

铝锗酸盐玻璃中铒离子升频荧光光子定量

赵达¹ 田亚蒙² 赵昕¹ 王志强² 林海^{1,2}

¹大连工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 大连 116034

²大连工业大学纺织与材料工程学院, 辽宁 大连 116034

摘要 研究了波导适用型 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃的绝对光谱功率分布和净发射光子数分布, 实现了稀土离子升频荧光参量的绝对量化。采用积分球配以电荷耦合器件 (CCD) 探测器系统对 Er^{3+} 离子升频荧光性能进行表征, 解析出绝对光谱功率分布, 进一步导出升频荧光净发射光子数与量子产率等荧光参数。结果表明, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃在 $380\text{ }^\circ\text{C}$ 的 KNO_3 熔盐中 K^+-Na^+ 离子交换有效扩散速率为 $0.077\text{ }\mu\text{m}^2/\text{min}$ 。 Er^{3+} 经 975 nm 抽运光照射, 发射出绿光 (548 nm) 与红光 (661 nm), 其中红光为支配性发射。在激光功率密度为 $1227\text{ W}/\text{cm}^2$ 时, 红光光谱功率输出和净发射光子数分别可达 $47.86\text{ }\mu\text{W}$ 和 $16.03\times 10^{13}\text{ s}^{-1}$ 。相对于比较法给出的锗酸盐玻璃荧光量子产率量级 $10^{-6}\sim 10^{-5}$, 绝对光子定量测量能提供更精确的指标, 使波导适用型铝锗酸盐玻璃中稀土升频荧光测试参数的准确性和可重复性得到显著提升。

关键词 量子光学; 光子定量; 稀土光学材料; 铝锗酸盐玻璃; 升频发光

中图分类号 TQ171;O433 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.092702

Quantitation of Frequency Upconversion Fluorescence Photons of Erbium Ions in Aluminum Germanate Glasses

Zhao Da¹ Tian Yameng² Zhao Xin¹ Wang Zhiqiang² Lin Hai^{1,2}

¹School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China

²School of Textile and Material Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China

Abstract The absolute spectral power distribution and net emission photon distribution of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped waveguide-type aluminum germanate glasses are investigated, and the absolute quantification of upconversion fluorescence parameters of rare earth ion are realized. The performance of Er^{3+} ion upconversion fluorescence is characterized by integrating sphere and charge-coupled device detector system. The absolute spectral power distribution of upconversion fluorescence is analyzed. Further, the fluorescence parameters such as the number of the net emission photon and the quantum yields are derived. The results show that the effective diffusion rate of K^+-Na^+ ion-exchange in the glass sample of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped aluminum germanate glasses in KNO_3 fused salt at $380\text{ }^\circ\text{C}$ is $0.077\text{ }\mu\text{m}^2/\text{min}$. The green light and red light centered at 548 nm and 661 nm are emitted after Er^{3+} illuminated by 975 nm pump light, and the red light is dominant emission. The output power and the net emission photon of dominant red emission are $47.86\text{ }\mu\text{W}$ and $16.03\times 10^{13}\text{ s}^{-1}$ respectively, when the laser power density is $1227\text{ W}/\text{cm}^2$. Compared with the relative measurement method whose fluorescence quantum yield magnitude in germanate glass stays within the range of $10^{-6}\sim 10^{-5}$, absolute method for photon quantification can provide more accurate data, which significantly improves the accuracy and repeatability of test parameters for rare earth upconversion fluorescence in waveguide-type aluminum germanate glasses.

Key words quantum optics; photon quantification; rare earth optical material; aluminum germanate glass; upconversion luminescence

收稿日期: 2016-04-20; **收到修改稿日期:** 2016-05-23; **网络出版日期:** 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61275057)、辽宁省自然科学基金(2015020187)

作者简介: 赵达(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子材料与器件方面的研究。E-mail: dazhao133@yahoo.com

导师简介: 林海(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电子材料与器件方面的研究。

E-mail: lhai@dlpu.edu.cn(通信联系人)

OCIS codes 270.5292; 130.3130; 300.6280; 250.5230

1 引言

近年来,随着红外抽运激光器的商品化,通过稀土离子掺杂材料升频转换实现红外到可见光转化的研究引起了人们的极大热情,其应用包括了可见光激光器、彩色显示、光纤放大器以及医疗诊断等领域^[1-5]。稀土 Er^{3+} 离子是最重要的升频活性离子之一,具有丰富的能级结构,其谱线集中在 $^4\text{S}_{3/2}$ 、 $^2\text{H}_{11/2}$ 和 $^4\text{F}_{9/2}$ 能级向基态跃迁^[6-7],同时 Yb^{3+} 离子作为敏化剂可提高掺 Er^{3+} 玻璃的抽运效率^[8-9]。影响稀土离子发光效率的一个重要因素是基质材料的声子能量,基质的最大声子能量越小,非辐射弛豫速率越低,发光效率也就越高^[10]。锗酸盐玻璃被证实是一种理想的升频发光基质材料,相对于硅酸盐、硼酸盐和磷酸盐玻璃具有较低声子能量(约 820 cm^{-1}),有助于提高 Er^{3+} 发射的量子效率,此外还具有热化学稳定性高、光敏性强和成纤性能好等特性^[2,11-14],且 Al^{3+} 的引入可增加稀土离子溶解度并减少荧光淬灭,使铝锗酸盐玻璃具有更为广阔的应用空间和良好的发展前景^[15-17]。因此,波导适用型 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃中升频荧光光子的定量研究对集成光学器件的研发、三维显示与医疗诊断等技术的升级有着深远的意义。

本文制备了波导适用型 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃,通过 975 nm 抽运光激发,实现从红外到可见光的升频转换,其荧光光谱功率分布由积分球测试系统进行采集,推导出标准卤素灯标定的绝对光谱功率分布和光子数分布。分析了升频荧光净发射光子数与抽运功率密度的相对关系,表明可见光发射均属双光子激发过程。近年来文献报道的相对比较法评估荧光量子产率量级为 $10^{-6}\sim 10^{-5}$,在此基础上采用绝对测量法进一步给出更精确的铝锗酸盐玻璃荧光量子产率。波导适用型 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃中升频荧光光子数的定量为升频转换进一步的研究提供更精准的参考依据。

2 实验方法

利用高温熔融反应及淬冷技术合成 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃,基质摩尔组分为 $23\text{Na}_2\text{O}-2\text{MgO}-22\text{Al}_2\text{O}_3-53\text{GeO}_2$ (NMAG),引入质量分数为 0.8% Er_2O_3 与 2.4% Yb_2O_3 ,原材料 Na_2CO_3 , MgO , Al_2O_3 , GeO_2 , Er_2O_3 和 Yb_2O_3 纯度为 4 N 。准确称量药品,装入氧化铝坩埚,充分混匀,于 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 预热 4 h 以除去生料中潜含的微量水分,转至 $1550\text{ }^\circ\text{C}$ 高温炉中熔融 3 h ,将熔融液倒入预热的铝质模具中,成型后移入 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 退火炉退火 4 h ,之后随炉冷却到室温。制备 K^+-Na^+ 离子交换波导,首先对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐基质玻璃进行精致抛光并清洗完全,接着置玻璃基片及盛有纯净 KNO_3 熔盐的刚玉坩埚于电阻炉并升温至 $380\text{ }^\circ\text{C}$,最后待炉温稳定将玻璃基片浸没在熔盐中进行 4 h 热离子交换。离子交换过程结束后自然冷却,取出基片玻璃去除表面残留的熔盐。

根据阿基米德原理测得玻璃样品的密度为 $\rho=3.212\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。采用 Metricon 2010 棱镜耦合仪测量出 NMAG 玻璃基底折射率以及热离子交换后平面光波导的有效折射率分布。玻璃基底在 635.96 nm 和 1546 nm 处的折射率测定为 1.5798 和 1.5617 ,其他波长处的折射率可由柯西公式 $n=A+B/\lambda^2$ 导出,式中

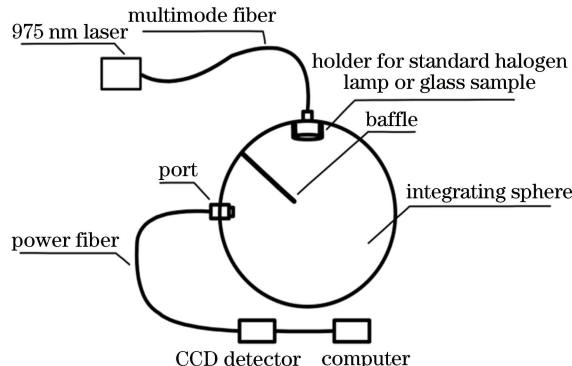


图 1 光谱功率分布测量系统示意图

Fig. 1 Diagram of measurement system for spectral power distribution

$A=1.5580, B=8785 \text{ nm}^2$ 。荧光光谱功率分布曲线采用 3.3 inch(8.382 cm)直径积分球(Labsphere)进行采集(975 nm 激光作为激发源),积分球测试系统如图 1 所示,整个测光系统通过标准卤素灯定标。

3 结果与分析

本研究初步尝试了可见光波导的制备,成功获得了 K^+-Na^+ 离子交换的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂 NMAG 平板波导。 K^+-Na^+ 离子交换平面玻璃光波导在自然光下透明度和均匀性良好,如图 2(a)所示。图 2(b)为持续 4 h 离子交换平板波导的反射光强度和折射率曲线图,向下的峰型代表了检测到横向电场(TE)模式,可知在 635.96 nm 激光照射下此平面波导有 3 个完整的 TE 模式存在。采用 IWKB(Inverse-Wentzel-Kramers-Brillouin)法获得了 635.96 nm 激光在波导中折射率分布随扩散深度变化的函数关系,如图 2(c)所示。对折射率分布采用高斯函数 $n(x) = n_{\text{sub}} + \Delta n_{\text{max}} \cdot \exp(-x^2/d^2)$ 进行拟合,式中 n_{sub} 为基底折射率; $\Delta n_{\text{max}} = n_0 - n_{\text{sub}}$ 为折射率最大改变量; d 为有效波导扩散深度。测得 $n_0 = 1.5867$,拟合出 $d = 8.587 \mu\text{m}$ 。根据波导有效扩散深度与有效扩散系数 D_e 的关系式 $d = 2\sqrt{D_e t}$,离子交换时间 $t = 240 \text{ min}$,得到有效扩散系数 D_e 为 $0.077 \mu\text{m}^2/\text{min}$ 。实验拟合出的有效扩散系数 D_e 值同 K^+-Na^+ 离子交换磷酸盐玻璃($0.110 \mu\text{m}^2/\text{min}$)和 Dy^{3+} 掺杂的锗酸盐玻璃($0.085 \mu\text{m}^2/\text{min}$)相比略低,但明显高于 BK7 玻璃($0.017 \mu\text{m}^2/\text{min}$)和 PYREX7740 玻璃($0.025 \mu\text{m}^2/\text{min}$)^[18-20]。在器件化应用过程中,单模可见光波导具有损耗小的特点,利用 NMAG 玻璃通过减少离子交换时间的方法达到该目的。离子交换 1 h 的平面波导在 635.96 nm 激光照射下的波导模式有所减少,如图 2(d)所示,进一步缩短离子交换时间可获得较好的单模波导。热离子交换实验结果表明, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂 NMAG 玻璃离子交换速率适中,离子交换过程易于掌控,为研发单模可见光波导激光器和光纤放大器提供了有价值的参考。

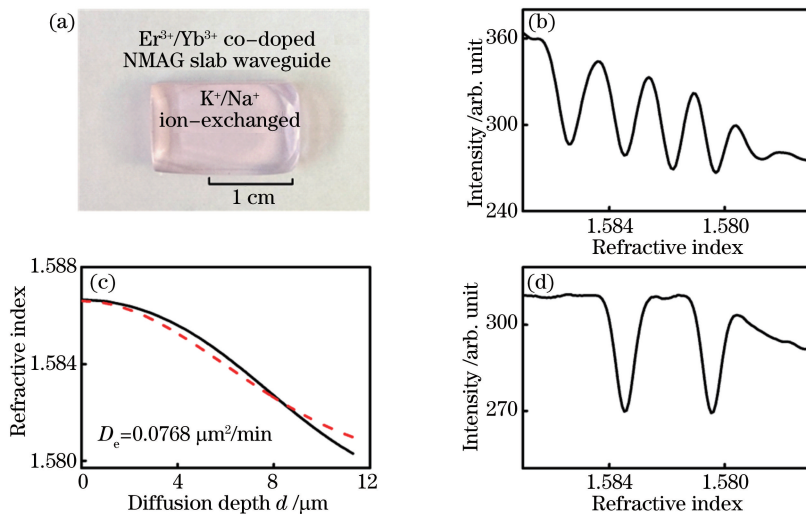


图 2 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂 NMAG 玻璃波导化实验结果。(a) K^+-Na^+ 离子交换平面光波导照片; (b) 离子交换 4 h, 635.96 nm 反射光强度与平板波导折射率关系; (c) 折射率随波导扩散深度分布曲线; (d) 离子交换 1 h, 635.96 nm 反射光强度与波导折射率关系

Fig. 2 Results of experiment for $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped NMAG waveguide. (a) Photograph of K^+-Na^+ ion exchanged slab waveguide; (b) intensity of 635.96 nm reflected light with refractive index for slab waveguide by ion exchange for 4 h; (c) distribution curves for refractive index with diffusion depth of waveguide; (d) intensity of 635.96 nm reflected light with refractive index for slab waveguide by ion exchange for 1 h

在室温下采用 975 nm 半导体激光器激发玻璃样品,激发功率密度分别设定为 539, 721, 867, 987, 1108, 1227 W/cm^2 ,观察到清晰的红绿荧光谱线。荧光光谱功率分布如图 3 所示(SPD 表示绝对光谱功率分布),绿光和红光发射中心波长为 548 nm 和 661 nm,分别源于 Er^{3+} 离子 ${}^2\text{H}_{11/2}$ 、 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 及 ${}^4\text{F}_{9/2}$ 到基态的跃迁^[21-23]。随着激发功率密度的增加, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂 NMAG 玻璃升频荧光发射功率均有显著增强,当激发功率密度为 1227 W/cm^2 时,绿光和红光发射功率分别可达 20.15 μW 和 47.86 μW 。其中红光为主导性发射,但在视

觉感官上,由于人眼对 548 nm 绿光的敏感度约是 661 nm 红光的 17 倍^[24],使得 548 nm 绿光对视觉贡献较大,因此肉眼感觉 Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂 NMAG 玻璃升频荧光为黄绿色而非红色。

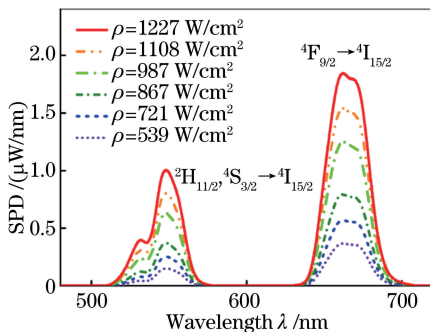


图 3 不同激发功率密度下升频荧光的绝对光谱功率分布

Fig. 3 Absolute spectral power distributions of upconversion fluorescence under various excitation power densities

净发射光子数分布 $N(\lambda)$ 与光谱功率分布 $P(\lambda)$ 呈正相关关系:

$$N(\lambda) = \frac{\lambda}{hc} P(\lambda), \quad (1)$$

以此推导出净发射光子数分布。4 种激发功率密度 (539, 721, 987, 1227 W/cm²) 下 NMAG 玻璃的净发射光子数分布 (NEPD) 和净吸收光子数分布 (NAPD) 曲线如图 4 所示。从绝对光谱表征可以发现,红色升频荧光发射强于绿色荧光,本实验中 661 nm 红光为支配性发射。红光 ($4F_{9/2} \rightarrow 5I_{15/2}$) 净发射光子数从激发功率密度为 539 W/cm² 时的 $3.8 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 增加到 1227 W/cm² 时的 $16.0 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$, 而绿光 ($2H_{11/2} + 4S_{3/2} \rightarrow 5I_{15/2}$) 净发射光子数从激发功率密度为 539 W/cm² 时的 $0.95 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 增加到 1227 W/cm² 时的 $5.54 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$, 相关数据列于表 1。

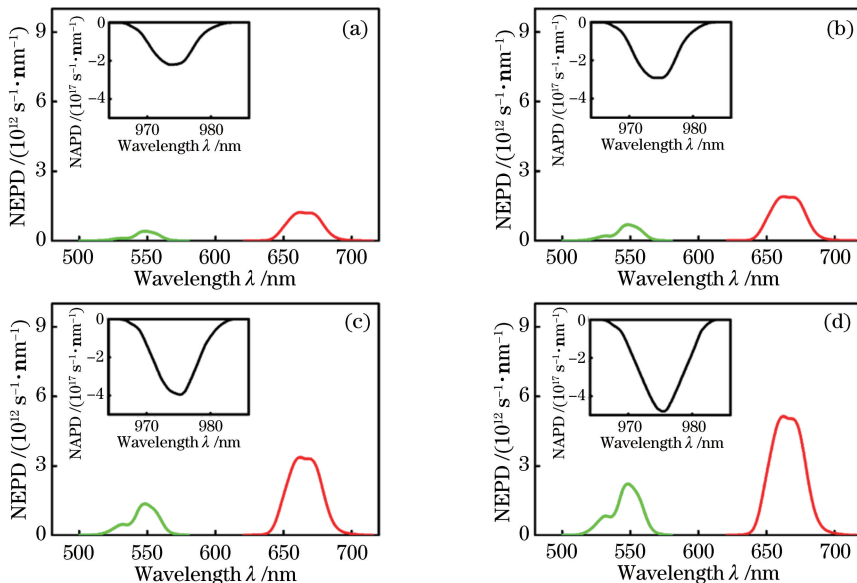


图 4 不同激发功率密度下升频荧光的净吸收光子数(插图)和净发射光子数分布。(a)539 W/cm²; (b)721 W/cm²; (c)987 W/cm²; (d)1227 W/cm²

Fig. 4 Net absorption photon distributions (inset) and net emission photon distributions of upconversion fluorescence under various excitation power densities. (a) 539 W/cm²; (b) 721 W/cm²; (c) 987 W/cm²; (d) 1227 W/cm²

图 5 为升频荧光净发射光子数 (NEP) 与激发功率密度分别取对数后的拟合曲线,548 nm 和 661 nm 发射带的拟合曲线斜率分别为 2.15 和 1.75,该结果符合升频发光过程中光子数 N 相对于激发功率 ρ^m 的一般指数性变化关系:

$$N \propto \rho^m, \quad (2)$$

式中 m 表示发射 1 个可见光子需要的激发抽运光子数, 本实验中 m 接近于 2, 表明绿光和红光发射均属双光子激发过程。

表 1 各发射带的净吸收/发射光子数

Table 1 Net absorption/emission photon numbers for each emission band

Excitation density /(W/cm ²)	Net absorption /(10 ¹⁸ s ⁻¹)	² H _{11/2} + ⁴ S _{3/2} → ⁵ I _{15/2} /(10 ¹³ s ⁻¹)	⁴ F _{9/2} → ⁵ I _{15/2} /(10 ¹³ s ⁻¹)
539	1.74	0.95	3.80
721	2.31	1.65	5.89
867	2.77	2.47	8.24
987	3.12	3.32	10.52
1108	3.49	4.31	12.97
1227	3.84	5.54	16.03

量子产率表示荧光体吸收光子发射荧光的效率, 可以写为:

$$Q_Y = \frac{N_{em}}{N_{abs}}, \quad (3)$$

式中 N_{em} 为玻璃受激发出的光子数, N_{abs} 为玻璃吸收光子数。如图 6 所示, 升频绿光发射在激发功率密度为 539 W/cm² 时量子产率为 5.5×10^{-6} , 随着激发功率密度增加到 1227 W/cm², 量子产率可达 14.4×10^{-6} , 升频红光发射量子产率同样从低抽运功率密度的 21.9×10^{-6} 递增至高功率密度时的 41.7×10^{-6} 。近年来文献报道中对于掺杂玻璃量子产率的表征多采用相对比较法, 而本工作采用绝对测量法, 如表 2 所示。在低激发功率密度 (539 W/cm²) 条件下, Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂 NMAG 玻璃的绿光荧光量子产率 (5.5×10^{-6}) 与铅锗酸盐玻璃 (8.0×10^{-6}) 相近, 相比于硅酸盐 (2×10^{-7}) 与磷酸盐 (6×10^{-8}) 玻璃的要高, 但低于氟化物 (1×10^{-3}) 和锗铋酸盐 (2.27×10^{-4}) 玻璃^[25-28]。给出铝锗酸盐玻璃升频转换绝对量子产率量级, 为升频荧光研究提供了可重复的参考依据。

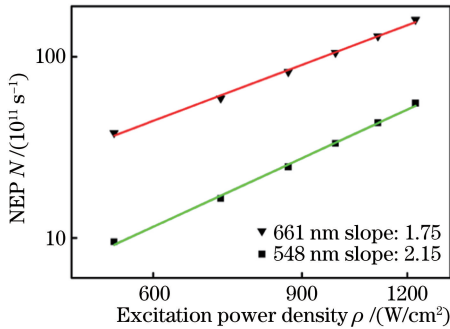


图 5 净发射光子数与激发功率密度关系曲线

Fig. 5 Relation curve of net emission photon with excitation power density

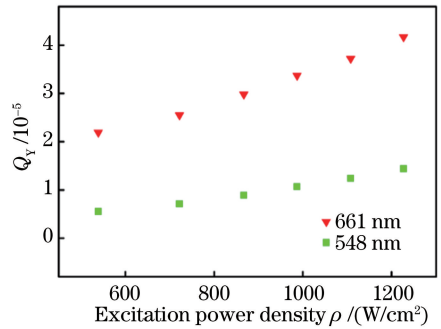


图 6 量子产率随激发功率密度的变化

Fig. 6 Quantum yield with excitation power density

表 2 不同玻璃中 Er³⁺ 离子升频转换的量子产率Table 2 Upconversion quantum yield of Er³⁺ in different types of glass

Glass	Q _Y of green	Q _Y of red	Experimental method	Reference
Na ₂ OCa ₃ Al ₂ Ge ₃ O ₁₂ glass	8.0×10^{-6}	8.4×10^{-6}	Relative method	26
Fluoride glass	1.0×10^{-3}		Relative method	27
Lead-tellurium-germanate	3.1×10^{-6}		Relative method	25
Silicate glass	2.0×10^{-7}		Relative method	27
Phosphate glass	6.0×10^{-8}		Relative method	27
Germanium bismuth glass	2.27×10^{-4}		Relative method	28
NMAG glass ($\rho = 539$ W/cm ²)	5.5×10^{-6}	21.9×10^{-6}	Absolute method	This work

4 结 论

制备了波导适用型 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃。波导化实验结果表明, K^+-Na^+ 离子交换速率适中, 波导模式可控。在 975 nm 抽运激光照射下, Er^{3+} 离子主要发出 548 nm 绿光和 661 nm 红光, 抽运激光功率密度为 1227 W/cm^2 时, 升频绿光与红光的光谱功率输出分别达到 $20.15 \mu\text{W}$ 和 $47.86 \mu\text{W}$, 净发射光子数可达 $5.54 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 和 $16.03 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 。548 nm 和 661 nm 升频荧光净发射光子数随抽运激光功率密度的拟合曲线斜率分别为 2.15 和 1.75, 表明 Er^{3+} 离子升频荧光发射属双光子激发过程。运用绝对测量法实现了对升频荧光光量子的测量与表征, 推导出 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂铝锗酸盐玻璃绝对荧光总量子产率从 539 W/cm^2 时的 27.4×10^{-6} 增加到 1227 W/cm^2 时的 56.1×10^{-6} , 相对于比较法给出的荧光离子产率量级 $10^{-6} \sim 10^{-5}$, 绝对测量法给出更为精准的参数指标, 为实现集成波导器件化及进一步研发稀土掺杂固体发光材料提供了有益的参考依据。

参 考 文 献

- 1 Wang F X, Song F, Zhang G, *et al.* Upconversion and pump saturation mechanisms in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ nanocrystals[J]. J Appl Phys, 2014, 115(13): 134310.
- 2 Sun H T, Zhang L Y, Zhang J J, *et al.* Upconversion fluorescence property of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped novel bismuth-germanium glass[J]. Solid State Communications, 2005, 133(12): 781-784.
- 3 Zhao Yongkai, Zhou Lei, Huang Huijie, *et al.* Up-converting phosphor technology-based biosensor and its application [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 841-847.
赵永凯, 周 蕾, 黄慧杰, 等. 基于上转换发光技术的生物传感器及其应用[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 841-847.
- 4 Qin G S, Qin W P, Wu C F, *et al.* Infrared-to-visible upconversion luminescence of Er^{3+} and Yb^{3+} co-doped germanate glass[J]. J Non-Cryst Solids, 2004, 347(1-3): 52-55.
- 5 Lü Xiaoying, Han Qun, Liu Tiegeng. Theoretical investigation of high-power pulse-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602003.
吕晓英, 韩 群, 刘铁根. 高功率脉冲抽运 Er-Yb 共掺光纤放大器的理论研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602003.
- 6 Zhou Yuanhang, Lü Shuchen. Luminescent properties of Er^{3+} and $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped nanocrystalline CaWO_4 [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2010, 31(3): 378-384.
周远航, 吕树臣. Er^{3+} 及 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂纳米晶 CaWO_4 的发光性质[J]. 发光学报, 2010, 31(3): 378-384.
- 7 Chu Linlin, Li Linjun, Yu Xiaoyang, *et al.* Research progress on the up-conversion continuous wave green laser with the Er^{3+} doped crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020004.
楚琳琳, 李林军, 于晓洋, 等. Er^{3+} 掺杂晶体绿光上转换连续波激光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020004.
- 8 Wei T, Tian Y, Tian C, *et al.* Optical spectroscopy and population behavior between $^4\text{I}_{11/2}$ and $^4\text{I}_{13/2}$ levels of erbium doped germinate glass[J]. Opt Mater Express, 2014, 4(10): 2150-2165.
- 9 Peng S X, Yang F J, Wu L B, *et al.* Multicolor upconversion emission and energy transfer mechanism in $\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped tellurite glasses[J]. J Quant Spec & Radia Trans, 2014, 147: 155-163.
- 10 Liu Fangchao, Liu Tiegeng, Guo Honglong, *et al.* Near-infrared spectroscopic properties and Judd-Ofelt theory analysis of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fluoride particles[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1006002.
刘芳超, 刘铁根, 郭洪龙, 等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺氟化物颗粒的红外光谱特性及 Judd-Ofelt 理论分析[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1006002.
- 11 Yu Chunlei, He Dongbing, Wang Guonian, *et al.* The effects of $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ doping concentration on $2 \mu\text{m}$ wavelength luminescence in germanium glasses[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3143-3147.
于春雷, 何冬兵, 汪国年, 等. 锗酸盐玻璃中 $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 掺杂浓度对 $2 \mu\text{m}$ 发光的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3143-3147.
- 12 Chijing Zhizi, Jiaoye Guangping, Zhou Qinling, *et al.* Spectral properties of Er^{3+} doped high silica glass[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2771-2776.
赤井智子, 角野广平, 周秦岭, 等. 掺铒高硅氧玻璃光谱性质的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2771-2776.
- 13 Li X P, Chen B J, Shen R S, *et al.* On the fluorescence enhancement mechanism of Er^{3+} in germanate glass containing

- silver particles[J]. Chin Phys B, 2013, 22(2): 023202.
- 14 Wang R F, Zhou D C, Song Z G, *et al.* Adjustable up-conversion luminescence color in Er^{3+} -doped germinate glasses[J]. J Chin Ceram Socie, 2011, 39(1): 134-138.
- 15 Wu D, Tang B, Laurent C, *et al.* Upconversion luminescence of Er^{3+} ions in transparent germanate glass ceramics containing CaF_2 nanocrystals[J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(6): 067804.
- 16 Yang Z M, Xu S Q, Hu L L, *et al.* Thermal analysis and optical properties of $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -codoped oxyfluoride germinate glasses[J]. J Opt Soc Am B, 2004, 21(5): 951-957.
- 17 Jiang Z W, Dai N L, Yang L Y, *et al.* Effects of Al_2O_3 composition on the near-infrared emission in Bi-doped and Yb-Bi-codoped silicate glasses for broadband optical amplification[J]. J Non-Cryst Solids, 2014, 383: 196-199.
- 18 Wang F, Chen B J, Pun E Y B, *et al.* Alkaline aluminum phosphate glasses for thermal ion-exchanged optical waveguide[J]. Optical Materials, 2015, 42: 484-490.
- 19 Li H Y, Shen L F, Pun E Y B, *et al.* Dy^{3+} -doped germanate glasses for waveguide-typed irradiation light sources[J]. J Alloy Compd, 2015, 646: 586-591.
- 20 Gortych J, Hall D. Fabrication of planar optical waveguides by K^+ -ion exchange in BK7 and Pyrex glass[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(6): 892-895.
- 21 Song H W, Sun B J, Wang T, *et al.* Three-photon upconversion luminescence phenomenon for the green levels in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped cubic nanocrystalline yttria[J]. Solid State Commun, 2004, 132(6): 409-413.
- 22 Sun H, Yu C, Zhou G, *et al.* Up-conversion luminescence analysis in ytterbium-sensitized erbium-doped oxide-halide tellurite and germanate-niobic-lead glasses[J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2005, 62(4/5): 1000-1003.
- 23 Wu Y, Shen X, Dai S X, *et al.* Silver nanoparticles enhanced upconversion luminescence in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped bismuth-germanate glasses[J]. J Phys Chem C, 2011, 115(50): 25040-25045.
- 24 桂 垣, 杨晓晴. 非明视觉条件下照明评估标准的探讨[J]. 建筑电气, 2010, 29(11): 44-47.
- 25 Pan Z D, Morgan S H, Dyer K, *et al.* Host-dependent optical transitions of Er^{3+} ions in lead-germanate and lead-tellurium-germanate glasses[J]. J Appl Phys, 1996, 79(12): 8906-8913.
- 26 Lin H, Pun E Y B, Man S Q, *et al.* Optical transitions and frequency upconversion of Er^{3+} ions in $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ glasses[J]. J Opt Soc Am B, 2001, 18(5): 602-609.
- 27 Quimby R S, Drexhage M G, Suscavage M J. Efficient frequency up-conversion via energy transfer in fluoride glasses[J]. Elec Lett, 1987, 23(1): 32-34.
- 28 Nie Q H, Lu L J, Xu T F, *et al.* Upconversion luminescence of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped sodium-germanium-bismuth glasses[J]. J Phy Chem Solids, 2006, 67(11): 2345-2350.