石墨烯的研究方向主要是负极材料领域。

烯碳新材在2013年完成战略转型，从房地产业转向石墨烯等新材料产业，实现了烯碳新材料的全产业链布局。根据公司烯碳产业集群的布局规划，公司旗下产品包括资源类、应用类和科技类前沿产品。2013年公司完成战略布局：置入海城三岩矿业有限公司40%股权；置入奥宇集团有限公司51%股权；置入黑龙江牡丹江农垦奥宇石墨深加工有限公司51%股权；投资参股连云港丽港稀土实业有限公司，基本完成石墨碳、耐火碳和活性碳之基础产品布局。

近日，康得新公告，公司拟在张家港设立张家港康得新石墨烯应用科技，注册资本1亿元，为康得新全资子公司。公司经营范围为石墨烯新材料技术的研发应用，石墨烯相关产品的研发、生产和销售等。不过，公司表示，所涉石墨烯相关业务尚处于引进和投资阶段，尚未对公司经营业绩造成实质性影响。

早在2011年6月，金路集团与中科院金属所签署技术开发合同，双方将在“石墨烯材料及其应用技术与产业化技术研发”方面展开合作，金属所负责具体研究开发工作，并提供产业化可行性报告；公司负责提供研发经费，并组织相关团队进行产业化及市场开发方面的工作。公司在研石墨烯透明导电薄膜、石墨烯基三维网络散热材料、石墨烯基动力电池项目。在石墨烯透明导电膜方面，金属研究所能制备出4英寸的石墨烯透明导电薄膜。

2014年3月，金路集团发布公告称，公司与金属所前期的合作，主要包括石墨烯散热材料、石墨烯功能涂层、石墨烯复合材料的制备技术与应用技术研发，石墨烯材料在电池中的应用技术研发，石墨烯三维网络材料应用技术研发等；2014年年度研发计划包括：石墨烯在锂离子电池、锂硫电池、导电油墨以及防腐涂层中的应用研发。

中泰化学参股厦门凯纳石墨烯技术有限公司35%股权。厦门凯纳自2006年启动石墨烯技术的研发，并于2010年5月正式注册成立，成为国内第一家专业从事石墨烯研发的企业，率先向国内外提供高品质的石墨烯相关产品。

7月15日，中泰化学披露厦门凯纳石墨烯技术有限公司最新研发工作进展情况。根据厦门凯纳与中泰化学项目组的研发工作计划，项目组技术研发人员已于近日进驻公司研发实验基地，开展石墨烯与PVC聚合相关试验，试验工作按计划推进。厦门凯纳共向国家知识产权局申请了17项发明专利，其中被授予4项发明专利权；1项实用新型专利权。

近日，康得新公告，公司拟在张家港设立张家港康得新石墨烯应用科技，注册资本1亿元，为康得新全资子公司。公司经营范围为石墨烯新材料技术的研发应用，石墨烯相关产品的研发、生产和销售等。不过，公司表示，所涉石墨烯相关业务尚处于引进和投资阶段，尚未对公司经营业绩造成实质性影响。