

高光学质量 Yb:YAG 透明陶瓷的制备及激光参数研究

王晴晴^{1,2}, 石云¹, 冯亚刚^{1,3}, 刘欣^{1,3}, 陈昊鸿¹, 谢腾飞¹, 李江^{1,3}

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 透明光功能无机材料重点实验室, 上海 201899; 2. 蚌埠学院 理学院, 硅基新材料工程技术研究中心, 蚌埠 233030; 3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要: 以高纯 Y_2O_3 , $\alpha-Al_2O_3$, Yb_2O_3 粉体作为原料, 采用固相反应和真空烧结法(1750 °C, 30 h)制备了高光学质量的 Yb:YAG 透明陶瓷。5.0at% Yb:YAG 陶瓷中 Yb^{3+} 的实测浓度为 $6.41 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 晶胞密度为 4.65 g/cm^3 。本工作重点研究了 Yb:YAG 陶瓷的显微结构、光谱特性和激光性能参数。场发射扫描电镜(FESEM)结果表明, Yb:YAG 陶瓷的结构均匀致密、晶界干净平直, 平均晶粒尺寸为 $(19 \pm 3) \mu\text{m}$ 。该陶瓷样品(厚度为 4.0 mm)在 400 nm 处的直线透过率为 82.5%, 在 1100 nm 处的透过率为 85.2%。泵浦波长 940 nm 处的泵浦饱和光强最小, 激光波长 1030 nm 处的泵浦阈值功率最低, 940 nm 泵浦 1030 nm 激光的品质因子为 $1.02 \times 10^{-22} \text{ cm} \cdot \text{s}$ 。通过计算增益截面表明 Yb:YAG 陶瓷宽带可调谐, 是理想的激光增益材料。

关键词: Yb:YAG 陶瓷; 反应烧结; 光谱特性; 激光性能参数

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

Fabrication and Laser Parameters of Yb:YAG Transparent Ceramics with High Optical Quality

WANG Qing-Qing^{1,2}, SHI Yun¹, FENG Ya-Gang^{1,3}, LIU Xin^{1,3},
CHEN Hao-Hong¹, XIE Teng-Fei¹, LI Jiang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Transparent Opto-functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China; 2. Engineering Technology Research Center for New Silicon-based Materials, Faculty of Science, Bengbu University, Bengbu 233030, China; 3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Yb:YAG transparent ceramics with high optical quality were fabricated by solid-state reaction and vacuum sintering method (1750 °C × 30 h) using high-purity Y_2O_3 , $\alpha-Al_2O_3$ and Yb_2O_3 powders as raw materials. The measured concentration of Yb^{3+} in 5.0at% Yb:YAG ceramics is $6.41 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, and the cell density is 4.65 g/cm^3 . The microstructures, spectral characteristics and laser performance parameters of Yb:YAG ceramics were studied in this work. FESEM results show that Yb:YAG ceramics have uniform and compact structure, clean and straight grain boundaries, and the average grain size is about $(19 \pm 3) \mu\text{m}$. The in-line transmittance of Yb:YAG ceramics with thickness of 4.0 mm reaches 82.5% at 400 nm and 85.2% at 1100 nm. The minimum pump saturation light intensity occurs at 940 nm, and the pump threshold power at 1030 nm is the lowest. The quality factor of 1030 nm laser

收稿日期: 2019-02-14; 收到修改稿日期: 2019-03-21

基金项目: 安徽省教育厅国内访学项目(gxgnfx2018059); 蚌埠学院自然科学基金项目(2018ZR06zd); 安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2018A0573); 国家自然科学基金(61575212); 中国科学院前沿基础重点项目(QYZDB-SSW-JSC022) Domestic Visiting Program of Anhui Education Department (gxgnfx2018059); Natural Science Project of Bengbu University (2018ZR06zd); Natural Science Project of Anhui Education Department (KJ2018A0573); National Natural Science Foundation of China (61575212); Key Research Project of the Frontier Science of the Chinese Academy of Sciences (QYZDB-SSW-JSC022)

作者简介: 王晴晴(1985-), 女, 博士, 讲师. E-mail: sunny3406@163.com

WANG Qing-Qing (1985-), female. PhD, lecturer. E-mail: sunny3406@163.com

通讯作者: 李江, 研究员. E-mail: lijiaang@mail.sic.ac.cn

LI Jiang, professor. E-mail: lijiaang@mail.sic.ac.cn

pumped at 940 nm is 1.02×10^{-22} cm \cdot s. By calculating the gain cross section, it is indicated that Yb:YAG ceramics can be tuned broadband, and are ideal laser gain media.

Key words: Yb:YAG ceramics; reactive sintering; spectral properties; laser performance parameters

高性能激光增益材料是激光技术发展和应用的核心与基础,继激光晶体和玻璃之后,透明激光陶瓷作为新一代激光材料引起了国内外的广泛关注^[1]。1995年, Ikesue等^[2]用固相反应法制备了Nd:YAG透明陶瓷并首次获得了激光输出。国内对透明陶瓷的研究相对较晚,2006年,中国科学院上海硅酸盐研究所成功制备出高质量Nd:YAG透明陶瓷,并在国内首次实现了激光输出^[3]。与传统的Nd:YAG相比,Yb:YAG具有很多优势^[4-7]:只有一个激发态,因此不存在上转换和激发态吸收,转换效率高;Yb³⁺的有效离子半径更接近Y³⁺,所以高浓度掺杂时不会像Nd³⁺一样产生浓度淬灭现象;吸收带宽且分布在900到1100 nm之间,更容易与激光二极管(LD)的泵浦波长相耦合;荧光寿命约是Nd:YAG的三倍多。因此Yb:YAG陶瓷的研究引起了国内外的重视。2003年, Takaichi等^[8]采用纳米晶技术和真空烧结法制备了1.0at% Yb:YAG陶瓷,并首次实现了LD泵浦Yb:YAG陶瓷345 mW的激光输出。2007年,吴玉松等^[9]制备了高质量的Yb:YAG陶瓷,并采用LD泵浦Yb:YAG陶瓷实现了268 mW的连续激光输出。2013年, Hostasa等^[10]采用固相反应烧结法制备了10.0at% Yb:YAG陶瓷,实现了LD泵浦Yb:YAG陶瓷的6 W激光输出。2016年, Ikesue等^[11]在不添加SiO₂等烧结添加剂的情况下首次成功制备10.0at% Yb:YAG陶瓷,由该陶瓷制成的薄圆盘激光器最大输出功率达到了1.8 kW。在高功率固体激光领域,Yb:YAG陶瓷是比Nd:YAG陶瓷更具有潜力的激光增益介质^[12]。

目前国内外对Yb:YAG陶瓷已经有了大量的研究^[13],但是关于Yb:YAG陶瓷的激光性能参数的研究相对较少,为了更好地设计出高效率和高功率的Yb:YAG陶瓷激光器,有必要对高光学质量Yb:YAG陶瓷的激光性能参数进行系统的研究。本研究选择固相反应加真空烧结法制备5.0at% Yb:YAG透明陶瓷,研究陶瓷样品的显微结构和光谱特性,并计算Yb:YAG陶瓷的吸收截面、发射截面、增益截面、饱和光强、阈值泵浦功率和品质因子等激光性能参数,为Yb:YAG陶瓷激光器的深入研究和应用提供理论支持。

1 实验方法

采用高纯商业Y₂O₃、 α -Al₂O₃和Yb₂O₃粉体为原料,按照化学计量(Yb_{0.05}Y_{0.95})₃Al₅O₁₂进行配比,以高纯MgO和正硅酸乙酯(TEOS)作为烧结助剂,以无水乙醇为球磨介质,混合粉体用行星式球磨机球磨12 h。混合浆料干燥后过200目(75 μ m)筛,用钢模在40 MPa下压制成 ϕ 25 mm的陶瓷素坯,再用200 MPa进行冷等静压成型。在高真空钨丝炉中对陶瓷素坯进行1750 $^{\circ}$ C \times 30 h烧结,然后在空气中进行1450 $^{\circ}$ C \times 10 h退火处理以消除氧空位和残余应力。得到的Yb:YAG陶瓷双面抛光至厚度为4.0 mm。

根据X射线衍射图谱(XRD,日本, Rigaku,型号D/max 2550V, 18kW转靶)计算陶瓷样品的晶胞参数;采用场发射扫描电子显微镜(FESEM,日本, Hitachi,型号S-4800)表征商业初始粉体的形貌,采用场发射扫描电子显微镜(日本, Hitachi,型号SU8200)表征陶瓷的热腐蚀抛光表面形貌;用紫外分光光度计(美国, Varian,型号Cary-5000)表征陶瓷的直线透过率和吸收光谱;用荧光光谱仪(英国, Edinburgh Instruments,型号FLS980)测量陶瓷的荧光光谱;Yb:YAG陶瓷中Yb³⁺的实际浓度用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国, Agilent,型号Agilent725)测量。

2 结果与讨论

如图1所示为高纯商业 α -Al₂O₃、Y₂O₃和Yb₂O₃粉体的FESEM形貌照片。从图中可以看出, α -Al₂O₃粉体属于亚微米粉,粉体颗粒团聚少、分散性较好;而Y₂O₃和Yb₂O₃粉体呈片状,团聚较严重。

图2为抛光Yb:YAG陶瓷热腐蚀(1450 $^{\circ}$ C, 3 h)后的表面FESEM形貌。在晶界和晶粒内观察不到气孔的存在,晶粒分布均匀,结构致密。通过截线法统计了200多个晶粒的尺寸,得到陶瓷样品的平均晶粒尺寸为(19 \pm 3) μ m。

图3为Yb:YAG陶瓷的XRD图谱。利用布拉格方程及立方晶系的晶面间距公式^[14]计算陶瓷的晶胞参数,公式表示为:

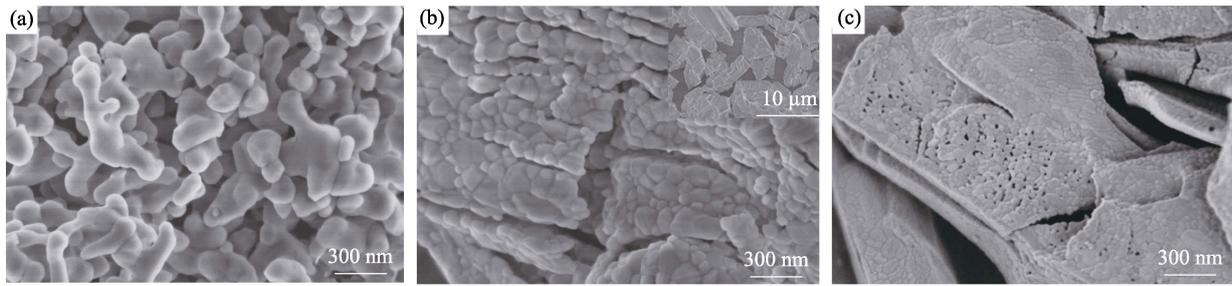


图 1 商业氧化物粉体的 FESEM 照片

Fig. 1 FESEM microstructures of commercial oxide powders
(a) α - Al_2O_3 ; (b) Y_2O_3 ; (c) Yb_2O_3

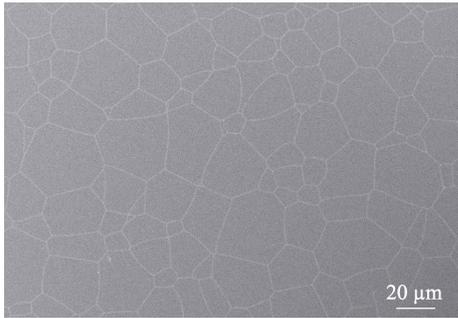


图 2 Yb:YAG 陶瓷热腐蚀表面的 FESEM 照片
Fig. 2 FESEM microstructure of the thermally etched surface of Yb:YAG ceramics

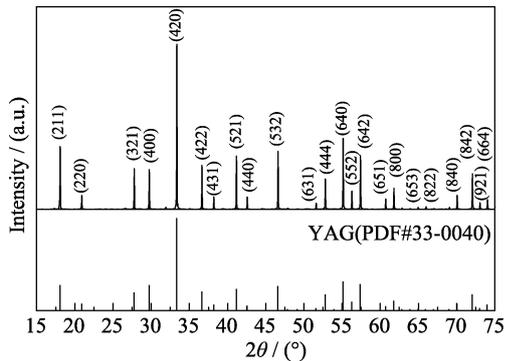


图 3 Yb:YAG 陶瓷的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD pattern of Yb:YAG ceramics

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad d = \frac{1}{\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2) / a^2}} \quad (1)$$

其中, d 、 θ 、 a 分别为晶面间距、衍射角和晶胞参数, $n=1$ 为衍射级数, $\lambda=0.15406 \text{ nm}$ 为 X 射线波长, (hkl) 为密勒指数。通过拟合所有峰位的衍射角计算得到 Yb:YAG 陶瓷的晶胞参数为 1.20004 nm , 晶胞体积为 $1.7282 \times 10^{-21} \text{ cm}^3$; 根据电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-AES) 测得的 Yb^{3+} 的实际浓度为 $6.41 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 计算得到陶瓷的晶胞密度约为 4.65 g/cm^3 。

图 4 为 Yb:YAG 透明陶瓷(厚度 4.0 mm) 的直线透过率曲线。从图中可以看出, 随着波长向短波方

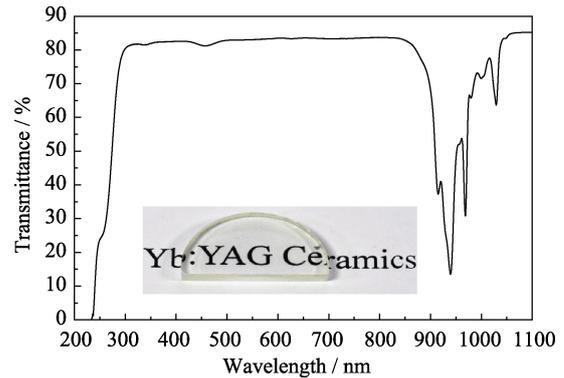


图 4 Yb:YAG 陶瓷的直线透过率曲线
Fig. 4 In-line transmittance curve of Yb:YAG ceramics

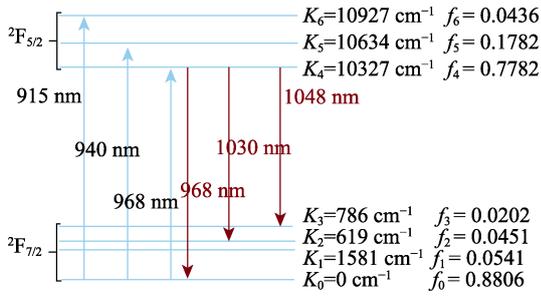
向移动, Yb:YAG 陶瓷在可见光波段的透过率下降较小, 400 nm 处透过率为 82.5% , 在 1100 nm 处的透过率为 85.2% 。在可见光范围($300\sim 500 \text{ nm}$) 出现部分波长的吸收是由退火不完全导致部分 Yb^{2+} 残留引起的。

为了深入研究 Yb:YAG 陶瓷的光谱特性和激光性能参数, 对 Yb:YAG 激光器中可能存在的激光运行机制进行简单分析。如图 5 所示, Yb^{3+} 在 YAG 晶体中是二能级系统: 基态 $^2F_{7/2}$ 和激发态 $^2F_{5/2}$ 。两个能级在 YAG 晶体场作用下产生 Stark 分裂^[15]。常见的泵浦波长分别为 915 、 940 和 968 nm , 常见的激光波长分别为 968 、 1030 和 1048 nm 。如图 5 中的 $K_i (i=0,1,2,3,4,5,6)$ 表示各子能级的能量, $f_i (i=0,1,2,3)$ 和 $f_i (i=4,5,6)$ 表示基态和激发态中各子能级粒子数分别占基态和激发态总粒子数的比例, 数值由玻尔兹曼分布律计算:

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} \exp \left[-\frac{(E_i - E_j)}{kT} \right] \quad (2)$$

$$f_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i} \quad (3)$$

其中, n_i 、 g_i 、 E_i 分别表示第 i 个子能级的粒子数密度、简并度和能量, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。

图 5 YAG 晶体中 Yb³⁺ 的能级结构Fig. 5 Energy level structure of Yb³⁺ in YAG crystal

激光波长 1030 和 1048 nm 是由激发态子能级 K_4 向基态子能级 K_2 和 K_3 跃迁的结果, f_2 和 f_3 分别为 4.51% 和 2.02%, 占基态能级粒子总数的比例很低, 因此粒子跃迁回避了三能级系统粒子数反转的困难, 激光运行机制类似于四能级系统, 被称为准三能级系统^[16]。激光发射波长 968 nm 由激发态子能级 K_4 向基态子能级 K_0 跃迁产生, f_0 高达 88.06%, 激光运行机制类似于三能级系统, 要想实现粒子数反转并最终实现激光输出需要很高的泵浦功率。因此 Yb:YAG 激光器通常实现 1030 和 1048 nm 激光跃迁, 很少实现 968 nm 激光跃迁。

图 6 为 Yb:YAG 透明陶瓷的吸收截面和发射截面, 从图中可以看出主吸收峰分别位于 915、940、968 和 1030 nm, 其中 940 nm 处的谱线宽度 (FWHM) 约为 20 nm, 说明 Yb:YAG 陶瓷激光器适合 LD 泵浦且对 LD 的光谱带宽要求不高。主发射峰分别位于 968、1030 和 1048 nm, 激光波长 1030 nm 处的谱线宽度约为 11 nm。

吸收系数可表示为:

$$\alpha = \frac{2.303 \lg(I_0 / I)}{L} \quad (4)$$

式中, $\lg(I_0 / I)$ 为光密度, L 为样品厚度。

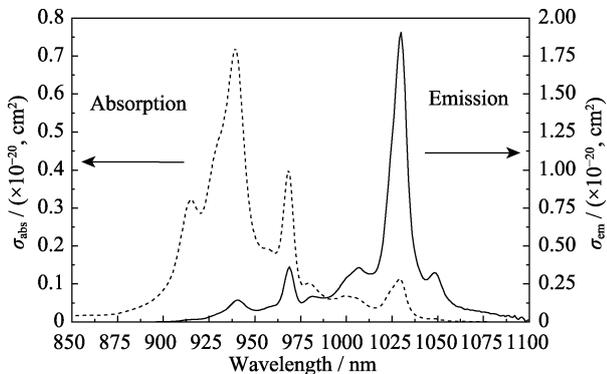


图 6 Yb:YAG 陶瓷吸收截面和发射截面

Fig. 6 Absorption and emission cross sections of Yb:YAG ceramics

吸收截面可表示为:

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\alpha}{N} \quad (5)$$

式中, N 为 Yb:YAG 陶瓷中 Yb³⁺ 的浓度。

发射截面可利用 McCumbei 理论计算^[17], 公式表示为:

$$\sigma_{\text{em}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \frac{Z_l}{Z_u} \exp[(E_0 - h\nu) / kT] \quad (6)$$

$$Z = \sum_i g_i \exp(-E_i / kT) \quad (7)$$

其中, $E_0 = 10327 \text{ cm}^{-1}$ 为激光上下能级的最低能级差, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, g_i 、 E_i 分别表示第 i 个子能级的简并度和能量。 $Z_l = 1.136$ 和 $Z_u = 1.285$ 分别为激光下能级和激光上能级的配分函数。

从图 6 中得到泵浦波长 915、940 和 968 nm 处的吸收截面分别为 3.22×10^{-21} 、 7.21×10^{-21} 和 $3.99 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$; 激光波长 968、1030 和 1048 nm 处的发射截面分别为 3.23×10^{-21} 、 19.1×10^{-21} 和 $3.23 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。

通过对 Yb:YAG 透明陶瓷的吸收截面和发射截面可以进一步预测激光性能参数, 进而对设计高功率 Yb:YAG 陶瓷激光器提供理论依据。

激光产生过程中存在增益饱和现象, 当入射光强与饱和光强可相比拟时才会稳态振荡输出激光, 因此小的饱和光强或饱和光通量意味着更容易实现激光输出。激光跃迁饱和光通量表示为:

$$F_{\text{ext}}(\lambda_{\text{ex}}) = \frac{hc}{\sigma_{\text{ex}}(\lambda_{\text{ex}}) \lambda_{\text{ex}}} \quad (8)$$

泵浦跃迁饱和光强表示为:

$$I_{\text{sat}} = \frac{hc}{\lambda_p \sigma_{\text{abs}}(\lambda_p) \tau_s} \quad (9)$$

式中, λ_{ex} 和 $\sigma_{\text{ex}}(\lambda_{\text{ex}})$ 分别为激光波长和相对应的发射截面; λ_p 和 $\sigma_{\text{abs}}(\lambda_p)$ 分别为泵浦波长和泵浦波长处的吸收截面, $\tau_s = 1.15 \text{ ms}$ 为 Yb³⁺ 在 YAG 基质中的荧光寿命^[17]。

在激光波长净透过时, 激活离子最小分数意味着产生激光所需的最小受激辐射粒子数所占的比例, 小的激活离子最小分数意味着更容易实现激光输出。公式表示为:

$$\beta_{\text{min}} = \frac{\sigma_{\text{abs}}(\lambda_{\text{ex}})}{\sigma_{\text{abs}}(\lambda_{\text{ex}}) + \sigma_{\text{em}}(\lambda_{\text{ex}})} \quad (10)$$

式中, $\sigma_{\text{abs}}(\lambda_{\text{ex}})$ 和 $\sigma_{\text{em}}(\lambda_{\text{ex}})$ 分别为激光波长处的吸收截面和发射截面。

在不考虑谐振腔损耗的情况下, 达到泵浦阈值

功率时所需吸收的最小泵浦功率可表示为:

$$I_{\min} = \beta_{\min} I_{\text{sat}} \quad (11)$$

品质因子越大意味着更适合固体激光的输出, 公式表示为^[18]:

$$M = \sigma_{\text{abs}}(\lambda_p) \sigma_{\text{em}}(\lambda_{\text{ex}}) \tau_s N \quad (12)$$

表 1 列出了不同泵浦波长和激光波长对应的几种激光运行机制的性能参数。从表中可以看出三个泵浦波长中 940 nm 的泵浦饱和光强最小, 低至 25.5 kW·cm⁻², 对应的泵浦阈值功率也最小, 因此采用 940 nm 作为泵浦波长更容易实现激光输出; 三个激光波长中, 1030 nm 的饱和光通量最低, 对应的泵浦阈值功率也最低。采用 940 nm 作为泵浦波长时, 输出 968 nm 激光需要的泵浦阈值功率约是 1030 nm 激光波长的 9.3 倍, 品质因子约是 1030 nm 处的五分之一到六分之一, 这是因为 968 nm 激光输出类似于三能级系统, 需要很高的泵浦阈值, 且从 Yb³⁺ 的光谱中也可以看出 968 nm 处的发射光强更弱且自吸收更强, 因此较难实现激光的输出。采用 940 nm 作为泵浦波长时, 输出 1030 nm 激光需要的泵浦阈值功率约是 1048 nm 激光波长的 2.2 倍, 但是品质因子约是 1048 nm 处的 5.9 倍, 原因是 1030 nm 处存在自吸收所以需要更高的泵浦功率才能实现激光的输出, 但是 1030 nm 处的发射截面远大于 1048 nm 处的发射截面。

根据上述激光性能参数可求出 Yb:YAG 的增益截面, 表示为:

$$\sigma_{\text{gain}}(\lambda) = \beta \sigma_{\text{em}}(\lambda) - (1 - \beta) \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \quad (13)$$

其中, β 为在激光波长净透过时所需要激发的激活离子分数。

所有激光发射波长中激活离子分数最小值为 0.0259, 此时 1048 nm 处的增益截面为 0。计算在激

活离子分数分别为 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10 时 Yb:YAG 陶瓷的增益截面。从图 7 中可以看出, 随着激活离子分数的增加, 增益截面在更大范围内表现为正值, 特别是当 β 达到 0.06 时, 激光发射波长 1030 nm 处的增益截面由负值变为正值, 此时增益截面保持了约 70 nm 的正值, 当 $\beta=0.10$ 时增益截面保持了约 80 nm 的正值。

3 结论

采用固相反应和真空烧结法制备了 5.0at% Yb:YAG 透明陶瓷, 并研究了陶瓷的显微结构、光谱特性和激光性能参数。本研究通过 1750 °C, 30 h 真空烧结制备得到陶瓷的平均晶粒尺寸为(19±3) μm, 晶胞密度为 4.65 g/cm³, 在 400 nm 处的透过率达到 82.5%, 陶瓷具有很好的光学质量。通过计算不同波长处的吸收截面和发射截面, 进而计算了不同激光运行机制下的饱和光强、阈值泵浦功率和品质因子等激光参数, 得出 Yb:YAG 陶瓷激光器中品质因子最高的模式为 940 nm 泵浦 1030 nm 激光, 其次是 968 nm 泵浦 1030 nm 激光。当激活粒子分数为

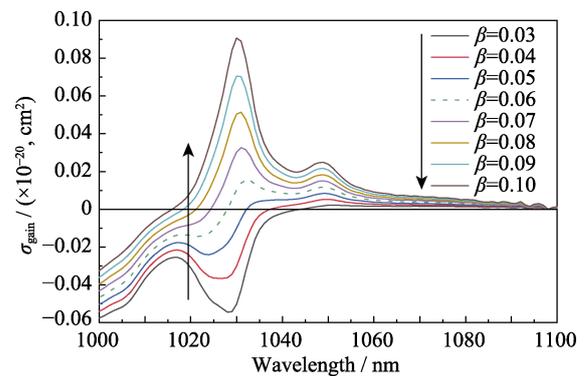


图 7 Yb:YAG 陶瓷的增益截面

Fig. 7 Gain cross sections of Yb:YAG ceramics

表 1 不同泵浦波长和激光波长处 Yb:YAG 透明陶瓷的激光性能参数
Table 1 Laser performance parameters of Yb:YAG transparent ceramics at different pump wavelengths and laser wavelengths

$\lambda_p \rightarrow \lambda_{\text{ex}}/\text{nm}$	$I_{\text{sat}}/(\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2})$	$F_{\text{ext}}(\lambda_{\text{ex}})/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\beta_{\min}/\%$	$I_{\min}/(\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2})$	$M/(\times 10^{-23}, \text{cm} \cdot \text{s})$
915→968	58.7	56.7	52.4	30.8	0.86
940→968	25.5	56.7	52.4	13.4	1.92
915→1030	58.7	10.1	5.63	3.30	4.53
940→1030	25.5	10.1	5.63	1.44	10.2
968→1030	44.8	10.1	5.63	2.52	5.62
915→1048	58.7	58.7	2.59	1.52	0.78
940→1048	25.5	58.7	2.59	0.66	1.72
968→1048	44.8	58.7	2.59	1.16	0.95

$\beta=0.06$ 时增益截面保持了约 70 nm 的正值, 具有很宽的激光波长可调谐范围。综上所述, 高光学质量 Yb:YAG 透明陶瓷是一种很有应用前景的固体激光增益材料。

参考文献:

- [1] ZHANG ZHOU, WANG HAO, TU PENG-YU, *et al.* Characterization and evaluation on mechanical property of $Mg_{0.27}Al_{2.58}O_{3.73}N_{0.27}$ transparent ceramic. *Journal of Inorganic Materials*, 2018, **33(9)**: 1006–1010.
- [2] IKESUE A, KINOSHITA T, KAMATE K, *et al.* Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, **78(4)**: 1033–1040.
- [3] PAN YU-BAI, XU JUN, WU YU-SONG, *et al.* Fabrication and laser output of Nd:YAG transparent ceramic. *Journal of Inorganic Materials*, 2006, **21(5)**: 1278–1280.
- [4] GIESEN A, HUGEL H, VOSS A, *et al.* Scalable concept for diode-pumped high-power solid state lasers. *Applied Physics B*, 1994, **58(4)**: 365–372.
- [5] XU XIAO-DONG, ZHAO ZHI-WEI, SONG PING-XIN, *et al.* Spectroscopic properties of Cr:Yb:YAG crystals. *Journal of Inorganic Materials*, 2004, **19(6)**: 1427–1430.
- [6] ZHANG H B, ZHANG Q L, WANG X, *et al.* Transition intensity calculation of Yb:YAG. *Chinese Physics B*, 2018, **27(6)**: 067801–1–6.
- [7] HE YI-FENG, XUE YAN-YAN, LIU WEN-QING, *et al.* Structure and property of Yb doped $Ca_{1-x}R_xF_{2+x}$ ($R=La, Gd$) laser crystals. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, **32(8)**: 857–862.
- [8] TAKAICHI K, YAGI H, LU J, *et al.* Yb^{3+} doped $Y_3Al_5O_{12}$ ceramics—a new solid-state laser material. *Physica Status Solidi A*, 2003, **200(1)**: R5–R7.
- [9] WU YU-SONG, PAN YU-BAI, LI JIANG, *et al.* Fabrication and laser output of transparent Yb:YAG ceramic. *Journal of Inorganic Materials*, 2007, **22(6)**: 1086–1088.
- [10] HOSTASA J, ESPOSITO L, ALDERIGHI D, *et al.* Preparation and characterization of Yb-doped YAG ceramics. *Optical Materials*, 2013, **35(4)**: 798–803.
- [11] IKESUE A, AUNG Y L. Synthesis of Yb:YAG ceramics without sintering additives and their performance. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, **100(1)**: 26–30.
- [12] 潘裕柏, 李江, 姜本学. 先进光功能透明陶瓷. 北京: 科学出版社, 2013: 47–49.
- [13] LI J, PAN Y B, ZEBG Y P, *et al.* The history, development, and future prospects for laser ceramics: a review. *International Journal Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, **39(Complete)**: 44–52.
- [14] WANG Q Q. Calculation and analysis of the lattice constant of β - Zn_4Sb_3 doped with Sm. *Journal of Bengbu University*, 2016, **5(1)**: 31–34.
- [15] YOSHIKAWA A, BOULON G, LAVERSENNE L, *et al.* Growth and spectroscopic analysis of Yb^{3+} doped $Y_3Al_5O_{12}$ fiber single crystals. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94(9)**: 5479–5488.
- [16] XIA Z C, YANG F G, QIAO L. The modeling of end pumping $Yb^{3+}:YVO_4$ quasi-three-level laser. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62(11)**: 114206–114206.
- [17] 徐军, 徐晓东, 苏良碧, 等. 掺镱激光晶体材料. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 34–35.
- [18] XU Y Y, GONG X H, CHEN Y J, *et al.* Crystal growth and optical properties of $YbAl_3(BO_3)_4$: a promising stoichiometric laser crystal. *Journal Crystal Growth*, 2003, **252(1)**: 241–245.