

低温重复率 Yb:YAG 固体激光放大器

李磊,王建磊,程小劲,刘晶,施翔春,陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

摘要: Yb:YAG 晶体比 Nd:YAG 晶体更适用于产生和放大具有 Hz 量级重复频率的高脉冲能量激光。报道了 LD 泵浦低温工作的 Yb:YAG 脉冲固体激光放大系统。整个系统由再生种子源、预放大器和主放大器 3 部分组成。晶体用铟和金箔作为导热层压到金属热沉上,散热方式采用传导冷却,低温环境由液氮冷却热沉来保证。实验结果表明:当晶体温度控制在 150 K 时,装置得到了 3 J@10 ns, 10 Hz 的 1 030 nm 脉冲激光能量输出。研究了低温真空环境下介质膜的损伤等因素对泵浦参数的要求,最后分析了进一步提升脉冲能量所需要解决的问题。

关键词: 激光放大器; Yb:YAG; 脉冲能量; 低温

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1170-04

Cryogenic Yb:YAG solid state pulsed laser amplifier

Li Lei, Wang Jianlei, Cheng Xiaojin, Liu Jing, Shi Xiangchun, Chen Weibiao

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

Abstract: Compared with Nd:YAG, the Yb:YAG laser system is more suitable to produce at several Hz repetition rates high pulsed energy laser beam. A LD pumped Yb:YAG solid state pulsed MOPA laser system at cryogenic temperature was reported. The amplifier chain was composed of three parts: regenerative amplifier seed, pre-amplifier and main amplifier. The thermal management was realized by liquid nitrogen cooling sink on which laser crystal was compressed using indium and gold foil as thermal interface. The coating film damage at cryogenic and vacuum environment was studied, which directly affected the pumped and extracted parameter design. A 1 030 nm pulse 10 Hz, 10 ns laser output energy 3 J was achieved. At last, in order to improve laser energy scalability the further step was analyzed.

Key words: laser amplifier; Yb:YAG; pulse energy; cryogenic

收稿日期:2012-09-05; 修订日期:2012-10-03

基金项目:国家自然科学基金(61008020)

作者简介:李磊(1971-),男,助理研究员,博士,主要从事大能量激光器和新型固体激光器方面的研究。Email:lilei@siom.ac.cn

0 引 言

LD 泵浦的具有一定重复频率的高脉冲能量、高光束质量的激光光源在社会生活的各个方面都有着巨大的应用发展前景^[1-2]。Yb:YAG 增益介质相对于掺 Nd 的激光工作物质而言具有量子亏损小、上能级寿命长等特点,适合于用作此类激光器的工作物质。但常温下 Yb:YAG 晶体准三能级的性质特点和相对较差的导热能力限制了其平均功率的提升。而在低温工作条件下其导热能力明显改善,同时当工作温度低于 150 K 时可以成为真正意义上的四能级激光系统,这些特性都有着诱人的应用潜力,使 Yb:YAG 成为非常适合在低温条件下的增益工作介质^[3-7]。文中报道了研究的低温工作重复率脉冲 Yb:YAG 固体激光放大器系统。

1 系统构成

整个系统由再生放大器产生的单频种子源、预放大器助推级和高能量提取的主放大器组成,如图 1 所示。

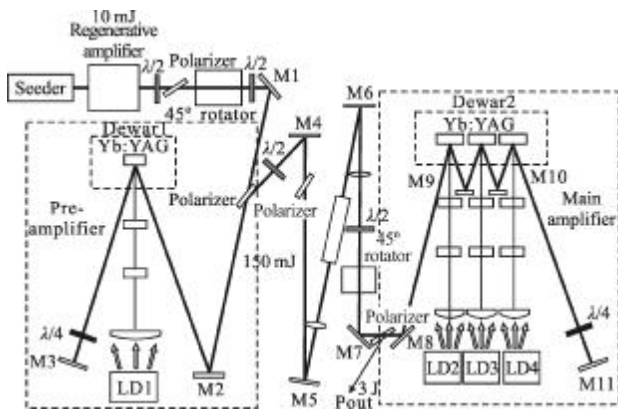


图 1 3J 脉冲低温 Yb:YAG 放大器结构示意图

Fig.1 Schematic of 3J cryogenic Yb:YAG pulsed laser amplifier

1.1 种子源

种子源提供一束脉宽为 10 ns,重复频率为 10 Hz 的单频激光,为了实现与后面放大器增益波长的准确匹配,图示的再生放大器同样需要低温工作,利用 Yb:YAG 晶体在低温环境下优异的光学特性,实现弱脉冲信号光的能量放大,如图 2 所示^[8]。信号光通过再生放大器可以得到 10 mJ 的能量输出,总增益大于 10⁷ 倍,稳定度±3%,光束质量因子为 M_x²=1.24,

M_y²=1.18。并利用二元面板以及空间滤波器对高斯分布的输出光进行了空间整形处理,得到了 4.5 mm×4.5 mm 的平顶光束,方波扭曲度<1.5。图 3 是种子光斑空间整形处理后的能量分布图。

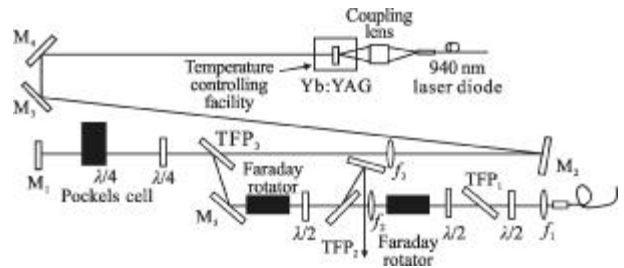


图 2 低温 Yb:YAG 再生放大器种子源构型图

Fig.2 Cryogenic Yb:YAG regenerative amplifier seed configuration

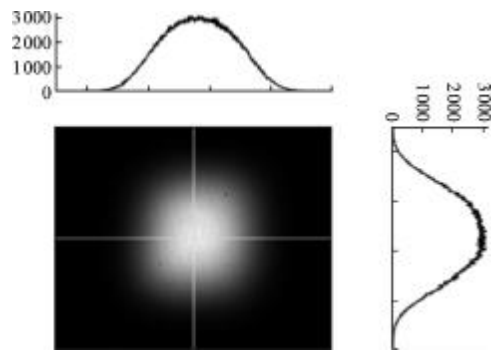


图 3 种子光斑形状

Fig.3 Shape of seeding laser beam

1.2 预放大器

预放大器将种子源 10 mJ 的脉冲能量提升到数百 mJ 量级。预放级的低温系统采用的是 Janis 的 ST-100 冷却系统,利用液氮冷却可以使晶体工作在 77~325 K 之间,温控精度可以达到 0.1 °C。实际的激光系统增益介质不能工作在太低的温度下,否则增益截面的迅速增大导致 ASE 会大量消耗反转粒子数,降低放大器的效率。经过实验,确定晶体的工作温度为 150 K。泵浦源是 DILAS 的 3 000 W QCW Stack,工作时的占空比为 1%,快轴准直后的发散角小于 8 mrad。

Yb:YAG 在低温下的吸收会相对增强,经过对增益介质低温下的光谱测量,计算出其对泵浦光的吸收系数。如图 4 所示为采用分光光度计测量得到的掺杂浓度为 4.0at%、厚度为 4 mm 的 Yb:YAG 晶体在不同温度下的透过率曲线(晶体未镀增透膜)。

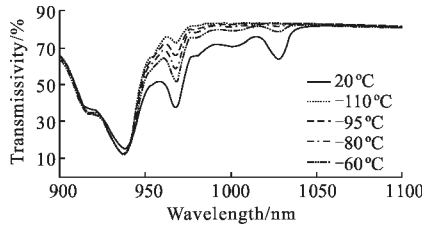


图 4 5 at% 掺杂 4 mm 厚 Yb:YAG 晶体在不同温度时的透过率曲线
Fig.4 Transmissivity curves of 4 mm thick 5 at% doped Yb:YAG crystal at different temperature

可以看到，低温时比常温下吸收峰向短波方向移动，由此可以通过控制 LD 的工作温度实现泵浦光的最大吸收效率。

1.3 主放大器

主放大器将百 mJ 量级预放大级的激光放大到 3 J，整个主放大器由 3 块晶体级联而成。为了实现能量的提升，泵浦源用了 3 个 DILAS 公司的 8 000 W QCW Stack，泵浦区域的能量分布均匀度优于 ±15%。

如图 5 所示是 Yb 离子的能级图，其结构非常简单，只有 $^2F_{7/2}$ 的基态和 $^2F_{5/2}$ 的受激多重态。泵浦和激光跃迁发生在 Stark 子能级之间。用 L 和 U 分别表示上、下能级，设参与激光放大过程的 Yb 离子粒子数密度为 N_{Yb} ，则有

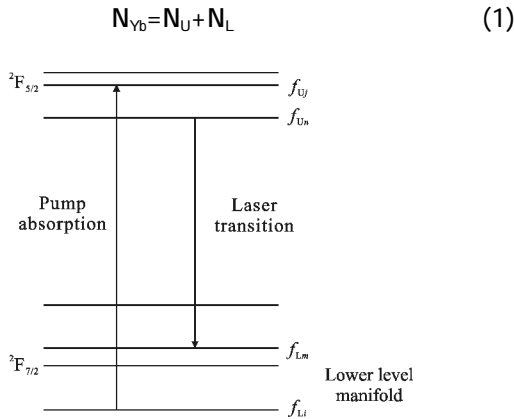


图 5 Yb 离子能级示意图

Fig.5 Energy level scheme for Yb:YAG

首先定义参与泵浦和激光跃迁的 Stark 子能级的波耳兹曼热分布因子： $f_{Uj}, f_{Li}, f_{Un}, f_{Lm}$ 。其中下标 i, j 对应着泵浦跃迁子能级； m, n 对应着激光跃迁子能级。这样，泵浦和受激辐射过程 Yb 离子对应的粒子数差为

$$\Delta N_p = f_{Li} N_L - f_{Uj} N_U = N_{Yb} (f_{Li} + f_{Uj}) (f_p - X_U) \quad (2)$$

$$\Delta N_l = f_{Un} N_U - f_{Lm} N_L = N_{Yb} (f_{Lm} + f_{Un}) (X_U - f_l) \quad (3)$$

其中 $f_p = \frac{f_{Li}}{f_{Li} + f_{Uj}}, f_l = \frac{f_{Un}}{f_{Lm} + f_{Un}}, X_U = \frac{N_U}{N_{Yb}}$

最后根据激光粒子数密度的变化关系可以得到一组跟泵浦和跃迁对应的微分方程组：

$$\tau_U = \frac{dX_U(t, z)}{dt} = I_p(t, z) [f_p - X_U(t, z)] - X_U(t, z) \quad (4)$$

$$\frac{dI_p(t, z)}{I_p(t, z)} = -\alpha_0 [f_p - X_U(t, z)] dz \quad (5)$$

$$\tau_U = \frac{dX_U(t, z)}{dt} = X_U(t, z) = I_l(t, z) [X_U(t, z) - f_l] \quad (6)$$

$$\frac{dI_l(t, z)}{I_l(t, z)} = g_0 [X_U(t, z) - f_l] dz \quad (7)$$

式中： $I_p(t, z)$ 和 $I_l(t, z)$ 分别为泵浦和跃迁对应的激光能量密度； α_0 为增益介质的吸收系数； g_0 为小信号增益系数。

这样，通过分步求解上述方程就可以进行数值计算模拟。图 6 是用 MATLAB 数值求解的主放大器输入与输出脉冲能量关系，对应的计算条件是：温度为 150 K，晶体厚度为 3.0 mm，掺杂浓度为 4at%，泵浦面积为 16 mm×16 mm，激光面积为 15 mm×15 mm，3 个模块级间传输效率为 0.85，损耗因子为 0.3。

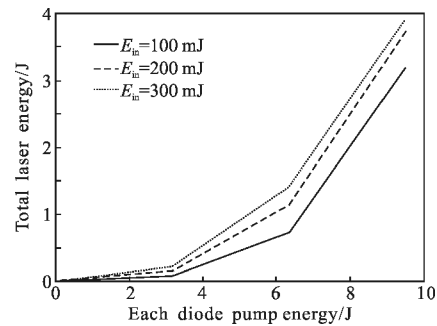


图 6 数值模拟的主放大器输入与输出能量的关系

Fig.6 Main amplifier input vs output energy using MATLAB

2 膜层损伤阈值和增益介质的 ASE

由于 Yb:YAG 增益介质工作在低温和真空环境下，晶体的增透膜和高反膜的损伤阈值与常温常压时的情况有很大的不同。文中采用自制的测量设备对膜层的损伤阈值进行了测量，包括增透膜和高反膜的损伤测试。测试方法采用在不同温度下对增透和高反膜用经过标定能量密度的激光光源以 10 Hz 的重复频率在同一样点连续作用 1 min，然后在光学显微镜下观察有没有膜层破斑为判定依据。实验

中激光损伤测试采用了6个能量台阶,分别是3 J/cm²、5 J/cm²、7 J/cm²、9 J/cm²、11 J/cm²、13 J/cm²,结果初步测定所用批次的晶体增透膜损伤阈值在温度为150 K时是5 J/cm²,高反膜的损伤阈值是9 J/cm²。在实际的系统中,以4 J/cm²的上限能量密度来进行系统设计。

由于低温下 Yb:YAG 增益介质的发射截面会显著增加,因此泵浦光到一定强度可能会产生自激振荡和 ASE,需要加以克服。实验中所用的晶体尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 6.5\text{ mm}$,其中掺杂4%的晶体部分厚度为3.5 mm,与厚度为3.0 mm的未掺杂的纯 YAG 晶体键合,以消除强泵浦时的端面效应。为了消除自激振荡和 ASE,晶体用小角度的圆锥面代替圆柱面,周边打毛并作了特殊处理。泵浦区域的选择以计算以最大泵浦参数得到的 $g_0 D < 4.7$ 作为判据, D 是泵浦面积的横向尺寸。

3 实验结果和改进方向

由于主放大器所用的 LD 堆栈性能退化,使用一段时间后泵浦脉冲能量和均匀度都有一定程度的下降。实验中种子能量为200 mJ,3个 LD 泵浦脉冲能量为6.5 J,最后得到了10 ns,10 Hz,3 J的能量输出,光光效率约为15.4%。图7为种子光和放大光的光斑形状,变化的比较严重。

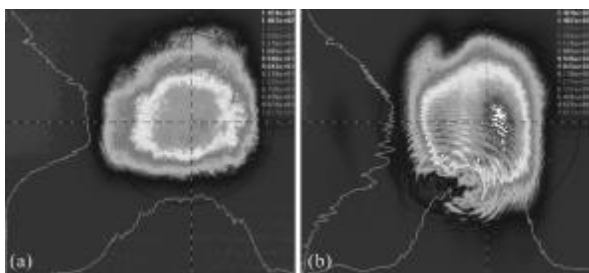


图7 种子光斑和放大光斑形状

Fig.7 Seed laser image and amplified laser image

分析原因,晶体的热效应是一个比较重要的原因,一是因为泵浦的均匀性比较差导致;另外,晶体的散热用铜和金箔作为导热层压到金属热沉上,施加的压力会导致晶体的机械形变,两种因素产生的应力变化都会使光束质量恶化。现尝试将晶体采用铜焊的工艺焊接到钨铜热沉上,同时改进泵浦的均

匀性和采用畸变矫正的措施,使这种构型的放大系统能够有足够的按比例脉冲能量放大能力。

参考文献:

- [1] Wang Mingzhe, Duan Wentao, Cao Dingxiang, et al. Laser diode pumped cryogenically cooled Yb:YAG laser design for rep-rated and high-energy output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(1): 36-40. (in Chinese)
王明哲, 段文涛, 曹丁象, 等. 激光二极管泵浦的重复频率大能量低温 Yb:YAG 激光器设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(1): 36-40.
- [2] Dai Mei, Jin Guangyong, Wang Chao, et al. 100 MW high peak power and high beam quality Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 612-616. (in Chinese)
戴梅, 金光勇, 王超, 等. 100 MW 级高功率高光束质量 Nd:YAG 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 612-616.
- [3] Jiang Dongzhen, Duan Wentao, Xu Meijian, et al. High power laser diode end-pumped Yb:YAG repeat frequency laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1831-1834. (in Chinese)
蒋东镇, 段文涛, 徐美健, 等. 高功率激光二极管端面抽运重复频率 Yb:YAG 激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1831-1834.
- [4] Fan T Y, Crow T, Hoden B. Cooled Yb:YAG for high-power solid state lasers[C]//SPIE, 1998, 3381: 200-205.
- [5] Rand D, Miller D, Ripin D J, et al. Cryogenic Yb³⁺-doped materials for pulsed solid-state laser applications [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(3): 434-450.
- [6] Brendan A R, Alden H C, Keith A W, et al. Development of high energy diode-pumped thick-disk Yb:YAG chirped-pulse-amplification lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(6): 827-835.
- [7] Wang Mingzhe, Li Mingzhong, Zheng Jiangang, et al. Application of heat-pipe cooling in Yb:YAG laser amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1457-1460. (in Chinese)
王明哲, 李明中, 郑建刚, 等. 热管冷却技术在 Yb:YAG 激光放大器中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1457-1460.
- [8] Wang J F, Jiang Y E, Li X C, et al. Research of diode-pumped cryogenic Yb:YAG amplification at 10Hz repetition rate[C]//SPIE, 2011, 7916: 79160M-1-8.