

用于汤姆孙散射诊断的高重频高光束质量焦耳级Nd:YAG纳秒激光器

邱基斯 唐熊忻 樊仲维 陈艳中 葛文琦 王昊成 刘昊

High repetition rate and high beam quality joule level Nd:YAG nanosecond laser for Thomson scattering diagnosis

Qiu Ji-Si Tang Xiong-Xin Fan Zhong-Wei Chen Yan-Zhong Ge Wen-Qi Wang Hao-Cheng Liu Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 154204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.154204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率激光终端KDP晶体非共线高效三倍频及远场色分离方案数值模拟分析

Numerical simulation analysis of high efficient SFG and color separation in far field in high power laser facility based on noncollinear phase matching by KDP crystal

物理学报.2016, 65(14): 144202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144202>

热退火、激光束和电子束等作用对纳米硅制备及其局域态发光特性的影响

Effects of thermal annealing, laser and electron beam on the fabrication of nanosilicon and the emission properties of its localized states

物理学报.2016, 65(10): 104202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104202>

周期极化KTiOPO₄晶体和频单块非平面环形腔激光产生连续单频589nm黄光

Continuous-wave single-frequency 589 nm yellow laser generated from sum frequency of single-block non-planar ring cavity laser in periodically poled KTiOPO₄ crystal

物理学报.2016, 65(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094203>

掺Er³⁺氟化物光纤振荡器中红外超短脉冲的产生

Theoretical study on generating mid-infrared ultrashort pulse in mode-locked Er³⁺: ZBLAN fiber laser

物理学报.2016, 65(4): 044206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044206>

神光-III激光装置时标激光和任意反射面速度干涉仪探针光源产生技术

Research of time fiducial laser and probe laser of velocity interferometer system for any reflector for Shenguang-III laser facility

物理学报.2016, 65(2): 024203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024203>

用于汤姆孙散射诊断的高重频高光束质量焦耳级 Nd:YAG纳秒激光器*

邱基斯¹⁾²⁾ 唐熊忻^{1)2)†} 樊仲维^{1)‡} 陈艳中¹⁾²⁾ 葛文琦¹⁾²⁾
王昊成¹⁾ 刘昊¹⁾

1)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2)(中科和光(天津)应用激光技术研究所有限公司, 天津 300304)

(2016年3月22日收到; 2016年5月18日收到修改稿)

基于激光二极管抽运棒状放大器和板条放大器相结合的方式, 研制了一台应用于汤姆孙散射诊断的高重复频率、高光束质量焦耳级的Nd:YAG纳秒激光器. 激光器采用主振荡功率放大的结构, 主要包括单纵模种子、预放大单元和能量提取单元三部分. 为了获得高光束质量的激光输出, 采用相位共轭技术对激光光束畸变进行补偿. 在重复频率200 Hz、单纵模种子注入单脉冲能量8.23 μ J的条件下, 获得了1.85 J的能量输出. 输出激光的脉冲宽度为5.36 ns, 远场光斑为1.72倍衍射极限, 能量稳定性(RMS)为1.3%.

关键词: 二极管抽运, 高重复频率, 纳秒激光器, 高光束质量

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.By, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.65.154204

1 引言

激光汤姆孙散射诊断是国际公认的最为准确的测量等离子体电子温度的方法, 也是技术难度最高的几个热核聚变装置诊断的手段之一. 激光器是激光汤姆孙系统的关键器件, 而激光器的技术指标——重复频率、光束质量、脉冲能量直接决定了激光汤姆孙仪器的诊断能力. 2009年, 慈佳祥等^[1]报道了HL-2 A激光多道汤姆孙散射系统, 采用重复频率10 Hz、脉冲宽度约10 ns、能量4 J的激光器, 时间分辨率为100 ms, 空间分辨率约为2.2 cm. 2011年, Andrébe等^[2]研制的汤姆孙散射系统采用重复频率20 Hz、单脉冲能量1.8 J、脉宽8—12 ns的Nd:YAG纳秒激光器作为光源. 2015年, Kim等^[3]采用重复频率10 Hz、单脉冲能量1.5 J、脉宽10 ns的Nd:YAG纳秒激光器作为汤姆孙散射系统光源.

在这些现有的实验装置中, 由于激光器重复频率低, 建成的汤姆孙散射仪器只能用于缓慢变化的等离子体参数诊断, 对一些快变的关键物理过程, 如边界局域模的研究就无能为力. 高重复频率是磁约束聚变等离子体诊断的发展趋势. 我国激光汤姆孙散射系统受激光光束质量的限制, 仍无法满足高精度的空间分辨率测量. 因此, 激光器的重复频率和光束质量是影响激光汤姆孙散射诊断时间、空间分辨的重要因素. 而激光器的能量决定了单个待测体积内的光子数, 增强激光器输出能量亦是激光汤姆孙诊断研究中的关键问题.

由于高脉冲能量的Nd:YAG纳秒激光器在激光加工、光电对抗、激光测距、激光通信等方面有着重要应用^[4-7], 是众多前沿科学研究、现代科学仪器和设备中的核心器件, 在此方面已经取得了一系列的研究成果. 2004年, Yoshida等^[8]报道了

* 国家重大科研装备研制项目(批准号: ZDYZ2013-2)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(批准号: 2014RA4051)和中国科学院青年创新促进会资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lotus0311@163.com

‡ 通信作者. E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn

利用闪光灯抽运的Nd:YAG高能激光系统, 激光器重复频率50 Hz, 单脉冲能量7.4 J, 远场光束质量1.5倍衍射极限. 2006年, Yang等^[9]研制了激光二极管抽运棒的Nd:YAG纳秒激光器, 激光器重复频率108 Hz, 单脉冲能量5.1 J, M^2 因子3.6. 2012年, Hatae等^[10]同样利用闪光灯抽运的方法研制了一台YAG原型激光系统, 小信号增益达到20倍, 激光器重复频率100 Hz, 单脉冲能量7.66 J. 这些激光器都选用棒状放大器进行能量放大. 与棒状放大器相比, 板条型放大器的增益介质加大了散热面积, 能有效地减小介质内的热畸变与热应力, 冷却厚度薄, 可高效导出晶体的废热, 不形成大的温度梯度, 由于具有近似一维的热梯度, 极大地消减了双折射效应, 便于热管理. 板条放大器优异的散热能力, 使其成为获得高功率、高光束质量激光输出的最佳途径之一^[11,12]. 1998年, Pierre等^[13]研制了一台激光二极管抽运的Nd:YAG板条激光器, 重复频率100 Hz时, 激光器输出的平均功率为950 W, 远场光束质量为2倍衍射极限. 2014年, Yang等^[14]研制了紧凑型高能Nd:YAG板条激光器, 其重复频率20 Hz, 脉宽13 ns, 单脉冲能量341 mJ.

本文研制了一台高重复频率、高光束质量焦耳级的Nd:YAG纳秒激光器. 为了获得高能量、高光束质量的激光输出, 采用主振荡功率放大(MOPA)的结构, 主要包括单纵模种子、预放大单元和能量提取单元三部分, 并采用相位共轭技术对激光光束畸变进行补偿. 在预放大单元采用中小口径的棒状放大器进行能量放大, 而在能量提取单元采用大口径的板条放大器进行能量放大. 在重复频率200 Hz、单纵模种子注入单脉冲能量8.23 μ J的条件下, 获得了1.85 J的能量输出. 输出激光的脉冲宽度为5.36 ns, 远场光斑为1.72倍衍射极限, 能量稳定性(RMS)为1.3%.

2 实验装置

激光器主要包含单频种子、预放大单元和能量提取单元三个部分. 单频种子负责输出能量为 μ J量级的高光束质量单纵模种子激光. 脉冲单频激光器为半导体抽运的Nd:YAG激光器, 采用声光调制器实现主动调Q, 采用标准具实现单纵模运转, 利用压电陶瓷精确控制谐振腔长, 实现ns级单频脉冲的稳定输出. 其主要技术指标为光束指向精度小

于150 μ rad, 在30—40 ns单脉冲时间内无跳变, 光束质量 M^2 小于1.2, 线偏振度大于100:1. 预放大单元将 μ J量级的脉冲激光放大到数百mJ量级, 并实时矫正预放大过程热效应造成的光学畸变. 能量提取单元实现高增益放大, 最终输出高光束质量的激光.

2.1 预放大单元

预放大单元的光路如图1所示. 单频种子输出的激光经透镜L1将光束口径准直为约 ϕ 1 mm (光强的 $1/e^2$)后进入下一级光路. 光路中所有法拉第前后均有PBS. 由于Nd:YAG晶体具有严重的热退偏特性, 光路中放置四分之一波片消除热退偏. 光路中的两个二分之一波片用于将线偏振光的偏振态旋转90°, 使偏振态与其后的法拉第匹配. 光路中所有Nd:YAG激光放大器均采用激光二极管侧面抽运. 放大器AMP1, AMP2激光晶体的尺寸为 ϕ 3 mm \times 67 mm, 掺杂浓度为0.8%, 在重复频率200 Hz、抽运脉宽250 μ s、抽运电流120 A时, 储能为0.152 J. 放大器AMP3, AMP4激光晶体的尺寸为 ϕ 6.35 mm \times 140 mm, 掺杂浓度为0.6%, 在重复频率200 Hz、抽运脉宽250 μ s、抽运电流70 A时, 储能为0.79 J. 成像透镜组L2, L3与L4, L5起像传递与准直激光的作用, 透镜组中配有空间滤波器, 用于去除光束中的高频分量以保证高光束质量的激光输出. 放大器AMP3与AMP4串联放置, 中间插入90°石英旋光器补偿高重复频率下激光放大器的热致双折射效应, 透镜L4用于补偿两个放大器的热透镜效应.

由于热效应, 高功率激光放大系统不可避免地存在热畸变, 随着激光能量的不断放大, 光束畸变越来越严重, 即使采用热补偿、空间滤波等措施, 也无法获得近衍射极限的光束输出. 为此, 引入受激布里渊相位(SBS)共轭镜, 实现高功率放大的光束波前畸变动态矫正. 利用SBS进行相位共轭双程放大, 可以实时修复光学元件和激光放大器的不均匀性、变形和热畸变等造成的波前畸变, 获得近衍射极限的均匀优质放大光输出. L6是焦距为200 mm的聚焦透镜, 将光束聚焦于相位共轭镜的液体内, 从而对热至波前畸变进行共轭补偿. 高分子碳氟化合物是一类最适合于高能高功率SBS相位共轭镜的介质材料, 它具有吸收系数低、承受高负载能力的SBS特性. 实验中选择超

过滤的FC-770作为SBS增益介质, 其吸收系数为 0.0011 cm^{-1} , 光学击穿阈值高达 197.9 GW/cm^2 , 增益系数 3.5 cm/GW [15]. 预放大单元输出激光的

光束口径约 $\phi 6 \text{ mm}$, 能量约 323 mJ , 为后续的能量提取单元提供种子光.

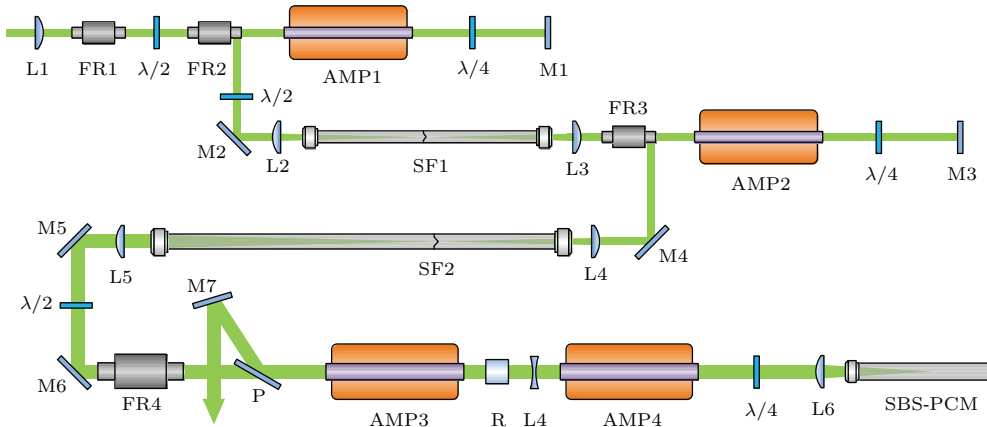


图1 (网刊彩色) 预放大单元光路图(L为透镜, FR为法拉第隔离器, $\lambda/2$ 为二分之一波片, AMP为放大器, $\lambda/4$ 为四分之一波片, M为反射镜, R为 90° 转子, P为偏振片, SF为空间滤波器)

Fig. 1. (color online) Pre-amplifier unit optical pathway diagram (L, lens; FR, Faraday rotator; $\lambda/2$, $1/2$ wave plate; AMP, amplifier; $\lambda/4$, $1/4$ wave plate; M, Mirror; R, 90° quartz rotator; P, polarizer; SF, spatial filter).

2.2 能量提取单元

能量提取单元的光路如图2所示. 为保障输出激光的高光束质量, 在进入下一级放大前, 光束经扩束比为 $1:1$ 的成像透镜组 L7, L8 进行保形传输. 放大器 AMP5 为 zig-zag 板条激光放大器, 采用 808 nm 半导体激光二极管双大面抽运 Nd:YAG 薄板条的方案. 板条外形尺寸为 $7 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 138.2 \text{ mm}$, 切角为 56° , Nd^{3+} 掺杂浓度为 0.6% . 板条表面镀了一层 SiO_2 保护膜, 可以防止密封引起的漏光. 采用水平抽运方式, 如图3所示, 激光二极管的慢轴在水平方向, 与晶体的长度方向和激光的传输方向基本一致. 单面阵由8组垂直 stack 并排而成, 每组 stack 由12个单 bar 功率 200 W 的激光二极管 bar 沿快轴方面堆叠而成. 慢轴方向上, 二极管 bar 发出的光束经慢轴柱面镜发散, 在晶体上叠加形成强度均匀的光斑. 在快轴方向上, 二极管 bar 发出的光束穿过慢轴柱面镜后进入波导中, 在波导的上下面上多次反射后, 最终在晶体内叠加形成均匀光斑. 大尺寸板条模块激光二极管面阵发出的抽运光经整形后在垂直晶体厚度方向形成均匀抽运, 荧光分布如图4所示. 激光束经板条端面入射到晶体内部, 在两个大面间发生全内反射, 沿 Z 形光路通过板条, 获得均匀增益后实现功率放大. 在重复频率 200 Hz 、抽运脉宽 $250 \mu\text{s}$ 、抽运电流

140 A 时, 储能为 2.30 J . 柱面镜组 L3, L4 将 $\phi 6 \text{ mm}$ 的圆光斑扩束为长椭圆光斑进入板条放大器, 经板条放大器进行双程放大后输出.

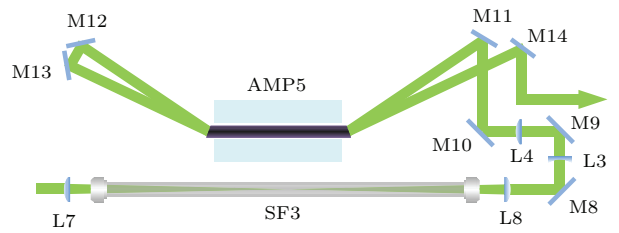


图2 (网刊彩色) 能量提取单元光路图

Fig. 2. (color online) Energy extraction unit optical pathway diagram.

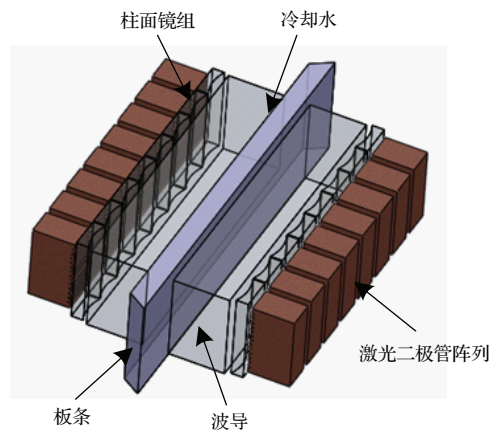


图3 (网刊彩色) 水平抽运方案

Fig. 3. (color online) Horizontal pumped scheme.

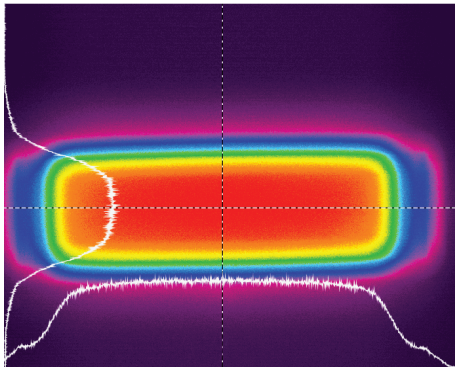


图4 (网刊彩色) 板条放大器的荧光分布
Fig. 4. (color online) Fluorescence distribution of slab amplifier.

3 实验结果与分析

使用示波器 (25G 采样率, 带宽 8 GHz 的 Tektronix 示波器 DSA70804) 与高速光电探测器 (Alphas) 测量种子、经预放大单元后以及经能量提取单元后的时间脉冲波形, 如图 5 所示, 单频种子光的脉宽为 33.95 ns, 经过预放大单元和能量提取单元后激光器输出的激光脉宽为 5.36 ns, 图 5(a) 引起脉冲时间波形变窄的原因有两个: 一是在预放大单元, 由于 SBS 相位共轭镜的脉冲压缩特性, 进入 SBS 池激光的脉宽会被 SBS 压缩, 这一压缩比与 SBS 池前聚焦透镜的焦距有关, 脉冲前沿由于增益饱和而上升很快, 得到了优先放大, 在脉冲得到完全放大后, 抽运激光脉冲能量几乎全部转移到了一个很窄的后向脉冲中, 使脉冲波形前沿比后沿陡得多, 脉冲宽度明显变窄, 如图 5(b) 所示; 二是在能量提取单元, 当脉冲能量接近饱和和通量时, 脉冲前沿对晶体内储能进行优先提取, 导致后沿提取的储能较少, 通过激光晶体前后的脉冲宽度会被压缩, 随着脉冲经过若干级的放大, 脉冲宽度会被进一步压缩, 经能量提取单元后输出时间波形如图 5(c) 所示。

经各级放大器后激光脉冲的能量、储能及能量提取效率如图 6 所示。经过 Amplifier1, Amplifier2, Amplifier3+4, Amplifier5 双程放大后能量提取效率分别为 1.32%, 13.2%, 20.4%, 80.0%。激光器总的光-光效率为 52.46%。

单频种子输出的近场光斑如图 7(a) 所示, 经过预放大单元和能量提取单元后, 激光器输出的近场光斑如图 7(b) 所示。由图 7 可看出, 经过多级能量放大后, 光束近场分布均匀。

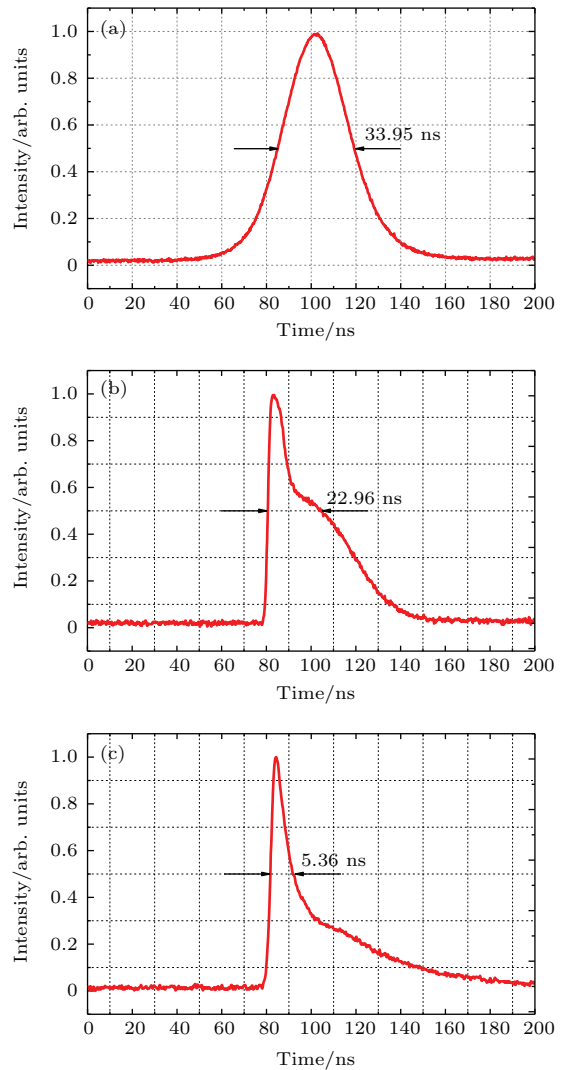


图5 时间脉冲波形图 (a) 种子; (b) 经预放大单元后; (c) 经能量提取单元后
Fig. 5. Pulse waveform diagram: (a) Seed; (b) after pre-amplifier unit; (c) after energy extraction unit.

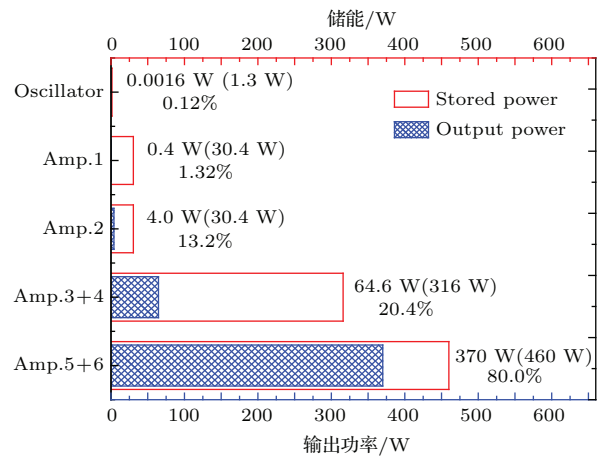


图6 经各级放大器后激光脉冲的能量、储能及能量提取效率
Fig. 6. The output pulse energy, stored power and energy extract efficiency by each power amplification.

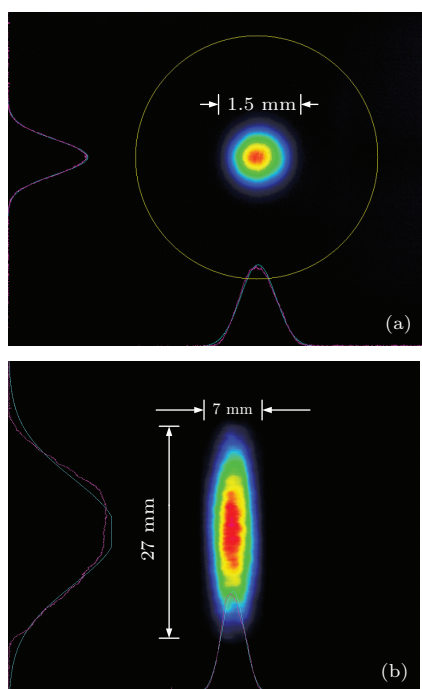


图7 (网刊彩色) 光束的近场分布 (a) 种子; (b) 放大后
Fig. 7. (color online) Spatial distribution of the laser beam in near field: (a) Seed; (b) after amplification.

激光器开机 5 min 后, 对激光器进行测量. 单频种子输出的单脉冲能量为 $8.23 \mu\text{J}$, 空间模式为 TEM_{00} . 在重复频率 200 Hz, 经过预放大单元和能量提取单元后激光器输出的能量为 1.85 J. 测量了激光器 10 min 内输出能量的变化, 如图 8 所示, 输出能量的 RMS 值为 1.3%. 远场能量集中度是衡量激光器光束质量的重要指标之一. 将光斑的远场能量集中度定义为距离光斑中心距离 r 范围内的能量与光斑的总能量的比值. 由于激光器输出的长条形光斑远场能量不集中, 通过柱面镜组将其整形为方形, 远场光斑 86.5% 能量的光斑直径为 1.72 倍衍射极限, 如图 9 所示.

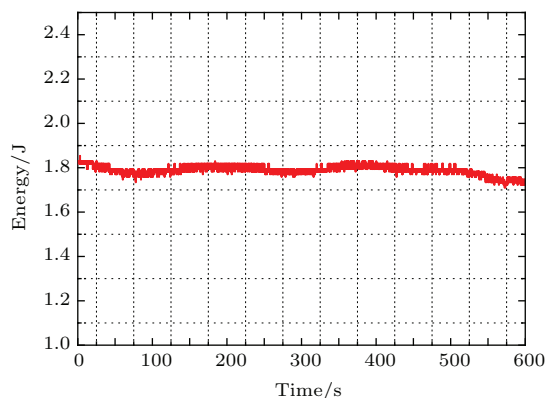


图8 (网刊彩色) 10 min 内激光的输出能量
Fig. 8. (color online) Output energy in ten minutes.

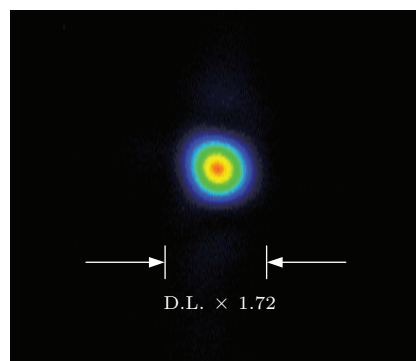


图9 (网刊彩色) 输出光束远场分布
Fig. 9. (color online) Output spot far-field distribution.

4 结 论

本文针对汤姆孙散射诊断所需的高重复频率、高光束质量 Nd:YAG 纳秒激光器进行了实验研究. 激光器采用 MOPA 结构, 由单频种子输出的单纵模激光经过预放大单元、能量提取单元进行能量放大, 并利用受激布里渊相位共轭镜进行光束波前畸变动态矫正. 激光器最终输出重复频率 200 Hz, 脉冲宽度 5.36 ns, 能量 1.85 J 的激光脉冲. 激光器具有良好的光束质量, 能量稳定性 (RMS) 为 1.3%, 远场光斑为 1.72 倍衍射极限. 此激光器将填补国内在高时间、空间分辨激光汤姆孙散射诊断的空白.

参考文献

- [1] Ci X J, Huang Y, Tang C J, Feng Z, Shi P L, Liu C H, Qiu Y 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 359 (in Chinese) [慈佳祥, 黄渊, 唐昌建, 冯震, 施佩兰, 刘春华, 邱银 2009 强激光与粒子束 **21** 359]
- [2] Andr be Y, Behn R, Duval B P, Etienne P, Pitzschke A 2011 *Fusion Eng. Des.* **86** 1273
- [3] Kim Y G, Lee J H, Lee J, An Y H, Dang J J, Jo J M, Lee H Y, Chung K J, Hwang Y S, Na Y S 2015 *Fusion Eng. Des.* **96-97** 882
- [4] Qi Y F, Zhu X L, Lou Q H, Ji J H, Dong J X, Wei R R 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1042
- [5] Jae S S, Sangwoo P, Hong J K 2010 *Opt. Commun.* **283** 2402
- [6] Yang H D, Li X H, Li G Q, Yuan C H, Tang D C, Xu Q, Qiu R, Wang J B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027901 (in Chinese) [杨宏道, 李晓红, 李国强, 袁春华, 唐多昌, 徐琴, 邱荣, 王俊波 2011 物理学报 **60** 027901]
- [7] Liang D W, Joana A, Dario G 2014 *Appl. Opt.* **53** 1856
- [8] Yashida H, Masahiro N, Takaki H, Shigeru K, Takaki S, Takaki H 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 1038
- [9] Yang X D, Bo Y, Peng Q J, Zhang H L, Geng A C, Cui Q J, Sun Z P, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Opt. Commun.* **266** 39

- [10] Hatae T, Yatsuka E, Hayashi T, Yoshida H, Ono T, Kusama Y 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10E344
- [11] Qi Yang Q, Zhu X L, Ma J, Lu T T, Ma X H, Chen W B 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 061401
- [12] Ma X, Wang J, Zhou J, Zhu X, Chen W 2011 *Appl. Phys. B* **103** 809
- [13] Pierre R J S, Mordaunt D W, Injeyan H, Berg J G, Hilyard R C, Weber M E, Wickham M G, Harpole G M, Senn R 1997 *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **3** 53
- [14] Yang H L, Meng J Q, Ma X H, Chen W B 2014 *Chin. Opt. Lett.* **12** 121406
- [15] Hasi W L J, Qiao Z, Cheng S X, Wang X Y, Zhong Z M, Zheng Z X, Lin D Y, He W M, Lu Z W 2013 *Opt. Commun.* **311** 375

High repetition rate and high beam quality joule level Nd:YAG nanosecond laser for Thomson scattering diagnosis*

Qiu Ji-Si¹⁾²⁾ Tang Xiong-Xin^{1)2)†} Fan Zhong-Wei^{1)‡} Chen Yan-Zhong¹⁾²⁾ Ge Wen-Qi¹⁾²⁾
Wang Hao-Cheng¹⁾ Liu Hao¹⁾

1) (Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

2) (Zhong Ke He Guang (Tianjin) Research Institute of Applied Laser Technology Co., Ltd. Tianjin 300304, China)

(Received 22 March 2016; revised manuscript received 18 May 2016)

Abstract

A joule-level Nd:YAG nanosecond laser of high repetition frequency and high beam quality is developed for Thomson scattering diagnosis. The laser is designed as a master oscillator power-amplifier system mainly including single longitudinal mode seed, pre-amplifier unit and energy extraction unit. The single-longitudinal-mode Q-switched laser of a high stability is taken as the seed laser of output pulse at μJ level. The pre-amplifier unit amplifies the μJ -level pulse laser beam into hundreds of mJ level. In order to obtain the high-quality laser beam output, phase conjugation is adopted to compensate for the laser beam distortion. The ultra-filtered FC-770 is taken as an SBS gain medium of 0.0011 cm^{-1} absorption coefficient, 197.9 GW/cm^2 optical breakdown threshold and 3.5 cm/GW gain coefficient. The double-pass amplification of SBS phase conjugation could realize a real-time repair towards the non-uniformity, deformation and wavefront aberration caused by thermal distortion of the optical components and the laser amplifier to achieve the uniform amplified beam output of high quality close to the diffraction limit. In the energy extraction unit, the amplifier of large-diameter slab is used for energy amplification. The size of the slab is $7\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 138.2\text{ mm}$ of 56° cutting angle and 0.6% Nd^{3+} doping concentration. The slab is plated by a layer of SiO_2 against light leak. Horizontal pumping mode is adopted. And the slow axis of the laser diode is almost the same as the length of the slab and the direction of laser transmission. The single-plane array is composed of 8 groups of vertical stacks and each group consists of 12 laser diode bars of power 200 W. At 200 Hz repetition frequency, 250 μs pump pulse width and 140 A pump current, the up to 2.3 J stored energy can be achieved. The energy extraction unit achieves high gain amplification and finally outputs high-quality laser beam. Under the condition of 200 Hz high repetition frequency and 8.23 μJ single pulse energy injected by the single longitudinal mode seed, 1.85 J output energy is gained. The energy extract efficiency of the laser system is 52.46%. The output laser possesses a pulse width of 5.36 ns, a far field beam spot 1.72 times the diffraction-limited value, and 1.3% energy stability (RMS).

Keywords: diode-pumped, high repetition, nanosecond laser, high beam quality

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.By, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.65.154204

* Project supported by the National Research and Development Projects for Key Scientific Instruments, China (Grant No. ZDYZ2013-2), the China Innovative Talent Promotion Plans for Innovation Team in Priority Fields (Grant No. 2014RA4051), and the Youth Innovation Promotion Association, CAS.

† Corresponding author. E-mail: lotus0311@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn