

文章编号: 1000-7032(2015)02-0129-06

用于液体激光介质的 Nd³⁺ 离子 掺杂氟化镧纳米颗粒的制备与性能表征

陈 卓¹, 薄淑晖^{1*}, 田昌勇², 甄 珍¹, 刘新厚¹

(1. 中国科学院理化技术研究所 中国科学院光化学转换与功能材料重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院理化技术研究所 中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190)

摘要: 设计并合成了掺杂不同 Nd³⁺ 离子浓度的氟化镧纳米颗粒,并用油酸进行了表面修饰,使得这类纳米颗粒可分散于常见的有机溶剂中形成透明、均一、稳定的溶液。对纳米颗粒的结构、晶相以及发光性能进行了表征。固体和溶液材料在 1 060 nm 都有强的发射峰,说明纳米晶格可有效地保护 Nd³⁺ 离子免受外界环境对发光的猝灭影响。纳米颗粒有机溶液的吸收损耗和散射损耗测试结果表明,其总损耗系数能够满足激光介质材料的损耗要求,为该材料的实用化打下了基础。

关 键 词: 稀土; 纳米发光材料; 共沉淀法; 液体激光介质

中图分类号: O614.33 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153602.0129

Synthesis and Characterization of Nd³⁺ Doped LaF₃ Nanocrystals for Liquid Laser Medium

CHEN Zhuo¹, BO Shu-hui^{1*}, TIAN Chang-yong², ZHEN Zhen¹, LIU Xin-hou¹

(1. Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding Author, E-mail: boshuhui@mail.ipc.ac.cn

Abstract: LaF₃ nanocrystals with different Nd³⁺ concentration were designed, synthesized and modified by oleic acid. This kind of nanocrystals can be dissolved in many organic solvents and form a transparent, uniform and stable solution. The structure, crystal phase and luminescence properties of LaF₃:Nd³⁺ nanocrystals were characterized and studied. The nanocrystals show strong emission at 1 060 nm not only in solid but also in solution. This illustrates that the nanocrystal lattice can efficiently protect Nd³⁺ ions from the influence of environment on the luminescence. Meanwhile, the absorption loss and scattering loss of LaF₃ nanocrystals in organic solution were tested by our own system. The total loss coefficient can meet the requirements for laser medium material. These results show that LaF₃:Nd³⁺ nanocrystals may be used for liquid laser medium in the future.

Key words: rare-earth; nanocrystal luminescent materials; coprecipitation method; liquid laser medium

1 引 言

Nd^{3+} 是一种四能级的激活离子,具有增益高、阈值低、吸收截面大等优点, Nd^{3+} 掺杂的晶体或玻璃被广泛应用于激光工作介质,尤其是一些高功率泵浦及输出的激光器^[1-3]。但是,在大功率运行状态下,一些激光器产生的热量很难及时地从工作介质中被带走,过多的热量堆积很容易对工作介质产生损伤并且会迅速扩大,最终将导致整个工作介质的破坏。这些不足在很大程度上制约了激光工作介质的重复使用率、使用范围、运转周期和寿命^[4-8]。针对这种情况,从 1960 年开始,含有 Nd^{3+} 离子的液体激光工作介质因为其良好的散热性以及极低的热损伤特性被人们广泛地研究^[9-12]。其中一种方法是将 Nd^{3+} 离子的氧化物或氯化物溶于 SeOCl_2 和 POCl_3 等无机溶剂中^[9-10],但是这些无机溶剂的毒性与腐蚀性很强,这个特性严重阻碍了这种激光介质的使用。另外一种方法是将 Nd^{3+} 离子与有机配体相结合形成稀土有机配合物,再将该配合物分散于有机溶剂之中^[11]。有机溶剂的毒性与腐蚀性大大低于无机溶剂,但是有机溶剂与有机配体中大量的 C—H 和 O—H 基团会对 Nd^{3+} 离子发光产生非常严重的猝灭,所以这种材料的荧光寿命与量子产率通常都比较低^[12]。近年来,有关稀土离子掺杂纳米颗粒用于光放大器及有源集成光学器件的报道越来越多^[13-15]。尤其值得注意的是,这类纳米颗粒不仅可以通过表面修饰的方式分散于有机介质中,同时还保持了稀土离子在纳米颗粒中原有的优异发光性能^[16-17]。

本文从结构设计出发,首先选择声子能级较低的氟化镧纳米颗粒作为载体^[18-19]。这样可以在一定程度上保护掺杂于其中的稀土离子,使大多数稀土激活离子仍保有在纳晶中的状态,降低周围环境对其荧光猝灭的影响,同时这些氟化物能够容纳高的稀土掺杂量,是非常理想的纳米基质材料。此外,选用油酸这种长链羧酸作为修饰配体,利用羧基与稀土离子的配位作用或离子键形式修饰到纳米晶体的表面,经过修饰的纳米颗粒在有机溶剂中有了很好的分散性和相容性,可以分散到多种常见有机溶剂中并形成透明、均一、稳定的溶液体系。掺杂 Nd^{3+} 离子的氟化镧纳米颗粒在有机溶剂中的发光寿命(42 μs)与固体情

况下的发光寿命(49 μs)相差不大,说明纳米晶格可有效保护 Nd^{3+} 离子免受外界环境对发光的猝灭影响。液体激光介质的光学损耗也是一个极其重要的性能参数,决定了是否能有激光输出,但是很少有文献报道液体激光介质光学损耗的测量和分析。本文利用自行搭建的系统测试了氟化镧纳米颗粒有机溶液的吸收损耗和散射损耗,其总损耗系数为 0.05 ~ 0.06 cm^{-1} ,能够满足激光介质材料的损耗要求。这些特性使得此类材料非常有希望成为新型液体激光器的工作介质。

2 实 验

2.1 试剂与仪器

实验所用试剂均为分析纯,油酸为 Aldrich 公司产品。实验中使用的仪器主要有 Bruker D8-Advance X 射线粉末衍射仪、JEOL JEM-2100F 透射电子显微镜、Varian Excalibur 3100 傅里叶变换红外光谱仪、SDT Q600 热重分析仪以及 Edinburgh Instruments LFS920 荧光光谱仪。

2.2 实验过程

LaF_3 : Nd 纳米颗粒采用共沉淀法合成,该方法合成的纳米颗粒尺寸小,溶解到有机溶剂中不会产生大的光学损耗。采用油酸作为有机配体对 LaF_3 : Nd 纳米颗粒进行修饰,油酸与稀土离子具有很强的配位能力,可以使得稀土离子在有机溶剂中具有很好的溶解性。

2.2.1 油酸修饰 LaF_3 : 5% Nd 纳米颗粒的合成

将 NaF (1.008 g, 24 mmol) 溶解到 180 mL 去离子水中,然后再往其中加入 120 mL 乙醇和 40 mL 油酸。把混合溶液在氮气氛围内加热到 75 $^{\circ}\text{C}$ 。将 $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (3.753 1 g, 10.11 mmol) 和 $\text{NdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.190 8 g, 0.53 mmol) 溶解到 20 mL 去离子水中,当上述 NaF 混合溶液澄清透明后,再逐滴加入到其中。最终溶液在 75 $^{\circ}\text{C}$ 反应 5 h,然后冷却到室温。将 200 mL 乙醇加入到反应完毕的溶液中,搅拌过夜后离心分离,收集沉淀,即得到油酸修饰 LaF_3 : 5% Nd 纳米颗粒。

为了将附着在纳米颗粒上的无机盐与未反应的油酸等杂质除去,需要对所得的纳米颗粒进行纯化。首先将所得的纳米颗粒分散于正己烷中,等到充分分散之后,将溶液离心分离,去除沉淀。收集上层清液后,将乙醇加入其中,再离心分离,所得沉淀即为纯化后的油酸修饰 LaF_3 : 5% Nd 纳

米颗粒。

2.2.2 油酸修饰 LaF₃:2% Nd 纳米颗粒的合成

合成与纯化方法与前文所述相同,将反应原料的量变为 LaCl₃·7H₂O(3.871 6 g,10.43 mmol)和 NdCl₃·6H₂O(0.076 3 g,0.21 mmol)。

3 结果与讨论

3.1 纳米颗粒的形态与结构

图1为样品的X射线衍射(XRD)图谱,最大的衍射峰(002)、(111)和(300)说明所有的油酸修饰 LaF₃:Nd 纳米颗粒均呈现 LaF₃的特征六方晶相结构(α 相)^[20],图中衍射峰的展宽说明本文合成的纳米颗粒的尺寸是纳米量级。

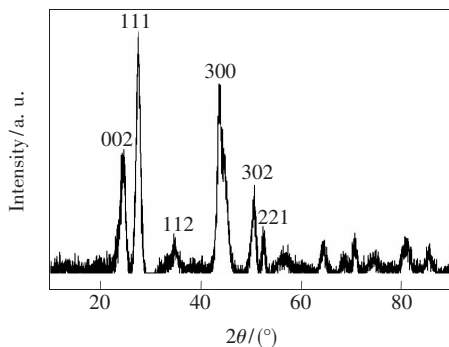


图1 油酸修饰 LaF₃:2% Nd 纳米颗粒的 X 射线衍射谱图
Fig.1 XRD patterns of the oleic acid-modified LaF₃:2% Nd nanocrystals

图2是 LaF₃:Nd 纳米颗粒的高分辨透射电镜的图像(HRTEM)。所有的纳米颗粒都是均匀分散的圆形,但是形状不是特别规整,纳米颗粒的尺寸为5~10 nm,衍射图样显示每个纳米颗粒都是

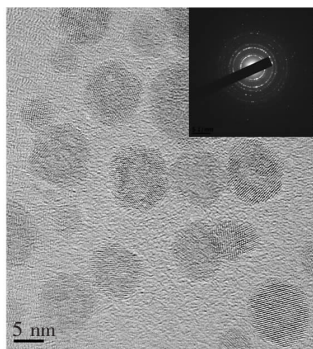


图2 LaF₃:Nd 纳米颗粒分散于氯仿中的透射电镜谱图,左上角的小图为选区电子衍射谱图。

Fig.2 TEM image of LaF₃:Nd nanocrystals dispersed in CHCl₃, the inset is a selected area electron diffraction pattern (SAED).

单晶。图2的电子衍射环图样(SAED)显示(002)、(111)和(300)3处有明显的衍射环,这与 LaF₃ 纳米颗粒的六方晶相结构相符^[21]。

图3显示的是油酸与油酸修饰 LaF₃:Nd 纳米颗粒的傅里叶变换红外光谱图(FT-IR)的对比。油酸与纳米颗粒在2854,2925,2960,3009,721 cm⁻¹处都有相同的吸收峰,表明在纳米颗粒表面保留有油酸的结构^[22-23]。但是,两者谱图也有区别:在曲线b中,1710 cm⁻¹处吸收峰为C=O的伸缩振动,但是在曲线a中却未发现该峰,只发现位于1457 cm⁻¹与1551 cm⁻¹的特征吸收峰,这是COO⁻基团的对称和非对称伸缩振动吸收峰^[22-24]。这表明油酸稀土离子发生了化学反应形成了羧酸盐,因此羧酸的特征峰消失。

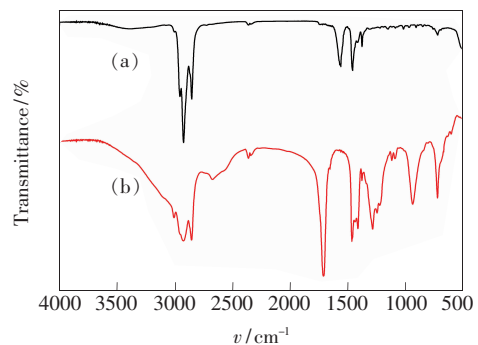


图3 油酸修饰 LaF₃:Nd 纳米颗粒(a)和油酸(b)的红外谱图

Fig.3 FT-IR spectra of the oleic oil-modified LaF₃:Nd nanocrystals (a) and oleic oil (b)

图4是油酸修饰 LaF₃:Nd 纳米颗粒的热失重(TGA)谱图。该热重分析在氮气氛围下进行,升温速率为10 °C/min,最终温度为600 °C。如图所示,谱图中主要有两个阶段的失重(250~400 °C和

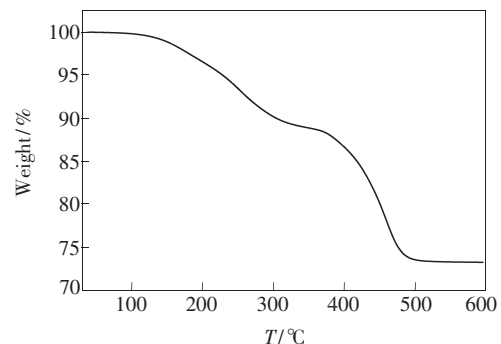


图4 油酸修饰 LaF₃:2% Nd 纳米颗粒的热失重曲线
Fig.4 TGA curve of the oleic oil-modified LaF₃:2% Nd nanocrystals

400 ~ 500 °C): 第一阶段的失重可归因于外层物理吸附油酸的解吸附过程, 这一层的油酸分子主要是通过物理相互作用吸附在内层油酸分子上, 作用力较小, 因此在较低温度下即可分解; 第二阶段的失重可归因于内层油酸的分解, 该层油酸分子主要是油酸与稀土离子进行化学反应以羧酸盐的形式存在, 作用力较大, 所以在较高的温度分解^[20,24], 这与红外谱图数据分析的结果一致。

3.2 发光性能测试

纳米颗粒的发光性能采用艾丁伯格公司的 LFS920 型荧光光谱仪进行测试, 光源为一个 450 W 的氙灯, 探测器为一个由液氮冷却的光电倍增管近红外探测器。

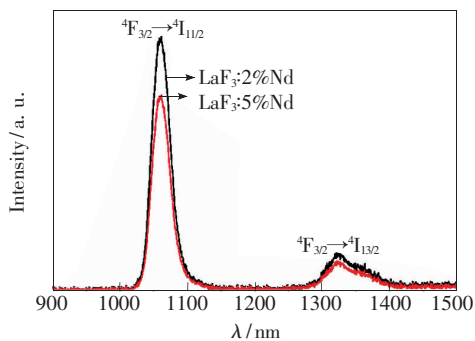


图 5 油酸修饰 LaF₃:2% Nd 与 LaF₃:5% Nd 纳米颗粒的发射光谱(800 nm 激发)

Fig. 5 Emission spectra of the oleic oil-modified LaF₃:2% Nd and LaF₃:5% Nd nanocrystals in solid state (excited by 800 nm)

如图 5 所示, 在 800 nm 波长光的激发下, 不同浓度 Nd³⁺ 离子掺杂的 LaF₃:Nd 纳米颗粒都有很强的特征发射峰, 且发射峰的波长均为 1 060 nm 和 1 323 nm, 分别归因于 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 和 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 能级跃迁。1 060 nm 处发射峰强很多, 所以该材料非常适合作为 1 060 nm 激光的工作介质^[25]。

图 6(a) 显示的是 LaF₃:2% Nd 固体纳米颗粒在 1 060 nm 发光寿命的拟合曲线(800 nm 激发), 内嵌图中是白色 LaF₃:Nd 固体纳米颗粒的实物图。所得的发光寿命曲线符合单指数拟合, 固体 LaF₃:2% Nd 纳米颗粒的发光寿命约为 49 μs。图 6(b) 是油酸修饰 LaF₃:2% Nd 纳米颗粒溶解到正己烷中(15% 质量分数) 发光寿命的拟合曲线, 内嵌图中是该正己烷溶液的实物图, 可以看出有机修饰的 LaF₃:Nd 纳米颗粒可以很好地分散于常

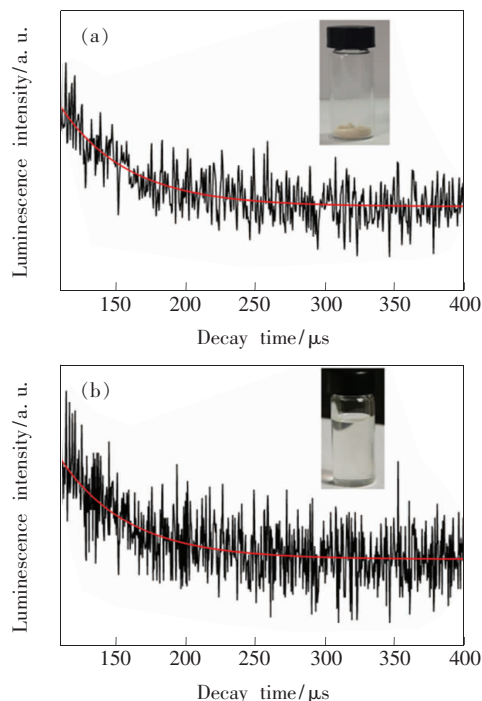


图 6 (a) LaF₃:2% Nd (固体) 的发光寿命衰减曲线, 实线为拟合曲线(插图是纳米颗粒固体粉末实物图); (b) LaF₃:2% Nd 分散于正己烷中的发光寿命衰减曲线, 实线为拟合曲线(插图是纳米颗粒分散于正己烷的溶液实物图, 质量分数为 15%)。

Fig. 6 (a) Decay curves of LaF₃:2% Nd nanocrystals in solid state (the inset shows a photograph of the white nanocrystals powder). (b) Decay curves of LaF₃:2% Nd nanocrystals dissolve in hexane (the inset shows a photograph of hexane solution of nanocrystals with 15% mass fraction).

规有机溶剂中, 形成透明、均一、稳定的溶液。液体体系的 LaF₃:Nd 纳米颗粒的发光寿命曲线符合单指数拟合, 寿命约为 42 μs, 比固体纳米颗粒的发光寿命只有轻微的下落, 说明所采用的氟化物基质材料可以很好地保护掺杂其中的稀土离子, 在很大程度上降低了外界环境对稀土离子发光性能的影响。

另外, 对于 LaF₃:5% Nd 纳米颗粒, 其在固体和油酸中的 1 060 nm 波长的发光寿命分别为 34 μs 和 30 μs。不论是在固体还是液体情况下, LaF₃:2% Nd 纳米颗粒的发光寿命都要长于 LaF₃:5% Nd, 这归因于浓度猝灭效应的存在。在浓度很小时, Nd³⁺ 的发光寿命随着浓度的增加而延长; 然而, 在 Nd³⁺ 浓度增加到一定程度后, 寿命反而变短。这是因为对于 Nd³⁺ 掺杂的晶体而言, $^4F_{3/2}$ 激发态

的发光很容易被猝灭。随着Nd³⁺浓度的增高,离子之间的距离减小。当荧光中心之间距离非常小时,激发能量可以从一个荧光中心迁移到其他没有被激发的荧光中心,从而增加了荧光猝灭的几率。当荧光中心之间的距离为0.5~1.0 nm时,激发能量在荧光中心间迁移的几率与荧光中心本身辐射跃迁的几率相当。当能量迁移的几率超过辐射跃迁的几率后,就会产生荧光猝灭。

本文除了研究纳米颗粒的发光性能外,还对纳米颗粒有机溶液的吸收与散射损耗进行了测试,测试原理和装置示意图如图7所示。首先将液体材料放入3 cm长的石英容器中,再将该石英容器放入损耗的测试设备中。液体的吸收损耗通过测量输入光和从样品输出光的两个功率求差值得到;液体的散射损耗通过积分球来收集经过样品散射出来的光,测得光功率,然后与输入光求差值得到,损耗率为损耗与液体容器长度的比值。表1中列出了LaF₃:2%Nd纳米颗粒以不同浓度溶解到正己烷中液体介质的损耗数据。从数据

来看,随着纳米颗粒浓度的提高,材料的散射损耗有明显提高,而吸收损耗没有太大变化。这说明随着溶解纳米颗粒浓度的增加,纳米颗粒或许有少量团聚而造成颗粒尺寸变大使得散射损耗增加。但是,在纳米颗粒含量较高的条件下,纳米颗粒有机溶液的总损耗系数也在0.04~0.06 cm⁻¹之间,该数值满足目前作为液体激光工作介质的条件。

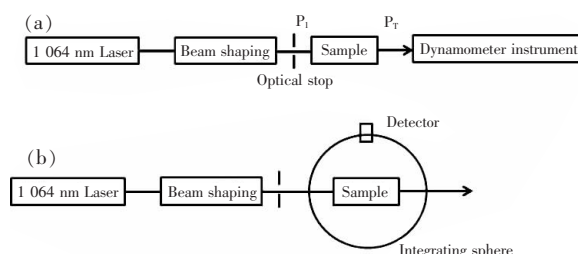


图7 纳米晶体分散于有机溶剂中的光学损耗测试装置。(a) 吸收损耗测试装置;(b) 散射损耗测试装置。

Fig.7 Optical loss test device of the nanocrystal in organic solution. (a) Absorption loss test device. (b) Scattered loss test device.

表1 LaF₃:2%Nd 纳米晶体分散于正己烷中的光学损耗系数
Table 1 Optical loss coefficient of LaF₃:2%Nd nanocrystals in hexane

Mass fraction of nanocrystals	Transmittance	Scattered power	Absorption loss coefficient/cm ⁻¹	Scattered loss coefficient/cm ⁻¹	Total loss coefficient/cm ⁻¹
10%	0.877	0.040	0.027 7	0.013 3	0.041 0
15%	0.838	0.089	0.027 4	0.029 7	0.057 1

4 结 论

合成了可用于液体激光工作介质的有机修饰LaF₃:Nd纳米颗粒。该类纳米颗粒在1060 nm具有很强的特征发射峰,同时固体纳米颗粒的Nd³⁺的发光寿命为49 μs。该纳米颗粒可以很好地分散

于多种常规有机溶剂中,在正己烷溶剂中Nd³⁺的发光寿命和固态时相差不大,说明纳米晶格能很好地保护Nd³⁺免受外界环境对其发光的影响。当纳米颗粒在有机溶剂中的含量高达10%~15%时,液体材料的损耗仍然能够满足激光工作介质的要求,这为该材料未来的实用化打下了基础。

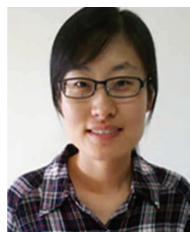
参 考 文 献:

- [1] Lu W, Yan L, Menyuk C R. Kerr-lens mode-locking of Nd: glass laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 200 (1-6): 159-163.
- [2] Cantatore J L, Kriegel D A. Laser surgery: An approach to the pediatric patient [J]. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 2004, 50(2):165-184.
- [3] Nava E, Stucchi E. Development of lasers for spaceborne Doppler wind lidar applications [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2003, 39:255-263.
- [4] Ren G G. Current situation and development trend of high energy laser weapon [J]. *Laser Optoelectron. Prog.* (激光与光电子学进展), 2008, 45(9):62-69 (in Chinese).
- [5] Zhou S H. The heat managements of the solid-state lasers [J]. *Chin. J. Quant. Electron.* (量子电子学报), 2005, 22(4):497-509 (in Chinese).

- [6] Zhou S H, Zhao H, Tang X J. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2009, 36(7):1605-1618 (in Chinese).
- [7] Mei S S. Solid-state lasers marching to 100 kW—A pilot study on overseas development of high energy solid state lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.* (激光与光电子学进展), 2005, 42(10):2-8 (in Chinese).
- [8] Li J D, Guo M X, Fu W Q, *et al.* Thermal distortion influence on single-slab heat capacity laser output [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2007, 34(1):45-49 (in Chinese).
- [9] Heller A. A high-gain room-temperature liquid laser: Trivalent neodymium in selenium oxychloride [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, 9(3):106-107.
- [10] Heller A. Formation of hot OH bonds in the radiationless relaxations of excited rare earth ions in aqueous solutions [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1966, 88:2058-2059.
- [11] Winston H, Marsh O J, Suzuki C K. Fluorescence of europium thenoyltrifluoroacetate I: Evaluation of laser threshold parameters [J]. *J. Chem. Phys.*, 1963, 39(2):267-271.
- [12] Miao T Z, Zhang Z, Feng W X, *et al.* Temperature-dependent self-assembly of near-infrared (NIR) luminescent Zn_2Ln and Zn_2Ln_3 ($Ln = Nd, Yb$ or Er) complexes from the flexible Salen-type Schiff-base ligand [J]. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2014, 132:205-214.
- [13] Xu X D, Wang X D, Meng J Q, *et al.* Crystal growth, spectral and laser properties of Nd: LuAG single crystal [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, 6(9):678-681.
- [14] Lin J, Li C X. Hydrothermal synthesis, formation mechanisms and luminescence properties of the rare earth fluorides nano- and micro-materials [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(6):519-534 (in Chinese).
- [15] Zhuo Z, Li T, Li S G, *et al.* A new composite $YVO_4/Nd: Y_{0.9}La_{0.1}VO_4$ crystal laser end-pumped with a fiber coupled diode array [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, 6(6):445-449.
- [16] Yu K H, Qiu X M, Xu X X, *et al.* Enhanced photoluminescence of Nd_2O_3 nanoparticles modified with silane-coupling agent; Fluorescent resonance energy transfer analysis [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(9):091916-1-3.
- [17] Yu R B, Yu K H, Wei W, *et al.* Nd_2O_3 nanoparticles modified with a silane-coupling agent as a liquid laser medium [J]. *Adv. Mater.*, 2007, 19:838-842.
- [18] Wang G, Peng Q. Tunable photoluminescence of $NaYF_4: Eu$ nanocrystals by Sr^{2+} codoping [J]. *Solid State Chem.*, 2011, 184:59-63.
- [19] Achary S N, Tyagi A K, Seshagiri T K, *et al.* Synthesis, powder XRD studies on $LiF-BaF_2/EuF_3$ systems and thermally stimulated luminescence (TSL) of Eu^{3+} doped $LiBaF_3$ [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2006, 129:256-260.
- [20] Shen L F, Laibinis P E, Hatton T A. Bilayer surfactant stabilized magnetic fluids: Synthesis and interactions at interfaces [J]. *Langmuir*, 1999, 15(2):447-453.
- [21] Kim J, Lee J H, An H J, *et al.* Luminescence properties of $LaF_3: Ce$ nanoparticles encapsulated by oleic acid [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2014, 57:110-115.
- [22] Thistlethwaite P J, Hook M S. Diffuse reflectance Fourier transform infrared study of the absorption of oleate/oleic acid onto titania [J]. *Langmuir*, 2000, 16(11):4993-4998.
- [23] Thistlethwaite P J, Gee M L, Wilson D. Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopic studies of the adsorption of oleate/oleic acid onto zirconia [J]. *Langmuir*, 1996, 12(26):6487-6491.
- [24] Nara M, Torii H, Tasumi M. Correlation between the vibrational frequencies of the carboxylate group and the types of its coordination to a metal ion: An *ab initio* molecular orbital study [J]. *J. Phys. Chem.*, 1996, 100(51):19812-19817.
- [25] Delphine P, Yan S, Mohamed B T, *et al.* Optical properties of Nd^{3+} and Yb^{3+} -doped $AgM(IO_3)_4$ metal iodates: Transparent host matrices for mid-IR lasers and nonlinear materials [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2:2715-2723.



陈卓(1980 -),男,江苏南京人,博士,助理研究员,2011年于中科院研究生院获得博士学位,主要从事稀土纳米发光材料的研究。
E-mail: chenzhuo@mail.ipc.ac.cn



薄淑晖(1982 -)女,山东临沂人,博士,副研究员,2008年于中科院研究生院获得博士学位,主要从事光功能材料的研究。
E-mail: boshuhui@mail.ipc.ac.cn