

激光二极管抽运下铥/镱共掺碲镓酸盐玻璃 光谱特性研究*

赵 纯^{1)†} 张勤远^{1)†} 陈东丹¹⁾ 姜中宏¹⁾

1) 特种功能材料及其制备新技术教育部重点实验室, 华南理工大学光通信材料研究所, 广州 510641)

2) 华南理工大学物理科学与技术学院, 广州 510641)

(2006 年 7 月 27 日收到, 2006 年 12 月 7 日收到修改稿)

研究了 808 nm 和 977 nm 激光二极管抽运下铥/镱共掺 $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ ($R = \text{Li, Na, K}$) 玻璃光谱特性. 利用 Judd-Ofelt 理论计算了 Tm^{3+} 离子在碲镓酸盐玻璃中自发辐射跃迁概率、荧光分支比和辐射寿命等光谱参数. 在 977 nm 激光二极管抽运下, 观测到 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲镓酸盐玻璃很强的 476 nm 上转换蓝光 ($^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$) 和较弱的 650 nm 上转换红光 ($^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 和 $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$). 分析表明 476 nm 蓝光发射为三光子吸收过程, 650 nm 红光发射为双光子和三光子混合吸收过程, 而在 808 nm 激光二极管抽运下, 玻璃上转换蓝色荧光为双光子吸收过程. 实验发现, 随着碱金属离子半径的增大, 977 nm 激光二极管抽运下蓝光上转换发光强度增强, 而用 808 nm 激光二极管抽运蓝光上转换发光无明显的变化.

关键词: 碲镓酸盐玻璃, 铥镱共掺, Judd-Ofelt 理论, 上转换

PACC: 7855, 4255R, 7840

1. 引言

掺稀土光学和激光材料及其应用技术一直是物理学、光学、材料学及一些工程技术等学科的研究热点之一^[1-3]. 目前, 稀土掺杂光学材料已广泛应用于光纤通信、彩色显示、激光技术、激光医学等领域, 给人类生产实践带来了巨大变革^[4]. 探索和研究掺稀土新材料及其物理、化学和光学光谱特性, 以期获得新型多功能和高性能材料依然是当前研究焦点之一.

小型紧凑的蓝光固体激光器因其在通信、高密度数据存储、显示、激光医疗等领域巨大的应用前景和价值, 一直是近些年的研究热点^[5-7]. 研究表明, 采用掺稀土玻璃及光纤材料的上能级转换技术将可能获得品质优异的蓝光激光输出, 并且这一方法具有体积小、光束质量高、系统简单, 制造的光纤激光器输出波长多、可调谐范围宽, 不需要严格的相位匹

配等优势. 本文报道了一种国内鲜有报道的新型 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺新型光学玻璃 $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ ($R = \text{Li, Na, K}$), 研究了 808 nm 和 977 nm 激光二极管 (LD) 抽运下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ ($R = \text{Li, Na, K}$) 玻璃光谱特性.

2. 实验方法

2.1. 样品制备

选取分析纯原料 TeO_2 , Ga_2O_3 , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , Li_2CO_3 和纯度为 99.99% 的稀土 Tm_2O_3 和 Yb_2O_3 配制样品, 具体组分见表 1. 称取混合料 15 g, 充分混合, 搅拌均匀后放入有盖的铂金坩锅中于 850 °C 的硅碳棒电炉中熔化 20 min. 将熔融液体倒入不锈钢模中, 再放入马弗炉中退火, 保温 2 h 后, 以 10 °C·h⁻¹ 的速度降温至室温. 将退火后的玻璃研磨、抛光, 制成 10 mm × 20 mm × 2 mm 的样品.

* 国家自然科学基金(批准号: 50472053), 新世纪优秀人才计划(批准号: 04-0821 和 04-0823), 广州市科技项目(批准号: 2004Z2-D0131, 2006J1-C0491) 和华南理工大学青年基金(批准号: 123-E5040900) 资助的课题.

† E-mail: qzhang@scut.edu.cn

表 1 碲镓酸盐玻璃组分,密度和折射率及 Tm^{3+} 离子掺杂浓度

玻璃样品	组分/mol%									
	TeO_2	Ga_2O_3	Li_2O	Na_2O	K_2O	Tm_2O_3	Yb_2O_3	$N_{\text{Tm}^{3+}} / 10^{20} \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	n_d
TGL	80	10	10			0.3	0.3	2.41	5.01	2.050
TGN	80	10		10		0.3	0.3	2.39	5.16	2.052
TGK	80	10			10	0.3	0.3	2.38	5.31	2.061

2.2. 性能测试

密度采用排水失重法测量,折射率采用加和法计算.吸收光谱测试采用 PE LAMBDA 900 UV/VIS/NIR 型分光光度仪,测量范围为 400—2100 nm;上转换荧光光谱采用 TRIAX320 型荧光光谱仪测试,用 977 nm 和 808 nm LD 作为激发源,测试范围分别为 420—750 nm,420—530 nm,采用光电倍增管作为探测器,上转换光谱用与光谱仪相连的计算机记录.为了比较不同样品的上转换发光强度,抽运光的位置和能量以及光路中荧光信号透过的狭缝宽度均保持不变.以上所有的测试都是在室温同一条件下进行.

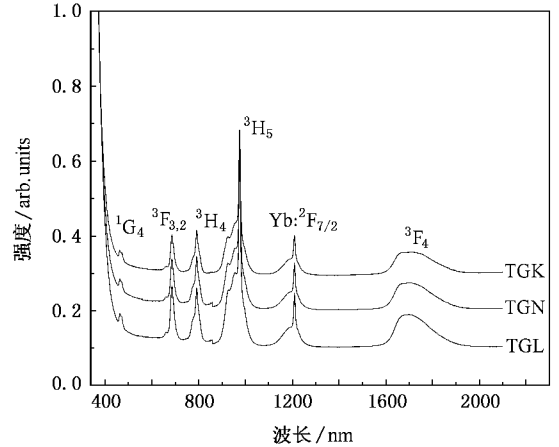


图 2 TGL, TGN, TGK 的吸收光谱

3. 结果与讨论

玻璃的密度 ρ 和折射率 n_d 测定结果如图 1 所示.由图 1 可见,碲镓玻璃的密度 ρ 和折射率 n_d 均随着碱金属离子半径增大而增大.

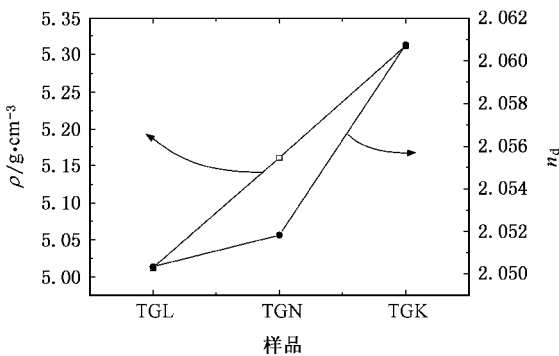


图 1 TGL, TGN 和 TGK 玻璃的密度及折射率

图 2 列出不同玻璃样品的吸收光谱谱图,图中的 6 个吸收峰位分别为 467, 689, 792, 1214, 1697 与 977 nm,分别对应于 Tm^{3+} 的基态 $^3\text{H}_6$ 到激发态 $^1\text{G}_4$, $^3\text{F}_{2,3}$, $^3\text{H}_4$, $^3\text{H}_5$, $^3\text{F}_4$ 的吸收和 Yb^{3+} 的基态 $^2\text{F}_{7/2}$ 到激发态 $^2\text{F}_{7/2}$ 的吸收.

Judd-Ofel (J-O) 理论是预测外场作用下稀土离子在各种基质中的电偶极跃迁概率,荧光分支比和

辐射寿命的有效的理论. J-O 强度参数 Ω_t ($t = 2, 4, 6$) 可以根据实验测得的吸收光谱通过最小二乘法拟合求得^[8,9],计算中用到的矩阵元由 Weber 和 Carnall 等人给出^[10,11] 结果列于表 2.

表 2 玻璃样品的 J-O 强度参数

样品	Ω_2	Ω_4	Ω_6
TGL	2.23	0.8	0.6
TGN	2.22	0.7	0.52
TGK	2.14	0.47	0.51

从表 2 的数据可以看到,随玻璃基质中碱金属原子半径的增大, J-O 强度参数 Ω_2 , Ω_4 , Ω_6 均有减小的趋势. 以往的研究结果表明^[12], Ω_2 受玻璃基质的非对称性影响显著,和稀土离子的超敏跃迁相关联,受基质组分和场域的影响最大. Ω_6 与配位体和稀土离子之间的共价性成反比. 分析可知,用 K^+ 取代 Li^+ , Na^+ 引起三个 J-O 强度参数的降低,使碲镓酸盐玻璃基质的非对称性降低, $\text{Er}-\text{O}$ 键的共价性增加.

利用计算出的 Ω_t ($t = 2, 4, 6$),采用文献 [12—14] 中提供的方法计算出 Tm^{3+} 离子在各玻璃样品中的自发辐射跃迁概率 A 、荧光分支比 β 和辐射寿命 τ_{rad} .

表 3 Tm^{3+} 离子在玻璃样品中的自发辐射跃迁概率 A 、荧光分支比 β 和辐射寿命 τ_{rad}

样品	初态	终态	能量/ cm^{-1}	自发辐射跃迁概率/ s^{-1}	荧光分支比	辐射寿命/ μs
TGL	$^1\text{G}_4$	$^3\text{H}_6$	21422	2134.0	0.467	219
		$^3\text{F}_4$	15541	348.6	0.076	
		$^3\text{H}_5$	13175	1461.2	0.320	
		$^3\text{H}_4$	8815	469.2	0.103	
		$^3\text{F}_3$	6870	124.0	0.027	
		$^3\text{F}_2$	6315	35.4	0.008	
TGN	$^1\text{G}_4$	$^3\text{H}_6$	21422	1148.5	0.497	433
		$^3\text{F}_4$	15541	147.4	0.064	
		$^3\text{H}_5$	13175	691.7	0.299	
		$^3\text{H}_4$	8815	257.5	0.111	
		$^3\text{F}_3$	6870	50.9	0.022	
		$^3\text{F}_2$	6315	14.4	0.006	
TGK	$^1\text{G}_4$	$^3\text{H}_6$	21422	1016.1	0.474	466
		$^3\text{F}_4$	15541	135.4	0.063	
		$^3\text{H}_5$	13175	682.0	0.318	
		$^3\text{H}_4$	8815	253	0.118	
		$^3\text{F}_3$	6870	47	0.022	
		$^3\text{F}_2$	6315	12	0.005	

表 3 列出了计算的 TGL, TGN, TGK 样品 $^1\text{G}_4$ 能级自发辐射跃迁概率 A , 荧光分支比 β , 辐射寿命 τ_{rad} 值. 碱金属作为玻璃修饰体对 A , β , τ_{rad} 值产生了影响. 随碱金属原子序数的增加, $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 跃迁的自发辐射跃迁概率不断下降, 辐射寿命相应从 219 μs 增大到 466 μs , τ_{rad} 的增加对有助于增强玻璃上转换发光. TGL, TGN 和 TGK 玻璃 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 能级跃迁的荧光分支比为分别为 46.7%, 49.7% 和 47.4%, 可知在 $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ ($R = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) 玻璃材料中易实现上转换蓝光发射.

图 3 是 977 nm LD 抽运下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲镱玻璃样品的上转换荧光光谱. 通过 977 nm LD 激发, 在室温下同时观察到强烈的蓝光 (476 nm) 和微弱的红光 (650 nm). 对照 Tm^{3+} 的能级图 4, 可知它们分别对应 Tm^{3+} 的 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$, $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 和 $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$ 能级跃迁. 图 5(a) 比较了各样品中蓝红光发射峰的积分发射强度以及各样品蓝光强度与 TGL 玻璃蓝光强度之比. 由图 5(a) 可见, 随着作为网络修饰体的碱金属离子半径的增大, 蓝光和红光不断增强, 且蓝光强度明显大于红光强度. 说明在这种碲镱酸盐玻璃材料中蓝光发射明显占优. 另外, 随碱金属离子半径的增大, 各样品蓝光强度与 TGL 玻璃蓝光强度比

值逐渐增大, TGK 比 TGL 的蓝光强 3.6 倍. 这可能是由于随着网络修饰体的离子半径的增大, 导致玻璃基质的最大声子能量密度的降低引起的^[15].

808 nm LD 抽运的 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲镱玻璃上转换荧光光谱如图 6 所示. 由于 808 nm 抽运源激发的 650 nm 红光很弱, 因此只测了位于 476 nm 的蓝光光谱, 蓝光光强微弱, 对应 Tm^{3+} 的 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 能级的跃迁. 图 5(b) 比较了 808 nm LD 抽运下各样品中蓝光发射峰的积分发射强度及各样品蓝光强度与 TGL 玻璃蓝光强度比. 由图可见, 随着作为网络修饰体的碱金属离子半径的增大, 蓝光强度变化不明显. 实验表明, 对于 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲镱玻璃系统, 在 977 nm LD 抽运下的获得的蓝光强度远高于 808 nm LD. 上转换发光受抽运源波长影响显著.

为进一步验证 977 nm LD 和 808 nm LD 抽运上转换各谱线的跃迁机理, 图 3 和图 6 的插图给出 TGK 样品的上转换各谱线强度与抽运功率之间的双对数曲线关系, 其中荧光强度用各荧光带的积分面积表示, 图中离散点为实验所得数据, 直线为拟合曲线. 图 3 插图中, 在 977 nm LD 抽运下, 476 nm 荧光的对数曲线的斜率为 3.22, 荧光强度正比于抽运功率的 3.22 次方, 即 $I \propto P^{3.22}$, 这说明 476 nm 荧光是

三光子吸收过程,而红色荧光的对数曲线斜率为 2.84, 荧光强度正比于抽运功率的 2.89 次方, 即 $I \propto P^{2.84}$. 结合 Tm^{3+} 离子能级图 4, 说明 977 nm LD 抽运下 650 nm 荧光为双/三光子混合吸收过程. 而图 6 插图中, 在 808 nm LD 抽运下 476 nm 荧光的对数曲线的斜率为 2.39, 这说明 476 nm 荧光是双光子吸收过程.

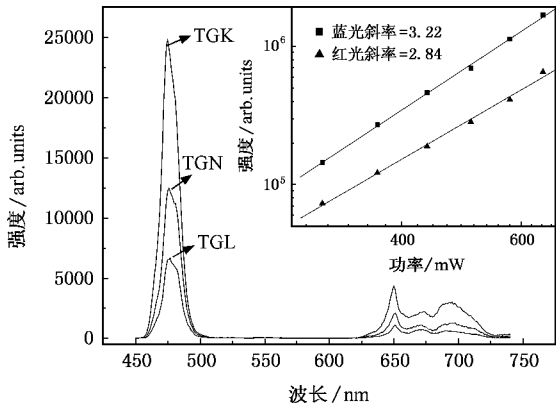


图 3 977 nm LD 激发下的 TGL, TGN 和 TGK 上转换光谱(插图为上转换积分光强与抽运光功率关系)

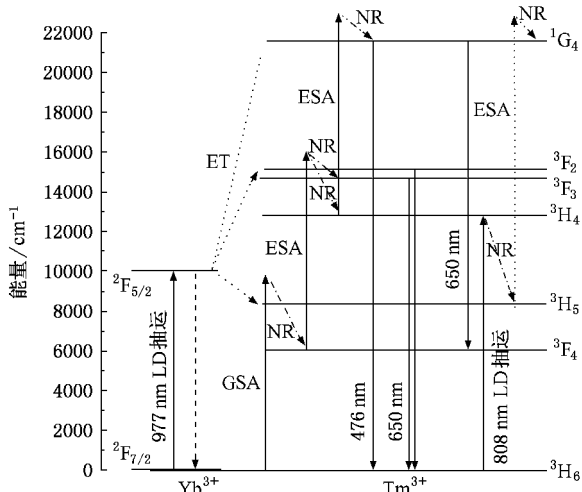


图 4 Yb^{3+} 和 Tm^{3+} 的能级结构图

基于 Tm^{3+} 和 Yb^{3+} 的能级图^[16], 讨论 Tm^{3+} 离子上转换发光机理, 如图 4 所示. 根据能量匹配情况, 产生上转换 476 nm 蓝光和 650 nm 红光的跃迁具体分析如下.

在 Tm^{3+}/Yb^{3+} 共掺杂的体系中, 用 977 nm 红外光激发 Yb^{3+} , 可通过三步能量传递(ET)实现上转换激发过程: $(Yb^{3+} : ^2F_{5/2}, Tm^{3+} : ^3H_6) \rightarrow (Yb^{3+} : ^2F_{7/2}, Tm^{3+} : ^3H_5)$, $(Yb^{3+} : ^2F_{5/2}, Tm^{3+} : ^3F_4) \rightarrow$

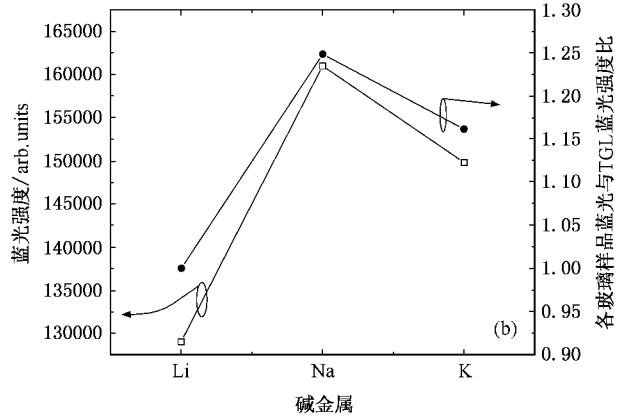
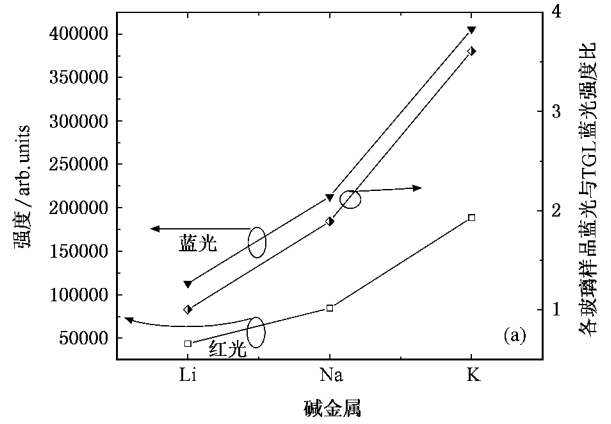


图 5 (a) 977 nm LD 抽运下 TGL, TGN 和 TGK 玻璃上转换蓝光和红光荧光积分强度, 以及各样品蓝光强度与 TGL 玻璃蓝光强度比值图. (b) 808 nm LD 抽运下 TGL, TGN 和 TGK 玻璃上转换蓝光积分强度及各样品蓝光强度与 TGL 玻璃蓝光强度比值图

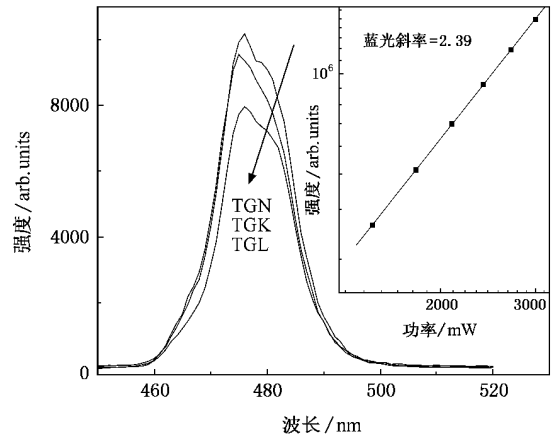


图 6 808 nm LD 激发下的 TGK, TGL, TGN 上转换光谱(插图为上转换积分光强与抽运光功率关系)

$(Yb^{3+} : ^2F_{7/2}, Tm^{3+} : ^3F_{2,3}), (Yb^{3+} : ^2F_{5/2}, Tm^{3+} : ^3H_4) \rightarrow (Yb^{3+} : ^2F_{7/2}, Tm^{3+} : ^1G_4)$. 同时也可通过如下的

激发态吸收过程(ESA)实现上转换: Tm^{3+} 吸收 977 nm 的抽运光子,由基态 $^3\text{H}_6$ 跃迁到 $^3\text{H}_5$,由于 $^3\text{H}_5$ 和 $^3\text{H}_4$ 能级间隔较近,粒子很快通过多声子弛豫无辐射跃迁(NR)到 $^3\text{H}_4$ 能级。 $^3\text{H}_4$ 能级寿命较长(~ 0.7 ms),粒子会再吸收一个 977 nm 的抽运光子从 $^3\text{H}_4$ 能级跃迁到 $^3\text{F}_{2,3}$,经过类似的过程,粒子吸收第三个抽运光子跃迁到 $^1\text{G}_4$,由于 $^1\text{G}_4$ 能级寿命较短,跃迁概率大,于是发生到基态的跃迁($^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$)辐射出蓝光,到第一激发态 $^3\text{F}_4$ 的跃迁辐射出(650 nm)红光。 $^3\text{F}_{2,3}$ 能级跃迁回基态也辐射出波长为 650 nm 的红光。因此在 977 nm 抽运的上转换光谱图中 650 nm 处峰可能是 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$, $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$ 共同跃迁产生。由于样品 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂浓度较低, Yb^{3+} 在 977 nm 附近吸收截面远远大于 Tm^{3+} , 因此以上上转换过程中 ET 是主要的,同时也存在少量的 ESA 过程。

808 nm LD 抽运时,抽运光激发 Tm^{3+} 离子从基态跃迁到 $^3\text{H}_4$ 能态,快速弛豫到 $^3\text{H}_5$ 态,处于 $^3\text{H}_5$ 能级的粒子再吸收第二个光子跃迁到 $^1\text{G}_4$ 能级,由 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 的跃迁辐射出 476 nm 蓝光。另外,由于 Tm^{3+} 和 Yb^{3+} 离子之间可能存在能量传递,使少量 Yb^{3+} 离子被 Tm^{3+} 间接激发到激发态 $^2\text{F}_{5/2}$,位于激发态 $^3\text{H}_4$ 能级的 Tm^{3+} 离子再与位于激发态 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级的 Yb^{3+} 离子发生 ET 过程,把 Tm^{3+} 离子激发到更高 $^1\text{G}_4$ 能级。 $^1\text{G}_4$

能级粒子跃迁回基态($^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$)辐射出 476 nm 蓝光。由于 Yb^{3+} 对 808 nm 抽运光基本无吸收,因此,当用 808 nm LD 抽运时,激发态吸收是上转换发光的主要过程。

4. 结 论

本文研究了 808 nm 和 977 nm LD 抽运下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲镓酸盐玻璃光谱特性。利用 Judd-Ofelt 理论计算了 Tm^{3+} 离子在碲镓酸盐玻璃中自发辐射跃迁概率、荧光分支比和辐射寿命等光谱参数。当 K^+ 替代 Li^+ , Na^+ 时,发现 Ω_i 随碱金属原子序数的增加而减小, Tm^{3+} : $^1\text{G}_4$ 能级寿命随之不断增加。在 977 nm LD 抽运下,观测到 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ ($\text{R} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) 光学玻璃发射出强 476 nm 蓝光($^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$)和较弱 650 nm 红光($^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 和 $^3\text{F}_{2,3} \rightarrow ^3\text{H}_6$),分析表明 476 nm 蓝光发射为三光子吸收过程,650 nm 红光发射为双光子和三光子混合吸收过程,而在 808 nm 激光二极管抽运下,该玻璃蓝光上转换荧光为双光子吸收过程。同时实验还发现,随着碱金属离子半径增大,977 nm LD 抽运下蓝光上转换发光强度明显增强,而用 808 nm LD 抽运蓝光上转换发光无明显的变化。

- [1] Funk D S , Carlson J W , Eden J G 1994 *Electron. Lett.* **30** 1859
- [2] Xu S Q , Zhang Z X , Fang D W , Dong Q M , Jiang Z H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3694 [in Chinese] [徐时清、张在宣、方达伟、董前民、姜中宏 2005 物理学报 **54** 3694]
- [3] Zhao C , Zhang Q Y , Pan Y X , Jiang Z H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2158
- [4] Balda R , Sáez de Ocariz I , Fernández J , Fdez-Navarro J M , Arriandiaga M A 2000 *J. Phys. Condens. Matter* **12** 10623
- [5] Boyer J C , Vetrone F , Capobianco J A 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9460
- [6] Oliveira A S , de Araujo M T , Gouveia-Neto A S 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 753
- [7] Zhang Q Y , Li T , Jiang Z H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 171911
- [8] Judd B R 1962 *Phys. Rev.* **127** 750
- [9] Ofelt G S 1962 *J. Chem. Phys.* **37** 511
- [10] Weber M J 1967 *Phys. Rev.* **157** 262
- [11] Carnall W T , Fields P R , Wybourne B G 1965 *J. Chem. Phys.* **42** 3797
- [12] Wu G Z 1980 *Luminescence and Display* **4** 31 [in Chinese] [吴光照 1980 发光与显示 **4** 31]
- [13] Tanabe S , Tamai K , Hirao K , Soga N 1993 *Phys. Rev. B* **47** 2507
- [14] Tanabe S , Tamai K , Hirao K , Soga N 1996 *Phys. Rev. B* **53** 8358
- [15] Tsang W S , Yu W M , Mak C L , Tsui W L , Wong K H , Hui H K 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 1871
- [16] Zhang Q Y , Jiang Z H 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 033510

Blue-upconversion in thulium and ytterbium codoped tellurite-gallium glasses pumped by laser diodes^{*}

Zhao Chun^{1,2)} Zhang Qin-Yuan^{1)†} Chen Dong-Dan¹⁾ Jiang Zhong-Hong¹⁾

¹ *Key Laboratory of Special Functional Materials and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, Institute of Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*

² *College of Applied Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*

(Received 27 July 2006 ; revised manuscript received 7 December 2006)

Abstract

This paper reports on upconversion properties of $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$ ($R = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) glasses pumped by 808 and 977 nm laser diodes (LD). An intense upconversion emission centered at 476-nm (blue) along with a weak emission at 650 nm (red) has been observed when pumped by 977 nm LD, assigned to the transitions of $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ and $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$ and/or $^3\text{F}_2,3 \rightarrow ^3\text{H}_6$ of Tm^{3+} , respectively. The 476-nm upconversion intensity has a nearly cubic dependence on incident pump laser power, indicating a three-photon process. However, a quadratic dependence of the 476-nm upconversion intensity on the incident pump laser power has been observed when pumped by 808 nm LD, due to two-photon absorption process. It is noticed that the intensity of the blue-upconversion emission increases significantly with increasing radius of alkali metal of samples when pumped by 977 nm LD, while no obvious change has been observed when pumped by 808 nm LD.

Keywords : tellurite gallium glass, $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped, Judd-Ofelt theory, upconversion

PACC : 7855, 4255R, 7840

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50472053), New Century Excellent Talent Program in University (Grant Nos. 04-0821 and 04-0823), Guangzhou Science and Technology Programme (Grant Nos. 2004Z2-D0131, 2006J1-C0491) and Foundation of South China University of Technology (Grant No. 123 - E5040900).

[†] E-mail : qzhang@scut.edu.cn