

# 氧化锌纳米线介电电泳组装及电学特性的实验研究

张玉婷<sup>1</sup>, 安立宝<sup>1\*</sup>, 蔡小勇<sup>2</sup>

(1. 华北理工大学机械工程学院, 河北 唐山 063210;

2. 国家纳米科学中心, 中国科学院纳米标准与检测重点实验室, 北京 100190)

**摘要:**为了将氧化锌(ZnO)纳米线有效集成到微纳器件上,采用介电电泳法对一维材料 ZnO 纳米线进行组装。研究了介电电泳(DEP)组装过程中外加交变电压幅值、ZnO 纳米线悬浮液质量浓度和外加电场作用时间等组装参数对组装结果的影响,结果表明,组装到电极间 ZnO 纳米线的数量随着上述参数值的增大而增加。同时,对组装后的 ZnO 纳米线进行了电学性质测量以及组装形态和接触电阻分析,组装后 ZnO 纳米线的  $I-V$  特性曲线近似呈线性,且在紫外光照射下,ZnO 样件显示出良好的响应特性。

**关键词:**氧化锌纳米线;介电电泳;组装参数; $I-V$  特性;接触电阻

中图分类号:TN4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)02-0102-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.02.024

## Experimental study on dielectrophoretic assembly and electrical characteristics of ZnO nanowires

ZHANG Yu-ting<sup>1</sup>, AN Li-bao<sup>1\*</sup>, CAI Xiao-yong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. CAS Key Laboratory of Standardization and Measurement for Nanotechnology, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to integrate effectively ZnO nanowires onto micro/nano-devices, ZnO nanowires, a kind of one-dimensional nano-materials, is assembled via dielectrophoresis (DEP) method. The effects of the DEP assembly parameters such as the amplitude of applied alternating voltage, the mass concentration of ZnO nanowire suspension and the effecting duration of applied electric field on the assembly outcome are studied. The results show that the number of ZnO nanowires assembled between the electrodes increases with the increase of the values of above-mentioned parameters. The electrochemical properties, assembling morphology and contact resistance of assembled ZnO nanowires are detected and analyzed as well. The  $I-V$  characteristic curves of the assembled ZnO nanowires exhibit approximate linearity, and the nanowire samples show good response properties under UV irradiation.

**Key words:** ZnO nanowire; dielectrophoresis; assembly parameter;  $I-V$  characteristics; contact resistance

氧化锌(ZnO)纳米线作为“第三代半导体材料”的典型代表,是一种 II~VI 族直接带隙的两性金属氧化物,禁带宽度约为 3.37 eV,激子束缚能约为 60 meV,熔点为 1975°C<sup>[1-2]</sup>。ZnO 纳米线具有独特的六方结构、良好的热稳定性、优良的生物相容性、大的比表面积和高的电子迁移率<sup>[1-4]</sup>,具备半导体、光电、压电、热电和气敏等特性,在晶体管、传感器和场发射等诸多领域有着广阔的应用价值<sup>[5-8]</sup>。

Fu 等<sup>[9]</sup>在 2 块平行的薄 Ti 基底表面生长出 Cu-ZnO 纳米线阵列,并使 2 块 Ti 基底分别覆盖聚

酰亚胺薄膜和 Al 膜,将整个装置与电源相连,制成自供电的气体检测仪原型,可用于检测 H<sub>2</sub>S 等有害气体,具有较强的选择性和优良的响应能力。Xu 等<sup>[10]</sup>在 GaN 层上预先制备 Ni/Au 电极,将石墨烯转移到 GaN 层上作为透明导电层,再在石墨烯表面生长出 ZnO 纳米线,使外部电源与 Ni/Au 电极相连,制备 Ni/Au-石墨烯-ZnO 纳米线结构的 LED 装置。相对于无 ZnO 纳米线的 LED 器件,该装置反向漏电现象减弱,开启电压和工作电压降低,电流扩展性能增强,光电转化效率增大,工艺简单,成本低廉。

收稿日期:2017-07-12

基金项目:国家自然科学基金(51472074,51172062);河北省“百人计划”资助项目(E2012100005);华北理工大学研究生创新项目(2017S25)

作者简介:张玉婷(1990-),女,硕士研究生,主要从事碳纳米功能材料组装研究,zhangyuting5682@163.com;安立宝(1965-),男,博士,教授,主要从事微纳制造技术、碳纳米功能材料特性及应用的研究,通讯联系人,lan@ncst.edu.cn。

为了使 ZnO 纳米线在各种微纳器件上得到应用,实现 ZnO 纳米线在器件中的组装,笔者考察了 ZnO 纳米线介电电泳组装过程中外加交变电压幅值、ZnO 纳米线悬浮液质量浓度以及外加电场作用时间等组装参数对组装结果的影响,并对组装后的 ZnO 纳米线样品进行不同光照情况下的电学性质测量以及组装形态和接触电阻分析,为 ZnO 纳米线在光敏传感领域进一步应用奠定基础。

## 1 介电电泳原理

介电电泳 (DEP) 是介电液中的中性粒子在非均匀电场作用下发生极化效应诱导出偶极矩,粒子受到非平衡的介电电泳力作用向电极间隙运动完成组装<sup>[11-14]</sup>。ZnO 纳米线介电电泳组装示意图如图 1 所示。

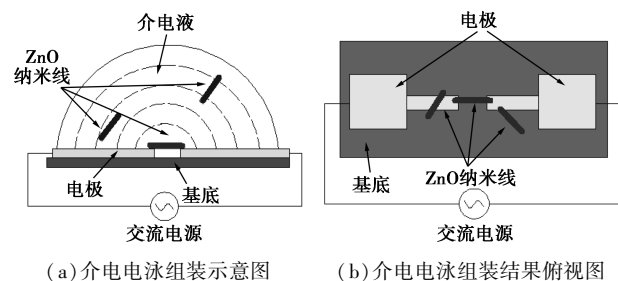


图 1 ZnO 纳米线介电电泳组装原理

介电电泳力的计算模型可以表述为<sup>[15]</sup>:

$$F_{\text{DEP}} = (\pi r^2 l / 6) \varepsilon_m \text{Re} \{ (\varepsilon_p^* - \varepsilon_m^*) / \varepsilon_m^* \} \nabla E^2 \quad (1)$$

在计算介电电泳力时,复合介电常数定义为:

$$\varepsilon^* = \varepsilon - i(\sigma/\omega) \quad (2)$$

其中: $r$ 和 $l$ 分别为 ZnO 纳米线的半径和长度; $\varepsilon$ 为介电常数; $\sigma$ 为电导率; $\omega$ 为外加交变电场的角频率; $\varepsilon^*$ 为复合介电常数;下标 $m$ 和 $p$ 分别代表介电液和中性粒子; $\text{Re}$ 是克劳修斯-莫索提(C-M)因子的实部值; $\nabla E^2$ 是电场均方值平方的梯度。

## 2 实验条件

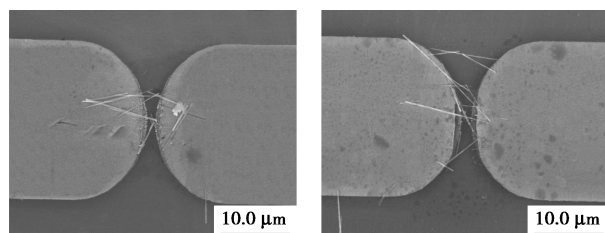
用电子分析天平称取 ZnO 纳米线(长度为 5~15  $\mu\text{m}$ ,直径为 30~60 nm) 1 mg,分散到 10 mL 的乙醇溶液中。经超声震荡 30 min,将 ZnO 纳米线悬浮液等分成 2 份,采用乙醇分别对其进行 1:100 和 1:25 比例稀释,再经超声波震荡均匀,得到 1  $\mu\text{g}/\text{mL}$  和 4  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的 ZnO 纳米线悬浮液。实验中所用半圆形电极是端部半径为 10  $\mu\text{m}$ 、最小电极间隙为 2  $\mu\text{m}$  的 Au(Ti 为粘接层)平行电极。用微量进样器取 4  $\mu\text{L}$  溶液,滴加到电极间隙处。介电电泳组装电源由精密电感电容电阻(LCR)测试仪提供,由

LabVIEW 程序控制 LCR 测试仪的输出电压和通电时间。组装结束后,用半导体参数测试仪(Keithly 4200S)对 ZnO 组装样件的电阻值进行测量。采用手持式紫外灯作光源,其波长为 365 nm,强度为 0.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 外加交变电压幅值对组装结果的影响

外加交变电压幅值大小影响 ZnO 纳米线在非均匀电场中受到介电电泳力的大小。由式(1)可知,随着外加交变电压幅值的增加,电场强度和梯度增加,悬浮液中 ZnO 纳米线受到的介电电泳力增大,加快了 ZnO 在溶液中的运动速度,也使更多的 ZnO 纳米线受到电场力作用向电场较强的电极间隙运动,完成组装。因此,在 ZnO 纳米线悬浮液质量浓度和外加电场作用时间等条件一定时,适当地提高交变电压,使悬浮液中 ZnO 受力增大,从而使更多的 ZnO 纳米线在电极间隙完成组装。交变电压幅值为 2.5 V 时,少量 ZnO 纳米线组装到电极间隙,如图 2(a)所示;当交变电压幅值为 5.0 V 时,会存在更多的 ZnO 纳米线在电极间隙完成组装,如图 2(b)所示。



(a) 2.5 V p-p

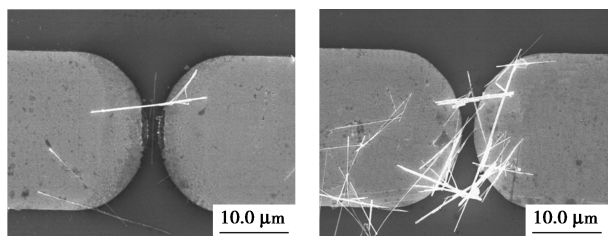
(b) 5.0 V p-p

图 2 交变电压幅值对组装结果的影响

注:ZnO 纳米线悬浮液质量浓度为 1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,外加电场作用时间为 60 s。

### 3.2 ZnO 纳米线悬浮液质量浓度对组装结果的影响

在相同的外加交变电压幅值和电场作用时间实验条件下,ZnO 纳米线悬浮液质量浓度越高,在组装过程中悬浮液中会有更多的 ZnO 纳米线受到介电电泳力作用,从而被吸引到电极间隙,完成组装。当 ZnO 纳米线质量浓度为 1  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时,只有少量根数的 ZnO 纳米线运动到电极间隙,如图 3(a)所示;对比图 3(b),当 ZnO 纳米线溶液质量浓度为 4  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时,多根 ZnO 纳米线在电极间隙完成组装。即 ZnO 纳米线悬浮液的质量浓度越高,组装的 ZnO 纳米线根数越多。



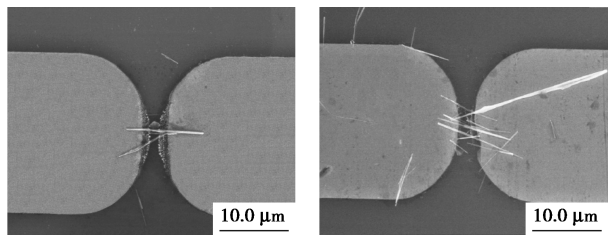
(a) 1 μg/mL (b) 4 μg/mL

图 3 悬浮液质量浓度对组装结果的影响

注: 交变电压幅值为 2.5 V p-p, 外加电场作用时间为 60 s。

### 3.3 外加电场作用时间对组装结果的影响

外加电场的作用时间即 ZnO 纳米线在电场中受到介电电泳力的时间, 电场作用时间的长短决定着 ZnO 纳米线在介电电泳力下运动时间的长短。适当地延长电场的作用时间, 会使更多的 ZnO 纳米线在介电电泳力作用下向电极间隙运动, 最终在电极间隙完成组装。由图 4 可以看出, 外加电场时间为 120 s 时, 电极间隙完成组装的 ZnO 纳米线的根数明显多于外加电场时间为 60 s 的 ZnO 纳米线的根数。即更长的外加电场作用时间, 在电极间隙完成组装的 ZnO 纳米线的数量较多; 反之, 组装的数量较少。



(a) 60 s (b) 120 s

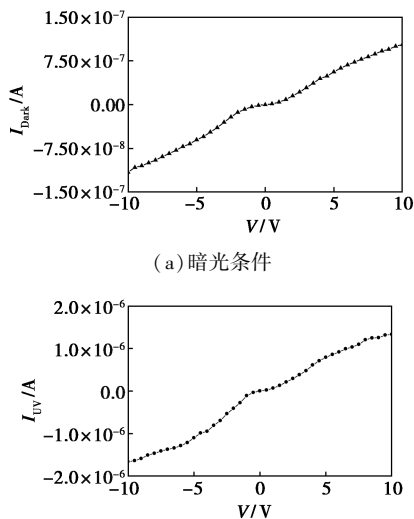
图 4 电场作用时间对组装结果的影响

注: 交变电压幅值为 2.5 V p-p, ZnO 纳米线悬浮液质量浓度为 1 μg/mL。

### 3.4 组装后 ZnO 纳米线电学特性和紫外响应性能分析

介电电泳条件为 2.5 V p-p, ZnO 纳米线悬浮液质量浓度为 1 μg/mL, 电场作用时间为 120 s 时, 组装后 ZnO 纳米线  $I-V$  特性曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出, ZnO 纳米线  $I-V$  曲线均近似呈线性, 显示出良好的欧姆接触。同时 2 条  $I-V$  曲线呈现出轻微的非线性, 在 2 个 M-S (金属-半导体) 界面形成了反向的肖特基势垒, 存在较弱的肖特基接触特征。整个测量电路构成 1 个 M-S-M (金属-半导体-金属) 的结构。根据测量结果, 可得暗光条件下 ZnO 纳米线样件的电阻均值为 120.47 MΩ, 而紫外光照射条件下, 电路中 ZnO 纳米线电阻均值为

7.13 MΩ。ZnO 纳米线在紫外光照下的电阻比暗光条件下的电阻明显降低, 相同电压值下光电流 ( $I_{UV}$ ) 比暗电流 ( $I_{Dark}$ ) 明显增大, 且光暗电流比值均在 13 以上, 表明 ZnO 纳米线对紫外光有着良好的响应特性。ZnO 紫外检测原理为在热平衡条件下, 暗态时 ZnO 纳米线表面的电子吸附空气中的氧气分子形成氧气负离子, 这时 ZnO 纳米线表面形成较低电导的耗尽层, 使 ZnO 纳米线的电阻较高<sup>[6]</sup>; 而在紫外光照射下, ZnO 纳米线内部产生光生电子-空穴对, 在内建电场的作用下, 空穴容易迁移到表面, 光生空穴与表面的氧气负离子复合, 释放氧气, 从而使表面高电阻的耗尽层变薄<sup>[16]</sup>。同时在 ZnO 纳米线内部留下光生电子参与导电, 增强了 ZnO 纳米线的导电性, ZnO 纳米线这种特殊的光电特性可用于制备紫外线纳米检测仪等<sup>[6, 16-17]</sup>。



(a) 暗光条件

(b) 紫外光照射条件

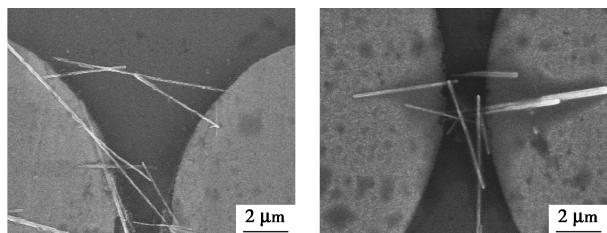
图 5 ZnO 纳米线  $I-V$  曲线

### 3.5 组装后 ZnO 纳米线形态及接触电阻分析

根据半导体材料 ZnO 纳米线组装结果的不同, 多个 ZnO 纳米线组装试样的电阻在数 MΩ 至数百 MΩ 之间。而 ZnO 纳米线接触电阻较高, 主要有三方面因素影响<sup>[18-20]</sup>: 一是金属电极的润湿性和功函数。金属润湿性良好, 则功函数对接触电阻影响较小, 此时 ZnO 纳米线与金属电极形成良好的欧姆接触。反之, 金属的润湿性差, 则功函数影响较大, ZnO 纳米线与金属电极之间功函数差值较大, 导致隧穿势垒增加, 形成肖特基接触, 增大接触电阻<sup>[18]</sup>。二是 ZnO 纳米线本身性质, 如表面缺陷和表面耗尽层等因素。ZnO 纳米线低电导的耗尽层会直接影响电子的传递, 使接触势垒增加, 形成高接触电阻<sup>[19-20]</sup>。三是 ZnO 纳米线与金属电极之间的接触

情况。有效且紧密的机械连接能有效降低接触势垒。但组装过程中会因搭接情况不良或接触间隙含有杂质等因素,使 ZnO 纳米线与金属电极机械连接不牢固,影响电子运输能力,使接触电阻变大<sup>[19-20]</sup>。

本组装实验中,由于 ZnO 纳米线具有较大的长径比,组装后 ZnO 纳米线之间会存在搭接、翘起、团聚等现象,使得 ZnO 纳米线与金属接触情况变差,减小了有效接触面积,增加了接触电阻,如图 6 所示。由图 6(a)可以看出,ZnO 纳米线之间产生了相互搭接,形成了金属电极-ZnO 纳米线-ZnO 纳米线-金属电极结构,同时出现 ZnO 纳米线翘起现象,减小了金属电极与 ZnO 纳米线之间的有效接触面积,影响了电子的传递,使接触电阻增大。由图 6(b)可以看出,ZnO 纳米线出现了团聚现象,使得 ZnO 纳米线之间的相互影响增大,接触状况变差,同样增加了回路中的总电阻。ZnO 纳米线较高的接触电阻影响了其电学特性,使光暗电流比值降低,额外功耗增加,严重影响了 ZnO 微纳器件的性能。因此,有效地改善 ZnO 纳米线本身的性质和降低组装后较高的接触电阻是提高基于 ZnO 纳米线器件的性能和使用寿命的重要前提。



(a) 搭接、翘曲

(b) 团聚

图 6 组装后 ZnO 纳米的形态

## 4 结论

(1)通过介电电泳法在金属电极上定向排列了 ZnO 纳米线,并制备了 ZnO 纳米器件原型,可用于紫外线、有害气体检测等领域。通过控制外加交变电压、ZnO 纳米线悬浮液质量浓度和外加电场作用时间等实验条件,可实现不同数量 ZnO 纳米线的组装。

(2)ZnO 纳米线在电极间隙的组装数量均随介电电泳组装过程中外加交变电压幅值、ZnO 纳米线悬浮液质量浓度和外加电场作用时间等组装参数的增大而增多。当需要在电极上组装较少根数的 ZnO 纳米线时,可适当降低组装参数值;反之,适当提高组装参数值。由此,合理选择介电电泳组装参数,可提高 ZnO 纳米线的组装效率。

(3)通过对组装后的 ZnO 纳米样件进行电学性质测量发现,ZnO 纳米线对紫外光有着良好的响应,可用于制备紫外线传感器等光敏器件。但实际电路中接触电阻较大,影响了 ZnO 纳米器件的性能,因此需采用有效的方法降低 ZnO 纳米线的接触电阻。

## 参考文献

- [1] Riaz M, Song J, Nur O, *et al.* Study of the piezoelectric power generation of ZnO nanowire arrays grown by different methods [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(4): 628-633.
- [2] Dugaiczky L, Ngo-Duc T T, Gacusan J, *et al.* Resistive switching in single vertically-aligned ZnO nanowire grown directly on Cu substrate [J]. *Chemical Physics Letters*, 2013, 575(12): 112-114.
- [3] 李江江,高志远,薛晓玮,等.片上制备横向结构 ZnO 纳米线阵列紫外探测器件[J].*物理学报*, 2016, 65(11): 255-263.
- [4] Johannes A, Noack S, Paschoal J W, *et al.* Enhanced sputtering and incorporation of Mn in implanted GaAs and ZnO nanowires [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(39): 871-880.
- [5] Karthik K R G, Ramanujam P R, Hai L, *et al.* A ZnO nanowire resistive switch [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(12): 123114-1-123114-4.
- [6] Li Y, Della V F, Simonnet M, *et al.* High-performance UV detector made of ultra-long ZnO bridging nanowires [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(4): 045501-1-045501-5.
- [7] Baxter J B, Aydil E S. Metallorganic chemical vapor deposition of ZnO nanowires from zinc acetylacetonate and oxygen [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 156(1): 52-58.
- [8] 付晓君,张海英,徐静波,等.氧化锌纳米线晶体管的电学特性研究[J].*半导体技术*, 2011, 36(10): 778-781.
- [9] Fu Y, Zhao Y, Wang P, *et al.* High response and selectivity of a Cu-ZnO nanowire nanogenerator as a self-powered/active H<sub>2</sub>S sensor [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, 17(3): 2121-2126.
- [10] Xu K, Xie Y, Ma H, *et al.* ZnO nanorods/graphene/Ni/Au hybrid structures as transparent conductive layer in GaN LED for low work voltage and high light extraction [J]. *Solid State Electronics*, 2016, 126: 5-9.
- [11] An L, Friedrich C R. Dielectrophoretic assembly of carbon nanotubes and stability analysis [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2013, 23(4): 367-373.
- [12] Suehiro J, Nakagawa N, Hidaka S, *et al.* Dielectrophoretic fabrication and characterization of a ZnO nanowire-based UV photosensor [J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(10): 2567-2573.
- [13] An L, Friedrich C R. Process parameters and their relations for the dielectrophoretic assembly of carbon nanotubes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(7): 074314-1-074314-7.
- [14] 李文,安立宝.碳纳米管介电电泳精确及可控组装技术[J].*高分子通报*, 2016(8): 44-50.

高为 240 mm,底部设有砂芯曝气头,由空气压缩机经气体流量计供气。运行温度控制为  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。1 个周期为 6 h,好氧颗粒污泥培养时期进水为 2 min,曝气为 340 min,刚开始沉淀为 5 min,随后逐步调至 2 min,排水 2 min,静置时间随沉淀时间调整,由 11 min 逐步升至 14 min,用定时器进行控制。此外,考察污泥稳定性时,按照末期运行方式进行。

### 1.2 进水水质

实验用水采用人工模拟生活污水,其中以葡萄糖为碳源配制 COD 为 450 mg/L 左右,以氯化铵为氮源,磷酸氢二钾和磷酸二氢钾为磷源,分别配制  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为 40~50 mg/L、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  为 4~6 mg/L,通过投加适量  $\text{NaHCO}_3$  控制 pH 在 8 左右。其他元素为  $\text{FeSO}_4$  20 mg/L、 $\text{MgSO}_4$  30 mg/L、微量元素 1 mL/L,微量元素的组成为  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.05 g/L、 $\text{CaCl}_2$  15 g/L、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.05 g/L、 $\text{KI}$  0.05 g/L、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.1 g/L、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.1 g/L、 $\text{H}_3\text{BO}_3$  0.1 g/L、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.1 g/L。

### 1.3 接种污泥

实验中好氧絮状污泥取自南京市某生活污水处理厂二沉池,MLSS 为 5 910 mg/L,SVI 为 57.54 mL/g,接种前经过 2 周的驯化。实验接种厌氧颗粒污泥取自上流式厌氧污泥床,颗粒粒径为 1.0~3.0 mm,SVI 为 25 mL/g,接种前经过筛选、淘洗,再用清水空曝 4 d,此时颗粒污泥颜色变浅,部分成铁锈红色。

### 1.4 分析方法

COD、氨氮、总氮、 $\text{NO}_2^-$ 、MLSS、SVI 等均采用国家标准方法进行测定<sup>[9]</sup>;DO 采用 JPBj-608 溶解氧分析仪;颗粒污泥粒径分布采用 Mastersizer 2000 马尔文激光粒度仪;污泥形态采用电子显微镜观察;表面结构特征通过扫描电镜(SEM)获得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 好氧颗粒污泥培养

反应器运行到第 5 d 时,部分厌氧颗粒污泥出现解体现象,颜色变浅,大部分颗粒污泥呈浅褐色,小部分颗粒污泥呈黄色。由于系统为好氧环境,大量好氧菌繁殖,反应器内絮状污泥量增加。运行到第 11 d,沉淀时间由 5 min 缩短为 3 min,沉降性能较差的絮状污泥和厌氧颗粒污泥碎片排出系统。运行到第 18 d,系统中厌氧颗粒污泥的颜色全部变为黄色,电子显微镜观察到颗粒污泥表面有大量的丝状菌缠绕,且附着少量原生动物,颗粒中心存在明显的“内核”。运行到第 36 d,好氧颗粒污泥基本形成,外形轮廓清晰可见,大部分颗粒粒径为 3 mm 左右。成熟好氧颗粒污泥的 SVI 值为 37 mL/g,MLSS 为 9 g/L 左右,对 COD、氨氮、总氮的去除稳定在 92%、92%、76%左右。

在好氧颗粒污泥培养成熟(36 d)后,对污泥的外观进行电镜扫描,如图 2 所示。由图 2 可以看出,颗粒污泥表面不平整,存在大量褶皱和洞眼,有利于溶解氧和污染物的传递。此外,还观察到颗粒污泥主要由球菌和杆菌组成,结构较为密实,沉降性能良好。

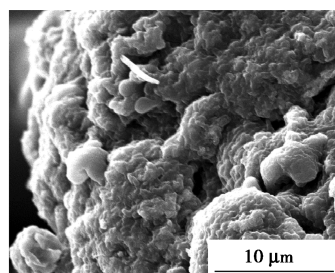


图 2 成熟好氧颗粒污泥的扫描电镜照片

(上接第 105 页)

- [15] Tao Q, Liu L, Li G. Selective manipulation of ZnO nanowires by controlled dielectrophoretic force [C]//IEEE, International Conference on Nanotechnology, Portland, USA, August 15 - 18, 2011; 1106-1109.
- [16] Li Y, Valle F D, Simonnet M, et al. Competitive surface effects of oxygen and water on UV photoresponse of ZnO nanowires [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(2): 023110-1-023110-3.
- [17] Gong B, Shi T, Zhu W, et al. UV irradiation-assisted ethanol detection operated by the gas sensor based on ZnO nanowires/optical fiber hybrid structure [J]. Sensors and Actuators B;

Chemical, 2017, 245: 821-827.

- [18] Kryvchenkova O, Cobley R J, Kalna K. The current crowding effect in ZnO nanowires with a metal contact [J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(1): 309-314.
- [19] Lin Y F, Jian W B, Wang C P, et al. Contact to ZnO and intrinsic resistances of individual ZnO nanowires with a circular cross section [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(22): 223117-1-223117-3.
- [20] Hu X, Sun J, Qian C, et al. Low contact resistance in solid electrolyte-gated ZnO field-effect transistors with ferromagnetic contacts [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 4(1): 150-156. ■