

孔性氧化铝模板与一维纳米新材料的制备

吴强 胡征* 王喜章 杨勇 陈懿

(介观材料科学实验室, 南京大学化学化工学院, 南京 210093)

纳米材料尤其是以碳纳米管有序阵列为代表的一维纳米阵列材料的重要价值, 促进了人们对模板合成方法的研究。本文简要回顾和总结了近年来有关孔性氧化铝模板的制备及其应用的研究进展, 结合我们实验室的部分相关研究工作, 揭示了孔性氧化铝模板在合成与组装一维纳米新材料方面的重要作用, 以进一步活跃和促进该重要领域的研究和发展。

关键词: 孔性氧化铝模板 一维纳米材料 阵列
分类号: O611.12

纳米材料是公认的21世纪的新材料, 其制备、研究和应用构成了当今最为活跃的研究领域之一。近十年来, 以碳纳米管为代表的一维纳米新材料因其特殊的一维纳米结构, 呈现出一系列优异的力、光、电、声、磁、热、储氢、吸波等性质, 具有广阔而深远的应用前景, 成为纳米材料家族中一类“闪光”的群体。至今已发展了多种一维纳米材料(线、管)的制备方法, 如电弧法、催化热解法、激光烧蚀法、化学气相沉积法、分子束外延法、模板合成法等。由于模板具有有限域能力, 容易调控所制一维材料的尺寸及形状, 因此模板合成法已迅速发展成为制备纳米线和纳米管的一种十分重要的途径。

孔性氧化铝模板一般具有孔径在纳米级的平行阵列孔道, 其孔径和孔深度可以通过制备条件方便调控。由于它是一种无机材料, 相对于聚碳酸酯膜能经受更高的温度、更加稳定、孔分布也更加有序, 已成为制备一维纳米材料最为有效而常采用的模板之一。

本文结合我们实验室的相关研究工作, 对孔性氧化铝模板的制备、性质及其在合成一维纳米新材料方面的应用作简要回顾与总结, 以期进一步促进该领域的发展。

1 孔性氧化铝模板

收稿日期: 2002-01-09。收修改稿日期: 2002-03-05。

国家自然科学基金资助项目(No. 10175034)。

* 通讯联系人。E-mail: zhenghu@netra.nju.edu.cn

第一作者: 吴强, 男, 26岁, 博士研究生; 研究方向: 纳米材料和等离子体化学。

1.1 氧化铝膜的结构

通过金属铝的电化学阳极化处理可得到氧化铝膜, 根据阳极化时所用电解液的不同, 可得到孔性或非孔性两种不同的氧化铝膜。电解液如是一些酸性较强的能够溶解氧化铝的多元酸(如硫酸、磷酸和草酸等), 就会生成孔性氧化铝膜, 其厚度可由电解时间、电解液浓度、电流密度决定; 如果是酒石酸、硼酸等不能溶解氧化铝的弱酸, 就会生成非孔性氧化铝, 厚度由电压决定, 一般为 $1.4\text{nm} \cdot \text{V}^{-1}$; 如果是盐酸、硝酸等一元强酸, 则不能生成氧化膜。

孔性氧化铝是一种在阳极化过程中自组装形成的具有有序孔道的纳米结构, 如图1所示。它具有六方紧密堆积柱状结构, 在六棱柱中心有一个圆形孔道。孔壁氧化物上存在着羟基, 可以与一些有机基团结合而修饰孔内壁, 但 H_2O 、 OH^- 、 H^+ 的含量 $< 1\%$ 。电解液的阴离子会嵌入孔壁的微晶中, 如 H_2SO_4 作电解液时, 膜中 SO_4^{2-} 含量可高达 11% , 只有经过多次洗涤才有可能降低。

1.2 孔性氧化铝的形成机理

对于在氧化铝膜上自组装生成孔道结构的原因, Murphy 等人提出了胶体沉淀模型 (colloid-precipitation model)^[1], 认为氧化铝是电解时阳极产生的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 分解形成的, 其中的孔洞是用电子显微

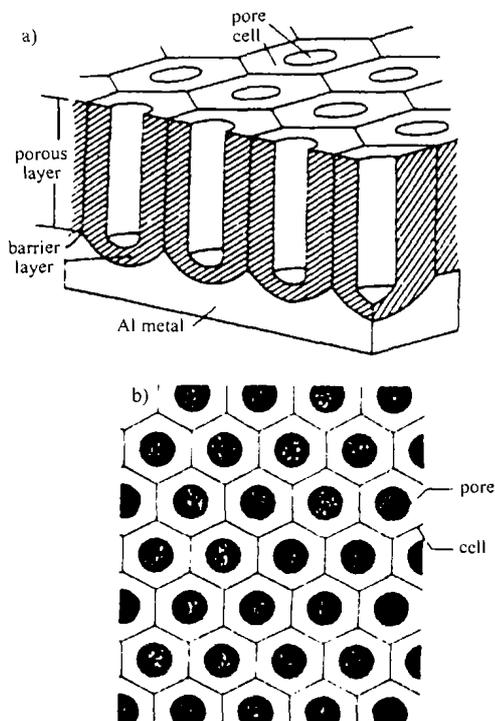


图 1 孔性氧化铝的结构图

Fig. 1 Schematic diagrams of the hexagonal structure of porous alumina (a) side view, (b) top view

镜表征时电子穿透引起的; Despic A. R. 等人提出了可变的区域溶解模型 (various local dissolution model), 认为孔洞是在热处理、电场以及机械应力等多种因素促进的溶解过程后形成的^[2], 但这两个机理缺乏实验的证据。Parkhutik V. P. 等人根据实验中观察到的电流变化情况, 提出了稳态孔生长机理 (steady state pore growth mechanism)^[3], 该机理 (如图 2) 认为孔的形成分为四步: (I) 通电后, 在 Al 表面形成一层阻碍氧化层 (barrier oxide layer), 厚度由电压决定 ($1.4\text{nm} \cdot \text{V}^{-1}$); (II) 在氧化膜的某些地方, 氧化铝溶解, 形成通道 (path), 使得氧离子等得以迁移通过阻碍层与金属反应, 即孔的成核; (III) 电解过程中某些通道在竞争中形成孔道并变大变深。(IV) 稳定态孔结构形成。孔的生长过程其实是氧化物在金属表面生成和在溶液界面溶解的结果。氧化物溶解的过程受到孔内电场的促进和溶液中氢离子的诱导作用。实际上, 在氧化铝膜中发生了三个反应过程: (A) 氧化物在 H^+ 辅助电场促进作用下溶解。(B) O^{2-} 离子迁移到氧化膜的内层, Al^{3+} 向外迁移。(C) O^{2-} 与 Al^{3+} 发生位置交换, 生成新的氧化层或氧化层溶解到电解液中。其形成过程见图 3 示意。

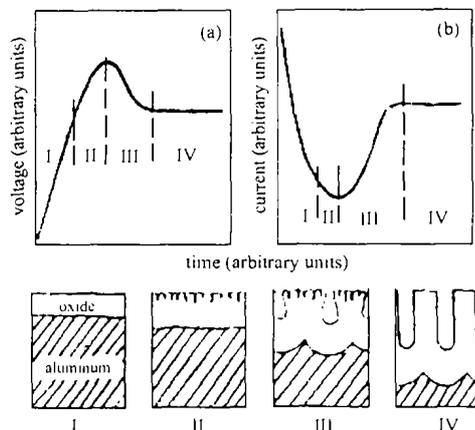


图 2 孔性氧化铝生成步骤及对应的电压电流变化
Fig. 2 Schematic diagrams of the kinetics of porous oxide growth on Al in (a) galvanostatic and (b) potentiostatic regimes. The stages of porous structure development are also shown.

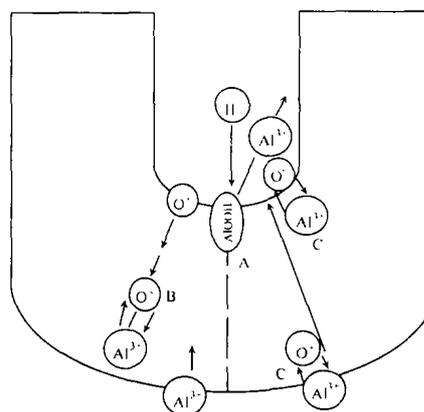


图 3 孔性氧化铝的基本生成过程
Fig. 3 Elementary processes involved in porous oxide growth: processes ABC were described in the text

1.3 孔性氧化铝的制备及表征

如前所述, 孔性氧化铝是通过电化学阳极化的方法获得的。将高纯度的 Al 片除掉有机层和氧化层后, 置于一定浓度的多元酸 (如硫酸、磷酸、草酸) 中, 加上一定的电压进行电解, 经过一段时间后, 在金属铝表面就会出现一层具有孔洞的氧化铝膜。其中孔密度可由电压来控制, 电压越大, 孔密度越小。孔的大小也与电压有关, 电压越大, 孔直径也越大。而模板的厚度则由电流、电解液种类及浓度和电解时间共同决定。由于孔密度与电压平方的反比关系, Li J. 等人在阳极化过程中从某个电压 V 改变到另一个电压 $V/\sqrt{2}$, 制得了具有 Y 型分叉孔道的氧化铝模板^[4]。

在孔性氧化铝的形成过程中, 孔洞和金属之间

有一层阻碍层 (barrier layer)。根据不同的要求, 有些氧化铝模板需要同金属铝分离, 有些则要求除去阻碍层, 得到两端都通的孔道结构。文献报道的除去 Al 层方法有 (1) 饱和 Hg_2Cl_2 溶液处理^[5]; (2) $\text{Br}_2 + \text{CH}_3\text{OH}$ 处理^[6]; 以及 (3) 电极反向或电压递减方法^[7, 8]。在 5% 的 H_3PO_4 溶液中 30°C 下处理, 则可在扩孔的同时除去阻碍层得到两端打通的模板, 通过改变处理的时间还可调变孔径大小。

对于生成的模板, 一般通过透射电子显微镜 (TEM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 观察其形貌, 用 X 射线光电子能谱 (XPS)、二次电子质谱 (SIMS)、X 射线衍射谱 (XRD)、红外光谱 (IR) 等手段来表征其所含的基团。

1.4 氧化铝模板的有序化

通常制得的氧化铝模板的孔分布并不是完全规整的, 也不完全是以六方紧密堆积形式存在。但模板孔分布的有序化程度决定了在孔道中生长的纳米线或管的性能。例如作为磁记录材料, 有序的 Co 纳米线阵列比光盘的存储密度高两个数量级以上, 达到 $4 \times 10^{11} \text{bit} \cdot \text{in}^{-2}$ ^[9]。因此, 人们致力于模板的有序化研究。

文献中报道了三种使孔洞较大范围内 ($> 1 \text{mm}^2$) 有序分布的方法。用带有有序突起的 SiC 的面罩 (mask) 在高纯金属铝上高压压制出孔洞, 再在电解液中进行阳极化, 生长出了有序孔性氧化铝模板。这种方法受到了面罩的限制, 其孔径较大, 孔密度相对较小^[10]。通过考察阳极化时间对孔分布的影响, 发现长时间的阳极化可以增加孔分布的有序性^[11]。后来又发展了二步阳极化 (two-step anodization) 技术, 制备出了孔道在大范围内有序分布的模板。具体过程如下, Al 先在一定电压下阳极化, 孔道逐渐的由无序变为有序分布, 然后用 6% 的 H_3PO_4 和 1.8% 的 H_2CrO_4 溶液溶掉已生成的氧化铝层, 得到了有序分布的锯齿状凹槽, 作为进一步阳极化的面罩, 然后在相同的电压下进行阳极化, 得到有序分布的孔道结构^[12]。

对于模板孔道产生有序化的原因, Jessensky O. 等提出了邻孔斥力作用导致自组织分布的机理 (self-organized arrangement of neighboring pores mechanism)^[13]。他们认为在孔的底端瞬时发生的氧化反应使得材料的体积向垂直方向迅速膨胀, 由于体积的增大, 使得在氧化物内部产生了机械应力。

不同孔道之间的机械应力相互排斥, 导致了孔道之间距离相等, 促进了孔分布的有序性。实际上, 孔的有序分布并不是几个孔之间相互排斥的结果, 而是整个模板上所有的孔相互作用引起的自组装效应的体现。

模板的有序化还受到很多因素的影响^[14], 首先是电压, 低电压不利于有序化, 因为此时氧化反应较缓慢, 由体积膨胀产生的应力不足以使其有序分布, 这一实验事实也证实了上述机理的合理性; 高电压下氧化过程迅速发生, 使得孔底端受扩散控制的电解液浓度迅速变小, 氧化膜上溶解的 Al^{3+} 浓度变大, 从而在孔中形成了离子浓度梯度, 导致氧化速度不均一, 不利于孔道的有序, 因此阳极化电压要适中。其次, Al 片本身的结构也影响模板孔的有序化程度。Al 片通常是多晶材料, 在晶粒之间存在着晶界, 阳极化得到的模板孔洞在晶界边缘就不能有序分布。例如, 图 4 是我们实验室在 $0.3 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的草酸溶液中 50V 电压条件下阳极化 6h 后得到的孔性氧化铝模板的 SEM 照片, 孔径在 40 ~ 60nm 之间, 孔中心间距约为 110nm, 孔密度约为 $1.3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$, 模板厚度约为 $90 \mu\text{m}$ 。图中可清楚地看到晶界边缘的有序性发生了改变, 因此往往通过对 Al 片进行退火预处理 (惰性气氛或真空条件下 500°C 处理 3h), 以增大晶粒尺寸甚至消除晶界。另外, 如果 Al 片表面粗糙, 则在凹陷 (depression) 的地方更容易形成氧化层, 在这些地方成核的孔道就比其他孔道更早生长出来。这样, 表面粗糙面实际上充当了在氧化物和 Al 之间的面罩, 阻止了自组织的有序化过程。第三,

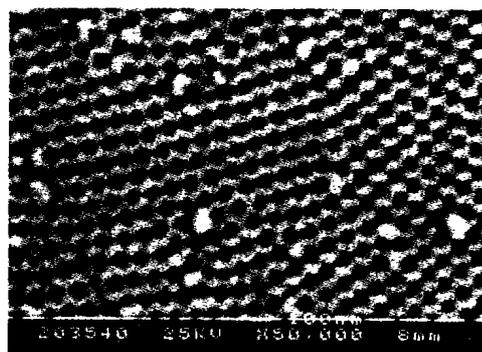


图 4 在 $0.3 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的草酸溶液中 50V 阳极化电压条件下得到的孔性氧化铝模板的 SEM 形貌

Al 中的晶界导致孔分布有序性的变化
Fig. 4 SEM image of the porous alumina template formed by anodizing Al in the oxalic acid of $0.3 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ at 50V. The grain boundary in the Al plate results in the change of the periodicity

在阳极化过程中进行搅拌,有利于电解液离子在孔道中的扩散,能促进有序化过程。

2 一维纳米新材料的氧化铝模板合成

最早人们将孔性氧化铝用作抗腐蚀和耐磨材料^[15],或用作过滤膜^[16]。应用最多的则是用作催化剂载体或微反应器,例如 Alfonso M. J. 等人在模板上负载 V 催化剂用于丙烷的氧化脱氢反应^[17]。随着近期电子仪器的广泛应用,人们又将氧化铝膜作为稳态电子透射窗,与常用的 SiN 相比更稳定,加速电压更小^[18];还可作为低介电常数的电介质,应用于微电子线路中 Al 布线工艺^[19]。

随着纳米线、管等新材料研究热潮的兴起,人们逐渐发现利用孔性氧化铝作为模板,通过限域生长是一条制备一维纳米新材料的十分有效的途径。

2.1 电化学沉积制备一维纳米材料

以制备多孔氧化铝模板时余留的金属铝基底或通过溅射(或蒸镀)在模板上制作的金属薄膜作电极,以被组装物的盐溶液为电解液,通过交流或直流电沉积的方法,可在氧化铝孔道内组装纳米线或纳米管。例如,图 5 为我们实验室以余留金属铝基作电



图 5 孔性氧化铝模板中组装 Fe 纳米线后的 SEM 照片以及溶去模板后 Fe 纳米线的 TEM 照片

Fig. 5 SEM image of the Fe nanowires array fabricated in porous alumina template and the corresponding TEM image of the Fe nanowires after removing the template

极,在多孔氧化铝模板中用 16V 交流电沉积 10min 后所得金属铁纳米线阵列的扫描及溶去模板后样品的透射电镜照片。磁性纳米线阵列在研制新型存储器方面有重要应用前景。经 NaOH 处理溶掉模板后的 Fe 纳米线由于磁相互作用而聚集,其直径与模板孔径基本一致。本方法在 Cu、Pt、Au、Fe、Co、Ni、聚吡咯、聚苯胺、CdS 等多种金属、导电高分子及某些半导体材料体系中获得成功^[20-24]。Cao H. Q 等先在氧化铝模板中组装聚苯胺纳米管,在其中用电化学沉积金属铁、钴、镍等纳米线,再用热解方法将聚苯胺纳米管转化为碳纳米管,可得到精细纳米结构并对金属纳米线予以保护^[25-27]。

2.2 化学气相沉积(CVD)法制备纳米材料

在放置孔性氧化铝模板的实验装置中通入易于分解或反应的气体,这些气体在通过模板孔壁时发生热解或化合,可在孔道内形成纳米管、纳米线或者纳米粒子。我们用化学气相沉积的方法在 660℃ 下热分解乙炔,在模板中得到了碳纳米管阵列(见图 6);通过微波等离子体辅助化学气相沉积(MW-PECVD)的方法用 CH₄ 和 H₂ 反应得到了碳纳米管阵列^[28, 29],这是一种低温(< 520℃)条件下合

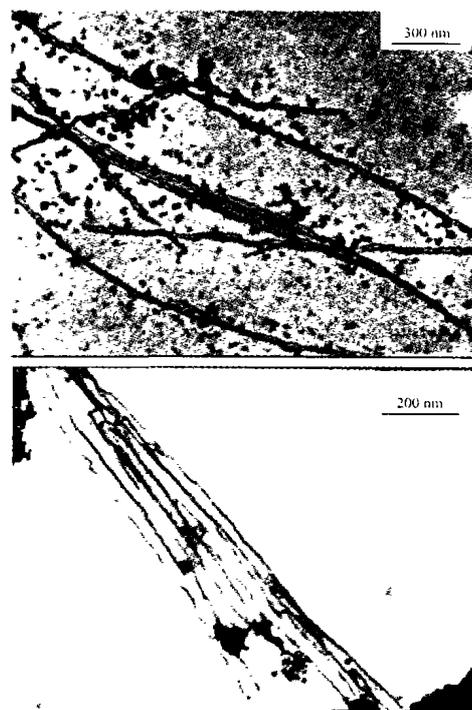


图 6 化学气相沉积法在模板中组装的碳纳米管阵列的 TEM 照片

Fig. 6 TEM images of the aligned carbon nanotubes fabricated in porous alumina by CVD

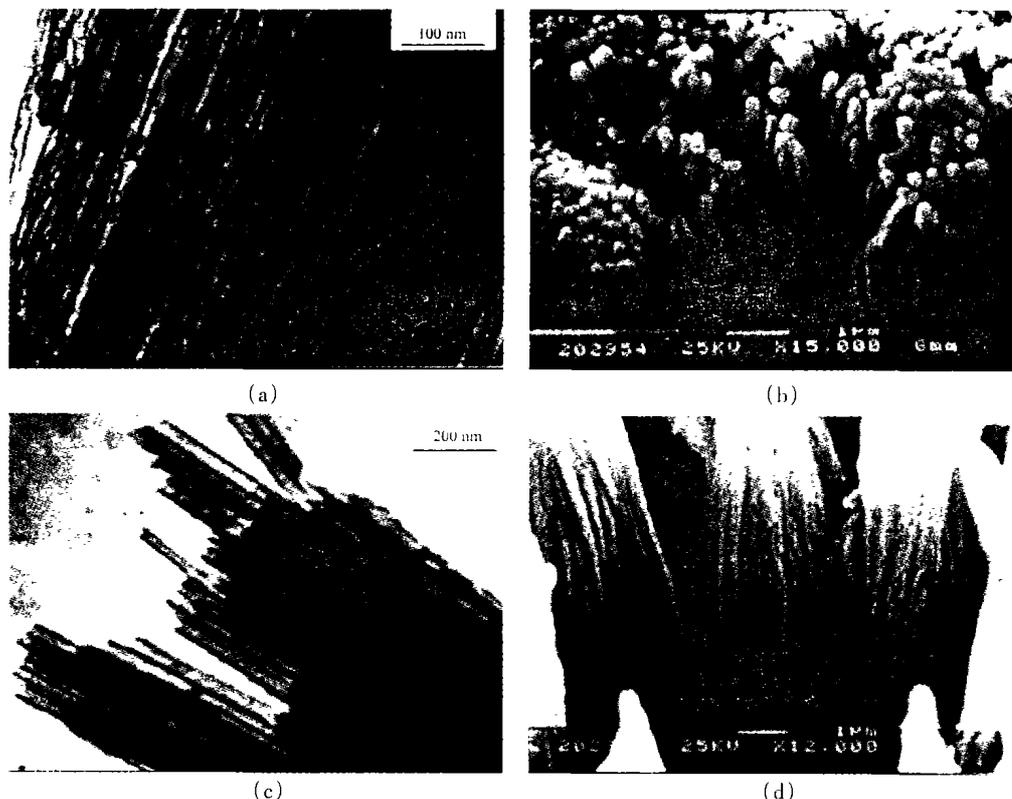


图 7 用 MW-PECVD 法在模板中组装的碳及氮化硼纳米管的 TEM 和 SEM 照片

Fig. 7 TEM and SEM images of carbon and BN nanotubes fabricated in porous alumina by MW-PECVD

(a), (b): carbon nanotubes, (c), (d): BN nanotubes

成碳纳米管的有效方法, 有望在平板显示器^[30]以及冷阴极场电子发射源^[31]等方面发挥作用。我们还利用微波等离子体容易活化氮源的特点以 B_2H_6 和 NH_3/N_2 为原料成功合成了 BN 纳米管阵列^[32](见图 7), 大大降低了 BN 的合成温度^[33]。Zhang L. D. 等人用真空蒸镀到模板孔道中的 In 作为催化剂, 用 $Ga + GaO_2$ 和 NH_3 在 $1000^\circ C$ 下反应合成了 GaN 纳米线阵列^[34]。可见, 本方法在合成碳纳米管、BN 纳米管、GaN 纳米线以及 SiO_2 纳米光源等方面均获得了成功^[35-37]。

2.3 模板转换

孔性氧化铝模板还可用作面罩或用于复制其它模板。Masuda H. 的研究小组用两端开口的氧化铝模板作为面罩, 在硅基片上镀上了 Au 的纳米点阵, 大大的降低了面罩的尺寸, 而且也能得到更为有序的纳米点阵, 具体工艺见图 8^[38]。他们还发展了一种方法, 将氧化铝模板作为模子, 复制得到了更为稳定和便于操作的金属孔道结构。具体做法是: 将氧化铝孔道两端打通, 并在一面真空蒸镀上一层金属作为电极, 再注入甲基丙烯酸甲酯 (MMA) 进行聚合。

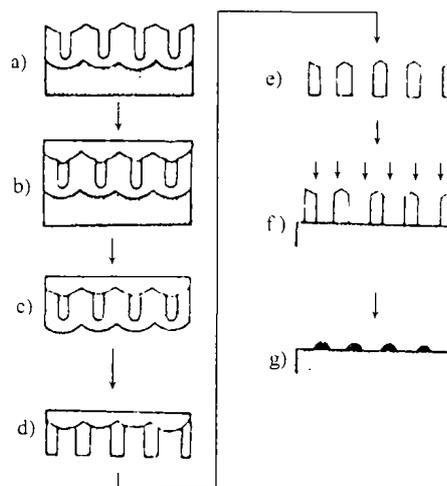


图 8 在 Si 基片上制备纳米金点阵 (a) 孔性氧化铝, (b) 包裹层, (c) 除去 Al, (d) 除去阻碍层, (e) 除去保护层, (f) 放置在 Si 基片上蒸镀 Au, (g) Si 基片上的纳米金点阵

Fig. 8 Schematic diagrams for fabrication of Au nanodot on Si (a) porous alumina, (b) coating layer, (c) removal of Al layer, (d) removal of barrier layer, (e) removal of protecting layer, (f) evaporation of Au on Si through mask, (g) Au nanodot array on Si substrate

溶掉氧化铝膜后就得到了聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 模板, 再在该模板上无电极沉积得到完全复制于氧化铝的 Pt 或 Au 的纳米孔道结构, 见图 9^[39]。

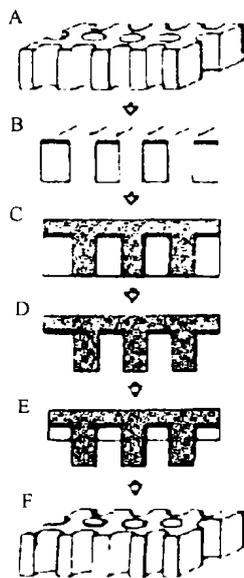


图 9 复制氧化铝的纳米孔道: (A) 孔性氧化铝, (B) 真空蒸镀金属, (C) 注入并聚合 MMA, (D) PMMA 模子, (E) 化学镀法镀上金属, (F) 金属孔道阵列

Fig. 9 Schematic diagrams of the process for the fabrication of the metal nanohole array: (A) porous alumina, (B) metal deposition with vacuum evaporation, (C) injection and polymerization of methyl methacrylate, (D) PMMA negative type, (E) electroless metal deposition, (F) metal hole array

2.4 其他应用

除了电化学沉积、化学气相沉积外, 还可以用化学聚合以及溶胶凝胶法在氧化铝模板内组装一维纳米材料。利用这些方法, 已经成功合成了高分子材料如聚吡咯、聚丙烯腈以及多种无机半导体材料如 C_{70} 、 TiO_2 、 ZnO 、 WO_3 等的纳米管及纳米线阵列^[40-43]。例如 Martin C. R. 等的研究小组用多孔氧化铝作为过滤膜, 真空抽滤 1 mL 5% 的聚合物溶液, 抽滤完后残留在孔道中的聚合物就形成了管状结构。他们通过该法合成了各种管径的聚苯乙烯、聚 1, 1- 二氟乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯等纳米管^[44]。

3 结论

本文简要总结了孔性氧化铝模板的合成、结构及其在组装一维纳米新材料方面的应用。用孔性氧

化铝模板合成一维纳米材料具有简便、可控、适用范围广泛等重要特点, 必将在一维纳米新材料的研究进程中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Murphy J. P., Michelson C. E. *Proc. Conf. Anodiz. Aluminum*, Nottingham: Alumin. Federation, **1961**, p114.
- [2] Despic A. R., Parkhutik V. P. *Modern Aspects of Electrochemistry*, Bockris J. O'M. et al (Ed.), Plenum: New York, **1989**, **20**, 397.
- [3] Parkhutik V. P., Shershulsky V. I. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **1992**, **25**, 1258.
- [4] Li J., Papadopoulos C., Xu J. *Nature*, **1999**, **402**, 253.
- [5] Masuda H., Hasegawa F., Ono S. *J. Electrochem. Soc.*, **1997**, **144**(5), L127.
- [6] Nakamura S., Saito M., Huang L. F. et al *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1992**, **31**, 3589.
- [7] Tsai S. H., Chiang F. K., Tsai T. G. et al *Thin Solid Films*, **2000**, **366**, 11.
- [8] Furneaux R. C., Rigby W. R., Davidson A. P. *U. S. Patent, No. 4*, 687, 551, **1987**.
- [9] Chou S. Y., Krauss P. R., Zhang W. et al *J. Vac. Sci. Technol.*, **1997**, **B15**(6), 2897.
- [10] Masuda H., Yamada H., Satoh M. et al *Appl. Phys. Lett.*, **1997**, **71**(19), 2770.
- [11] Masuda H., Yada K., Osaka A. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1998**, **37**, L1340.
- [12] Masuda H., Satoh M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1996**, **35**, L126.
- [13] Jessensky O., Muller F., Gosele U. *Appl. Phys. Lett.*, **1998**, **72**, 1173.
- [14] Jessensky O., Muller F., Gosele U. *J. Electrochem. Soc.*, **1998**, **145**(11), 3735.
- [15] Keller F., Hunter M. S., Robinson D. L. *J. Electrochem. Soc.*, **1953**, **100**(9), 411.
- [16] Hernandez A., Martinez F., Martin A. et al *J. Colloid Interface Sci.*, **1995**, **173**, 284.
- [17] Alfonso M. J., Menendez M., Santamaria J. *Catalysis Today*, **2000**, **56**, 247.
- [18] Dell T., Hochberg M., Barsic D. et al *Sensors and Actuators*, **2000**, **87**, 52.
- [19] Lazarouk S., Katsouba S., Deimanovich A. et al *Solid-State Electronics*, **2000**, **44**, 815.
- [20] Pontifex G. H., Zhang P., Haslett T. L. et al *J. Phys. Chem.*, **1991**, **95**, 9989.

- [21] Foss C. A., Hornyak G. L., Stockert J. A., Martin C. R. *J. Phys. Chem.*, **1992**, **96**, 7497.
- [22] Brumilik C. J., Martin C. R. *J. Am. Chem. Soc.*, **1991**, **113**, 3174.
- [23] Che G., Miller S. A., Fisher E. R., Martin C. R. *Anal. Chem.*, **1999**, **71**, 3187.
- [24] Routkevitch D., Bigioni T., Moskovits M. et al *J. Phys. Chem.*, **1996**, **100**, 14037.
- [25] Cao H. Q., Xu Z., Sheng D., Hong J. M., Sang H., Du Y. W. *J. Mater. Chem.*, **2001**, **11**, 958.
- [26] Cao H. Q., Xu Z., Sang H., Sheng D., Tie C. Y. *Adv. Mater.*, **2001**, **13**, 121.
- [27] Cao H. Q., Tie C. Y., Xu Z., Hong J. M., Sang H. *Appl. Phys. Lett.*, **2001**, **78**, 1592.
- [28] CHEN Xin(陈 新), HU Zheng(胡 征), WANG Xi-Zhang(王喜章), WU Qiang(吴 强), CHEN Yi(陈 懿), YANG Shao-Guang(杨绍光), DU You-Wei(都有为) *Gaodeng Xuexiao Huaxue Xuebao(Chem. J. Chin. Univ.)*, **2001**, **22**(5), 731.
- [29] Wang X. Z., Hu Z., Wu Q., Chen Y. *Catalysis Today*, **2002**, **72**, 205.
- [30] Ren Z. F., Huang Z. P., Xu, J. W. et al *Science*, **1998**, **282**, 1105.
- [31] Fan S. S., Chapline M. G., Franklin N. R. et al *Science*, **1999**, **283**, 512.
- [32] HU Zheng(胡 征), WANG Xi-Zhang(王喜章), WU Qiang(吴 强), CHEN Yi(陈 懿) *A Method of Preparation for BN Nanotube. Zhongguo Faming Zhuanti (Chinese Patent) Patent Appl.*, 01113556. 5, 2001
- [33] Sen R., Satishkumar B. C., Govindaraj A. et al *Chem. Phys. Lett.*, **1998**, **287**, 671.
- [34] Cheng G. S., Chen S. H., Zhu X. G., Mao Y. Q., Zhang L. D. *Mater. Sci. and Engin.*, **2000**, **A286**, 165.
- [35] Li J., Papadopoulos C., Xu J. M. et al *Appl. Phys. Lett.*, **1999**, **75**, 367.
- [36] Zhang L. D., Meng G. W., Philipp F. *Mater. Sci. and Engin.*, **2000**, **A286**, 34.
- [37] Heilmann A., Jutzi P. et al *Adv. Mater.*, **1998**, **10**(5), 398.
- [38] Masuda H., Satoh M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1996**, **35**, L126.
- [39] Masuda H., Fukuda K. *Science*, **1995**, **268**, 1466.
- [40] Cao H. Q., Xu Z., Wei X. W., Ma X., Xue Z. L. *Chem. Comm.*, **2001**, **6**, 541.
- [41] Parthasathy R. V., Phani K. L. N., Martin C. R. *Adv. Mater.*, **1995**, **7**, 896.
- [42] Parthasathy R. V., Martin C. R. *Chem. Mater.*, **1997**, **6**, 1627.
- [43] Lakshmi B. B., Dorhont P. K., Martin C. R. *Chem. Mater.*, **1997**, **9**, 857.
- [44] Veronica M. C., Martin C. R. *Chem Mater.*, **1999**, **11**, 1363.

Porous Alumina Template in Preparation of One-dimensional Novel Nanomaterials

WU Qiang HU Zheng* WANG Xi-Zhang YANG Yong CHEN Yi

(Laboratory of Mesoscopic Materials Science, College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093)

The importance of nanomaterials, especially the one-dimensional arrays represented by the aligned carbon nanotubes, has enhanced the research interest of template-synthesis method. In this paper, we have briefly reviewed the development of the preparation and applications of porous alumina template in recent years. In combination with our own work, the importance of porous alumina template for the synthesis and fabrication of one-dimensional novel nanomaterials has been exhibited.

Keywords: porous alumina template one-dimensional nanomaterial array