

全固态 Yb:YAG 激光器发展现状

曹洪忠¹, 彭鸿雁¹, 张梅恒¹, 张冰¹, 陈宝玲¹, 吴同华¹, 赵祥敏¹, 檀慧明²

(1. 牡丹江师范学院物理系, 黑龙江 牡丹江 157012; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:介绍了 Yb:YAG 晶体的激光特性, 分析了 Yb:YAG 1030 nm 激光器、1049 nm 激光器、倍频激光器、可调谐激光器以及新型陶瓷激光器的发展现状。

关键词:全固态激光器; Yb:YAG; 1030 nm; 1049 nm; 倍频

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Development of all-solid-state Yb:YAG laser

CAO Hong-zhong¹, PENG Hong-yan¹, ZHANG Mei-heng¹, ZHANG Bing¹, CHEN Bao-ling¹,
WU Tong-hua¹, ZHAO Xiang-min¹, TAN Hui-ming²

(1. Department of Physics, Mudanjiang Normal College, Mudanjiang 157012, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The laser properties of Yb:YAG crystal are introduced. The developments of 1030 nm Yb:YAG laser, 1049 nm Yb:YAG laser, frequency doubled Yb:YAG laser, tunable Yb:YAG laser and new type Yb:YAG ceramic laser are all analyzed.

Key words: all-solid-state laser; Yb:YAG; 1030 nm; 1049 nm; frequency double

1 引言

全固体激光器是随着半导体激光器的发展而迅速发展的, 现已成为当今固体激光技术领域的一个研究热点。由于全固体激光器具有体积小、效率高、寿命长、易于集成化等优点, 使其在许多应用领域不断的替代其他类型的激光器。目前, 全固态 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 激光器技术已较为成熟。但随着新波段 LD 和新晶体材料的出现, 各种新型全固态激光器将不断涌现。

Yb:YAG 是诞生较早的一种激光晶体, 它具有吸收带宽宽, 上能级寿命长, 量子效率高等的优点。早在 1965 年, 美国贝尔实验室的 L. F. Johnson 等用闪光灯泵浦 Yb:YAG 晶体获得激光, 但由于阈值高 (325 J), 转换效率低并未引起人们的注意^[1]。1971 年, A. R. Reichberg 等用 GaAsSi LED 泵浦 Yb:YAG 晶体, 在 77K 温度下获得了 1029 nm 的脉冲激光输出^[2]。之后一段时间里, 由于缺乏有效的泵浦源, 掺 Yb³⁺ 激光晶体仅能在低温下运行。因此, 对其研

究仅限于光谱特性的研究。进入 20 世纪 90 年代, 随着 InGaAs 激光二极管的发展, Yb:YAG 激光器技术研究再次得到人们的重视。1991 年, 美国林肯实验室的 P. Lacovara 等报道了世界上第一台室温运转的 Yb:YAG 激光器^[3]。随后, Yb:YAG 激光器技术研究逐渐成为国内外激光器研究的一个热点。

2 Yb:YAG 的激光特性

Yb:YAG 晶体为准三能级结构的激光晶体, 能级结构如图 1 所示^[4]。Yb³⁺ 仅有一个基态²F_{7/2} 和一个激发态²F_{5/2}, 两者的能量间隔约为 10000 cm⁻¹, 而且在激光上能级之上不存在更高的激发态能级。激光过程发生在激发态²F_{5/2} 最低的子能级 10327 cm⁻¹ 与基态²F_{7/2} 的第三子能级 612 cm⁻¹ 以及

基金项目:牡丹江市科学技术计划项目 (No. G2009e91); 牡丹江师范学院科研项目 (No. KY2008004) 资助。

作者简介:曹洪忠 (1981 -), 男, 硕士, 助教, 主要从事全固体激光器及其频率变换方面的研究。E-mail: caoay412@163.com

收稿日期: 2009-08-19

第四子能级 785 cm^{-1} 之间,激光中心波长分别为 1030 nm 和 1049 nm 。由于泵浦能级靠近激光上能级,可极大的降低激光材料中的热负荷。 1030 nm 的激光下能级 Boltzmann 因数为 0.046 ,由于有较多的粒子数分布,使得 1030 nm 处存在严重的自吸收效应,而且难于实现粒子数反转,尤其在泵浦功率较小时,较难获得激光输出;而 1049 nm 处 Boltzmann 因数仅为 0.02 ,自吸收较 1030 nm 要弱,也较易实现粒子数反转。

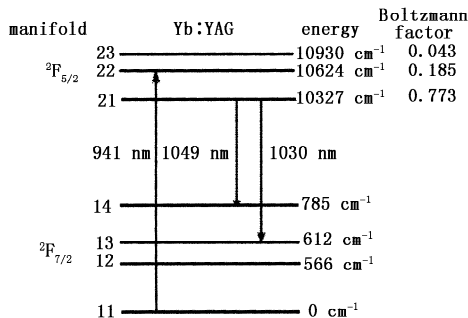


图1 Yb:YAG 的能级结构

Fig.1 energy level diagram of Yb^{3+} ion in YAG crystal

图2为Yb:YAG晶体的吸收光谱和发射光谱^[5]。由图可以看出Yb:YAG晶体有两个吸收带,分别位于 940 nm 和 968 nm 处,而且位于 940 nm 的吸收带较宽(约 18 nm),这样LD就不需要像泵浦掺 Nd^{3+} 离子激光器的 808 nm LD那样采取严格的温度控制,使其更适于LD泵浦。Yb:YAG晶体的发射峰也有两个,一个较大的位于 1030 nm 处,另一个位于 1049 nm 处。Yb:YAG晶体的吸收光谱范围和发射光谱范围有很大重叠,而且在 1030 nm 处也存在一个明显的吸收峰,使得 1030 nm 处存在严重的自吸收效应。

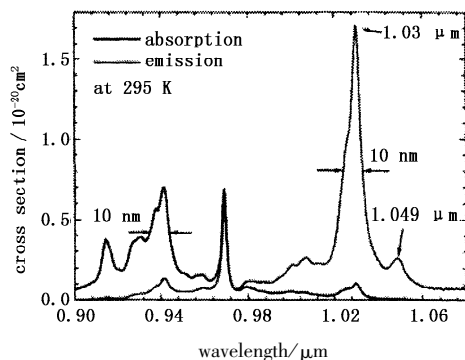


图2 300 K 温度下 Yb:YAG 的吸收和发射光谱

Fig.2 absorption and emission spectra of Yb:YAG crystal at 300K

3 1030 nm 波段激光器发展现状

如上所述,由于Yb:YAG在 1030 nm 波段存在严重的自吸收效应,在泵浦功率密度较低时, 1030 nm 波段较难获得激光输出。目前,对于

1030 nm 激光器的报道主要集中在高功率和中等功率。

在高功率激光器方面,国际上主要有美国的利费莫尔实验室和休斯实验室,德国的斯图加特大学等。2000年,美国利费莫尔国家实验室的 Eric C. Honea 等采用 3930 W LD 泵浦 2 根 $\phi 2 \times 20\text{ mm}^3$ 掺杂浓度为 $1 \times 10^{-20}\text{ cm}^{-3}$ 的 Yb:YAG 晶体,在腔长为 84 cm 时获得了 1080 W 的 1030 nm 激光输出^[6]。2004年, J. Wallace 报道了一个 4 kW 的全固态 Yb:YAG 激光器^[7],该激光器包含四个 Yb:YAG 盘片,每一个盘片分别被一个激光二极管泵浦。国内,2005年,清华大学的柳强等采用角抽运方式,在泵浦功率 2 kW 时,获得了 520 W 激光输出,光-光转换效率为 25% ^[8]。2006年,他们又将输出功率提高到 1050 W ,光-光转换效率提高到 36.3% ^[9]。

在中等功率激光器方面,2001年,日本 Fukui 大学的 Hongru Yang 等报道了 2.5 W ,光-光转换效率为 19.8% 的 1030 nm 激光器^[10]。2002年,新加坡的 Deyuan Shen 等用 GaAs 作为输出镜,被动调 Q,在泵浦功率为 12.2 W 时,获得了脉宽为 15.5 ns 、脉冲能量为 $75.6\text{ }\mu\text{J}$ 的激光^[11]。2004年,北京理工大学的李磊等采用水冷方式在泵浦功率为 13.56 W 时,获得了 3.06 W 激光输出^[12]。2005年,安徽光机所的宋秋鸣等同样采用水冷结构,在泵浦功率为 25 W 时获得了 6.09 W 1030 nm 连续激光^[13]。2008年,长春光机所的田玉冰等采用主动调 Q 获得了单脉冲能量为 $319.67\text{ }\mu\text{J}$ 的 1030 nm 激光^[14]。

4 1049 nm 波段激光器的发展现状

Yb:YAG 在 1049 nm 处存在一个发射峰。而且由于 1030 nm 处的自吸收效应,在低功率泵浦的情况下, 1049 nm 处更容易实现激光输出。2002年,清华大学的吴海生等采用掺杂浓度为 $10\text{ at.}\%$ 的 Yb:YAG 获得了 91.5 mW 1049 nm 激光输出,斜率效率为 30% ^[15]。2003年,他们又采用 Cr:YAG 作为调 Q 晶体,获得了脉宽为 15 ns ,峰值功率为 0.11 kW 的 1049 nm 激光输出^[16]。同年,天津大学的居桂芳等用 SESAM 锁模获得了脉冲宽度为 4 ps 的 1047 nm 激光输出^[17]。

5 倍频可见光激光器的发展现状

Yb:YAG 激光通过倍频可以分别获得 515 nm 和 525 nm 波段的可见绿光输出,这两种颜色的绿光可以在激光显示、舞台灯光、医疗等方面有广泛的应用。特别是 515 nm 激光可以替代 Ar^+ 激光器泵浦

钛蓝宝石激光器。

1998年,日本的 Takunori Taira 等采用厚度为 400 μm 掺杂浓度为 25 at. % 的 Yb:YAG 晶体,用 5 mm 和 2 mm 的 KTP 倍频获得了 150 mW 和 112 mW 的 516 nm 的可见激光输出^[18]。2004年,清华大学的单欣岩等采用 V 形腔结构,通过 I 类相位匹配的 LBO 腔内倍频,在泵浦功率为 43 W 时,获得了 0.422 W 的 515 nm 激光输出^[19]。2006年,中科院北京物理所的郭新军采用类似的折叠腔结构获得了 4.44 W 的 515 nm 连续激光^[20]。2007年,曹洪忠等采用 10 at. % 掺杂的尺寸为 $\phi 4 \times 1 \text{ mm}^3$ 的 Yb:YAG 晶体和 I 类相位匹配的 LBO,在泵浦功率为 1.43 W 时,获得了 22.3 mW 的 525 nm 激光输出^[21]。2008年,田玉冰等采用线性平凹腔,在泵浦功率为 11.3 W 时,获得了 244 mW 的 525 nm 激光^[22]。同年,他们用两支 LD 偏振耦合泵浦 10 at. % 掺杂的尺寸分别为 $\phi 4 \times 1 \text{ mm}^3$ 和 $\phi 3 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 的 Yb:YAG 晶体,通过 LBO 腔内倍频,在泵浦功率为 2 W 时,分别获得了 5.62 mW 和 2.66 mW 的 515 nm 激光输出^[23]。

6 可调谐激光器的发展现状

由于 Yb:YAG 的荧光带宽宽,在 910 ~ 1100 nm 几乎都有发射谱线存在,使得 Yb:YAG 较为适合进行可调谐运转。1995年,T. Y. Fan 等采用三个 In-GaAs LD 泵浦 Yb:YAG 晶体,在泵浦功率为 3 W 时,获得了 1.05 W 调谐范围 1028.98 ~ 1031.74 nm 的可调谐激光^[24]。同年,德国斯图加特大学的 U. Brauch 等通过在谐振腔内插入双折射滤光器获得了调谐范围在 1018 ~ 1053 nm 的激光^[25]。2000年日本的 Jiro Saikawa 等通过调节双折射滤光片获得了从 1024.1 ~ 1108.6 nm 的调谐范围为 84.5 nm 的 Yb:YAG 激光输出,同时他们还通过在腔内插入 LBO 晶体实现了从 515.3 ~ 537.7 nm 的可调谐绿光输出^[26]。2001年,天津大学的张丽哲等采用 2 支 LD 双端泵浦 Yb:YAG 晶体,获得了调谐范围在 1030.5 ~ 1055.5 nm 的激光^[27]。2005年,日本的 R. Bhandari 等报道了调谐范围为 51 nm 的连续激光和调谐范围为 14 nm 的声光调 Q 激光^[28]。

7 新型陶瓷激光器的发展现状

透明激光陶瓷是新近几年发展起来的一种新型激光材料。其具有生产周期短、成本低、易于批量生产等优点。2003年,K. Takaichi 等首次报道了 LD

泵浦的 Yb:YAG 陶瓷激光器^[29]。采用掺杂浓度为 1 at. %,厚度为 1.6 mm 的 Yb:YAG 陶瓷,在泵浦功率为 2.4 W 时,获得了 345 mW 的 1039 nm 激光输出。2006年,日本的 Jun Dong 等报道了高效的微片陶瓷激光器,分别获得了斜率效应为 79% 的 1030 nm 和斜率效率为 67% 的 1049 nm 激光输出^[30]。同年,他们又报道了采用 Cr:YAG 陶瓷被动调 Q 的 Yb:YAG 陶瓷激光器,获得了脉宽为 380 ps,峰值功率为 82 kW 的 1030 nm 脉冲激光^[31]。2007年,上海硅酸盐研究所的吴玉松等在国内首次制备 Yb:YAG 陶瓷,并且在泵浦功率为 7 W 时,获得了 268 mW 的 1030 nm 激光输出^[32]。同年,中科院上海光机所的许毅等采用国产 Yb:YAG 激光陶瓷,在泵浦功率为 9 W 时,获得了 1.63 W 1030 nm 激光,斜率效率达到 23.2%^[33]。2008年,日本的 Shinki Nakamura 等采用 Yb:YAG 陶瓷获得了从 1020.1 ~ 1083.6 nm 调谐范围为 63.5 nm 的激光^[34],这是首次实现 Yb:YAG 陶瓷的可调谐输出。

8 结论

全固态 Yb:YAG 在最近十多年来发展迅速,已经成为当今激光的研究热点,并且实现了连续、脉冲、超短脉冲、波长连续可调谐、倍频等输出。随着 LD 泵浦功率的提高,镀膜和激光技术的发展,以及新型 Yb:YAG 材料的制备,Yb:YAG 激光器的研究必将取得更大的进展。

参考文献:

- [1] L F Johnson, J E Geusic, Van Uitert L G. Coherent oscillations from Tm^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+} , and Er^{3+} ions in yttrium aluminum garnet [J]. Appl. Phys. Lett., 1965, 7(5): 127 - 129.
- [2] A R Reinbeig, L A Risebeg, et al. GaAs:Si LED pumped Yb-doped YAG laser [J]. Appl. Phys. Lett., 1971, 19(1): 11 - 13.
- [3] P Lacovara, H K Chol, C A Wang, et al. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser [J]. Opt. Lett., 1991, 16(14): 1089 - 1091.
- [4] Haisheng Wu, Mali Gong, Ping Yan, et al. Quasi-continuous-wave diode array side-pumped Q-switched Yb:YAG slab laser [J]. Opt. Eng., 2004, 43, 986.
- [5] H Hugel, W L Bohn. Solid state thin disc laser [C]. SPIE, 1998, 3574: 15 - 28.
- [6] E C Honea, R J Beach, S C Mitchell, et al. High-power dual-rod Yb:YAG laser [J]. Opt. Lett., 2000, 25(11):

- 805 - 807.
- [7] J Wallace. Commercial disk laser reaches 4-kW output [J]. Laser Focus World, 2004, 40(9): 19 - 20.
- [8] Q Liu, M Gong, F Lu, et al. 520-W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser [J]. Opt. Lett., 2005, 30(7): 726.
- [9] Qiang Liu, Mali Gong, Fuyuan Lu, et al. Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab laser emitted up to 1 kW [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88(10): 101 - 113.
- [10] Hongru Yang, S Kawata, T Kobayashi. Performance characteristics of diode-pumped miniature Yb:YAG laser [C]. SPIE, 2001, 4595: 22 - 29.
- [11] Deyuan Shen, Dingyuan Tang, Jian Kong, Passively Q-switched Yb:YAG laser with a GaAs output coupler [J]. Opt. Commun., 2002, 211: 271 - 275.
- [12] 李磊, 杨苏辉, 孙文峰, 等. 激光二极管抽运的高光束质量的 Yb:YAG 薄片激光器 [J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1285 - 1288.
- [13] 宋秋鸣, 陈长水, 殷绍唐. 激光二极管泵浦 Yb:YAG 激光器 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 525 - 527.
- [14] Yubing Tian, Huiming Tan, Jiying Peng, et al. LD-Pumped Actively Q-switched Yb:YAG Laser with an Acoustic-Optical Modulator [J]. Laser Phys., 2008, 18(1): 12 - 14.
- [15] 吴海生, 闫平, 巩马理. $M^2 \leq 1.14$ 的 LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器 [J]. 中国激光, 2002, A29(11): 961 - 964.
- [16] Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali, et al. A passively Q-switched diode pumped Yb:YAG microchip laser [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(12): 697 - 698.
- [17] Ju Guifang, Chai Lu, Wang Qingyue, et al. Stable mode-locking in an Yb:YAG laser with a fast Sesam [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(12): 695 - 696.
- [18] Takunori Taira, Jiro Saikawa, Eiji Yamaguchi, et al. Intracavity frequency doubled Yb:YAG miniature laser [J]. Osa Topics on advanced solid state lasers, 1998, (19): 119 - 121.
- [19] 单欣岩, 魏晓羽, 吴念乐, 等. 二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器光束质量及 V 形腔腔内倍频的研究 [J]. 量子电子学报, 2004, 21(5): 587 - 591.
- [20] Xinjun Guo, Wei Hou, Haibo Peng, et al. 4.44 W of CW 515 nm green light generated by intracavity frequency doubling Yb:YAG thin disk laser with LBO [J]. Opt. Commun., 2006, 267: 451 - 454.
- [21] 曹洪忠, 檀慧明, 王保山, 等. LD 端面泵浦 Yb:YAG/LBO 525 nm 绿光激光器 [J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 117 - 119.
- [22] 田玉冰, 檀慧明, 付喜宏, 等. 激光二极管阵列泵浦 Yb:YAG/LBO 525 nm 绿光激光器 [J]. 量子电子学报, 2008, 25(6): 681 - 684.
- [23] Yubing Tian, Huiming Tan, Hongzhong Cao, et al. Intracavity frequency doubling with a Yb:YAG/LBO laser at 515 nm [J]. Laser Phys., 2008, 18(1): 15 - 17.
- [24] T Y Fan. Tunable Single-Frequency Yb:YAG Laser with 1-W Output Power Using Twisted-Mode Technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(10): 1137 - 1138.
- [25] Brauch U, Giesen A, Karzewski M, et al. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm [J]. Opt. Lett., 1995, 20(7): 713 - 715.
- [26] Jiro Saikawa, Sunao Kurimura, Nicolaie Pavel, et al. Performance of widely tunable Yb:YAG microchip lasers [J]. Osa Topics on advanced solid state lasers, 2000, 34: 106 - 111.
- [27] 张雨哲, 戴建明, 张伟力, 等. 全固化可调谐 Yb:YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2001, 28(10): 1 - 4.
- [28] R Bhandari, T Taira, Widely Tunable CW and Q-switched Operation of Thin-Rod Yb:YAG laser [C] // Conference on Lasers & Electro-Optics Paper CMA6. CLEO, 2005: 16 - 18.
- [29] 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: 43.
- [30] Jun Dong, Akira Shirakawa, Ken-ichi Ueda. Efficient Yb³⁺:Y₃Al₅O₁₂ ceramic microchip lasers [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(9): 091114 - 091114 - 3.
- [31] Jun Dong, Akira Shirakawa, Ken-ichi Ueda, et al. All-ceramic passively Q-switched Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser [J]. Electronics Letters, 2006, 42(20): 1154 - 1155.
- [32] 吴玉松, 潘裕柏, 李江, 等. Yb:YAG 透明陶瓷的制备和激光输出 [J]. 无机材料学报, 2007, 22(6): 1086 - 1088.
- [33] 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.
- [34] Shinki Nakamura, Hiroaki Yoshioka, Yu Matsubara, et al. Efficient tunable Yb:YAG ceramic laser [J]. Opt. Commun., 2008, 281: 4411 - 4414.