LB 技术在一维纳米结构组装中的应用

林 松，邓 兆，戴 英

（武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070）

摘要：一维纳米材料由于其特有的尺度和维度具有多种优异性能，在许多重要领域，如纳米电子学、纳米光电子学、超高密度存储器等方面有着广阔的应用前景，因而，如何能有效地操纵和组装一维纳米材料，已成为纳米材料应用领域的关键问题之一。LB 技术以其高致密性、厚度可控、结构可控等特点在纳米组装中被广泛采用，尤其是近来用于一维纳米结构的组装。本文对目前一维纳米结构的组装方法进行了简要概括，综述了 LB 技术在一维纳米结构组装中的应用，并对其今后的研究进行了展望。

关键词：材料科学基础学科；一维纳米结构；LB 技术；组装

中文分类号：O647 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-2850(2008)11-1548-7

Application of Langmuir-Blodgett technique in assembly of one-dimensional nanostructure

LIN Song, DENG Zhao, DAI Ying

(*School of Materials Science & Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Because of their excellent characteristics depending on particular sizes and shapes, one-dimensional nanostructures have promising applications in many important fields such as nanoelectronics, nanooptoelectronics and ultrahigh density storage units. How to manipulate and assemble one-dimensional nanostructures efficiently is one of the crucial issues in nanotechnology. Langmuir-Blodgett (LB) technique has been widely used in nanostructure assembly because of its characteristics of high compactness and controllable thickness and structure, especially in recent one-dimensional (1D) nanostructure assembly. This paper briefly introduces the present 1D nanostructure assembling methods and summarizes the application of LB technique in assembling 1D nanostructure. The future research direction is also pointed out in this paper.

Key words: basic subject of materials science; one-dimensional nanostructure; Langmuir-Blodgett technique; assembly

0 引言

自 1990 年第一届国际纳米科学技术会议正式将纳米材料科学作为材料科学的一个新的分支后，全世界掀起了纳米材料和纳米技术的研究热潮。1991 年日本的 LIJIMA 等[1]首次用高分辨电镜发现碳纳米管，更使人们的目光聚焦到一维纳米材料的研究上来。一维纳米材料包括纳米线、纳米棒、纳米管、纳米带、同轴纳米电缆等[2]，因具有量子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应、宏观量子隧道效应、库仑阻塞、介电限域效应等，使其光、热、电、磁、力、化学性质发生显著变化[3]。因此，一维纳米材料在介观领域和纳米器件研究方面有着广阔的应用前景。

近年来，关于一维纳米材料的制备已有大量报道，但由于其杂乱无序的分布状态导致其应用受限。纳米器件的构筑更要求对一维纳米材料进行有序组装，使其形成可控阵列结构，并实现对其性能的设

基金项目：国家自然科学基金（50672072）

作者简介：林松（1982—），男，硕士研究生，主要研究方向：一维纳米材料

通信联系人：戴英，教授，主要研究方向：纳米材料. E-mail：daiying@whut.edu.cn

计调控，这也是纳米超微型器件的设计基础。因此，如果不能实现对其有效的控制组装，就不能实现其优异性能的有效应用。到目前为止，已有很多对一维纳米结构组装的方法[4]，如宏观力场组装、模板组装、自组装和LB组装等，本文主要对目前国内外利用LB技术在一维纳米结构组装中的应用进行综述。

1 一维纳米结构的组装方法

1.1 宏观力场组装

宏观力场组装主要通过对宏观电场、磁场等的强弱和方向的调控，实现对一维纳米组装体系的控制。CUI等[5~6]将已合成掺杂的n型、p型InP半导体纳米线在电场作用下进行控制组装，在加有50～100 V电压的两个电极之间的衬底上滴加已均匀分散的InP纳米线溶液，溶液中的纳米线在电场作用下自组装排列形成平行的纳米线阵列。TANASE等[7]利用磁场对表面修饰了荧光生物分子的磁性Ni纳米线进行了组装，以多孔Al_2O_3为模板，采用电化学沉积的方法制备Ni纳米线，再在其表面上修饰上一层荧光卟啉分子，施加磁场，在高粘度的16烷/18烷混合溶剂中，这种纳米线自动排列成平行阵列，而在流动性溶剂中，这些纳米线首尾相联形成链状结构。

宏观力场组装的方法比较简便，容易通过调节电场、磁场的强弱和方向等实现对一维纳米体系的控制。但其局限性在于只能对在电场中极化或具有磁性的物质适用，且只能在平行于电场、磁场的方向上实现纳米线的分离。

1.2 模板组装

MESSER等[8]将微流体与模板技术结合，采用流体辅助模板技术成功地将一维纳米材料组装成平行阵列。他们将刻制有孔道形状的高分子模板聚二甲基硅氧烷（PDMS）倒扣在装有电极的基底上形成纳米坑道，分散的Mo_3Se_3纳米线溶液在此隧道中由于毛细管作用而限制流过，通过蒸发溶剂利用模板的空间限制效应实现分子线的聚集和排列组装，除去高分子模板获得平行排布的纳米线阵列。HUANG等[9]进一步通过设计高分子模板孔道的方向获得GaP，InP及Si一维纳米线的交叉网络，并系统研究了流速对纳米线排列程度的影响和沉积时间对纳米线密度的影响。另外，NOBLE等[10]利用水核将聚合物纳米棒组装成胶束壳状有序结构。

模板组装的优点在于此方法与纳米线的性质无关，并可在各种基板上实现不同尺度的组装，具有普适性；通过控制流速和沉积时间等方便实现对纳米线排列方向、聚集密度的控制，在原有的功能网络上通过分层多级组装可实现复杂功能结构的制备，但其制备工艺线程较长，所耗时间长，且纯化步骤复杂。

1.3 自组装

纳米结构的自组装体系是指通过弱的和较小方向性的非共价键，如氢键、范德华键和/或弱的离子键协同作用，组装纳米体系的过程，可从分子水平上控制粒子的形状、尺寸、取向和结构，其物理本质是永久偶极矩、瞬时偶极矩、诱导偶极矩三者之间的相互作用[11]。自组装体系的形成有两个重要条件[12]：由足够数量的非共价键的存在而产生足够的自组装的推动力和导向作用。20世纪90年代，SAGIV[13]首次将自组装技术应用于胶体与表面化学，他将羟基化的Si片浸入十八烷基三氯硅烷（OTS）的稀溶液中，首先OTS分子吸附在基底表面，然后发生水解作用，Si—C键被Si—O—Si网状结构代替形成单层超薄有序的自组装膜，自此纳米自组装体系得到了广泛的研究[14]。利用表面活性剂包埋纳米粒子浇铸到基底上，纳米粒子在溶剂挥发过程中将自发排列成二维或三维有序结构[15]。DONG等[16]以花生酸单分子膜为模板采用自组装分子模板法组装CuS纳米棒阵列。RAO等[17]先在基底的不同区域分别沉积上极性分子团（如氨基或羧基）和非极性分子团（如甲基），然后将该基底置于碳纳米管的悬浮液中，纳米管就会吸附在有极性分子团的区域，并且按照预定的图案进行自组装，这个过程通常只需要10 s左右。在这种方法中，纳米管的排列不需要借助于外力如磁场或液体的流动，它可以很快地将纳米管按照所需的结构进行排列，并且也可以在较大的面积范围内实现。但由于一维

纳米结构具有较大质量和体积，自组装体系的弱作用不容易甚至很难克服体系的无序，因此对一维纳米结构的有序组装一般要利用宏观条件的调控来实现。

1.4 LB 组装

Langmuir-Blodgett（LB）膜是一种分子有序排列的有机超薄膜，LB 膜技术是一种可以在分子水平上精确控制薄膜厚度和分子结构的制膜技术[18]。这种技术是 20 世纪二 三十 年代由美国科学家 LANGMUIR 及其学生 BLODGETT 建立的一种单分子膜制备沉积技术，即通过压缩分散在气－液界面上的两亲性物质使其形成紧密有序的单分子膜，并将其沉积到基片上。LB 膜是目前人们所能制备的最缀密、缺陷最少的超分子薄膜，能在分子水平上保持分子的有序排列，厚度可控，能在 1～100 nm 之间形成均一的超薄膜，且制备要求条件低，容易实现大尺寸范围的规模化组装。

LB 膜技术作为一种有效的分子组装技术[19]在构筑纳米结构材料领域中得到了广泛应用。这种组装方法起初一直用于零维材料的组装领域，但随着近年来人们对一维纳米结构的制备与组装的研究越来越热，这一技术也逐渐拓展到一维纳米组装的领域中来。利用 LB 膜技术对一维纳米结构的组装方法主要是将包裹有表面活性剂[20]的纳米粒子溶解于一疏水有机溶剂（如氯仿）中，然后慢慢滴入到亚相（通常是去离子水）表面使其铺展开来，纳米线等像漂浮在水上的圆木一样浮于亚相表面[21]。通过压缩气－液界面，随着表面压的增加，在毛细力及粒子间的相互作用驱动下，纳米线的排列逐渐趋于有序，最终排列形成紧密有序的结构[22]，并可通过沉积到基片上而组装成一维、二维及三维有序的多层超晶格结构（如图 1 所示）。

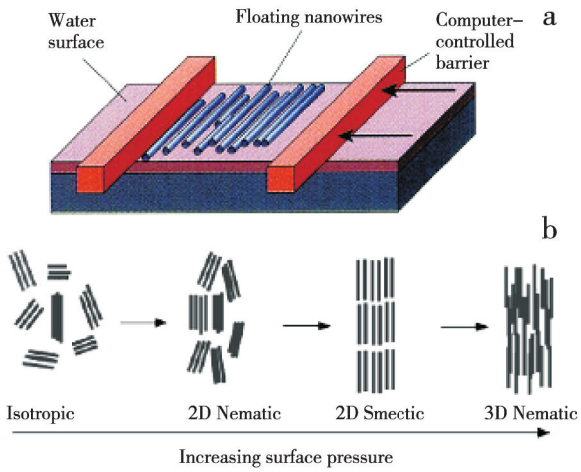

图 1 a—漂浮于液相表面的纳米线[21]；
b—通过压缩气－液界面组装一维纳米结构[22]
Fig. 1 a-Floating nanowires on a water surface[21]；
b-Pressure-induced assembly of nanostructures
at the water-air interface[22]

2 LB 技术在一维纳米结构组装中的应用

由于 LB 膜的高致密性、厚度可控、结构可控，制备要求条件低，且具有易于交替、多层沉积的特点，LB 技术提供了一种非常有用的有序排列及沉积方法，使其在纳米结构组装中占有独特的地位。

CHUNG 等[23]将 12 -烷基硫醇包裹 Ag 纳米粒子，再用辛烷基硫醇取代配体，并溶解分散于己烷或庚烷中，然后将其铺展到水面上，通过 LB 沉积使得纳米粒子组装成一维线型阵列。HUANG 等[25]采用同样方法利用垂直提拉将 PVP 包裹的 Ag，Au 纳米粒子组装沉积，获得间距相等、宽度均一的平行条纹型阵列。

2001 年，KIM 等[26]利用 LB 技术成功组装 $BaCrO_4$ 纳米棒的二维有序阵列。他们以 AOT 为表面活性剂包埋稳定的单分散 $BaCrO_4$ 纳米棒，将其溶解分散到异辛烷中制得稳定纳米棒胶体溶液，以纯水为亚相铺展压膜，并以恒定表面压沉积得到致密二维有序阵列（如图 2 所示）。随后又通过同样方法对 $BaWO_4$[27]，Au，CdSe 纳米棒进行了组装[21]。之后，该小组以十六烷基硫醇为表面活性剂对 PVP 包裹 Ag 纳米线改性，以氯仿为溶剂铺展压膜，在 Si 基片上沉积得到有序 Ag 纳米线阵列（如图 2 所示），并对其进行表面增强拉曼光谱学（SERS）研究[28]。AROCA 等[29]在此方法基础上组装层/层交替（Layer-byVLayer，LBL）Ag 纳米线 LB 膜作基底进行表面增强拉曼散射研究[30～31]。

WHANG 等[32～35]以十八胺为表面活性剂制成的无极性溶液将纳米线溶解分散其中，通过 LB 沉积

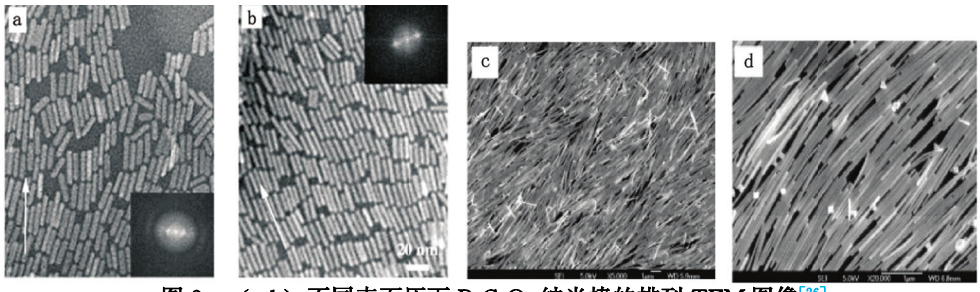

图 2 （a b）不同表面压下 $BaCrO_4$ 纳米棒的排列 TEM 图像[26]
（c d）Ag 纳米线沉积在 Si 基底上的不同放大倍数 SEM 图像[28]

Fig. 2 （a b）TEM images of the $BaCrO_4$ nanorod assembled at different stages of compression[26]
（c d）SEM images (at different magnifications) of the silver nanowire monolayer deposited on a silicon wafer [28]

得到大尺度范围（>20 cm^2）的多层交叉交替纳米线阵列。并基于 LB 技术采用包覆层改善纳米线间的相互作用的影响，实现了纳米线组装的间距可控。他们首先制备 SiO_2 包覆的 Si-SiO_2 纳米线[36~37]，选取异辛烷-2-丙醇为表面活性剂并溶解分散于氯仿中，铺展沉积得到有序纳米线阵列。然后用 NH_4F 溶液腐蚀掉 SiO_2 包覆层得到一定间距的 Si 纳米线阵列，且线间距可以通过控制包覆层的厚度和压缩过程来控制（如图 3 所示）。这种方法的好处在于可以控制纳米线的间距，而且可以在较大范围内形成这种定向的排列，同时也可以形成较大面积的交叉纳米线阵列。WANG 等[38]将长链硫醇改性的 Ge 纳米线溶解分散于氯苯或氯仿中，通过以 5%的乙醇水溶液为亚相来改善 Ge 纳米线间的疏水作用，以得到稳定有序的纳米线阵列。EFRIMA 等[39~42]在此基础上对 ZnS 纳米棒和 ZnSe 纳米线进行组装，实现了等间距纳米线的端并端的排列，并通过 LBL 交叉沉积得到复杂 3D 结构。

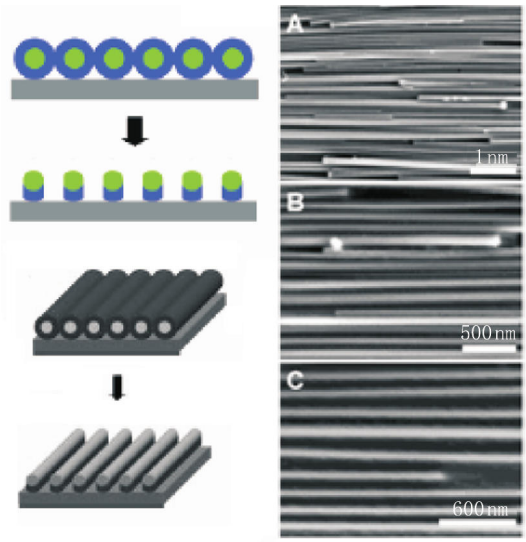

图 3 LB 组装纳米线阵列的线间距控制[32,35]
Fig. 3 Controlled spacing of nanowire structures produced by LB assembly method[32,35]

在单壁碳纳米管（SWNT）的组装中，LB 组装法作为一种简便有效的方法也被广泛使用。DUESBERG 等[43~45]以 LDS 包埋 SWNTs，通过离心提纯，并铺展于低浓度聚合电解质水溶液表面，压缩沉积得到 SWNTs LB 膜。MINNAMI 等[46~48]和 ARMITAGE 等[49]采用 PDDA 或 ODA 等包埋 SWNTs 或不使用表面活性剂，以氯仿为溶剂制得 LB 膜，通过水平和垂直提拉法在基片上沉积得到多层（>25 层）SWNTs 结构，并通过拉曼光谱响应的各向异性，说明碳纳米管在膜中呈定向排布。

另外，LB 膜组装技术在聚合物分子纳米线的组装中也被广泛采用。AKUTAGAWA 等[50~51]将 $(F_4TCNQ)_2$ 联合体分散于 $CHCl_3$-CH_3CN（9∶1）溶液中，然后将其铺展到纯水或 0.01 mol/L 的金属氯化物 MCl 溶液亚相表面［MCl（M = Li，Na K，Rb，Cs）或 $BaCl_2$］，压缩沉积到云母基片上得到不同形状组装的 TTF-F_4TCNQ 纳米线阵列（如图 4 所示）。

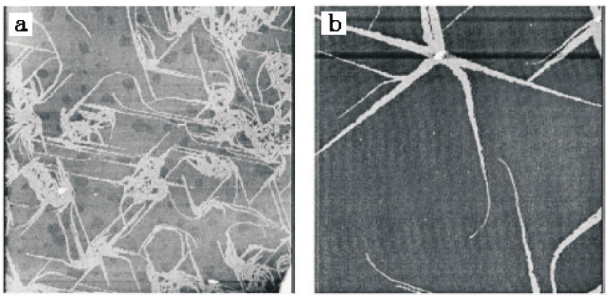

图 4 不同表面压下水平提拉法得到的 TTF-F_4TCNQ 纳米线 AFM 图片［(10×10) μm^2］，
Fig. 4 AFM images［(10×10) μm^2］of the TTF-F_4TCNQ nanowires formed by LB method[51]
a-10 mN/m；b-0 mN/M

3 结论与展望

LB技术以其超薄、均匀、厚度可控且能在分子水平上组装控制的特点，越来越广泛地被用于一维纳米结构的组装中，成为一维纳米结构组装的重要方法。目前的研究主要集中于将已制备的一维纳米线通过LB技术组装成为二维、三维紧密有序结构，且在多层沉积中实现多种交叉网络结构。但像某些零维纳米材料一样可以直接通过LB技术制备并组装，在一维纳米结构中暂时还没有报道。而且目前的可控组装还只停留在简单的网络结构组装上，尚不能实现对预定的特殊复杂图案进行组装排列。不过随着LB技术的迅速发展及技术水平的不断成熟，这些问题必将得到解决，并在工业化生产中得到应用。

总之，LB技术是一种重要的纳米组装手段，尤其是在一维纳米结构的组装中，通过恰当结构控制使其构建成结构形态功能化的二维及三维网络结构，充分发挥其一维结构单元的优异性能和单元间的协同作用，使其真正具有实际应用的价值。随着LB技术的不断发展，通过人工控制在分子尺度上排布组建分子聚集体的可能性越来越高，其对纳米材料的尺寸、粒度分布、组装维数上的控制将越来越成熟，使得纳米材料的优异性能充分发挥出来，从而使其更有效地实现器件化来为社会服务。

[参考文献] (References)

[1] LIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. Nature, 1991, 354(6348): 56～58.

[2] 张立德，牟季美. 纳米材料与纳米结构[M]. 北京：科学技术出版社，2001.
ZHANG L D, MOU J M. Nanomaterials and nanostructures[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

[3] XIA Y N, YANG P D, SUN Y G, et al. One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications[J]. Adv. Mater., 2003, 15(5): 353～389.

[4] HERNÁNDEZ-VÉLEZ M. Nanowires and 1D arrays fabrication: an overview[J]. Thin Solid Films, 2006, 495 (1～2): 51～63.

[5] DUAN X F, HUANG Y, CUI Y, et al. Indium phosphide nanowires as building blocks for nanoscale electronic and optoelectronic devices[J]. Nature, 2001, 409(6816): 66～69.

[6] CUI Y, LIEBER C M. Funtional nanoscale electronic devices assembled using silicon nanowire building blocks[J]. Science, 2001, 291(5505): 851～853.

[7] TANASE M, BAUER L A, HULTGREN A, et al. Magnetic alignment of fluorescent nanowires[J]. Nano Lett., 2001, 1(3): 155～158.

[8] MESSER B, SONG J H, YANG P D. Microchannel networks for nanowire patterning[J]. J. Am. Chem. Soc., 2001, 1(3): 155～158.

[9] HUANG Y, DUAN X F, WEI Q Q, et al. Directed assembly of one-dimesional nanostructures into functional networks[J]. Science, 2001, 291(5504): 630～633.

[10] NOBLE P F, CAYRE O J, ROSSITZA G, et al. Fabrication of 'Hairy' colloidosomes with shells of polymeric microrods[J]. J. Am. Chem. Soc., 2004, 126: 8092～8093.

[11] WHITESIDES G M, GRZYBOWSKI B A. Self-assembly at all scales[J]. Science, 2002, 295(29): 2418～2421.

[12] GIBB C L D, GIBB B C. Estimating the efficiency of self-assemblies[J]. J. Supramol. Chem., 2001, 1(1): 39～52.

[13] SAGIV J. Formation and structure of oleophobic mixed monolayers on solid surfaces[J]. J. Am. Chem. Soc., 1980, 102(1): 92～98.

[14] 李薇，徐冉，王丽颖，等. 分子组装技术制备超晶格的研究进展[J]. 化学进展，1999，11 (2): 139～147.
LI W, XU R, WANG L Y, et al. Progress of the preparation of superlattice by molecule assembly technique[J]. Progress in Chemistry, 1999, 11(2): 139～147. (in Chinese)

[15] ANDRES R P, BIELEFELD J D, HENDERSON J I, et al. Self-assembly of a two-dimensional superlattice of molecularly linked metal clusters[J]. Science, 1996, 273: 1690～1693.

[16] DONG W, KURTH D G, MÖHWALD H. Synthesis of copper sulfide nanorod arrays on molecular templates[J]. Nano Lett., 2004, 4(2): 249～252.

[17] RAO S G, HUANG L, SETYAWAN W, et al. Nanotube electronics: large-scale assembly of carbon nanotubes[J]. Nature, 2003, 425(6953): 36～37.

[18] 黄春辉，富友，黄岩谊. 光电功能超薄膜[M]. 北京：北京大学出版社，2001.
HUANG C H, FU Y, HUANG Y Y. Photoelectric functional super film[M]. Beijing: Peking University Press, 2001. (in Chinese)

[19] TREDGOLD R H. Spreading it out-an introduction to ultrathin organic films from Langmuir-Blodgett to self-Assembly[J]. Nature, 1991, 354: 6349.

[20] 李玲. 表面活性剂与纳米技术[M]. 北京：化学工业出版社，2004.
LI L. Surfactants and nanotechnology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)

[21] YANG P D. Wires on water[J]. Nature, 2003, 425(6955): 243～244.

[22] YANG P D, KIM F. Directed assembly of 1-dimensional nanostructures using Langmuir-Blodgett technique[J]. Chemphyschem., 2002, 3: 503～506.

[23] CHUNG S W, MARKOVICH G, HEATH J R. Fabrication and alignment of wires in two-dimensions[J]. J. Phys. Chem. B., 1998, 102(35): 6685～6687.

[24] HEATH J R, KNOBLER C M, LEFF D V. Pressure/Temperature phase diagrams and superlattices of organically functionalized metal nanocrystal monolayers: the influence of particle size, size distribution, and surface passivant [J]. J. Phys. Chem. B., 1997, 101(2): 189～197.

[25] BATTAGLIA G, RYAN A J. The evolution of vesicles from bulk lamellar gels[J]. Nature Materials, 2005, 4: 869～876.

[26] KIM F, KWAN S, AKANA J, et al. Langmuir-Blodgett nanorod assembly[J]. J. Am. Chem. Soc., 2001, 123 (18): 4360～4361.

[27] KWAN S, KIM F, AKANA J, et al. Synthesis and assembly of $BaWO_4$ nanorods[J]. Chem. Commun., 2001, 5 (38): 447～448.

[28] TAO A, KIM F, HESS C, et al. Langmuir-Blodgett silver nanowire monolayers for molecular sensing using surface-enhanced raman spectroscopy[J]. Nano Lett., 2003, 3(9): 1229～1233.

[29] AROCA R F, GOULET P J, SANTOS D S, et al. Silver nanowire layer-by-layer films as substrates for surface-enhanced raman scattering[J]. Anal. Chem., 2005, 77(2): 278～282.

[30] GOULET P J G, NICHOLAS P W P, PIECZONKA N P W, et al. Overtones and combinations in single-molecule surface-enhanced resonance raman scattering spectra[J]. Anal. Chem., 2003, 75(8): 1918～1923.

[31] CONSTANTINO C J L, LEMMA T, ANTUNES P A, et al. Single-molecule detection using surface-enhanced resonance raman scattering and Langmuir-Blodgett monolayers[J]. Anal. Chem., 2001, 73(15): 3674～3678.

[32] WHANG D, JIN S, LIEBER C M. Nanolithography using hierarchically assembled nanowire masks[J]. Nano Lett., 2003, 3(7): 951～954.

[33] WHANG D, JIN S, WU Y, et al. Large-scale hierarchical organization of nanowire arrays for integrated nanosystems[J]. Nano Lett., 2003, 3(9): 1255～1259.

[34] JIN S, WHANG D, MCALPINE M C, et al. Scalable interconnection and integration of nanowire devices without registration[J]. Nano Lett., 2004, 4(5): 915～919.

[35] WANG D, JIN S, LIEBER C M. Large-scale hierarchical organization of nanowires for functional nanosystems[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2004, 43(7B): 4465～4470.

[36] LAUHON L J, GUDIKSEN M S, WANG D, et al. Epitaxial core-shell and core-multishell nanowire heterostructures[J]. Nature, 2002, 420: 57～61.

[37] CUI Y, LAUHON L J, GUDIKSEN M S, et al. Diameter-controlled synthesis of single-crystal silicon nanowires [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78(15): 2214～2216.

[38] WANG D W, CHANG Y L, LIU Z, et al. Oxidation resistant germanium nanowires: bulk synthesis, long chain

alkanethiol functionalization, and Langmuir-Blodgett assembly[J]. J. Am. Chem. Soc., 2005, 127(33): 11871～11875.

[39] PRADHAN N, EFRIMA S. Supercrystals of uniform nanorods and nanowires, and the nanorod-to-nanowire oriented transition[J]. J. Phys. Chem. B, 2004, 108(32): 11964～11970.

[40] ACHARYA S, EFRIMA S. Two-dimensional pressure-driven nanorod-to-nanowire reactions in Langmuir monolayers at room temperature[J]. J. Am. Chem. Soc., 2005, 127(10): 3486～3490.

[41] PANDA A B, ACHARYA S, EFRIMA S. Ultranarrow ZnSe nanorods and nanowires: structure, spectroscopy, and one-dimensional properties[J]. Adv. Mater., 2005, 17(20): 2471～2474.

[42] ACHARYA S, PANDA A B, BELMAN N, et al. A semiconductor-nanowire assembly of ultrahigh junction density by the Langmuir-Blodgett technique[J]. Adv. Mater., 2006, 18(2): 210～213.

[43] DUESBERG G S, BURGHARD M, MUSTER J, et al. Separation of carbon nanotubes by size exclusion chromatography[J]. Chem. Commun., 1998: 435～436.

[44] KRSTIC V, DUESBERG G S, MUSTER J, et al. Langmuir-Blodgett films of matrix-diluted single-walled carbon nanotubes[J]. Chem. Mater., 1998, 10(9): 2338～2340.

[45] KRSTIC V, MUSTER J, DUESBERG G S, et al. Electric transport in single-walled carbon nanotubes bundles embedded in Langmuir-Blodgett monolayers[J]. Synthetic Metals, 2000, 110(3): 245～249.

[46] GUO Y Z, MINNAMI N, KAZAOUI S, et al. Multi-layer LB films of single-wall carbon nanotubes[J], Physica B, 2002, 323(1): 235～236.

[47] KIM Y, MINNAMI N, ZHU W, et al. Homogeneous and structurally controlled thin films of single-wall carbon nanotubes by the Langmuir-Blodgett technique[J]. Synthetic Metals, 2003, 135～136: 747～748.

[48] KIM Y, MINNAMI N, ZHU W, et al. Langmuir-Blodgett films of single-wall carbon nanotubes: layer-by-layer seposition and in-plane orientation of tubes[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2003, 42(12): 7629～7634.

[49] ARMITAGE N P, GABRIEL J C P, GRÜNER G. Quasi-Langmuir-Blodgett thin film deposition of carbon nanotubes[J]. J. Appl. Phys., 2004, 95(6): 3228～3230.

[50] AKUTAGAWA T, OHTA T, HASEGAWA T, et al. Formation of oriented molecular nanowires on mica surface [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2002, 99(8): 5028～5033.

[51] TATEWAKI Y, AKUTAGAWA T, HASEGAWA T, et al. Structural modification of molecular nanowires composed of dialkylmacrocyclicbis TTF-F_4TCNQ complex[J]. Synthetic Metals, 2003, 137(1): 933～934.