

# 疏水上转换纳米晶的均相体系聚合物包覆 及在发光检测中的应用

张庆彬<sup>1</sup>, 孔祥贵<sup>2</sup>, 程 成<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学理学院应用物理系, 杭州 310023;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态重点实验室, 长春 130033)

**摘要** 选用水解的十八碳烯-马来酸酐共聚物(PMAO)为表面修饰分子, 发展了一种以疏水纳米粒子吸附表面活性剂十二烷基磺酸钠( $\text{NaYF}_4$ -SDS)为中间体的均一液相聚合物包覆纳米粒子方法. 该方法解决了油性纳米晶与弱极性聚合物分子难以在单一体系下均匀分散的问题, 实现了在均一液相体系下对疏水纳米晶的单分散包覆以及表面羧酸官能团修饰. 红外光谱与表面 Zeta 电位测试结果表明纳米晶已被聚合物包覆, 粒子表面为强电负性的羧酸基团. 电镜结果表明聚合物包覆的上转换纳米晶粒径无明显的变化, 具有良好的单分散性. 发射光谱表明聚合物包覆前后粒子的发射谱带无显著变化, 保持了原油相粒子的发光性能. 进一步的特异性识别荧光显微成像实验证实聚合物包覆后的粒子( $\text{NaYF}_4$ -PMAO)可用于生物学检测.

**关键词** 纳米粒子; 上转换发光; 聚合物表面包覆; 生物应用

**中图分类号** O614

**文献标志码** A

近年来, 以  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  等为代表的上转换发光(980 nm 激发)纳米粒子作为一类新的荧光探针在生物医学领域中的应用引起了人们广泛的兴趣<sup>[1-7]</sup>, 其独特优势在于近红外光源激发下低的生物背景荧光能够极大地提高光学检测的灵敏度<sup>[8,9]</sup>. 相对于水相体系合成, 高温有机相体系合成的纳米晶展现出结晶性高、粒径均一、发光强等优良性能<sup>[10-12]</sup>. 然而, 高温有机相体系合成的纳米晶表面为油酸、油胺等疏水有机配体, 不具有水溶性, 且不含有可用于偶联生物分子的官能团, 限制了其在生物医学检测中的实际应用.

对高温有机体系合成的高性能纳米晶进行表面功能化修饰是获得适合生物应用发光纳米探针的必要途径. 目前对油性纳米晶进行表面修饰的主要方法可概括为两类: 一类是利用双官能团分子替代粒子表面疏水配体的配体交换法修饰; 另一类是选用双亲性聚合物或  $\text{SiO}_2$  等直接对疏水纳米晶进行表面包覆<sup>[1,8,13-23]</sup>. 表面配体交换的优点在于取代剂一般为小分子, 实验过程简单, 但配体交换过程需经历原有配体的解离与新配体的再配位过程, 难免会对纳米晶的性能造成影响<sup>[19,20]</sup>. 与配体交换法相比, 表面包覆法具有明显的优点: 首先, 修饰过程直接在疏水粒子外附加包覆层, 不改变纳米粒子的原表面状态, 从而降低了对功能性质的影响; 其次, 包覆层的存在使粒子具有更高的水溶稳定性<sup>[13,15,16]</sup>. 然而, 表面包覆法也存在一些明显不足, 如  $\text{SiO}_2$  包覆纳米粒子的操作过于复杂且包覆层厚度难于控制, 聚合物的长碳链容易造成纳米粒子的团聚等<sup>[15,17]</sup>. 因此, 选择适合的表面包覆剂, 并发展有效的表面包覆技术仍然是发光纳米晶应用于生物医学检测需解决的重要问题.

本文选用水解处理的十八碳烯-马来酸酐共聚物(PMAO)为包覆剂, 发展了一种借助疏水纳米晶与表面活性剂吸附中间体( $\text{NaYF}_4$ -SDS)过程的表面包覆技术, 克服了双亲性聚合物与疏水纳米粒子的界面问题, 在均一液相体系下实现了对纳米粒子的有效包覆. 获得的粒子为水溶性并具有丰富的表面羧酸官能团. 修饰后的粒子表现出良好的单分散性, 包覆前后纳米晶的发光性能无明显变化. 进一步的特异性识别荧光显微成像实验证实该粒子适合用于生物学检测.

收稿日期: 2015-12-10. 网络出版日期: 2016-02-03.

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 21305126)和浙江工业大学自然科学基金(批准号: 2012XZ003)资助.

联系人简介: 张庆彬, 男, 博士, 副教授, 主要从事纳米光电材料制备与光学检测研究. E-mail: qbzhang@zjut.edu.cn

# 1 实验部分

## 1.1 试剂与仪器

$Y_2O_3$  (纯度 99.99%)、 $Yb_2O_3$  (纯度 99.99%) 和  $Er_2O_3$  (纯度 99.99%) 购于北京稀土创新技术有限公司; 油酸(OA)、 $NH_4F$  (98%)、*N*-羟基琥珀酰亚胺(Sulfo-NHS)、2-(*N*-吗啉代)乙磺酸(MES)、牛血清白蛋白(BSA)和十二烷基磺酸钠(SDS)等购于国药集团化学试剂有限公司; 马来酸酐与十八碳烯的交替共聚物(PMAO,  $M_n = 30000 \sim 50000$ ) 购于 Aldrich 公司; 十八碳烯(纯度 90%) 购于 Alfa aesar 公司; 实验用水为自制去离子水.

8100IV 型透射电子显微镜(日本 Hitachi 公司), 加速电压 200 kV; F4500 荧光光谱仪(日本 Hitachi 公司), 激发光源为外接的 980 nm 激光器(功率 1 mW); Colloidal Dynamics Zeta 电位分析仪(美国 Colloidal Dynamics 公司); Motic AE30 倒置生物显微镜以外接 980 nm 激光器为激发光源.

## 1.2 $NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$ 纳米晶的制备

$NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$  发光纳米晶的制备参照文献[24]方法. 将盐酸与稀土氧化物反应获得的  $YCl_3$  (0.78 mmol),  $YbCl_3$  (0.2 mmol),  $ErCl_3$  (0.02 mmol) 按计量比放入 50 mL 三颈瓶中, 向体系中加入 12 mL 十八碳烯和 9 mL 油酸, 加热至 160 °C 使稀土盐充分溶解, 冷却至室温. 将溶有氟源(4 mmol  $NH_4F$ ) 和钠源(2.5 mmol NaOH) 的甲醇溶液加入反应器中, 缓慢搅拌使之充分混合. 然后, 在氩气流保护下缓慢加热蒸出低沸点的甲醇溶剂, 升温至 330 °C 回流反应 1 h 后停止反应, 冷却至常温, 离心收集样品, 用乙醇-水混合液和乙醇-氯仿混合液分别清洗 2 次, 获得的纳米晶分散于环己烷中备用.

## 1.3 $NaYF_4$ -PMAO 纳米晶的制备

聚合物 PMAO 的酸酐水解处理: 称取 40 mg 聚合物溶解于 20 mL 丙酮中, 加入 2~4 mL 水, 于 65 °C 缓慢搅拌回流 12 h, 使聚合物中的酸酐水解为羧基. 高速离心收集产物, 移除体系中的丙酮和水, 水解聚合物分散于乙醇中备用.

将 1 mL 含有 5 mg  $NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$  纳米晶的环己烷溶液与 10 mL 溶解了 20 mg SDS 的水溶液混合, 在 200 r/min 转速下磁力搅拌乳化 30 min, 之后在搅拌下缓慢加热到 70 °C 蒸发掉体系内的环己烷, 高速离心沉化, 将获得的纳米粒子与表面活性剂吸附中间体  $NaYF_4$ -SDS 分散于 2 mL 无水乙醇中. 然后缓慢滴加到 10 mL 含有 20 mg 水解的 PMAO 的乙醇体系中, 高速搅拌超过 12 h, 离心收集样品, 用乙醇清洗 3 次移除过量的游离聚合物, 最后将  $NaYF_4$ -PMAO 样品分散在去离子水中用于进一步分析.

## 1.4 $NaYF_4$ -PMAO 纳米粒子的亲核素修饰

取约 2.0 mg  $NaYF_4$ -PMAO 分散于 1.0 mL MES (0.02 mol/L) 缓冲溶液 (pH=6.0) 中, 加入 5 mg EDAC 与 15 mg sulfo-NHS, 室温搅拌反应 4 h 后离心纯化, 再分散于 MES 中, 加入 1 mg 亲核素, 在 4 °C 下搅拌反应 48 h. 最后, 将亲核素化的  $NaYF_4$ -PMAO 粒子离心纯化后分散于 5 mmol/L 的硼酸盐缓冲液 (pH=8.5) 中备用.

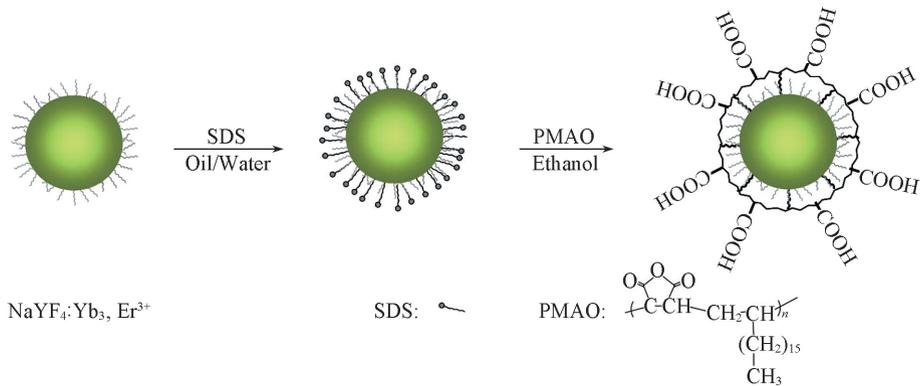
取 2 片表面醛基化的硅片与 0.1 mg/mL 的人血清蛋白在 37 °C 下反应 2 h, 使人血清蛋白固定于硅片表面, 清洗 3 次后加入 2% 的 BSA 溶液, 反应 1 h 用于表面封闭. 之后, 将 2 个硅片分别放入 0.1 mg/mL 羊抗人蛋白(对照细)与生物素化的羊抗人蛋白溶液中, 在 37 °C 下反应 2 h, 清洗备用. 获得的两组硅片分别与亲核素功能化的  $NaYF_4$ -PMAO 纳米粒子进行特异性识别反应, 用于荧光显微检测. 检测系统为 Motic AE30 倒置荧光显微镜, 外加 980 nm 激光器为激发光源.

# 2 结果与讨论

## 2.1 PMAO 聚合物均一液相体系包覆 $NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$ 上转换纳米晶

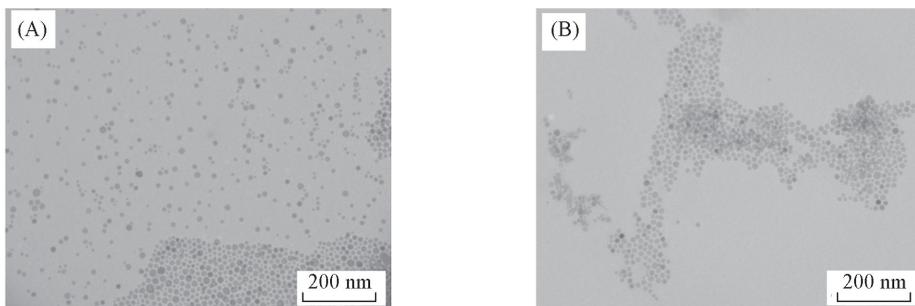
PMAO 同时含有亲水性基团与亲油性碳链, 是常见的油水双亲性聚合物. 聚合物本身含有丰富的酸酐, 经水解反应为羧酸化 PMAO 后极性明显增强, 可溶解于弱极性溶剂无水乙醇中. 高温有机相合成得到的  $NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$  上转换纳米晶由于表面存在疏水配体, 仅能分散于氯仿和环己烷等溶剂中. 羧酸化 PMAO 分子与  $NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$  纳米晶表面的极性差异导致两者难以在同一溶剂中形成均一反

应体系, 从而无法有效接触实现聚合物对纳米晶的有效包覆. 因此, 我们设计了借助疏水纳米晶与表面活性剂吸附中间体  $\text{NaYF}_4\text{-SDS}$  来完成聚合物对纳米晶的包覆. 利用 SDS 分子亲、疏水基团在纳米晶表面的取向吸附作用, 经过水包油微乳液过程, 在纳米晶表面吸附一层 SDS 分子 ( $\text{NaYF}_4\text{-SDS}$ , 见 Scheme 1), 表面磺酸基团使得纳米晶能够短时间内在乙醇溶剂中保持分散. 当将  $\text{NaYF}_4\text{-SDS}$  加入到 PMAO 的乙醇溶液中时, 在高速搅拌下不稳定的  $\text{NaYF}_4\text{-SDS}$  吸附结构被打开, SDS 从纳米晶表面脱落, 长碳链的 PMAO 分子逐渐缠绕包覆于纳米晶表面, 实现了在均一乙醇溶剂体系中聚合物对疏水纳米晶的表面包覆 ( $\text{NaYF}_4\text{-PMAO}$ ), 具体过程见 Scheme 1.



**Scheme 1** Illustration of the surface coating approach of  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  with PMAO

图 1 为聚合物包覆前后  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  纳米晶的 TEM 照片. 可见, 表面包覆前油酸稳定的纳米

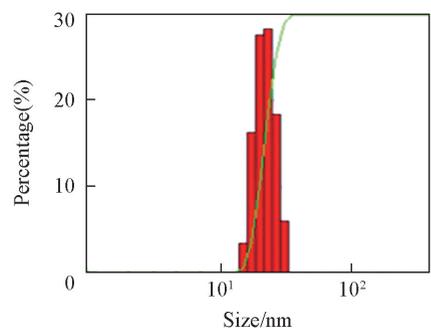


**Fig. 1** TEM images of  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  nanocrystals before (A) and after (B) surface coating process

晶平均尺寸为  $(12 \pm 1.99)$  nm [图 1(A)], 具有良好的分散性. 包覆后水溶性纳米晶的形貌与尺寸未发生明显的变化, 尺寸为  $(12 \pm 1.76)$  nm [图 1(B)].  $\text{NaYF}_4\text{-PMAO}$  纳米粒子表面含有丰富的羧酸基团, 能够稳定分散于去离子水中. 在生物学中常用的磷酸盐 (PBS,  $\text{pH} = 7.4$ )、硼酸盐 ( $50$  mmol/L,  $\text{pH} = 8.3$ ) 和 MES ( $20$  mmol/L,  $\text{pH} = 6.1$ ) 等缓冲溶液中也都可以保持稳定分散, 未发生可见的聚集与沉淀. 通过激光粒度分析 (DLS) 测试了  $\text{NaYF}_4\text{-PMAO}$  粒子在水溶液中的伸展尺寸, 结果如图 2 所示.

## 2.2 $\text{NaYF}_4\text{-PMAO}$ 纳米粒子的表面分子分析

通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 表征了 PMAO 包覆  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  过程中纳米晶表面分子的变化. 图 3(A) 示出了  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  纳米晶、SDS 和  $\text{NaYF}_4\text{-SDS}$  的 FTIR 谱图, 与纯  $\text{NaYF}_4$  纳米晶的 FTIR 谱对比可以看出,  $\text{NaYF}_4\text{-SDS}$  的 FTIR 谱中清楚地显示了 SDS 分子在  $1221$   $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰, 归属为 SDS 分子中  $\text{-SO}_2\text{-}$  基团的反对称振动模式; 同时谱线中还保持了  $\text{NaYF}_4$  纳米晶表面油酸配体的



**Fig. 2** Hydrodynamic diameter distribution of the polymer coated  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  in water

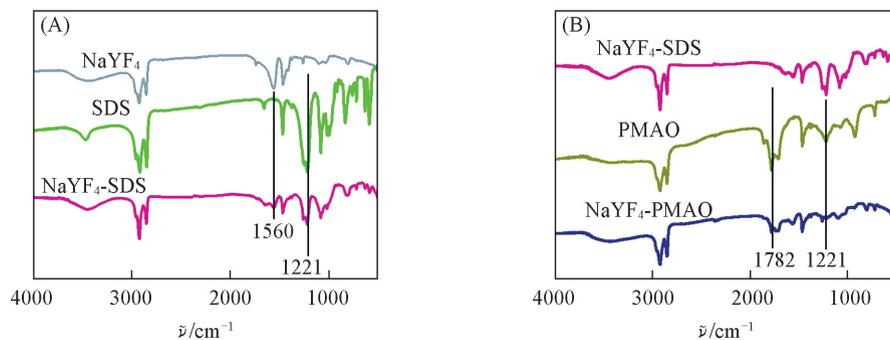


Fig. 3 FTIR spectra of NaYF<sub>4</sub>-SDS(A) and NaYF<sub>4</sub>-PMAO(B)

特征峰(1560  $\text{cm}^{-1}$ , 归属为 $-\text{COO}^-$ 基团的反对称伸缩振动), 表明 SDS 分子已经成功吸附于纳米晶表面. 经过 PMAO 分子包覆后, 在 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 的 FTIR 谱[图 3(B)]中, SDS 的特征谱峰(1221  $\text{cm}^{-1}$ )变得非常微弱, 同时, 在 1782  $\text{cm}^{-1}$  出现 1 个新的吸收谱带, 这归属于 PMAO 中  $\text{C}=\text{O}$  基团的拉伸振动模式, 表明纳米晶表面吸附的 SDS 分子已经脱落, PMAO 分子包覆在了纳米晶的表面.

采用本文方法制备的 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 纳米粒子表面含有大量的羧酸基团, 这些羧基不仅使 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 纳米粒子具有良好的水溶性, 同时也可以作为反应基团为后续的生物医学应用偶联功能分子. 为了进一步确定粒子的表面性质, 对 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 进行了表面 Zeta 电位测试, 结果表明粒子表面电位为 -38.3 mV(图 4). 强的电负性进一步证实 NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>, Er 纳米粒子的表面被 PMAO 分子所包覆.

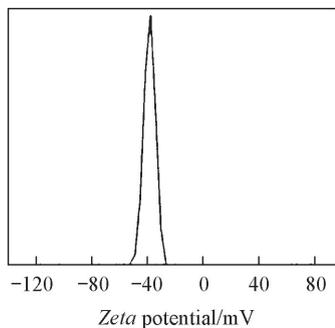


Fig. 4 Zeta potential at the surface of NaYF<sub>4</sub>-PMAO nanoparticles

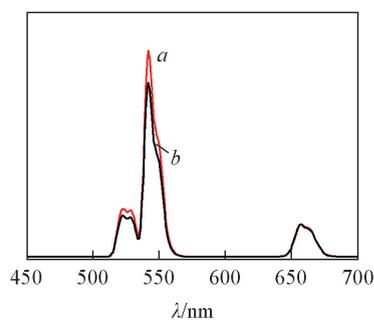


Fig. 5 Luminescence spectra of NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup> nanoparticles in cyclohexane (a) and NaYF<sub>4</sub>-PMAO nanoparticles in water(b)

$\lambda_{\text{ex}} = 980 \text{ nm}$ .

### 2.3 聚合物修饰前后的光谱性质

图 5 为 NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup> 粒子包覆前后的上转换发射光谱. 发射谱中位于 521, 540 和 654 nm 的发射峰分别归属于 Er<sup>3+</sup> 离子<sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>和<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>能级到<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>能级的跃迁. 经过表面聚合物包覆后, 纳米粒子的发光性质受到了较小的影响, 谱带中 2 个主发光峰的相对强度比 ( $I_{540}/I_{654}$ ) 由油溶纳米晶的 5.65 降低为 4.79. 这种谱带相对强度的变化归因于纳米粒子表面分子与分散环境的改变. 表面分子基团的变化会造成不同的非辐射跃迁<sup>[25,26]</sup>, 同时, 聚合物亲水表面的吸附水也会对发射谱带产生一定的影响<sup>[27,28]</sup>.

### 2.4 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 纳米粒子检测蛋白的荧光显微成像

对亲核素功能化的 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 纳米粒子的特异性识别能力进行了研究. 图 6(A) 中的荧光来自于 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 纳米粒子的上转换发光, 表明亲核素化的纳米粒子已经与在硅片表面固定的生物素化羊抗人血清蛋白特异性结合; 而在未进行生物素处理的硅片上只观测到很少的荧光[图 6(B)], 这些光点归因于纳米粒子与固定于硅片表面的蛋白少量的非特异性吸附. 实验结果表明所制备 NaYF<sub>4</sub>-PMAO 纳米粒子适合用于生物学检测.

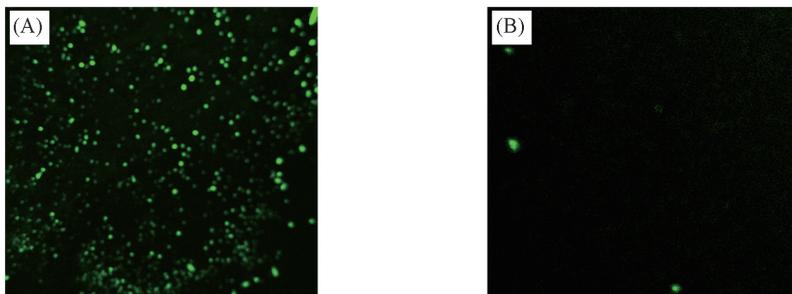


Fig. 6 Fluorescence image of avidin-coated  $\text{NaYF}_4$ -PMAO and biotinylated IgG bioconjugates(A) and the result of control experiment(B)

### 3 结 论

本文以十八碳烯-马来酸酐共聚物(PMAO)为表面包覆分子,发展了一种以纳米粒子吸附表面活性剂作为中间体的均一液相聚合物包覆纳米粒子方法.借助于表面活性剂两端的亲、疏水特性,使得疏水纳米粒子能够与油、水双亲性聚合物分子均匀分散于乙醇溶剂中,实现了双亲性聚合物对油性纳米粒子的表面包覆修饰.获得的  $\text{NaYF}_4$ -PMAO 纳米粒子展示了良好的水溶性与单分散性,保持了较好的上转换发光性能.通过荧光显微成像技术对聚合物包覆的纳米粒子进行了特异性生物识别检测研究,表明获得的  $\text{NaYF}_4$ -PMAO 纳米粒子适合用于生物学检测.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Deng M. , Tu N. , Bai F. , Wang L. , *Chem. Mater.* , **2012** , 24 , 2592—2597
- [ 2 ] Zhang Q. B. , Wang X. , Zhu Y. M. , *J. Mater. Chem.* , **2011** , 21 , 12132—12138
- [ 3 ] Yang Y. , Zhao Q. , Feng W. , Li F. , *Chem. Rev.* , **2013** , 113 , 192—270
- [ 4 ] Jothirmayanantham P. , John C. B. , Kerry R. D. , van Veggd F. C. J. M. , *J. Phys. Chem. C* , **2011** , 115 , 19054—19064
- [ 5 ] Tang Y. , Di W. , Zhai X. , Yang R. , Qin W. , *ACS Catal.* , **2013** , 3 , 405—412
- [ 6 ] Xie L. G. , Qin Y. , Chen H. Y. , *Anal. Chem.* , **2013** , 85 , 2617—2622
- [ 7 ] Ju Q. , Tu D. T. , Liu Y. S. , Li R. F. , Zhu H. M. , Chen J. C. , Chen Z. , Huang M. D. , Chen X. Y. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2012** , 134 , 1323—1330
- [ 8 ] Jiang S. , Zhang Y. , *Langmuir* , **2010** , 26(9) , 6689—6694
- [ 9 ] Li L. L. , Wu P. , Hwang K. , Lu Y. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2013** , 135 , 2411—2414
- [ 10 ] Wang F. , Liu X. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2008** , 130 , 5642—5643
- [ 11 ] Li Z. , Zhang Y. , Jiang S. , *Adv. Mater.* , **2008** , 20 , 1—5
- [ 12 ] Wang G. , Peng Q. , Li Y. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2009** , 131 , 14200—14201
- [ 13 ] Pellegrino T. , Manna L. , Kudera S. , *Nano Lett.* , **2004** , 4 , 703—707
- [ 14 ] Gao X. , Cui Y. , Levenson R. M. , *Nat. Biotechnol.* , **2004** , 22 , 969—976
- [ 15 ] Yu W. W. , Chang E. , Falkner J. C. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2007** , 129 , 2871—2879
- [ 16 ] Wang L. , Li Y. , *Chem. Mater.* , **2007** , 19 , 727—734
- [ 17 ] Selvan S. T. , Tan T. T. , Ying J. Y. , *Adv. Mater.* , **2005** , 17 , 1620—1625
- [ 18 ] Zhelev Z. , Ohba H. , Bakalova R. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2006** , 128 , 6324—6525
- [ 19 ] Liu W. , Choi H. S. , Zimmer J. P. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2007** , 129 , 14530—14531
- [ 20 ] Zhang Q. B. , Kong X. G. , Wang X. , Cheng C. , *Chem. J. Chinese Universities* , **2014** , 35(2) , 224—229(张庆彬, 孔祥贵, 王新, 程成. 高等学校化学学报, **2014** , 35(2) , 224—229)
- [ 21 ] Mattoussi H. , Mauro J. M. , Goldman E. R. , *J. Am. Chem. Soc.* , **2000** , 122 , 12142—12150
- [ 22 ] Jiang W. , Mardiyani S. , Fischer H. , *Chem. Mater.* , **2006** , 18 , 872—878
- [ 23 ] Dong W. , Cheng Y. , Luo L. , *RSC Adv.* , **2014** , 4 , 45939—45945
- [ 24 ] Qian H. , Zhang Y. , *Langmuir* , **2008** , 24 , 12123—12125
- [ 25 ] Sun Y. , Chen Y. , Tian L. , *Nanotechnology* , **2007** , 18 , 275609
- [ 26 ] Zhao J. , Sun Y. , Kong X. , *J. Phys. Chem. B* , **2008** , 112 , 15666—15672
- [ 27 ] Bai X. , Song H. , Pan G. , *J. Phys. Chem. C* , **2007** , 111 , 13611—13617

[28] Zhang F., Wan Y., Shi Y., Tu B., *Chem. Mater.*, **2008**, 20, 3778—3784

## Surface Coating of Hydrophobic Up-converting Nanoparticles in Homogenous Liquid Phase System and Application in Optical Detection<sup>†</sup>

ZHANG Qingbin<sup>1\*</sup>, KONG Xianggui<sup>2</sup>, CHENG Cheng<sup>1</sup>

(1. Department of Applied Physics, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Key Laboratory of Excited State Process, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract** NaYF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>,Er<sup>3+</sup> nanoparticles were successfully surface-coated *via* a hydrophobic nanoparticles adsorption surfactant intermediate (NaYF<sub>4</sub>-SDS) process with hydrolysed poly(maleic anhydride-alt-1-octadecene) molecules (PMAO). This method overcomes the defect that oil-soluble nanocrystals and weak polar polymer molecules could hardly well-disperse in a single system and the surface-coating was realized in homogenous solution system. The surface-coating process was confirmed by Fourier transform infrared spectra (FTIR) and surface Zeta potential. Investigations by transmission electron microscopy (TEM) and photoluminescence (PL) spectroscopy showed no obvious variations in the morphologies and luminescent properties of the nanoparticles during the surface-coating process. The specific molecular recognition capacity of PMAO-coated nanoparticles confirms that hydrophilic NaYF<sub>4</sub>-PMAO are suitable for potential biological labeling.

**Keywords** Nanoparticles; Up-conversion luminescence; Polymers surface coating; Biological application

(Ed.: F, K, M)

<sup>†</sup> Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21305126) and the Natural Science Foundation of Zhejiang University of Technology, China (No. 2102X2003).

## 化学工业出版社化学专业图书推荐

### 《元素周期表和元素知识集萃》

周公度 主编 王颖霞 副主编

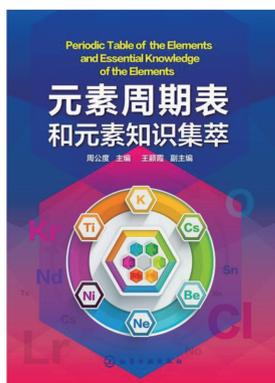
本书集结了化学元素周期表和元素知识两方面的内容，把二者有机地结合在一本书中，并独立成册。元素周期表以彩色图片的形式展示，同时内容更加丰富，加深了对周期表的认识与解读；元素知识部分按照元素周期表的分类规律，以族为单位，把性质或结构相似的一类物质统一介绍其相似性和共性的部分，对于个性部分单独列出，特别是对于一些重要的新的元素性质及用途，本书中给予了特别说明。

❖ 书号：9787122248015

定 价：19.80 元

❖ 开本：16

出版日期：2016年1月



如需更多图书信息，请登录 [www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn) 服务电话：010-64518888, 64518899 (销售中心)