

文章编号: 1000-7032(2022)11-1779-10

## Yb:GdScO<sub>3</sub>晶体光谱参数计算

李加红<sup>1,2,3</sup>, 张庆礼<sup>1,2\*</sup>, 孙贵花<sup>1,2</sup>, 高进云<sup>1,2</sup>, 王小飞<sup>1,2</sup>, 窦仁勤<sup>1,2</sup>,  
丁守军<sup>1,2,4</sup>, 张德明<sup>1,2</sup>, 刘文鹏<sup>1,2</sup>, 罗建乔<sup>1,2</sup>, 孙 或<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230031; 3. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

4. 安徽工业大学 数理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

**摘要:** 采用提拉法生长了质量优良的Yb:GdScO<sub>3</sub>晶体,对样品的X射线粉末衍射进行了Rietveld精修,给出了晶体计算密度及掺杂浓度。Yb<sup>3+</sup>的有效分凝系数计算为1.04。室温下测量了其吸收光谱、发射光谱和荧光寿命,首次计算了GdScO<sub>3</sub>基质中Yb<sup>3+</sup>的吸收、发射振子强度、谱线强度、跃迁概率、能级寿命和积分发射截面等重要光谱参数,对其激光性能进行了初步评估。结果表明,Yb:GdScO<sub>3</sub>易于输出1 030 nm和1 060 nm波段附近的激光,而对于1 000 nm附近的激光输出则只有在高粒子数反转情况下才可能实现。

**关键词:** Yb:GdScO<sub>3</sub>; 吸收光谱; 发射光谱; 光跃迁

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220249

## Spectral Parameter Computation of Yb:GdScO<sub>3</sub> Crystal

LI Jia-hong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qing-li<sup>1,2\*</sup>, SUN Gui-hua<sup>1,2</sup>, GAO Jin-yun<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-fei<sup>1,2</sup>,  
DOU Ren-qin<sup>1,2</sup>, DING Shou-jun<sup>1,2,4</sup>, ZHANG De-ming<sup>1,2</sup>, LIU Wen-peng<sup>1,2</sup>, LUO Jian-qiao<sup>1,2</sup>, SUN Yu<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Province, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230031, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

4. School of Science and Engineering of Mathematics and Physics, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

\* Corresponding Author, E-mail: zql@aiofm.ac.cn

**Abstract:** A high quality Yb:GdScO<sub>3</sub> crystal was grown by Czochralski method. The X-ray diffraction was refined by Rietveld method, and the calculated crystal density and doping concentration were obtained. The effective segregation coefficient of Yb<sup>3+</sup> is calculated to be 1.04. Its absorption spectrum, emission spectrum and fluorescence lifetime were measured at room temperature. The absorption, emission oscillator strength, spectral line strength, transition probability, energy level lifetime and integral emission cross section of Yb<sup>3+</sup> in GdScO<sub>3</sub> matrix were calculated for the first time. The laser performance is preliminarily evaluated. The results show that Yb:GdScO<sub>3</sub> is easy to output laser near 1 030 nm and 1 060 nm, while the laser output near 1 000 nm is only possible under the condition of high population inversion.

**Key words:** Yb:GdScO<sub>3</sub>; absorption spectrum; emission spectrum; optical transition

收稿日期: 2022-06-24; 修订日期: 2022-07-03

基金项目: 安徽省先进激光技术实验室开放项目(AHL 20220 ZR04); 国家自然科学基金(51802307); 安徽省重大科技专项(202203a05020002)资助项目

Supported by The Open Project of Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province(AHL 20220 ZR04); National Natural Science Foundation of China(51802307); Major Special Project of Science and Technology of Anhui Province(202203a05020002)

## 1 引 言

钪酸钇 ( $\text{GdScO}_3$ ) 是一种优良的激光基质材料, 具有钙钛矿结构 ( $\text{ABO}_3$ ,  $\text{GdFeO}_3$  型), 属正交晶系, 空间群为  $Pnma$  (No. 62)<sup>[1-7]</sup>。其较低的最高声子能量 ( $452 \text{ cm}^{-1}$ ) 以及较宽的带隙, 可以最大限度地减少相邻能级之间的非辐射弛豫, 从而提升发光效率。此外, 该晶体具有较好的热力学特性和化学稳定性, 有利于开展高功率泵浦激光研究和应用。特别地, 因为  $\text{Gd}^{3+}$  与其他稀土离子大小非常接近, 因此掺杂的稀土离子可以有效地进入到晶格中, 从而可以降低由于掺杂而产生的缺陷和晶格应力的形成, 有利于实现高浓度掺杂, 进而提高激光效率<sup>[8-13]</sup>。

$\text{Yb}^{3+}$  能级结构简单, 电子构型为  $[\text{Xe}]4f^{13}$ , 可视作为一个等价空穴, 其共轭电子态为  $4f$ , 相应地仅有两个电子态, 即基态  $^3F_{7/2}$  和激发态  $^2F_{5/2}$ , 两者的能量间隔约为  $10\,000 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[14-25]</sup>。在晶体场作用下产生斯塔克 (Stark) 能级分裂后, 基态和激发态分别最多分裂为 4 个和 3 个子能级, 形成准三或准四能级的激光运行机制, 不存在激发态吸收、频率上转换和交叉弛豫等过程, 避免浓度猝灭效应, 光-光转换效率高<sup>[26-33]</sup>。其  $\text{Yb}^{3+}$  基态 Stark 分裂较大, 导致锁模 (ML) 激光器具有宽的波长可调谐性和产生超短脉冲<sup>[34-37]</sup>。它的吸收带在  $900\sim 1\,000 \text{ nm}$  波长范围, 能与 InGaAs (发射波长  $870\sim 1\,100 \text{ nm}$ ) 半导体激光二极管 (LD) 泵浦源有效耦合, 无需严格的温度控制即可获得相位匹配的泵浦源的泵浦波长<sup>[38-44]</sup>。因而,  $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$  是 LD 泵浦的有效激光工作物质。上海光机所 Zhang 等报道了基于  $3 \text{ mm}\times 3 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}$  (3%) 的  $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$  晶体实现了波长为  $1\,063.9 \text{ nm}$  的  $13.45 \text{ W}$  连续激光输出<sup>[45]</sup>。对于特定激光晶体来说, 掺杂离子浓度决定了其光谱特性和激光性能。本文采用提拉法生长了 (5%)  $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$  单晶, 测量了其吸收和发射光谱, 首次计算了  $\text{Yb}^{3+}$  在  $\text{GdScO}_3$  基质中的光谱参数, 并对晶体的激光性能进行了评估, 为下一步实现高效、低阈值激光输出提供了重要的参考。

## 2 实 验

采用 Czochralski 法在氮气氛围中沿 [100] 方向生长了  $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$  晶体。用于生长的设备为 JGD800 单晶炉, 晶体生长的放肩和等径都采用自动控制。所生长的晶体无色、透明、无裂纹, 表明

晶体质量良好, 如图 1 所示。



图 1  $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$  单晶照片

Fig.1 Photograph of the as-grown  $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$  single crystal

### 2.1 样品 $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$ 晶体的 X 射线衍射

取少量的晶体样品研磨成粉末, 用于测试晶体的 X 射线衍射, 测试仪器为荷兰飞利浦公司生产的 X'Pert PROX 射线衍射仪, 测试角度范围为  $10^\circ\sim 90^\circ$ , 步进间隔为  $0.033^\circ$ 。为了获取准确的结构信息, 得到  $\text{Yb}^{3+}$  在  $\text{GdScO}_3$  中的浓度用于光谱参数计算, 对  $\text{Yb}:\text{GdScO}_3$  的晶体粉末 X 射线衍射图谱进行了 Rietveld 全谱精修拟合。拟合软件为 GSAS。掺杂激活离子  $\text{Yb}^{3+}$  与基质中的  $\text{Gd}^{3+}$  都是稀土离子, 价态相同 (都是 +3 价离子), 并且离子半径接近 ( $\text{Yb}^{3+}$  半径为  $0.0985 \text{ nm}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  半径为

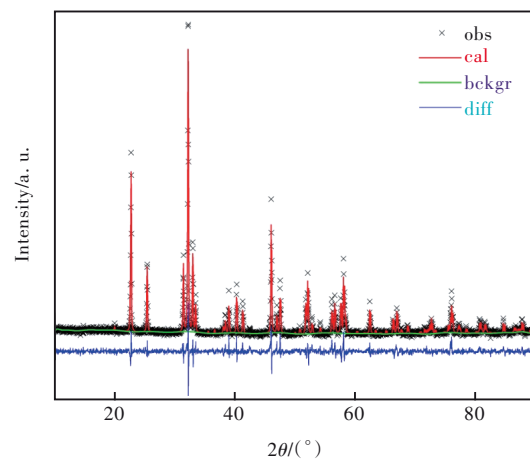


图 2  $\text{GdScO}_3$  晶体 XRD 数据 Rietveld 精修结果 (cal, obs, bckgr 和 diff 表示计算值、实验值、背底以及实验值和计算值之间的误差)

Fig.2 Rietveld refinement results of the  $\text{GdScO}_3$  crystal obtained from the XRD data (cal, obs, bckgr, and diff mean calculated data, observed data, background, and the difference between observed data and calculated data)

0. 105 3 nm, Gd<sup>3+</sup>/ Yb<sup>3+</sup>两者的配位数均为 CN=8), Yb<sup>3+</sup>离子在引入 Yb:GdScO<sub>3</sub>晶格中应取代 Gd<sup>3+</sup>离子进入其所在的格位。因此在精修时,使用 GdScO<sub>3</sub>晶胞结构数据作为初始参考数据,其空间群为 *Pnma*, Gd/Yb 格位为 8 个氧原子 (GdO<sub>8</sub>) 配位的十二面体, Sc 格位为 6 个氧原子 (ScO<sub>6</sub>) 配位的八面体<sup>[46-51]</sup>。按化学式 (Gd<sub>0.95</sub>Yb<sub>0.05</sub>)ScO<sub>3</sub> 固定晶胞中 Gd、Yb、Sc 和 O 原子的占有率,对其晶格常数、原

子位置坐标、各向同性温度因子 ( $U_{iso}$ ) 进行了精修。精修结果如图 2 所示,收敛时加权剩余方差因子  $R_{wp}$  和剩余方差因子  $R_p$  分别为 4. 97% 和 3. 64%,均小余 10%,说明计算值和实验值符合很好。拟合结果结构参数如表 1,晶胞参数  $a=0. 575 731 7$  nm,  $b=0. 794 584 3$  nm,  $c=0. 548 934 6$  nm,  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ,晶胞体积  $V=0. 251 119 6$  nm<sup>3</sup>。计算得到 Yb:GdScO<sub>3</sub>的密度  $\rho=6. 622 82$  g/cm<sup>3</sup>。

表 1 Yb:GdScO<sub>3</sub>的 Rietveld 精细结构参数

Tab. 1 Structural parameters from the Rietveld refinement of Yb:GdScO<sub>3</sub>

Atom	Multiplicity Wyckoff letter	$x$	$y$	$z$	Occupancy	$U_{iso}$
O1	4c	0. 470 876	0. 250 000	0. 081 371	1. 567 7	0. 100 79
Sc1	4b	0. 000 000	0. 000 000	0. 500 000	1. 056 2	0. 051 78
O2	8d	0. 208 495	0. 583 306	0. 201 682	0. 935 8	0. 057 90
Gd1	4c	0. 442 395	0. 750 000	0. 516 818	1. 025 2	0. 021 93
Yb1	4c	0. 178 142	0. 750 000	0. 693 908	0. 063 4	0. 039 20
Lattice parameters	$a=0. 575 731 7$ nm, $b=0. 794 584 3$ nm, $c=0. 548 934 6$ nm $\rho=6. 622 82$ g/cm <sup>3</sup> , $V=0. 251 119 6$ nm <sup>3</sup> , space group: <i>Pnma</i> (No. 62)					
R factor	$R_p=3. 64\%$ , $R_{wp}=4. 97\%$					

### 2. 2 Yb:GdScO<sub>3</sub>晶体的组成和分凝系数

用 LA-ICP-MS(美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a)仪器测量生长晶体中 Yb、Gd 和 Sc 元素的浓度,精度为 0. 001‰。通过 LA-ICP-MS 测试得到所生长晶体中 Yb<sup>3+</sup>、Gd<sup>3+</sup>、Sc<sup>3+</sup>离子的浓度,如表 2 所示。因此,有效分凝系数  $k_{eff}$  可以用方程  $k_{eff}=C_s/C_l$  计算。其中  $C_s$  和  $C_l$  分别是晶体和熔体中的掺杂剂浓度。经计算, GdScO<sub>3</sub> 主体中 Yb<sup>3+</sup>离子的  $k_{eff}$  为 1. 04,比较大,有利于生长均匀掺杂晶体。

表 2 ICPMS 分析得到的 Yb:GdScO<sub>3</sub>晶体组成

Tab. 2 Composition of Yb:GdScO<sub>3</sub> crystal obtained from ICP-MS analysis

Ions	$C_i/\%$	$C_s/\%$	$k_{eff}$
Yb <sup>3+</sup>	5	5. 2	1. 040 0
Gd <sup>3+</sup>	95	94. 8	0. 997 8
Sc <sup>3+</sup>	100	122. 70	1. 227 0

### 2. 3 Yb:GdScO<sub>3</sub>晶体的光谱分析

截取厚度为 2 mm 的薄片,样品经切割、粗磨、细磨、两面抛光用于透射光谱测试,抛光后测试样品的厚度为 1. 425 mm。用荧光分光光度计(Edinburgh FLSP-920)在 450 W Xe 灯下测量其荧光光谱,以 916 nm 闪光灯作为光源,激发得到荧光衰减曲线。用 Perkin Elmer 公司的 Lamda950 紫外-可见-红外分光光度计在室温下进行透射光谱

测量,光谱分辨率为 0. 5 nm。

图 3 是 Yb<sup>3+</sup>:GdScO<sub>3</sub>晶体在 916 nm 波长激发下的室温 (300 K) 发射光谱。986, 999, 1 030, 1 060 nm 处的发射峰分别对应 Yb<sup>3+</sup>离子的 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>(2) → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>(3)、<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>(1) → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>(2)、<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>(0) → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>(2)、<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>(0) → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>(3) 的跃迁,<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>和 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>的晶场能级分裂均为二度简并,<sup>2s+1</sup>L<sub>J</sub>(n)中的 n 表示每个 Stark 能级由低到高的序号,序号从 0 开始。Yb<sup>3+</sup>的最强荧光峰位于 999 nm 处。能级图如图 4 所示。

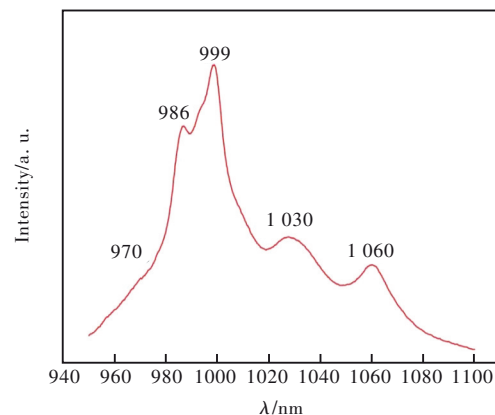


图 3 Yb:GdScO<sub>3</sub>晶体在 916 nm 激光激发下的室温发射光谱

Fig.3 Emission spectrum of Yb:GdScO<sub>3</sub> crystal excited by 916 nm laser

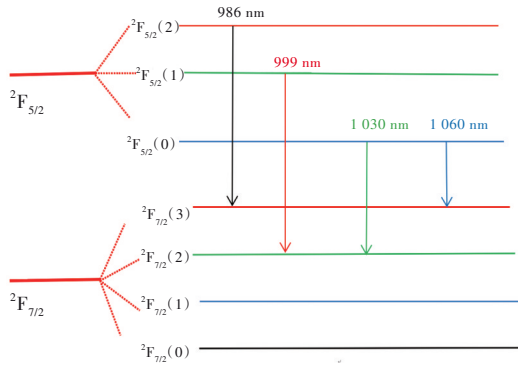


图 4 Yb<sup>3+</sup>:GdScO<sub>3</sub>能级分裂图

Fig.4 Yb<sup>3+</sup>:GdScO<sub>3</sub> energy level splitting diagram

在室温下,以 916 nm 闪光灯作为光源,监测 999 nm 发光,测试了 Yb:GdScO<sub>3</sub> 晶体的荧光寿命,结果如图 5 所示。经过单指数拟合得到 Yb<sup>3+</sup> 的 ²F<sub>5/2</sub>→²F<sub>7/2</sub> 跃迁的荧光寿命为 1 060 μs。与其他 Yb<sup>3+</sup> 掺杂的激光材料相比,如 Yb:YAG 的荧光寿命为 970 μs, Yb:GGG 的荧光寿命为 800 μs, Yb:GdScO<sub>3</sub> 晶体具有较长的荧光寿命,这将有利于增加布居激光上能级粒子数,利于储能获得高峰值功率调 Q 激光输出。

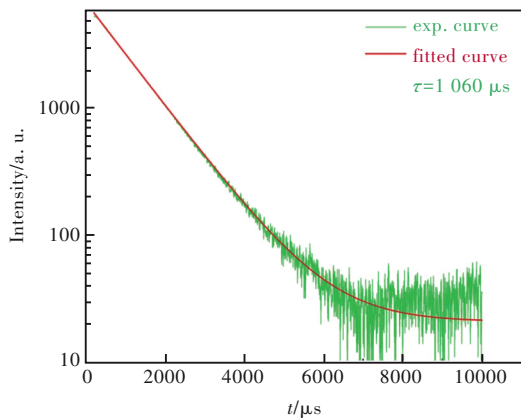


图 5 Yb:GdScO<sub>3</sub> 晶体 Yb<sup>3+</sup> 的 ²F<sub>5/2</sub>→²F<sub>7/2</sub> 跃迁的荧光衰减曲线

Fig.5 Fluorescence decay curves of the ²F<sub>5/2</sub>→²F<sub>7/2</sub> transition of Yb:GdScO<sub>3</sub> crystal

室温下测量了 Yb:GdScO<sub>3</sub> 晶体在 250~3 000 nm 范围内的吸收光谱,结果如图 6 所示。在 880~1 020 nm 范围内,仅有 Yb<sup>3+</sup> 的特征吸收,这与晶体为无色透明的结果一致(如图 1 所示)。根据晶体的吸收系数,采用下式可以计算出晶体的吸收截面 σ<sub>abs</sub>:

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\alpha}{N}, \quad (1)$$

其中 α 为吸收系数, N 为掺杂离子浓度。计算得到的吸收截面值如图 7 所示,最高和次高吸收截面位于 985 nm 和 964 nm 处,对应的吸收截面值分

别为 1.482×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup> 和 1.480×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup>。

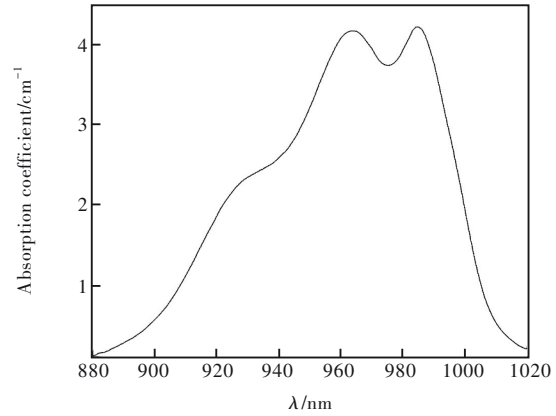


图 6 Yb:GdScO<sub>3</sub> 的吸收光谱

Fig.6 Absorption spectrum of Yb:GdScO<sub>3</sub>

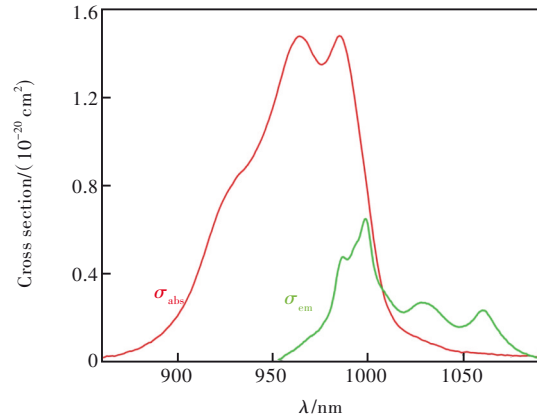


图 7 Yb<sup>3+</sup>:GdScO<sub>3</sub> 的吸收和发射截面

Fig.7 Absorption and emission cross sections of Yb<sup>3+</sup>:GdScO<sub>3</sub>

### 3 实验结果和讨论

稀土离子在固体中的发光现象发现较早,一类是线状光谱的 4f<sup>N</sup> 组态内的能级之间跃迁,即 4f-4f 跃迁;另一类是带状光谱,它是 4f<sup>N</sup> 组态内的能级和其他组态能级之间的跃迁,比如 4f<sup>N</sup> 组态和 4f<sup>N-1</sup>5d 组态能级之间的跃迁,即 4f-5d 跃迁。对于自由稀土离子,电偶极作用不能引起 4f-4f 跃迁,因为 4f<sup>N</sup> 组态内各个状态的宇称是相同的,它们之间的电偶极跃迁的矩阵元的值为零,因此,4f<sup>N</sup> 组态内的能级之间跃迁是宇称禁戒的。一般认为由于晶体场奇次项的作用,使与 4f<sup>N</sup> 组态状态相反宇称的组态状态混入到 4f<sup>N</sup> 组态状态之中,比如 4f<sup>N-1</sup>5d 或 4f<sup>N-1</sup>5g 组态,这样,在固体和溶液中的稀土离子中原来的 4f<sup>N</sup> 组态状态已经不再是一种宇称的状态,而是两种宇称状态的混合态,这些状态之间的电偶极跃迁矩阵元不再为零,出现了线状光谱的 4f-4f 跃迁。以此为基础,1962 年, Judd 和



Ofelt 分别给出了稀土 4f 组态电子跃迁的强度计算公式, 该理论通常称为 J-O 理论<sup>[52-56]</sup>。

在中间耦合情形下, 4f<sup>n</sup> 稀土离子在两个 J 多重态 |f<sup>n</sup>[αSL]J> → |f<sup>n</sup>[α'S'L']J'> 间的磁偶极子 (MD) 跃迁的谱线强度为

$$S_{\text{md}}(aJ; bJ') = \left( \frac{h}{4\pi mc} \right)^2 \langle f^n[\alpha SL]J \| L+2S \| f^n[\alpha' S'L']J' \rangle^2 = 3.72797562 \times 10^{-26} \langle f^n[\alpha SL]J \| L+2S \| f^n[\alpha' S'L']J' \rangle^2, \quad (2)$$

其中,  $h$ 、 $m$ 、 $c$  分别为普朗克常数、电子质量和光速,  $\alpha$ 、 $\alpha'$  表示除  $S$ 、 $L$ 、 $J$  和  $S'$ 、 $L'$ 、 $J'$  以外的其他量子数,  $a$ 、 $b$  表示除  $J$  和  $J'$  以外的其他量子数。矩阵元  $\langle f^n[\alpha SL]J \| L+2S \| f^n[\alpha' S'L']J' \rangle^2$  可由量子数  $\alpha$ 、 $\alpha'$ 、 $S$ 、 $L$ 、 $J$  和  $S'$ 、 $L'$ 、 $J'$  按公式直接计算, 且  $S_{\text{md}}(aJ; bJ') = S_{\text{md}}(bJ'; aJ)$ 。 $S_{\text{md}}$  的跃迁选择定则为:  $\Delta\alpha = \Delta S = \Delta L = 0$ ,  $\Delta J = 0, \pm 1$  ( $0 \rightarrow 0$  跃迁禁止)。电偶极子 (ED)  $f^n[\alpha SL]J \rightarrow f^n[\alpha' S'L']J'$  跃迁谱线强度为强度参数  $\Omega$  和  $t$  阶张量算符  $U^{(t)}$  的矩阵元求和<sup>[57]</sup>:

$$S_{\text{ed}}(aJ; bJ') = \sum_{t, \text{even}} \Omega_t \langle f^n[\alpha SL]J \| U^{(t)} \| f^n[\alpha' S'L']J' \rangle^2, \quad (3)$$

参数  $\Omega$  (具有面积量纲) 包含了晶体场强度、两个相反宇称组态的能量差、内部组态的径向积分, 包括了静态和振动诱导电偶极子跃迁, 它的值可由吸收光谱或发射光谱的实验结果拟合确定。跃迁选择定则为:  $\Delta S = 0$ ,  $|\Delta L|, |\Delta J| \leq 6$ 。求和中的  $t$  取为 2, 4, 6, 且须满足  $|J - J'| \leq t \leq |J + J'|$ 。

$S_{\text{md}}$  和  $S_{\text{ed}}$  具有面积量纲。对于 Yb<sup>3+</sup> 离子来说, 由于实验上仅能观察到一对 J 多重态的跃迁, 因而实验上不能直接通过拟合吸收光谱的办法来确定  $\Omega$ , 通常需要采用文献[57]提出的全谱拟合法才能确定。

通常定义无量纲振子跃迁强度  $f$  为:

$$f(aJ; bJ') = \frac{\chi}{n^2} \frac{8\pi^2 mc}{3h\bar{\lambda}(2J+1)} S(aJ; bJ'), \quad (4)$$

其中,  $\chi$  为与材料有关的校正因子, 对折射率为  $n$  的各项同性介质, 电偶极子和磁偶极子  $\chi$  分别为  $n(n^2+2)/9$  和  $n^3$ 。 $\bar{\lambda}$  为跃迁平均波长, 对吸收光谱, 可取为吸收光谱带的重心波长值。

|aJ> → |bJ'> 间的自发辐射概率  $A$  由下式计算:

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

其中,  $e$  为电荷常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数。

实验上, 振子强度可由吸收光谱来测定:

$$f^{\text{exp}} = \frac{4\epsilon_0 mc}{e^2} \int \sigma(\nu) d\nu = \frac{4\epsilon_0 mc}{Ne^2} \int \sigma(\nu) d\nu = \frac{4\epsilon_0 mc^2}{Ne^2 \bar{\lambda}^2} \int \alpha(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

其中  $N$  为单位介质内的稀土离子数, 相应的实验谱线强度  $S^{\text{exp}}(aJ; bJ')$  为

$$S^{\text{exp}}(aJ; bJ') = \frac{n^2}{\chi} \frac{3(2J+1)h\epsilon_0 \bar{\lambda}}{2\pi^2 e^2} \int \alpha(\nu) d\nu = \frac{n^2}{\chi} \frac{3(2J+1)h\epsilon_0 c}{2\pi^2 e^2 \bar{\lambda} N} \int \alpha(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

其中,  $\sigma$  为吸收截面,  $\alpha(\lambda)$  为吸收系数,  $n$  为介质折射率。积分对  $aJ \rightarrow bJ'$  的吸收带进行。

如果同一谱线包含了磁偶极子和电偶极子跃迁, 则有

$$f_{\text{ED}} + f_{\text{MD}} = \frac{4\epsilon_0 mc}{e^2} \int \sigma(\nu) d\nu, \quad (8)$$

因为磁偶极子振子强度  $f_{\text{MD}}$  可以直接计算, 故由公式(8)可计算出电偶极子的振子强度  $f_{\text{ED}}$ 。

由于 Yb<sup>3+</sup> 只有 <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 和 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 两个多重态能级, 不能通过实验来确定它的 3 个实验振子强度参数  $\Omega_2$ 、 $\Omega_4$ 、 $\Omega_6$ 。因此, 两个能级间的谱线跃迁强度  $S(aJ; bJ')$  可由吸收系数计算获得, 进而可对材料的其他光谱跃迁参数进行计算。

如图 3 所示, Yb<sup>3+</sup> 的特征吸收波长最大值在 999 nm, 重心吸收波长 (即平均吸收波长)  $\bar{\lambda} = \int \lambda \alpha(\lambda) d\lambda / \int \alpha(\lambda) d\lambda = 957$  nm, 吸收系数对波长的积分  $\int \alpha(\lambda) d\lambda = 913$  cm<sup>-1</sup>·nm。其余光谱参数计算所得的结果如表 3~4 所示。为了便于比较, 表中列出了 Yb:YAG<sup>[57]</sup> 晶体相应的光谱参数。

由表中数据可以看到, Yb:GdScO<sub>3</sub> 中 Yb<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 跃迁包含了磁偶极子和电偶极子跃迁的贡献, 但磁偶极子跃迁比电偶极子跃迁小。<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 的总跃迁概率  $A_{\text{ed}} + A_{\text{md}}$  为 941 s<sup>-1</sup>。

Yb<sup>3+</sup> 有很强的自吸收, 实验准确测定其能级寿命比较困难。而通过吸收光谱计算得到的能级寿命 1 063 μs 和实验测得的能级寿命 1 060 μs 非常接近, 说明通过吸收光谱计算得到其能级寿命是可行的。Yb<sup>3+</sup> 在 GdScO<sub>3</sub> 中的能级寿命 1 063 μs 比 Yb:YAG 的 950 μs 长<sup>[58]</sup>, 更有利于储能, 对于调 Q 激光输出更为有利。Yb:GdScO<sub>3</sub> 作为激光基质更优越。

初态能级  $I$  和末态能级  $F$  之间的跃迁概率  $A_{FI}$

表 3 Yb:GdScO<sub>3</sub> 和 Yb:YAG 晶体 Yb<sup>3+</sup>的 <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 跃迁的吸收谱参数计算结果Tab. 3 Computation results of absorption spectrum parameters of the <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> transition of Yb:GdScO<sub>3</sub> and Yb:YAG

	吸收振子强度 $f$	吸收谱线强度 $S/\text{cm}^2$	共振吸收跃迁概率 $A/\text{s}^{-1}$
Yb:GdScO <sub>3</sub> 电偶极子 (ED)	$9.050 \times 10^{-7}$	$6.240 \times 10^{-20}$	588
Yb:GdScO <sub>3</sub> 磁偶极子 (MD)	$1.811 \times 10^{-7}$	$1.278 \times 10^{-20}$	117
Yb:YAG 电偶极子 (ED)	$3.58 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^{-20}$	879
Yb:YAG 磁偶极子 (MD)	$3.32 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-21}$	82

表 4 Yb:GdScO<sub>3</sub> 和 Yb:YAG 晶体 Yb<sup>3+</sup>的 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 跃迁的发射谱参数计算结果Tab. 4 Computation results of emission spectrum parameters of the <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> transition of Yb:GdScO<sub>3</sub> and Yb:YAG

	发射振子强度 $f$	发射谱线强度 $S/\text{cm}^2$	共振发射跃迁概率 $A/\text{s}^{-1}$	总共振发射跃迁概率 $A/\text{s}^{-1}$	辐射寿命/ $\mu\text{s}$
Yb:GdScO <sub>3</sub> 电偶极子 (ED)	$7.986 \times 10^{-6}$	$6.241 \times 10^{-20}$	784	941	1 063
Yb:GdScO <sub>3</sub> 磁偶极子 (MD)	$1.599 \times 10^{-6}$	$1.278 \times 10^{-20}$	157		
Yb:YAG 电偶极子 (ED)	$4.77 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^{-20}$	1 171	1 280	781
Yb:YAG 磁偶极子 (MD)	$4.43 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-21}$	109		

和发射截面  $\sigma_{FI}$  之间的关系为<sup>[59]</sup>

$$\sigma_{em} = \sigma_{FI} = \frac{\lambda^4}{8\pi c n^2} A_{FI} \phi(\lambda), \quad (9)$$

其中  $\phi(\lambda)$  为发射光谱的线性函数,其量纲为长度量纲的倒数。忽略自吸收,由 Yb:GdScO<sub>3</sub> 的发射光谱  $I(\lambda)$  计算出线性函数:

$$\phi(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\int I(\lambda) d\lambda}, \quad (10)$$

如果该公式中波长按 nm 计算,则需要乘以  $10^{-9}$  转换为  $\text{m}^{-1}$ 。

计算出的发射截面如图 7 所示。由吸收截面可知, Yb:GdScO<sub>3</sub> 的吸收截面为  $0.94 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 在吸收峰 965 nm 和 985 nm 处,吸收截面分别为  $1.477 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  和  $1.482 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 其中 985 nm 处的吸收截面最大。在 987, 999, 1 029, 1 060 nm, 发射截面分别为  $0.476 \times 10^{-20}$ ,  $0.649 \times 10^{-20}$ ,  $0.268 \times 10^{-20}$ ,  $0.233 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 发射截面最大值位于 999 nm 处。

在激光中最重要的是增益截面,其计算公式为<sup>[58]</sup>:

$$\sigma_g(\lambda) = \beta \sigma_{em} - (1 - \beta) \sigma_{abs}, \quad (11)$$

其中  $\beta$  表示处于激发态的粒子占总粒子数的比例。以  $\beta$  为 0.2, 0.5, 0.8 计算出的增益截面如图 8 所示。可以看到,虽然发射截面在 999 nm 处最大,但直到  $\beta$  为 0.5 时,仍然不太可能实现激光输出,因为只有当波长大于 1 007.6 nm 时,增益截面才大于 0,方可实现激光增益放大。在  $\beta$  为 0.8

时,较适合激光输出的波段为 1 030 nm 和 1 060 nm。在强泵浦条件下,当激光上能级的粒子数达到 80% 时,此时 999 nm 的增益截面才最大,有望实现该波段的激光输出。与 Yb:CaF<sub>2</sub><sup>[58]</sup> 相比, Yb:GdScO<sub>3</sub> 的最大发射截面为  $0.649 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  (at 999 nm), 比 Yb:CaF<sub>2</sub> ( $0.24 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  at 973 nm) 大,有利于激光运转。

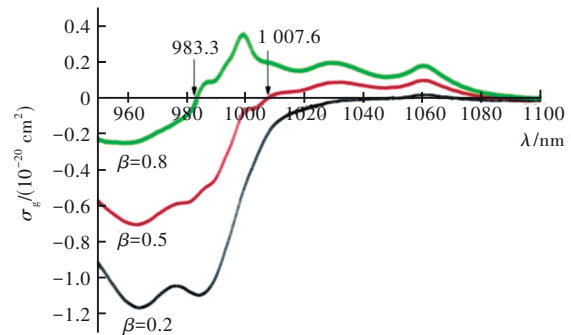


图 8 Yb:GdScO<sub>3</sub> 晶体在不同布居反转比例  $\beta$  下的增益截面  
Fig. 8 Gain cross sections of Yb:GdScO<sub>3</sub> crystal at different population inversion ratios  $\beta$

## 4 结 论

本文采用 Czochralski 法生长了 Yb:GdScO<sub>3</sub> 单晶, Yb<sup>3+</sup> 的有效分凝系数计算为 1.04。测量了其吸收光谱。测试范围为 250 ~ 3 000 nm, 测试在室温下进行, 在 880~1 020 nm 范围内, 仅有 Yb<sup>3+</sup> 的特征吸收。计算结果表明, 掺杂浓度为  $7.9133 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  的 Yb:GdScO<sub>3</sub> 的电偶极子的吸收、发射振子强度为  $1.086 \times 10^{-6}$  与  $7.986 \times 10^{-6}$ ,

吸收、发射跃迁概率为  $588\text{ s}^{-1}$  与  $784\text{ s}^{-1}$ ; 磁偶极子的吸收、发射振子强度为  $1.811 \times 10^{-7}$  与  $1.599 \times 10^{-6}$ , 吸收、发射跃迁概率为  $117\text{ s}^{-1}$  与  $157\text{ s}^{-1}$ ;  $^2F_{5/2}$  能级寿命计算值  $1\ 063\ \mu\text{s}$ , 和实验测量的能级寿命  $1\ 060\ \mu\text{s}$  接近; Yb:GdScO<sub>3</sub> 最高和次高吸收截面位于  $985\text{ nm}$  和  $964\text{ nm}$  处, 分别为  $1.482 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$  和  $1.480 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$ 。由吸收光谱计算了跃迁线强、振子强度、跃迁概率和上能级寿命, 然后给出了 Yb<sup>3+</sup> 的发射和增益截面。Yb:

GdScO<sub>3</sub> 的最高发射截面位于  $999\text{ nm}$  处, 为  $0.649 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$ ; 增益截面计算表明 Yb:GdScO<sub>3</sub> 通常适合输出  $1\ 030\text{ nm}$  和  $1\ 060\text{ nm}$  波段附近的激光, 只有在高粒子数反转情况下才可能实现  $1\ 000\text{ nm}$  附近的激光输出。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220249>。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] HOU W T, ZHAO H Y, QIN Z P, *et al.* Spectroscopic and continuous-wave laser properties of Er:GdScO<sub>3</sub> crystal at  $2.7\ \mu\text{m}$  [J]. *Opt. Mater. Express*, 2020, 10(11): 2730-2737
- [ 2 ] AMANYAN S N, ARSEN'EV P A, BAGDASAROV K S, *et al.* Synthesis and examination of GdScO<sub>3</sub> single crystals activated by Nd<sup>3+</sup> [J]. *J. Appl. Spectrosc.*, 1983, 38(3): 343-348.
- [ 3 ] LI S M, FANG Q N, ZHANG Y H, *et al.*  $2\ \mu\text{m}$  Ultrabroad spectra and laser operation of Tm:GdScO<sub>3</sub> crystal [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2021, 143: 107345-1-6.
- [ 4 ] PENG F, LIU W P, LUO J Q, *et al.* Study of growth, defects and thermal and spectroscopic properties of Dy:GdScO<sub>3</sub> and Dy, Tb:GdScO<sub>3</sub> as promising  $578\text{ nm}$  laser crystals [J]. *CrystEngComm*, 2018, 20(40): 6291-6299.
- [ 5 ] YAMAJI A, KOCHURIKHIN V, FUJIMOTO Y, *et al.* Optical properties and radiation response of Ce<sup>3+</sup>-doped GdScO<sub>3</sub> crystals [J]. *Phys. Status Solidi (c)*, 2012, 9(12): 2267-2270.
- [ 6 ] P N R S, PANDA D P, SUNDARESAN A. Switchable and nonswitchable polarization in doubly ordered perovskites Na-LnCoWO<sub>6</sub> (Ln = Er, Tm, Yb, and Lu) [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2021, 125(19): 10803-10809.
- [ 7 ] 赵亚洁, 盛贵章, 郑捷元, 等. 铜基钙钛矿材料及其研究进展 [J]. *新能源进展*, 2022, 10(3): 233-243.  
ZHAO Y J, SHENG G Z, ZHENG J Y, *et al.* Research progress on copper-based perovskite materials [J]. *Adv. New Renew. Energy*, 2022, 10(3): 233-243. (in Chinese)
- [ 8 ] MANSLEY Z R, MIZZI C A, KOIRALA P, *et al.* Structure of the (110) LnScO<sub>3</sub> (Ln=Gd, Tb, Dy) surfaces [J]. *Phys. Rev. Mater.*, 2020, 4(4): 045003-1-6.
- [ 9 ] SHENG J M, KAN X C, GE H, *et al.* Low temperature magnetism in the rare-earth perovskite GdScO<sub>3</sub> [J]. *Chin. Phys. B*, 2020, 29(5): 057503-1-5.
- [ 10 ] WANG D H, HOU W T, LI N, *et al.* Growth, spectroscopic properties and crystal field analysis of Cr<sup>3+</sup> doped GdScO<sub>3</sub> crystal [J]. *Opt. Mater. Express*, 2019, 9(11): 4218-4227.
- [ 11 ] 周慧丽, 吴锋, 张志宏, 等. Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 荧光材料的上转换发光及其温度传感特性 [J]. *发光学报*, 2022, 43(2): 192-200.  
ZHOU H L, WU F, ZHANG Z H, *et al.* Upconversion luminescence and temperature sensing characteristics of Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> phosphor [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(2): 192-200. (in Chinese)
- [ 12 ] 张志宏, 周慧丽, 吴锋, 等. Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 LuYO<sub>3</sub> 上转换荧光温度传感特性 [J]. *发光学报*, 2021, 42(12): 1872-1881.  
ZHANG Z H, ZHOU H L, WU F, *et al.* Temperature sensing characteristics of up-conversion luminescence in Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped LuYO<sub>3</sub> phosphor [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(12): 1872-1881. (in Chinese)
- [ 13 ] JIA J H, KE Y J, ZHANG X X, *et al.* Giant magnetocaloric effect in the antiferromagnet GdScO<sub>3</sub> single crystal [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 803: 992-997.
- [ 14 ] YAN W L, SUN Y J, WANG Z Y, *et al.* Growth and spectroscopic analyses of Yb, Ho:CaYAlO<sub>4</sub> disordered crystal for  $\sim 3\ \mu\text{m}$  mid-infrared laser [J]. *J. Lumin.*, 2021, 236: 118067.
- [ 15 ] WANG X L, WANG X J, DONG J. Sub-nanosecond, high peak power Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG/YVO<sub>4</sub> passively Q-switched Raman micro-laser operating at  $1134\text{ nm}$  [J]. *J. Lumin.*, 2021, 234: 117955.

- [ 16 ] LIANG H Z, LEI W C, LIU S X, *et al.* Color tunable up-conversion luminescence characteristics of Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup> tri-doped fluorosilicate glass potentially used in WLED field [J]. *Opt. Mater.*, 2021, 119: 111320-1-8.
- [ 17 ] WANG H, PANG T, TIAN Y, *et al.* Brightness attenuation mechanisms of Er<sup>3+</sup> self-sensitized upconversion nanocrystals under 1.5 μm pumping [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2021, 538: 148084-1-9.
- [ 18 ] DAI Y, ZHANG Z H, SU L B, *et al.* Growth of high-quality Yb<sup>3+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> single crystal fiber by laser heated pedestal growth method [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2021, 36(7): 761-765.
- [ 19 ] 邹金阁, 黄得财, 梁思思, 等. Cr<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>共掺杂 LaSc<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>近红外荧光粉的发光与器件性能 [J]. *发光学报*, 2021, 42(6): 793-803.  
WU J M, HUANG D C, LIANG S S, *et al.* Photoluminescence properties and device performance of Cr<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> co-doped LaSc<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> near infrared phosphors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(6): 793-803. (in Chinese)
- [ 20 ] LENGYEL K, TICHY-RÁCS É, TIMPMANN K, *et al.* Cooperative luminescence of Yb<sup>3+</sup> ion pairs in Li<sub>6</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>:Yb single crystals [J]. *J. Lumin.*, 2021, 230: 117732-1-9.
- [ 21 ] PAUL DAVID S, JAMBUNATHAN V, YUE F X, *et al.* Diode pumped cryogenic Yb:Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser in continuous-wave and pulsed regime [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2021, 135: 106720.
- [ 22 ] PETROV V A, PETROV V V, KUPTSOV G V, *et al.* YAG:Yb crystal with non-linear doping ions distribution as promising active element for high average power laser systems [J]. *Laser Phys.*, 2021, 31(3): 035003-1-6.
- [ 23 ] 金叶, 李坤, 罗旭, 等. Sc<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>的上转换发光及其温度传感特性 [J]. *发光学报*, 2021, 42(1): 91-97.  
JIN Y, LI K, LUO X, *et al.* Upconversion luminescence and temperature sensing properties for Sc<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(1): 91-97. (in Chinese)
- [ 24 ] 何旭, 吴亚楠, 蒋越宁, 等. 适用于近红外荧光/核磁双模成像的 GdF<sub>3</sub>:Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>@NaGdF<sub>4</sub> 纳米材料 [J]. *发光学报*, 2022, 43(3): 350-358.  
HE X, WU Y N, JIANG Y N, *et al.* GdF<sub>3</sub>:Nd<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>@NaGdF<sub>4</sub> nanomaterials for near infrared fluorescence and magnetic resonance dual-mode imaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(3): 350-358. (in Chinese)
- [ 25 ] 杨洁, 赵建斌, 刘义尹, 等. 镱钠共掺杂氟化钙锶混晶近红外光谱与激光参数 [J]. *发光学报*, 2022, 43(3): 341-349.  
YANG J, ZHAO J B, LIU Y Y, *et al.* Near-infrared spectra and laser parameters of Yb<sup>3+</sup> and Na<sup>+</sup> codoped CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub> crystal [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(3): 341-349. (in Chinese)
- [ 26 ] 宁凯杰, 张庆礼, 周鹏宇, 等. Yb<sup>3+</sup>:Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>晶体的结构和光谱性能 [J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 128102-1-8.  
NING K J, ZHANG Q L, ZHOU P Y, *et al.* Structure and spectral properties of Yb<sup>3+</sup>:Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> crystal [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2012, 61(12): 128102-1-8. (in Chinese)
- [ 27 ] STEPHEN S K, VARGHESE T. Effect of Yb<sup>3+</sup> substitution on the structural and optical properties of Ba<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>WO<sub>4</sub> nanoparticles-NIR luminescence emissions for optical communication and bioanalyses [J]. *Mater. Charact.*, 2021, 174: 110985.
- [ 28 ] WANG W, JIANG B X, FENG T, *et al.* Broadening emission band of Yb:LuScO<sub>3</sub> transparent ceramics for ultrashort pulse laser [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2021, 104(11): 6064-6073.
- [ 29 ] LIU Z Y, TOCI G, PIRRI A, *et al.* Fabrication, microstructures, and optical properties of Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser ceramics from co-precipitated nano-powders [J]. *J. Adv. Ceram.*, 2020, 9(6): 674-682.
- [ 30 ] SOHARAB M, BHAUMIK I, BHATT R, *et al.* Investigation of optical and spectroscopic properties of Nd co-doped Yb:YVO<sub>4</sub> single crystals grown by OFZ method [J]. *J. Lumin.*, 2021, 231: 117736.
- [ 31 ] MA J, YANG F, GAO W L, *et al.* Sub-five-optical-cycle pulse generation from a Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO<sub>4</sub> laser [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(10): 2328-2331.
- [ 32 ] DEMIRBAS U, KELLERT M, THESINGA J, *et al.* Comparative investigation of lasing and amplification performance in cryogenic Yb:YLF systems [J]. *Appl. Phys. B*, 2021, 127(3): 46-1-10.
- [ 33 ] CHEN J X, DONG L, LIU F F, *et al.* Investigation of Yb:CaWO<sub>4</sub> as a potential new self-Raman laser crystal [J]. *Cryst. EngComm*, 2021, 23(2): 427-435.
- [ 34 ] ZHAO Y Q, WANG Q G, MENG L H, *et al.* Anisotropy of the thermal and laser output properties in Yb, Nd:Sc<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> crystal [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2021, 19(4): 041405-1-5.
- [ 35 ] VOLOKITINA A, DAVID S P, LOIKO P, *et al.* Monoclinic zinc mon tungstate Yb<sup>3+</sup>, Li<sup>+</sup>:ZnWO<sub>4</sub>: Part II. Polarized



- spectroscopy and laser operation [J]. *J. Lumin.*, 2021, 231: 117811.
- [36] JIANG B B, ZHENG L H, JIANG D P, *et al.* Growth and optical properties of ytterbium and rare earth ions codoped CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub> eutectic solid-solution ( $RE = Y^{3+}, Gd^{3+}, La^{3+}$ ) [J]. *J. Rare Earths*, 2021, 39(4): 390-397.
- [37] BASYROVA L, LOIKO P, MAKSIMOV R, *et al.* Comparative study of Yb:Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> and Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser ceramics produced from laser-ablated nanopowders [J]. *Ceram. Int.*, 2021, 47(5): 6633-6642.
- [38] 李加红, 孙贵花, 张庆礼, 等. 退火气氛对 GdScO<sub>3</sub>和 Yb:GdScO<sub>3</sub>晶体的结构和光谱性质的影响 [J]. *物理学报*, 2022, 71(16): 164206-1-7.
- LI J H, SUN G H, ZHANG Q L, *et al.* Effect of annealing atmosphere on the structure and spectral properties of GdScO<sub>3</sub> and Yb:GdScO<sub>3</sub> crystals [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2022, 71(16): 164206-1-7. (in Chinese)
- [39] WANG A Y, ZHANG J, YE S, *et al.* Optimized growth and laser application of Yb:LuAG single-crystal fibers by micro-pulling-down technique [J]. *Crystals*, 2021, 11(2): 78-1-10.
- [40] PAN Y X, LIN H, LIU J, *et al.* Fabrication and spectral properties of Yb, Ho:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics [J]. *Opt. Mater.*, 2021, 112: 110479-1-6.
- [41] ZENG H J, LIN H F, LIN Z L, *et al.* Diode-pumped sub-50-fs Kerr-lens mode-locked Yb:GdYCOB laser [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(9): 13496-13503.
- [42] ÁLVAREZ-PÉREZ J O, CANO-TORRES J M, RUIZ A, *et al.* A roadmap for laser optimization of Yb:Ca<sub>3</sub>(NbGa)<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-CNGG-type single crystal garnets [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(13): 4628-4642.
- [43] 相国涛, 杨梦琳, 刘臻, 等. NaScF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>纳米颗粒荧光温敏特性 [J]. *发光学报*, 2022, 43(5): 684-690.
- XIANG G T, YANG M L, LIU Z, *et al.* Temperature sensing properties in NaScF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> nanoparticles [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(5): 684-690. (in Chinese)
- [44] 刘翠翠, 林楠, 马晓宇, 等. 带有非吸收窗口的高性能 InGaAs/AlGaAs 量子阱激光二极管 [J]. *发光学报*, 2022, 43(1): 110-118.
- LIU C C, LIN N, MA X Y, *et al.* High performance InGaAs/AlGaAs quantum well semiconductor laser diode with non-absorption window [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(1): 110-118. (in Chinese)
- [45] ZHANG Y H, LI S M, DU X, *et al.* Yb:GdScO<sub>3</sub> crystal for efficient ultrashort pulse lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(15): 3641-3644.
- [46] GUPTA S K, GROVER V, SHUKLA R, *et al.* Exploring pure and RE co-doped (Eu<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup> and Dy<sup>3+</sup>) gadolinium scandate: luminescence behaviour and dynamics of energy transfer [J]. *Chem. Eng. J.*, 2016, 283: 114-126.
- [47] CHENEBUAH E T, NGANBE M, TCHAGANG A B. Comparative analysis of machine learning approaches on the prediction of the electronic properties of perovskites: a case study of ABX<sub>3</sub> and A<sub>2</sub>BB'X<sub>6</sub> [J]. *Mater. Today Commun.*, 2021, 27: 102462.
- [48] RIETVELD H M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures [J]. *J. Appl. Cryst.*, 1969, 2(2): 65-71.
- [49] RIETVELD H M. Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement [J]. *Acta Cryst.*, 1967, 22(1): 151-152.
- [50] 柳欢, 高薪羽, 白杰, 等. 钙钛矿氧化物 ABO<sub>3</sub>的结构调控与电催化性能研究进展 [J]. *应用化工*, 2021, 50(12): 3498-3503.
- LIU H, GAO X Y, BAI J, *et al.* Advances in structural regulation and electrocatalytic properties of ABO<sub>3</sub> perovskite oxides [J]. *Appl. Chem. Ind.*, 2021, 50(12): 3498-3503. (in Chinese)
- [51] 杨洁, 皮明雨, 张丁可, 等. 低维钙钛矿光电探测器研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(6): 755-773.
- YANG J, PI M Y, ZHANG D K, *et al.* Recent progress on low-dimensional perovskite photodetectors [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(6): 755-773. (in Chinese)
- [52] 周港杰, 胡艺莹, 谭林玲, 等. 碲掺杂钙-铝-锗酸盐玻璃宽带近红外发光及其调控机理 [J]. *发光学报*, 2022, 43(1): 51-57.
- ZHOU G J, HU Y X, TAN L L, *et al.* Broadband near-infrared luminescence and regulation mechanism of tellurium-doped calcium-aluminum-germanate glass [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(1): 51-57. (in Chinese)
- [53] 杨立群, 马晓辉, 郑士建, 等. 柔性钙钛矿太阳能电池中电极材料和电荷传输材料的研究进展 [J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1175-1194.

- YANG L Q, MA X H, ZHENG S J, *et al.* Research progress on electrode materials and charge transport materials in flexible perovskite solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(10): 1175-1194. (in Chinese)
- [ 54 ] 胡强, 白雪, 宋宏伟, 等. 稀土离子掺杂钙钛矿纳米晶的光学性质和应用 [J]. *发光学报*, 2022, 43(1): 8-25.  
HU Q, BAI X, SONG H W, *et al.* Rare earth ion doped perovskite nanocrystals [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(1): 8-25. (in Chinese)
- [ 55 ] 时秋峰, 王磊, 郭海洁, 等. 真空紫外光及 X 射线激发下 Pr<sup>3+</sup> 掺杂 Ba<sub>3</sub>La(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 发光性质 [J]. *发光学报*, 2021, 42(11): 1756-1762.  
SHI Q F, WANG L, GUO H J, *et al.* Luminescence properties of Pr<sup>3+</sup> doped in Ba<sub>3</sub>La(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> with vacuum ultraviolet and X-ray excitation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(11): 1756-1762. (in Chinese)
- [ 56 ] 张思远. 稀土离子的光谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
ZHANG S Y. *Spectroscopy of Rare Earth Ions* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [ 57 ] 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]. *光谱学与光谱学分析*, 2004, 24(10): 1157-1160.  
ZHANG Q L, XIAO J Z, SUN D L, *et al.* Crystal growth and spectral parameter computation of Yb:YAG [J]. *Spectrosc. Spectral Anal.*, 2004, 24(10): 1157-1160. (in Chinese)
- [ 58 ] 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.  
XU J, XU X D, SU L B. *Ytterbium-doped Laser Crystal Materials* [M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005. (in Chinese)
- [ 59 ] ZHANG Q L, SUN G, GAO J Y, *et al.* Profile function properties & optical transition formulae [J]. *Chin. Phys. B*, 2017, 26(7): 077803-1-5.



李加红(1977-),男,云南会泽人,博士研究生,副研究员,2013年于云南师范大学获得硕士学位,主要从事光学材料的晶体生长技术及发光性能等领域的研究。

E-mail: lijiahong009@126.com



张庆礼(1973-),男,云南会泽人,博士研究生,研究员,博士生导师,2001年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事光学材料的晶体生长技术及发光物理等领域的研究。

E-mail: zql@aiofm.ac.cn