

采用钛宝石薄片作为增益介质的再生放大器

赵 环^{1,2} 魏志义¹ 滕 浩¹ 韩海年¹ 王兆华¹

(¹中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190
²北京无线电计量测试研究所计量与校准技术重点实验室, 北京 100854)

摘要 实验研究了以钛宝石薄片作为增益介质的再生激光放大器,其钛宝石薄片厚度为 2 mm,前表面作为通光面,镀有对抽运激光和放大激光增透的高阈值双色介质膜,后表面作为反射面,镀有对抽运激光和放大激光高反的高阈值双色介质膜,晶体对抽运激光的吸收率大于 80%(1 次透射和 1 次反射)。在再生腔中,钛宝石晶体不仅作为增益介质,也作为反射腔镜,简化了放大腔腔型。钛宝石晶体采用端面冷却的方式,极大地降低了晶体中的热效应,从而提高了放大脉冲激光的光束质量,在此基础上获得了能量为 5.2 mJ 的放大激光脉冲输出,能量转换效率达到 11.5%,放大激光光束质量因子 M^2 小于 1.2。

关键词 激光器;再生放大;薄片;热效应;钛宝石

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0902011

Thin Disk Ti:Sapphire Regenerative Amplifier

Zhao Huan^{1,2} Wei Zhiyi¹ Teng Hao¹ Han Hainian¹ Wang Zhaohua¹

¹Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
²Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing Institute of
Radio Metrology & Measurement, Beijing 100854, China

Abstract A regenerative amplifier taking a thin disk Ti:sapphire crystal (2 mm thick) as gain medium is presented. The front face of crystal is anti-reflection (AR) coated at 532 nm and 750~850 nm, the other face is high reflection (HR) coated at 532 nm and 750~850 nm, and the total absorbing efficiency of the crystal is over 80% at 532 nm for double passes. In the regenerative cavity, the Ti:sapphire crystal also acts as a flat reflective mirror, which reduces the complexity of amplifier. The crystal is end-cooled to reduce the thermal effects and improve the beam quality of amplified laser pulses, as a result, the output energy of the amplified laser is about 5.2 mJ, the corresponding conversion efficiency is 11.5%, and the beam quality factor M^2 is less than 1.2.

Key words lasers; regenerative amplification; thin disk; thermal effect; Ti:sapphire

OCIS codes 140.3280; 140.6810; 140.7090

1 引 言

超快超强激光是近十年来激光技术和物理学最前沿的研究内容之一。由于这一研究领域的持续快速发展,目前人们在实验室已经得到聚焦功率密度大于 10^{21} W/cm² 的光场。在这种超高强度光场的作用下,物质将表现出前所未有的极端非线性效应,并导致许多全新的物理现象和物理问题,从而为人们取得创新的学术思想提供了重要的前沿研究平

台。钛宝石激光放大器^[1]因其增益高、输出能量大以及性能稳定可靠等优点,已成为超快超强激光脉冲的标准台面装置,在强场科学领域具有极其广泛和重要的研究及应用价值。

依据不同的能量输出要求,超快激光放大装置可能会有多级组成,基本可分为预放大和主放大,前者属于小信号放大,后者则属于强信号放大。预放大一般是由再生放大器组成的,它能够把纳焦量级的激光

收稿日期: 2012-04-06; 收到修改稿日期: 2012-06-11

基金项目: 国家 863 计划和中国科学院知识创新项目(KJ CX2-YW-N36)资助课题。

作者简介: 赵 环(1980—),女,高级工程师,主要从事超快激光及其应用方面的研究。E-mail: huanzhao@sina.com

脉冲放大到毫焦量级,放大比为 10^6 。为了提高增益,同时也为了降低激光脉冲对钛宝石晶体表面的破坏,再生腔中使用的钛宝石晶体长度一般都在 10 mm 以上。再生放大过程中,当抽运激光脉冲注入钛宝石晶体后,至少有 30% 的抽运能量转换为热能沉积

在晶体中 $\left(\eta = 1 - \frac{\lambda_{\text{pump}}}{\lambda_{\text{lasing}}} = 1 - \frac{532 \text{ nm}}{800 \text{ nm}} = 0.335\right)^{[2,3]}$,

热源与抽运激光在晶体中的空间分布相同,由于激光介质激活区内温度的不均匀分布会产生如热透镜、应力双折射等热效应,且晶体越长越明显,这些效应会导致腔内光斑模式的畸变,从而导致最终输出放大激光的光束质量以及脉冲能量的降低^[4]。因此高效率的散热通常是设计高功率激光放大器时考虑的重要因素之一。为尽可能地减小热效应,人们曾采取多种措施对放大腔内的钛宝石进行制冷,如水循环冷却、半导体制冷^[5]甚至于利用复杂的液氮杜瓦装置进行冷却^[6,7]等,但晶体内部的热传导毕竟是需要一定时间的,因此其内部的温度梯度依旧存在。本课题组搭建了一台钛宝石再生放大器,以一块厚度为 2 mm 的薄片状钛宝石晶体作为激光增益介质,采用端面冷却的方式,极大地降低了热效应对光斑模式的影响,在此基础上最终得到脉冲能量为 5.2 mJ、高光束质量的放大激光脉冲。

2 薄片状钛宝石增益介质及其冷却装置设计

实验中使用的钛宝石晶体薄片及其冷却装置如图 1 所示,钛宝石晶体“end1”面为通光面,镀有对抽运激光(532 nm)和放大激光(中心波长为 800 nm)增透的高阈值双色介质膜;“end2”面为反射面,镀有对抽运激光和放大激光高反的高阈值双色介质膜。抽运激光采用端面抽运方式,经凸透镜聚焦到晶体中(晶体中光斑半径为 ω_p),大部分激光被晶体吸收后,剩余的激光会由“end2”面反射回去从而被再次吸收,这相当于对晶体进行了二次抽运,因此抽运激光在晶体中的总吸收效率为

$$\eta_{\text{abs}} = [1 - \exp(-\alpha L)][1 + \gamma \exp(-\alpha L)], \quad (1)$$

式中 α 为吸收系数 (4.8 cm^{-1}), L 为晶体厚度 (2 mm), γ 为反射面对抽运激光的反射率 (99%), 经过计算得到 $\eta_{\text{abs}} = 85.1\%$, 钛宝石晶体焊接后实际测量的 $\eta_{\text{abs}} = 83.8\%$ 。

为实现对钛宝石晶体的有效冷却,其反射面被焊接(焊料为铜)在一个无氧铜旋转台上,旋转台固定在通有循环水的热沉上,旋转台和热沉之间是一

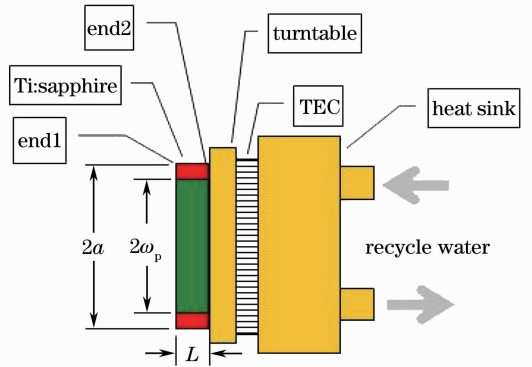


图 1 钛宝石及冷却装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cooling system

块半导体制冷片(TEC),它受外部控制使得钛宝石晶体的温度 T_0 恒定为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

晶体中的温度分布可以通过热传导方程求解^[8]:

$$\nabla^2 T = -\frac{2\alpha\eta_b P}{k\pi\omega_p^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

式中 k 为热传导系数, η_b 为热转换效率, P 为抽运功率(假设抽运激光为基模高斯分布)。

根据晶体冷却方式,方程的边界条件为^[9]

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=a} = 0, \quad (3)$$

晶体边缘绝热, a 为晶体半径;

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (4)$$

晶体透射面绝热;

$$T|_{z=L} = T_0. \quad (5)$$

晶体反射面恒温。

根据 Cousins 等^[10,11]的计算,对于棒状晶体,端面冷却时晶体内部温度分布总是比边缘冷却时更均衡,且晶体内的最大应力更小,可避免出现应力裂纹;当 $L/(2a) = 0.25$ 时,端面冷却和边缘冷却情况下,晶体内部温度分布近似相同,但当 $\omega_p \rightarrow a$ 时,端面冷却的晶体内部平均温度及应力分布均衡,不会产生光学畸变现象,且随着 $L/(2a)$ 的减小,晶体内部平均温度及应力会迅速减小。设 $\frac{L}{2a} \rightarrow 0, \frac{\omega_p}{a} \rightarrow 1$, 在抽运激光均匀分布的情况下,通过对旋转台的冷却,晶体不仅可以工作在低温状态下,而且在冷却面方向,即垂直于光束的方向不会有热梯度,因此避免了常规放大器增益介质中固有的有害热效应影响,从而有利于获得较高的激光增益和优良的光束质量。

3 实验研究

图 2 是使用钛宝石晶体薄片作为增益介质的再

生放大激光器的实验装置图,主要由四部分组成:再生谐振腔、隔离输出系统、种子源和抽运源。再生腔包括钛宝石晶体、平面全反镜、薄膜偏振片和普克尔盒。钛宝石晶体不仅作为增益介质,也作为反射镜,与平面全反镜共同构成平平谐振腔。实验中使用的抽运源为 Nd:YAG 倍频激光器,重复频率为 10 Hz,脉冲宽度约为 7 ns。抽运激光聚焦光斑半径为 1 mm 左右,位于钛宝石晶体中心处,由于抽运脉冲能量为 45 mJ,它在钛宝石晶体中的最大能量密度为 1.4 J/cm^2 ,低于钛宝石晶体和高阈值介质膜的破坏阈值(5 J/cm^2)。当再生谐振腔内没有插入薄膜偏振片和普克尔盒,且平面全反镜由一个 10% 输出镜代替时,在 45 mJ 脉冲能量抽运下,输出振荡激光的能量为 8 mJ,转换效率达到 17.8%,激光模式为 TEM_{00} 模。实验中对钛宝石晶体的有效散热至关重要,一旦热量积累,累积的热量会导致金属铜焊料融解,热透镜效应会导致腔内元件损坏,振荡激光输出能量也会迅速降低。图 2 中 Ti:S 为薄片状钛宝石晶体, M1 为平面全反腔镜, PC 为普克尔盒, TFP 为薄膜偏振片, WP 为 $\lambda/4$ 波片, FR 为法拉第旋光器, GP 为格兰棱镜, M3~M5 为平面反射镜, M6 为聚焦透镜。

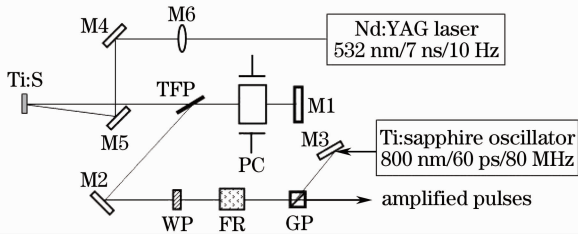


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic diagram of the regenerative amplifier

实验中使用的种子光源是 Tsunami 皮秒振荡器,脉宽为 60 ps,重复频率为 80 MHz,平均功率为 500 mW,且为垂直偏振光。隔离输出系统包括 $\lambda/4$ 波片、法拉第旋光器及格兰棱镜,若偏振光经过法拉第旋光器后再经过 $\lambda/4$ 波片,偏振方向不变;相反,若偏振光经过 $\lambda/4$ 波片后再经过法拉第旋光器,偏振方向将旋转 90° 。这样垂直偏振的种子激光将会由格兰棱镜反射,再由薄膜偏振片反射后以垂直偏振方向注入再生谐振腔。放大激光脉冲同样再以垂直偏振方向经薄膜偏振片反射后从再生谐振腔内导出,然后改变为水平偏振方向后,再经格兰棱镜透射输出。

种子激光进入再生腔后的放大过程如下:当普克尔盒上未加偏压时,它相当于 $\lambda/4$ 波片,当激光脉

冲连续两次经过它时,偏振方向将改变 90° ;相反,当普克尔盒加偏压时,则相当于一个 $\lambda/2$ 波片,当激光脉冲连续两次经过它时,偏振方向不发生改变。首先普克尔盒处于未加电状态,垂直偏振的种子激光由薄膜偏振片反射后先经过普克尔盒一次,再经过平面全反腔镜反射后二次经过普克尔盒,偏振方向变为水平偏振,激光将透过薄膜偏振片,并将进入钛宝石晶体;此时迅速给普克尔盒加电,水平偏振的种子激光再次往返经过普克尔盒时偏振方向不发生改变,因此该脉冲将会在腔内迅速振荡放大;当其能量放大到最大饱和值时,迅速去掉普克尔盒上的高压,放大脉冲再次往返经过普克尔盒后偏振方向将由水平偏振变成垂直偏振,从而被薄膜偏振片反射导出腔外。当普克尔盒处于加压状态时,被薄膜偏振片注入腔内的其他种子激光,在回到薄膜偏振片处时,因已通过普克尔盒两次,偏振方向仍为垂直偏振,这样它们将又被薄膜偏振片直接反射出腔外,未经过钛宝石晶体,不会参与再生放大过程,因此始终只有一个种子激光脉冲在谐振腔内得到了放大。

实验中利用一个光电探测器将种子激光锁模脉冲信号转化为电信号,输入普克尔盒驱动电源作为同步参考信号,将抽运源输出的 Q 开关同步信号输入普克尔盒驱动电源作为外部触发信号,两者共同作用可以产生一个新的使能门开关信号,该信号脉宽可调,与调 Q 信号重复频率相同,与种子激光锁模脉冲信号同步,同步的相对延迟时间可以通过电源的延时 τ 进行调节,这个使能门开关信号控制着普克尔盒的加压情况,当其为低电平时,普克尔盒相当于 $\lambda/4$ 波片,当其为高电平时,普克尔盒相当于 $\lambda/2$ 波片。

4 实验结果与分析

图 3 是放置在平面全反腔镜 M1 后面的光电二极管探测到的再生腔内激光脉冲的振荡放大过程曲线。当使能门开关信号脉宽较宽(约 500 ns)时,调节普克尔盒驱动电源的延时,被选中的种子激光脉冲将会在腔内反复往返振荡,脉冲能量不断得到放大,放大过程如图 3(a)所示,从图中可以看出,激光脉冲达到最大饱和值后仍然在腔内振荡,能量逐渐衰减,直至降为零。优化谐振腔以及抽运激光的方向,使得腔内放大激光的建立时间尽可能提前。以上仅仅是实现了种子激光的选单与放大,下一步是将放大激光脉冲进行倒空,缩短使能门开关信号的宽度,当腔内放大激光能量放大到最大饱和值时,去

掉普克尔盒上的高压,则放大激光脉冲会经过薄膜偏振片反射出腔外,从而实现了腔倒空,如图 3(b)所示。此时使能门开关信号脉宽为 120 ns 左右,而再生腔的腔长为 1 m,因此种子激光在腔内往返了

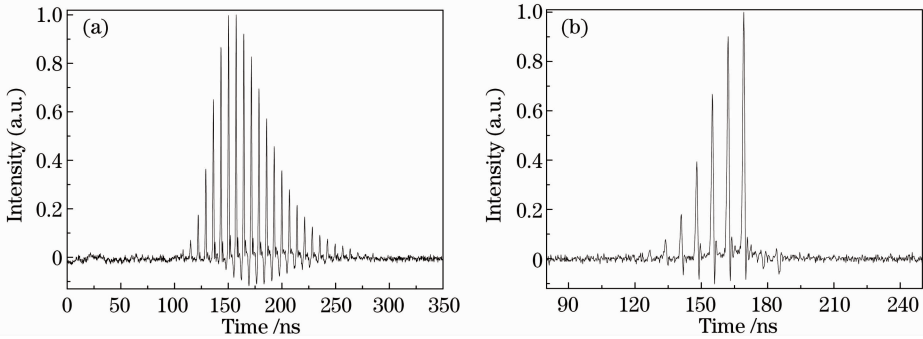


图 3 再生腔内激光脉冲的放大过程曲线。(a)选单后;(b)倒空后

Fig. 3 Amplified laser pulses in the regenerative cavity. (a) After pulse selected; (b) after pulse dumped

(1~10 kHz)激光抽运的放大器中,充分利用薄片状钛宝石晶体在散热冷却方面的优势,将更方便地获得高能量、高光束质量的放大激光脉冲。

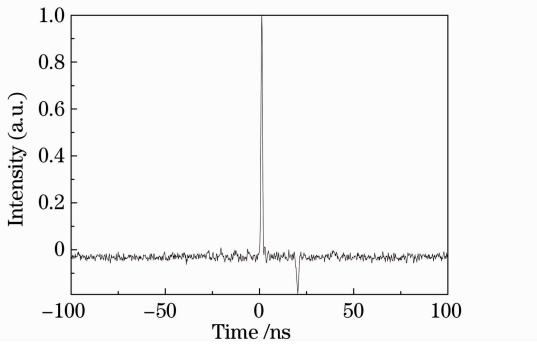


图 4 从腔内导出的放大激光脉冲的信号曲线

Fig. 4 Amplified laser pulse dumped from the regenerative cavity

上述再生放大器的特点是采用钛宝石薄片作为增益介质,薄片的厚度 2 mm,并采用端面冷却的方式,如此设计的目的就是尽可能地降低晶体中的热效应对腔内激光光斑模式造成的不利影响,这非常有利于优化输出放大脉冲激光的光斑模式和光束质量。图 5 是高分辨 CCD 采集的放大激光光斑图像,光束直径约为 4 mm,采用透镜聚焦方式估算, X 轴和 Y 轴 M^2 因子均小于 1.2。实验中抽运激光能量为 45 mJ,产生放大激光脉冲的能量为 5.2 mJ,脉宽约为 60 ps,激光能量转换效率为 11.5%,能量放大倍数为 8.3×10^5 。由于 10 Hz 的 Nd:YAG 激光器输出激光的单脉冲能量比较大,脉冲宽度只有 7 ns,如果对抽运激光采用强聚焦,聚焦后的功率密度比较高,会损伤钛宝石晶体,因此只能采用弱聚焦方式,抽运激光在钛宝石晶体中的聚焦光斑半径为 1 mm,通过增加抽运能量来得到高能量的放大激光输出,降低了放大器的能量转换效率。在进一步的实验中,将薄片状钛宝石晶体运用到较高重复频率

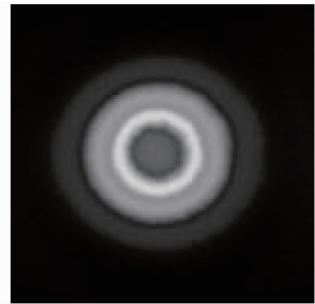


图 5 由 CCD 采集的放大激光脉冲的光斑图像

Fig. 5 Laser beam spot captured by CCD

5 结 论

采用了薄片式钛宝石晶体作为增益介质,搭建了重复频率为 10 Hz 的再生放大器,在晶体厚度 2 mm 的情况下,得到了 5.2 mJ 的放大脉冲激光输出,转换效率达到 11.5%。实验为进一步实现在高重复频率(1~10 kHz)的脉冲抽运下获得高功率、高光束质量的放大激光提供了基础。

参 考 文 献

- 1 J. Squier, F. Salin, G. Mourou *et al.*. 100 fs pulse generation and amplification in Ti:Al₂O₃ [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(5): 324~326
- 2 V. Ramanathan, J. Lee, S. B. Xu *et al.*. Analysis of thermal aberration in a high average power single-stage Ti:sapphire regenerative chirped pulse amplifier: simulation and experiment [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 103103
- 3 G. Wagner, M. Shiler, V. Wulfmeyer. Simulations of thermal lensing of a Ti:sapphire crystal end-pumped with high average power[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 8045~8055

- 4 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl.. Beijing: Science Press, 2002. 356~409
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 356~409
- 5 N. Zhavoronkov, G. Korn. Regenerative amplification of femtosecond laser pulses in Ti : sapphire at multikilohertz repetition rates[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(2): 198~200
- 6 S. Backus, C. G. Durfee, G. Mourou *et al.*. 0. 2-TW laser system at 1 kHz[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1256~1258
- 7 P. A. Schulz, S. R. Henion. Liquid-nitrogen-cooled Ti:Al₂O₃ laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27** (4): 1039~1047
- 8 L. Yan, C. H. Lee. Thermal effects in end-pumped Nd : phosphate glasses [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75** (3): 1286~1292
- 9 V. Quetschke, J. Gleason, M. Rakhmanov *et al.*. Adaptive control of laser modal properties[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 217~219
- 10 A. K. Cousins. Temperature and thermal stress scaling in finite length end-pumped laser rods[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1057~1069
- 11 K. L. Schepler, R. D. Peterson, P. A. Berry *et al.*. Thermal effects in Cr²⁺ : ZnSe thin disk lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 713~720

栏目编辑:宋梅梅