

文章编号: 1000-7032(2023)08-1390-08

双波长泵浦含有 $\text{Er}^{3+}:\text{NaYF}_4$ 纳米晶氟氧化物 微晶玻璃的上转换发光性能

李赛辉^{1,2}, 康世亮^{1,2*}, 陈智³, 邵欲欣^{1,2}, 林常规^{1,2}

(1. 宁波大学高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211; 3. 之江实验室, 浙江 杭州 311121)

摘要: 高效的光调制能够显著提高光转换效率和调节光响应速率, 在光电子学领域中表现出巨大的应用潜力。然而, 光子之间的弱相互作用对操纵光子-光子相互作用造成了巨大的障碍。本文采用 850 nm 和 1 550 nm 激光同时激发含有 $\text{Er}^{3+}:\text{NaYF}_4$ 纳米晶体的氟氧化物微晶玻璃, 可以实现绿色上转换荧光的快-慢光调制。与两束单波长激发的发光强度之和相比, 双波长同时激发的绿色上转换发光强度明显提高了一个数量级。值得注意的是, 绿色上转换发光快-慢响应速率依赖于双波长激发的泵浦策略, 显示出高达 4 倍的快-慢响应差异。研究表明, 双波长激发绿色上转换发光的快-慢光调制在新型的全光开关中具有广阔的应用前景。

关键词: 微晶玻璃; NaYF_4 纳米晶; 双波长泵浦; 上转换荧光

中图分类号: O482. 31; TQ171. 71 文献标识码: A DOI: 10. 37188/CJL. 20230069

Up-conversion Luminescence Performance of Oxyfluoride Glass-ceramic Containing $\text{Er}^{3+}:\text{NaYF}_4$ Nanocrystals Under Two-wavelength Excitation

LI Saihui^{1,2}, KANG Shiliang^{1,2*}, CHEN Zhi³, SHAO Yuxin^{1,2}, LIN Changgui^{1,2}

(1. Laboratory of Infrared Materials and Devices, Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China,

3. Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China)

* Corresponding Author, E-mail: kangshiliang@nbu.edu.cn

Abstract: Efficient optical modulation enables a prominent improvement of optical conversion efficiency and regulation of optical response rate, which shows great potential in the field of optoelectronics. However, the weak interaction between photons poses a strong obstacle for manipulating photon-photon interactivity. Here, upon simultaneous excitation of 850 nm and 1 550 nm, a fast-slow optical modulation of green up-conversion luminescence in oxyfluoride glass ceramics containing $\text{Er}^{3+}:\text{NaYF}_4$ nanocrystals can be achieved. Compared with the sum of the luminescence intensity with two single-wavelength excitations, the green up-conversion luminescence intensity excited by simultaneous two-wavelength presents a significant increase by an order of magnitude. It is worth noting that the fast-slow response rate of green up-conversion luminescence relies on the pump strategy of two-wavelength excitation, showing as high as four times of the fast-slow response difference. The fast-slow optical modulation of green up-conversion luminescence under two-wavelength excitation may find potential applications in emerging all-optical switching.

Key words: glass-ceramics; NaYF_4 nanocrystals; two-wavelength excitation; up-conversion fluorescence

收稿日期: 2023-03-21; 修订日期: 2023-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(62105168)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62105168)

1 引言

随着新一代信息技术的快速发展,对网络数据处理的速度和鲁棒性提出了更高的要求^[1-2]。传统的数据传输系统主要依赖于电子互连方式,存在传输速度低、串扰强等问题,而光子技术则被认为是实现高性能信息处理、通信和数据存储的理想方法^[3-5]。近些年,在基于光学非线性材料(如石墨烯、黑磷等)开发高效、紧凑和宽带的光调制器方面做出了巨大努力^[6-9]。然而,这种材料存在制备困难、成本高以及光和热稳定性差等问题^[10]。因此,迫切需要探索合适的光学材料用于稳定的光调制。

微晶玻璃,尤其是氟氧化物微晶玻璃结合了玻璃良好的可塑性、制备简单、组分和光学性能可调、热化学稳定性高和氟化物晶体低的声子能量和强大的晶体场等优点,可以显著提高活性离子的光学性能^[11-13]。稀土离子(如 Er^{3+})具有丰富的能级,能够被可见和近红外波段的激光激发,这为通过合适的泵浦策略实现有效的光调制提供了机会。此外, Er^{3+} 掺杂材料的光学性能非常稳定,没有任何荧光闪烁,表现出巨大的光调制应用潜力^[14]。 NaYF_4 晶体具有低的声子能量,并且 Er^{3+} 掺杂的 NaYF_4 晶体被认为是最有效的上转换发光材料^[15]。由于其有效的泵浦效率,双波长激发已被证明是获得优异光学性能的有效方法^[16]。该方法已经在上转换全光组合逻辑门、低功耗超分辨荧光成像和三维显示等领域展现出巨大的应用潜力^[17-18]。通过采用该泵浦方案,可以增强相邻激发态离子的能量传递和活性离子的激发态吸收,从而有利于提高光转换效率并实现优异的光调制性能。

在这项工作中,我们基于含 $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$ 纳米晶体的氟氧化物微晶玻璃材料,采用1550 nm和850 nm双波长激光同时泵浦,实现了绿色上转换荧光快-慢光学调制。与传统的单波长激发相比,双波长同时泵浦的上转换发光强度提高约10倍。当同时使用1550 nm脉冲光和850 nm连续光激发时,光调制性能随1550 nm脉冲光的调节而变化,最终可得到较慢的响应时间。相反,当同时使用1550 nm连续光和850 nm脉冲光激发时,光调制性能随850 nm脉冲光的调节而变化,最终可得到较快的响应时

间。此外,玻璃热处理后仍然具有较高的透过率($> 80\%$),这是由于 NaYF_4 晶体的折射率与玻璃基体相匹配。这些结果表明,含有 $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$ 纳米晶氟氧化物微晶玻璃的绿色上转换发光快-慢光调制在全光纤数据处理中具有潜在的应用前景。

2 实验

2.1 样品制备

采用熔融淬冷工艺制备组成为 $39\text{SiO}_2\text{-}25\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}18\text{Na}_2\text{O}\text{-}7\text{NaF}\text{-}10\text{YF}_3\text{-}1\text{ErF}_3$ (% (mol))的前驱体玻璃。选用高纯 SiO_2 (99.99%)、 Al_2O_3 (99.99%)、 NaF (99.99%)、 YF_3 (99.99%)、 ErF_3 (99.99%)和 Na_2CO_3 (99.99%)作为原材料,按化学计量比称取30 g原料放入玛瑙研钵中,充分混合均匀后放入高纯刚玉坩埚中。首先将装有原料的刚玉坩埚放入预升温至1500 °C的升降炉中并进行熔制50 min,然后将熔体浇注到预热的铜模具中淬冷获得前驱体玻璃,最后将前驱体玻璃移到精密马弗炉中在500 °C恒温下退火2 h以消除玻璃内部应力。冷却至室温后,将块状前驱体玻璃加工成规则形状并分别在580,585,590 °C下热处理6 h得到系列透明的微晶玻璃样品。之后,将样品加工为1.5 mm厚度且双面光学抛光,用于后续光学测量。

2.2 样品表征

实验样品中存在的晶相类型通过德国Bruker公司的D2 Phaser型号X射线衍射仪(XRD)表征。样品的吸收和透过光谱通过美国Perkin-Elmer公司的Lambda 950型分光光度计进行测试。在850 nm和1550 nm激光二极管(LDs)激发下,绿色上转换发射光谱通过海洋光学光谱仪记录。荧光衰减曲线通过Tektronix TDS 3012c型数字示波器进行测试。

2.3 光学测试平台

为表征绿色上转换荧光的快-慢光调制性能,我们使用多个反射镜和一个二向色镜DMLP1180(THORLABS, USA)对1550 nm和850 nm两束激光进行准直并耦合成同轴光束,在共焦处激发样品,如图1所示。使用斩波器对激光束的频率和脉冲宽度进行时间调制。利用加负高电压的光电倍增管(PMT)采集绿色上转换荧光信号。通过数字示波器采集快-慢光调制信号。

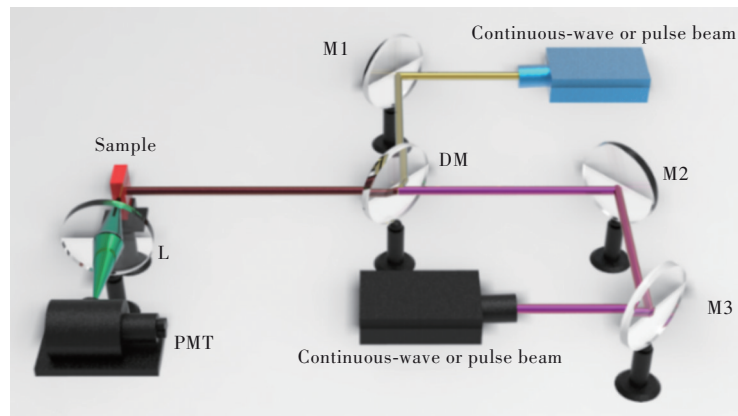


图1 双波长泵浦系统:M1~M3为反射镜,DM为二向色镜,L为聚焦镜,PMT为光电倍增管。

Fig.1 Two-wavelength pumping system. M1-M3: mirror; DM: dichroic mirror; L: lens; PMT: photomultiplier tube.

3 结果与讨论

为了确定系列微晶玻璃样品的晶相信息,对每个样品进行XRD表征,如图2所示。前驱体玻璃没有明显的衍射峰,表现出非晶态特征。热处理后可观察到一些尖锐的晶体衍射峰,这与立方相 NaYF_4 (NO. 6-342)晶体相的XRD衍射峰特征相吻合。根据Scherer公式^[19-20]以及晶相和非晶相强度参数可以分别计算出前驱体玻璃在580, 585, 590 °C热处理条件下析出晶粒的平均尺寸分别为30, 37, 53 nm, 结晶度分别为6.1%、6.9%和8.3%。另外,从图中发现微晶玻璃样品的衍射峰与标准 NaYF_4 晶体的PDF卡片对比有明显的蓝移。这是由于晶化后部分 Er^{3+} 进入到 NaYF_4 晶体中取代了 Y^{3+} 位置, Er^{3+} 离子的半径大于 Y^{3+} 离子导致纳米晶结构发生改变。

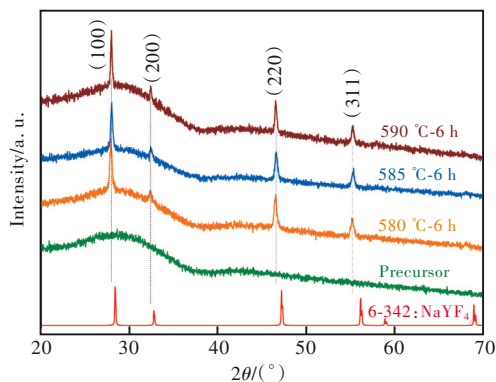


图2 前驱体玻璃和微晶玻璃样品的XRD谱

Fig.2 XRD patterns of precursor glass and glass ceramic samples

图3(a)为前驱体玻璃和系列微晶玻璃样品的可见-近红外透过光谱,可以观察到制备的前驱体玻璃具有较高的透过率,接近90%。由于瑞利

散射的作用,玻璃样品的透过率虽然随热处理温度的升高而降低,但依然保持在80%附近^[23]。从图中可以注意到,纳米晶体引起的透过率损失对近红外区域的影响并不严重,这主要是因为当晶粒直径小于波长时,瑞利散射的作用随着波长增加而减弱^[24]。而插图中是前驱体玻璃和微晶玻璃的光学照片,前驱体玻璃具有优异的透过率,随着温度的升高,玻璃依然保持良好的透明性,这主要是由于析出的纳米晶和玻璃基质之间相对较小的折射率差。单掺 Er^{3+} 微晶玻璃的吸收光谱和双波长泵浦快-慢调制机理如图3(b)、(c)所示。选择含有 $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$ 纳米晶体的氟氧化物微晶玻璃材料,在1550 nm和850 nm双波长泵浦下研究绿色上转换荧光的快-慢光学调制。基态吸收过程发生在1530 nm处,在1550 nm激光泵浦下产生 $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁,再利用另一束850 nm激光通过有效的激发态吸收过程即可实现绿色上转换荧光的快-慢光学调制。通过选择性地调整泵浦激光的输出方式(脉冲或者连续)来改变电子在 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级填充的速度,以实现上转换荧光快-慢光学调制。当同时使用850 nm连续激光($P_{850} = 26 \text{ W/cm}^2$)和1550 nm脉冲激光($P_{1550} = 5.83 \text{ W/cm}^2$)激发 Er^{3+} 单掺的微晶玻璃时(图3(d)),光调制性能随1550 nm脉冲光的调节而变化,表现出12.1 ms较慢的响应时间(图3(f))。相反,当同时使用850 nm脉冲激光($P_{850} = 26 \text{ W/cm}^2$)和1550 nm连续激光($P_{1550} = 5.83 \text{ W/cm}^2$)激发 Er^{3+} 单掺的微晶玻璃时(图3(e)),光调制性能随850 nm脉冲光的调节而变化,显示出3.2 ms较快的响应时间(图3(f))。

为了评估快-慢光调制的可行性,研究了1550

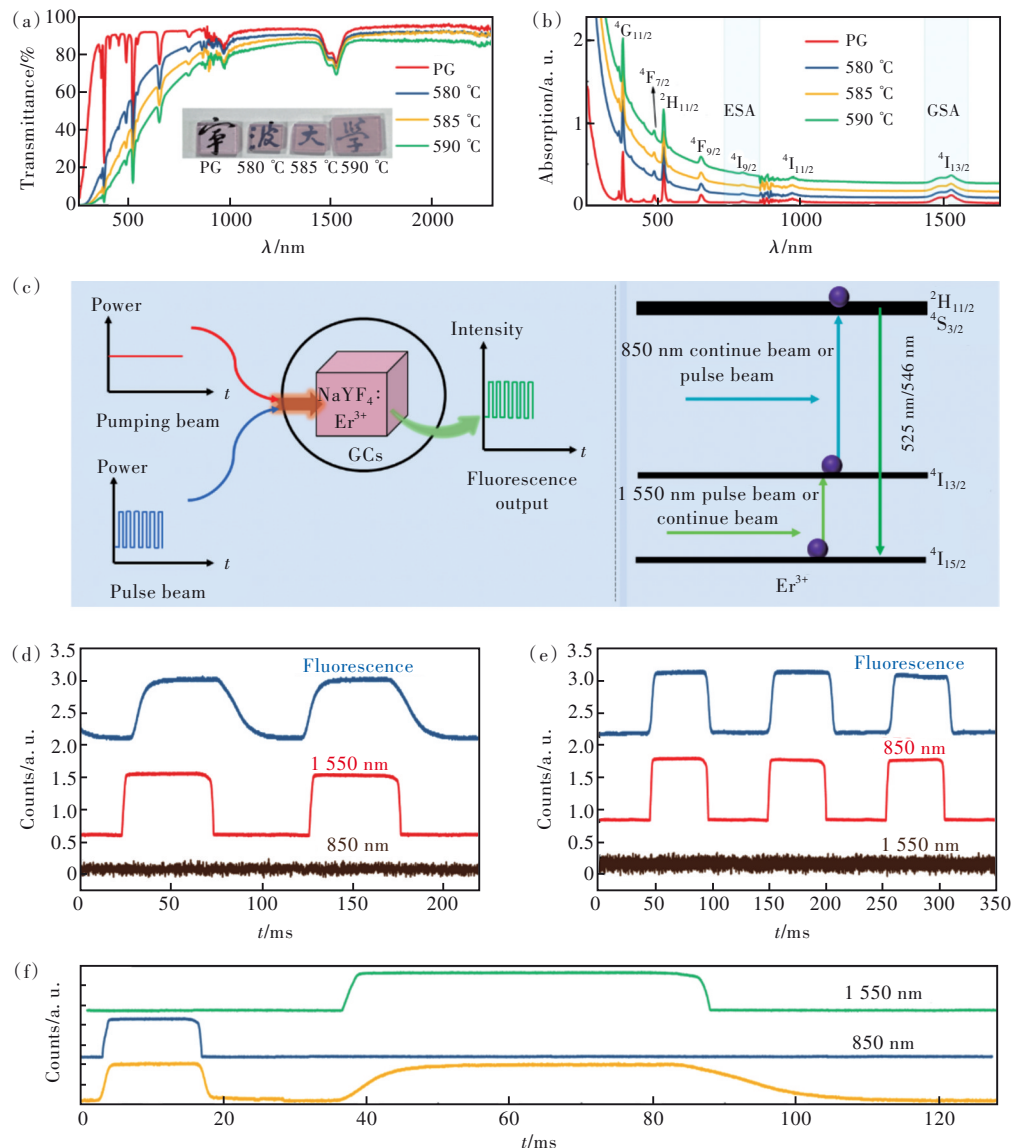


图 3 单掺 Er^{3+} 的前驱体玻璃和微晶玻璃样品的透过光谱(a)和吸收光谱(b),插图:相应单掺 Er^{3+} 的玻璃和微晶玻璃实物照片。(c)双波长 1 550 nm 和 850 nm 激发 Er^{3+} 单掺微晶玻璃的绿色上转换荧光快-慢光学调制机理。(d)~(f)双波长激发时绿色上转换荧光的快-慢光学调制曲线。在 1 550 nm (5.83 W/cm^2) 和 850 nm (26 W/cm^2) 激光泵浦下, Er^{3+} 掺杂微晶玻璃的绿色上转换荧光快-慢调制遵循 1 550 nm(d) 或 850 nm(e) 激光的调制; (f) 掺 Er^{3+} 微晶玻璃对 1 550 nm 和 850 nm 激光脉冲序列时间的依赖性。荧光寿命衰减时间采用双指数函数拟合: $I = I_0 + A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2)$, 其中 I 和 I_0 为时刻 t 和 0 的荧光强度, A_1 和 A_2 为常数, t 为时间, τ_1 和 τ_2 分别表示指数的快速和缓慢荧光衰减时间^[21-22]。

Fig.3 The visible and near-infrared transmission spectra(a), and absorption spectra(b) of precursor glass(PG) and glass ceramics(GCs). The insets in (a) show photographs of the corresponding Er^{3+} single-doped PG and GCs. (c)Fast-slow optical modulation mechanism of green up-conversion fluorescence in Er^{3+} single-doped glass ceramics excited by two-wavelength 1 550 nm and 850 nm. (d)~(f)Fast-slow optical modulation curve of green up-conversion fluorescence under two-wavelength excitation. Continuous fast-slow cycling of the green fluorescence from Er^{3+} doped GCs with 1 550 nm (5.83 W/cm^2) and 850 nm (26 W/cm^2) laser: fluorescence follows the modulation of 1 550 nm(d) or 850 nm(e) laser. (f)Time-dependent fluorescence of Er^{3+} doped GCs following repeated pulse sequence of 1550 nm and 850 nm laser. The fluorescence decay time is fitted with the double exponential function: $I = I_0 + A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2)$, where I and I_0 are the fluorescence intensity at time t and 0, A_1 and A_2 are constants, t is the time, and τ_1 and τ_2 present the rapid and slow fluorescence decay time for the exponent, respectively^[21-22].

nm 和 850 nm 双波长同时激发时绿色上转换荧光性能。如图 4(a)所示,在前驱体玻璃中仅检测到微弱的绿色荧光。相比之下,微晶玻璃中绿色荧光明显增强,这主要是由于晶化后 Er^{3+} 进入到低

声子能量的 NaYF_4 晶体中,被激发后非辐射多声子弛豫几率变低,因而发光增强。此外,散射作用也可能是发光增强的一个重要原因。随着热处理温度的升高上转换发光强度逐渐增强,这是由于

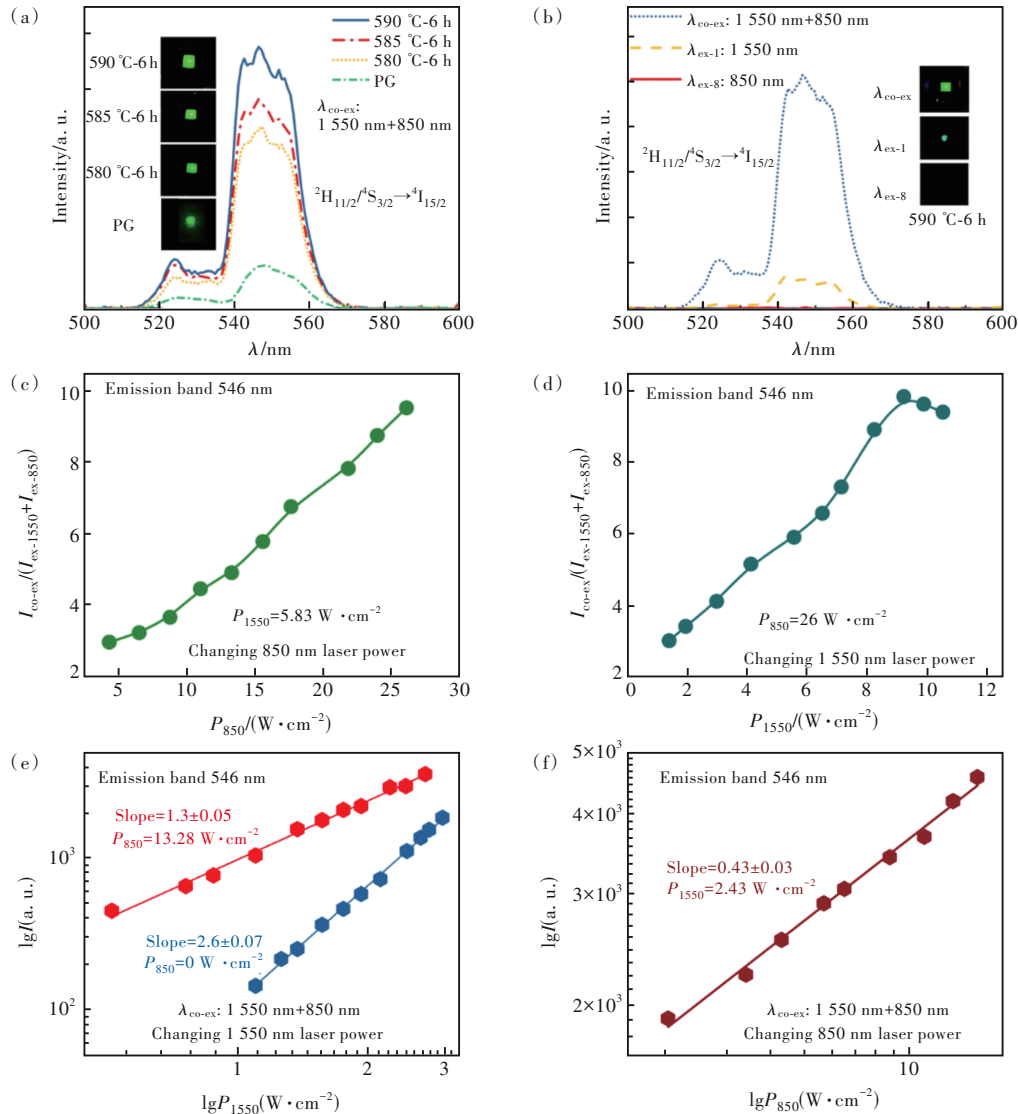


图 4 (a)前驱体玻璃和微晶玻璃样品在双波长激发下的上转换荧光光谱;(b)1 550 nm 和 850 nm 激光单波长激发和双波长同时激发下 590 °C-6 h 样品的上转换荧光光谱;(c)1 550 nm 激光功率为 5.83 W/cm²时,850 nm 激光功率与荧光强度比的关系;(d)850 nm 激光功率为 26 W/cm²时,1 550 nm 激光功率与荧光强度比的关系。 $I_{\text{co-ex}}$ 为双波长 1 550 nm 和 850 nm 激光激发时的荧光强度, $I_{\text{ex-1550}} + I_{\text{ex-850}}$ 为单一激光 850 nm 和 1 550 nm 激发时的荧光强度之和。(e)~(f) 590 °C-6 h 样品中绿色上转换荧光强度对单波长激光以及固定一束激光功率时改变另一束激光功率的双对数依赖关系。

Fig.4 (a)Up-conversion fluorescence spectra of PG and GCs under two-wavelength excitation. (b)Up-conversion fluorescence spectra of 590 °C-6 h sample under single and two-wavelength excitation by 1 550 nm and 850 nm lasers. (c)Relationship between laser power of 850 nm and fluorescence intensity ratio when 1 550 nm laser power is 5.83 W/cm². (d)Relationship between laser power of 1 550 nm and fluorescence intensity ratio when 850 nm laser power is 26 W/cm². $I_{\text{co-ex}}$ is the fluorescence intensity of two-wavelength 1 550 nm and 850 nm laser excitation, and $I_{\text{ex-1550}} + I_{\text{ex-850}}$ is the sum of the fluorescence intensity of single laser excitation at 850 nm and 1 550 nm. (e)–(f)The double logarithmic dependence of green up-conversion fluorescence intensity from 590 °C-6 h sample on the laser powers of single-wavelength excitation or two-wavelength excitation with one laser power fixed.

纳米晶体的结晶度提高以及数量增加,有利于更多的 Er^{3+} 从玻璃基质中进入到 NaYF_4 晶体中。图 4(b) 为 $590\text{ }^\circ\text{C}$ -6 h 样品在单一波长和双波长激发下的绿色上转换荧光光谱,可以发现在双波长激发下样品发光强度明显增强。与单波长 $1\ 550\text{ nm}$ 激发相比,通过 $1\ 550\text{ nm}$ 和 850 nm 激光的双波长同时激发可以使 Er^{3+} 掺杂微晶玻璃样品的绿色上转换荧光强度增强约一个数量级(图 4(c)、(d))。此外,绿色上转换荧光强度可以通过固定一束激光功率调节另一束激光的功率进行控制。为进一步探究双波长激发下绿色上转换荧光快-慢光调制的微观机制,研究了 $590\text{ }^\circ\text{C}$ -6 h 样品绿色上转换荧光强度与泵浦功率的依赖关系,如图 4(e)、(f) 所示。从图中可得绿色上转换荧光强度达到饱和前随着泵浦功率的增加线性增强。在 $1\ 550\text{ nm}$ 和 850 nm 激光双波长同时激发下,只需要吸收每种激光的一个光子即可实现绿色上转换荧光发射,表明激发态吸收效应的存在。然而,仅在 $1\ 550$

nm 单波长激发下,需要吸收 3 个光子才可产生绿色上转换荧光^[25]。因此,通过采取不同的双波长激发方式,可以实现绿色上转换荧光快-慢光调制。

为进一步探究绿色上转换荧光在双波长激发下的快-慢调制动态演化过程,研究了随时间变化的发光特性,如图 5 所示。在 850 nm 连续激光和 $1\ 550\text{ nm}$ 周期脉冲激光双波长激发下,电子跃迁到绿色上转换荧光发射能级达到稳定态所需的上升沿时间为 20.70 ms (图 5(a))。相反,在 850 nm 周期脉冲激光和 $1\ 550\text{ nm}$ 连续激光双波长激发下,电子跃迁到绿色上转换荧光发射能级达到稳定态所需的上升沿时间缩短至 4.5 ms (图 5(b))。荧光衰减曲线也可以为快-慢光调制提供依据,如图 5(c)、(d) 所示。随着热处理温度的升高,其衰减寿命明显延长。在 850 nm 连续激光和 $1\ 550\text{ nm}$ 周期脉冲激光的激发下,荧光表现出缓慢的时间衰减。而当将 850 nm 激光调制为周期脉冲信

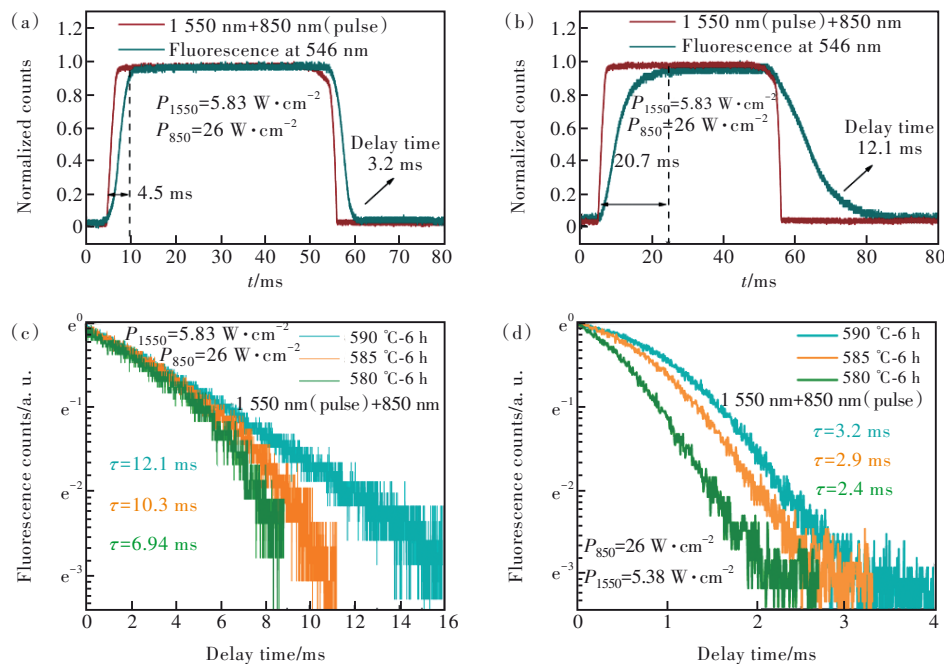


图 5 $590\text{ }^\circ\text{C}$ -6 h 样品在一束连续激光和一束脉冲激光同时激发下的时间依赖绿色上转换荧光信号:(a) 850 nm 激光固定为连续信号, $1\ 550\text{ nm}$ 激光为周期脉冲信号;(b) 850 nm 激光固定为周期脉冲信号, $1\ 550\text{ nm}$ 激光为连续信号。掺 Er^{3+} 微晶玻璃在一束连续激光和一束脉冲激光同时激发下的荧光衰减曲线:(c) 850 nm 和 $1\ 550\text{ nm}$ 分别设置为连续激光和脉冲激光;(d) 850 nm 和 $1\ 550\text{ nm}$ 分别设置为脉冲激光和连续激光。

Fig.5 Time-dependent green up-conversion fluorescence of $590\text{ }^\circ\text{C}$ -6 h sample under two-wavelength excitation combined with one continuous laser and the other pulsed laser. (a) Fixed 850 nm laser as continuous signal and $1\ 550\text{ nm}$ laser as periodic pulse signal. (b) Fixed 850 nm laser as periodic pulse signal and $1\ 550\text{ nm}$ laser as continuous signal. Fluorescence decay curves of Er^{3+} -doped GCs under excitation of one continuous laser combined with another pulsed laser. (c) The 850 nm laser and the $1\ 550\text{ nm}$ laser are set as continuous and periodic pulse signals, respectively. (d) The $1\ 550\text{ nm}$ laser and the 850 nm laser are set as continuous and periodic pulse signals, respectively.

号、1 550 nm 激光调制为连续信号时,荧光时间则表现出较快衰减。快-慢光调制约有 4 倍的时间差,表明了 850 nm 和 1 550 nm 激光双波长激发下对绿色上转换荧光进行快-慢光调制的可行性。

为评估快-慢光调制的时间响应特性,在双波长泵浦策略下固定两束激光功率,调控一束脉冲激光脉冲时间的同时结合另一束连续激光,如图 6 所示。我们发现,两种工作模式下荧光寿命衰减特性截然

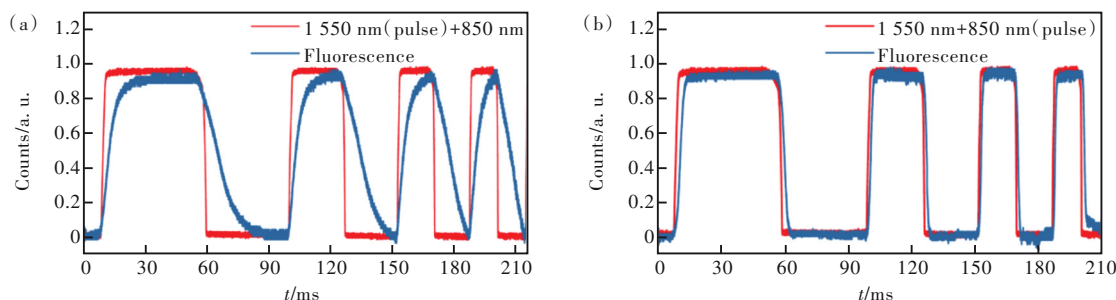


图 6 一束脉冲激光与另一束连续激光耦合并改变脉冲激光宽度时,Er³⁺掺杂微晶玻璃绿色上转换荧光的时间响应特性。(a)1 550 nm 为脉冲激光,980 nm 为连续激光;(b)1 550 nm 为连续激光;850 nm 为脉冲激光。

Fig.6 The measured green UC fluorescence from Er³⁺-doped GCs for different laser pulse width of one laser beam coupled with another continuous laser beam. (a)1 550 nm: pulse laser, 980 nm: continuous laser. (b)1 550 nm: continuous laser, 850 nm: pulse laser.

4 结 论

本文采用一种简便的全光信息处理方法,即双波长激发(1 550 nm 和 850 nm),在含有 NaYF₄:Er³⁺纳米晶体的氟氧化物微晶玻璃中成功实现了绿色上转换荧光的快-慢光调制。结果发现,通过双波长同时激发绿色上转换荧光强度增强约一个数量级,荧光信号的快速响应时间为 3.2 ms,慢速响应时间为 12.1 ms,调制的快-慢响应时间差异

不同。这是因为在 1 550 nm 为脉冲、850 nm 为连续的工作模式下,绿色荧光的寿命衰减主要受中间能级 ⁴I_{13/2} 的寿命影响;而在 1 550 nm 为连续、850 nm 为脉冲的工作模式下,绿色荧光的寿命衰减主要由发光能级 ²H_{11/2}/⁴S_{3/2} 的寿命决定。由于中间能级 ⁴I_{13/2} 的寿命远大于发光能级 ²H_{11/2}/⁴S_{3/2} 寿命,因此第一种工作模式下绿色荧光的衰减寿命比较长,而第二种工作模式下其衰减寿命比较短。

高达约 4 倍。此外,通过动态演变等微观机理研究解释了绿色上转换荧光快-慢光调制性能。这种利用双波长泵浦策略激发 Er³⁺掺杂的微晶玻璃进行绿色上转换荧光快-慢光调制方法,在未来全光光纤数据通信领域具有潜在的应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230069>.

参 考 文 献:

- [1] XUE X W, CALABRETTA N. Nanosecond optical switching and control system for data center networks [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 2257-1-8.
- [2] DORREN H J S, WITTEBOL E H M, DE KLUIJVER R, *et al.* Challenges for optically enabled high-radix switches for data center networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2015, 33(5): 1117-1125.
- [3] SUN Z P, MARTINEZ A, WANG F. Optical modulators with 2D layered materials [J]. *Nat. Photon.*, 2016, 10(4): 227-238.
- [4] CHEN Z, DONG G P, GAO H W, *et al.* Two-/multi-wavelength light excitation effects in optical materials: from fundamentals to applications [J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2019, 105: 100568-1-57.
- [5] KULCE O, MENGU D, RIVENSON Y, *et al.* All-optical information-processing capacity of diffractive surfaces [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 25-1-17.
- [6] BONACCORSO F, COLOMBO L, YU G H, *et al.* Graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage [J]. *Science*, 2015, 347(6217): 1246501-1-11.
- [7] FERRARI A C, BONACCORSO F, FAL'KO V, *et al.* Science and technology roadmap for graphene, related two-

- dimensional crystals, and hybrid systems [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(11): 4598-4810.
- [8] XIA F N, WANG H, JIA Y C. Rediscovering black phosphorus as an anisotropic layered material for optoelectronics and electronics [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5(1): 4458-1-6.
- [9] LI N, JIA H, GUO M, *et al.* Nano- Cs_2WO_3 : ultra-broadband nonlinear optical modulator for near-infrared and mid-infrared ultrafast fiber lasers generation [J]. *Nano Res.*, 2022, 15(5): 4403-4410.
- [10] FANG X, MACDONALD K F, ZHELUDEV N I. Controlling light with light using coherent metadevices: all-optical transistor, summator and inverter [J]. *Light Sci. Appl.*, 2015, 4(5): 292-1-7.
- [11] HU M Z, YANG Y Y, MIN X, *et al.* Rare earth ion ($RE = \text{Tb}/\text{Eu}/\text{Dy}$) doped nanocrystalline oxyfluoride glass-ceramic $5\text{BaF}_2\text{-}95\text{SiO}_2$ [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2021, 104(10): 5317-5327.
- [12] PAWLIK N, SZPIKOWSKA-SROKA B, GORYCZKA T, *et al.* Structure and luminescent properties of oxyfluoride glass-ceramics with $\text{YF}_3:\text{Eu}^{3+}$ nanocrystals derived by sol-gel method [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2019, 39(15): 5010-5017.
- [13] 傅恒毅, 钱江云, 潘毓, 等. 稀土掺杂上转换发光玻璃陶瓷的制备及性能 [J]. *材料科学与工程学报*, 2012, 30(1): 29-36, 88.
- FU H Y, QIAN J Y, PAN Y, *et al.* Preparation and properties of rare earth doped glass ceramics with upconversion luminescence behaviors [J]. *J. Mater. Sci. Eng.*, 2012, 30(1): 29-36, 88.
- [14] REN J, LU X S, LIN C G, *et al.* Luminescent ion-doped transparent glass ceramics for mid-infrared light sources [invited] [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(15): 21522-21548.
- [15] ZHANG Y Q, XU S, LI X P, *et al.* Improved LRET-based detection characters of Cu^{2+} using sandwich structured $\text{NaYF}_4@\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}@\text{NaYF}_4$ nanoparticles as energy donor [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2018, 257: 829-838.
- [16] 窦京涛, 侯延冰. ZBLAN: Yb^{3+} , Tm^{3+} 双频共激发的上转换发光 [J]. *发光学报*, 2008, 29(1): 85-88.
- DOU J T, HOU Y B. Upconversion luminescence of ZBLAN: Yb^{3+} , Tm^{3+} co-excited by double-frequency with both 808 and 980 nm lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2008, 29(1): 85-88.
- [17] YING W T, FAN X M, GU J M, *et al.* Oxyfluoride glass-ceramics for upconversion all-optical combinational logic gate operations [J]. *Cell Rep. Phys. Sci.*, 2022, 3(5): 100871-1-13.
- [18] 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.
- [19] BASHIR A K H, FURQAN C M, BHARUTH-RAM K, *et al.* Structural, optical and Mössbauer investigation on the bio-synthesized $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$: study on different precursors [J]. *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.*, 2019, 111: 152-157.
- [20] PRASANTH C S, KUMAR H P, PAZHANI R, *et al.* Synthesis, characterization and microwave dielectric properties of nanocrystalline CaZrO_3 ceramics [J]. *J. Alloys Compd.*, 2008, 464(1-2): 306-309.
- [21] YIN Z, LI H, XU W, *et al.* Local field modulation induced three-order upconversion enhancement: combining surface plasmon effect and photonic crystal effect [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(13): 2518-2525.
- [22] CHEN Z, CUI W T, KANG S L, *et al.* Fast-slow red upconversion fluorescence modulation from Ho^{3+} -doped glass ceramics upon two-wavelength excitation [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(3): 1600554-1-8.
- [23] KANG S L, OUYANG T C, YANG D D, *et al.* Enhanced 2 μm mid-infrared laser output from Tm^{3+} -activated glass ceramic microcavities [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2020, 14(5): 1900396-1-8.
- [24] FU Y Q, LI C K, YANG L, *et al.* Effect of biphasic-phase on the mid-infrared emission properties of Pr^{3+} doped $\text{GeSe}_2\text{-Ga}_2\text{Se}_3$ chalcogenide glass ceramics [J]. *J. Lumin.*, 2022, 249: 119049-1-6.
- [25] 彭跃红, 任韦舟, 邱建备, 等. 1 550 nm 激发层状 $\text{BiOCl}:\text{Er}^{3+}$ 上转换发光及温度传感特性 [J]. *无机材料学报*, 2020, 35(8): 902-908.
- PENG Y H, REN W Z, QIU J B, *et al.* Upconversion luminescence and temperature sensing properties of layered $\text{BiOCl}:\text{Er}^{3+}$ under 1 550 nm excitation [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2020, 35(8): 902-908.



李赛辉(1995-),男,河南商丘人,硕士研究生,2020年于洛阳理工学院获得学士学位,主要从事于发光材料的研究。

E-mail: lisaihuibu@163.com



康世亮(1990-),男,河北张家口人,博士,2020年于华南理工大学获得博士学位,主要从事于光功能玻璃和光纤器件的研究。

E-mail: kangshiliang@nbu.edu.cn