

# Yb·YAG 晶体的光谱和激光性能\*

杨培志 邓佩珍 徐 军 黄国松 陈 伟 乔景文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 研究了 Yb·YAG 晶体的光谱特性, 通过不同掺杂浓度的 Yb·YAG 晶体的荧光寿命的测定, 确定了 Yb<sup>3+</sup> 在 Yb·YAG 晶体中的最佳掺杂浓度, 用合作上转换机制解释了高浓度掺杂时的荧光猝灭效应, 研究了掺杂原子分数为 0.2 的晶体微片的激光性能。

**关键词** Yb·YAG 晶体, 浓度猝灭, 合作上转换。

## 1 引 言

用激光二极管泵浦的固体激光器, 因具有寿命长、不产生热光畸变而光束质量高、效率高且频率稳定性好、结构紧凑并可小型化和致密化等特点而成为固体激光器发展的主要方向之一。

Yb<sup>3+</sup> 作为能级结构最简单的激活离子, 原理上不存在激发态吸收和上转换, 由于泵浦能级靠近激光上能级, 可极大降低掺杂材料中的热负荷, 具有很高的光转换效率。随着 InGaAs 激光二极管(发射波长为 0.9~ 1.1 μm)的出现<sup>[1]</sup>, 掺 Yb<sup>3+</sup> 材料引起了人们的广泛重视<sup>[2~ 4]</sup>, 其中 Yb·YAG 由于有大的晶场分裂能、优异的热力学性能、可进行高浓度掺杂、生长工艺成熟等特点而成为掺 Yb<sup>3+</sup> 材料中的佼佼者。目前获得的 Yb·YAG 晶体的最高连续激光输出功率为 434 W, 在 10 KHz 频率下, 平均输出功率达 285 W。Payne 和 Krupke 预言, 在不久的将来激光二极管泵浦 Yb·YAG 晶体将成为 10 kW 激光器的一员<sup>[5]</sup>。

本文研究了 Yb·YAG 晶体的光谱特性, 通过不同掺杂浓度的 Yb·YAG 晶体的荧光寿命的测定, 确定了 Yb<sup>3+</sup> 在 Yb·YAG 晶体中的最佳掺杂浓度, 研究了掺杂原子分数为 0.2 的晶体的激光性能。

## 2 实 验

### 2.1 光谱测试

测试均在常温下进行。吸收光谱在 Lambda 9UV/VIS/NIR 光谱仪上测定; 荧光光谱和荧光寿命的测试用 InGaAs 二极管激发, 日本东芝公司的 V-1050F 100 MHz 型示波器用来观察和记录信号。

\* 国家科委 863 高技术项目和国家自然科学基金(69578026)资助课题。

收稿日期: 1998-07-10; 收到修改稿日期: 1998-08-24

## 2.2 激光实验

实验装置如图 1 所示, 采用发射波长为 940 nm 左右的 InGaAs 半导体激光泵浦, 激光腔设计为平-平折叠腔, 折叠镜为凹面镜, 晶体尺寸为 8 mm × 8 mm × 1 mm, 在晶体的输入面镀 1030 nm 和 940 nm 的增透膜(HT), 在另一面镀 1030 nm 和 940 nm 的高反膜(HR), 凹面镜也镀 1030 nm 和 940 nm 的高反膜(HR)。

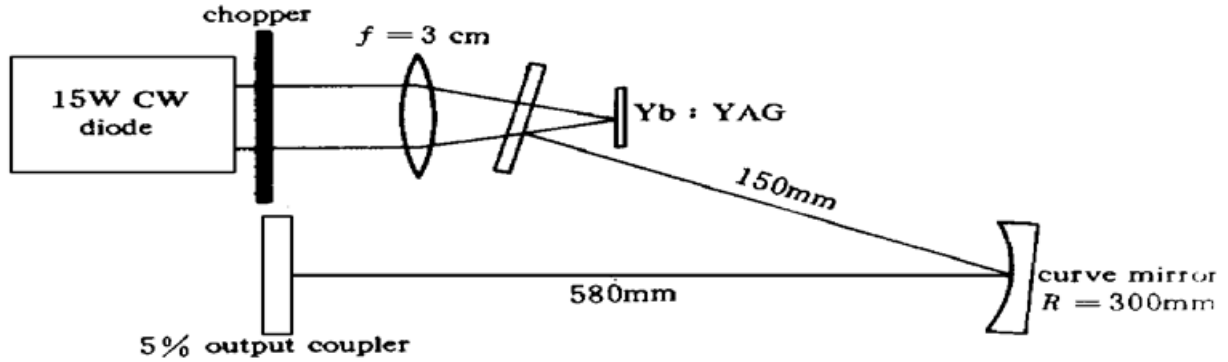


Fig. 1 Schematic of Yb:YAG microchip laser experiment

## 3 结果与讨论

$\text{Yb}^{3+}$  的电子构型为  $4f^{13}$ , 仅有两个电子态: 基态  $2F_{7/2}$  和激发态  $2F_{5/2}$ , 在 Yb:YAG 晶体中, 强的晶场作用导致了  $\text{Yb}^{3+}$  离子的斯塔克能级分裂, 如图 2 所示<sup>[7]</sup>, 基态和激发态分别分裂为四个和三个子能级, 形成准三能级的激光运行机制, 激光过程发生在激发态  $2F_{5/2}$  最低的子能级  $10327 \text{ cm}^{-1}$  和基态  $2F_{7/2}$  的第三个子能级间, 激光下能级能量较大, 为  $612 \text{ cm}^{-1}$ , 激光波长为 1030 nm。

图 3 为 Yb:YAG 晶体的吸收光谱, 图 4 为晶体的荧光光谱, 由图可见,  $\text{Yb}^{3+}$  离子的主吸收峰有两个, 分别位于 938 nm 和 970 nm, 在 938 nm 处, 吸收带宽大于 10 nm, 常将此作为激光二极管泵浦源的泵浦带。强的荧光峰位于 1030 nm 波长的弱吸收处, 此为输出的激光波长。由此可见: Yb:YAG 晶体有较宽的吸收和发射线宽, 这使得二极管泵浦不需要复杂的温度控制系统, 并可在较宽的波长

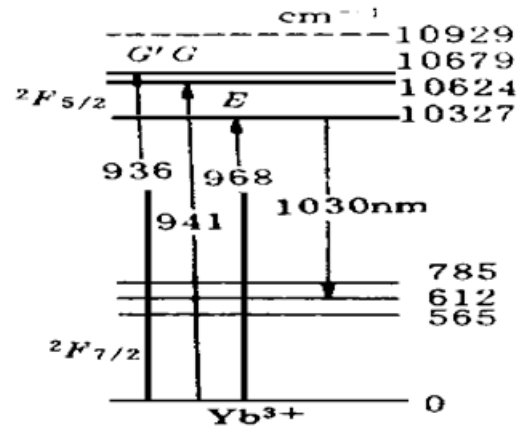


Fig. 2 Stark level energies of Yb:YAG

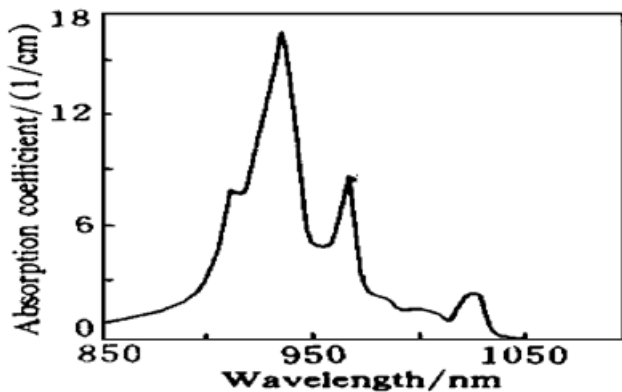


Fig. 3 Absorption spectrum of 20 at% Yb:YAG

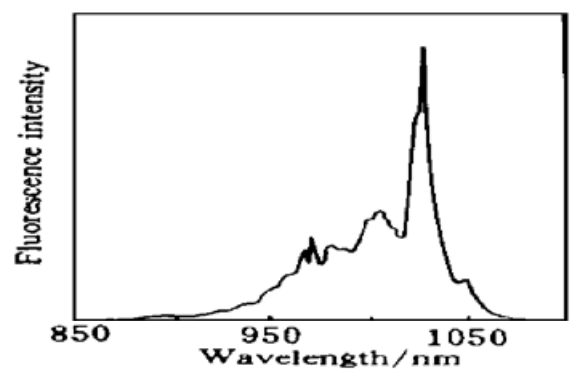


Fig. 4 Fluorescence spectrum of 20 at% Yb:YAG

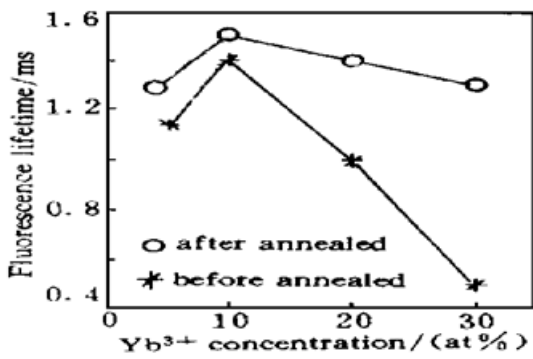


Fig. 5 Measured lifetime as a function of Yb<sup>3+</sup> concentration

范围内调谐。

图 5 为不同掺杂浓度的 Yb·YAG 晶体的荧光寿命，退火前寿命较低，尤其是在高浓度掺杂时降低的幅度较大，这是由于晶体中存在氧空位和 Yb<sup>2+</sup> 离子形成的色心而产生的无辐射跃迁所致，退火后晶体由于充分吸氧而极大地降低了氧空位浓度并使色心消除。退火后实测的荧光寿命较 Füchtbauer-Ladenburg 公式计算的理论值 1.08 ms 偏高是荧光捕获效应<sup>[7]</sup>造成的。由图 3

和图 4 可见：在 Yb<sup>3+</sup> 离子中荧光谱带和基态的吸收谱带存在相互重叠。从亚稳态能级自发发射的光子可被基态粒子吸收，再发射出更多的光子，光子重复不断的被发射、吸收，再发射、再吸收。结果造成实测的荧光寿命偏高。

当掺杂原子分数为 0.1 时，荧光寿命最长；当掺杂原子分数高于 0.1 时，出现荧光浓度猝灭效应。这可能是由于高掺杂浓度时其中的痕量稀土离子(Tm<sup>3+</sup> 和 Er<sup>3+</sup>) 与 Yb<sup>3+</sup> 离子相互作用引起的合作上转换效应造成的。经分析，其中的 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 10<sup>-5</sup>，Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量为 10<sup>-6</sup>，高掺杂浓度时其影响不可忽略。它们之间的能量转移过程如图 6 所示，在 Yb<sup>3+</sup> → Tm<sup>3+</sup> 的过程中，处于激发态的两个 Yb<sup>3+</sup> 粒子将能量同时转移至一个 Tm<sup>3+</sup> 粒子上，从而在 <sup>1</sup>G<sub>4</sub> 能级上产生集居粒子。

理论上，由于 Yb<sup>3+</sup> 为准三能级系统，尽管 0.2 原子分数掺杂的 Yb·YAG 晶体的起振阈值较掺杂为 0.1 原子分数的高，因阈值正比于 σ<sub>ext</sub>τ<sub>em</sub>N (阈值与发射截面、荧光寿命和离子浓度的乘积成正比)，但在晶体均具有良好光学质量的前提下，0.2 原子分数掺杂的 Yb·YAG 晶体的激光输出功率将比掺杂为 0.1 原子分数的高。因此本文首先研究了 0.2 原子分数掺杂的 Yb·YAG 晶体的激光性能。图 7 为掺杂为 0.2 原子分数的 Yb·YAG 晶体薄片的输入/输出特性曲线，当(薄片)输入功率为 1.2 W 时，得到 1030 nm 的脉冲激光输出为 300 mW，斜率效率为 30%，重复频率为 14 Hz。

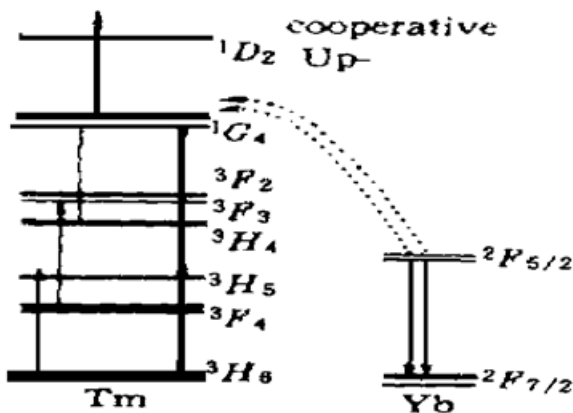


Fig. 6 Energy transfer processes for Yb<sup>3+</sup> → Tm<sup>3+</sup> in Yb·YAG

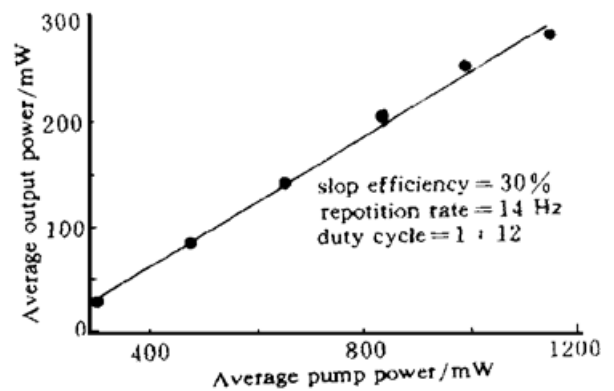


Fig. 7 Laser output versus pump power of the diode-pumped 20 at% Yb·YAG microchip

结 论 通过不同掺杂浓度的 Yb·YAG 晶体的荧光寿命的测定，找到了 Yb·YAG 晶体的最佳掺杂原子分数为 0.1，发现高浓度掺杂时存在荧光浓度猝灭，并用杂质离子引起的合作上

转换机制对其进行了解释。研究了晶体的光谱和激光性能。当用 InGaAs 激光二极管泵浦掺杂浓度为 0.2 原子分数的 Yb·YAG 晶体微片时, 获得了 1030 nm 的脉冲激光输出为 300 mW, 斜率效率为 30%, 重复频率为 14 Hz。以上研究表明, Yb·YAG 晶体是一种理想的固体激光介质。

### 参 考 文 献

- [1] R. M. Klbas, N. G. Anderson, W. D. Laidig *et al.*. Strained-layer InGaAs-GaAs-AlGaAs photopumped and current injection laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(8) : 1605~ 1613
- [2] P. Lacovara, H. K. Chai, C. A. Wang *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14) : 1089~ 1091
- [3] L. D. Deloach, S. A. Payne, L. L. Chase *et al.*. Evaluation of absorption and emission properties of Yb<sup>3+</sup> doped crystals for laser applications. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(4) : 1179~ 1190
- [4] C. D. Marshall, L. K. Smith, R. J. Beach *et al.*. Diode-pumped Yb·Sr<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F laser performance. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **QE-32**(4) : 650~ 656
- [5] S. A. Payne, W. F. Krupke. A glimpse into the laser crystal ball. *Opt. Photon. News*, 1996, Aug. : 31~ 35
- [6] W. F. Krupke, L. L. Chase. Ground-state depleted solid-state laser principles, characteristics and scaling. *Opt. Quant. Electron.*, 1990, **QE-22** : s1~ s22
- [7] D. S. Sumida, T. Y. Fan. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid-state laser media. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17) : 1343~ 1346
- [8] G. Huber, E. Heumann, T. Sandrock *et al.*. Up-conversion processes in laser crystals. *J. Luminescence*, 1997, **72~ 74** : 1~ 3

## Spectroscopy and Laser Performance of Yb<sup>3+</sup> Doped YAG Crystal

Yang Peizhi      Deng Peizhen      Xu Jun      Chen Wei

Qiao Jingwen      Huang Guosong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800)

(Received 10 July 1998; revised 24 August 1998)

**Abstract** Spectral performances of Yb·YAG crystal were studied. The optimal Yb<sup>3+</sup> doping level in Yb·YAG crystal is 10at%, which is determined by the fluorescence lifetime measurement. It is shown that the cooperative up-conversion processes of Yb<sup>3+</sup> → Tm<sup>3+</sup> energy transfer is responsible for the fluorescence quenching at high Yb<sup>3+</sup> doping level. 300 mW of pulsed laser output power at 1030 nm was obtained by means of InGaAs LD pumped 20at% Yb·YAG crystal thin chip.

**Key words** Yb·YAG crystal, concentration quenching, cooperative up-conversion.