

文章编号: 0253-2239(2010)03-0849-05

# Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub>的提拉法晶体生长和光谱特性

张庆礼<sup>1,2</sup> 周文龙<sup>1,2</sup> 刘文鹏<sup>1,2</sup> 丁丽华<sup>1,2</sup> 罗建乔<sup>1,2</sup> 殷绍唐<sup>1,2</sup> 江海河<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)  
(<sup>2</sup> 安徽光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 用提拉法生长了新型激光晶体 Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub>, 测量了它的吸收和光致发光光谱, 计算了它的光谱特性参数。Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub>的吸收半峰全宽(FWHM)为 56 nm, 约为 Yb<sup>3+</sup>:YAG 的 2.4 倍; 吸收峰为 930, 957, 974 nm, 吸收截面分别为  $0.81 \times 10^{-20}$ ,  $0.91 \times 10^{-20}$ ,  $1.2 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>; 光致发光发射主峰为 1016, 1035 nm 的 FWHM 分别为 42, 57 nm, 为 Yb<sup>3+</sup>:YAG 的 4~6 倍, 发射截面约为  $2.29 \times 10^{-20}$ ,  $1.36 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>, 与 Yb<sup>3+</sup>:YAG 相当。它的宽吸收带有利于降低抽运激光二极管(LD)的温度调控依赖, 宽的发射带则有利于实现超短脉冲和可调谐激光输出。结果表明 Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub> 是非常有希望的全固态超短脉冲激光、可调谐激光的工作物质。

**关键词** 光学材料; Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub>; 晶体生长; 吸收光谱; 发光; 折射率

中图分类号 O782+.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0849

## Crystal Growth by Czochralski Method and Spectral Properties of Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub>

Zhang Qingli<sup>1,2</sup> Zhou Wenlong<sup>1,2</sup> Liu Wenpeng<sup>1,2</sup> Ding Lihua<sup>1,2</sup>

Luo Jianqiao<sup>1,2</sup> Yin Shaotang<sup>1,2</sup> Jiang Haihe<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)  
(<sup>2</sup> The Key Laboratory of Photonic Devices and Materials of Anhui, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub> was grown by Czochralski method. Its absorption, photoluminescence spectra were measured, and its spectral property parameters were computed. Full width at half maximum (FWHM) of absorption of Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub> is 56 nm, which is 2.4 times broader than that of Yb<sup>3+</sup>:YAG. Its absorption peaks are at 930, 957 and 974 nm, whose absorption cross sections are  $0.81 \times 10^{-20}$ ,  $0.91 \times 10^{-20}$ , and  $1.2 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>, respectively. The main peak of photoluminescence is at 1016 nm. The FWHM of emission peaking at 1016 and 1035 nm are 42 and 57 nm, which are 4~6 times wider than that of Yb<sup>3+</sup>:YAG, corresponding cross sections are  $2.29 \times 10^{-20}$  and  $1.36 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>, respectively, which are a little higher than or equal to that of Yb<sup>3+</sup>:YAG. Its broad absorption band makes for decreasing the dependence on the temperature control of pump laser diode (LD), and broad emission band makes for realizing laser output of ultra-short pulse and tunable laser. Results indicate that Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub> is a very promising laser medium used in all-solid state ultra-short pulsed and tunable lasers.

**Key words** optical materials; Yb<sup>3+</sup>:GdTaO<sub>4</sub>; crystal growth; absorption spectrum; luminescence; refractive index

## 1 引言

Yb<sup>3+</sup>激光材料是高效紧凑、稳定长寿命的高功率大能量、超短脉冲全固态激光中的重要工作物质。就晶体中的 Yb<sup>3+</sup>而言, 它仅有两个多重态, 避免了上转换、交叉弛豫和激发态吸收等有害过程。它的

量子缺陷小, 有效地减小了抽运过程中产生的废热(即热负荷), 这对于高平均功率固体激光系统中首要解决的介质热效应这一关键问题是非常重要的<sup>[1,2]</sup>; 同时 Yb<sup>3+</sup>的激发态能级寿命在毫秒量级, 因而非常适合作为高功率大能量全固态激光工作物

收稿日期: 2009-08-06; 收到修改稿日期: 2009-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(50772112, 50872135, 90922003)和安徽省优秀青年基金(08040106820)资助课题。

作者简介: 张庆礼(1973-), 男, 博士, 研究员, 从事功能晶体生长及物理方面的研究。E-mail: zql@aiofm.ac.cn

质。 $\text{Yb}^{3+}$ 是所有稀土离子中唯一可全面满足核聚变点火巨型激光对荧光寿命、受激发射截面、提取效率和用半导体激光器(LD)抽运要求的激活离子<sup>[3]</sup>。美国<sup>[4]</sup>、日本<sup>[5]</sup>、法国<sup>[6]</sup>和中国<sup>[7]</sup>目前都正在开展研究,采用的激光介质有 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 和 $\text{Yb}^{3+}:\text{S-FAP}$ 。当前美国的 Mercury 全固态激光器输出能量最高达到了10 Hz,60 J。 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 是当前综合激光性能最为优良的 $\text{Yb}^{3+}$ 激光工作物质,理论计算表明它是100 kW级的激光工作物质<sup>[8]</sup>,4~6 kW的单片 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 全固态薄盘激光器已商品化<sup>[9]</sup>,LD抽运的单棒 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光输出已经达到2.65 kW<sup>[10]</sup>,国内也获得了400 W的 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 激光输出<sup>[11]</sup>,在激光透明陶瓷方面也获得了重要进展<sup>[12]</sup>。另外, $\text{Yb}^{3+}$ 有较宽的吸收带,被认为是用LD直接抽运来产生高平均功率超短脉冲激光最有希望的激活离子<sup>[13]</sup>,产生的超短脉冲激光在超快光谱学、环境监测、超精细材料加工、生物医疗、光钟、计量、全息、高容量和高速光通讯等众多领域有着广泛的应用前景。当前已经用 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 获得了110 fs的超短脉冲激光输出<sup>[11]</sup>,用 $\text{Yb}^{3+}:\text{SYOB}$ 获得了69 fs最短脉冲激光输出<sup>[14]</sup>。一些低对称晶体如 $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{SiO}_5$ 、 $\text{Yb}:\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ 不仅有宽的发射谱带,同时具有高的激光效率<sup>[15~17]</sup>,在超短脉冲全固态激光和可调谐全固态激光中展现出良好的引用前景。

稀土钽酸盐最初因为密度高、发光性能优良作为闪烁体引起了人们的兴趣<sup>[18]</sup>。本文用提拉法生长了 $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 晶体,初步的吸收和发光光谱分析表明它的激光性能和 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 相当,但它具有比 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 更宽的发射和吸收半峰全宽(FWHM),因而,是一种非常有希望的新型全固态可调谐激光和超短脉冲激光工作物质。

## 2 实 验

利用生长 $\text{Tb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 晶体余料补充 $\text{GdTaO}_4$ 多晶料后,按照原子数分数为1% $\text{Yb}:\text{GdTaO}_4$ 的浓度称取 $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,加入铈坩锅作为 $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 晶体生长原料。采用中频感应加热,用西安理工大学生产的SJ78-3提拉单晶炉进行晶体生长。生长气氛为氮气,拉速为2~3 mm/h,转速为每分钟15~20转。生长出晶体尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 52\text{ mm}$ ,如图1所示。生长后缓慢降温至室温,取出后,选取透明无散射部分,切片并抛光为1 mm厚的薄片,作为测试吸收光谱和光致发光的样品。

用 Lambda 900 紫外-可见-红外分光光度计测

量了 $\text{Yb}:\text{GdTaO}_4$ 吸收光谱,用法国 JOBIN YVON FLUOROLOG 3 TAU 荧光光谱仪测量了 $\text{Yb}:\text{GdTaO}_4$ 的光致发光光谱。测量均在室温下进行。

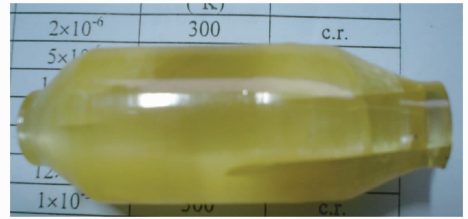


图1 提拉法生长的 $\text{Yb}, \text{Tb}:\text{GdTaO}_4$ 晶体

Fig. 1 Crystal  $\text{Yb}, \text{Tb}:\text{GdTaO}_4$  grown by Czochralski method

## 3 实验结果和讨论

$\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 的吸收光谱如图2所示。由于800~1100 nm波段内没有 $\text{Tb}^{3+}$ 的吸收,所以 $\text{Tb}^{3+}$ 的吸收对 $\text{Yb}^{3+}$ 的吸收没有影响。可以看到,930,957和974 nm的吸收峰都很强,吸截面分别为 $0.81 \times 10^{-20}$ , $0.91 \times 10^{-20}$ 和 $1.2 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$ ,以974 nm的吸收峰最强。为了便于比较,图1也给出了用原子数分数为29.52% $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 测量计算得到的 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 的吸收截面。可以看到, $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 在930 nm处的吸收截面和 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 相当( $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 最强的吸收峰在935.5 nm处为 $8.6 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$ ),但957和974 nm处的吸收截面比 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 的最强的吸收截面大一些,在974 nm处的吸收截面约为 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 最强吸收截面的1.4倍。以957 nm处的吸收截面算起, $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 吸收峰的FWHM约为56 nm,而 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 的FWHM约为23 nm。可见, $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 吸收的FWHM比 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 宽了很多。这对于减少抽运LD的温度调控要求、提高抽运效率

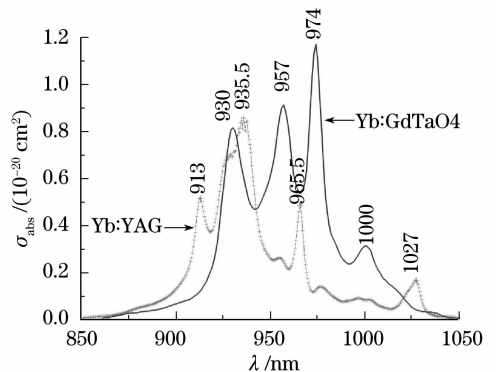


图2  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$ 和 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 的吸收截面  
Fig. 2 Absorption cross section of  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  and  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$

是非常有利的。

按文献[19],可由吸收光谱计算晶体的折射率  $n$ ,计算出  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的折射率后,用塞耳迈耶尔(Sellmeier)方程拟合,可得其折射率的 Sellmeier 方程为

$$n^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} + D\lambda^2, \quad (1)$$

式中  $A = 3.89546$ ,  $B = 531750 \text{ nm}^2$ ,  $C = -304910 \text{ nm}^2$ ,  $D = -0.05039 \times 10^{-6} \text{ nm}^{-2}$ 。

由吸收光谱可计算  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的线强  $S$  和振子强度  $f$  [20]

$$S = 10.41348659 \frac{n^2(2J+1)}{\chi \bar{\lambda} N} \int_{\text{band}} \alpha(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$$f = \frac{4\epsilon_0 mc^2}{Ne^2 \bar{\lambda}^2} \int_{\text{band}} \alpha(\lambda) d\lambda = \frac{1.12958325 \times 10^{14}}{N \bar{\lambda}^2} \int_{\text{band}} \alpha(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

(2) 式中的  $\chi$  为介质修正因子,对电偶极子和磁偶极子跃迁分别为  $n(n^2+2)^2/9$  和  $n^3$ ,  $\epsilon_0$  为介电常数,  $m$  为电子质量,  $c$  为光速,  $e$  为单位电荷,  $N$  掺杂粒子浓度,  $\bar{\lambda}$  为跃迁平均波长。因为多重态  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  的吸收跃迁包含了磁偶极子和电偶极子的跃迁,因而振子强度  $f$  为

$$f = f^{\text{MD}} + f^{\text{ED}}. \quad (4)$$

磁偶极子振子强度  $f^{\text{MD}}$  可直接计算,故由(3)式计算出  $f$  后,由(4)式可计算  $f^{\text{ED}}$ ,从而可计算出电偶极子线强  $S^{\text{ED}}$  和磁偶极子线强  $S^{\text{MD}}$ 。得到  $S$  后,可计算出跃迁几率  $A$

$$A = \chi \frac{16\pi^3 e^2}{3h\epsilon_0(2J+1)\bar{\lambda}^3} S, \quad (5)$$

其中  $h$  为普朗克常数。

对于  ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$  跃迁,可由  $A$  直接计算出  ${}^2F_{5/2}$  的能级寿命  $\tau$  和积分发射截面  $\Sigma$  [21]

$$\tau = 1/A, \quad (6)$$

$$\Sigma = \frac{\bar{\lambda}^2}{8\pi n^2 c} A. \quad (7)$$

计算结果如表 1 所示。

在 940 nm 光激发下,  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的光致发光光谱如图 3 所示。它的发光为一连续的发射宽带,发光主峰为 1016 nm,其余的发射峰由强到弱依次位于 1003, 1035 和 974 nm。其中 974 nm 的发射为零声子线发射。由以上数据,得到  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的晶场能级分裂结构如图 3 所示,即  ${}^2F_{5/2}$  的斯塔克(Stark)能级分裂为 10679, 10624 和

$10327 \text{ cm}^{-1}$ ,  ${}^2F_{7/2}$  的 Stark 能级分裂为 785, 612, 565 和  $0 \text{ cm}^{-1}$ 。可以看到,  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的 L2, L3, L4 晶场能级的间隔很小,因而,通过声子的辅助跃迁,  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的发射形成了一个连续的发射带,这有利于激光的调谐和锁模激光输出。

表 1  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的光谱参量计算结果

Table 1 Calculated results of spectral parameters of

$\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$			
Transition	Spectral parameters	Electric dipole	Magnetic dipole
${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$	$f$	$6.92 \times 10^{-6}$	$2.02 \times 10^{-7}$
	$S/\text{m}^2$	$2.31 \times 10^{-24}$	$6.90 \times 10^{-26}$
	$A/\text{s}^{-1}$	2146	62
${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	$f$	$9.23 \times 10^{-6}$	$2.69 \times 10^{-7}$
	$S/\text{m}^2$	$2.31 \times 10^{-24}$	$6.90 \times 10^{-26}$
	$A/\text{s}^{-1}$	2861	83
	$\tau/\mu\text{s}$	340	
	$\Sigma/\text{cm}$	$8.4 \times 10^{-18}$	

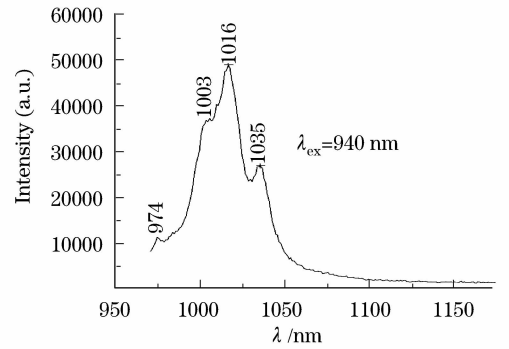


图 3  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的发射光谱

Fig. 3 Emission spectrum of  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  excited by 940 nm light

为了更好地分析  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的发光特性,这里对其发射截面做一粗略的计算。由于  ${}^2F_{7/2}$  所分裂的 Stark 能级上的热粒子布居数由低到高分别为 87.5%, 5.8%, 4.6% 和 2.0%, 可见基态以上的 Stark 能级具有较高的热粒子数分布比例。所以,在室温下测量的发光光谱在短波长一侧存在再吸收,使得测量的发光光谱和实际的发光光谱会有所差别。按文献[22]所给出的办法,我们采用如下方法来计算发射截面:

在存在较强吸收的一侧(970~1016 nm),采用对易法[23]从吸收光谱计算相应能级间的发射光谱。此时,吸收截面  $\sigma_{\text{abs}}$  和发射截面  $\sigma_{\text{em}}$  间的关系为

$$\sigma_{\text{em}}(\nu) = \sigma_{\text{abs}}(\nu) \frac{Z_L}{Z_U} \exp\left(-\frac{E_{ZL} - h\nu}{k_B T}\right), \quad (2)$$

式中  $E_{ZL}$  为上下能级的最小 Stark 能级差,  $k_B$  为

Boltzman 常数,  $T$  为温度,  $Z_k$  为配分函数,  $Z_L, Z_U$  分别表示  ${}^2F_{7/2}, {}^2F_{5/2}$  分裂能级的配分函数, 它们按下式计算

$$Z = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right), \quad (3)$$

式中  $g_i$  为相应 Stark 能级的简并度, 由于存在时间反演引起的能级简并, 此处的值为 2, 求和对相应能级所有的 Stark 子能级进行,  $E_i$  为  ${}^2F_J$  ( $J = 5/2, 7/2$ ) 第  $i$  个 Stark 能级值, 求和  $i$  指标遍及每一个  ${}^2F_J$  的 Stark 分裂能级。

而对于 1016 nm 以后的发射截面, 用光致发光光谱按(4)式计算<sup>[17]</sup>

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^5}{8\pi n^2 c \tau} \frac{I(\lambda)}{\int \lambda I(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $I$  为发光强度。

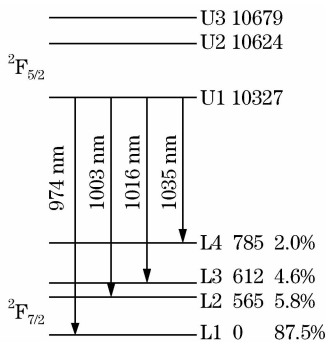


图 4  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  晶体场劈裂及  ${}^2F_{7/2}$  能级热布居  
Fig. 4 crystal field energy splitting of  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  and its thermal population of  ${}^2F_{7/2}$

由吸收光谱计算出的发射截面在 1016 nm 处为  $2.17 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 由发射光谱计算出的发射截面在 1016 nm 处为  $2.29 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 二者能较好地吻合。故将两种计算结果合在一起, 得到原子数分数为 1%  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的发射截面, 如图 5 所示。图 5 也给出了  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的发射截面曲线。为了方便, 它们的参数列入了表 2 中。从表 2 和图 5 可以看出,  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的发射最大发射截面略大于  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ , 但  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的发射光谱宽度是  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的 4~6 倍, 因而, 在可调谐激光中, 它将比  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  有更宽的激光调谐波长范围。另外, 由于在锁模模式运转下, 超短脉冲的宽度反比于发射光谱宽度, 因而,  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的理论超短脉冲宽度将比  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  快 4~6 倍。

根据文献[16], 积分发射截面  $\Sigma$  越大(大于  $10^{-18} \text{ cm}$ ), 也容易实现激光输出。  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  的  $\Sigma$  值为  $8.4 \times 10^{-18} \text{ cm}$ , 高于  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的  $5.4 \times$

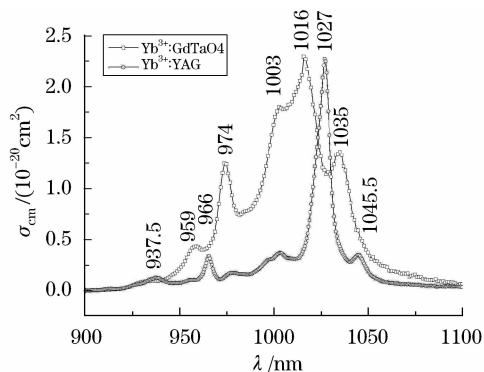


图 5  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  和  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的发射截面  
Fig. 5 Emission cross section of  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  and  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$

$10^{-18} \text{ cm}$ 。因此, 预期  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  是一种性能优良的激光材料。

表 2  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  和  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的参量比较  
Table 2 Parameters comparison of  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  and  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$

Parameters	(1%) $\text{Yb}^{3+}:$	(29.52%)
	$\text{GdTaO}_4$	$\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$
Absorption FWHM/nm	56	23
Emission peak width/nm	42(1016 nm) 57(1035 nm)	9(1027 nm)
Integral emission cross section $\Sigma/(10^{-18} \text{ cm}^2)$	8.4	5.4
Absorption cross section $\sigma_{abs}/(10^{-20} \text{ cm}^2)$	1.2(974 nm) 0.91(957 nm) 0.81(930 nm)	0.86(935 nm) 0.52(913 nm) 0.49(965.5 nm)
Emission cross section $\sigma_{em}/(10^{-20} \text{ cm}^2)$	2.29(1016 nm) 1.25(974 nm) 1.80(1003) 1.36(1035 nm)	2.26(1027 nm) 0.35(1045.5 nm)

## 4 结 论

用提拉法生长出了  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  晶体, 测量了它的吸收和光致发光光谱, 计算了它们的光谱参数,  $\text{Yb}^{3+}:\text{GdTaO}_4$  具有比  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  宽而高的吸收和发射截面, 已有的实验分析表明它是非常有希望的新型全固态可调谐激光和超短脉冲激光的工作物质。

## 参 考 文 献

- Tang Chun. Review on high brightness high average power solid-state laser technology[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(4): 488~496  
唐 淳. 高亮度高平均功率固体激光器技术评述[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 488~496
- Ahmad Khayat Jafari, Mehdi Aas. Continuous-wave theory of  $\text{Yb}:\text{YAG}$  end-pumped thin-disk lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2009,

- 48(1): 106~113
- 3 Lü Baida. Solid State Laser[M]. Beijing: Beijing Univeristy of Posts and Telecommunications Press, 2002, 232  
吕百达. 固体激光器件[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2002, 232
  - 4 Andy Bayramian, James Armstrong, Glenn Beer *et al.*. High-average-power femto-petawatt laser pumped by the Mercury laser facility[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(7): B57~B61
  - 5 J. Kawanaka, S. J. Pearce, R. Yasuhara *et al.*. High energy, diode-pumped Yb-doped solid-state lasers for inertial fusion drivers[C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society[J]. 2008. LEOS 2008. 21st Annual Meeting of the 9-13 Nov., 2008; 777 ~ 778
  - 6 J. C. Chanteloup, S. Bahbah, G. Bourdet *et al.*. Current status on the LUCIA laser: towards 100 joules nanosecond pulses, 10 Hz, kW averaged power, based on ytterbium diode pumped solid state laser[C]. *CLEO*, May 21, 2006; CWF3
  - 7 Haiwu Yu, Dongbin Jiang, Wentao Duan *et al.*. Gain medium parameters design for 100 J-class diode-pumped solid-state lasers based on Yb: YAG material[C]. Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim, 2007. CLEO/Pacific Rim 2007, 2007 (**26** ~ **31**): 1~2
  - 8 Todd S. Rutherford, William M. Tulloch, Eric K. Gustafson *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(2): 205~219
  - 9 Adolf Giesen. Thin disk lasers power scalability and beam quality [J]. *Laser Technik J.* 2005, **2**: 42~45
  - 10 Hans Bruesselbach, David S. Sumida. A 2.65 kW Yb:YAG single-rod laser [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**(3): 600~603
  - 11 Liu Qiang, Gong Mali, Li Chen *et al.*. Corner-pumped Yb:YAG lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2):721~725  
柳强, 巩马理, 李晨等. 角抽运 Yb:YAG 激光器[J]. 物理学报, 2005, **54**(2):721~725
  - 12 Xu Yi, Yu Haibo, Wu Yuson *et al.*. Laser diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1171~1173  
许毅, 于海波, 吴玉松等. 激光二极管抽运的国产 Yb:YAG 陶瓷激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1171~1173
  - 13 S. Matsubara, M. Takama, M. Inoue *et al.*. Efficient ultrashort-pulse generation of Yb: YAG laser overcoming the fluorescence spectrum limit by using nonlinear medium[C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2008. LEOS 2008. 21st Annual Meeting; 836~837
  - 14 Xu Jun, Xu Xiaodong, Su Liangbu. The Ytterbium-doped Laser Materials[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005, 7~8, 76  
徐军, 徐晓东, 苏良碧. 掺镱激光晶体材料[M]. 上海:上海科学普及出版社,2005, 7~8, 76
  - 15 Zhai Hui, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. A laser diode-pumped Yb:GSO laser with the high efficiency and low threshold[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1295~1296  
翟惠, 李文雪, 郝强等. 激光二极管抽运的高效率低阈值 Yb:GSO 激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1295~1296
  - 16 Li Wenxue, Pai Haifeng, Hao Qiang *et al.*. A femtosecond Yb: GSO laser pumped by laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1294  
李文雪, 潘海峰, 郝强等. 激光二极管抽运的 Yb:GSO 飞秒激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1294
  - 17 Song Yanrong, Hu Jianghai, Zhou Jinfeng *et al.*. Laser diode-pumped Q-switched Yb: LSO laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1298~1300  
宋晏蓉, 胡江海, 周劲峰等. 半导体可饱和吸收镜调 Q 的 Yb: LSO 激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1298~1300
  - 18 Xiang Dong, Liu Bo, Gu Mu *et al.*. Theoretical calculation of electronic structures and optical properties of  $\text{YTaO}_4$  and  $\text{LuTaO}_4$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 450~453  
向东, 刘波, 顾牡等.  $\text{YTaO}_4$  和  $\text{LuTaO}_4$  电子结构和光学性质的理论计算[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 450~453
  - 19 Zhang Qingli, Yin Shaotang, Wang Zhaobing *et al.*. A simple method to measure crystal refractive indices with an absorption spectrum[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2007, **36**: 110~113  
张庆礼, 殷绍唐, 王召兵等. 吸收光谱测量晶体折射率的简易方法[J]. 人工晶体学报, 2007, **36**: 110~113
  - 20 Zhang Qingli, Xiao Jingzhong, Sun Dunlu *et al.*. Crystal growth and spectral parameter computation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, **4**(10): 1157~1160  
张庆礼, 肖敬忠, 孙敦陆等. Yb:YAG 的晶体生长和光谱参数计算[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, **4**(10): 1157~1160
  - 21 Carid J. A., Deshazer L. G., Nella J.. Characteristics of room-temperature 2.3- $\mu\text{m}$  laser emission from  $\text{Tm}^{3+}$  in YAG and  $\text{YAlO}_3$  [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE**(11): 874~881
  - 22 Xu Jun, Xu Xiaodong, Su Liangbu. The Ytterbium-doped Laser Materials [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005, 4  
徐军, 徐晓东, 苏良碧. 掺镱激光晶体材料[M]. 上海:上海科学普及出版社,2005, 4
  - 23 Stephen A. Payne, L. L. Chase, Larry K. Smith *et al.*. Infrared cross-section measurements for crystals doped with  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ , and  $\text{Ho}^{3+}$  [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(11): 2619~2630