

文章编号:1007-2934(2018)04-0001-04

高平均功率固态激光器的实验研究

王晓丹¹,徐晓东²,张晶华¹,毛红敏¹

(1.苏州科技大学,江苏 苏州 215009;2.江苏师范大学 江苏省先进激光材料与器件重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘 要: 高平均功率固态激光器在先进制造业和激光武器等领域有重要应用。本文从激光工作物质激活离子的选择、基质的不同对激光器性能的影响等方面进行研究,得到 Yb:LuAG 晶体是一种应用于高平均功率激光器中更具潜力的增益介质的结论。通过该研究,学生在掌握了激光器相关知识的基础上,培养了科研能力和创新思维。

关键词: 固态激光器;高平均功率;Yb³⁺离子;石榴石

中图分类号:O 4-34

文献标志码:A

DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2018.04.001

高平均功率固态激光器在先进制造业和“新概念”激光武器等领域有重要应用,在诸多激光器中占有主要地位,其发展决定我国是否能成为世界先进制造业、信息产业强国,对国防建设也有着重大的战略意义和现实意义^[1]。在传统的《激光原理与应用》课程中典型激光器介绍,仅对激光器结构和输出特性做以简单介绍,对激光器的优化设计、性能改进等方面没有深入细致的研究。本文将对高平均功率固态激光器进行详细介绍,从激光工作物质激活离子的选择、基质不同对激光器性能的影响等方面来进行研究。对高平均功率固态激光器的发展具有一定的参考意义。

1 高平均功率固态激光器激活离子的选择

固态激光器具有体积小、重量轻、效率高、光束质量好、寿命长等一系列优点,已成为激光发展中最具前景的激光器之一^[2,3]。固态激光器中以高平均功率固态激光器的发展最为迅速,特别在输出功率和光束质量方面,高平均功率固态激光器已经实现万瓦激光输出,并计划进一步提高其功率至 10⁵ W,用于机载战术激光武器,其应用的是 1 μm 波段高功率、大能量激光材料^[2]。基本以 Nd³⁺、Yb³⁺掺杂石榴石系列晶体和陶瓷为主,陶瓷由于生长工艺的限制,目前还在实验阶段,未进

行大规模生产应用,所以工作物质仍以石榴石系列晶体为主。对于激活离子的选择,主要为 Nd³⁺、Yb³⁺等三价稀土离子。

1.1 Nd³⁺离子

Nd³⁺离子是最早用于激光器中的三价稀土离子,以 Nd³⁺为代表的四能级离子,由于激光下能级与基态相距较远,约 2 000 cm⁻¹,所以抽运阈值较低。另外由于它的吸收和发射截面都较大,所以是一种非常好的激光激活离子。Nd³⁺离子应用于固体激光器中所采用的基质材料主要是石榴石系列晶体。图 1 为 Nd³⁺离子在 YAG 晶体中的能级图^[4]。2005 年美国诺格公司利用二极管泵浦 Nd:YAG 板条固体激光器,实现了 25 kW 的连续激光输出。2008 年演示验证平均功率 100 kW 的加速固体激光器^[5]。

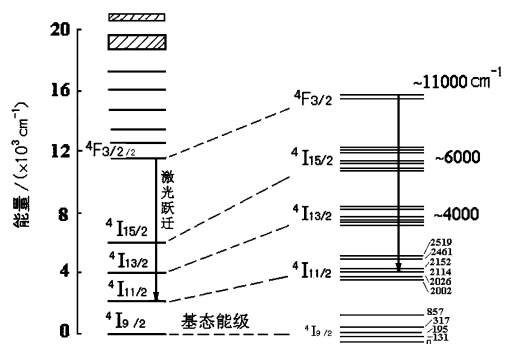


图 1 Nd³⁺在 YAG 中的能级结构图

收稿日期:2018-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(61306004);江苏省自然科学基金项目(BK20130263);江苏省十三五重点学科(20168765);教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会,中国高等学校实验物理教学研究会物理实验教学研究项目(01-201601-36);苏州科技大学研究生教育教学改革与研究项目(SKJG18_08)

1.2 Yb³⁺离子

Yb³⁺离子为能级结构最简单的激活离子,仅有两个电子态,基态²F_{7/2}和激发态²F_{5/2},相隔大约10 000 cm⁻¹,在晶场作用下,基态能级和激发态能级分别分裂为4个和3个stark子能级,从而形成准三能级的激光运行机制^[6]。图2给出了Yb³⁺的能级结构。Yb³⁺离子作为激光晶体的激活离子具有不存在激发态吸收、上转换;可实现Yb³⁺离子高掺杂浓度;Yb³⁺离子吸收谱线和发射谱线宽;较低的量子缺陷(8.6%)和荧光寿命长等优点。

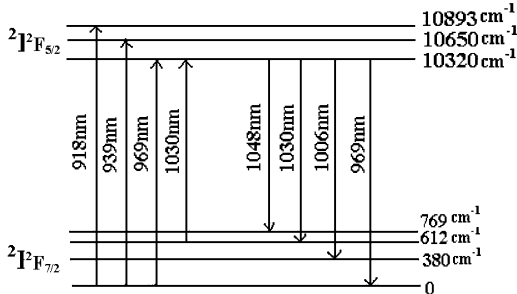


图2 Yb³⁺在LuAG中的能级结构图

由于Yb离子是准三能级结构,激光工作过程中要求具有高的抽运能量密度(抽运阈值较高),所以对激光介质的物化性能要求较高:高的热导率,好的机械性能,高的光学质量等等,因此选择石榴石晶体为基质材料。掺Yb³⁺的石榴石晶体在高平均功率固体激光器中的应用广泛。2005年美国H. Bruesselbach等报道单根Yb:YAG激光棒实现2.65 kW的高功率激光输出^[7]。Trumpf-Laser公司采用4个Yb:YAG薄片获得超过9 kW的激光输出^[8]。

1.3 Yb³⁺离子与Nd³⁺离子掺杂石榴石晶体性能比较

对Yb³⁺离子与Nd³⁺离子掺杂石榴石晶体性能进行了总结比较,结果如表1所列。

表1 Yb³⁺离子与Nd³⁺离子掺杂石榴石系列晶体性能比较

参数	Yb ³⁺ 离子	Nd ³⁺ 离子
抽运波长/nm	940	808
发光主峰/nm	1 030	1 064
能级	准三能级	四能级
掺杂浓度	0~100at. %	1~3at. %
分凝系数	1.07	0.18
热负荷	11%	30%~40%

从表1中可以看出,两种晶体发光波段均在

1 μm波段。Yb³⁺离子石榴石晶体可实现高掺杂,且热负荷较低,荧光寿命长,在0.95 ms左右^[1],可制成板条状、薄片状工作物质,有利于实现高功率激光输出。Yb³⁺离子将成为高平均功率固体激光器中最具应用前景的激活离子。

2 高平均功率固态激光器基质的选择

石榴石是最常用的激光基质材料,包括钇铝石榴石Y₃Al₅O₁₂(YAG),镱铝石榴石Lu₃Al₅O₁₂(LuAG),钆镓石榴石Gd₃Ga₅O₁₂(GGG)和钆钽铝石榴石Gd₃Sc₂Al₃O₁₂(GSGG)。其空间群为O_h(10)-Ia3d,属于立方晶系。稀土石榴石类晶体具有非常优异的物理和机械性能,晶体光学各向同性,容易接收掺杂离子,基质的内部损耗很小,且生长工艺成熟。以上优点充分说明了石榴石系列晶体是高平均功率固体激光器首选的激光基质晶体。

将最具发展潜力的Yb³⁺离子掺入石榴石晶体中从而形成的Yb:YAG晶体,制作成激光器,已经实现千瓦量级的激光输出。近年来,研究人员发现另一种石榴石系列Yb:LuAG晶体的光谱和激光性能优于Yb:YAG晶体,有望成为高平均功率固体激光器更具潜力的晶体之一^[9]。因此,在《激光原理与应用》课程教学中有必要引入这一项科研成果。下面将对Yb:LuAG晶体和Yb:YAG晶体在结构和光谱参数上进行比较。

2.1 Yb:LuAG与Yb:YAG晶体结构参数的比较

通过对晶体X射线衍射数据的处理和分析,可以得到晶体的晶胞参数。我们计算得到Yb:LuAG和Yb:YAG晶体的晶胞参数,如下表2所列。从表中数据可以看出,Yb:LuAG晶体的晶格常数比纯LuAG晶体的略大一些,晶胞体积V也略有增大。而Yb:YAG晶体的晶格常数比纯YAG晶体的略小一些,晶胞体积V也略有减小。其原因为Yb:LuAG晶体中,相对较大的Yb³⁺(0.858 Å)部分取代较小的Lu³⁺(0.848 Å),使得晶胞参数相应变大;而Yb:YAG晶体中,相对较小的Yb³⁺(0.858 Å)部分取代较大的Y³⁺(0.88 Å),使得晶胞参数相应变小。此外,还可以看出Yb³⁺的掺入不会引起LuAG基质晶体结构的改变,仍为立方晶系Ia3d对称。

表 2 Yb:LuAG 和 Yb:YAG 晶体的晶胞参数比较

	LuAG	Yb:LuAG	YAG	Yb:YAG
$a/\text{\AA}$	11.917 9±0.000 5	11.930 9±0.001 4	12.011 5±0.000 3	12.000 5±0.000 4
掺入激活离子变化		增大		减小
Cellvol/ \AA^3	1 692.78	1 698.32	1 733.01	1 728.25
掺入激活离子变化		增大		减小

2.2 Yb:LuAG 与 Yb:YAG 晶体光谱参数的比较

在激光器的输出特性表征中,工作物质的吸收光谱及发光光谱的研究必不可少。从光谱中可以了解激光器所需的抽运波长,激光输出波长及其他输出特征。因此,我们对 Yb:LuAG 和 Yb:YAG 晶体进行了光谱参数的研究。

Yb:LuAG 晶体与相同浓度的 Yb:YAG 晶体的光谱对比图,如图 3 所示。

比较其荧光光谱峰形和峰位的变化,从图中可以看出,Yb:LuAG 晶体与 Yb:YAG 晶体的峰形基本相同,相对于 Yb:YAG 晶体,Yb:LuAG 晶体的峰位出现了较小的“红移”现象。

关于 Yb:LuAG 晶体与 Yb:YAG 晶体光谱的一些具体参数如表 3 所列。从表中可以看出,Yb:LuAG 晶体的吸收和发射截面均大于 Yb:YAG 晶体,与文献^[9,10]中报道的结果一致。由光谱参数计算所得的最小抽运功率,Yb:LuAG 晶体小于 Yb:YAG 晶体。综上所述,Yb:LuAG 晶体的激光性能优于 Yb:YAG 晶体,是发展高功率大能量固体激光器的一种非常有潜力的增益介质。

表 3 10at. %的 Yb:LuAG 晶体与相同浓度的 Yb:YAG 晶体光谱参数比较

参数	Yb:LuAG	Yb:YAG
吸收峰/nm	918, 939, 969, 1 030	915, 941, 969, 1 030
吸收带宽 $\Delta\lambda/\text{nm}$	9.71	10.11
吸收截面 $\sigma_{\text{abs}}(10^{-20}\text{cm}^2)$	0.669	0.657
发射峰/nm	969, 1 006, 1 030, 1 048	968, 1 006, 1 029, 1 047
发射带宽 $\Delta\lambda/\text{nm}$	9.33	9.27
发射截面 $\sigma_{\text{em}}(10^{-20}\text{cm}^2)$	2.373	1.525
荧光寿命/ms	0.993	1.21
最小粒子分数 β_{min}	0.052	0.056
最小泵浦功率 $I_{\text{min}}(\text{kw}/\text{cm}^2)$	0.775	0.987

3 高平均功率固态激光器展望

在高平均功率固态激光器的研究中,与 Nd^{3+} 等其它稀土离子相比,Yb³⁺ 离子在晶场中具有强的电声子耦合效应,掺镱石榴石晶体已在激光器中得到广泛应用。掺镱晶体普遍具有较宽的吸收和发射带,有利于 LD 抽运和产生超短脉冲。在超快激光器领域也具有巨大的应用潜力^[1]。在增益介质方面,随着陶瓷和光纤生长工艺技术的不断提高,掺镱激光陶瓷和光纤也将在高平均功率固态激光器领域有重要应用。

在激光技术领域,高平均功率固态激光器尽

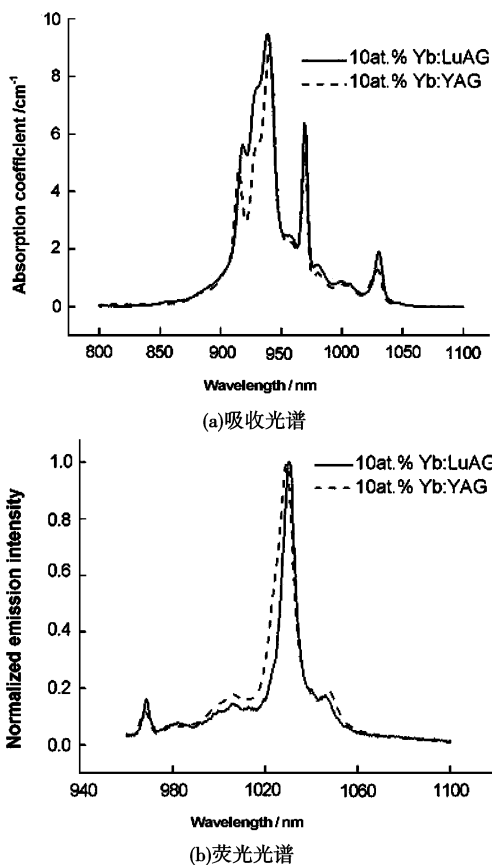


图 3 Yb:LuAG 晶体与相同浓度 Yb:YAG 晶体的光谱对比图

从图 3(a)中可以看出,Yb:LuAG 晶体与 Yb:YAG 晶体的吸收光谱峰形、峰位大致相同,吸收峰的强度略有差别。掺杂浓度为 10at.% 的 Yb:LuAG 晶体比相同浓度的 Yb:YAG 晶体的吸收系数稍大一些,大概相差 0.5 cm^{-1} 左右。将两晶体的荧光光谱进行了归一化处理,如图 3(b)所示,

管实现了千瓦量级的激光输出,但离硬杀伤激光武器的需求(高亮度兆瓦级)还有一定差距。激光器的可靠性、灵活性和激光光束传输等条件的不成熟,LD抽运高功率密度下($10^4 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$)激光晶体的热效应、放大自发辐射效应等不利因素,均使得高平均功率固态激光器在产业化的道路上有待进一步发展。

4 结 论

本文对高平均功率固态激光器的优化设计、性能改进等方面进行了详细介绍。从激光器工作物质激活离子的比较中发现 Yb^{3+} 离子性能优异,是高平均功率固态激光器中最具应用前景的激活离子。通过对两种掺镱石榴石晶体的结构和光谱性能的比较,得到 $\text{Yb}:\text{LuAG}$ 晶体的激光性能优于 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体,是一种更具潜力的增益介质的结论。最后对高平均功率固态激光器发展进行了展望。通过此课题的研究,使学生提高了科研思维能力,在掌握了激光器相关知识的基础上,进一步了解由激光器的改进可以进一步提升激光器的性能,从而满足激光器在高功率应用方面的迫切需求。对学生在激光领域的就业也有一定的益处。

参考文献:

[1] 徐军.激光晶体材料的发展和思考[J].激光与光电子学进展,2006,43(9):17-24.

- [2] 李晋闽.高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J].激光与光电子学进展,2008,45(7):16-29.
- [3] 周寿桓,赵鸿,唐小军.高平均功率全固态激光器[J].中国激光,2009,36(7):1605-1618.
- [4] A. A. Kaminskii, *Laser Crystals*, Springer-verlag Berlin Heidelberg, New York.1981.
- [5] 任国光,黄裕年.二极管抽运固体激光器迈向100kW[J].激光与红外,2006,36(8):617-622.
- [6] Laura D.Deloach, Stephen A. Payne, L.L. Chase, et al. Evaluation of Absorption and Emission Properties of Yb^{3+} Doped Crystals for Laser Application [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(4):1179-1191.
- [7] H. Bruesselbach, D.S.Sumida. A 2.65kW $\text{Yb}:\text{YAG}$ Single-rod Laser [J]. IEEE J. Selet. Top. Quant. Eletron., 2005,11(3):600-603.
- [8] Adolf Giesen, Jochen Speiser. Fifteen Years of Work on Thin-disk Lasers; Results and Scaling Laws [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007,13:598-609.
- [9] A. Brenier, Y. Guyot, H. Canibano, et al. Growth, Spectroscopic and Laser Properties of Yb^{3+} Doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ Garnet Crystal [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2006, 23(4):676-683.
- [10] D.S.Sumida, T.Y.Fan, R.Hutcheson, Spectroscopy and Diode-pumped Lasing of Yb^{3+} -doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($\text{Yb}:\text{LuAG}$) [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995,24:348-350.

Experimental Study on High Average Power Solid-state Lasers

WANG Xiao-dan¹, XU Xiao-dong², ZHANG Jing-hua¹, MAO Hong-min¹

(1.Suzhou University of Science and Technology, Jiangsu Suzhou 215009; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Normal University, Jiangsu Xuzhou 221116)

Abstract: High average power solid-state lasers have important applications in advanced manufacturing and laser weapons. From the choice of the active ion and host crystal, we have an conclusion that $\text{Yb}:\text{LuAG}$ crystal is a potential gain medium for high average power diode pumped lasers. Through the research on this subject, students have mastered the basic knowledge of the laser, and cultivate their scientific research ability and innovative thinking.

Key words: solid state laser; high average power; Yb^{3+} ion; garnet