

X射线吸收谱研究碳与硅的纳米线/管

林良武, 唐元洪*, 张伟

湖南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410082

摘要 由于X射线吸收谱中的总电子产额(TEY)和荧光产额(FLY)具有不同的取样探测深度, 分别对样品的表面和体内敏感, 因而两者的综合应用为纳米材料的整体分析提供了有力的依据, 是透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射(XRD)等传统方法分析纳米材料时的补充。同时, 通过对TEY和FLY记录的X射线吸收谱的评述, 作者认为X射线吸收谱可以准确、可靠地用来进行纳米线和纳米管的生长及其机理、取向、化学键合、缺陷与螺旋性等方面的研究。因此X射线吸收谱具有传统方法无法比拟的优势, 是纳米材料研究领域强有力的表征工具。

主题词 X射线吸收谱; 硅纳米线; 碳纳米管; 蓝移

中图分类号: O722⁺.8; O766⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)03-0571-06

引言

纳米线/管(包括碳纳米管、碳纳米线、硅纳米线和硅纳米管)因其在纳米电子学将逐渐取代微电子学的过程中扮演着非常重要的角色而引起了人们的极大关注, 特别是从1998年实现了硅纳米线的大规模合成以来, 有关硅纳米线的研究便得到了迅速的发展^[1-3]。例如硅纳米线的合成方法已经从制备普通硅纳米线^[4-6], 发展到大量制备无缺陷的硅纳米线^[7, 8]。在表征方面, 由传统的X射线衍射(XRD)^[2]、拉曼光谱(Raman spectroscopy)^[9, 10]、透射电子显微镜(TEM)^[11, 12]逐渐发展到采用高分辨透射电子显微镜(HR-TEM)^[8, 13, 14]、X射线吸收谱(XAFS)^[15-19]等来表征纳米线/管的形貌、结构、键合和性能; 在性能测量方面, 电子传输^[20]、光致发光^[21]、红外诱导发射^[22]和场发射^[23]等研究都已经开展。这些都为纳米线/管技术研究的发展打下了坚实的基础。在这些研究中, 特别是X射线吸收谱的引入为纳米线/管的研究开启了新的方法。本文探讨了X射线吸收谱在纳米线和纳米管的生长及机理、取向、化学键合、缺陷与螺旋性等方面研究的应用。

X射线吸收光谱一般可以分成两部分: 近边X射线吸收精细结构(NEXAFS), 有时也被称为X射线近吸收边(XANES)^[24]和扩展的X射线吸收精细结构(EXAFS), 前者实际上包括前吸收边和近吸收边(XANES)。前吸收边位于主吸收边2~10 eV处, 是由核能级到空的或部分填满的原

子能级间产生定域电子跃迁所致, 这种跃迁的概率低, 所以通常吸收较弱。同时, 像在光学吸收光谱中一样, 跃迁概率由偶极电子跃迁的选律决定, 其能量和强度可以提供吸收体的氧化态与几何位置、吸收体与配位体成键的信息。近吸收边(XANES)^[19]包括从前吸收边以上几eV到近吸收边上约50 eV的区域, 是吸收体周围的原子对动能较低的光电子产生强的多散射所致, 其特点是跃迁概率高, 吸收强度大, 它对中心吸收体第一或更远配位壳层的几何排列灵敏, 可以得到其位置几何与键角, 甚至键长的信息。同时, 结合同步光的线性偏振研究NEXAFS与光入射角度的关系可以探测纳米线/管的取向^[24]。当配位体与吸收体的原子间距增大时, XANES的能量减小; 当元素的氧化态增加时, 像前吸收边一样, XANES的也向高能平移, 这是由于氧化态增加, 原子间距减小和吸收原子的电子结构变化。所以XANES可以提供吸收原子的电子结构信息, 但是, 对这种非弹性多散射过程的理论处理和获得有关电子结构的信息, 还不十分完美。目前对这种散射, 已提出的计算模型有统一处理XANES和EXAFS的球面波近似计算, 多散射共振计算和全多散射计算, 这些计算多建立在 $X\alpha$ 散射波分子轨道模型的基础上。在X射线吸收光谱中, 从吸收边以上50 eV直至约1 000 eV的区域称为扩展的X射线吸收精细结构(EXAFS)^[19]。从EXAFS分析中获得主要参数是吸收体与各配位壳层原子的间距、配位数和Debye-Waller因子 δ 。主要强调的是这里得到的原子间距是局域的径向的距离, 而不是通常X射线结构分析中所得的平均间距。配位数也是有效的配位数。Debye-

收稿日期: 2004-12-17, 修订日期: 2005-06-03

基金项目: 教育部博士点基金(20040532014)资助项目

作者简介: 林良武, 1971年生, 湖南大学材料科学与工程学院博士研究生 * 通讯联系人

Waller 因子量度吸收体的短程无序。同时,在傅里叶变换的 EXAFS 中,峰的宽度也反映局部无序的信息,较宽的峰反映径向距离变化大,具有较高的静振动无序,此外,根据 EXAFS 还可以获得样品的局部结构,邻近原子的种类、配位多面的联结方式的信息。X 射线吸收谱的测得,通常是采用 TEY 和 FLY 的记录而获得的。TEY 对纳米线/管的表面敏感而 FLY 对纳米线/管的表面和体内敏感,因而结合两者的结果可以用来研究纳米线和纳米管的生长机理、化学键合、取向、缺陷、电子结构和光电性能等。

1 X 射线吸收谱研究纳米线/管的生长机理

1.1 碳纳米线/管的生长机理

自 1991 年 Iijima^[25]发现碳纳米管以来,人们对纳米管的生长机理进行了大量的研究。虽然提出各种生长模型,如卷曲模型^[26]和 lip-lip 键合模型^[27]等,但碳纳米管的生长机理仍然不清楚。最近, Tang 等^[28]报道了非晶态碳纳米线的大规模合成,提出了 CO 的辅助生长模型。同时, Tang 等^[16]通过总电子产额(TEY)和荧光产额(FLY)记录的碳 K 边近边 X 射线吸收精细结构谱,对比研究了热蒸发法合成的碳纳米线(CNW)和多壁碳纳米管(MWNT)的结构和键合,并对比了高取向石墨(HOPG)的 TEY 谱,结果证明了非晶态碳纳米线是多壁碳纳米管生长的前躯体,在退火条件下最终形成多壁碳纳米管。采用 X 射线吸收精细结构谱研究碳纳米管虽有所报道^[29],但不是高分辨的结果,而是低分辨。Tang 等^[16, 18]研究的是高分辨的结果,如图 1 所示。图中约 285 和 286 eV 的特征峰是碳的 1s 向 π^* 跃迁所产生的。类似的特征峰在 FLY 中,虽有些模糊但也可以观察到。这些特征直接证明出现了未饱和 C—C 键之间的反应(sp^2 键合)^[24],电子非定域碳^[30]。多壁碳纳米管中的 π^* 的跃迁比碳纳米线中的 π^* 的跃迁要明显得多。从图中可以看到,在 287~290 eV 范围内,碳纳米线的 TEY 显示出了强烈的特征峰而 FLY 中却不存。类似的特征在多壁碳纳米管的 TEY 中约 289.5 eV 处出现,但在 FLY 中也没有出现。在非晶态碳中存在 C—H

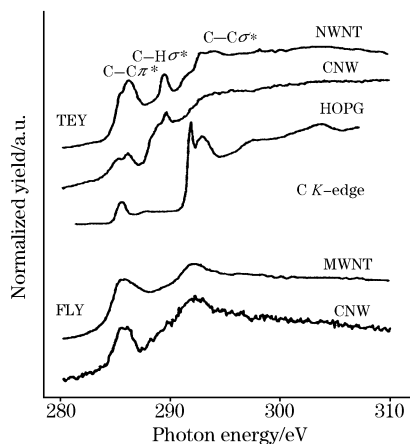


Fig. 1 TEY and FLY of CNW, MWNT and HOPG at the C K-edge

键的 σ^* 共振特性^[24, 30]并且这些特性在碳纳米线和多壁碳纳米管中都是由于 C—H 的键合引起的。碳纳米线的低能侧翼包含一些 sp^3 边际收益而在多壁碳纳米管中却完全消失了。除了 TEY 中的 C—H 的 σ^* 共振峰来自于残留物外,由碳纳米线转化而来的多壁碳纳米管的 NEXAFS 结果与以前观察的多壁碳纳米管结果相吻合^[29, 31]。强烈地证明碳纳米线内包含局部结构单元(类石墨碳)。这些单元在退火的基础上最终导致多壁碳纳米管的形成。

1.2 硅纳米线的生长研究

1.2.1 本征硅纳米线生长研究

对硅纳米线的表征在传统上主要采用 XRD, Raman, EDX 和 HRTEM, 这些方法显示硅纳米线一般具有两个特征:一是它们都含有量子限制的纳米尺寸数量级的天然硅结构;二是它们经常包裹着二氧化硅外壳层。同样,采用 X 射线吸收谱可以很好地鉴定硅纳米线具有以上两种普遍特征。Zhang 等^[19]对比研究了 TEY 记录的硅纳米线、HF 刻蚀的硅纳米线、Si(100)、在空气中被氧化的多孔硅和 SiO₂(石英)在 Si 的 K 边 X 射线吸收近边光谱。结果发现:硅纳米线的 NEXAFS 谱中展现的 Si 和 SiO₂ 共振峰类似于暴露于环境中的 Si(100)所展现的 Si 和 SiO₂ 共振峰,只不过其 SiO₂ 的峰强因更大的表面积和更大的表面硅原子(氧化物中)与体内硅原子(纳米线中)之比而大幅度地增加,如图 2 所示。在 1 844 和 1 860 eV 处,分别测量了与 Si 和 SiO₂ 相关的跃迁边,检测结果表明测量的 SiO₂ 与 Si 的比值约为 2/5,比 HRTEM 所预计的比值 1/4~1/3 要大。此明显的差别是意料中的事情,因为与被氧化物层包裹的 Si 相比,TEY 对表面氧化物的灵敏度更高。经 HF 刻蚀后,硅纳米线谱中的氧化物峰消失。这些说明二氧化硅是包裹在外层。Zhang 等进一步对比了 HF 刻蚀前后的硅纳米线、Si(100)的 FLY 和硅纳米线的 TEY,如图 3 图所示。图中可见,与硅纳米线的 TEY 相比,刻蚀前硅纳米线 FLY 中的 SiO₂ 特征峰强度较弱,而刻蚀后硅纳米线的 FLY 与纯 Si(100)片的 FLY 完全相同,这是因

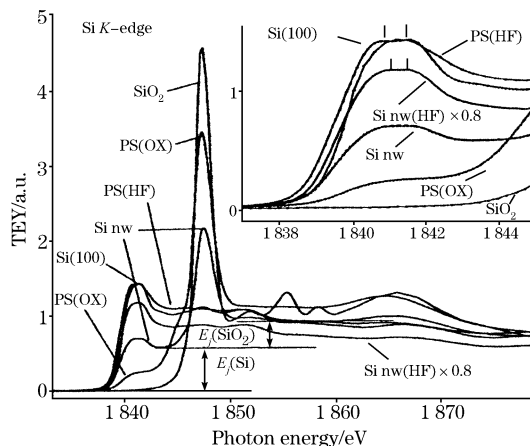


Fig. 2 TEY Si K-edge XANES for Si nw (ambient HF etched), Si(100), porous silicon (ambient and HF etched), and SiO₂ (quartz) normalized to unity edge jump. The edge region was expanded in the inset

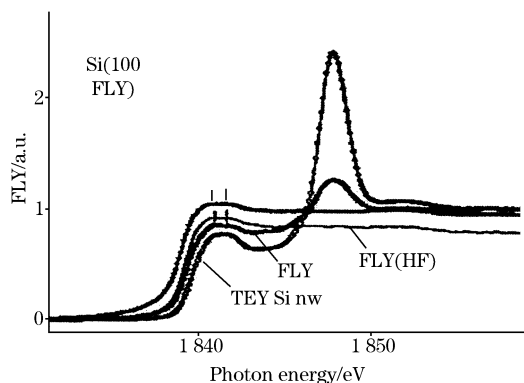


Fig. 3 Comparison for the FLY of Si(100), Si nw and Si nw (HF) and the TEY of Si nw

为 FLY 对表面和体内都敏感。同时可以看到相对于 Si(100)，刻蚀前后的硅纳米线 FLY 的跃迁边有明显的蓝移，这些说明纳米晶体硅位于硅纳米线的核中，蓝移是一种量子行为，是纳米材料的特征。Sun 等^[32]采用类似的方法证明了硅纳米线是有纳米尺寸的晶体硅和氧化物外层组成的纳米材料。这些结果与 HRTEM 等证明结果吻合的非常好，更好地体现出了 HRTEM 等不能体现的纳米体系的量子效应特征，这就是 XAFS 的优越之所在。

1.2.2 硅纳米线掺杂分布研究

通过 NEXAFS 探测深度的研究，可以确认元素磷的位置究竟是存在于线的表面还是存在于核中，及其化学键合状态。这是因为总电子产额 TEY 收集的是电子信号，是从样品表面发出的，对样品的表面敏感，而荧光产额 FLY 收集的是光子信号，是从样品内部发出的，对样品的体内敏感。Tang 等^[17]对激光烧蚀法制备的磷掺杂硅纳米线 (P-SiNW) 进行了 NEXAFS 测量。研究中测量了 Si 和 P 的 K 边不同的吸收常数，包括从 $1s$ 轨道到 $3p$ 轨道以及更高的 p 特征能态 (探测导带中未占据态密度) 的偶极跃迁，因此 Si 和 P 的 K 边 NEXAFS 可以提供本质的、化学的和取样深度灵敏度等信息。Tang 等对比了本征样品和经不同浓度 HF 刻蚀 5 min 后的 Si 和 P 的 K 边 NEXAFS 谱，如图 4 所示。随着刻蚀浓度的增加，在图 4(a)，(b) 所示的 TEY 和 FLY 谱中，1847 eV 处的二氧化硅峰强度显著减小，而在 1840 eV 处硅峰逐渐变为主要的特征峰。经过足够的刻蚀后，Si-O 特征峰几乎完全被 Si 的特征峰所取代。在高 K 空间，P-SiNW 在硅 K 边的 XAFS 光谱显示的 White line 双重线变得模糊不清^[17]。这意味着长程有序的降低且与纯 Si(100) 片相比，除了在更高能量振动稍微有些不匹配 (压缩) 之外，其振动方式基本相同。这些结果证明除了平均原子间距稍微变长之外，晶状硅位于 P-SiNW 核中。原子间距的变长与更大的替代物 P 的出现相吻合，同时证明 P-SiNW 的核中存在 P。进一步对比 HF 处理过的样品在硅 K 边的 TEY 谱 (a) 和在磷 K 边的 FLY 谱 (d) 发现，如果除去 2153 eV 峰 (以 2144 eV 处红磷特征峰为参照线)，两光谱的共振基本类似，这可以定性证明：P-SiNW 中的 P 取代大部分的四面体位，与在硅 K 边观察到的局部结构微小膨胀相吻合。2153 eV 峰的能量与氧化磷的能

量基本相同，是由 P-SiNW 中位于氧化物与硅纳米线核界面处的 P_2O_5 - SiO_2 相产生的，这说明在氧化层中也存在 P。

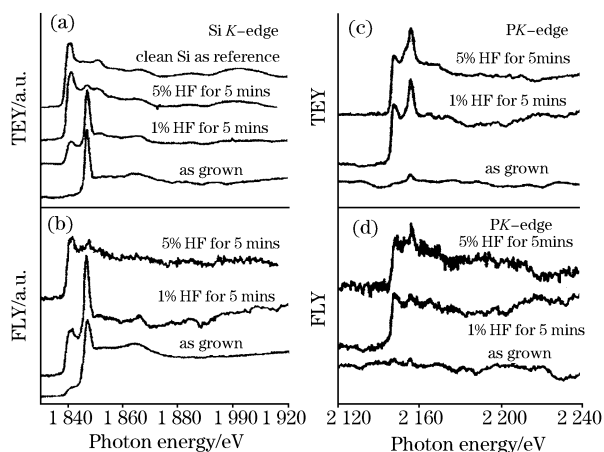


Fig. 4 TEY and FLY spectra of K-edge NEXAFS after sequential HF etching: (a), TEY of Si K-edge; (b), FLY of Si K-edge; (c), TEY of P K-edge; (d), FLY of P K-edge

2 X 射线吸收谱研究纳米线/管取向

利用同步光的线性偏振，研究 NEXAFS 谱与入射角度 (入射光与样品表面的夹角) 的关系可以鉴别纳米线/管的取向^[24]。若 NEXAFS 不依赖于角度，则表明是多晶体，没有择优取向。相反是单晶体，具有择优取向。Tang 等^[16]在研究多壁碳纳米管的生长机理时，采用此方法证明碳纳米线内前躯体的局部取向，如其 π^* 轨道是局部排列取向的并正交于 C-H 的 σ^* 。由于同步光是水平线性偏振光，所以 π^* 的跃迁强度与 π^* 轨道相对于极化矢量的方向有着非常密切的关系。因此，如果纳米线样品中 π^* 轨道相对于入射光子束是局部排列取向的，那么样品相对于入射光子的旋转将显示可测量的角度依赖关系。C-C 或 C-H 的 σ^* 轨道正交于 π^* 轨道，则显示相反的趋势。在 TEY 和 FLY 中碳纳米线的 NEXAFS 谱的角度关系中发现，如图 5 所示：随着角度从垂直入射到切向入射的变化， π^* 共振峰强度逐渐减小而 C-H

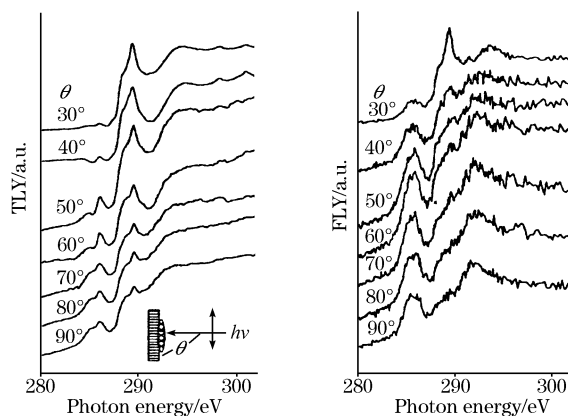


Fig. 5 Angular dependence of the C K-edge NEXAFS of a CNW

σ^* 的变化趋势与之相反。掠射角处观察到 C—H σ^* 的强度证明在类石墨基片中出现 C—H。在 FLY 中 30° 角时出现的 C—H 特征也可能是由于在掠射角处表面灵敏度的增加而引起的。这种影响应该是不怎么明显的, 因为最多存在局部排列取向的样品。因此, 在碳纳米线中的多壁碳纳米管积木式结构单元可能具有位于苯基和类石墨基片 (sp^2 键合) 之间某处的一种结构。

3 X 射线吸收谱研究纳米线/管的缺陷和螺旋性

纳米线/管中的缺陷、螺旋性等可以通过 X 射线吸收谱中的峰的变化反映出来。Tang 等^[18] 采用 TEY 和 FLY 记录的碳 K 边的 NEXAFS 谱研究了碳纳米管的螺旋度和缺陷。通过对高取向石墨 TEY 记录的碳 K 边 NEXAFS 谱的角度关系与体内纳米管 TEY 和 FLY 记录的 NEXAFS 谱的角度

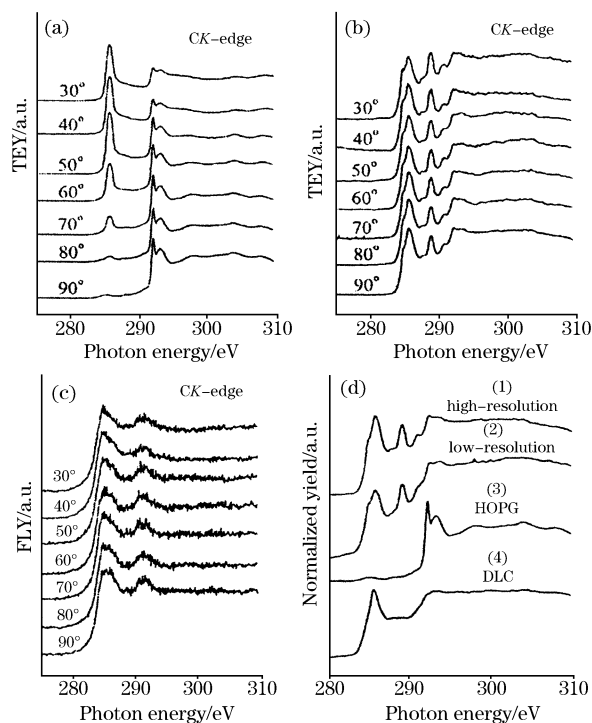


Fig. 6 (a), TEY C K-edge NEXAFS of HOPG; (b), TEY C K-edge NEXAFS of carbon nanotube; (c), corresponding FLY C K-edge NEXAFS of carbon nanotubes; (d), A comparison of C K-edge NEXAFS spectra of different materials; 1, High-resolution (30×20 m slit 0.12 eV) spectrum of nanotube; 2, Low-resolution spectrum (100×100 μm slit, 0.25 eV); 3, HOPG; 4, DLC

关系对比, 以及类金刚石、高取向石墨的碳 K 边 NEXAFS 谱与碳纳米管的高低分辨碳 K 边 NEXAFS 谱的对比发现碳纳米管中出现的 284.5 和 290.5 eV 两个新的特征峰, 并证明是由碳纳米管层的螺旋和局部的缺陷产生的, 如图 6 所示。图 6(b) 中出现的 285.5 , 288.5 和 291.5 eV 三个峰分别对应于 C 的 $1s$ 到 C— $C\pi^*$, C—H σ^* , C—C σ^* 的特征峰, 其中 C—H σ^* 峰只出现在碳纳米管的 TEY 谱中, 而在 FLY 和高取向石墨中没有出现, 如图 6(a), (c) 所示。这意味着 C—H 和碳纳米管的表面有关。以前, 在非晶态碳样品中也观察到类似的 C—H σ^* 特征峰^[30]。在图 6(d) 的碳纳米管高分辨光谱中出现的 290.5 eV 峰是由缺陷所产生的, 类似的, Atamny 等^[33] 在 HOPG 中也观察到与缺陷有关的峰, 这些缺陷在 HRTEM 中可以清晰的观察到^[18]。由于在纳米管的形成过程中需要石墨基片的旋转和卷曲, 因而 π^* 轨道将受到螺旋性较大的影响, 这将导致能级的分裂。这种影响只有在纳米管中才产生, 在石墨和 C_{70} 中都没有观察到^[34], 实际上在纳米线中也观察不到。这一点从图 1 中碳纳米线和多壁碳纳米管的 TEY 中可以看出, 在多壁碳纳米管的 TEY 图中 290.5 eV 处也隐约可以看到有微小的耸肩峰出现, 而在碳纳米线的 TEY 图中却看不到, 而且此现象与 HRTEM 观察到结果相吻合^[16]。

4 结束语

X 射线吸收谱在微米级及以上领域已经得到了很好的发展^[35]。随着纳米线管材料的进一步深入研究, X 射线吸收谱逐步成为纳米材料领域的重要表征工具。X 射线吸收谱在纳米材料的生长、机理、缺陷、旋度、取向等方面的研究具有传统方法无法比拟的优势。同时, 由于 TEY 和 FLY 具有不同的取样探测深度, 分别对样品的表面和体内敏感, 这为纳米材料的整体鉴定提供了强有力的工具, 是 TEM, XRD 等传统方法分析纳米材料的补充, 为纳米材料是否整体为纳米材料提供了有力的依据。实际上, X 射线吸收谱除了用于上述各方面的研究外, 人们已经在纳米薄膜, 如 Tang 等^[36] 提出的采用 X 射线吸收谱整体鉴别纳米薄膜是否为纳米薄膜、纳米多层超晶格的结构和电子性能^[37] 以及纳米结构复合材料的设计^[38] 等方面采用 X 射线吸收谱进行了初步的研究。总之, X 射线吸收谱因其独特的性能和所蕴含的丰富信息, 将成为纳米材料领域最重要的表征工具之一。

另外, 虽在张红瑞等^[39] 曾用拉曼光谱法研究过的硼碳氮等多元纳米管体系中, X 射线吸收谱的研究相对较少, 但 X 射线吸收谱也可以推广到此类体系的研究之中, 是值得进一步推广的重要领域。近年来对纳米材料的研究是热点课题。因此, 本文的论述是很有意义的。

参 考 文 献

- [1] Morales A M, Lieber C M. *Science*, 1998, 279: 208.
- [2] Zhang Y F, Tang Y H, Wang N, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72: 1835.
- [3] Tang Y H, Zhang Y F, Lee C S, et al. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1998, 526: 73.
- [4] Lee S T, Wang N, Zhang Y F, et al. *MRS Bull.*, 1999, 24: 36.
- [5] Tang Y H, Zhang Y F, Peng H Y, et al. *Chem. Phys. Lett.*, 1999, 314: 16.
- [6] Tang Y H, Zhang Y F, Wang N, et al. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 2001, 19: 317.
- [7] Holmes J D, Johnston K P, Doty R C, et al. *Science*, 2000, 287: 1471.
- [8] Tang Y H, Zheng Y F, Lee C S, et al. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, 328: 346.
- [9] Li B, Yu D, Zhang S L. *Phys. Rev. B*, 1999, 59: 1645.
- [10] WANG Yu-fang, CAO Xue-wei, LAN Guo-xiang(王玉芳, 曹学伟, 蓝国祥). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2000, 20(2): 180.
- [11] Wang N, Tang Y H, Zhang Y F, et al. *Chem. Phys. Lett.*, 1998, 283: 368.
- [12] Gole J L, Stout J D, Rauch W L, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76: 2346.
- [13] Zhang Y F, Tang Y H, Zhang Y, et al. *Chemical Physics Letters*, 2000, 330: 48.
- [14] Tang Y H, Zheng Y F, Lee C S, et al. *Chemical Physics Letters*, 2001, 342: 259.
- [15] Sun X H, Tang Y H, Zhang P, et al. *J. Appl. Phys.*, 2001, 90: 6379.
- [16] Tang Y H, Zhang P, Kim P S, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79: 3773.
- [17] Tang Y H, Sham T K, Jurgensen A, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80: 3709.
- [18] Tang Y H, Sham T K, Hu Y F, et al. *Chemical Physics Letters*, 2002, 366: 636.
- [19] Zhang Y F, Liao L S, Chan W H, et al. *Phys. Rev. B*, 2000, 61: 8298.
- [20] Chung S W, Yu J Y, Heath J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76: 2068.
- [21] Zhang Y F, Tang Y H, Peng H Y, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75: 1842.
- [22] Bagraev N T, Chaikina E I, Gehlhoff W, et al. *Solid-State Electron*, 1998, 42: 1199.
- [23] Au F C K, Wong K W, Tang Y H, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75: 1700.
- [24] Støhr J. *NEXAFS Spectroscopy*. New York: Springer, 1996.
- [25] Iijima S. *Nature*, 1991, 354: 56.
- [26] Amelinekx S, Bernaerts D, Zhang X B, et al. *Science*, 1995, 267: 1334.
- [27] Charlier J C, Alessandro D V, Blasé X, et al. *Science*, 1997, 275: 646.
- [28] Tang Y H, Wang N, Zhang Y F, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75: 292.
- [29] Kuzuo R, Terauchi M, Tanaka M, et al. *J. Appl. Phys.*, Part 2, 1994, 33: L1316.
- [30] Wesner D, Krummacher S, Carr R, et al. *Phys. Rev. B*, 1983, 28: 2152.
- [31] Imamura M, Shimada H, Matsubayashi N, et al. *J. Appl. Phys.*, Part 2, 1994, 33: L1016.
- [32] Sun X H, Sammynaiken R, Naftel S J, et al. *Chem. Mater.*, 2002, 14: 2519.
- [33] Atamny F, Blöcker J, Henschke B, et al. *J. Phys. Chem.*, 1992, 96: 4522.
- [34] Ramm M, Ata M, Gross T, et al. *Appl. Phys. A*, 2000, 70: 387.
- [35] PENG Ming-sheng, LI Di-en(彭明生, 李迪恩). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2000, 20(3): 402.
- [36] Tang Y H, Zhou X T, Hu Y F, et al. *Chemical Physics Letter.*, 2003, 372: 320.
- [37] Sammynaiken R, Naftel S J, Sham T K, et al. *J. Appl. Phys.*, 2002, 92(6): 3000.
- [38] Erenburg S B, Bausk N V, Mazalov L N, et al. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 652: 395.
- [39] ZHANG Hong-rui, DING Pei, GUO Xin-yong, et al(张红瑞, 丁佩, 郭新勇, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2004, 24(5): 569.

X-Ray Absorption Spectroscopy Study on Nanowires and Nanotubes of Carbon and Silicon

LIN Liang-wu, TANG Yuan-hong*, ZHANG Wei

College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract Due to the different sampling depth, the total electron yield (TEY) is sensitive to the surface and near surface region, while the fluorescence yield (FLY) probes the information of the bulk. Thus the combined use of TEY and FLY provides a powerful evidence for identifying the whole sample whether or not it is a nanoscale material, and is a supplement of the conventional methods for characterizing nanoscale materials, such as TEM and XRD. With analyses of X-ray absorption spectra recorded in TEY and FLY mode, it could be used for studying the mechanism of growth, orientation, chemical bonding, defect and helicity of nanowires and nanotubes exactly and reliably. Therefore, it is believed that X-ray absorption spectroscopy is a powerful characterization tool for the study of nanoscale materials, which has some super advantages over conventional methods.

Keywords X-ray absorption spectroscopy; Silicon nanowires; Carbon nanotubes; Blue shift

(Received Dec. 17, 2004; accepted Jun. 3, 2005)

* Corresponding author

(上接第 570 页)

为有效利用会议期间的的时间,提高学术交流的效果,本次会议仍采用“口头报告”和“墙报展示”两种方法进行学术交流。需要指出的无论是口头报告还是墙报展示均属大会同等学术交流,无水平高低之分。组委会还将继续设立“优秀墙报奖”,以表彰那些研究水平高、能突出展示研究内容要点、版面编排好的墙报。为尊重个人意见和便于组委会的安排,请投稿人注明选择自己的稿件为“口头报告”或“墙报”的字样。在安排“口头报告”和“墙报”时,将充分考虑作者的意见。

论文截稿日期:2006年1月31日,若以信件方式投稿,日期以邮戳为凭,信封上请注明“第十四届全国分子光谱学学术会议征文”字样。

会前课程

“二维相关振动光谱、基本原理、方法,应用示例,软件演示,图谱解析”

重要时间

论文截稿日期:2006年1月31日

第二轮会议通知:2006年4月中旬

第三轮会议通知:2006年6月初

会议召开期:2006年7月8~11日

想了解会议筹备情况进展和会议具体安排,请经常浏览我们的主页

联系方式

第十四届全国分子光谱学学术会议组委会

吉林省长春市前卫路10号

吉林大学超分子结构与材料教育部重点实验室

邮编:130012

联系人:赵冰教授

电话:0431-5168473,或0431-5168504

传真:0431-5193421

电子邮件:zhaobing@mail.jlu.edu.cn 或 bzhao1964@yahoo.com.cn

网址: <http://supramol.jlu.edu.cn>

若您决定参加会议,请填写回执寄回,或以电子邮件传到组委会电子邮箱,以便我们为您提供更多的有关会议的信息。

中国化学学会物理化学委员会

中国光学学会光谱委员会

吉林大学超分子结构与材料教育部重点实验室

2005年9月