

# 不同 $Tm^{3+}$ 浓度掺杂碲酸盐玻璃光谱性质研究\*

陈 鹤† 刘粤惠 姚小旭 冯洲明

(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 510640)

(2004 年 12 月 10 日收到 2005 年 1 月 21 日收到修改稿)

制备了  $70TeO_2-20WO_3-10ZnO-xTm_2O_3$  系统玻璃, 根据所测玻璃的吸收光谱, 应用 Judd-Ofel(J-O)理论计算出  $Tm^{3+}$  离子在碲酸盐玻璃的 J-O 强度参数、 $Tm^{3+}$  在玻璃中的自发辐射概率  $A$ 、荧光分支比  $\beta$  及荧光辐射寿命  $\tau_R$  等各项光谱参数. 测定了玻璃的荧光光谱, 并计算了  $Tm^{3+}$  在碲酸盐玻璃中的荧光有效线宽、峰值受激发射截面. 比较了  $Tm^{3+}$  在不同掺杂浓度下的光谱特性, 认为当  $Tm_2O_3$  掺杂浓度达到 0.8wt%—1wt% 时, 所获得的荧光强度与荧光线条宽达到最佳值, 掺  $Tm^{3+}$  碲酸盐玻璃是一种理想的 S 波段宽带光纤放大器用基质材料.

关键词: 碲酸盐玻璃, 宽带光纤放大器, 荧光线条宽, 荧光峰值发射截面

PACC: 7855, 4255R, 7840

## 1. 引 言

随现代通信技术飞速发展, 人们对光纤通信的容量和传输速度要求也大大提高, 这使得密集波分复用(DWDM)技术与较大带宽光放大器的联合运用变为实现多波长和超长距离传输必不可少的条件. 同时, 由于现代光纤和激光二极管制造技术的日趋成熟, 对  $Pr^{3+}$ ,  $Nd^{3+}$  和  $Er^{3+}$  等稀土离子实现有效抽运成为可行<sup>[1]</sup>. 目前, 通讯上 C + L 波段(1530—1610nm)带宽放大器可通过掺铒光纤放大器(EDFA)得以实现<sup>[2,3]</sup>, S 波段(1490—1530nm)与 S + 波段(1450—1490nm)的带宽放大器主要以掺铥光纤放大器(TDFA)为主, 现正处于热点研究阶段.

由于硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃和硼酸盐玻璃等具有高声子能量的特点, 所以在较低能级间隔下多声子弛豫引起的无辐射能量损失占据主导地位, 这必然导致  $Tm^{3+}$  离子在基质中辐射量子效率降低, 无法实现放大的效果. 且虽然硅酸盐光纤的制造工艺比较成熟, 但稀土离子在硅网络中容易产生团聚, 进而引起稀土离子的交叉弛豫造成荧光猝灭<sup>[4]</sup>, 这对光纤放大器小型化和高增益非常不利. 而氟化物玻璃虽然具有低声子能量优点, 但因其制备工艺复杂, 化学稳定性和机械性能差的特点, 使得氟化物玻璃

难以实用化. 因此, 对于光纤放大器理想基质材料的研究仍是现代材料研究的热点.

碲酸盐玻璃具有比硅酸盐、硼酸盐和氟化物玻璃具有更好的物理性能, 如低熔制温度<sup>[5-7]</sup>、高介电常数<sup>[8,9]</sup>、高折射率<sup>[8,10]</sup>、大的三阶非线性常数<sup>[11,12]</sup>以及良好的红外透过率<sup>[13]</sup>, 而且碲酸盐玻璃具有良好的抗水性和高掺杂浓度特点, 故是一种理想的激光与放大器用基质材料.

$Tm^{3+}$  离子在碲酸盐玻璃中的光谱性能前人已做了大量研究, Ozen 等就组分对  $Tm^{3+}$  在  $TeO_2-WO_3$  玻璃中的结构环境以及光学性能的影响进行了研究<sup>[14]</sup>, 但对于  $Tm^{3+}$  离子在  $TeO_2-WO_3-ZnO$  玻璃系统中的光学性能, 特别是在不同  $Tm^{3+}$  离子掺杂浓度下的光谱性能未见有系统报道, 本文以  $TeO_2-WO_3-ZnO$  系统中成玻性能良好的  $70TeO_2-20WO_3-10ZnO$  为基质, 研究了不同  $Tm^{3+}$  掺杂浓度的光谱性能, 并用 Judd-Ofel(J-O)理论计算了  $Tm^{3+}$  离子的光谱参数, 为掺铥基质的进一步研究做了基础性工作.

## 2. 实 验

掺  $Tm^{3+}$  离子的玻璃配方:  $70TeO_2-20WO_3-10ZnO-xTm_2O_3$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.4, 1.8$  wt%), 玻璃熔制实验用纯度  $\geq 99.6\%$  的  $WO_3$  与

\* 广州市科技计划重大项目(批准号 2004Z2-D0131)及广东省自然科学基金(批准号 D4020036)资助的课题.

† E-mail: chenhe\_1979@yahoo.com.cn

ZnO 高纯度的  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  ( $\geq 99.9\%$ ) 作为原料,按配方精确称取 20g 配合料置铂坩埚中于  $800^\circ\text{C}$  下熔制 20min,然后浇注于不锈钢模上,成型后立即送入马弗炉中精密退火.将玻璃加工成  $10\text{mm} \times 15\text{mm} \times 2\text{mm}$  两大面抛光样品.

用蒸馏水作介质,根据阿基米德定律测定玻璃样品的密度,用 V 棱镜法测定玻璃折射率.玻璃的吸收光谱用 Perkin-elmer lambda 900UV/UIS/NIR 型光度仪测得,发射光谱采用 2W 中心波长 800nm 的 LD 作为抽运源,用 PbS 探测器接收,信号经锁相放大器放大后记录.所有样品的测试条件严格保持一致,并在室温条件下测得.

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. Judd-Ofelt 强度参数与自发辐射概率

图 1 列出不同  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  掺杂浓度下的吸收光谱谱图,图中的 6 个吸收峰峰值位置为 662nm, 687nm, 793.2nm, 1212.5nm 与 1700nm, 相对应于基态  $^3\text{H}_6$  到激发态  $^3\text{F}_2$ ,  $^3\text{F}_3$ ,  $^3\text{H}_4$ ,  $^3\text{H}_5$ ,  $^3\text{F}_4$  的吸收.除  $^1\text{G}_4$  的吸收被基质吸收淹没外,这些玻璃的吸收谱图和峰值位置与  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3$  系统玻璃的吸收谱图相似<sup>[14]</sup>,这可能是由于 ZnO 的引入降低了玻璃基质的紫外透过率,将  $^1\text{G}_4$  的吸收淹没.由吸收光谱确定出的  $\text{Tm}^{3+}$  离子在硝酸盐玻璃中的能级图见图 2,其中虚线代表我们从发射荧光谱图中得到  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$  的跃迁峰值波长,约为 1457nm,处于 S 波段边缘.

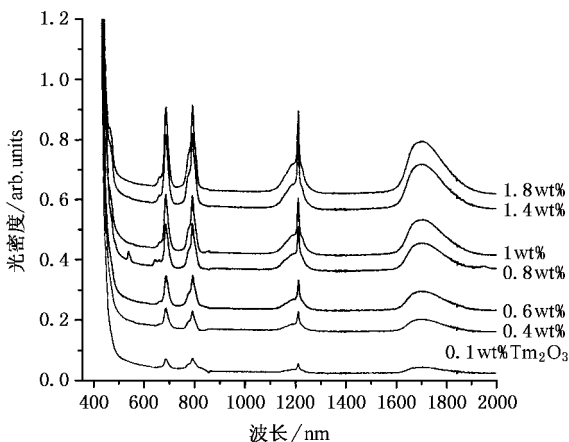


图 1 硝酸盐玻璃  $\text{Tm}^{3+}$  吸收光谱

从图 1 可以看出,随  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  浓度增加,吸收强度

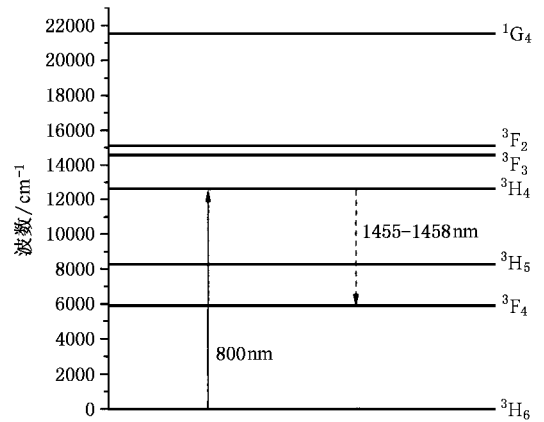


图 2 硝酸盐玻璃  $\text{Tm}^{3+}$  离子能级图

也随之不断增加,同时峰值位置几乎无变化.说明由于基质玻璃相同, $\text{Tm}^{3+}$  离子不同掺杂浓度下对吸收峰值位置无影响,即  $\text{Tm}^{3+}$  离子周围的配位场为常数.

基质吸收截面可根据测得的吸收光谱由下式得到

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \frac{2.303}{Nl} OD(\lambda), \quad (1)$$

式中  $OD(\lambda)$  是光密度,  $l$  是玻璃厚度,  $N$  是稀土离子掺杂浓度,可由测得密度与掺杂摩尔分数来获得.每个吸收带的积分吸收截面为

$$\Sigma_{\text{abs}} = \int \sigma_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中  $\Sigma_{\text{abs}}$  是积分吸收截面,计算所得的结果列于表 1.从表中可以看出积分吸收截面基本没有随  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  掺杂浓度的变化而变化,这主要由于基质玻璃的成分无变化而使得  $\text{Tm}^{3+}$  离子周围的配位场基本保持一致.

根据 Judd-Ofelt 谱线强度理论<sup>[15,16]</sup>,稀土离子  $4f \rightarrow 4f$  电子组态跃迁的谱线强度  $S$  为

$$S [aJ; bJ'] = \sum_{\iota=2,4,6} \Omega_{\iota} | aJ \| U^{(\iota)} \| bJ' |^2, \quad (3)$$

式中  $\Omega_{\iota}$  为 J-O 谱线强度参数,取决于基质材料的配位特性;  $| aJ \| U^{(\iota)} \| bJ' |^2$  为约化矩阵元,基本不随基质而变化.本文采用文献 [17] 中的数据.利用实验测定的吸收谱线强度  $S$ ,以及文献 [17] 中的数据两者的基础上再由最小二乘法拟合,可计算出谱线强度  $\Omega_{\iota}$ .结果列于表 1.

从表中的 Judd-Ofelt 强度参数比较可知,  $\Omega_2$ 、 $\Omega_4$  与  $\Omega_6$  的关系并不固定,这不像有些掺  $\text{Tm}^{3+}$  硝酸盐

玻璃的文献所报道<sup>[18]</sup>,  $\Omega_2 > \Omega_4 > \Omega_6$ , 与 Ozen 对  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3$  系统的研究相一致.  $\Omega_6$  主要反映  $\text{Tm-O}$  键的共价性<sup>[19,20]</sup>,  $\Omega_6$  越大, 表明  $\text{Tm-O}$  键的共价性越大, 反之则表明共价性越小, 两者成反比关系. 表

中  $\Omega_6$  始终在 1.5 左右, 尤其当掺杂浓度达到一定值以后,  $\Omega_6$  的值恒定在 1.46, 说明由于基质配方相同,  $\text{Tm-O}$  键周围的配位场并无多大的变化, 使得  $\text{Tm-O}$  键的共价性维持在一定值.

表 1 不同  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂下基态到激发态积分吸收截面与 Judd-Ofelt 谱线强度

玻璃组分	积分吸收截面( $10^{-28}/\text{cm}^3$ )				Judd-Ofelt 谱线强度参数( $10^{-20}/\text{cm}^2$ )		
$\text{Tm}_2\text{O}_3$ 掺杂浓度	${}^3\text{F}_{2+3}$	${}^3\text{F}_4$	${}^3\text{H}_5$	${}^3\text{H}_4$	$\Omega_2$	$\Omega_4$	$\Omega_6$
0.4wt%	2.11	2.36	3.63	10.58	4.12	1.83	1.4
0.6wt%	1.98	2.81	3.44	10.19	5.6	0.46	1.6
0.8wt%	2.27	2.54	3.72	11.24	4.44	1.9	1.46
1wt%	2.10	2.47	3.62	10.60	4.5	1.59	1.46
1.4wt%	2.04	2.61	3.46	10.53	4.97	1.14	1.46
1.6wt%	2.02	2.56	3.47	10.35	4.82	1.17	1.46

利用计算得到的  $\Omega_i$ , 采用文献 [21] 中的高能级到低能级跃迁的简约化矩阵  $\| aJ \| U^{(i)} \| bJ' \|^2$ , 再利用 (3) 式计算发射谱线强度, 由此可计算从  $J$  多重态到  $J'$  多重态的电偶极子自发辐射概率

$$A_{\text{ed}}(aJ; bJ') = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J+1)\lambda^3} \times \frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{\text{ed}}(aJ; bJ'). \quad (4)$$

因为在一般情况下磁偶极子的谱线强度与电偶极子相比很小, 故被忽略<sup>[22]</sup>. 但对满足磁偶极子跃迁定则  $\Delta S = \Delta L = 0$ ,  $\Delta J = 0, \pm 1$  的磁偶极子跃迁谱线强度  $S_{\text{md}}$  要考虑, 例如  $\text{Tm}^{3+}$  离子的  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$  跃迁的磁偶极子, 因此自发辐射概率  $A$  应为电偶极子跃迁概率  $A_{\text{ed}}$  与磁偶极子跃迁概率  $A_{\text{md}}$  之和, 即

$$A(aJ; bJ') = A_{\text{ed}} + A_{\text{md}} = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J+1)\lambda^3} \times \left[ \frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{\text{ed}}(aJ; bJ') + n^3 S_{\text{md}} \right]. \quad (5)$$

荧光分支比:

$$\beta(aJ; bJ') = \frac{A(aJ; bJ')}{\sum_{bJ'} A(aJ; bJ')}, \quad (6)$$

荧光寿命:

$$\tau_{\text{R}}(J) = \frac{1}{\sum_{bJ'} A(aJ; bJ')}. \quad (7)$$

表 2 列出掺杂 1wt%  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  的  $\text{Tm}^{3+}$  离子的自发辐射概率、荧光分支比以及荧光寿命. 从  $\text{Tm}^{3+}$  离子

的  ${}^3\text{H}_4$  和  ${}^3\text{F}_4$  的辐射寿命来看,  ${}^3\text{F}_4$  的辐射寿命几乎是  ${}^3\text{H}_4$  辐射寿命的 3 倍. 这是掺杂  $\text{Tm}^{3+}$  的主要缺点, 由于下能级寿命比上能级寿命长很多, 使得  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  跃迁会产生自终结现象, 无法实现辐射跃迁. 本实验中须采用锁相放大器进行信号放大才能得到波形比较规整的荧光光谱. 一般采用上转换抽运方式或双波长二次抽运进行激发<sup>[23,24]</sup>, 从而提高  $\text{Tm}^{3+}$  离子的粒子数反转. 从表 2 还可以看到  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  辐射跃迁的荧光分支比与  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  相差一个数量级, 这是我们利用  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  辐射跃迁在 S 波段放大所不愿意看到的, 可通过共掺杂  $\text{Ho}^{3+}$  离子和  $\text{Dy}^{3+}$  离子来降低  ${}^3\text{F}_4$  能级寿命的方法来提高  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  辐射跃迁效率, 这将在下一步工作中继续探讨.

### 3.2. 受激发射截面与荧光光谱分析

图 3 为不同  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度荧光发射光谱图, 从图中可由

$$\Delta\lambda_{\text{eff}} = \frac{\int I_{\text{em}}(\lambda) \lambda d\lambda}{I_{\text{peak}}} \quad (8)$$

计算荧光有效线宽, 结果列于表 3.

同时结合前面计算所得的自发辐射跃迁概率与有效线宽, 可由下式得到峰值受激发射截面:

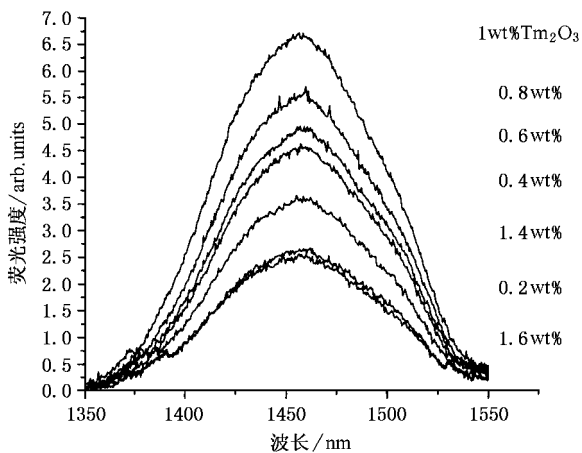
$$\sigma(\lambda_p) = \frac{\lambda_p^4}{8\pi c n^2 \Delta\lambda_{\text{eff}}} A_{\text{ed}}, \quad (9)$$

式中  $n$  是折射率,  $c$  为光速,  $A_{\text{ed}}$  为电偶极子自发辐射概率,  $\lambda_p$  为峰值波长.

由图 3 的荧光光谱谱图可以看到, 随  $\text{Tm}^{3+}$  离子

表 2  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  掺杂浓度为 1wt% 下  $\text{Tm}^{3+}$  离子自发辐射概率  $A$ , 辐射寿命  $\tau_R$ , 荧光分支比  $\beta$ 

能级跃迁	波数/ $\text{cm}^{-1}$	$A_{\text{rad}} + A_{\text{nr}} / (10^2/\text{s}^{-1})$	$\beta$	$\tau_R/\text{ms}$
$^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$	21422	24.12074	0.4435309	0.000184
$^3\text{F}_4$	15541	3.950198	0.072636	0.000184
$^3\text{H}_5$	13175	18.29788	0.3364605	0.000184
$^3\text{H}_4$	8815	6.25918	0.1150935	0.000184
$^3\text{F}_3$	6870	1.395273	0.0256562	0.000184
$^3\text{F}_2$	6315	0.360173	0.0066228	0.000184
$^3\text{F}_2 \rightarrow ^3\text{H}_6$	15108	17.37479	0.4519341	0.00026
$^3\text{F}_4$	9227	15.01001	0.3904239	0.00026
$^3\text{H}_5$	6860	5.684802	0.1478669	0.00026
$^3\text{H}_4$	2501	0.374944	0.0097526	0.00026
$^3\text{F}_3$	555.1	0.000308 + 0.00055648	$2.25 \times 10^{-5}$	0.00026
$^3\text{F}_3 \rightarrow ^3\text{H}_6$	14553	50.74568	0.8180533	0.000161
$^3\text{F}_4$	8672	1.595587 + 1.533956934	0.0504503	0.000161
$^3\text{H}_5$	6305	8.06124	0.1299524	0.000161
$^3\text{H}_4$	1945	0.095776	0.001544	0.000161
$^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$	12607	29.28355	0.9014108	0.000308
$^3\text{F}_4$	6726	2.449357	0.0753965	0.000308
$^3\text{H}_5$	4360	0.510866 + 0.24258	0.0231928	0.000308
$^3\text{H}_5 \rightarrow ^3\text{H}_6$	8247	6.055366 + 1.34779	0.9925594	0.001341
$^3\text{F}_4$	2366	0.055497	0.0074406	0.001341
$^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$	5881	6.136834	1	0.00163

图 3 不同掺杂浓度  $\text{Tm}^{3+}$  离子荧光发射光谱

掺杂浓度的增加,  $\text{Tm}^{3+}$  离子的荧光强度也随之增加, 但掺杂浓度超过 1wt%  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  时, 荧光强度开始下降, 但谱线的形状却不随浓度的改变而改变. 这与掺  $\text{Er}^{3+}$  硝酸盐玻璃不同<sup>[25]</sup>, 当  $\text{Er}^{3+}$  掺杂浓度增加时, 1.53 $\mu\text{m}$  荧光光谱谱线侧峰被大大提高, 主要是

因为  $\text{Er}^{3+}$  1.53 $\mu\text{m}$  跃迁是三能级系统, 存在比较大的荧光捕获效应, 从而使荧光光谱强度红移变形. 但在掺杂  $\text{Tm}^{3+}$  的不同掺杂浓度中, 由于  $\text{Tm}^{3+}$  在 1.46 $\mu\text{m}$  的跃迁是通过四能级系统来实现, 故不存在荧光捕获效应的影响. 这也能从表 3 中荧光半高宽与计算所得的荧光有效线宽的比较来证实, 两者除掺杂浓度 0.6wt% 的情况下有稍微差异外, 其余数值相差均小于 1nm, 可见掺  $\text{Tm}^{3+}$  的硝酸盐玻璃系统的 FWHM 不存在荧光俘获效应, 真实反映其线宽, 这是四能级跃迁系统的优点之一.

同时, 从图 3 和表 3 可看到, 不管是荧光强度或者是荧光有效线宽和荧光半高宽, 三者都随掺杂离子浓度的增加呈现先增加后下降的趋势, 而峰值受激发射截面基本不随  $\text{Tm}^{3+}$  离子掺杂浓度的改变而变化. 我们知道, 线宽的影响主要与稀土离子周围配位场有关, 可通过调整玻璃基质配方来改变  $\text{Tm}^{3+}$  的配位场进而实现展宽线宽的目的. 但本文选用的玻璃配方不变, 只是  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度不断增加, 故认为  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  类似于碱金属或碱土金属, 起网络修饰体作

用.当  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  浓度增加时,不仅引入  $\text{Tm}^{3+}$ ,同时也引入多余的非桥氧离子,使得  $[\text{TeO}_4]$  结构变形  $[\text{TeO}_3]$  与  $[\text{TeO}_{3+1}]$  结构增多,网络结构松弛,从而引起

$\text{Tm}^{3+}$  的荧光谱线不均匀展宽.而后随浓度的继续增加,线宽却开始降低,主要是由交叉弛豫( $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ ;  $^3\text{F}_4 \leftarrow ^3\text{H}_6$ )所引起的浓度猝灭效应所致<sup>[26]</sup>.

表 3 不同掺杂浓度下  $\text{Tm}^{3+}$  离子荧光有效线宽,荧光半高宽以及峰值发射截面

掺杂离子浓度/wt%	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.4	1.6
荧光有效线宽/nm	97.4	98.0	96.9	100.4	97.8	98.4	97.4
荧光半高宽 FWHM/nm	98	99	100.5	100.5	99.5	98.5	98
峰值发射截面/ $10^{-21} \text{cm}^2$	3.39	3.50	3.63	3.37	3.44	3.39	3.39

## 4. 结 论

根据不同  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度的吸收光谱,利用 Judd-Ofelt 理论计算了  $\text{Tm}^{3+}$  在硝酸盐玻璃中的各个光谱参数,由计算所得的 J-O 强度  $\Omega_6$  可知由于基质配方相同,虽然  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  浓度不断增加,但  $\text{Tm}-\text{O}$  键的共价性并没有改变.

通过对荧光发射光谱的分析,可知在掺杂  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  硝酸盐玻璃中存在明显的荧光猝灭效应,当浓度为 0.8wt% 时,  $\text{Tm}^{3+}$  的荧光发射有效线宽与荧光半高宽都达到最高值,同时实验中发现存在粒子数反转效率低的问题,可在下一步工作中通过采用上转换抽运机理或共掺杂  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  离子来提高  $\text{Tm}^{3+}$  的荧光辐射效率.

- [ 1 ] Rodriguez V D , Lavin V , Rodriguez-Mendoza U R and Martin I R , 1999 *Opt. Mater.* **13** 1
- [ 2 ] Tanabe S , Sugimoto N , Ito S et al 2000 *Journal of Luminescence* , **87-89** 670
- [ 3 ] Aozasa S , Sakamoto T , Kanamori et al 2000 *IEEE Photonics Technology Letters* **12** 1331
- [ 4 ] Wysocki P , Rench T , Ardrejco M , Digiovanni D and Jayawardene I 1997 *Optical Fiber Communication Conference ( OFC )* Vol. 6 , OSA Technical Digest Series , Paper WF2
- [ 5 ] Sidebottom D L , Hruschka M A , Potter B G B and Brow R K 1997 *J. Non-cryst. Solids* **222** 282
- [ 6 ] Stanworth J E 1952 *J. Soc. Glass Technol.* **36** 217
- [ 7 ] Stanworth J E 1954 *J. Soc. Glass Technol* **36** 425
- [ 8 ] Stanworth J E 1952 *Nature* **169** 581
- [ 9 ] Ulrich D R 1964 *J. Am. Ceram. Soc.* **47** 595
- [ 10 ] Webber M J , Myers J D and Bluckbum D H 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 2944
- [ 11 ] Wang J S , Vogel E M and Snitzer E 1994 *Opt. Mater.* **3** 187
- [ 12 ] Kim S H , Yoko T 1995 *J. Am. Ceram. Soc.* **78** 1061

- [ 13 ] Burger H , Vogel W and Kozhukharov V 1985 *Infrared Phys.* **25** 395
- [ 14 ] Ozen G , Aydinli A , Cerk S and Semaroglu A 2003 *Journal of Luminescence* **101** 293
- [ 15 ] Judd B R 1962 *Phys. Rev.* **127** 750
- [ 16 ] Ofelt G S 1962 *J. Chem. Phys.* **37** 511
- [ 17 ] Tanabe S et al 1993 *Physical Review B* **47** 2507
- [ 18 ] Reisfield R , Jorgensen C K , in : K. A. Gschneidner Jr. , L Eyring ( Eds ) 1987 *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* , Vol. **9** , Ch. 58 , Elsevier , Amsterdam
- [ 19 ] Tanabe S 1999 *J. Non-Cryst. Solids* **259** 1
- [ 20 ] Tanabe S 1993 *J. Appl. Phys* **73** 8451
- [ 21 ] Reisfield R and Boehm L 1977 *Chemical Physics Letters* **49** 49
- [ 22 ] Tanabe S , Tamai K , Hirao K et al 1996 *Physical Review B* **53** 8358
- [ 23 ] Komukai T and Yamamoto T 1992 *Electron Lett.* **28** 830
- [ 24 ] Roy F , Bayart D and Baniel P 2002 OFC '00 [ C. J. ] WA6
- [ 25 ] Jha A , Shen S and Naftaly M 2000 *Phys. Rev. B* **62** 6215
- [ 26 ] Martin I R , Rodriguez V D , Alcalá R and Lases R 1993 *J. Non-Cryst. Solids* **161** 294

# Effect of $\text{Tm}^{3+}$ -doping concentration on the spectral properties in tellurite glass<sup>\*</sup>

Chen He<sup>†</sup> Liu Yue-Hui Yao Xiao-Xu Feng Zhou-Ming

( *Key Laboratory of Specially Functional Materials and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, China ;  
and Institute of Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China* )

( Received 10 December 2004 ; revised manuscript received 21 January 2005 )

## Abstract

The tellurite glass  $70\text{TeO}_2\text{-}20\text{WO}_3\text{-}10\text{ZnO}$  in different  $\text{Tm}^{3+}$ -doping concentration were prepared. According to the absorption spectra, the Judd-Oflet strength parameters were calculated by using Judd-Ofelt theory. The spontaneous-emission probabilities, branch ratios and radiative lifetime of each level of  $\text{Tm}^{3+}$  were given. The emission spectra of  $\text{Tm}^{3+}$ -doping in various concentrations were studied. The effective bandwidth and stimulated emission cross-section at the peak wavelength of the emission band were also investigated. After comparing the spectral properties at various  $\text{Tm}^{3+}$  concentrations, we concluded that the luminescence intensity and effective bandwidth were maximum when the  $\text{Tm}^{3+}$ -doping concentration ranges from 0.8wt%—1wt%. The  $\text{Tm}^{3+}$ -doped tellurite glass is an ideal host for optical amplifier working on S-band.

**Keywords** : tellurite glass, broad-band amplifier, effective bandwidth, stimulated emission cross-section at peak wavelength

**PACC** : 7855, 4255R, 7840

<sup>\*</sup> Project supported by the Science and Technology Program of Guangzhou, Guangdong Province, China ( Grant No. 20004Z2-D0131 ) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China ( Grant No. 04020036 ).

<sup>†</sup>E-mail : chenhe-1979@yahoo.com.cn