

文章编号: 1001-3806(2010)01-0048-05

钕离子 1.3 μm 波段放大特性和浓度猝灭研究

厉旭杰^{1,2}, 李虎雄¹

(1. 温州大学 物理与电子信息工程学院, 温州 325035; 2. 宁波大学 信息科学与工程学院, 宁波 315211)

摘要: 为了研究 Nd³⁺ 的摩尔分数对 1.3 μm 处荧光的影响, 采用常规的熔融方法制备了钕离子掺杂的 0.70TeO₂-(0.30-x)WO₃-xNd₂O₃ (摩尔分数 x 为 0.001, 0.003, 0.005, 0.007, 0.01) 玻璃系统, 得到了 Nd³⁺ 1.3 μm 荧光光谱, 同时还研究了荧光峰值波长的有效线宽和受激发射截面与 Nd³⁺ 摩尔分数的关系。根据 Dexter 能量转移理论计算了 Nd³⁺ 在硝酸盐玻璃中能量转移参量 C_{d,d}(⁴F_{3/2}, ⁴I_{9/2}→⁴I_{9/2}, ⁴F_{3/2}) 和 C_{d,a}(⁴F_{3/2}, ⁴I_{9/2}→⁴I_{15/2}, ⁴I_{15/2} 和 ⁴F_{3/2}, ⁴I_{9/2}→⁴I_{13/2}, ⁴I_{15/2}) 值和相应发生浓度猝灭的临界距离 R_{d,d} 和 R_{d,a}。结果表明, 随着 Nd³⁺ 的掺杂摩尔分数增加, 荧光强度也逐渐增加, 到 0.005 时达到最大; 随后当 Nd³⁺ 的摩尔分数大于 0.005 时, 荧光强度逐渐降低。

关键词: 光电子学; 荧光强度; 能量转移; 浓度猝灭

中图分类号: O614.33⁺5 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.014

1.3 μm emission and concentration quenching in Nd³⁺-doped glass

Li Xue-jie^{1,2}, Li Hu-xiong¹

(1. Department of Physics and Electron Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to study the effect of Nd³⁺ concentration on the fluorescence property at 1.3 μm, Nd₂O₃-doped 0.70TeO₂-(30-x)WO₃-xNd₂O₃ (mole fraction x is 0.001, 0.003, 0.005, 0.007, 0.010) tellurite glass was prepared by means of the conventional melt-quenching method. The fluorescence spectra were obtained. The dependence of the effective bandwidth and the stimulated emission cross-sections of ⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2} transition on Nd³⁺ concentration was studied. Based on the electric dipole-dipole interaction theory, the interaction parameters, C_{d,d}, for the energy migration rate ⁴F_{3/2}, ⁴I_{9/2}→⁴I_{9/2}, ⁴F_{3/2} and C_{d,a}, for cross relaxation rate ⁴F_{3/2}, ⁴I_{9/2}→⁴I_{15/2}, ⁴I_{15/2}, and/or ⁴F_{3/2}, ⁴I_{9/2}→⁴I_{13/2}, ⁴I_{15/2} in tellurite glass are about 10.6 × 10⁻⁴⁰ cm⁶/s and 2.80 × 10⁻⁴⁰ cm⁶/s, respectively. The result shows that the fluorescence intensity drastically increases and has a maximum around 0.005 (mole fraction) Nd₂O₃ and decreases with increase of the Nd₂O₃ concentration.

Key words: optoelectronics; fluorescence properties; energy migration; concentration quenching

引言

对稀土掺杂玻璃及其光纤的研究主要是受远距离光通信发展的需要所驱动的^[1], 所以, 其研究就主要集中在 1.5 μm, 1.3 μm, 1.0 μm ~ 1.1 μm 3 个波段。实用的 1.3 μm 和 1.5 μm 波段的光纤放大器在远距离光通信上起着重要的作用, 这是因为在这两个波段石英光纤的传输损耗较低。众所周知, Nd³⁺ 从 ⁴F_{3/2} 到 ⁴I_{13/2} 发射, 其荧光波长在 1.3 μm 附近有好的放大特性^[2,3]。早在 1967 年, REDMAN 等人在研究 TeO₂-ZnO 系统的成玻璃性能和玻璃光学性能时, 就测试了掺杂的硝酸盐玻璃 Nd³⁺ 在该玻璃中的吸收光谱。他们同时首次

提出, 对稀土离子良好的溶解性和 Nd³⁺ 在玻璃中宽的光谱使 TeO₂-ZnO 玻璃成为潜在的良好的稀土离子掺杂基质^[4]。JACOBS 和 BRACHKOVSKAYA 等人对硝酸盐玻璃中 Nd³⁺ 的受激发射截面与玻璃形成体成分、修饰体成分的关系进行了研究。1976 年 SINGH 等人的研究则说明, Nd³⁺ 在硝酸盐中具有很大的受激发射截面和较短的荧光寿命^[5]。众所周知, 玻璃中的荧光强度主要决定于玻璃的最大声子能量, 而玻璃的网络形成体是决定玻璃的最大声子能量的最主要因素^[6]。硝酸盐玻璃作为氧化物玻璃存在自身独特的优点^[7], 这主要包括: (1) 较宽的红外透过范围(直到 6 μm); (2) 在氧化物玻璃中具有较低的声子能量(约为 650 cm⁻¹); (3) 高折射率(约 2.0)和高非线性折射率; (4) 熔化温度较低(约 900℃); (5) 与氟化物玻璃相比具有较好的化学稳定性。

在确基要实现掺钕离子 1.3 μm 波段放大需要提

作者简介: 厉旭杰(1981-), 男, 硕士, 助理实验师, 主要从事稀土掺杂激光玻璃和光纤方面的研究。

E-mail: lixujie101@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2009-03-03

高钕离子的掺杂摩尔分数,而掺杂摩尔分数的提高会带来一些负面的影响,如浓度猝灭,因此,研究钕离子在碲基玻璃中的浓度猝灭问题极为重要。对稀土离子浓度猝灭的研究,在 Er^{3+} 掺杂的硝酸盐和钨酸盐玻璃中已有大量的研究^[8,9],计算了 Er^{3+} 引起浓度猝灭的临界距离和 Er^{3+} 间相互作用参量。而对于 Nd^{3+} 浓度猝灭的研究虽然有,但是在硝酸盐和钨酸盐玻璃中研究得甚少,因此,作者通过对不同 Nd^{3+} 掺杂摩尔分数样品的吸收光谱及荧光光谱的测试,研究 Nd^{3+} 摩尔分数对 1.3 μm 处荧光的影响以及荧光峰值波长的有效线宽和受激发射截面与 Nd^{3+} 摩尔分数的关系,根据 Dexter 能量转移理论,计算了 Nd^{3+} 之间的能量参量 $C_{d,d}$ ($^4\text{F}_{3/2}$, $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{F}_{3/2}$) 和 $C_{d,a}$ ($^4\text{F}_{3/2}$, $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{15/2}$ 和 $^4\text{F}_{3/2}$, $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{15/2}$)。

1 实验

选取 $0.70\text{TeO}_2-(0.30-x)\text{WO}_3-x\text{Nd}_2\text{O}_3$ (摩尔分数 x 分别为 0.001, 0.003, 0.005, 0.007, 0.010) 系统作为研究对象,并将其依次命名为: $\text{Nd}_1, \text{Nd}_2, \text{Nd}_3, \text{Nd}_4, \text{Nd}_5$ 。采用排水失重法测玻璃密度;用 SPA-Lite 型棱镜耦合仪测量玻璃折射率,光源选用 632.8nm He-Ne 激光器;密度和折射率如表 1 所示。样品的吸收光谱采用 Lambda950UV/VIS/NIR 型分光光度计测定。荧光光谱用 TRIAX550 型光谱仪记录,采用国产功率为 2W、波长为 800nm 的 LD 作为抽运源。整个测试中抽运源功率大小和位置保持不变,所有被测样品都紧贴于荧光光谱仪狭缝入口处同一位置。以上测试都在室温下进行。

Table 1 Glass sample, glass composition, density, refractive index, Nd^{3+} concentration

sample No.	composition(mole fraction)	density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	refractive index	Nd^{3+} concentration/($10^{20} \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Nd_1	$0.70\text{TeO}_2-0.299\text{WO}_3-0.001\text{Nd}_2\text{O}_5$	5.708	2.1873	0.3789
Nd_2	$0.70\text{TeO}_2-0.297\text{WO}_3-0.003\text{Nd}_2\text{O}_5$	5.652	2.1879	1.1243
Nd_3	$0.70\text{TeO}_2-0.295\text{WO}_3-0.005\text{Nd}_2\text{O}_5$	5.638	2.1885	1.8670
Nd_4	$0.70\text{TeO}_2-0.293\text{WO}_3-0.007\text{Nd}_2\text{O}_5$	5.629	2.1891	2.6068
Nd_5	$0.70\text{TeO}_2-0.290\text{WO}_3-0.010\text{Nd}_2\text{O}_5$	5.620	2.1900	3.7118

2 结果与讨论

2.1 吸收光谱性质

图 1 为不同摩尔分数的 Nd^{3+} 掺杂碲钨酸盐玻璃

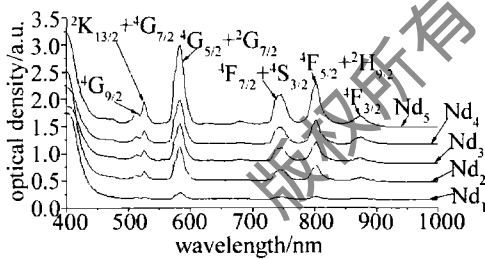


Fig. 1 Absorption spectra of Nd^{3+} singly doped tellurite glass

的吸收光谱,其中 $\text{Nd}_1 \sim \text{Nd}_5$ 分别表示 Nd^{3+} 的摩尔分数由 0.001 变化到 0.01。从图中可以看出,随着 Nd^{3+} 摩尔分数的增加, Nd^{3+} 的基态吸收变强。 Nd^{3+} 的各个吸收峰位置有相应的激发态能级标识。其中中心位置 875nm, 803nm, 747nm, 681nm, 628nm, 584nm, 526nm 的吸收峰分别对应从基态 $^4\text{I}_{9/2}$ 到各个激发态之间的跃迁。从图中还可以看出, 681nm 和 628nm 处的吸收峰很小,而在 584nm, 747nm, 803nm 处吸收峰较大。另外,在 400nm 处基质的吸收明显加强,说明在 400nm 左右为碲钨酸盐玻璃的截止频率处^[10]。

2.2 Judd-Ofelt 理论计算

不同摩尔分数的 Nd^{3+} 在碲钨酸盐中的强度参量见表 2。Judd-Ofelt 理论常用来分析稀土离子在不同

Table 2 Judd-Ofelt parameters of different Nd^{3+} concentrations in tungsten-tellurite glasses

sample No.	$\Omega_2/10^{-20} \text{ cm}^2$	$\Omega_4/10^{-20} \text{ cm}^2$	$\Omega_6/10^{-20} \text{ cm}^2$
Nd_1	5.36	1.89	3.17
Nd_2	7.91	1.89	4.69
Nd_3	4.53	1.13	2.94
Nd_4	4.48	1.46	3.02
Nd_5	5.25	1.37	3.36

基质中光谱性质,3 个强度参量 Ω_t ($t=2, 4, 6$) 可以通过实验测得的吸收光谱和最小二乘法获得,从表 2 中可以看出 $\Omega_2 > \Omega_6 > \Omega_4$ 。根据 TANABE 等人的研究^[11], Ω_2 与玻璃结构和配位场的非对称性密切相关,对玻璃成分变化最敏感。这一点从表 2 中也可以看出, Ω_2 的变化比较明显, Ω_6 和玻璃基质的刚性有关, Ω_4 由 Ω_2 和 Ω_6 共同决定^[12]。

计算得到的电偶极跃迁几率 A_{ed} 、电偶极跃迁谱线强度 S_{ed} 和荧光分支比 β 见表 3。因 Nd^{3+} 从 $^4\text{F}_{3/2}$ 能级发射的能级跃迁不满足磁偶极跃迁选择定则,所以不存在磁偶极跃迁成分的作用。

Table 3 Predicted spontaneous-radiative rates A_{ed} , electric-dipole line strengths S_{ed} and fluorescence branching ratio β of Nd^{3+} in tungsten-tellurite glasses

sample No.	initial manifold		final manifold		
	${}^4F_{3/2}$	${}^4I_{15/2}$	${}^4I_{13/2}$	${}^4I_{11/2}$	${}^4I_{9/2}$
	wavelength/nm	1.88	1.34	1.06	0.88
Nd ₁	A_{ed}/s^{-1}	10.7370	227.3060	1052.4800	734.5400
	$S_{ed}/10^{-20} cm^2$	0.0887	0.6720	1.5586	0.6122
	β	0.0053	0.1122	0.5197	0.3627
Nd ₂	A_{ed}/s^{-1}	11.604	244.819	1070.311	611.19
	$S_{ed}/10^{-20} cm^2$	0.1313	0.9943	2.1772	0.6973
	β	0.0057	0.1264	0.5524	0.3155
Nd ₃	A_{ed}/s^{-1}	9.9680	210.2950	914.1110	509.8700
	$S_{ed}/10^{-20} cm^2$	0.0823	0.6233	1.3570	0.4245
	β	0.0061	0.1279	0.5559	0.3101
Nd ₄	A_{ed}/s^{-1}	10.2375	216.7150	967.5000	606.3200
	$S_{ed}/10^{-20} cm^2$	0.0846	0.6402	1.4365	0.5049
	β	0.0057	0.1203	0.5373	0.3367
Nd ₅	A_{ed}/s^{-1}	11.4288	241.1195	1055.6700	606.3800
	$S_{ed}/10^{-20} cm^2$	0.0941	0.7123	1.5621	0.5033
	β	0.0060	0.1259	0.5514	0.3167

2.3 荧光光谱分析

图2所示为不同摩尔分数的 Nd^{3+} 在硝酸盐中用 800nm LD 激发下的 1.25 μm ~ 1.44 μm 荧光光谱。从图2可以看出,在碲钨酸盐中,随着 Nd^{3+} 的掺杂摩尔

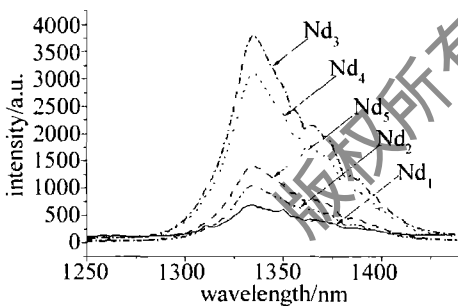


Fig. 2 1.25 μm ~ 1.44 μm emission spectra of Nd^{3+} for different Nd^{3+} concentrations

分数由 0.001 增加,荧光强度也逐渐增加,到 0.005 时达到最大。随后当 Nd^{3+} 的摩尔分数大于 0.005 时,荧光强度逐渐降低。随着参与受激发射的 Nd^{3+} 增加,导致荧光强度增加,另一方面当 Nd^{3+} 的摩尔分数增加到 0.005 之后,玻璃中各个 Nd^{3+} 之间将产生相互作用, Nd^{3+} 吸收的激发能量,将通过这种相互作用,从一个激活 Nd^{3+} 迁移到另外一个尚未激活的 Nd^{3+} ,从而使荧光强度下降,产生浓度猝灭效应。 Nd^{3+} 由 ${}^4F_{3/2}$ 到 ${}^4I_{13/2}$ 跃迁发射的峰值波长为 1334nm。

利用公式^[13]:

$$\sigma_p = \frac{\lambda_p^4}{8\pi c n^2 \Delta\lambda_{eff}} A[{}^4F_{3/2}; {}^4I_{13/2}] \quad (1)$$

式中, λ_p 表示发射截面的峰值波长, $\Delta\lambda_{eff}$ 表示有效线宽, n 为玻璃样品的折射率, c 为光速, $A[{}^4F_{3/2}; {}^4I_{13/2}]$ 表示 ${}^4F_{3/2}$ 能级到 ${}^4I_{13/2}$ 能级之间的自发辐射跃迁几率。利用 J-O 理论计算出的各种样品的 Ω_t ($t=2,4,6$)、谱线强度 S_{ed} 和荧光峰值波长 1.33 μm 处的有效线宽,得到的各种 Nd^{3+} 浓度样品的受激发射截面列于表 4 中。

Table 4 $Nd^{3+}: {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ effective bandwidth and the stimulated emission cross-section at the peak wavelength

sample No.	Nd ₁	Nd ₂	Nd ₃	Nd ₄	Nd ₅
$\Delta\lambda_{eff}/nm$	47.87	52.64	53.67	54.18	54.75
FWHM/nm	48	52	52	53	53
τ_{rad}/ms	430	441	475	461	412
τ_f/ms	300	360	400	360	320
$\eta/\%$	67.8	81.6	84.2	78.1	77.7
$\sigma/10^{-21} cm^2$	3.436	4.081	4.167	3.856	3.506

由表 4 可以看出, Nd_1 到 Nd_3 的受激发射截面从 $3.436 \times 10^{-21} cm^2$ 增加到 $4.167 \times 10^{-21} cm^2$, 然后开始减小到 $3.506 \times 10^{-21} cm^2$, 在 Nd^{3+} 的摩尔分数为 0.005 时, 其受激发射截面达到最大。因此, 在设计作为 1.33 μm 光放大器时, 应选择合适浓度的 Nd^{3+} 进行掺杂, 使其性能达到最优。

2.4 硝酸盐玻璃中 Nd^{3+} 能量转移

图 3 显示了硝酸盐玻璃中 Nd^{3+} 的能级图, 钕离子之间存在的主要能量转移为: 能量转移过程 $C_{d,u}$ (${}^4F_{3/2}, {}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}, {}^4F_{3/2}$) 和交叉弛豫过程 $C_{d,u}$ (${}^4F_{3/2}$,

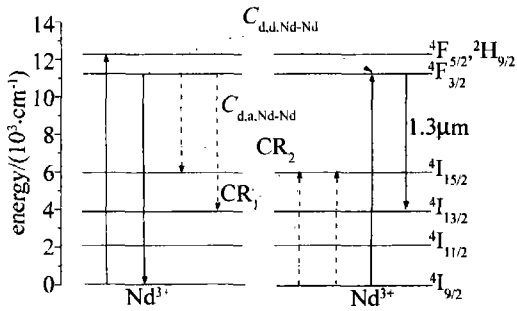


Fig. 3 Simplified energy level diagram of Nd^{3+} ions (${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4F_{3/2}$, ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, ${}^4I_{15/2}$)。归一化发射光谱可通过下式获得:

$$g(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\int_0^\infty I(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中, $I(\lambda)$ 为发射光谱, λ 为波长, 通过归一化的发射光谱和辐射跃迁几率, 利用下式, 可以获得发射交叉截面^[14]:

$$\sigma_{em}(\lambda) = (\lambda^2 A_r / 8\pi n^2) g(\nu) = (\lambda^4 A_r / 8\pi c n^2) g(\lambda) \quad (3)$$

式中, $g(\nu)$ 表示单位频率下的发射几率, n 为玻璃样品的折射率, A_r 为跃迁几率, 通过使用施主离子的发射光谱和受主离子的吸收光谱, FÖRSTER 和 DEXTER 计算了偶极-偶极非辐射能量转移临界距离^[15-16], Dexter 表达式为:

$$R_{d,x}^6 = \frac{3}{4\pi} \left(\frac{hc}{n} \right)^4 \int \frac{F_{d,em}(E) \sigma_{x,abs}(E)}{E^4} dE \quad (4)$$

式中, x 为 d (施主-施主能量转移) 或者 a (施主-受主能量转移), h 为普朗克常量, $\sigma_{x,abs}(E)$ 表示 x 在能量为 E 处的吸收交叉截面, $F_{d,em}(E)$ 表示归一化的发射截面, 在此处 $g(\nu) d\nu = F_{d,em}(E) dE$, 因此把(3)式代入(4)式, 转换成对波长的积分公式如下:

$$R_{d,x}^6 = \frac{3c}{8\pi n^2 A_r} \int \sigma_{d,em}(\lambda) \sigma_{x,abs}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

(5)式是一个非常有用的表达式, 其中, $\sigma_{d,em}(\lambda)$ 和 $\sigma_{x,abs}(\lambda)$ 分别为归一化的发射和吸收交叉截面, 从(5)式中可以看出, 临界距离独立于施主离子的辐射跃迁几率, 因为可以从(3)式中看到, $\sigma_{d,em}(\lambda)$ 与辐射跃迁成正比。能量转移参量 $C_{d,d}$ (${}^4F_{3/2}$, ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2}$) 和 $C_{d,a}$ (${}^4F_{3/2}$, ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4F_{3/2}$, ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, ${}^4I_{15/2}$) 可以由下式获得:

$$C_{d,a} = A_r R_{d,a}^6, C_{d,d} = A_r R_{d,d}^6 \quad (6)$$

图 4 是摩尔分数为 0.01 的样品 $Nd^{3+}: {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 跃迁的吸收发射截面, 其它掺杂摩尔分数的样品计算结果与该图相似。利用(2)式~(6)式可以计算出铍粒子发生浓度猝灭的相关参量, 列于表 5 中。

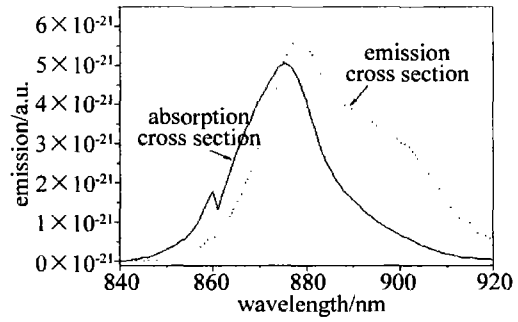


Fig. 4 The absorption cross section and emission cross section of $Nd^{3+}: {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ transition around 0.005 (mole fraction) Nd_2O_3

Table 5 Comparison of $C_{d,x}$ and $R_{d,x}$ ($x = a$ or d)

glass composition	$C_{d,d}/(cm^6 \cdot s^{-1})$	$R_{d,d}/nm$	$C_{d,a}/(cm^6 \cdot s^{-1})$	$R_{d,a}/nm$
tellurite glass	10.6×10^{-40}	0.91	2.80×10^{-40}	0.73
lithium lanthanum metaphosphate-like	40×10^{-40}	0.42	—	—
fluoroindogallat ^[17]	7.0×10^{-40}	0.82	2.5×10^{-40}	0.69

3 结论

研究 Nd^{3+} 对 1.3 μm 处荧光的影响发现, 随着 Nd^{3+} 的掺杂摩尔分数增加, 荧光强度也逐渐增加, 到摩尔分数为 0.005 时达到最大。随后当 Nd^{3+} 的摩尔分数大于 0.005 时, 荧光强度逐渐降低。随着 Nd^{3+} 摩尔分数的增加, 样品的荧光峰值波长的有效线宽变大, 从 Nd_1 的 47.87nm 到 Nd_5 的 54.75nm。 Nd_1 到 Nd_3 的受激发射截面从 $3.436 \times 10^{-20} cm^2$ 增加到 $4.167 \times 10^{-20} cm^2$, 然后开始减小到 $3.506 \times 10^{-20} cm^2$, 在 Nd^{3+} 摩尔分数为 0.005 时, 其受激发射截面达到最大。根据 Dexter 能量转移理论计算了 Nd^{3+} 在硝酸盐玻璃中能量转移参量 $C_{d,d} = 10.6 \times 10^{-40} cm^6 \cdot s^{-1}$ 和 $C_{d,a} = 2.80 \times 10^{-40} cm^6 \cdot s^{-1}$ 值与相应发生浓度猝灭的临界距离 $R_{d,d} = 0.91 nm$ 和 $R_{d,a} = 0.73 nm$ 。

参 考 文 献

- [1] HE F, ZHAO S H, XIA M. Effect of fiber parameters on the performance of Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped double-cladding fiber lasers [J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 431-434 (in Chinese).
- [2] RATNAKARAM Y C, SRIHARI N V, KUMAR A V, et al. Optical absorption and photoluminescence properties of Nd^{3+} doped mixed alkali phosphate glasses-spectroscopic investigations [J]. Spectrochimica Acta, 2009, A72(1): 171-177.
- [3] PHANON D, BRENIER A, LUNEAU I G. Luminescence studies of Nd^{3+} - and Yb^{3+} -doped α - $Y(IO_3)_3$ and β - $Y(IO_3)_3$, transparent host matrix in the mid- and beginning of the far-infrared [J]. Journal of Luminescence, 2009, 129(3): 203-207.
- [4] CHEN D D, CHEN B Y, LIU Y H, et al. Thermal stability and structure of glass systems of TeO_2 -ZnO [J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2004, 23(5): 86-89 (in Chinese).

- [5] PIATKOWSKI D, WISNIEWSKI K, KOEPKE C, *et al.* Excited state absorption spectroscopy of Nd^{3+} activated fluoroaluminate glass -experiment and simulation [J]. *Optical Materials*, 2009, 31(3): 541-547.
- [6] NIE Q H, LI X J, DAI S X, *et al.* Energy transfer and upconversion luminescence in $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped lanthanum-zinc-lead-tellurite glasses [J]. *Journal of Luminescence*, 2008, 128(1): 135-141.
- [7] BOYER J C, Vetrone F, CAPOBIANCO J A, *et al.* Yb^{3+} ion as a sensitizer for the upconversion luminescence in nano-crystalline $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ho}^{3+}$ [J]. *Chemical Physics Letters*, 2004, 390(4/6): 403-407.
- [8] YU C L, DAI S X, ZHOU G, *et al.* Concentration quenching mechanism in erbium-doped tellurite glass [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(8): 3894-3899 (in Chinese).
- [9] DAI S X, XU T F, NIE Q H, *et al.* Investigation of concentration quenching in $\text{Er}^{3+}:\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glasses [J]. *Phys Lett*, 2006, A359(4): 330-333.
- [10] SHEN X, NIE Q H, XU T F, *et al.* Investigation on energy transfer from Er^{3+} to Nd^{3+} in tellurite glass [J]. *Journal of Rare Earths*, 2008, 26(6): 899-903.
- [11] XU S Q, YANG Z M, DAI S X, *et al.* Spectroscopic properties and Judd-Ofelt theory analysis of Er^{3+} -doped heavy metal oxyfluoride silicate glass [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(2): 137-142 (in Chinese).
- [12] JIANG C, DENG P Z, ZHANG J Z. Yb^{3+} -oxide glass with high emission cross section [J]. *Acta Optics Sinica*, 2000, 20(9): 1287-1290 (in Chinese).
- [13] CHEN D Q, WANG Y S, YU Y L, *et al.* Fluorescence and Judd-Ofelt analysis of Nd^{3+} ions in oxyfluoride glass ceramics containing CaF_2 nanocrystals [J]. *J Phys & Chem Solids*, 2007, 68(2): 193-200.
- [14] CASTILLO J D, RAMOS J M, YANES A C, *et al.* Gain cross-section of 1.06 μm emission in Nd^{3+} -doped $\text{SiO}_2-\text{LaF}_3$ glass-ceramics prepared by sol-gel method [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(18): 2000-2003.
- [15] HASEGAWA Y, WADA Y, YANAGIDA S. Strategies for the design of luminescent lanthanide(III) complexes and their photonic applications [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2004, C5(3): 183-202.
- [16] JABA N, BEN MANSOUR B, KANOUN A, *et al.* Spectral broadening and luminescence quenching of 1.53 μm emission in Er^{3+} -doped zinc tellurite glass [J]. *Journal of Luminescence*, 2009, 129(3): 270-276.
- [17] de SOUSA D F, BATALIOTO F, BELL M J V. Spectroscopy of Nd^{3+} and Yb^{3+} codoped fluorindogallate glasses [J]. *J A P*, 2001, 90(7): 3308-3313.

(上接第36页)

优良,其拉伸强度达到母材的93%以上。(3)填丝焊接接头拉伸断裂于热影响区,断裂特性和母材相似,均为韧窝和撕裂棱混合型韧性断口,由于在热影响区晶粒发生一定程度的粗化,有固溶粒子的析出,成为断裂源,所以导致其断裂强度和韧性均有所降低,延伸率为基材的58%左右。

在此感谢北京航空制造工程研究所的大力支持。

参考文献

- [1] ZHOU W Sh, YAO J Sh. Welding of aluminum and aluminum alloy [M]. Beijing: China Machine Press, 2006, 26-59 (in Chinese).
- [2] YU J, WANG K H, XU Y L, *et al.* Microstructures and properties of 7A52 aluminum alloy welded joint by twin wire welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(10): 87-90 (in Chinese).
- [3] XU L H, TIAN Zh L, PENG Y, *et al.* Comparison of MIG welding and laser-MIG welding of high strength aluminum alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(2): 38-42 (in Chinese).
- [4] LÜ Sh X, LI L Q, SHI J W, *et al.* AC pulsed gas tungsten arc welding technology for dissimilar aluminum alloy ZL101A and LF6 [J]. *Welding & Joining*, 2007(9): 42-45 (in Chinese).
- [5] WANG X J, HUANG W R, WEI Q L, *et al.* Evaporation loss of Mg element in 5A06 aluminum alloy electron beam welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(11): 61-65 (in Chinese).
- [6] YOON J W, LEE Y S, LEE K D, *et al.* Effect of filler wire composition on the Nd:YAG laser weldability of 6061 aluminum alloy [J]. *Materials Science Forum*, 2005, 475/479: 2591-2594.
- [7] MAYER C, FOUQUET F, ROBIN M. Laser welding of aluminium-magnesium alloys sheets process optimization and welds characterization [J]. *Material Science Forum*, 1996, 217/222: 1679-1684.
- [8] ZHAO H, DEBROY T. Weld metal composition changes during conduction mode laser welding of aluminum alloy 5182 [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2001, B32(1): 163-172.
- [9] ANCONA A, SIBILLANO T, TRICARICO L, *et al.* Comparison of two different nozzles for laser beam welding of AA5083 aluminium alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164/165: 971-977.
- [10] BRAUN R. Nd:YAG laser butt welding of AA6013 using silicon and magnesium containing filler powders [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, A426(1/2): 250-262.
- [11] WANG J Ch. Development and expectation of laser welding technology [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(1): 48-54 (in Chinese).