

# Tm<sup>3+</sup> 掺杂硅酸镓镧(La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>) 晶体的结构与光学性能研究\*

牛 艺<sup>1)</sup> 王增梅<sup>1)†</sup> 刘英才<sup>1)</sup> 尹衍升<sup>1)</sup> 袁多荣<sup>2)</sup>

1) 中国海洋大学材料科学与工程研究院, 青岛 266100)

2) 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

(2006 年 9 月 27 日收到, 2006 年 10 月 26 日收到修改稿)

利用 X 射线粉末衍射确定了 Tm<sup>3+</sup> 掺杂硅酸镓镧(La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>, LGS)晶体的晶体结构, 运用 DICVOL91 程序计算了该晶体不同部位的晶胞参数, 测定了 Tm<sup>3+</sup> LGS 晶体的室温吸收谱和 470 nm 光激发下的发射光谱, 根据 Judd-Ofelt 理论拟合了 Tm<sup>3+</sup> 的三个晶场调节参数  $\Omega_t$  ( $t = 2, 4, 6$ ), 分别为  $2.694 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $1.842 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $0.030 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 计算了各个能级跃迁的谱线强度、振子强度、吸收截面等, 进而计算了<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 和<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 态的自发跃迁概率、辐射寿命、荧光分支比和积分发射截面, 并对结果进行了分析.

关键词: Tm<sup>3+</sup> LGS 晶体, 吸收谱, Judd-Ofelt 理论, 光谱参数

PACC: 7855C, 4255R, 7840E, 6110M

## 1. 引 言

上世纪 60 年代激光器的出现, 开创了光学领域的崭新局面, 促进了光电技术的进程和发展. 激光技术是光电子技术的核心组成部分, 而激光晶体是激光器的工作物质. 目前 90% 左右的激光晶体是掺入稀土作为激活离子. 近年来, 掺杂稀土离子铥离子(Tm<sup>3+</sup>)的激光晶体越来越多的受到人们的关注. 作为激活离子, Tm<sup>3+</sup> 可以在紫外到红外多个波段产生不同能级之间的跃迁<sup>[1]</sup>. 在 450 nm 附近, Tm<sup>3+</sup> 可以产生从<sup>1</sup>D<sub>2</sub> 到<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 的上转换, 使它成为产生蓝光和蓝色激光的重要选择<sup>[2-4]</sup>. 由于离子之间存在交叉弛豫效应, Tm<sup>3+</sup> 可以在近红外波段产生有效的激光输出<sup>[5, 6]</sup>. 对应于<sup>3</sup>H<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> 跃迁, 它发射波长为 1.9 μm 左右的荧光, 可以适用于红外雷达和远距离红外传感器, 同时在激光医疗上也有着重要的应用<sup>[7]</sup>. 特别引人关注的是 Tm<sup>3+</sup> 在 800 nm 附近的对应<sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 的跃迁适用于商用激光二极管的抽运<sup>[8-11]</sup>.

LGS 晶体是一种性能优良的新型压电晶体, 同时具有良好的物理性能, 例如良好的热稳定性, 高的

透过率, 小的膨胀系数, 大的比热等<sup>[12, 13]</sup>, 是制作高稳定、高频、大带宽、低插损、小体积 SAW 滤波器的理想材料. 同时, 也是制作高稳定、大带宽、低插损 SAW 中长延迟线的理想材料. 在 BAW 领域, 采用 LGS 晶体可以做成高稳定、大带宽、低插损、小体积滤波器, 在 VCXO 及 TCXO 的应用上也具有很大应用潜力<sup>[12, 13]</sup>. 因此, Tm<sup>3+</sup> 掺杂 LGS 有可能成为一种性能优良的激光晶体, 实现红光及红外光的输出.

Young 等<sup>[14]</sup>用 Czochralski 提拉技术对 Tm<sup>3+</sup> LGS 晶体进行了生长, 得到了长达 149.22 mm 的晶体, 并对晶体进行了紫外可见红外吸收光谱的测试, 以此分析了其光学性能, 但对其可能的激光性能未作进一步研究. 对掺入激光晶体的稀土离子, 两个能级之间的跃迁概率、发射截面、辐射寿命、荧光强度、荧光分支比等等, 这些标志强度的参数对于激光发射来说都是十分重要的光谱参数, 但是它们的实验测定不太容易. 目前, Judd-Ofelt 理论(J-O 理论)<sup>[15, 16]</sup>是研究稀土离子在固体中的光谱性质的重要理论, 尤其在激光晶体的光谱研究中被广泛使用. 为了探索 Tm<sup>3+</sup> LGS 晶体的激光性能, 本文测量了 Tm<sup>3+</sup> LGS 晶体不同部位的 XRD 谱, 运用 DICVOL91 程序计算了晶

\* 国家自然科学基金(批准号 50242008)和“长江学者奖励计划”资助的课题.

† E-mail: zmwang@ouc.edu.cn

体的晶胞参数,测量了  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体紫外—可见—红外吸收光谱和 470 nm 光激发下的荧光光谱,根据 J-O 理论计算了晶体的光谱参数,并对结果作了分析,从而预测了  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体的激光性能。

## 2. 实 验

实验中我们采用的  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体由山东大学晶体材料国家重点实验室提供,该晶体采用提拉法生长<sup>[12]</sup> 均匀透明,无宏观缺陷, $\text{Tm}^{3+}$  离子掺杂的原子百分比浓度为 1%。将晶体垂直于  $c$  轴切割,厚度为 10.72 mm,然后进行光学抛光。

我们用 X 射线粉末衍射对  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体结构进行了鉴定。沿着晶体生长的方向(从晶体尖部开始),依次从长度百分比为 30%、63.3%、86.2% 和 100% 的不同部位取样,分别编号为 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup>,进行 X 射线粉末衍射测试。X 射线粉末衍射数据是用德国 Bruck 公司生产的 D8-Advanced 型号衍射仪收集,该衍射仪使用镍滤波的铜靶和石墨电极(28 kV);衍射峰的强度在  $10^\circ$ — $70^\circ(2\theta)$  之间收集,扫描速度为  $8^\circ/\text{min}$ 。

光谱测试在常温下进行,采用 UV/Vis/NIR Hitachi U-3500 分光光度计,缝宽 4 nm,扫描速度为 120 nm/min,扫描间隔 1 nm,入射光沿晶体的  $c$  方向,测量了晶体的紫外—可见—近红外  $\sigma$ -偏振吸收光谱,波长范围从 200 nm 到 3200 nm。采用 HORIBA JOBIN YVON 公司生产的 Fluorolog 3-P 型号的荧光光谱仪,以 470 nm 波长的光激发,测定了  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体 600 nm—900 nm 波段的荧光光谱以及 786 nm 荧光峰的荧光寿命。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. X 射线衍射谱及晶体晶胞参数计算

图 1 为不同部位的晶体 X 射线粉末衍射谱。根据粉末衍射图中的  $2\theta$  值,利用 DICVOL91 程序计算六方晶胞参数,对其峰值进行了指标化,各样品的晶胞参数  $a$ 、 $c$  值如表 1。

为了探讨在晶体生长方向的结构变化情况,对四种样品的晶格参数进行作图比较(图 2),可以看出晶格参数  $a$  值与  $c$  值都变化较小,这表明沿着晶体生长的方向,晶体结构没有改变,生长的晶体结构

均匀。这说明 LGS 晶体对  $\text{Tm}^{3+}$  的接纳性较好。作为激光晶体,必须具有较高的完整性,良好的光学性质,而结构的均匀对于晶体具有这些性能是十分重要的。

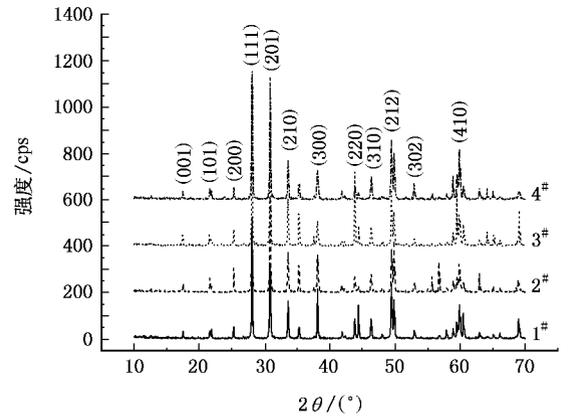


图 1 不同长度百分比部分  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体 XRD 谱

表 1  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体晶胞参数

晶体长度百分比/%	30	63.3	86.2	100
$a/\text{Å}$	8.14617	8.14773	8.15024	8.14307
$c/\text{Å}$	5.07701	5.07880	5.08321	5.08620

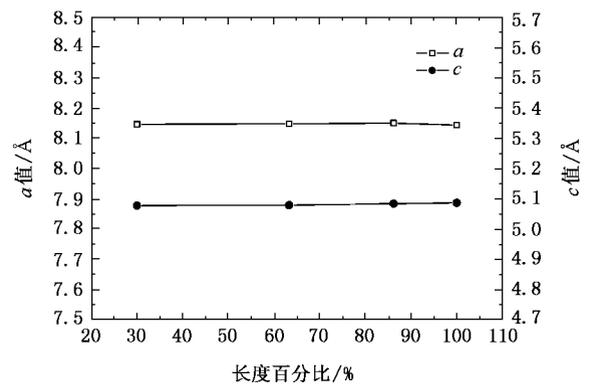


图 2  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体晶胞参数  $a$ 、 $c$  值随长度百分比位置不同的变化

### 3.2. 吸收光谱以及光谱参数的计算

图 3 是  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体室温下的吸收光谱,图中还标注了相对应的能级跃迁。图 3 表明, $\text{Tm}^{3+}$  离子在  $\text{Tm}^{3+}:\text{LGS}$  晶体中有 5 个主要吸收谱带,分别对应  $\text{Tm}^{3+}$  离子中的 4f 壳层电子吸收能量后从基态  $^3\text{H}_6$  态向不同激发态的跃迁。其中 461 nm 对应于  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^1\text{G}_4$  的跃迁,682 nm 对应于  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_3$  的跃迁,790 nm 对应于  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$  的跃迁,1211 nm 对应于  $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$  的跃迁,

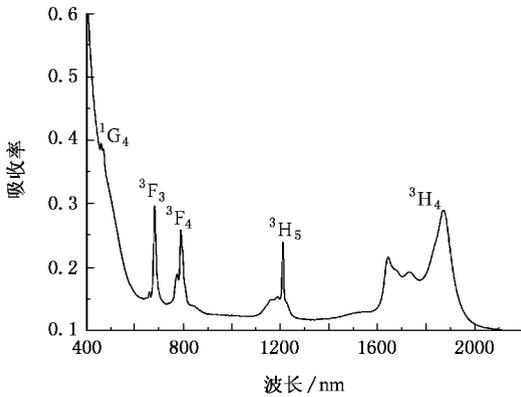


图3 Tm:LiGS 晶体室温下吸收光谱

1873 nm 对应于  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$  的跃迁. 由于是在室温下记录, 各峰的精细结构不易分辨, 因此取各吸收峰的重心波长标示为相应能级的位置. 激光晶体的吸收过程也就是激光晶体被抽运的过程.  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  之间的跃迁是值得注意的, 因为该吸收峰位置与 808 nm 接近, 这个波长同已经商业化的 LD 激光的输出波长相匹配, 有利于对激光晶体进行抽运.

Judd 和 Ofelt 由静态晶场引起相反宇称的组态混杂出发, 推导了跃迁概率表达式, 并提出了用拟合吸收光谱获得晶体场调节参数  $\Omega_i$  的方法. 目前 J-O 模型是能够在一定精度内定量计算稀土离子发光强度的重要理论方法之一<sup>[15,16]</sup>. 以下是 J-O 理论的常用公式<sup>[17]</sup> (采用  $\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$  制).

$$\int K(\lambda) d\lambda = N_0 \frac{8\pi^3 e^2 \bar{\lambda} (n^2 + 2)^2}{3hc} \frac{1}{(2J+1)} S_{\text{exp}}(J \rightarrow J'), \quad (1)$$

$$S_{JJ'}^{\text{el}} = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t | \langle S, L, J | U^{(t)} | \langle S', L', J' \rangle |^2, \quad (2)$$

$$A_{JJ'} = \frac{64\pi^4 e^2}{3h\lambda^3} \frac{n(n+2)^2}{9} \frac{1}{(2J+1)} S_{JJ'}, \quad (3)$$

$$f_{\text{el}} = \frac{8\pi^2 mc}{3h\lambda(2J+1)} \cdot \frac{(n^2 + 2)^2}{9n} \cdot S_{JJ'}, \quad (4)$$

$$\int \alpha(\nu) d\nu = \frac{\pi e^2}{mc^2} f_{\text{el}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{D(\lambda)}{N_0 Z l g_e}, \quad (6)$$

$$A(J'' \rightarrow J') = \frac{64\pi^4 e^2}{3h\lambda^3} \frac{n(n+2)^2}{9} \times \frac{1}{(2J''+1)} S(J'' \rightarrow J'), \quad (7)$$

$$\beta_{JJ'} = \frac{A(J'' \rightarrow J')}{\sum_J (A_{J'' \rightarrow J'})}, \quad (8)$$

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{\sum_J A(J'' \rightarrow J')}, \quad (9)$$

$$\sum (J'' \rightarrow J') = \frac{\lambda^2}{8\pi n^2 c} A_{J, J'}, \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\tau_f}{\tau_\gamma}. \quad (11)$$

式中  $N_0$  为掺杂离子浓度;  $Z$  为样品厚度;  $\bar{\lambda}$  为跃迁谱线中心波长;  $n$  为折射率 ( $J \rightarrow J'$ ) 和 ( $J'' \rightarrow J'$ ) 分别代表从基态向较高能级的跃迁和从激发态向较低能级的跃迁;  $S(J \rightarrow J')$  和  $S(J'' \rightarrow J')$  分别为从基态跃迁的吸收光谱和从激发态跃迁的发射光谱的谱线强度;  $D(\lambda)$  为吸收率;  $\tau_{\text{rad}}$  为辐射寿命;  $\beta_{JJ'}$  为荧光分支比;  $\Omega_i (i = 2, 4, 6)$  为唯象强度参数;  $|\langle S, L, J | U^{(t)} | \langle S', L', J' \rangle|^2$  为只和激活离子有关的约化矩阵元;  $\int K(\lambda) d\lambda$  为  $\text{Tm}^{3+}$  在  $4f^n$  电子组态内电偶极子跃迁有关的积分吸收系数;  $\sum_J A(J'' \rightarrow J')$  为总辐射跃迁概率;  $\int \alpha(\nu) d\nu$  积分吸收截面;  $\sum (J'' \rightarrow J')$  为积分发射截面;  $e$  为电子电量;  $h, c$  分别为普朗克常数和光速. 利用(1)至(6)式, 可以算出 Tm:LiGS 晶体各能级的主要吸收光谱参数: 吸收谱线强度实验值  $S_{\text{exp}}(J \rightarrow J')$ , 积分吸收截面积  $\int \alpha(\nu) d\nu$ , 其结果列于表 2. 由吸收谱线强度实验值以及(2)式, 用最小二乘法拟合得到三个晶场调节参数  $\Omega_i (i = 2, 4, 6)$  的值分别为

$$\Omega_2 = 2.694 \times 10^{-20} \text{ cm}^2,$$

$$\Omega_4 = 1.842 \times 10^{-20} \text{ cm}^2,$$

$$\Omega_6 = 0.030 \times 10^{-20} \text{ cm}^2,$$

其均方根误差为  $4.43 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ , 误差较小, 线性回归系数  $R$  为 0.997, 与 1 十分接近. 这说明我们的拟合是相当精确的, 以下对各个光谱参数的计算值有效. 由晶场调节参数可以计算出吸收谱线强度的理论值  $S_{\text{cal}}(J \rightarrow J')$  (见表 2). 由于磁偶极子跃迁对谱线强度贡献不大, 与电场相比较要弱近一个数量级, 所以我们在计算时将其忽略不计. 由计算结果可以看出, Tm:LiGS 晶体在 790 nm 处的积分吸收截面为  $98.053 \times 10^{-18} \text{ cm}$ , 有可能实现商用激光二极管的抽运.

表 2  $\text{Tm}:\text{LGS}$  晶体的吸收光谱参数

$4f^n\Psi J'$	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$n$	$S_{\text{exp}}(J \rightarrow J')/10^{-20} \text{ cm}^2$	$S_{\text{cal}}(J \rightarrow J')/10^{-20} \text{ cm}^2$	$\int \sigma(\nu) d\nu / 10^{-18} \text{ cm}$
$^1\text{G}_4$	461	1.927	0.128	0.268	52.553
$^3\text{F}_3$	682	1.896	0.597	0.608	80.505
$^3\text{F}_4$	790	1.890	0.835	0.858	98.053
$^3\text{H}_5$	1221	1.878	0.656	0.735	54.784
$^3\text{H}_4$	1873	1.869	2.772	2.793	134.644

表 3 由  $^3\text{H}_4, ^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_J$  跃迁的发光参数

能级跃迁	发射波长/nm	$S_{\text{cal}}(J \rightarrow J')/10^{-20} \text{ cm}^2$	$A(J'' \rightarrow J')/\text{s}^{-1}$	$\tau_{\text{rad}}/\text{ms}$	$\beta_{JJ'}/\%$	$\sum (J'' \rightarrow J')/10^{18} \text{ cm}$
$^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$	1721	2.749	272.2	3.674	100	3.059
$^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$	2314	0.914	36.66		3.290	0.751
$^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$	1447	0.599	100.45	0.897	9.014	0.795
$^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$	786	0.906	977.3		87.696	2.244

得到了晶场调节参数,根据(7)–(11)式可以求出我们感兴趣的发射光谱参数:发射谱线强度理论值  $S_{\text{cal}}(J'' \rightarrow J')$ ,跃迁概率  $A(J'' \rightarrow J')$ ,辐射寿命  $\tau_{\text{rad}}$ ,荧光分支比  $\beta_{JJ'}$ ,积分发射截面  $\sum (J'' \rightarrow J')$ . 计算中同样忽略了磁偶极子跃迁. 结果见表 3. 由表 3 可以看出,786 nm 与 1721 nm 处的积分发射截面分别为  $3.059 \times 10^{-18} \text{ cm}$  和  $2.244 \times 10^{-18} \text{ cm}$ ,都大于

$10^{-18} \text{ cm}$ ,荧光分支比很高,有望实现红光和红外光的输出<sup>[18]</sup>. 我们把其他几种目前已经发展较为成熟的和研究较多的  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂的晶体(玻璃)材料在  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁中的积分发射截面<sup>[19–22]</sup>与本文的计算结果进行了对比(表 4),发现我们的  $\text{Tm}:\text{LGS}$  晶体样品在  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  状态跃迁中积分发射截面与其他数据比较接近,有可能成为一种性能优良的激光材料.

表 4 不同基质中  $\text{Tm}$  离子  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁的积分发射截面比较

晶体(玻璃)	荧光波长/nm	积分发射截面/ $10^{-18} \text{ cm}$	参考文献
$\text{Tm}:\text{LGS}$	1721	3.059	本文
$\text{Tm}:\text{YAG}$	–	1.44	[19]
$\text{Tm}:\text{YAlO}_3$	–	2.43	[19]
$\text{Tm}:\text{ZBLA}$	–	2.96	[19]
$\text{Tm}:\text{YVO}_4$	1764	5.03	[19]
$\text{Na}_5\text{Tm}(\text{WO}_4)_4$	1709	3.22	[20]
$\text{Tm}:\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ 玻璃	1691	3.23	[21]
$\text{Tm}:\text{Li}_2\text{O}-\text{CdO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 玻璃	–	2.94	[22]

### 3.3. 发射光谱的计算分析

图 4 和图 5 分别为  $\text{Tm}:\text{LGS}$  晶体用 470 nm 光激发下 600 nm—900 nm 波段的发射光谱(图 4)以及 786 nm 荧光峰的荧光寿命(图 5).

图 4 可以看出,用波长为 470 nm 的光激发  $\text{Tm}:\text{LGS}$  晶体,在 600—900 nm 波段得到两个波长分别为 650 nm,786 nm 的较强的荧光峰,分别对应的是  $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4, ^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁. 此外,我们对  $\text{Tm}:\text{LGS}$  晶体在

波长 786 nm 处的荧光寿命测量结果进行拟合(如图 5),得到荧光寿命为 0.348 ms. 从而计算出对应 786 nm 处的  $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁的辐射量子效率为 38.782%,这对于实现 786 nm 的红光输出是有利的.

## 4. 结 论

本文通过对  $\text{Tm}:\text{LGS}$  晶体的结构和光学性质进行测试和计算,得出了以下结论:

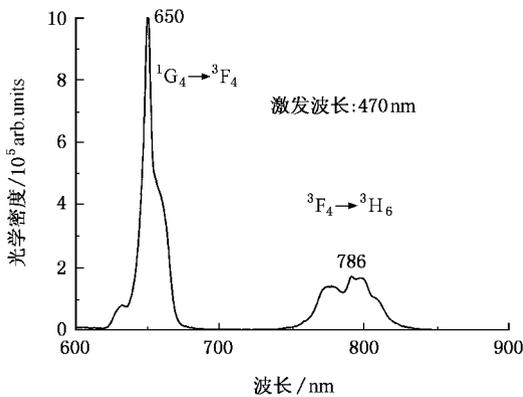


图4 Tm:LSG 晶体在 600 nm 到 900 nm 波段的荧光谱(激发波长 470 nm)

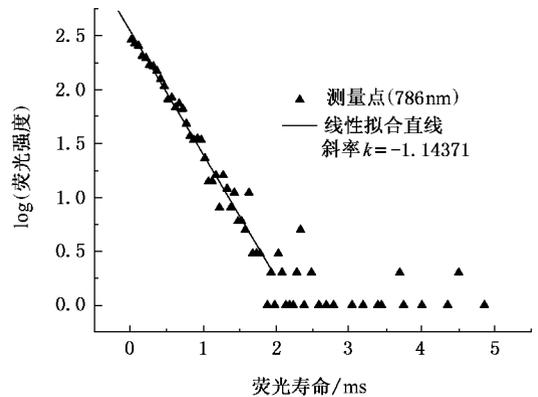


图5 Tm:LSG 晶体在 786 nm 处的荧光寿命

1. 测量了 Tm:LSG 晶体不同长度百分比位置的 XRD 谱,运用 DICVOL91 程序计算 Tm:LSG 晶体不同位置的晶胞参数,证明了该晶体结构均匀。

2. 测量了 Tm:LSG 晶体的室温吸收谱,应用 J-O 理论拟合了三个晶场调节参数  $\Omega_i (i = 2, 4, 6)$ , 计算了晶体一些重要的光谱参数,发现 Tm:LSG 晶体在 800 nm 附近存在较大的吸收,有利于已经商业化的 LD 激光对其进行抽运; $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  的荧光分支比为

87.696% 积分发射截面较大,有望实现 786 nm 的红色激光输出; $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$  积分发射截面也较大,有望实现 1721 nm 的红外激光输出。

3. 对 Tm:LSG 晶体进行了 600 nm 到 900 nm 波段荧光谱的测试,观察到 650 nm 和 786 nm 处强的荧光峰,对 786 nm 处进行了荧光寿命测试,得到该晶体在  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  态的荧光寿命为 0.348 ms,量子效率为 38.782%,有利于红光输出。

[1] Garnier N, Moncorgé R, Manaa H, Descroix E, Laporte P, Guyot Y 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 4323

[2] Chen X B, Zhang G Y, Feng Y, Liu Y B, Li J J, Song Z F 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 698 (in Chinese) [陈晓波、张光寅、冯衍、刘言滨、李加季、宋增福 1996 物理学报 **45** 698]

[3] Hao Z, Chen X B, Hou Y B, Song F, Wang H, Zhang G Y 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1206 (in Chinese) [郝昭、陈晓波、侯延冰、宋峰、王虹、张光寅 1997 物理学报 **46** 1206]

[4] Chen X Y, Luo Z D 1998 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition) **7** 773

[5] Ohta K, Saito H, Obara M 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 3149

[6] Feng Y, Chen X B, Hao Z, Zhang G Y, Song F, Li M X 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 2454 (in Chinese) [冯衍、陈晓波、郝昭、张光寅、宋峰、李美仙 1997 物理学报 **46** 2454]

[7] Qi C H, Hu H F 1998 *Acta Opt. Sin.* **18** 818 (in Chinese) [祁长鸿、胡和方 1998 光学学报 **18** 818]

[8] Ermeneux F S, Goutaudier C, Moncorgé R, Cohen-Adad M T, Bettinelli M, Cavalli E 1997 *Opt Mater* **8** 83

[9] Chen X B, Zhang G Y, Sawanobori N, Feng Y, Li M X, Bi S Z, Nie Y X, Sun Y G 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 948 (in Chinese) [陈晓波、张光寅、Sawanobori N、冯衍、李美仙、毕诗章、聂玉昕、孙寅官 1999 物理学报 **48** 948]

[10] Liu F S, Liu Q L, Liang J K, Luo J, Su J, Zhang Y, Sun B J, Rao G H 2006 *Chinese Physics* **15** 2445

[11] Zhang L, Zhang J J, Hu H F, Lin F Y 2001 *Chinese Physics* **10** 58

[12] Wang Z M 2004 *Doctoral Dissertation* (Shandong University 1—18 (in Chinese) [王增梅 2004 博士学位论文(山东大学)1—18]

[13] Li Z F, Zhang P L, Zhao M L, Wang C L, Zhong W L, Wang Z M, Yuan D R 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 726 (in Chinese) [李正法、张沛霖、赵明磊、王春雷、钟维烈、王增梅、袁多荣 2003 物理学报 **52** 726]

[14] Young S K, Keun H A 2002 *Materials Letters* **57** 28

[15] Judd B R 1962 *Physical Review* **127** 750

[16] Ofelt G S 1962 *The Journal of Chemical Physics* **37** 511

[17] Xia H R, Zheng W Q, Zhang S J, Cheng Z X, Cheng X F, Yang Z H 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5060

[18] Caird J A 1975 *IEEE J. Quantum. Electron.* **11** 874-18

[19] Chen X B, He C J, Chen L, Zhuang J, Song Z F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1371 (in Chinese) [陈晓波、何琛娟、陈鸾、庄建、宋增福 2001 物理学报 **50** 1371]

[20] Yao L Z, Zhang H F 1997 *Journal of the Chinese Rare Earth Society* **15** 6 (in Chinese) [姚连增、张海峰 1997 中国稀土学报 **15** 6]

[21] Ratnakaram Y C, Thirupathi Naidua D, Vijaya Kumar A, Rao J L 2003 *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **64** 2487

[ 22 ] Yuan J H , Zeng X Y , Zhang Z H 2006 *Journal of Optoelectronics · laser* 17 591 ( in Chinese ) [ 袁剑辉、曾晓英、张振华 2006 光电

子·激光 17 591 ]

## Structure and spectroscopic properties of $\text{Tm}^{3+}$ doped langasite ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) crystal <sup>\*</sup>

Niu Yi<sup>1)</sup> Wang Zeng-Mei<sup>1)†</sup> Liu Ying-Cai<sup>1)</sup> Yin Yan-Sheng<sup>1)</sup> Yuan Duo-Rong<sup>2)</sup>

1  $\checkmark$  *Institute of Material Science and Engineering , Ocean University of China , Qingdao 266100 , China )*

2  $\checkmark$  *State Key Lab . of Crystal Materials , Shandong University , Jinan 250100 , China )*

( Received 27 September 2006 ; revised manuscript received 26 October 2006 )

### Abstract

The structure of  $\text{Tm}^{3+}$  -doped langasite(  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  , abbreviated as LGS ) crystal has been measured by XRD. The crystal lattice parameters were calculated with DICVOL91 program. The absorption spectra and emission spectra ( excited under 470 nm ) of  $\text{Tm}^{3+}$ :LGS single crystal was measured at room temperature. And the optical parameters , such as transition-line intensity , oscillator strength and absorption section were calculated by using Judd-Ofelt theory. The three intensity parameters  $\Omega_t$  (  $t = 2, 4, 6$  ) were fitted to be  $2.694 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  ,  $1.842 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  ,  $0.030 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  , respectively. The lifetime , branching ratio and integrated stimulated-emission cross section were obtained and the results were discussed.

**Keywords :**  $\text{Tm}^{3+}$ :LGS crystal , absorption spectra , Judd-Ofelt theory , spectral parameters

**PACC :** 7855C , 4255R , 7840E , 6110M

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 50242008 ) and the Cheung Kong Scholars Programme of China.

† E-mail : zmwang@ouc.edu.cn