

聚焦电子束诱导碳沉积实现纳米线表面可控修饰

苏江滨^{①②}, 朱贤方^{①③④*}, 李论雄^①, 王占国^③

① 厦门大学中国-澳大利亚功能纳米材料联合实验室, 厦门大学物理系, 厦门 361005;

② 江苏工业学院数理学院, 常州 213164;

③ 中国科学院半导体材料重点实验室, 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;

④ 中国科学院固体物理研究所, 合肥 230031

* 联系人, E-mail: zhux@xmu.edu.cn

2009-11-10 收稿, 2010-01-19 接受

国家科技计划国际科技合作与交流专项(编号: 2008DFA51230)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB936603)、国家自然科学基金(批准号: 90401022, 60776007)、中澳科技合作特别基金(编号: 20050222)和教育部科技研究重点项目(编号: 105099)资助

摘要 作为一种典型的准一维纳米材料, 纳米线具有纳米材料所特有的小尺寸效应或纳米曲率效应, 经表面修饰的纳米线一般具有不同于普通纳米线的特殊性质. 利用实验室发展成熟的透射电子显微镜原位辐照技术, 以透射电子显微镜中残留的有机气体分子为前驱体, 成功地在纳米线表面可控沉积了非晶碳纳米颗粒和碳纳米棒, 以及局域凸起的非晶碳膜并形成局域肿大的同轴结构. 实验结果表明, 该方法能够方便地通过控制聚焦电子束的束斑尺寸、辐照方式、辐照时间以及辐照位置等参数, 在纳米线表面精确可控地沉积各种非晶碳纳米结构, 从而实现纳米线的表面可控修饰. 对聚焦电子束辐照下基于纳米线的各种碳纳米结构的可能沉积机理作了进一步地探索, 并针对透射电子显微镜中如何减少因电子束辐照诱导非晶碳沉积造成的样品污染提出了几点建议.

关键词

透射电子显微镜
聚焦电子束诱导沉积
纳米线
表面修饰
碳纳米结构

纳米线作为一种典型的准一维纳米材料, 在场发射显示器、场效应晶体管、逻辑电路、新型光电子器件以及化学生物传感器等领域都具有潜在应用前景^[1]. 但是, 由于在可控制备、合成和修饰等技术上的难度, 纳米线一般没有理想的形貌(如长度、直径以及轴向的平直度等)和结构(如同轴结构和异质节结构等), 对纳米线的推广应用造成了极大的限制, 这就要求在纳米尺度上对纳米线进行精确可控地修饰加工. 而且, 更为重要的是, 经过人为特意修饰加工之后的纳米线一般具有不同于普通纳米线的特殊物理、化学性质, 更能满足纳米线器件化、功能化的需要. 在目前的纳米线修饰加工工艺中, 场发射透射电子显微镜中高能聚焦电子束辐照诱导纳米线修饰加工是一种很常用的手段, 它不但可以实现纳米线的切割、打孔、焊接, 以及长度、直径、弯曲度等形

貌的改变, 而且还可以在纳米线表面诱导沉积其他元素的纳米结构, 从而改善其物理、化学性能. 对于前者, 目前文献[2~6]特别是我们近期的工作^[2]已有较系统的研究, 这里就不作详细的阐述; 对于后者, 文献更多的是利用透射电子显微镜中高能聚焦电子束诱导沉积来制备纳米线、纳米点、纳米树等各种纳米结构^[7~11], 而针对纳米线表面修饰的研究^[7,12]则很少. 而且, 在上述我们仅发现的这两篇文献^[7,12]中, 文献[7]通过手动控制电子束运动的方法对多壁碳管、氧化锌纳米线的改造作了初步的尝试, 但它并不是以纳米线的表面修饰作为主要目的, 尚未对透射电子显微镜中聚焦电子束诱导碳沉积实现纳米线表面可控修饰作系统、深入的研究. 而且, 手动控制电子束运动的方法虽然简单, 但在实际操作中电子束移动方向的稳定性以及束斑在每个点的停留时间都很

英文引用格式: Su J B, Zhu X F, Li L X, et al. Controllable surface modification of nanowires by focused-electron-beam-induced deposition of carbon (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2010, 55: 1288—1293, doi: 10.1360/972009-2390

难精确控制, 导致生长出来的碳纳米线普遍粗细不均、轴向弯曲且表面凹凸不平, 在纳米器件的实际应用中可能会带来不确定性或留下隐患. 而文献[12]只是利用准聚焦电子束(束斑直径为 200 nm)在 ZnSe 纳米线表面沉积了一层厚度均匀的碳氢化合物薄膜. 同样, 它也没有对透射电子显微镜中聚焦电子束诱导碳沉积实现纳米线表面可控修饰作系统、深入的研究.

鉴于此, 本文在前人工作的基础上^[7,12], 以纳米线表面修饰为研究目的, 直接以透射电子显微镜中残留的有机气体分子为前驱体, 利用透射电子显微镜的定点辐照、定向线扫等功能, 通过控制聚焦电子束的束斑尺寸、辐照方式、辐照时间以及辐照位置等参数, 在纳米线表面精确可控地沉积了碳纳米颗粒、碳纳米棒以及局域凸起的非晶碳膜, 从而实现了纳米线的表面可控修饰.

1 实验方法

本文实验是在 FEI 公司的 Tecnai F-30 场发射透射电子显微镜下完成的, 加速电压为 300 kV, 电子显微镜真空度约为 10^{-5} Pa. 由于硅基纳米技术能够很好地和当代微电子技术相兼容, 本文特地选择非晶 $\text{SiO}_x(x=2\sim3)$ 纳米线和单晶 Si 纳米线作为修饰对象, 并以铜网和碳膜组成的普通微栅作为基底, 分别制成透射电子显微镜样品. 然后设计了以下三组典型实验对聚焦电子束辐照诱导纳米线表面碳沉积进行研究: (1)电子束束斑小于纳米线直径时, 通过改变束斑尺寸和辐照时间对纳米线进行定点辐照; (2)电子束束斑小于纳米线直径时, 通过设定束斑的尺寸以及线扫的方向、速度和长度对纳米线进行定向线扫; (3)电子束束斑大于纳米线直径时, 通过改变束斑尺寸、辐照位置和辐照时间对纳米线进行定点辐照. 在辐照过程中, 为了避免纳米线结构转变过程受到基底非晶碳膜的干扰, 特地选择突出在碳膜孔中的纳米线片段进行辐照修饰.

2 结果和讨论

图 1 中的 TEM 照片显示了在束斑尺寸小于纳米线直径的聚焦电子束定点辐照下诱导的碳沉积对非晶 SiO_x 纳米线表面修饰的结果. 如图 1(a)和(b)所示, 在束斑尺寸分别约为 15 nm 和 35 nm 的聚焦电子束定点辐照下, 直径约 40 nm 的非晶 SiO_x 纳米线的表

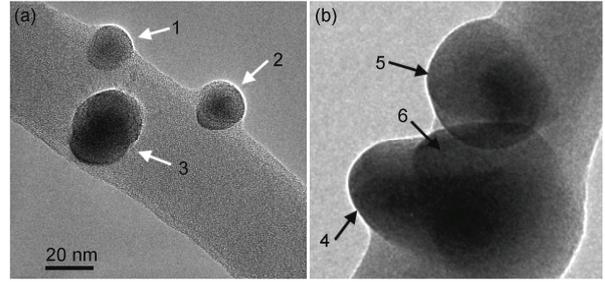


图 1 束斑尺寸小于纳米线直径时, 聚焦电子束定点辐照在非晶 SiO_x 纳米线表面可控沉积非晶碳纳米颗粒
(a) 束斑尺寸约 15 nm 时, 不同辐照时间下的碳纳米颗粒: 1, 10 s; 2, 15 s; 3, 30 s; (b) 束斑尺寸约 35 nm 时, 不同辐照时间下的碳纳米颗粒: 4, 60 s; 5, 110 s; 6, 160 s

面在受辐照位置均可控沉积了非晶碳纳米颗粒. 具体地讲, 当辐照时间较短时, 碳纳米颗粒刚形成, 其尺寸与束斑的尺寸很接近(如颗粒 1, 约 17 nm), 但随着辐照时间的增加, 颗粒进一步长大(从颗粒 1 到颗粒 3, 或从颗粒 4 到颗粒 6), 其尺寸甚至超过纳米线的直径(如颗粒 6, 约 65 nm). 因此, 在束斑尺寸小于纳米线直径的聚焦电子束定点辐照下, 可以方便地通过控制束斑尺寸和辐照时间来沉积合适尺寸的碳纳米颗粒, 实现碳纳米颗粒对纳米线的可控表面修饰.

图 2 中的 TEM 照片给出了当束斑尺寸小于纳米

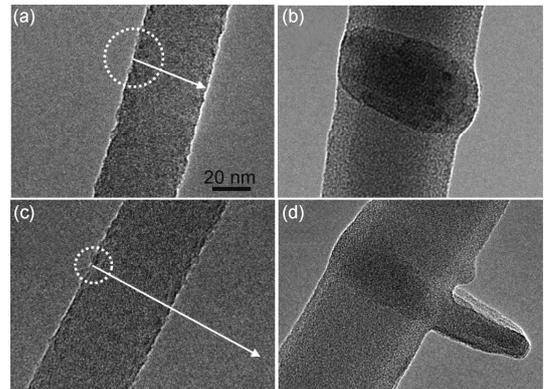


图 2 束斑尺寸小于纳米线直径时, 聚焦电子束定向线扫在非晶 SiO_x 纳米线表面可控沉积非晶碳纳米棒
束斑尺寸约 30 nm 沿径向进行线扫(线扫长度约 40 nm, 线扫速度约 10 nm/min): (a) 线扫前; (b) 线扫后; 束斑尺寸约 20 nm 沿径向进行线扫(线扫长度约 100 nm, 线扫速度约 20 nm/min): (c) 线扫前; (d) 线扫后; 图中圆圈代表束斑的尺寸及初始位置, 箭头代表线扫的方向及长度

线直径的聚焦电子束沿纳米线的径向方向进行线扫时诱导的碳沉积对非晶 SiO_x 纳米线表面修饰的结果. 如图 2(a)所示, 当束斑尺寸约 30 nm 的聚焦电子束沿直径约 40 nm 的非晶 SiO_x 纳米线的径向方向从纳米线一侧向另一侧进行线扫时(线扫长度约 40 nm, 线扫速度约 10 nm/min), 纳米线表面受辐照位置沉积了一根直径较束斑大得多的非晶碳纳米棒(约 45 nm, 见图 2(b)). 而当束斑尺寸减小为 20 nm、线扫长度增加为 100 nm(线扫速度约 20 nm/min)时, 如图 2(c)所示, 直径约 46 nm 的非晶 SiO_x 纳米线的表面及侧面沿线扫方向生长出一根直径较束斑略大的非晶碳纳米棒(约 24 nm, 见图 2(d)). 值得注意的是, 如图 2(d)所示, 距离纳米线的侧表面越远, 碳纳米棒就越细, 或者说碳沉积就越不容易. 因此, 当束斑尺寸小于纳米线直径的聚焦电子束对纳米线进行定向线扫时, 可以方便地通过控制线扫参数(如束斑尺寸, 线扫的方向、速度和长度等)来沉积各种形貌的非晶碳纳米棒, 实现碳纳米棒对纳米线的可控表面修饰.

图 3 中的 TEM 照片则显示了在束斑尺寸大于纳米线直径的聚焦电子束定点辐照下诱导的碳沉积对单晶 Si 纳米线表面修饰的结果. 如图 3(a)所示, 当束斑尺寸约 90 nm 的电子束聚焦于直径约 63 nm 的单晶 Si 纳米线的中心进行定点辐照时, 纳米线圆柱表面沉积了一层在受辐照位置局域凸起的非晶碳膜, 从而形成局域肿大的同轴结构. 而当束斑尺寸减小为 70 nm, 如图 3(b)所示, 先后在直径约 55 nm 的单晶 Si 纳米线的位置 1 和位置 2 进行定点辐照时, 类似地, 得到了两处受辐照位置局域肿大的同轴结构. 进一步地, 一系列连续的 TEM 照片(未给出)表明, 辐照时间越长, 表面非晶碳膜越厚; 辐照过程中单晶 Si 纳米线表面还出现了优先非晶化现象(拟发表在其他刊物). 因此, 在束斑尺寸大于纳米线直径的聚焦电子束定点辐照下, 可以方便地通过控制束斑尺寸、辐照位置和辐照时间等参数来沉积各种形貌的同轴结构, 实现非晶碳膜对纳米线的可控表面修饰.

由 HRTEM, SAED 和 EDX 分析(因图片较多未给出), 可以确认上述纳米线表面所沉积的物质就是非晶碳. 尽管电子显微镜中聚焦电子束辐照诱导物质沉积的机理尚未完全认识, 但通常可用如下过程来描述: 电子显微镜真空中含有要沉积物质的前驱气体, 样品表面的气体分子在聚焦电子束辐照下, 发生复杂的物理化学反应分解为沉积物附着在样品的

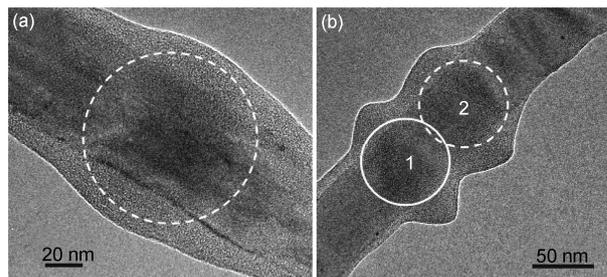


图 3 束斑尺寸大于纳米线直径时, 聚焦电子束定点辐照在单晶 Si 纳米线表面可控沉积在受辐照位置局域凸起的非晶碳膜, 从而形成局域肿大的同轴结构

(a) 聚焦于纳米线中心进行单次辐照; (b) 聚焦于纳米线中心先后在相邻两个位置进行辐照; 1, 2 代表同一纳米线上的先后两次辐照; 图中圆圈代表聚焦电子束的大小及辐照位置

表面, 剩余气体被真空泵抽出^[8,13]. 进一步地, 本文在上述三组实验的基础上对聚焦电子束辐照下纳米线表面各种非晶碳纳米结构的可能沉积机理作了探索.

本工作认为, 在束斑尺寸小于纳米线直径的高能聚焦电子束辐照下, 如图 1 所示, 辐照区域内纳米线表面的有机气体分子优先迅速分解为非晶碳并附着在纳米线表面的受辐照位置. 因此, 在较短辐照时间内所沉积的非晶碳纳米颗粒主要来源于辐照区域内纳米线表面有机气体分子的分解, 其尺寸与束斑尺寸很接近, 束斑尺寸就直接决定了碳纳米颗粒形成之初的尺寸. 但接下来, 随着辐照区域内纳米线表面有机气体分子的逐渐完全分解, 在浓度梯度的驱使下, 辐照区域附近纳米线表面的有机气体分子将沿纳米线表面不断扩散到束斑辐照区域之内, 并在聚焦电子束辐照下分解及进一步沉积, 非晶碳纳米颗粒进一步长大, 其尺寸甚至大大超过束斑的尺寸.

当束斑尺寸小于纳米线直径的聚焦电子束沿纳米线径向方向进行线扫时, 如果束斑辐照区域或扫过之处仅局限于纳米线表面, 如图 2(a)情况, 辐照区域内纳米线表面有机气体分子将发生分解并沉积非晶碳, 故在束斑扫过之处留下或沉积了一根非晶碳纳米棒, 而且该碳纳米棒的两端都呈半圆形, 与束斑半圆类似(见图 2(b)). 在这个过程中, 束斑尺寸和线扫速度都很关键: 如果束斑尺寸较大、线扫速度较慢, 那么辐照区域内纳米线表面有机气体分子将较完全地分解, 甚至辐照区域附近纳米线表面的有机气体分子也大量扩散到辐照区域中来, 所沉积的碳纳米

棒就粗;如果束斑尺寸较小、线扫速度较快,那么辐照区域内纳米线表面有机气体分子甚至可能分解不完全,所沉积的碳纳米棒就细.另外,束斑辐照区域还可能不仅仅局限于纳米线表面,如图 2(c)情况,束斑越过了纳米线的右侧表面继续线扫.对于这种情况,要分成两部分进行讨论:当束斑还在纳米线表面上时,情形与图 2(a)类似;但当束斑移出纳米线表面时,纳米线表面的有机气体分子先扩散到已沉积的非晶碳纳米棒,再沿碳纳米棒表面扩散到移动中的束斑辐照位置,即碳纳米棒的生长端,保证碳纳米棒的进一步生长.但随着生长端距离纳米线表面越来越远或者碳纳米棒越来越长,有机气体分子的扩散越来越困难,特别是当束斑移动较快时,生长端碳源可能供应不足,从而导致碳纳米棒越来越细(见图 2(d)),甚至生长中断.

而当聚焦电子束束斑尺寸大于纳米线直径并置于纳米线中心进行定点辐照时,如图 3 所示,由于径向方向整根纳米线均处于束斑辐照区域之内,纳米线整个圆柱表面上吸附的有机气体分子同时被分解成非晶碳并在各自位置上沉积.而且,随着辐照时间的增加,辐照区域附近纳米线表面的有机气体分子也不断扩散到辐照区域之内,纳米线圆柱表面上非晶碳得到进一步堆积,逐渐给纳米线圆柱表面包上了一层在受辐照位置局域凸起的非晶碳膜,从而形成在受辐照位置局域肿大的同轴结构,而且受辐照位置同轴结构的直径甚至超过束斑的尺寸(见图 3(a)和(b)).

通过上述实验结果及分析可以发现,辐照后纳米线表面所沉积非晶碳的形貌主要取决于辐照方式以及电子束束斑尺寸相对纳米线直径的大小,而非晶碳纳米结构的尺寸主要取决于束斑尺寸、辐照时间以及线扫速度等.此外,非晶碳的沉积速率则可能跟电子束的辐照强度、电镜中有机气体分子的浓度、有机气体分子的分解速率及其在纳米线表面的扩散速度等因素有关.

在上述 TEM 照片中,还可以发现高能聚焦电子束辐照下各种非晶碳纳米结构与非晶 SiO_x 纳米线、单晶 Si 纳米线都实现了较好地黏附(见图 1(a)和(b),图 2(b)和(d),图 3(a)和(b)).它们这种良好的黏附性可能是由于:(1)对于非晶 SiO_x 纳米线,它与各种非晶碳纳米结构一样,在相同曲率下具有较晶态纳米结构更大的表面纳米曲率效应以及更高的表面能,而且在高能聚焦电子束超快辐照下表现出更强的软模

效应或湿润效应^[2,14-16],因而与各种非晶碳纳米结构容易黏附在一起;(2)对于单晶 Si 纳米线,在表面纳米曲率效应^[14,15]作用下,它的表面一般是非晶的,而且在高能聚焦电子束辐照下其表面会进一步优先非晶化,因而单晶 Si 纳米线表面所沉积的非晶碳纳米结构实际上是跟非晶硅接触在一起的,其黏附情形类似于上述非晶 SiO_x 纳米线.

此外,在上述三组实验中,还发现辐照后纳米线表面在未受辐照位置也或多或少都沉积有非晶碳膜(见图 1(a)和(b),图 2(b)和(d),图 3(a)和(b)),这可能是由于:(1)聚焦电子束束斑由大(普通观察模式下束斑较大)调到小(聚焦辐照下束斑较小)的过程中,受辐照位置附近纳米线表面有机气体分子不可避免地要受到准聚焦电子束(束斑稍大一些)的辐照而分解、沉积;(2)受辐照位置有机气体分子分解成非晶碳后,可能有一部分非晶碳原子在电子束轰击下发生了“融蒸”,随后沉积下来并被受辐照位置附近纳米线表面所吸附;(3)在表面纳米曲率效应和电子束诱导非热激活软模^[14,16]的驱动下,受辐照位置(堆积有非晶碳,纳米曲率大,表面能高)非晶碳原子容易沿纳米线表面向邻近未受辐照位置(纳米曲率小,表面能低)进行“扩散”,从而降低体系的能量.纳米线表面未受辐照位置非晶碳膜的存在对纳米线的可控表面修饰是一个干扰或伤害,实验中可以采取行之有效的措施,如扩大观察模式下束斑的尺寸或缩短电子显微镜观察的时间等,尽量避免未受辐照位置非晶碳膜的不可控沉积;但从另一个角度看,纳米线表面非晶碳膜的存在使得纳米线形成一种“纳米线-非晶碳膜”核壳结构或同轴结构,从而可能具有更优于普通纳米线的物理、化学性能.

本文利用透射电子显微镜中残留的有机气体分子实现了纳米线的可控表面修饰,修饰后的纳米线可能具有优于普通纳米线的物理、化学特性而在将来的纳米器件中具有潜在应用前景.但在实际应用中,透射电子显微镜更多是用于形貌观察、结构和成分分析,或者研究纳米不稳定性、纳米制备和加工,这时如果透射电子显微镜中残留的有机气体分子太多,反而会造成样品的污染,给研究工作带来干扰甚至误导.为了减少透射电子显微镜中因电子束辐照诱导非晶碳沉积造成的样品污染,可以尝试以下途径:(1)提高电子显微镜真空度(超高真空下最佳),减小电子显微镜中有机气体分子的浓度;(2)制样时选择

合适的衬底并对样品作必要的前期处理,降低样品表面吸附有机气体分子的能力;(3)实验过程中尽量减少不必要的辐照或电子显微镜分析。

3 结论

综上,本文利用我们发展成熟的透射电子显微镜原位辐照技术,以透射电子显微镜中残留的有机气体分子为前驱体,成功地在纳米线表面可控沉积了非晶碳纳米颗粒和非晶碳纳米棒,以及局域凸起的

非晶碳膜并形成局域肿大的同轴结构。实验结果表明,该方法能够方便地通过控制聚焦电子束的束斑尺寸、辐照方式、辐照时间以及辐照位置等参数,在纳米线表面精确可控地沉积各种非晶碳纳米结构,从而实现纳米线的表面可控修饰。对聚焦电子束辐照下基于纳米线的各种碳纳米结构的可能沉积机理作了进一步地探索,并针对透射电子显微镜中如何减少因电子束辐照诱导非晶碳沉积造成的样品污染提出了几点建议。

致谢 厦门大学纳米科技中心洪麒麟老师在电子显微镜观察上提供了许多帮助,浙江大学硅材料国家重点实验室杨德仁教授提供了单晶硅纳米线,在此一并感谢。

参考文献

- 1 Appel D. Wired for success. *Nature*, 2002, 419: 553—555
- 2 苏江滨. 原位透射电镜电子束辐照诱导 SiO_x 纳米线结构不稳定性和纳米加工研究. 硕士学位论文. 厦门: 厦门大学, 2008
- 3 Xu S Y, Tian M L, Wang J G, et al. Nanometer-scale modification and welding of silicon and metallic nanowires with a high-intensity electron beam. *Small*, 2005, 1: 1221—1229
- 4 Remeika M, Bezryadin A. Sub-10 nanometer fabrication: molecular templating, electron-beam sculpting and crystallization of metallic nanowires. *Nanotechnology*, 2005, 16: 1172—1176
- 5 Kondo Y, Takayanagi K. Gold nanobridge stabilized by surface structure. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 3455—3458
- 6 许胜勇. 电子束纳米焊接与纳米切割. *电子显微学报*, 2007, 26: 563—569
- 7 王鸣生, 王晶云, 陈清, 等. 电子束致沉积手控生长碳纳米线. *电子显微学报*, 2005, 24: 11—16
- 8 Liu Z Q, Mitsuishi K, Furuya K. Features of self-supporting tungsten nanowire deposited with high-energy electrons. *J Appl Phys*, 2004, 96: 619—623
- 9 Mitsuishi K, Shimojo M, Han M et al. Electron-beam-induced deposition using a subnanometer-sized probe of high-energy electrons. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 2064—2066
- 10 Cho S O, Lee E J, Lee H M, et al. Controlled synthesis of abundantly branched, hierarchical nanotrees by electron irradiation of polymers. *Adv Mater*, 2006, 18: 60—65
- 11 Furuya K. Nanofabrication by advanced electron microscopy using intense and focused beam. *Sci Technol Adv Matter*, 2008, 9: 014110
- 12 Wang Y G, Zuo B S, Wang T H, et al. Synthesis and characterization of hydrocarbon coating prepared by in situ electron beam deposition on ZnSe nanowire. *J Phys Chem C*, 2008, 112: 7572—7578
- 13 Koops H W P, Kretz J, Rudolph M, et al. Characterization and application of materials grown by electron-beam-induced deposition. *Jpn J Appl Phys*, 1994, 33: 7099—7107
- 14 Zhu X F, Wang Z G. Nanoinstabilities as revealed by shrinkage of nanocavities in silicon during irradiation (invited review). *Int J Nanotechnology*, 2006, 3: 492—516
- 15 Zhu X F. Evidence of an antisymmetry relation between a nanocavity and a nanoparticle: A novel nanosize effect. *J Phys: Condens Matter*, 2003, 15: L253—L261
- 16 Zhu X F, Wang Z G. Evidence of ultrafast energy exchange-induced soft mode of phonons and lattice instability: A nanotime effect. *Chin Phys Lett*, 2005, 22: 737—740

Controllable surface modification of nanowires by focused-electron-beam-induced deposition of carbon

SU JiangBin^{1,2}, ZHU XianFang^{1,3,4}, LI LunXiong¹ & WANG ZhanGuo³

¹ *China-Australia Joint Laboratory for Functional Nanomaterials & Physics Department, Xiamen University, Xiamen 361005, China;*

² *Mathematics and Physics Department, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China;*

³ *Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;*

⁴ *Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

Surface-modified nanowires generally own some additional properties, and thus in this paper, the authors particularly studied the surface modification of nanowires via irradiation of focused electron beam in a Tecnai F-30 field emission transmission electron microscope (TEM). It was observed that controllable deposition of all kinds of amorphous carbon nanostructures, such as carbon particles, carbon rods and carbon films with local bulging, could be got on the surface of nanowires after intentional irradiation. In details, the controllable deposition of carbon nanostructures could be easily and precisely controlled by changing of some irradiation parameters such as beam spot diameter, irradiation manner, irradiation time and irradiation position. The possible deposition mechanisms of carbon nanostructures on the wire surface as induced by irradiation of focused electron beam in TEM were further discussed. In addition, some suggestions were also proposed on reducing of specimen pollution caused by undesired deposition of amorphous carbon materials during the irradiation.

transmission electron microscope, focused electron beam induced deposition, nanowires, surface modification, carbon nanostructures

doi: 10.1360/972009-2390