论 文

NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺的水热合成及980 nm激发下的光致发热

王嘉俊, 庞涛*

湖州师范学院理学院, 湖州 313000

*通讯作者, E-mail: tpang@126.com

收稿日期: 2018-05-18; 接受日期: 2018-06-20; 网络版发表日期: 2018-10-31

国家自然科学基金(编号: 11747312)和国家级大学生创新实践项目(编号: 201710347009)资助

摘要 本文利用简单的水热法制备了NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺光加热器,并基于可靠的上转换发光温度计研究了它在980 nm辐射下的光热转换特性.为了克服激光辐射所引起的热效应,间断的光谱扫描方式用来研究NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺光热转换与泵浦功率密度的关系.结果显示,激光辐射点的温度与泵浦功率密度线性相关.更有趣的是,我们注意到光热响应度依赖于Yb³⁺掺杂浓度.95% Yb³⁺掺杂在低功率密度下显示最强的光致发热量,但60% Yb³⁺掺杂对应最大的光热响应度(373 (K mm²)/W).可能的原因在于高浓度Yb³⁺掺杂有利于980 nm光子的吸收,但Yb³⁺之间长距离的能量转移抑制Yb³⁺到Sm³⁺的能量传递,进而降低了光热响应度.

关键词 NaYF₄, 光致发热, 温度传感, 980 nm激发

1 引言

近年来,由于在固体照明^[1]、全彩色显示^[2]、太阳能电池^[3]、生物标记^[4,5]、肿瘤治疗^[6-8]等领域的潜在应用,镧系掺杂上转换发光材料的研究引起人们的极大兴趣.然而,大多数基础研究集中在发光效率的提升^[9-11]及发光颜色的调控^[12-14]方面.事实上,上转换发光总是伴随热量的产生^[15,16],而温度的升高通常导致发光猝灭.有趣的是,我们发现适当的温度有利于声子辅助能量传递过程的发生,进而热增强上转换发光^[17].另外,温度也影响上转换发光色度的调控^[18].当然,更重要的是这种伴随热效应的上转换发光材料在肿瘤光热治疗方面显示了巨大的应用潜力^[19-21].根据

能量守恒原理,发光过程的存在势必会抑制光到热的转换.因此为了获得高的光热转换效率,降低辐射跃迁几率或消除辐射跃迁过程至关重要.同时,发热离子或发热离子组合在980 nm处应具有较强的光吸收.根据Chen等^[22]的报道,Yb³⁺/Sm³⁺共掺可实现高效的光热转换.

对于实际应用,定量地评价光热转换是非常重要的.但受测量技术的限制,很难准确地给出光热转换的效率.温度作为7个基本物理量之一,可用来评价光热转换的性能.相比于传统的接触式测量方法,基于Yb³⁺/Er³⁺共掺上转换发光的光学温度传感技术提供了更精准、更快速的温度探测^[23].然而,一个容易被忽视的问题是基于一实验数据所建立的温度测量标准是否

引用格式: Wang J, Pang T. Hydrothermal synthesis of NaYF₄:Yb³⁺,Sm³⁺ and photo-thermal effect under 980 nm excitation. *Sci Sin Chim*, 2019, 49: 311–318, doi: 10.1360/N032018-00116

可靠. 受热效应的影响, 通常上转换发光温度计读出的温度比实际温度要低.

本文采用简单的水热法制备了NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺光加热器, 并基于NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺的上转换发光建立了可靠的温度测量标准. 通过将只占总质量1%的NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺混入NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺粉末中, 利用Er³⁺上转换发光与温度的关系研究了NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺在980 nm辐射下的光热转换性能.

2 实验部分

2.1 实验原料

Gd(NO₃)₃·6H₂O (99.99%)、Y(NO₃)₃·6H₂O (99.99%)和Er(NO₃)₃·6H₂O (99.99%)购自山东省鱼台县清达化工有限公司(中国). Yb(NO₃)₃·6H₂O (99.99%)、Sm(NO₃)₃·6H₂O (99.99%)和柠檬酸(C₆H₈O₇·H₂O, 分析纯)购自上海市阿拉丁生化科技股份有限公司(中国). NaF (AR)购自天津市科密欧化学试剂有限公司(中国).

2.2 NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺光加热器的水热合成

典型的制备工艺如下: 利用去离子水溶解Ln(NO₃)₃·6H₂O配制20 mL LnNO₃ (Ln=0 mol% Y, 95 mol% Yb, 5 mol% Sm)溶液, 并按照柠檬酸与Ln³⁺摩尔比例为2/1加入C₆H₈O₇·H₂O. 磁力搅拌10 min后, 快速注入20 mL的NaF水溶液(摩尔比F⁻/Ln³⁺=5/1). 继续搅拌20 min后, 将所得产物转移至50 mL反应釜, 并于200℃恒温6 h. 待反应釜自然冷却至室温后, 离心分离收集产物并利用去离子水洗涤3次. 最后, 在50℃烘箱内干燥12 h得到目标产物NaYbF₄:5%Sm³⁺. 作为对比, 通过相同的合成方法制备了其他3个样品. 不同样品的化学组成见表1.

2.3 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺上转换温度计的制备

利用去离子水溶解Ln(NO₃)₃·6H₂O配制20 mL LnNO₃ (Ln=79 mol% Gd, 20 mol% Yb, 1 mol% Er)溶液, 磁力搅拌下, 将20 mL的NaF水溶液快速倒入(摩尔比F⁻/Ln³⁺=12/1). 继续搅拌20 min后, 将所得产物转移至50 mL反应釜, 并于200℃恒温12 h. 待反应釜自然冷却至室温后, 离心分离收集产物并利用去离子水洗涤3

次. 最后, 在50℃烘箱内干燥12 h得到目标产物NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺.

2.4 表征

X射线衍射谱(XRD)用于鉴别材料的晶体结构, 仪器型号为Smartlab 9 (日本), 工作电压为40 kV, 电流为150 mA. FEI Inspect F50 (美国)和JSM-7800F型(日本)扫描电子显微镜(SEM)分别用于观察NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺和NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺的粒子形貌和尺寸. Hitachi F-4600光谱仪(日本)用于记录样品的上转换光谱, 所用光源为功率可调的980 nm连续激光器. 自制的温控装置用于上转换温度计的温度测量标准的建立, 控温误差低于0.5℃.

3 结果与讨论

3.1 NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺光加热器的结构与形貌

如图1所示, 当Yb³⁺浓度较大时, 所得产物(如N1和N2)的衍射峰与立方相NaYF₄ (JCPDS No. 77-2042)的标准数据匹配良好. 然而, 当Yb³⁺浓度低于40%时, 对应的样品为立方相和六方相的混合物. 这可由图2的SEM照片进一步予以证实, 但六方相的含量非常少. 关于稀土掺杂调控NaReF₄ (Re代表稀土)的晶体结构, Liu等^[24]曾做过系统的研究, 并指出掺杂离子的半径发挥重要作用. 在本研究中, Y³⁺的半径大于Yb³⁺^[25], 更大的电子云畸变使得Y³⁺比Yb³⁺更适应六方相结构中低对称性的阳离子格位^[24], 因此Y³⁺的含量增加, 形成少量的六方相产物. 此外, 由图3可知Yb³⁺浓度对立方相的尺寸也有一定影响. 与其他3个样品相比, N2样品的粒子尺寸最小, 约为135 nm.

3.2 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺的上转换温度传感特性

原则上, 要研究NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺的光热转换特性, 最理想的上转换温度计应该具有球形形貌的六方相NaYF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺. 但受限于六方相的取向生长(图2(c, d)), 很难获得球形的六方相NaYF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺. 本研究选择六方相的NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺作为上转换发光温度计, 原因在于它更容易形成球形粒子(图4)且具有与六方相NaYF₄相似的物理和化学性质.

表 1 不同样品的化学组成

Table 1 Chemical composition of various samples

样品	Ln ³⁺ 的浓度(mol%)		
	Y ³⁺	Yb ³⁺	Sm ³⁺
N1	0	95	5
N2	35	60	5
N3	55	40	5
N4	75	20	5

图5(a, b)分别给出了0.015 W/mm²功率密度下绿光发射强度比(I_H/I_S)及绿光发射积分强度(I_{H+S})与激光辐射时间(t)的关系. I_H/I_S 的数值随激光辐射时间的增加并不发生显著变化, 充分表明长时间的激光辐射不会导致样品温度的升高^[26]. 更重要的是, 这一事实意味着0.015 W/mm²的激光辐射几乎不引起热效应(相反的结果参照下文). 综上所述, 本研究建立温度测量标准所选取的实验条件为: (1) 功率密度为0.015 W/mm²; (2) 光谱连续扫描, 即整个测试过程中激光持续照射样品. 如图5(c, d)所示, 随温度的升高, I_H 先少许增强后缓慢衰减而 I_S 单调递减. I_H 相比于 I_S 所呈现的良好热稳定

图 1 N1、N2、N3和N4的XRD谱及立方相(JCPDS No. 77-2042)、六方相(JCPDS No. 16-0334) NaYF₄的标准数据(网络版彩图)

Figure 1 XRD patterns of N1, N2, N3 and N4 as well as the standard data of cubic (JCPDS No. 77-2042) and hexagonal (JCPDS No. 16-0334) NaYF₄ (color online).

性可归因于⁴S_{3/2}到²H_{11/2}的热布居^[27]. 因²H_{11/2}和⁴S_{3/2}是一对耦合能级, I_H/I_S 与温度的关系可用式(1)进行拟合:

$$\frac{I_H}{I_S} = C \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

图 2 N1 (a)、N2 (b)、N3 (c)和N4 (d)的SEM照片, 其中红色箭头所指的是棒状的六方相NaYF₄ (网络版彩图)

Figure 2 SEM images of N1 (a), N2 (b), N3 (c) and N4 (d), in which the rod-shaped structure pointed by the red arrow is the hexagonal NaYF₄ (color online).

图3 Yb^{3+} 浓度对光加热器粒子尺寸的影响

Figure 3 Effect of Yb^{3+} concentration on particle size of optical heaters.

图4 (a) $\text{NaGdF}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/1\%\text{Er}^{3+}$ 的XRD谱及六方相 NaGdF_4 (JCPDS No. 27-0699) 的标准数据; (b) $\text{NaGdF}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/1\%\text{Er}^{3+}$ 的SEM照片及尺寸分布柱状图(网络版彩图)

Figure 4 (a) XRD pattern of $\text{NaGdF}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/1\%\text{Er}^{3+}$ as well as standard data of hexagonal NaGdF_4 (JCPDS No. 27-0699); (b) SEM image of $\text{NaGdF}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/1\%\text{Er}^{3+}$ as well as histogram of size distribution (color online).

图5 0.015 W/mm^2 功率密度下, 不同时刻 $\text{NaGdF}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/1\%\text{Er}^{3+}$ 的 $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (a) 和 $I_{\text{H+S}}$ (b) 及不同温度下 $\text{NaGdF}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/1\%\text{Er}^{3+}$ 的上转换光谱(c) 和 I_{H} 及 I_{S} (d) (网络版彩图)

Figure 5 $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (a) and $I_{\text{H+S}}$ (b) of $\text{NaGdF}_4:20\%\text{Yb}^{3+}/1\%\text{Er}^{3+}$ at different times as well as upconversion spectra (c) and I_{H} and I_{S} (d) of $\text{NaGdF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ at various temperatures (pumping power density: 0.015 W/mm^2) (color online).

其中 C 是常数, ΔE 是 $^2\text{H}_{11/2}$ 与 $^4\text{S}_{3/2}$ 的能隙, k 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度^[28]. 由图6可知, 拟合得到的 C 和 $\Delta E/k$ 分别为 10.12 和 1031.54. 将玻尔兹曼常数代入, 可确定 ΔE 约为 716 cm^{-1} . 该数值与图5(c)中光谱估算得到的数值(713 cm^{-1})非常接近, 再次证明图6中的温度测量标准是可靠的. 为了评价上转换温度计的温度传感能力, 图6也显示了温度灵敏度的函数. 很明显, 温度灵敏度的大小与温度有关, 但它的数值随温度的变化幅度很小, 表明该温度计在 300~500 K 温度范围内具有良好的温度传感能力.

图 6 I_H/I_S 和温度灵敏度与温度的关系(图中所有实验数据均采用 3 次测量取平均的方式获得)(网络版彩图)

Figure 6 Dependence of I_H/I_S and sensitivity on temperature (all experimental data in the figure are obtained by averaging three measurements) (color online).

图 7 0.219 W/mm² 功率密度下, M1 的 I_H/I_S 和温度与辐射时间的关系

Figure 7 Dependence of I_H/I_S and temperatures on radiation time for M1 (pumping power density: 0.219 W/mm²).

3.3 NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺ 的光致发热

由于激光辐照点的光斑尺寸很小, 为了准确地反映 NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺ 的光热转换性能, 必须将上转换温度计 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺ 和 NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺ 进行充分混合. 同时, 为了避免 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺ 的光致发热影响探测的结果, NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺ 的加入量必须足够小. 本文中, NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺ 的质量仅为混合物质量的 1%. 下文出现的 M1、M2、M3 和 M4 分别代表混有上转换温度计的 N1、N2、N3 和 N4.

图 7 给出的是 M1 在 0.219 W/mm² 功率密度辐射下不同时刻的 I_H/I_S 及对应的温度. 如图所示, 样品的温度在 $t=0$ 到 $t=2$ min 经历一个明显的温升, 之后逐渐趋于稳定. 这个事实表明在无法忽略激光辐射热效应的情况下, 采用连续光谱扫描模式计算得到的温度值将高于真实值. 而且, 泵浦功率密度越大, 温度的偏差越大. 综上所述, 为了反映真实的温度, 光谱扫描模式改为间断扫描, 即每次光谱扫描时激光辐射时间仅为 3 s, 且两次光谱扫描的间隔为 5 min.

通过比较 M1 和上转换温度计 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺ 在不同泵浦功率密度下的上转换光谱、绿光发射强度和绿光强度比(图 8), 我们发现 M1 的光热转换能力明显强于 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺. 考虑到 M1 中只含有 1 wt% 的 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺, NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺ 对 M1 的发热贡献应可以忽略. 另外, 注意到通过简单地改变激光辐射功率密度可对 NaYbF₄:5%Sm³⁺ 的光热转换进行调节. 类似的现象在 M2、M3 和 M4 中也有观察到(图 9(a)), 同时发现光热转换的能力与 Yb³⁺ 的掺杂浓度密切相关.

进一步, 由图 9(b) 可知 M1、M2、M3 和 M4 的温度与功率密度呈良好的线性关系. 为了定量地评价它们的光热转换能力, 我们将线性拟合得到的斜率定义为光热响应度, 即温度随功率密度的变化率. 如图所示, M1、M2、M3 和 M4 的光热响应度分别为 283、373、244 和 166 K mm²/W. 有趣的是, 虽然在较低的泵浦功率密度下, N1 的光致发热量强于 N2, 但 N1 的光热响应度却远低于 N2. 众所周知, Yb³⁺ 在晶格中所发挥的作用是吸收 980 nm 光子并传递能量给临近的 Sm³⁺, 因此 Yb³⁺ 浓度越大越有利于 980 nm 光子的吸收. 但 Yb³⁺ 浓度过大会诱发 Yb³⁺ 之间的长距离能量转移^[29], 进而抑制 Yb³⁺ 到 Sm³⁺ 的能量传递. N1 样品中 Yb³⁺ 浓度高达 95%, 虽然可吸收更多的 980 nm 光子, 但是 Yb³⁺ 之间的能量转移反使其光热响应度低于 N2 样品.

4 结论

本文利用简单的水热法制备了 NaYF₄:Yb³⁺/Sm³⁺ 光加热器和 NaGdF₄:20%Yb³⁺/1%Er³⁺ 上转换发光温度计. 通过消除激光辐射所致热效应, 建立了可靠的上转换温度测量标准. 而且证实了光热转换性能与功率密度的关系, 采用长时间的激光辐射将导致计算的温度

图8 M1 (a)和上转换温度计(b)在不同功率密度下的上转换光谱; M1在不同功率密度下的上转换发光强度(c)及 $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (d); 上转换温度计在不同功率密度下的上转换发光强度(e)及 $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (f) (环境温度为290 K) (网络版彩图)

Figure 8 Upconversion spectra of M1 (a) and optical thermometer (b) at various power densities; dependence of emission intensity (c) and $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (d) on power density for M1; dependence of emission intensity (e) and $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (f) on power density for optical thermometer (ambient temperature: 290 K) (color online).

图9 M1、M2、M3和M4的 $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (a)和样品温度(b)与功率密度的关系(网络版彩图)

Figure 9 Dependence of $I_{\text{H}}/I_{\text{S}}$ (a) and sample's temperature (b) on pumping power density for the various mixtures (color online).

明显偏离真实温度. 基于间断的光谱扫描模式, 详细研究了 Yb^{3+} 掺杂浓度和泵浦功率密度对光加热器光热性

能的影响. 结果显示, 光热转换能力与 Yb^{3+} 掺杂浓度密切相关.

参考文献

- 1 Tang JF, Li GN, Yang C, Gou J, Luo DH, He H. *CrystEngComm*, 2015, 17: 9048–9054
- 2 Zhu Y, Cui S, Liu M, Liu X, Lu C, Xu X, Xu W. *Appl Phys Express*, 2015, 8: 072602
- 3 Yu J, Yang Y, Fan R, Wang P, Dong Y. *Nanoscale*, 2016, 8: 4173–4180
- 4 Hu Y, Wu B, Jin Q, Wang X, Li Y, Sun Y, Huo J, Zhao X. *Talanta*, 2016, 152: 504–512
- 5 Yang P, Gai S, Lin J. *Chem Soc Rev*, 2012, 41: 3679–3698
- 6 Lv R, Yang P, He F, Gai S, Li C, Dai Y, Yang G, Lin J. *ACS Nano*, 2015, 9: 1630–1647
- 7 He F, Yang G, Yang P, Yu Y, Lv R, Li C, Dai Y, Gai S, Lin J. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 3966–3976
- 8 Gai S, Li C, Yang P, Lin J. *Chem Rev*, 2014, 114: 2343–2389
- 9 Wang Z, Wang C, Han Q, Wang G, Zhang M, Zhang J, Gao W, Zheng H. *Mater Res Bull*, 2017, 88: 182–187
- 10 Zhang Y, Shen Y, Liu M, Han Y, Mo X, Jiang R, Lei Z, Liu Z, Shi F, Qin W. *CrystEngComm*, 2017, 19: 1304–1310
- 11 Fan S, Wang S, Xu W, Li M, Sun H, Hu L. *J Mater Sci*, 2017, 52: 869–877
- 12 Zhou A, Song F, Han Y, Song F, Ju D, Adnan K, Liu L, Feng M. *J Lumin*, 2018, 194: 225–230
- 13 Zhang L, Zhao S, Liang Z, Zhang J, Zhu W, Liu P, Sun H. *J Alloys Compd*, 2017, 699: 1–6
- 14 Li H, Liu G, Wang J, Dong X, Yu W. *Phys Chem Chem Phys*, 2016, 18: 21518–21526
- 15 Dai Q, Song H, Ren X, Lu S, Pan G, Bai X, Dong B, Qin R, Qu X, Zhang H. *J Phys Chem C*, 2008, 112: 19694–19698
- 16 Zhang Y, Xu S, Li X, Zhang J, Sun J, Xia H, Hua R, Chen B. *Opt Mater Express*, 2018, 8: 368–384
- 17 Pang T, Wang J. *Mater Res Express*, 2018, 5: 015049
- 18 Pang T, Lu W H. *Ceram Int*, 2017, 43: 1061–1065
- 19 Pandey A, Rai VK, Kumar V, Kumar V, Swart HC. *Sens Actuat B-Chem*, 2015, 209: 352–358
- 20 Suo H, Guo C, Yang Z, Zhou S, Duan C, Yin M. *J Mater Chem C*, 2015, 3: 7379–7385
- 21 Du P, Luo L, Park HK, Yu JS. *Chem Eng J*, 2016, 306: 840–848
- 22 Zheng H, Chen B, Yu H, Li X, Zhang J, Sun J, Tong L, Wu Z, Zhong H, Hua R, Xia H. *Sens Actuat B-Chem*, 2016, 234: 286–293
- 23 Tong L, Li X, Zhang J, Xu S, Sun J, Zheng H, Zhang Y, Zhang X, Hua R, Xia H, Chen B. *Opt Express*, 2017, 25: 16047–16058
- 24 Wang F, Han Y, Lim CS, Lu Y, Wang J, Xu J, Chen H, Zhang C, Hong M, Liu X. *Nature*, 2010, 463: 1061–1065
- 25 Pang T, Cao W, Xing M, Luo X, Yang X. *Opt Mater*, 2011, 33: 485–489
- 26 Chen D, Liu S, Li X, Yuan S, Huang P. *J Eur Ceram Soc*, 2017, 37: 4939–4945
- 27 Wu JL, Cao BS, Lin F, Chen BJ, Sun JS, Dong B. *Ceram Int*, 2016, 42: 18666–18673
- 28 Tong L, Li X, Zhang J, Xu S, Sun J, Cheng L, Zheng H, Zhang Y, Zhang X, Hua R, Xia H, Chen B. *Sens Actuat B-Chem*, 2017, 246: 175–180
- 29 Chen D, Zhou Y, Wan Z, Yu H, Lu H, Ji Z, Huang P. *Phys Chem Chem Phys*, 2015, 17: 7100–7103

Hydrothermal synthesis of NaYF₄:Yb³⁺,Sm³⁺ and photo-thermal effect under 980 nm excitation

Jiajun Wang, Tao Pang^{*}

College of Science, Huzhou University, Huzhou 313000

^{*}Corresponding author (email: tpang@126.com)

Abstract: In this paper, NaYF₄:Yb³⁺,Sm³⁺ optical heaters were prepared by a simple hydrothermal method. Based on a reliable upconversion luminescence thermometer, its photothermal conversion properties under 980 nm radiation were studied. To overcome the thermal effects caused by laser radiation, an intermittent spectral scanning method was used to study the relationship between NaYF₄:Yb³⁺,Sm³⁺ photothermal conversion and pumping power density. The results show that the temperature of the laser radiation point is linearly related to the pumping power density. More interestingly, it is noted that the photothermal response depends on the Yb³⁺ doping concentration. The 95% Yb³⁺ doping shows the strongest photogenerated heat at low power density, but the 60% Yb³⁺ doping corresponds to the maximum photo-thermal responsivity (373 (K mm²)/W). The probable reason is that the high concentration of Yb³⁺ doping facilitates the absorption of 980 nm photons, but the long-distance energy transfer between Yb³⁺ suppresses the energy transfer from Yb³⁺ to Sm³⁺, thereby reducing the photo-thermal responsivity.

Keywords: NaYF₄, photo-thermal conversion, temperature sensing, 980 nm excitation

doi: [10.1360/N032018-00116](https://doi.org/10.1360/N032018-00116)