

室温下 Ho: YAG 激光器输出 3J 的 2.1 μ m 激光

叶洪波 邝能俊 朱长虹 李正佳

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 根据对 2.1 μ m 波长 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器的实验研究, 详细分析了冷却温度、放电脉冲半宽度和输出镜透过率等因素对激光器的输出的影响。

关键词: Cr, Tm, Ho: YAG 晶体 敏化作用

Ho: YAG laser with 3J output operating at room temperature and 2.1 μ m wavelength

Ye Hongbo, Kuang Nengjun, Zhu Changhong, Li Zhengjia

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST)

Abstract: According to a lot of experimental research to Cr, Tm, Ho: YAG laser operating at 2.1 μ m wavelength, the factors effecting on the output characteristics, such as cooling temperature, flashlamp pulse width, transparent index of output mirrors, are discussed.

Key words: Cr, Tm, Ho: YAG crystal sensitized

一、引言

2 μ m 波段的激光是当前世界上一个热门的研究方向, 国外, 尤其是美国对它的研究已经开展了多年, 早在 1965 年美国 Johnson 等首先在液氮温度下使 Ho: YAG 激光器输出了 2 μ m 的激光。由于这种激光器要求的温度极低且阈值很高, 则限制了它的实际应用。最近室温运转的 2 μ m 激光器的出现, 再一次引起人们的极大注意。

2 μ m 波段的激光是很有用的, 它在医学、光通讯、遥感和雷达等方面都显示出独特的优良性能。由于水的吸收峰是在 1.93 μ m 左右, 因此 2 μ m 激光对组织的吸收不会象 Nd: YAG 激光那样强烈, 因而对组织的穿透深度浅, 有很高的外科手术精度, 且对人眼安全, 更加上它可用光纤进行传输, 所以在医疗上它是一种很好的做外科手术的光源, 另外, CO₂ 的吸收带也在 2 μ m

通过计算和实验, 可以得出初步结论: (1) 本设计所得膜系能有效地提高反射率, 加强对银膜的保护。(2) 膜厚监控保证将每层膜的膜厚控制在 2% 以内, 膜厚在一定范围内的误差对膜系的反射率影响很小。

参 考 文 献

- 1 Macleod H A. Thin Film Optical Filter, Second Edition. New York: Macmillan, 1986
- 2 唐晋发, 郑 权. 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- 3 Macleod H A, Song D Y. Improved coatings for large astronomical telescope mirrors. Proc. SPIE, 1985; 542: 25~ 27

* * *

作者简介: 骆 青, 女, 1973 年 5 月出生。从事光学薄膜的研究工作。

左右,所以这种激光在遥感方面也有着重要的应用前景^[1]。

目前国外对 2μm 波段的激光器研究的很多,不同掺杂离子的激光棒也有多种,如 Tm:YAG; Cr, Tm: YAG; Tm, Ho: YAG 和 Cr, Tm, Ho: YAG 等。经研究发现, Cr, Tm, Ho: YAG 这种激光棒的效果不错,而且国内已经能够研制生产,所以作为国内的研究人员应该对用这种棒的激光器进行重点研究。国外 Ho 激光器已经商品化,如 Schwartz Electro-Optics, Photo Interaction, Coherent 等公司都有较成熟的 Ho 激光器出售。现在,国内的研究人员也正在加紧对这种激光器的研究。

我们在研究了国内外大量的资料后,着手对这种新型的激光器进行了研究,并研制了一台以 Cr, Tm, Ho: YAG 为工作物质的激光样机,使其在室温下输出了 3J 的能量。

二、Cr³⁺, Tm³⁺ 离子的敏化作用

Ho³⁺ 激光的幅射跃迁是 ⁵I₇ → ⁵I₈,但是由于 Ho³⁺ 离子的激光下能级 ⁵I₈ 接近基态,温度在 80K 以上时热诱导跃迁使终端能级上的粒子数迅速增加,致使激光的阈值提高,使得 Ho³⁺: YAG 激光器不可能在室温下运转。随后,人们发现可以用 Er³⁺, Tm³⁺ 等离子作为敏化离子,使 Ho 激光器的效率大为提高,并且实现了在室温下运转。后来,人们又发现用 Cr³⁺ 代替 Er³⁺ 作为敏化离子的效果更好。Ho³⁺ 离子激光棒的基质也经过人们的努力,发现了 YAG, YAP, YLP, YLF, YSGG^[1,3], YALO 和 YVO₄ 等许多种。其中以 YAG 和 YSGG 好些,经过实验比较,发现 YAG 作为基质效果要更好,输出的效率也更高些^[9]。

为了克服 Ho³⁺ 对泵浦光的弱吸收,用 Cr³⁺ 和 Tm³⁺ 离子对其进行敏化,它们的作用过程如图 1 中所示^[1,2],这种泵浦机制的步骤为:

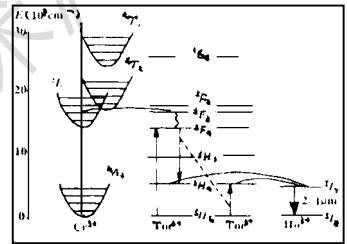


Fig. 1 The pumping mechanism of Cr, Tm, Ho: YAG laser

1. 由于 Cr³⁺ 的 3d 轨道能级分裂,应用群论中的符号来定义 Cr³⁺ 的能级符号,用 ⁴A_{2j}, ²E_g, ⁴T_g, ⁴T_{2g} 等来表示,其中 ⁴T₂, ⁴T₁ 等能级均为带状,因此在泵浦灯的可见光谱作用下, Cr³⁺ 很容易跃迁到高能级的激发态 ⁴T₂ 和 ⁴T₁,然后再无幅射跃迁弛豫到亚稳态 ²E 上。

2. Cr³⁺ 的 ²E 能级与 Tm³⁺ 的 ²F₃ 能级的斯塔克能级位置差不多,并且 Cr: YAG 的荧光谱带与 Tm³⁺ 的吸收线重叠,则通过无辐射的偶极形式的能量转移过程,使 Tm³⁺ 处于 ²F₃ 激发态,并经过弛豫过程转移到 Tm³⁺ 的 ³F₄ 能级上。

3. 在掺 Tm³⁺ 浓度较高的时候, Tm³⁺ 的 ³F₄ 能级容易淬灭,并通过交叉弛豫过程转移到两个 Tm³⁺ 的 ³H₄ 能级上。

4. 随后, ³H₄ 能级把能量转移到与其能级位置差不多的 Ho³⁺ 的 ⁵I₇ 能级上。

5. Ho³⁺ 离子的 ⁵I₇ 能级为激光的上能级,当它从 ⁵I₇ 跃迁到 ⁵I₈ 能级时,就会输出 2.1μm 的激光。

可以看到, Ho³⁺ 的 ⁵I₇ 能级之所以能有大量的粒子聚集,是由于有 Cr³⁺ 和 Tm³⁺ 的敏化作用。但至今敏化的具体过程还未完全弄清,有关敏化动力学方面的问题还待进一步地研究。

三、实验过程和结果

这种激光器的结构与 Nd: YAG 激光器类似,如图 2 所示。实验中所用到的泵浦方式为脉

冲氙灯泵浦, 聚光腔是镀银单椭圆腔, 冷却方式为对冷却水进行恒温控制, 其温度浮动范围为 $10 \pm 5^\circ\text{C}$ 。实验中所使用的棒的尺寸为 $\phi 5\text{mm} \times 93\text{mm}$ 。

谐振腔中使用两片镀介质膜的镜片, 其中输出镜为平面镜, 输出的透过率为 $15\% \sim 29\%$, 全反镜为曲面镜, 本实验中所使用的镜片的曲率为 1m 。

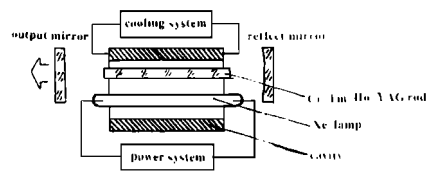


Fig. 2 The structure of Cr, Tm, Ho: YAG laser

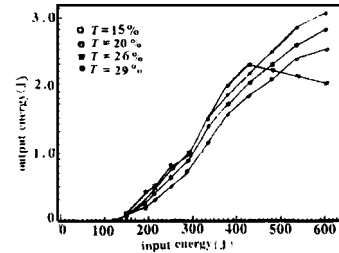


Fig. 3 The input and output properties curves with different transparent rates, here $T_w = 9^\circ\text{C}$, $t_p = 360\mu\text{s}$

图3中所示的曲线是在冷却温度为 9°C 、放电脉冲半宽度为 $360\mu\text{s}$ 的条件下不同的输出镜透过率对激光器的输出的影响。

可以看到, 在其它条件相同时, 不同的输出镜透过率对激光器的阈值、输出能量和效率有较大的影响。 $T = 15\%$ 时, 其阈值为 84.4J , 而 $T = 20\%$, 26% , 29% 时的阈值分别为 92.3J , 95.0J , 98.4J 。另外, $T = 15\%$ 时, 其斜效率可近达 1% , 高于 $T = 20\%$, 26% , 29% 时分别为 0.79% , 0.82% , 0.89% 的斜效率, 因此 $T = 15\%$ 时应该是最佳的透过率。但是可以发现, 当 $T = 15\%$ 时激光器的输出会很快达到饱和, 而当 $T = 29\%$ 时, 斜效率比较高, 并且很容易达到 3J 以上。

快速达到饱和, 而当 $T = 29\%$ 时, 斜效率比较高, 并且很容易达到 3J 以上。

从图4中可以看到, 冷却水温对激光器的输出性能有较大的影响。当水温升高时, 激光器的阈值也随之升高, 而在输入能量为 384J 时, 其输出的能量和效率也随之降低。因此, 要想使激光器的输出达到较好的水平, 需要在激光器的冷却系统上下一番功夫, 使其保持在一个比较低的温度下(一般应低于 10°C), 如果要达到输出稳定, 则应该加上恒温装置。

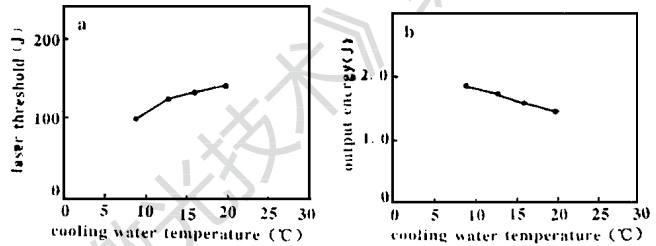


Fig. 4 The effect of cooling water temperature on laser threshold a and output energy b, here $T = 29\%$, $t_p = 360\mu\text{s}$, and $E_i = 384\text{J}$

另外, 电源的性能对激光器的性能影响也比较大。从图5中可以看到, 在输入能量均为 195J 时, 放电脉冲半宽度对激光输出的能量影响很大。 $C = 400\mu\text{F}$ 时的最佳半宽度为 $420\mu\text{s}$, $C = 800\mu\text{F}$ 为 $480\mu\text{s}$, $C = 1200\mu\text{F}$ 为 $560\mu\text{s}$ 。还可以注意到, $C = 400\mu\text{F}$ 时的输出明显要高于其它两种, 这是由于当输入能量一定时, 根据输入量的计算式

$$E_i = CV^2/2 \quad (1)$$

得到

$$V = \sqrt{2E_i/C} \quad (2)$$

因此当 C 较小的时候, 同样的输入功率则需要更高的放电电压, 这样使流过闪光灯的电流增大, 一般情况下, 当放电电流密度增大时, 脉冲闪光灯的发

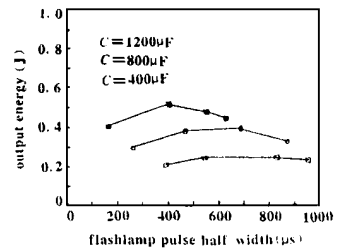


Fig. 5 The effect of flashlamp pulse half width on the laser output for the same input energy and different discharge capacity, $T_w = 13^\circ\text{C}$, $T = 29\%$

光功率密度增大, 脉冲闪光灯的发光效率也随之提高。

射光谱将会向短波长方向移动,而 Cr, Tm, Ho: YAG 激光棒主要吸收近紫外的泵浦光,所以这时的转换效率将会提高,最终使激光器的效率提高。不过由于受放电电压不能过高的限制,要综合考虑电源的参数,不能片面追求高效率。

四、结 论

从以上的介绍中可以看到,冷却水温对 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器输出的影响较大,输出效率几乎是随着温度的提高而直线的下降。以上的实验是在单脉冲的情况下得到的结果,可以想到在重复频率的情况下,特别是在高重复频率的情况下,冷却水温对这种激光器的影响将会更大,因此在研制这种激光器时应该把冷却问题作为首要的事情来解决。目前 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器均能在室温下运行,不过一般都需要把水的温度降到 10℃ 以下,这时激光器的工作将是高效的。不同的输出镜透过率对激光器的阈值、输出能量和效率也有较大的影响,从上面的分析中可以看到,虽然在相同条件下 $T = 15\%$ 时的阈值、输出能量和效率都最高,但是它很快就饱和了,而 $T = 29\%$ 时的能量较高,效率跟 15% 相差不大,所以在单脉冲的条件下 29% 的透过率较好,当然在重复频率的条件下小透过率的输出镜将会好些。由于 Cr, Tm, Ho: YAG 激光工作物质的能级间的转换过程较多,因此需要对其进行较长时间的泵浦,这就需要激光器的电源应输出长脉冲对闪光灯供电。考虑到 Cr^{3+} 吸收的主要是近紫外光,因此在激光器的设计上要有所不同,如闪光灯玻璃和冷却水玻璃套管都不能用滤紫外的,闪光灯也应有所不同,它的光谱应向近紫外靠近,所以它的充气压也应该更大些。还有一点,那就是由于水对这种激光吸收严重,而空气中多少都有水分子,这会给激光的产生和输出都带来很大的影响,特别是对两个镜片的影响最大,容易使镜片吸热过多而损坏,所以这种激光器应该有装置对其干燥以确保没有水汽的影响。

2.1 μ m 波段的激光器的研究已经逐渐成为热点,相信经过今后进一步的研究,这种激光器的性能会得到进一步的提高,并应用到更多的领域中去。

参 考 文 献

- 1 Teichman H O, Duczynski E W, Huber G. SPIE Proc, High Power Solid Laser, 1988; 1021: 74~ 81
- 2 Quarles G J, Rosenbaun A, Marquardt C L *et al.* SPIE Proc, Solid State Lasers, 1990; 1223: 221~ 229
- 3 Bowman S R, Winings M J, Anyaung R Y *et al.* IEEE J Q E, 1991; 27(9): 2142~ 2149
- 4 Daly J G, Smith C A. SPIE Proc, Solid State Laser III, 1992; 1627: 26~ 31
- 5 Bouchenkov V A, Antipenko B M, Berezin U D *et al.*, SPIE Proc, Solid State Laser III, 1991; 1410: 185~ 188
- 6 Bowman S R, Winings M J, Searles S *et al.* IEEE J Q E, 1991; 27(5): 1129~ 1131
- 7 Allatev A N, Smirnov V A, Sheherbakov. Soviet J Q E, 1993; 23: 962
- 8 Pinto J F, Esterowitz L. IEEE J Q E, 1994; 30(1): 167~ 169
- 9 Bowman S R, Lynn J G *et al.* IEEE LEOS' 93, Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1993

作者简介: 叶洪波,男,1970 年出生。硕士。

收稿日期: 1995-07-01