文章编号 2095-1531(2019)06-1288-07

溶剂中稀土上转换纳米粒子表面猝灭效应的定量分析

于海洋[1,2],涂浪平[1],张友林[1],赵慧颖[3*],孔祥贵[1*]
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 吉林大学 第一临床医院,吉林 长春 130021)

摘要:激光诱导的稀土纳米粒子的上转换发光由于具有独特的光学效应,多年来一直受到人们的广泛研究。其中,溶剂对纳米粒子表面效应的影响是该类材料在实际应用中面临的一个普遍问题,传统的分析方法对溶剂的作用难以给出定量化的分析结果。针对这一困难,本文利用 Monte Carlo 计算模拟方法,从离子-离子相互作用的微观层面上重构出宏观的上转换发光现象,进而分别给出了纳米粒子表面效应在 4 种不同的水相溶剂:水、甲醇、乙醇和 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中的定量化分析结果。稳态和动力学光谱测试结果均表明,溶剂水中的上转换纳米粒子表面猝灭速率最高,甲醇和乙醇中次之,DMF 中最低,这可归因于溶剂中羟基基团及其活性对于上转换纳米粒子表面猝灭效应的影响。进一步,通过计算模拟获得了 $NaYF_4$:20% Yb,2% Er 上转换纳米粒子中,Yb^{3+} 激发态($^2F_{5/2}$)表面猝灭速率的定量化数值,分别为:$2.5\times10^4\ s^{-1}$(DMF)、$1\times10^5\ s^{-1}$(甲醇和乙醇)、$5\times10^5\ s^{-1}$(水)。

关 键 词:水相溶剂;纳米粒子;上转换发光;计算模拟;定量分析
中图分类号:TP394.1; TH691.9 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191206.1288

Quantitative analysis of the surface quenching effect of lanthanide-doped upconversion nanoparticles in solvents

YU Hai-yang[1,2], TU Lang-ping[1], ZHANG You-lin[1], ZHAO Hui-ying[3*], KONG Xiang-gui[1*]
(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Gerontology Department of First Bethune Hospital, Jilin University, Changchun* 130021, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: xgkong*14@ *ciomp. ac. cn*

Abstract: Laser-induced upconversion luminescence of lanthanide-doped nanoparticles has attracted great in-

收稿日期:2019-01-29;**修订日期**:2019-02-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11874354, No. 51772122, No. 11874355)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11874354, No. 51772122, No. 11874355)

terest from researchers for many years due to its unique optical properties. The influence of solvents on the surfaces of these nanoparticles is a common problem in practical applications of these materials. However, traditional analysis methods are incapable of quantifying the influences of solvents. In response to this difficulty, we used a Monte Carlo simulation to reconstruct macroscopic upconversion luminescence at the microscopic level of ion-ion interaction. Then, we succeeded in obtaining quantified analysis results of the surface effects from four different aqueous solvents, which were water, methanol, ethanol and N, N-dimethylformamide (DMF). Both steady-state and dynamic spectra results show that the surface quenching rate of the upconversion nanoparticles in the highest to the lowest order of the four solvents are water, methanol, ethanol and DMF, which is attributed to the hydroxyl group and its activity. The computational simulation results show that the surface quenching rates of the Yb^{3+} excited state($^2F_{5/2}$) in $NaYF_4$:20% Yb,2% Er upconversion nanoparticles in the four solvents are 2.5×10^4 s^{-1}(DMF), 1×10^5 s^{-1}(methanol and ethanol) and 5×10^5 s^{-1}(water), which confirms our hypothesis.

Key words: aqueous solvent; nanoparticle; upconversion luminescence; computational simulation; quantitative analysis

1　引　言

激光诱导的稀土离子上转换发光是一类特殊的发光现象。由于稀土离子具有丰富的阶梯状能级结构和较长的中间态能级寿命,使得该类离子能以激发态吸收或能量传递的形式,连续获得多个光子的能量,然后发射出单个光子,从而实现长波长激发,短波长发射,即产生所谓的“上转换发光”现象。由于它的这种独特的光学效应,自 1960 年首次提出以来,就引起了极大反响。目前,经过多年的研究,该类材料已在生物成像和治疗、检测、发光显示、保密编码和太阳能利用等诸多方面展示出诱人的应用前景[1-7]。尽管稀土上转换发光机理已取得了许多进展,但是依然存在着许多有待完善的地方。例如,在许多实际应用中,都需要材料达到纳米尺度[8-11],在这种情况下,材料比表面积很大,因此其表面结构和性质对上转换发光的影响不能被忽略。然而,迄今为止,尽管人们公认表面效应对稀土上转换发光过程具有重要的影响[12-16],但仍然无法精确地对其做出定量化的描述。主要难点在于人们难以通过直接测量获得表面(包含悬键、配体、溶剂分子、缺陷等诸多因素)与稀土离子间的相互作用参数。针对上述问题,本文提出构建一个 Monte Carlo 计算模型,从离子-离子相互作用的微观层面上重构出宏观的上转换发光现象。这样就可以利用计算模拟与实验结果的对照,定量化地给出表面效应对上转换发光纳米结构的影响。利用这种方法,本课题组成功地重构了纳米粒子在油相环境(环己烷溶液)中的上转换发光过程,具体细节请参见本课题组在 2018 年发表的工作[17]。

基于前期工作,本文系统地比较分析了 4 种不同的水相溶剂(水、甲醇、乙醇和 DMF)对稀土纳米粒子上转换发光表面猝灭效应的影响。与之前的研究工作相比,该研究内容有如下特点:(1)4 种溶剂均为水相环境,因此与之前工作所研究的油相环境(环己烷溶液)相比,其分析结果对上转换纳米粒子在生物环境中的应用更加具有针对性;(2)通过对4 种不同的水相溶剂效应进行比较,获得了溶剂对纳米粒子发光过程中表面猝灭效应影响的定量结果和规律。研究结果表明:猝灭速率的强弱依次排序是水 > 甲醇 ≈ 乙醇 > DMF,这可归因于溶剂分子羟基基团及其活性的差异。接着,通过计算模拟获得了 4 种溶剂中上转换纳米粒子表面的 Yb^{3+} 激发态($^2F_{5/2}$)的猝灭速率。本文研究结果对于加深人们对稀土上转换材料发光机理的认识,以及该材料在生物成像与治疗等领域的应用优化,具有重要的科学意义。

2 实 验

2.1 实验原料

$ErCl_3 \cdot 6H_2O$、$YbCl_3 \cdot 6H_2O$、$YCl_3 \cdot 6H_2O$、油酸(90%)和 1-十八烯(90%)购自 Sigma 公司。甲醇、乙醇、DMF、丙酮、环已烷、NaOH 和 NH_4F 购自 GFS Chemicals 公司。所有材料在使用前均未进行特殊处理。

2.2 $NaYF_4$:20% Yb,2% Er 上转换纳米粒子合成

该上转换纳米粒子采用溶剂热法合成[18]。将 0.78 mmol $YCl_3 \cdot 6H_2O$、0.2 mmol $YbCl_3 \cdot 6H_2O$、0.02 mmol $ErCl_3 \cdot 6H_2O$、6 mL 油酸和 15 mL 1-十八烯依次加入到 50 mL 的三颈瓶中。在氩气保护下将混合溶液加热到 160 ℃并不断搅拌。待固体全部溶解后将混合溶液降至室温,随后逐滴加入 4 mL 含有 2.5 mmol NaOH 和 4 mmol NH_4F 的甲醇溶液。将混合溶液升温至 70 ℃并搅拌 30 min,使得甲醇全部挥发。之后在氩气保护下将溶液升温至 300 ℃并反应 90 min。然后将混合溶液降至室温,并分别采用丙酮和乙醇对产物进行离心分离和洗涤,最终的产物被分散在 4 mL 环已烷中。

2.3 上转换纳米粒子的相转移

首先将 12 mol/L 的浓盐酸稀释 100 倍,然后将 4 mL 稀释后的盐酸与 4 mL 含有 1 mmol $NaYF_4$:20% Yb,2% Er 的环已烷溶液混合,并搅拌过夜,取下层水溶液离心分离后,将固体粉末干燥后平均分为 4 份,分别溶于 4 种不同的水相溶剂中(水、甲醇、乙醇和 DMF)。

2.4 实验测量

上转换纳米粒子形貌及结构通过场扫描发射电镜(FESEM, Hitachi, S4800)和 X 射线衍射仪(Brucker D8/Advance)表征。稳态光谱测量通过爱丁堡公司 FLS980 光谱仪实现。动力学光谱测量采用纳秒脉冲激光器(Nd:YAG)和单光子计数系统(Hamamatsu R9110 PMT)。

3 结果及分析

3.1 纳米粒子形貌与结构表征

本文所制备的纳米粒子形貌与结构表征如图 1所示。

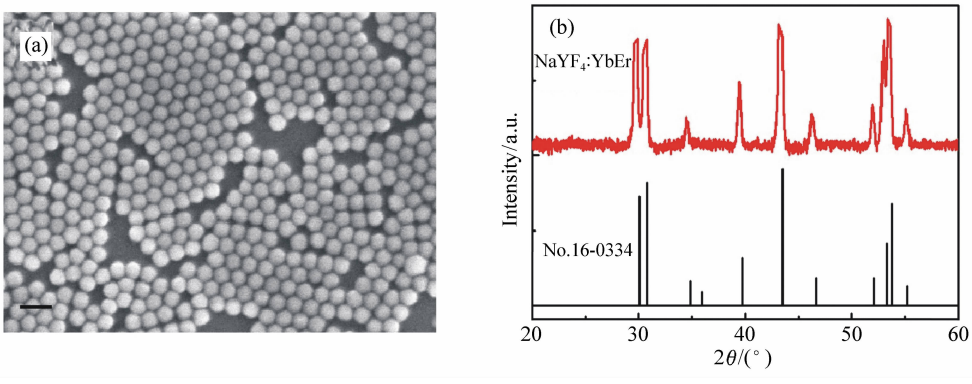


图 1 (a) $NaYF_4$:20% Yb,2% Er 上转换纳米粒子的 SEM 图片(图中标尺为 100 nm)及其(b)XRD 图谱(与 $NaYF_4$ 六角相标准图谱进行对比,编号:16-0334)

Fig. 1 (a) SEM image of $NaYF_4$:20% Yb,2% Er upconversion nanoparticles (scale bar is 100 nm) and its X-ray powder diffraction spectra (b) (compared with the Joint Committee on Powder Diffraction Standards, file number 16-0334)

从扫描电镜图可以看出,制备的 $NaYF_4$:20% Yb,2% Er 上转换纳米粒子的尺寸均一(40 nm ± 3 nm),且分散性好。由于 $NaYF_4$ 晶体存在两种晶体结构:立方相与六角相,相比于立方相结构,六角相结构具有更高的上转换发光效率。对样品进行了 X 射线衍射图谱分析。结果显示,纳米粒子呈现出单一的六角相结构(与六角相 $NaYF_4$ 标准卡片进行比对,文件编号:16-0334)。均一的晶体尺寸与统一的晶相结构,为本研究奠定了良好的材料基础。

3.2　纳米粒子的发光性质测试

如图 2 所示,上转换纳米粒子在 4 种溶剂中的发光强度表现出了明显的差异:DMF 中上转换纳米粒子发光最强,甲醇和乙醇次之,水中最弱。需要指出的是,在测试分析过程中,不同溶剂中的纳米粒子为同一批样品,这保证了实验中纳米粒子的一致性。此外测量稳态光谱所用的石英比色皿厚度仅为 1 mm,以尽可能地避免溶剂对激发光和发射光的吸收对实验的不利影响。在上述测试条件下,发光光强的差异可以归结为各溶剂对纳米粒子上转换发光过程影响的不同。图 2(b)中的数据结果显示,纳米粒子在 4 种溶剂中的上转换发光强度比值为 1∶0.57∶0.55∶0.31(DMF:乙醇:甲醇:水)。在这 4 种溶剂中,DMF 溶剂中无羟基基团,甲醇、乙醇溶剂每个分子含有一个羟基基团,水分子含有两个羟基基团。这说明溶剂中羟基基团对上转换纳米粒子的发光过程有着重要的影响,溶剂分子中羟基基团越多,上转换发光强度积分值越小,上转换发光越弱。该结果也与文献中的报道现象一致[19]。

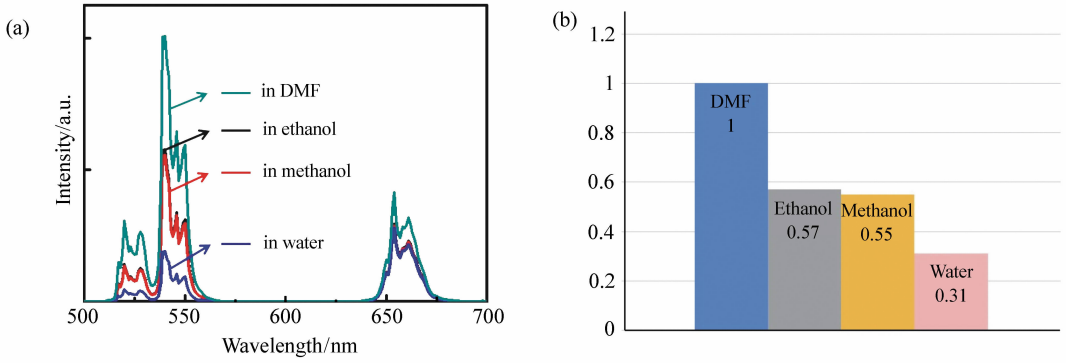


图 2　(a)上转换纳米粒子在 4 种不同溶剂中的上转换发光光谱图(Ex:980 nm,激发光功率密度为 100 W/cm^2,纳米粒子浓度均为 50 mg/mL)。(b)4 种溶剂中的纳米粒子上转换发光强度对比结果(以 DMF 溶剂中的发光强度归一化,光谱积分区域:500 ~ 700 nm)

Fig. 2　(a) The emission spectra of upconversion nanoparticles in four different solvents (Ex:980 nm, power density is 100 W/cm^2, the concentration of nanoparticles is 50 mg/mL). (b) Comparison of upconversion luminescence intensities (spectra integration region:500 ~ 700 nm) in four different solvents (normalized by the luminescence intensity of nanoparticles in DMF solvent)

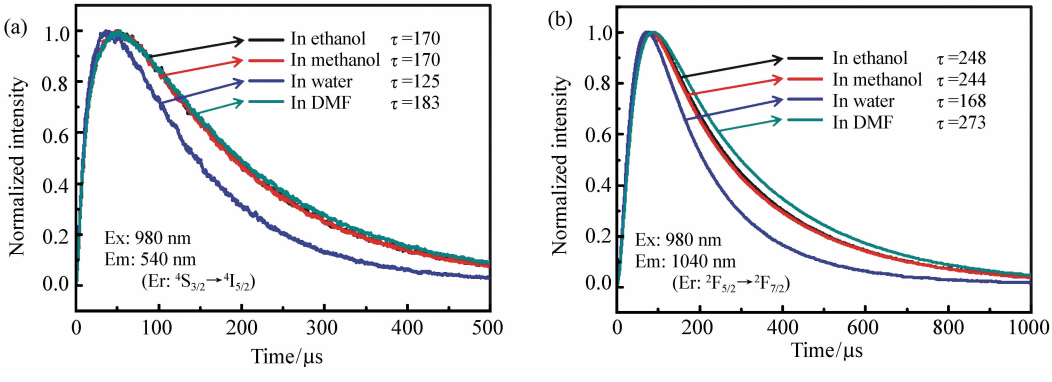


图 3　980 nm 的纳秒脉冲光激发下,纳米粒子在不同溶剂中的发光离子 Er^{3+} 的上转换发光(540 nm)(a)以及敏化离子 Yb^{3+} 的斯托克斯发光(1 040 nm)(b)的荧光衰减曲线

Fig. 3　Under the excitation of 980 nm nanosecond pulsed light, the lifetime curves of (a) upconversion luminescence (540 nm) of activator Er^{3+} and (b) Stokes luminescence (1 040 nm) of sensitizer Yb^{3+} of the nanoparticles in different solvents

接下来,分析了材料在溶剂效应诱导下的发光动力学过程。图 3 给出了在 980 nm 纳秒脉冲光激发下,纳米粒子上转换发光强度在 4 种溶剂中的衰减过程。从图中可以看出,无论是发光离子 Er^{3+} 的上转换发光(图 3(a),$^4S_{3/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$),还是敏化离子 Yb^{3+} 的斯托克斯荧光发射(图 3(b),$^2F_{5/2}\rightarrow{}^2F_{7/2}$),其荧光寿命的变化规律都与稳态发光强度的规律相同,为 $\tau_{DMF} > \tau_{甲醇} \approx \tau_{乙醇} > \tau_{水}$。发光寿命结果再次验证了对于溶剂分子羟基基团作用的分析是正确的。

3.3 不同溶剂中上转换发光纳米粒子表面效应的 Monte Carlo 计算模拟

尽管上述分析结果证实了溶剂分子中羟基基团对的纳米粒子发光强度有影响,但是仍为定性分析。为了实现定量分析,引入 Monte Carlo 计算模拟。通过统计纳米粒子内离子间的微观相互作用来重构宏观的上转换发光行为,从而利用模拟与实验结果的相互对比,来获得表面效应对上转换发光影响的量化结果,如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。

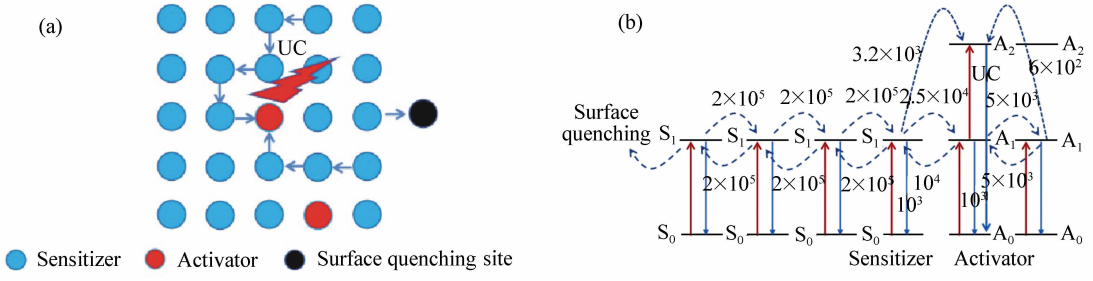


图 4 (a)基于 Monte Carlo 计算模拟的上转换发光微观物理图像。(b)$NaYF_4$:20% Yb,2% Er 上转换纳米粒子中离子间相互作用的计算模拟参数

Fig. 4 (a) Upconversion luminescence microphysical image based on Monte Carlo computational simulation. (b) Computational simulation parameters of the interaction between ions in $NaYF_4$:20% Yb,2% Er upconversion nanoparticles

本课题组前期工作显示,能量传递上转换发光现象的微观物理图像[17],如图 4(a)所示。假定激发态光子能量在由稀土离子组成的晶格点阵中随机游走,当两个激发态光子能量同时游走到同一个发光中心离子上时,就有一定几率发生“碰撞”,产生上转换发光(实质上为激发态之间发生能量传递相互作用)。而当激发态光子能量游走到位于纳米粒子表面的离子时,该激发态能量有一定几率被表面缺陷所俘获而直接损耗掉。基于前期工作[17],通过适当的修正,在图 4(b)列出了本文中所应用的离子间相互作用的计算模拟参数。

由于在实验中,使用的纳米粒子都是同一批样品,并且实验条件保证了溶剂的吸收和散射效应可以忽略。显然,在这种情况下,上转换发光强度的变化可以归因于各溶剂分子表面猝灭速率的不同。猝灭速率越大,上转换纳米粒子的稳态发光强度越弱。本文使用的纳米粒子中,Yb^{3+} 与 Er^{3+} 的个数比为 10:1,因此,表面猝灭效应主要作用在 Yb^{3+} 上。图 5(a)为在 100 W/cm^2 激发光功率密度下,通过模拟上转换纳米粒子中掺杂的 Yb^{3+} 在不同溶剂中因表面猝灭速率变化而导致 Er^{3+} 上转换发光强度的不同。显然,随着在表面的 Yb^{3+} 激发态($^2F_{5/2}$)猝灭速率的增加,Er^{3+} 上转换发光强度一开始迅速下降,然后逐渐趋于平缓,当猝灭速率大于10^6 s^{-1}后基本保持不变。在模拟中首先计算出 $NaYF_4$:20% Yb,2% Er 纳米粒子在环己烷溶剂中的表面猝灭速率为 2.5×10^4 s^{-1},由于环己烷与 DMF 相同,分子中并无羟基基团,且上转换发光强度在这两种溶剂中也基本一致,所以将 DMF 溶剂中的表面猝灭速率也定为 2.5×10^4 s^{-1}。然后通过对比分析实验和模拟结果(图 5(b)),获得了 4 种水相溶剂分子对 Yb^{3+} 离子激发态($^2F_{5/2}$)的猝灭速度,分别为:2.5×10^4 s^{-1}(DMF)、10^5 s^{-1}(甲醇和乙醇),以及 5×10^5 s^{-1}(水)。

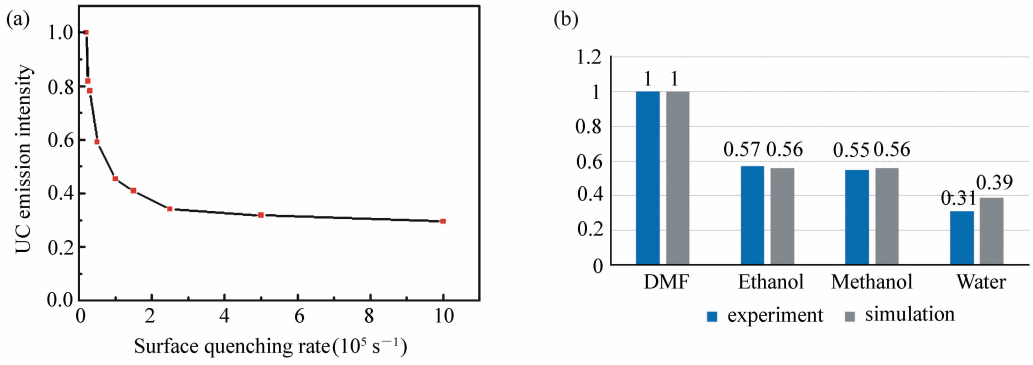


图 5　(a)在不同 Yb^{3+} 激发态表面猝灭速率下计算机模拟的纳米粒子上转换发光强度。(b)模拟结果与实验数据的对比图

Fig. 5　(a) Upconversion luminescence intensity of nanoparticles at different quenching rates in Yb^{3+} excited state surface by computational simulation. (b) Comparison of simulation results and experimental results

4　结　论

本文通过研究分析了 4 种不同的水相溶剂(水、甲醇、乙醇和 DMF)中的上转换纳米粒子 $NaYF_4$:20% Yb,2% Er 的稳态和动力学光谱。证明了溶剂中的羟基基团是影响上转换纳米粒子表面猝灭效应的重要因素。发现拥有更多羟基基团的水溶剂中上转换纳米粒子发光最弱,甲醇和乙醇中的发光稍强,而没有羟基基团的 DMF 中的发光最强。更重要的是,本文通过建立 Monte Carlo 模拟方法,定量给出了上转换纳米粒子在 4 种溶剂中 Yb^{3+} 激发态($^2F_{5/2}$)的表面猝灭速率,分别为:2.5×10^4 s^{-1}(DMF)、10^5 s^{-1}(甲醇和乙醇)以及 5×10^5 s^{-1}(水)。本文结果为人们更加深入地认识水相溶剂中上转换纳米粒子的发光现象提供了重要依据。

参考文献:

[1] ZHOU L,WANG R,YAO CH,*et al*.. Single-band upconversion nanoprobes for multiplexed simultaneous in situ molecular mapping of cancer biomarkers[J]. *Nature Communications*,2015,6:6938.

[2] 李巧凤,任舒悦,王瑜,等. 基于 AuNP-AuNP-UCNP 三联体结构的传感体系高效检测环境雌激素双酚 A 和雌二醇[J]. 分析化学,2018,46(4):486-492.
LI Q F,REN SH Y,WANG Y,*et al*.. Efficient detection of environmental estrogens bisphenol A and estradiol by sensing system based on AuNP-AuNP-UCNP triple structure[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*,2018,46(4):486-492. (in Chinese)

[3] 李慧,杨魁胜,祁宁,等. Yb^{3+}/Er^{3+} 掺杂氟氧化物微晶玻璃的制备与发光性能[J]. 中国光学,2011,4(6):672-677.
LI H,YANG K SH,QI N,*et al*.. Preparation and luminescence properties of Yb^{3+}/Er^{3+}-codoped oxyfluoride glass ceramics[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):672-677. (in Chinese)

[4] LIU X W,WANG Y,LI X Y,*et al*.. Binary temporal upconversion codes of Mn^{2+}-activated nanoparticles for multilevel anti-counterfeiting[J]. *Nature Communications*,2017,8:899.

[5] 华修德,尤红杰,杨家川,等. 基于上转换荧光标记的氯噻啉免疫层析方法研究[J]. 分析化学,2018,46(3):413-421.
HUA X D,YOU H J,YANG J CH,*et al*.. Immunochromatographic assay for detection of imidaclothiz based on upconversion fluorescence labeling[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*,2018,46(3):413-421. (in Chinese)

[6] CHEN H D,LEE S M,MONTENEGRO A,*et al*.. Plasmonically enhanced spectral upconversion for improved performance of GaAs solar cells under nonconcentrated solar illumination[J]. *ACS Photonics*,2018,5(11):4289-4295.

[7] 张磊,范亚蕾,黄月霞,等. Al^{3+},Ba^{2+} 掺杂 YF_3:Er^{3+},Yb^{3+} 的上转换发光性能[J]. 发光学报,2018,39(11):1533-

1541.
ZHANG L, FAN Y L, HUANG Y X, *et al*.. Upconversion luminescence properties of $YF_3:Er^{3+}$, Yb^{3+} doped with Al^{3+}, Ba^{2+}[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1533-1541. (in Chinese)

[8] LU Y Q, ZHAO J B, ZHANG R, *et al*.. Tunable lifetime multiplexing using luminescent nanocrystals[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(1): 32-36.

[9] LIU Y J, LU Y Q, YANG X S, *et al*.. Amplified stimulated emission in upconversion nanoparticles for super-resolution nanoscopy[J]. *Nature*, 2017, 543(7644): 229-233.

[10] 韩玉平, 谌林, 李贞, 等. 基于上转换荧光纳米颗粒-聚多巴胺纳米颗粒的生物传感器检测癌胚抗原[J]. 分析化学, 2018, 46(8): 1178-1185.
HAN Y P, SHEN L, LI ZH, *et al*.. An aptasensor based on upconversion nanoparticles-polydopamine nanoparticles nanosystem for detection of carcinoembryonic antigen[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(8): 1178-1185. (in Chinese)

[11] 李洋洋, 李大光, 张丹, 等. 小尺寸 $NaLuF_4:Yb^{3+}/Tm^{3+}$ 纳米晶的生长及上转换发光[J]. 发光学报, 2018, 39(6): 764-770.
LI Y Y, LI D G, ZHANG D, *et al*.. Growth process and upconversion luminescence of $NaLuF_4:Yb^{3+}/Tm^{3+}$ nanocrystals [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(6): 764-770. (in Chinese)

[12] JOHNSON N J J, HE SH, DIAO SH, *et al*.. Direct evidence for coupled surface and concentration quenching dynamics in lanthanide-doped nanocrystals[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(8): 3275-3282.

[13] CHEN Q SH, XIE X J, HUANG B L, *et al*.. Confining excitation energy in Er^{3+}-sensitized upconversion nanocrystals through Tm^{3+}-mediated transient energy trapping[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(26): 7605-7609.

[14] HE SH, JOHNSON N J J, HUU V A N, *et al*.. Simultaneous enhancement of photoluminescence, MRI relaxivity, and CT contrast by tuning the interfacial layer of lanthanide heteroepitaxial nanoparticles[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(8): 4873-4880.

[15] ZUO J, LI Q Q, XUE B, *et al*.. Employing shells to eliminate concentration quenching in photonic upconversion nanostructure[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(23): 7941-7946.

[16] FISCHER S, BRONSTEIN N D, SWABECK J K, *et al*.. Precise tuning of surface quenching for luminescence enhancement in core-shell lanthanide-doped nanocrystals[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7241-7247.

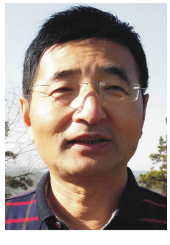
[17] ZUO J, SUN D P, TU L P, *et al*.. Precisely tailoring upconversion dynamics via energy migration in core-shell nanostructures[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(12): 3054-3058.

[18] QIAN H SH, ZHANG Y. Synthesis of hexagonal-phase core-shell $NaYF_4$ nanocrystals with tunable upconversion fluorescence[J]. *Langmuir*, 2008, 24(21): 12123-12125.

[19] RABOUW F T, PRINS P T, VILLANUEVA-DELGADO P, *et al*.. Quenching pathways in $NaYF_4:Er^{3+}$, Yb^{3+} upconversion nanocrystals[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(5): 4812-4823.

作者简介:

于海洋(1994—),男,河北沧州人,硕士研究生,2016 年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事稀土掺杂上转换纳米粒子发光材料及其机理方面的研究。E-mail: yutongyhy @ hotmail. com



孔祥贵(1955—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,1980 年于中国科学技术大学获得学士学位,1993 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,1998 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现任中国生物物理学会理事,主要从事稀土上转换发光纳米材料及其应用方面的研究。E-mail: xgkong14@ ciomp. ac. cn