一维纳米材料的合成、组装与器件

董亚杰 李亚栋*

(清华大学化学系, 北京 100084. *联系人, E-mail: ydli@mail.tsinghua.edu.cn)

摘要 一维纳米材料的合成、组装及其物性的测量是制约其在纳米原型器件制作与应用中的关键, 评述了这一领域的最新进展. 一维纳米材料的组装大致可分为宏观场力组装与微流辅助模板限域组装, 其中前者是通过控制宏观电场、磁场的方向和大小来对微观的纳米线进行组装, 后者则通过控制模板的形状、尺寸、流体的流速、沉积的时间等来实现纳米线网络阵列的制备. 纳米线的组装与单根纳米线的物性测量使得纳米线激光器、传感器乃至纳米逻辑电路的制备成为可能.

关键词 一维纳米材料 合成 组装 物性测量 电场 磁场 模板 器件

碳纳米管的发现^[1]为低维纳米结构的研究与应用开辟了崭新的方向, 随着研究的不断深入, 各种新颖的一维纳米材料如非碳纳米管、纳米棒、纳米丝和纳米同轴电缆、纳米带等相继被发现, 引起了国际上的广泛关注^[2~8]. 近年来对各种不同类型材料的单根纳米结构物性的成功测量, 以及组装技术的不断完善, 推动了一维纳米材料器件制备的发展, 并对其生长机制的探索和控制合成提出了更高的要求.

1 一维纳米材料合成的新进展

一维纳米材料既包括人们熟知的碳纳米管, 还包括各种新颖的非碳纳米管、金属、半导体纳米线、纳米带等. 关于碳纳米管的合成与制备已有综述报道, 本文主要针对近两年来其他一维纳米材料的研究进行评述.

1.1 气-液-固生长机制激光烧蚀法制备半导体纳米线

自 1998 年首次报道利用激光烧蚀法与气-液-固 (VLS) 生长机制结合制备 Si、Ge 的单晶线以来^[9,10],

段镶锋等人^[11~13]利用同样的方法制备了多种 III-V 族, II-VI 族的化合物半导体的单晶纳米线, 其结果详见表 1. 通过控制生长纳米线的催化剂合金的粒径以及生长时间, 他们还实现了对多种半导体纳米线的直径与长度的控制^[14~16], 为单根一维纳米结构的物性研究与器件制备探索奠定了基础.

1.2 层状卷曲机制制备一维纳米材料

许多纳米管(BN, WS₂, C-NT 等)都与相应的层状结构相联系, 如碳纳米管对应于石墨的层状结构(见图 1). 李亚栋研究组^[17]利用低温水热还原的方法合成了直径在 5 nm 左右、长度为 0.5~5 μm 的金属 Bi 的纳米管(图 2(a)). 与石墨、黑磷一样, α-Bi 也是层状结构. 在每一层, 一个 Bi 原子与另三个 Bi 原子成键, 形成金字塔结构. Bi-Bi 键长 0.3072 nm, 键角为 95.5°, 层间距为 0.3529 nm. Bi 的这种层状结构表明 Bi 纳米管有存在的可能性. 但由于金属 Bi 的熔点(271.3℃)非常低, 难以用传统方法如电弧放电、激光烧蚀和化学气相沉积等来合成, 只能采用低温水热控制法合成.

表 1 激光烧蚀法可以制备的化合物半导体纳米线

材料	生长温度/℃	最小直径 / nm	平均直径 / nm	结构	生长方向	成分比例
GaAs	800~1030	3	19	ZB	〈111〉	1.00 : 0.97
GaP	870~900	3~5	26	ZB	〈111〉	1.00 : 0.98
GaAs _{0.6} P _{0.4}	800~900	4	18	ZB	〈111〉	1.00 : 0.58 : 0.41
InP	790~830	3~5	25	ZB	〈111〉	1.00 : 0.98
InAs	700~800	3~5	11	ZB	〈111〉	1.00 : 1.19
InAs _{0.5} P _{0.5}	780~900	3~5	20	ZB	〈111〉	1.00 : 0.51 : 0.51
ZnS	990~1050	4~6	30	ZB	〈111〉	1.00 : 1.08
ZnSe	900~950	3~5	19	ZB	〈111〉	1.00 : 1.01
CdS	790~870	3~5	20	W	〈100〉〈002〉	1.00 : 1.04
CdSe	680~1000	3~5	16	W	〈110〉	1.00 : 0.99
Si _{1-x} Ge _x	820~1150	3~5	18	D	〈111〉	-

图 1 层状卷曲成管机制图

为进一步探索验证纳米管结构的层状卷曲机制，最近该研究组在设计合成出一系列人工介孔层状结构(artificial lamellar)前驱物的基础上，通过控制适当的化学合成条件，又成功合成出WS₂, MoS₂等多种物质的纳米管(图 2(b))^[18]，单晶 W 纳米线(图 2(c))^[19]。基于类似的机制，该小组还合成了一系列金属、半导体、过渡金属氧化物的一维纳米材料以及氧化锌的单晶有序阵列(图 2(d))，具体结果列于表 2。

1.3 一种新颖的一维纳米材料——单晶纳米带

2001 年，王中林等人^[8, 25~27]利用高温固体气相法成功合成了 ZnO, SnO₂, In₂O₃, CdO 和 Ga₂O₃ 等宽带半导体体系的带状结构。带宽为 30~300 nm，厚 5~10

图 2 层状卷曲而得的一维纳米材料
(a) 金属 Bi 纳米管；(b) 二硫化钨纳米管；(c) 金属钨单晶纳米线；
(d) ZnO 单晶有序阵列

表 2 层状卷曲机制制备的一维纳米材料

材料	直径 / nm	长度 / μm	文献
CdS 纳米棒	25~75	0.3~2.5	[20,21]
CdSe 纳米棒	40~60	0.3	[21]
CdTe 纳米棒	20~50	0.2~0.6	[21]
ZnS 纳米线	15~30	0.3~8	*
ZnTe 纳米棒	30~100	0.5~1.2	[22]
GaN 纳米线	20~30	3~10	*
CoTe 纳米线	10~20	4~5	*
Bi 纳米管	5	0.5~5	[17]
WS ₂ (单/多壁)纳米管	15~75	0.2	[18]
W 纳米线	20~70	5	[19]
MoO ₃ 单晶纳米带	20~50 × 200~500	10~15	*
α-MnO ₂ 纳米线	5~20	5~10	[23,24]
β-MnO ₂ 纳米线	40~100	2.5~4	[23]
V ₂ O ₅ 纳米管	60~80	1~2	*
钛酸盐纳米管	20~40	0.5~3	*
钛酸盐纳米带	10~20 × 200	10	*
ZnO 单晶有序阵列	2~3 μm	300	*
CaSO ₄ 纳米线	10~50	0.2~4	*

*为作者未发表的数据 <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-9-641>

nm, 而长度可达几毫米. 和碳纳米管以及 Si 和复合半导体线状结构相比, “纳米带” 是迄今发现具有结构可控且无缺陷的惟一宽带半导体准一维结构, 这为丰富和发展一维纳米材料开辟了新的方向.

一维纳米材料的研究多集中在碳纳米管上, 碳纳米管的性能, 特别是呈现金属性还是半导体性, 与其直径与螺旋度密切相关, 很难实现选择性的控制合成^[28]; 而器件制备需要对材料的结构、组成与物性进行有效调控, 但对碳纳米管进行有效控制掺杂至今还是一个很大的难题. 近年来多种新颖一维纳米材料的控制合成成为这一体系的研究提供了新的可能, 比如对一维半导体纳米材料的掺杂就可以借用半导体工业的相应技术来实现. 如何在深刻理解一维纳米材料生长机制的基础上发展新的控制合成的方法, 选择性地制备各种类型的具有特定性能的一维功能纳米材料, 探索其形成机制与控制原理方法, 研究其组成结构与物性的关系, 是当前纳米科学技术研究与发展的关键, 也为一维纳米材料的控制合成提供了新的机遇与挑战.

2 单根一维纳米材料的直接物性测量

国内虽然在一维纳米材料的制备领域取得了一些进展, 但是, 对单根一维纳米材料的性能的测量, 利用这些基本的构筑基元(building blocks)自下而上地组装纳米原型器件, 构筑纳米激光器、传感器, 乃至建造真正的纳米计算机等方面的研究几乎是空白. 如何在现有基础上进一步深入开展一维纳米材料的电学、光学性能研究, 发展组装技术, 构筑新型纳米器件, 是摆在国内科学家面前的一个重要课题.

单根一维纳米材料性能的测量早期主要是在未经组装情况下直接利用随机沉积的方法进行, 其一般步骤如图 3 所示.

在衬底上用电子束刻蚀的方法做上标记, 将分散了纳米线、管的溶液沉积到衬底上, 通过标记的坐标系确定沉积上的纳米线、管的位置, 再用热蒸镀的方法在其端点镀上金属电极, 进而测量其电学输运性能. 这种方法早些时候被用于碳纳米管的输运性能的测量^[29,30]. 最近, 崔毅等人^[31]采用此法成功地测量了掺杂的 Si 纳米线的电学性能, 测量结果表明掺 B 的 Si 纳米线表现出 p 型半导体的性能, 掺 P 的 Si 纳米线表现出 n 型半导体的性能. 这种通过方便地控制掺杂来改变半导体性质的方法使得半导体纳米线成为优于碳纳米管的纳米器件构筑基元.

但是这种与随机沉积相结合的测量性能的方法, 仅仅局限于单根纳米材料性能的测量, 而为了实现纳米器件的制作, 既要知道单根纳米材料的性能, 还要对其进行相应的组装, 并对组装出的一维纳米材料阵列原型器件的性能进行表征.

3 一维纳米材料的人工组装

利用宏观条件的调控来实现对微观的纳米的控制组装就成为制约纳米原型器件制备与性能测试的关键. 从文献来看, 这方面的组装主要分为两类, 一类是利用宏观场力(如电场, 磁场)对纳米线进行组装, 另一类则是利用模板的空间限域效应来进行组装.

3.1 电场驱动组装

段钺锋等人^[32,33]采用电场驱动组装的方法将纳

图 3 一维纳米材料电学输运性能的直接测量

<https://www.scichina.com> (a)电子束刻蚀作标记;(b)沉积纳米线;(c)镀上电极 -9-641

米线的组装与其半导体性质的测量联系起来. 他们将事先已进行掺杂好的 n 型, p 型 InP 半导体一维纳米线在电场作用下进行了合理的控制组装. 如图 4 所示, 在加有 50~100 V 电压的两个电极之间的衬底上滴加一滴分散了 InP 纳米线的溶液, 溶液中的纳米线在电场作用下自组装排列成平行的纳米线阵列, 如果再在垂直方向上加一个电场, 重复以上组装步骤, 即可获得如图 4(d)所示的一个十字结. 利用这种电场组装成的 3 类不同一维纳米线十字结可以进行 p-p 结、n-n 结与 p-n 结的电学性质测量, 所得 I - V 曲线如图 5 所示.

类似的技术还可能用于更长纳米线及纳米电路的制备, Mayer 等人^[34]将一对梳状电极相互交叉地组装在 SiO₂ 衬底上. 再将分散了金纳米线的溶液滴加到这两列电极间. 当在两个电极之间通入交流电时, 纳米线就极化而按电场线排列, 导致两个不同电极邻齿间的桥联, 这样就可测量金纳米线的电学性质, 也可用施加电场的方法将纳米线首尾相联成链. 最近, Velev 等人^[35]又利用交流电场成功将悬浮在水溶液中的金纳米颗粒组装形成长度超过 5 nm 的、能自我修复的细微导线. 其简单有效的技术或许能用于

创造湿电子或生物电子的电路和传感器.

3.2 磁场驱动组装

Tanase 等人^[36]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. 他们以多孔氧化铝做模板, 用电化学的方法制备得到 Ni 纳米线, 再在其表面修饰上一层荧光卟啉分子. 在高黏度的 16 烷-18 烷混合溶剂中, 如图 6 所示, 施加磁场后这种 Ni 纳米线自动排布成平行阵列. 这种方法有望在生物技术与分离化学中获得应用, 并用于研究生物体系中的纳米线的化学、光学与磁学性能.

相对于随机沉积来说, 宏观场力的方法更简便, 容易通过调节电场、磁场强弱来实现对组装体系的控制. 但是此类方法也有一定局限, 首先, 它们只对能在电场中极化或者具有磁性的物质才适用; 其次, 只能在平行于电场、磁场的方向上实现纳米线的分离, 在垂直于场的方向上难以分离; 再则, 当需要进行复杂组装, 比如构筑纳米线的功能网络之时, 所需要的复杂微电极制备起来也很困难.

3.3 微流辅助模板法组装

1997 年, van Blaaderen 等人^[37]曾利用固体模板的空间限制效应完成了对零维纳米材料的组装, 制

图 4 纳米线在电场作用下组装
(a) 原理图; (b) 和 (c) 平行排列的纳米线; (d) 正交排列的纳米线.

图 5 交叉纳米线结与其电学性质
(a) 典型 Si 纳米线结; (b) p-n 结 I - V 曲线; (c) p-p 结 I - V 曲线; (d) n-n 结 I - V 曲线

图 6 磁场中的 Ni 纳米线在高黏度溶剂中的组装

备了三维有序的超晶格结构. 近年来, 夏幼南等人^[38~40]利用高分子模板对多种单分散的球形粒子进

行组装制备了相应的阵列. 但这些研究旨在探讨各向同性的零维量子点的组装规律. 而一维纳米材料的各向异性, 及其本身制备上的困难, 使得利用模板法对其进行组装的研究还很不充分.

杨培东等人^[41]将微流体与模板技术结合, 成功地将一维纳米材料组装成平行阵列. 如图 7 所示, 他们在高分子模板 PDMS(聚二甲基硅氧烷)上刻制出孔道形状, 将其倒扣在平整的基底上形成纳米隧道, 再将分散了 $[\text{Mo}_3\text{Se}_3]_\infty$ 纳米线的溶液在此隧道中限制流过, 蒸发溶剂, 利用模板的空间限制效应可对纳米线进行排列组装, 最后除去高分子模板就可以获得平行排布的纳米线阵列. 黄昱等人^[42]进一步发展了这种方法, 他们通过设计高分子模板孔道的方向, 获得如图 8 所示的纳米线交叉结构, 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, 并通过对 2×2 纳米线网络输运性能的测量证

图 7 微流辅助模板法组装纳米线机理及结果

明确形成了电导性的功能网络。

与宏观场力方法相比，微流辅助的模板组装方法有几个优势。首先，它利用的是模板的空间限域效应，与具体纳米线的性质无关，而利用软刻蚀(soft lithography)的技术已经能够制备尺度范围从 30 nm 到 500 μm 不等的微结构模板^[43]，这就使得此项技术对不同物质，不同尺度的纳米线具有普适性；其次，通过控制流体流速、沉积时间这些简单的实验条件可实现纳米线排列方向、密度的控制；再则，通过多级模板组装可以方便实现功能网络结构的制备。这些优势使得这种组装方式成为测量纳米线电学、光学性能的普遍方法，并成为制备纳米线电子器件，如纳米线传感器、激光器、逻辑电路的首选。

4 基于一维纳米材料的纳米器件

4.1 纳米线传感器

因为一维纳米材料的电学输运性能随其所处环

境、吸附物质的变化而变。通过对其电学输运性能的检测，就可能对其所处的化学环境作出检测。

一般用来检测 NO₂ 或 NH₃ 的物质只在高温下敏感。2000 年，戴宏杰等人^[44]观察到单壁碳纳米管的电阻在室温下与 NO₂ 或 NH₃ 接触仅几秒钟后就有较大的变化，表现出比普通固态传感器更快的反应速度和更高的灵敏度。2001 年，崔毅等人^[45]利用微流辅助模板组装掺杂了硼的 Si 纳米线制备了可望用于蛋白质表达和医疗诊断的传感器。通过适当的表面修饰，可使这种纳米线对不同物质的存在表现出电导率的变化，从而对其进行实时检测。对某些生物分子的检测灵敏度可达到皮摩尔量级。

如果探索合成出各种不同类型的一维纳米材料，并进行适当的表面化学修饰，这种基于一维纳米材料电学输运性能变化的传感器就可能成为对化学、生物领域的多种物质进行高灵敏、高选择性检测的新技术。

图 8 微流辅助模板组装一维纳米线所得功能网络结构

4.2 纳米线激光器

2001 年, 杨培东等人^[46]利用 ZnO 的纳米线阵列成功制备了纳米激光器. 他们采用高温气相的方法在蓝宝石衬底上生长出直径为 20~150 nm, 长约 10 μm 的 ZnO 纳米线阵列. 室温下, 这些纳米线自然形成良好的激光器共振腔, 纳米线与蓝宝石的分界面和纳米线自由端表面正好成为共振腔两端的反射面. 此时采用另一激光器来激发纳米线迫使其中的激子相互碰撞发射出波长半峰宽只有 17 nm 的激光. 此项工作引起国际上的广泛关注, 如能改用电流来激活此类纳米激光器, 就可能开发出新型光电纳米器件. 段镶锋等人^[32]利用掺杂的 InP 纳米线组装成 p-n 结, 在其端点加以电压, 观察到了电致发光的现象, 制备了纳米线发光二极管(LED).

通过选择不同电学性能的纳米线材料可能制备覆盖从可见光区到近红外各个波段的 LED, 而如果能够利用组装技术制备出交叉纳米线的网络结构, 则可能制备高分辨率的 LED 阵列, 这些工作最终可

能制备真正电致激发的纳米激光器, 并用于鉴别化学物质、提高计算机磁盘和光子计算机的信息存储量.

4.3 逻辑门计算电路

单壁碳纳米管与半导体纳米线都曾被用于制备基本的纳电子器件如室温场效应管(FETs)^[31,32, 47~49]、p-n 结二极管^[32,33,50,51]和变极器^[43,52]等.

在这些工作的基础上, Dekker 与 Lieber 等人^[53~55]分别利用碳纳米管与 GaN 纳米线作为基元组装制备了能够实现数字逻辑运算的电路, 以 GaN 纳米线为例, 采用微流辅助模板组装的技术自下而上地制得 p-n 结与场效应管, 以此为基础组合成“或”、“与”、“非”逻辑门, 并且能进一步相互连接形成计算电路.“或”、“与”、“非”逻辑门的可预测的组装, 使组成几乎任何逻辑线路成为可能, 这意味着一个实质性的进展. Tseng 等人^[56]在相关评述中指出, 这项工作及相关研究意味着我们“朝电子纳米计算机的实现迈出了激动人心的步伐”.

5 前景展望

一维纳米材料的合成、组装与物性测量以及器件制备虽然起步不久,但已取得了很多非常有意义的研究成果.其中以半导体纳米线、碳纳米管为构筑基元组装制备逻辑计算电路的工作被评选为年度十大科技新闻之首^[57].有理由相信,随着对一维纳米材料生成机制的深入理解,新颖一维纳米材料的不断发现,特别是可控合成方法的建立、完善,及其组装、测量技术的不断成熟,一维纳米材料的各种奇异性质和功能必将得到更充分的发挥和利用,对一维体系的深入研究,极可能成为实现纳米器件集成、乃至制备真正的纳电子计算机的突破口.

但是同时应该看到,这一领域的研究从合成、组装到性能测量、器件制备都还存在许多尚未解决的问题.合成中如何实现作为纳米器件构筑基元的一维纳米材料的结构与组成,形貌与尺寸的有效控制,这些迫切需要回答的问题依然是限制一维纳米材料研究发展的关键,需要物理、化学、材料科学等多学科研究人员的通力合作才可能获得突破.

从技术的角度来看,目前已报道的各种组装技术都尚有各自的局限,微流辅助模板法作为一种普适方法具有相对的优越性,但迄今也只实现了最简单的逻辑计算电路.理论上,选用直径 5 nm 的纳米线作为构筑基元,集成密度可达 10^{12}cm^{-2} ^[54],远高于目前采用微电子技术所能达到的极限.但要真正实现这个目标从构筑基元的合成、组装到芯片制备技术的提高都还有很长的一段路要走.随着现今的 Si 芯片技术越来越接近于极限,对纳电子学发展的要求就越来越强烈,在一维纳米材料研究领域寻求突破的呼声也会越来越高.

致谢 本工作为国家杰出青年科学基金(批准号:20025102)、海外青年学者合作研究基金(批准号:50028201)、国家自然科学基金重点项目纳米专项基金(批准号:20151001)、国家重大基础研究发展规划(G19990645-03)资助项目.

参 考 文 献

- Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, 354: 56~58
- Trentler T J, Hickman K M, Buhro W E, et al. Solution-liquid-solid growth of crystalline III-V semiconductors—An analogy to vapor-liquid-solid growth. *Science*, 1995, 270: 1791~1794

- Dai H J, Wong E W, Lieber C M, et al. Synthesis and characterization of carbide nanorods. *Nature*, 1995, 375: 769~772
- Han W Q, Fan S S, Li Q Q, et al. Synthesis of gallium nitride nanorods through a carbon nanotube-confined reaction. *Science*, 1997, 277: 1287~1289
- Fasol G. Applied physics—Nanowires: Small is beautiful. *Science*, 1998, 280: 545~546
- Zhang Y, Suenaga K, Colliex C, et al. Coaxial nanocable: Silicon carbide and silicon oxide sheathed with boron nitride and carbon. *Science*, 1998, 281: 973~975
- 张立德, 牟季美. 纳米材料与纳米结构. 北京: 科学出版社, 2001. 27~48
- Pan Z W, Dai Z R, Wang Z L. Nanobelts of semiconducting oxides. *Science*, 2001, 291: 1947~1949
- Morales A M, Lieber C M. A laser ablation method for the synthesis of crystalline semiconductor nanowires. *Science*, 1998, 279: 208~211
- Yu D P, Lee C S, Bello I, et al. Synthesis of nano-scale silicon wires by excimer laser ablation at high temperature. *Solid State Commun*, 1998, 105 (6): 403~407
- Duan X F, Lieber C M. Laser-assisted catalytic growth of single crystal GaN nanowires. *J Am Chem Soc*, 2000, 122(1): 188~189
- Duan X F, Wang J F, Lieber C M. Synthesis and optical properties of gallium arsenide nanowires. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(9): 1116~1118
- Duan X F, Lieber C M. General synthesis of compound semiconductor nanowires. *Adv Mater*, 2000, 12(4): 298~302
- Gudiksen M S, Lieber C M. Diameter-selective synthesis of semiconductor nanowires. *J Am Chem Soc*, 2000, 122(36): 8801~8802
- Gudiksen M S, Wang J F, Lieber C M. Synthetic control of the diameter and length of single crystal semiconductor nanowires. *J Phys Chem B*, 2001, 105(19): 4062~4064
- Cui Y, Lauhon L J, Gudiksen M S, et al. Diameter-controlled synthesis of single-crystal silicon nanowires. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(15): 2214~2216
- Li Y D, Wang J W, Deng Z X, et al. Bismuth nanotubes: A rational low-temperature synthetic route. *J Am Chem Soc*, 2001, 123(40): 9904~9905
- Li Y D, Li X L, He R R, et al. Artificial lamellar mesostructures to WS₂ nanotubes. *J Am Chem Soc*, 2002, 124(7): 1411~1416
- Li Y D, Li X L, Deng Z X, et al. From surfactant-inorganic mesostructures to tungsten nanowires. *Angew Chem Int Edit*, 2002, 41(2): 333~335
- Li Y D, Liao H W, Qian Y T, et al. Nonaqueous synthesis of CdS nanorod semiconductor. *Chem Mater*, 1998, 10(9): 2301~2303
- Li Y D, Liao H W, Ding Y, et al. Solvothermal elemental direct reaction to CdE (E = S, Se, Te) semiconductor nanorod. *Inorg*

- Chem, 1999, 38(7): 1382~1387
- 22 Li Y D, Ding Y, Wang Z Y. A novel chemical route to ZnTe semiconductor nanorods. *Adv Mater*, 1999, 11(10): 847
- 23 Wang X, Li Y D. Selected-control hydrothermal synthesis of α - and β - MnO_2 single crystal nanowires. *J Am Chem Soc*, 2002, 124(12): 2880~2881
- 24 Wang X, Li Y D. Rational synthesis of α - MnO_2 single-crystal nanorods. *Chem Commun*, 2002, 7: 764~765
- 25 Wang Z L, Gao R P, Pan Z W, et al. Nano-scale mechanics of nanotubes, nanowires, and nanobelts. *Adv Eng Mater*, 2001, 3 (9): 657~661
- 26 Dai Z R, Pan Z W, Wang Z L. Ultra-long single crystalline nanoribbons of tin oxide. *Solid State Commun*, 2001, 118 (7): 351~354
- 27 Pan Z W, Dai Z R, Wang Z L. Lead oxide nanobelts and phase transformation induced by electron beam irradiation. *Appl Phys Lett*, 2002, 80 (2): 309~311
- 28 Hu J T, Odom T W, Lieber C M, et al. Chemistry and physics in one dimension: Synthesis and properties of nanowires and nanotubes. *Acc Chem Res*, 1999, 32(5): 435~445
- 29 Bockrath M, Cobden D H, Smalley R E, et al. Single-electron transport in ropes of carbon nanotubes. *Science*, 1997, 275: 1922~1925
- 30 Lee R S, Kim H J, Smalley R E, et al. Conductivity enhancement in single-walled carbon nanotube bundles doped with K and Br. *Nature*, 1997, 388: 255~257
- 31 Cui Y, Duan X F, Hu J T, et al. Doping and electrical transport in silicon nanowires. *J Phys Chem B*, 2000, 104(22): 5213~5216
- 32 Duan X F, Huang Y, Lieber C M, et al. Indium phosphide nanowires as building blocks for nanoscale electronic and optoelectronic devices. *Nature*, 2001, 409: 66~69
- 33 Cui Y, Lieber C M. Functional nanoscale electronic devices assembled using silicon nanowire building blocks. *Science*, 2001, 291: 851~853
- 34 Smith P A, Nordquist C D, Jackson T N, et al. Electric-field assisted assembly and alignment of metallic nanowires. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(9): 1399~1401
- 35 Hermanson K D, Lumsdon S O, Williams J P, et al. Dielectrophoretic assembly of electrically functional microwires from nanoparticle suspensions. *Science*, 2001, 294: 1082~1086
- 36 Tanase M, Bauer L A, Meyer G J, et al. Magnetic alignment of fluorescent nanowires. *Nano Letters*, 2001, 1(3): 155~158
- 37 van Blaaderen A, Ruel R, Wiltzius P. Template-directed colloidal crystallization. *Nature*, 1997, 385: 321~324
- 38 Yin Y D, Xia Y N. Self-assembly of monodispersed spherical colloids into complex aggregates with well-defined sizes, shapes, and structures. *Adv Mater*, 2001, 13(4): 267~271
- 39 Yin Y D, Lu Y, Gates B, et al. Template-assisted self-assembly: A practical route to complex aggregates of monodispersed colloids with well-defined sizes, shapes, and structures. *J Am Chem Soc*, 2001, 123(36): 8718~8729
- 40 Yin Y D, Lu Y, Xia Y N. A self-assembly approach to the formation of asymmetric dimers from monodispersed spherical colloids. *J Am Chem Soc*, 2001, 123(4): 771~772
- 41 Messer B, Song J H, Yang P D. Microchannel networks for nanowire patterning. *J Am Chem Soc*, 2000, 122(41): 10232~10233
- 42 Huang Y, Duan X F, Lieber C M, et al. Directed assembly of one-dimensional nanostructures into functional networks. *Science*, 2001, 291: 630~633
- 43 Xia Y N, Rogers J A, Whitesides G M. Unconventional methods for fabricating and patterning nanostructures. *Chem Rev*, 1999, 99 (7): 1823~1848
- 44 Kong J, Franklin N R, Dai H J, et al. Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 2000, 287: 622~625
- 45 Cui Y, Lieber C M, et al. Nanowire nanosensors for highly sensitive and selective detection of biological and chemical species. *Science*, 2001, 293: 1289~1292
- 46 Huang M H, Mao S, Yang P D, et al. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers. *Science*, 2001, 292: 1897~1899
- 47 Tans S J, Verschueren A R M, Dekker C. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube. *Nature*, 1998, 393: 49 ~ 52
- 48 Martel R, Schmidt T, Shea H R, et al. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(17): 2447~2449
- 49 Collins P C, Arnold M S, Avouris P. Engineering carbon nanotubes and nanotube circuits using electrical breakdown. *Science*, 2001, 292: 706~709
- 50 Yao Z, Postma H W C, Balents L, et al. Carbon nanotube intramolecular junctions. *Nature*, 1999, 402: 273~276
- 51 Fuhrer M S, Nygard J, Shih L, et al. Crossed nanotube junctions. *Science*, 2000, 288: 494~497
- 52 Derycke V, Martel R, Appenzeller J, et al. Carbon nanotube inter- and intramolecular logic gates. *Nano Letters*, 2001, 1(9): 453~456
- 53 Bachtold A, Hadley P, Nakanishi T, et al. Logic circuits with carbon nanotube transistors. *Science*, 2001, 294: 1317~1320
- 54 Huang Y, Duan X F, Lieber C M, et al. Logic gates and computation from assembled nanowire building blocks. *Science*, 2001, 294: 1313~1317
- 55 Huang Y, Duan X F, Cui Y, et al. Gallium nitride nanowire nanodevices. *Nano Letters*, 2002, 2(2): 101~104
- 56 Tseng G Y, Ellenbogen J C. Nanotechnology — Toward nanocomputers. *Science*, 2001, 294: 1293~1294
- 57 Service R F. Breakthrough of the year — Molecules get wired. *Science*, 2001, 294: 2442~2443

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-9-641>

(2001-12-10 收稿, 2002-03-28 收修改稿)