

# Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃的制备及光谱性质

李玮楠, 邹快盛, 陆敏, 相里斌

中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068

**摘要** 采用高温熔融工艺制备了 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃。玻璃的非线性折射率  $n_2$  小(1.62), 转变温度和软化温度低(分别为 540 °C 和 585 °C)。测试了玻璃的吸收光谱和发射光谱, 计算了 Yb<sup>3+</sup> 的积分吸收截面和受激发射截面及荧光寿命。吸收光谱曲线表明: 吸收区域为 850~1100 nm, 主峰位于 975 nm, 次峰位于 908 和 944 nm; 荧光光谱曲线表明: 中心峰值为 1010 nm, 荧光 linewidth 为 65.5 nm。积分吸收截面和受激发射截面及荧光寿命分别为  $3.44 \times 10^4 \text{ pm}^3$ ,  $0.710 \text{ pm}^2$ , 1.05 ms。玻璃的常规性能测试和光谱特性研究表明, 所制备的玻璃材料能够满足激光玻璃的使用要求。

**关键词** Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃; 光谱特性; 受激发射截面; 积分吸收截面

**中图分类号:** TQ 171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)06-0983-04

## 引言

Yb<sup>3+</sup> 离子能级结构简单, 只有基态<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>和激发态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>, 没有激发态吸收(ESA)和多声子吸收。Yb<sup>3+</sup> 掺杂激光玻璃有较宽的吸收光谱(850~1100 nm)和荧光光谱(900~1200 nm), 可作为飞秒超短脉冲激光和可调谐激光的工作物质; 它储量效率高, 荧光寿命长, 在半导体阵列泵浦的高功率激光装置中具有很大的应用潜力。由于掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤具有高效率、能量大、体积小等优点, 已成为固体激光器强有力的竞争者<sup>[1]</sup>。

硅酸盐玻璃是最为常用的玻璃系统, 与硼酸盐和磷酸盐等玻璃体系相比挥发小、玻璃组分稳定。因此硅酸盐体系玻璃具有优良的化学稳定性、热稳定性, 且玻璃容易制备。

本文采用高温熔融工艺制备了 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃, 测试了玻璃的常规物理化学性能和光学性能。作为应用于激光领域的光学材料, 着重研究了玻璃样品的吸收光谱和荧光光谱, 并计算了玻璃的积分吸收截面和受激发射截面及荧光寿命。

## 1 实验

### 1.1 玻璃制备

按配方 65.40SiO<sub>2</sub>/9.46B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/3.48Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/21.66M<sub>x</sub>O<sub>y</sub> (mol%) 配制原料。其中 M<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 表示 Na<sub>2</sub>O, Li<sub>2</sub>O, BaO,

CaO, ZnO, MgO, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等。原料中 SiO<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, Al(OH)<sub>3</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>, Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, ZnO, ZrO<sub>2</sub> 为分析纯, 纯度 > 99.6%, TiO<sub>2</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的纯度 > 99.99%。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可以部分 Al(OH)<sub>3</sub> 的形式引入。

采用高温熔融工艺制备 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃。称取混合均匀的原料 500 g, 将原料逐次加入温度为 1150 °C 铂金坩埚中熔制 2 h; 当由硅碳棒加热的电炉温度升至 1300 °C 时, 搅拌、澄清、均化玻璃液 4 h; 待炉温降温至 1000 °C, 将高温均化好的玻璃液浇注在事先预热的铸铁模具上, 然后置于一定温度的退火炉中进行退火, 最后以 3 °C · min<sup>-1</sup> 降温至室温。经切割、研磨、抛光等工序加工成 10 mm × 10 mm × 5 mm 和 Ø5 × 50 mm<sup>3</sup> 的数块样品, 用于各种性能测试。

### 1.2 性能测试

采用排水法测定玻璃样品的密度; 用 V 棱镜测玻璃的折射率  $n_D$ ,  $n_F$ ,  $n_C$ ; 用德国生产的 Leitz(石英比较法)膨胀仪测定玻璃的线膨胀系数。光谱测试在常温下进行。样品的吸收光谱用 Lambda 900UV/VIS/NIR Spectrometer 测定, Coherent FAP System 980 nm 半导体激光器作为激发源, SD2000 Fiber Optic Spectrometer 测定玻璃荧光光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 玻璃性能

表 1 为玻璃样品的物理化学性能参数。

收稿日期: 2005-02-26, 修订日期: 2005-06-08

基金项目: 陕西省自然科学基金(2003F18)、中国科学院西安光学精密机械研究所所长基金(40401194)资助项目

作者简介: 李玮楠, 女, 1976 年生, 中国科学院西安光学精密机械研究所博士研究生

**Table 1 Physical and chemical properties of Yb<sup>3+</sup> glass**

properties	YB <sup>[2]</sup>	YS
$N_{Yb_2O_3} / (\text{wt}\%)$	13.75	16.79
$N_{Yb^{3+}} / (10^{20} \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3})$	16.8	16.9
Non-linear refractive index coefficient $n_2 / (\times 10^{-13} \text{ esu})$	1.96	1.62
Refractive index at 587.6 nm $n_D$	1.664 9	1.586 4
Refractive index at 486.1 nm $n_F$	1.672 1	1.593 6
Refractive index at 656.3 nm $n_C$	1.660 2	1.583 4
Abbe value $\nu$	58.42	58.7
Coefficient of linear thermal expansion $\alpha / (10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) (20 \sim 100 ^\circ\text{C})$	6.5	6.42
Transformation temperature $T_g / ^\circ\text{C}$	609	540
Soften temperature $T_c / ^\circ\text{C}$	650	585
Density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	3.99	3.25

Note: YB refers to Yb<sup>3+</sup> doped borate glasses, YS refers to Yb<sup>3+</sup> doped silicate glasses

Yb<sup>3+</sup> 浓度计算式为

$$N_0 = \frac{Yb_2O_3 \text{ wt}\% \rho N_A}{M_{Yb_2O_3}} \times 2 \quad (1)$$

wt% 为 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的重量百分比;  $\rho$  为样品的密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $N_A$  为阿佛加德罗常数, 为  $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;  $M_{Yb_2O_3}$  为 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的分子量。非线性折射率  $n_2$  由  $n_D$  和二阶非线性系数  $\gamma$  表示, 为<sup>[2]</sup>

$$n_2 = \frac{c n_D \gamma}{40\pi} \quad (2)$$

$$\gamma (m^2/w) = \frac{2.8 \times 10^{-18} (n_D - 1)(n_D^2 + 2)^2}{n_D \nu [1.52 + (n_D^2 + 2)(n_D + 1)\nu / 6n_D]^{1/2}} \quad (3)$$

非线性折射率  $n_2$  是用于高功率激光装置的激光玻璃的重要参数之一。在强激光光学系统应用中, 激光玻璃的非线性折射率系数大会使光在玻璃中产生集束现象, 引起自聚焦丝状破坏<sup>[3]</sup>。为了避免该现象发生必须减小非线性折射率系数。从表 1 可以看出: 在 Yb<sup>3+</sup> ( $10^{20} \text{ ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 浓度相同的情况下, 与 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硼酸盐玻璃相比, Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃的非线性折射率  $n_2$  更小。此外, Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃有较低的转变温度和软化温度, 这使得玻璃容易制备, 且可避免玻璃析晶, 利于后期将玻璃制作成光纤。

## 2.2 吸收光谱

图 1 为 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃的吸收曲线。在 850 ~ 1 100 nm 的吸收区域中, 吸收主峰位于 975 nm, 吸收次峰位于 908 nm, 在 925 ~ 960 nm 范围有一较为弥散的吸收次峰。在周围离子作用下, Yb<sup>3+</sup> 的激发态  $^2F_{5/2}$  能级分裂成三个 Stark 子能级, 基态  $^2F_{7/2}$  能级分裂成四个 Stark 子能级<sup>[4]</sup>。能级 Stark 分裂的大小主要取决于晶体场的强弱<sup>[5]</sup>。图 2 所示为 Yb<sup>3+</sup> 在玻璃基质中的能级分裂情况。975 nm 的吸收峰对应于 Yb<sup>3+</sup> 能级图中 Stark 能级  $a \rightarrow d$  的跃迁, 即基态  $^2F_{7/2}$  和激发态  $^2F_{5/2}$  两能级的最低 Stark 能态之间的跃迁。Stark 能级  $e$  对应吸收曲线中 908 nm 处的吸收峰。在 Yb<sup>3+</sup> 掺杂激光玻璃的吸收光谱中, 都会出现 974 nm 附近的吸收主峰, 次峰位置是受周围离子作用引起的非均匀展宽和电子振动决定<sup>[6]</sup>。在 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硼酸盐玻璃的吸收光谱中, 就只有两个吸

收峰: 主峰位于 974 nm, 弥散的吸收次峰位于 920 ~ 940 nm, 而没有 908 nm 的吸收次峰。因为激光玻璃的吸收光谱形状是由玻璃形成体和其组分决定的<sup>[7]</sup>。根据文献<sup>[8]</sup>可知, 铝氧四面体 [AlO<sub>4</sub>] 比硼氧四面体 [BO<sub>4</sub>] 稳定; 在“游离氧”不足的情况下, Al<sup>3+</sup> 优先 B<sup>3+</sup> 组成四面体进入网络结构; 当玻璃中存在离子电场强度比较高的氧化物如: Li<sub>2</sub>O, CaO, ZnO, MgO, ZrO<sub>2</sub> (场强分别为 1.65, 1.67, 3.3, 3.3, 4.5) 等时, B<sup>3+</sup> 较难形成四面体 [BO<sub>4</sub>] 进入网络结构。依据文献<sup>[8]</sup>计算可知, 在 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃中, 大部分 B<sup>3+</sup> 的配位数为 3, 仅有小部分 B<sup>3+</sup> 形成了 [BO<sub>4</sub>] 四面体。由于 [BO<sub>4</sub>] 带有负电, 其周围必须围绕若干阳离子以达到电性中和, 使结构趋向稳定; 然而阳离子间的相互斥力使得四面体间不能直接相连, [BO<sub>4</sub>] 间必须有一定数量的不带电的硼氧三角体 [BO<sub>3</sub>] 加以隔离。干福熹<sup>[8]</sup>认为隔离四面体 [BO<sub>4</sub>] 所需要的三角体 [BO<sub>3</sub>] 的数目是可变的, 其值取决于空隙中阳离子的半径和所带电荷。在 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃中, 处于网络外体的间隙离子较多, 如 Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Zr<sup>4+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, La<sup>3+</sup> 等。众多因素造成三角体 [BO<sub>3</sub>] 间隔数是变化的, 从而增加了 Yb<sup>3+</sup> 周围环境的不对称度, 且周围 [ZnO<sub>6</sub>] 八面体、[MgO<sub>6</sub>] 八面体、[TiO<sub>6</sub>] 八面体又增加了 [YbO<sub>6</sub>] 八面体中 O<sup>2-</sup> 的极化率, 进一步提高了 [YbO<sub>6</sub>] 八面体的不对称性。在晶体场不对称度较高情况下, 造成 Yb<sup>3+</sup> 能级 Stark 分裂完全, 即出现了 7 个 Stark 子能级。

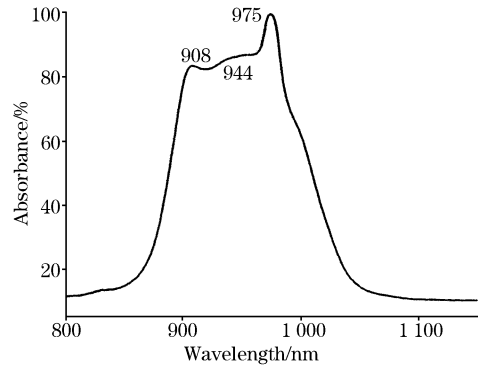


Fig. 1 Absorption spectrum of Yb<sup>3+</sup> in glass

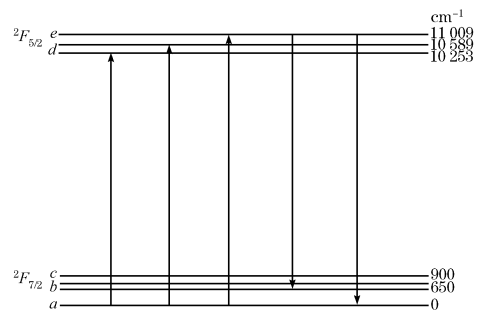


Fig. 2 Simplified energy level diagram of Yb<sup>3+</sup>

## 2.3 Yb<sup>3+</sup> 玻璃荧光光谱

图 3 是测试玻璃荧光光谱的装置。图中 DM 为二向色镜 ( $T > 95\% @ 970 \sim 980 \text{ nm}$ ,  $R > 99\% @ 1 040 \sim 1 075 \text{ nm}$ )。

图 4 为玻璃的荧光光谱。图 4 中 974 nm 处荧光强度的大幅降低就是由于二向色镜的原因。

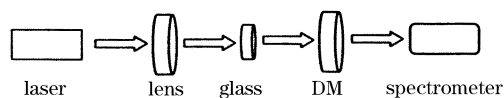


Fig. 3 Setup of fluorescence spectrum

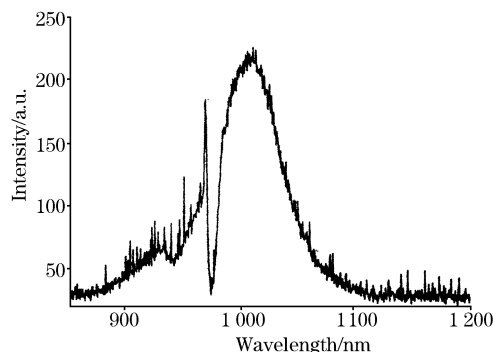


Fig. 4 Fluorescence spectrum of Yb<sup>3+</sup> in glass

由于高浓度掺杂时, Yb<sup>3+</sup> 存在的自吸收会对光谱强度产生影响, 结果造成荧光强度降低, 荧光峰位向长波方向略有移动。正如图 4 所示, 荧光区域在 950~1 100 nm, 中心峰位于 1 010 nm, 荧光线宽为 65.5 nm。由下式

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{2.303 \log(I_0/I)}{Nl} \quad (4)$$

可得 Yb<sup>3+</sup> 吸收截面。其中  $I_0$  为入射光强度,  $I$  为透射光强度,  $N$  为掺 Yb<sup>3+</sup> 浓度 ( $\text{ion} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $l$  为样品厚度 (cm)。已有研究表明掺 Yb<sup>3+</sup> 玻璃受激发射截面主要取决于积分吸收截面<sup>[7]</sup>。玻璃的积分吸收截面越大, 相应的受激发射截面就越大。积分吸收截面的定义如下<sup>[7]</sup>:

$$\Sigma_{\text{abs}} = \int \sigma_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda = \int \frac{2.303 \log(I_0/I)}{Nl} d\lambda \quad (5)$$

对于具有简单二能级的 Yb<sup>3+</sup> 来说, 常用的 Judd-Oflet 理论不能用来计算其受激发射截面的。Weber 法<sup>[6]</sup>是根据测定的吸收光谱和荧光光谱来计算受激发射截面。受激发射截面由 Fuchtbauer-Ladenburg 公式<sup>[6]</sup>表示为

$$\sigma_p = 4\Sigma_{\text{abs}}/3\Delta\lambda_{\text{eff}} \quad (6)$$

式中  $\Delta\lambda_{\text{eff}}$  为荧光有效线宽。宽的荧光峰处的发射截面  $\sigma_s$  (也称为有效发射截面) 在 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃中出现在 1 010 nm 附近。它与  $\sigma_p$  的关系可由下式得到

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_p} = \left(\frac{n_p}{n_s}\right)^2 \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_p}\right)^5 \left[\frac{(dI/d\lambda)_s}{(dI/d\lambda)_p}\right] \quad (7)$$

这里  $n_p$ ,  $n_s$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_s$  分别为主、次峰的折射率和波长。由 Cauchy 色散公式<sup>[7]</sup>可算出

$$n(\lambda) = a + b/\lambda^2 \quad (8)$$

及  $n_p$ ,  $n_s$ 。式中  $a$  和  $b$  为系数。

倒易法 (Reciprocity method)<sup>[6]</sup> 是利用玻璃吸收光谱来计算受激发射截面的, 与荧光光谱的测试无关。计算公式可表示为<sup>[6]</sup>

$$\sigma_{\text{emi}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda)(Z_l/Z_u) \cdot \exp[(\Delta E - hc\lambda^{-1})/KT] \quad (9)$$

其中  $Z_l/Z_u$  为配分函数, 对玻璃来说近似为 1.0,  $\Delta E$  为零线能量, 即激发态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 和基态<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 两能级的最低 Stark 能态能量差。Yb<sup>3+</sup> 激发态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 的荧光寿命可由自发辐射概率  $A$  表示为

$$A = \frac{32\pi c}{3\lambda^4} n^2 \Sigma_{\text{abs}} \quad \text{和} \quad \tau = \frac{1}{A} \quad (10)$$

$\bar{\lambda}$  为吸收带平均波长,  $n$  是对应  $\bar{\lambda}$  的折射率, 可由 (8) 式算出。

激光玻璃的增益大小与  $\sigma_p \times \tau$  与相关, 一般可以用  $\sigma_p \times \tau$  来评价激光玻璃增益性能。表 2 为 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃的激光性能。从表中可以看出, Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃具有较大的受激发射截面、较长的荧光寿命和较宽的荧光线宽。在氧化物玻璃中, 积分吸收截面  $\Sigma_{\text{abs}}$  主要取决于 Yb<sup>3+</sup> 周围结构的不对称性<sup>[7]</sup>。周围的高价离子 Zr<sup>4+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, La<sup>3+</sup> 和众多多面体, 如: [BO<sub>4</sub>]四面体、数目变化的[BO<sub>3</sub>]三角体、[ZnO<sub>6</sub>]八面体、[MgO<sub>6</sub>]八面体、[TiO<sub>6</sub>]八面体, 一起增加了[YbO<sub>6</sub>]八面体中 O<sup>2-</sup> 的极化率, 提高了[YbO<sub>6</sub>]八面体的不对称性, 从而增大  $\Sigma_{\text{abs}}$  和受激发射截面。Yb<sup>3+</sup> 掺杂硼酸盐玻璃  $\sigma_p \times \tau$  为 0.45, 而 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃  $\sigma_p \times \tau$  为 0.885, 几乎是前者的 2 倍, 所以 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃的激光性能优于 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硼酸盐玻璃。

Table 2 Optical properties of Yb<sup>3+</sup> glass

Properties	YB <sup>[2]</sup>	YS
The integrated absorption cross section $\Sigma_{\text{abs}}/(\times 10^4 \text{ pm}^3)$	3.96	3.44
The stimulated emission cross section $\sigma_s/(\text{pm}^2)$	0.53	0.843
The spontaneous emission probability $A/\text{s}^{-1}$	1.176	0.952
Fluorescent time $\tau/\text{ms}$	0.85	1.05
$\sigma_p \times \tau$	0.45	0.885
Fluorescent half-line width at 290 K/nm	51.88	65.5

根据公式 (6) 和 (9) 算出的受激发射截面分别为 0.710  $\text{pm}^2$ , 0.644  $\text{pm}^2$ , 说明 Weber 和 Reciprocity method 两种计算方法是存在误差的。由于由 Reciprocity method 确定的受激发射截面仅取决于吸收光谱, 与荧光光谱测试结果无关, 因此与 Weber 提出的计算截面方法相比, 倒易法计算的截面值受实验误差的影响较小, 所以 Reciprocity method 更适合用来计算 Yb<sup>3+</sup> 掺杂激光玻璃的受激发射截面。

### 3 结 论

(1) 采用高温熔融工艺制备了 Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃; 玻璃的非线性折射率  $n_2$  更小 (1.62), 转变温度和软化温度更低 (分别为 540 °C 和 585 °C), 从而具有更好的激光性能和可加工特性, 所以制备的玻璃材料能够满足激光玻璃的使用要求。

(2) 多种玻璃网络形成体 ([SiO<sub>4</sub>], [AlO<sub>4</sub>], [BO<sub>4</sub>], [BO<sub>3</sub>]) 和网络外体高价离子的共同作用, 提高了 [YbO<sub>6</sub>] 八面体的不对称性, 增加 Yb<sup>3+</sup> 的吸收强度和积分吸收截面及其受激发射截面。从而使制备的玻璃材料的吸收光谱特性

为: 吸收区域为 850~1 100 nm, 主峰位于 975 nm, 次峰位于 908 和 944 nm; 荧光光谱特性为: 中心峰值为 1 010 nm, 荧光线宽为 65.5 nm。

(3) 通过计算, 积分吸收截面和受激发射截面及荧光寿

命分别为  $3.44 \times 10^4 \text{ pm}^3$ ,  $0.710 \text{ pm}^2$ ,  $1.05 \text{ ms}$ 。Reciprocity Method 更适合用来计算  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂激光玻璃的受激发射截面。激光玻璃增益性能  $\sigma_p \times \tau$  为 0.885。

### 参 考 文 献

- [1] Muendel M. SPIE, 1998, 3264: 21.
- [2] YIN Hong-bing, DENG Pei-zhen, et al(尹红兵, 邓佩珍, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 1997, 17(2): 227.
- [3] DAI Shi-xun, HU Li-li, JIANG Zhong-hong, et al(戴世勋, 胡丽丽, 姜中宏, 等). Chinese Journal of Laser(中国激光), 2002, 29(1): 1.
- [4] Yeh D C, Sibley W A. J. Non-Cryst. Solids, 1998, 88(1): 66.
- [5] YANG Jian-hu, DAI Shi-xun, DAI Neng-li, et al(杨建虎, 戴世勋, 戴能利, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(6): 1065.
- [6] Weber W J, Lynch J E, Blachburn D H, et al. IEEE J. Quant. Electron, 1983, QE-19(10): 1600.
- [7] Takebe H, Murata T, Morinaga K. J. Am. Ceram. Soc., 1996, 79(3): 681.
- [8] GAN Fu-xi(干福熹). Optic Glass II(光学玻璃). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1985. 20.

## The Preparation and Spectroscopic Characteristics of Ytterbium Silicate Glasses

LI Wei-nan, ZOU Kuai-sheng, LU Min, XIANG Li-bin

State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China

**Abstract**  $\text{Yb}^{3+}$ -doped silicate glasses were prepared at high temperature, which had a small non-linear refractive index coefficient  $n_2$  (1.62), lower transformation temperature and lower softening temperature (540 °C and 585 °C, respectively). The absorption spectrum from 850 to 1100 nm showed that the main peak was at 975 nm with two subpeaks near 908 nm and 944 nm, respectively. Emission peak was at 1 010 nm in the fluorescence spectrum with a 65.5 nm fluorescence half-line width. The integrated absorption cross section, stimulated emission cross section and fluorescence time were calculated to be  $3.44 \times 10^4 \text{ pm}^2$ ,  $0.71 \text{ pm}^2$  and  $1.05 \text{ ms}$ , respectively, which satisfy the requirements of laser glasses.

**Keywords**  $\text{Yb}^{3+}$ -doped silicate glasses; Spectroscopic characteristics; Stimulated emission cross section; Integrated absorption cross section

(Received Feb. 26, 2005; accepted Jun. 8, 2005)