

用于空间碎片探测的百赫兹 3.31 J 高光束质量全固态 Nd:YAG 激光器

樊仲维 邱基斯 唐熊忻 白振岙 康治军 葛文琦 王昊成 刘昊 刘悦亮

A 100 Hz 3.31 J all-solid-state high beam quality Nd:YAG laser for space debris detecting

Fan Zhong-Wei Qiu Ji-Si Tang Xiong-Xin Bai Zhen-Ao Kang Zhi-Jun Ge Wen-Qi Wang Hao-Cheng
Liu Hao Liu Yue-Liang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), **66**, 054205 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.054205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[160W 端面抽运正支混合腔板条激光器的研究](#)

[160 W laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with positive branch hybrid resonator](#)

物理学报.2016, 65(19): 194206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194206>

[CsB₃O₅ 晶体高效三倍频产生 28.3W 355nm 激光](#)

[28.3 W 355 nm laser generated by efficient third-harmonic in CsB₃O₅ crystal](#)

物理学报.2016, 65(18): 184203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.184203>

[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](#)

[High repetition rate and high beam quality joule level Nd: YAG nanosecond laser for Thomson scattering diagnosis](#)

物理学报.2016, 65(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154204>

[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>

用于空间碎片探测的百赫兹 3.31 J 高光束质量 全固态 Nd:YAG 激光器*

樊仲维^{1)2)4)†} 邱基斯^{1)2)3)‡} 唐熊忻¹⁾²⁾³⁾ 白振忞¹⁾²⁾³⁾ 康治军¹⁾²⁾³⁾
葛文琦¹⁾²⁾³⁾ 王昊成¹⁾²⁾ 刘昊¹⁾ 刘悦亮¹⁾

1) (中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2) (国家半导体泵浦激光工程技术研究中心, 北京 100094)

3) (中科和光(天津)应用激光技术研究所有限公司, 天津 300304)

4) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2016年9月28日收到; 2016年12月13日收到修改稿)

基于激光二极管侧面抽运棒状放大器的方式, 研制了一台应用于空间碎片探测的高重复频率、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、受激布里渊散射相位共轭光束控制单元和能量提取单元四部分. 在能量提取单元, 为了减小热效应对光束质量的影响, 降低了放大器的工作电流, 采用了分束-放大-合束的方案. 在重复频率 100 Hz, 单纵模种子注入单脉冲能量 10.73 μJ 的条件下, 获得了 3.31 J 的能量输出. 输出激光的脉冲宽度为 4.58 ns, 远场光束质量为 2.12 倍衍射极限, 能量稳定性 (RMS) 为 0.87%.

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.66.054205

1 引言

随着空间技术的进步, 人类进入太空的活动不断增多, 产生了越来越多的空间碎片. 碎片物质的撞击是航天器机械损伤和损毁的主要原因, 也是影响航天器寿命的主要因素之一, 甚至会危及在航天器外工作的宇航员的生命安全, 也会对天文观测和研究构成威胁^[1,2]. 对于空间碎片的监测与预警逐渐得到广泛关注. 激光探测作为一种方向性好、抗干扰能力强的主动探测手段, 在全天候探测方面有着得天独厚的优势. 研制碎片探测激光光源成为大幅度提高空间碎片探测精度的最直接有效手段. 2011年, 中国科学院上海光机所 Ma 等^[3] 研制了一

台用于空间应用的激光二极管抽运的高效单频板条激光器. 在重复频率 100 Hz, 脉宽为 11 ns 时, 输出的最大能量为 800 mJ. 2012年, Zhang 等^[4] 报道了中国科学院上海天文台利用激光测量太空碎片的实验结果, 使用重复频率 20 Hz、能量 2 J、脉宽 10 ns、波长 532 nm 的 Nd:YAG 激光器在 900 公里内有较强的返回信号, 测距精度约为 60—80 cm. 2014年, Yang 等^[5] 研制了一台用于空间应用的紧凑型高能 Nd:YAG 激光器, 在重复频率 20 Hz、脉宽 13 ns 时, 激光器输出的最大脉冲能量为 341 mJ. 激光器探测能力同时受激光器光束质量、脉冲能量、重复频率的影响. 光束质量会影响空间目标探测与识别能力. 激光器脉冲能量越大, 重复频率越

* 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: fanzhongwei@aoe.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: keith0311@163.com

高,可探测碎片尺寸越小,即探测能力越强.中国科学院国家天文台的于欢欢等^[6]从理论和仿真角度,对望远镜口径大小、激光探测器脉冲能量及重复频率与空间碎片大小及探测距离之间的关系进行了分析,为满足探测微小空间碎片(尺寸为20 cm左右)的需要,建议采用口径1.2 m以上的望远镜和能量在2—3 J之间、重复频率100 Hz的激光器.

由于此类高能量、高光束质量激光器在激光测距、激光加工和激光武器等方面亦有较多的应用^[7-9],已经取得了一系列具有代表性的成果.2004年,Yoshida等^[10]报道了利用受激布里渊散射(SBS)进行光束整形的基于闪光灯抽运的Nd:YAG高能激光系统.在重复频率50 Hz时,单脉冲的能量为7.4 J,远场光束质量为1.5倍衍射极限.2006年,Yang等^[11]研制了激光二极管抽运棒状的Nd:YAG纳秒激光器,在重复频率108 Hz时,激光器的脉宽为230 μs ,单脉冲能量为5.1 J, M^2 因子为3.6.同年,华北光电技术研究所固体激光技术国家重点实验室的孙维娜等^[12]介绍了一种激光二极管抽运的高重复频率、大能量、高光束质量的激光放大系统.在重复频率100 Hz时,脉宽约为20 ns,单脉冲能量约为5 J,远场光束质量约为5倍衍射极限.

本文研制的用于空间碎片探测的全固态Nd:YAG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的结构.主要包括单纵模种子、预放大单元、相位共轭光束控制单元和功率放大单元四部分.就抽运方式而言,文献^[10]采取的是闪光灯抽运,而本文选用的是激光二极管侧面抽运.就输出光束脉冲宽度而言,参考文献^[11]中激光器的脉冲宽度为 μs 量级,而本文激光器的脉冲宽度为ns量级.就输出激光的光束质量而言,参考文献^[12]中激光器的远场光斑为5倍衍射极限,而本文激光器的远场光斑为2.12倍衍射极限.此激光器采用了课题组报道过的相似的方案^[13,14],尤其是与文献^[15]一样,在最后一级放大中都采用了分束-放大-合束的方法,但相位共轭光束控制单元的位置不一样,导致输出光束有着不同的脉冲波形,远场光束质量改善取得的效果也不一样.同时,在文献^[15]中,光束在预放大单元的最后一级即放大器AMP5,AMP6采用双程放大,而在本文中加大了放大器的抽运电流,采用的是单程放大.在重复频率100 Hz,单纵模种子注入单脉

冲能量10.73 μJ 的条件下,获得了3.31 J的能量输出.输出激光的光束口径为 $\phi 25$ mm,脉冲宽度为4.58 ns,远场光斑为2.12倍衍射极限,能量稳定性(RMS)为0.87%.

2 实验装置

激光器采用主振荡-功率放大的方案,主要包括种子源、预放大单元、光束控制单元、功率放大单元四部分,如图1所示.采用高稳定性的单纵模调Q激光器作为种子源,输出 μJ 级的脉冲种子激光.预放大单元将种子激光放大到百mJ量级.光束质量控制单元对能量放大过程中热效应造成的光学畸变进行实时校正.功率放大单元采用分束-放大-偏振合束的方案,实现高增益饱和和放大,最终输出高光束质量的焦耳级激光.

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级脉宽、10 μJ 级能量、百赫兹重频的单频脉冲稳定输出.单频种子与第一级放大器、各级放大器之间均放置隔离比为500:1的隔离器,防止反向激光逆向放大,产生不必要的能量损失和光学元件损伤.各级放大器间均放置空间滤波器进行高频滤波,从而消除高频分量非线性增长引起的小尺度自聚焦.光束传输满足像传递关系,经过空间滤波器的成像透镜组进行保形传输,确保输出高光束质量的激光.种子光在预放大单元共经过三级双程放大.能量为 μJ 级的种子激光经透镜L1准直为 $\phi 1.5\text{mm}$ 后注入系统.空间滤波器SF1透镜的扩束比为1:2.放大器AMP1,AMP2的激光晶体尺寸为 $\phi 3\text{mm} \times 67\text{mm}$,掺杂浓度为0.8%,抽运脉宽250 μs ,抽运电流90 A时,储能为0.152 J.为消除自发辐射光(ASE)振荡,所有放大器中的晶体棒两端面采用 2° 切角设计.空间滤波器SF2透镜的扩束比为1:2.2,将光束扩束至 $\phi 6.6\text{mm}$ 后进入下一级光路.放大器AMP3与AMP4串联放置,其增益和荧光分布等参数完全一致,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,激光经过 90° 石英旋光器后偏振态旋转 90° ,径向偏振态和切向偏振态互换,使得两个放大器的热退偏互相补偿.同时,在放大器之间放置透镜补偿两个放大器的热透镜效应.后级放大器均采用此

串联结构. 放大器 AMP3, AMP4 的激光晶体尺寸为 $\phi 6.35 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 掺杂浓度为 0.6%, 抽运脉宽 $250 \mu\text{s}$, 抽运电流 70 A 时, 储能为 0.79 J.

激光经 AMP3, AMP4 单程放大后, 进入光束控制单元进行光束波前畸变动态矫正. 光束控制单元由一个聚焦透镜和一个单布里渊池组成. 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 [16]. 空间滤波器 SF3 透镜的扩束比为 3 : 5, 将光束扩束至 $\phi 11 \text{ mm}$ 后进入下一级光路. 放大器 AMP5, AMP6 的激光晶体尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 掺杂浓度为 0.8%, 抽运脉宽 $250 \mu\text{s}$, 抽运电流 110 A 时, 储能为 1.46 J. 光束控制单元位于 $\phi 6.35 \text{ mm}$ 的放大器之后, 且经过 AMP5, AMP6 进行单程放大.

空间滤波器 SF4 透镜的扩束比为 2 : 3, 将光束扩束至 $\phi 15 \text{ mm}$ 后进入 PBS1, 分束后分别进行能量放大, 随后经 PBS2 合束后进入扩束比为 3 : 5 的空间滤波器 SF5, 将光束扩束至 $\phi 25 \text{ mm}$ 后输出. 采用分束后分别放大的方案, 是为了降低放大器的工作电流, 减小热效应对光束质量的影响. 放大器 AMP7, AMP8, AMP9, AMP10 的激光晶体尺寸为 $\phi 15 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 掺杂浓度为 0.6%, 抽运脉宽 $250 \mu\text{s}$, 抽运电流 85 A 时, 储能为 1.3 J.

激光器各放大器输出通量分布如图 2 所示, 最大通量出现在 AMP8 和 AMP10 放大器输出端, 约达到 1.9 J/cm^2 . 次最大通量出现在 AMP6 输出端, 约达到 1.3 J/cm^2 . 在目前的元件损伤阈值条件下不会造成元件的破坏.

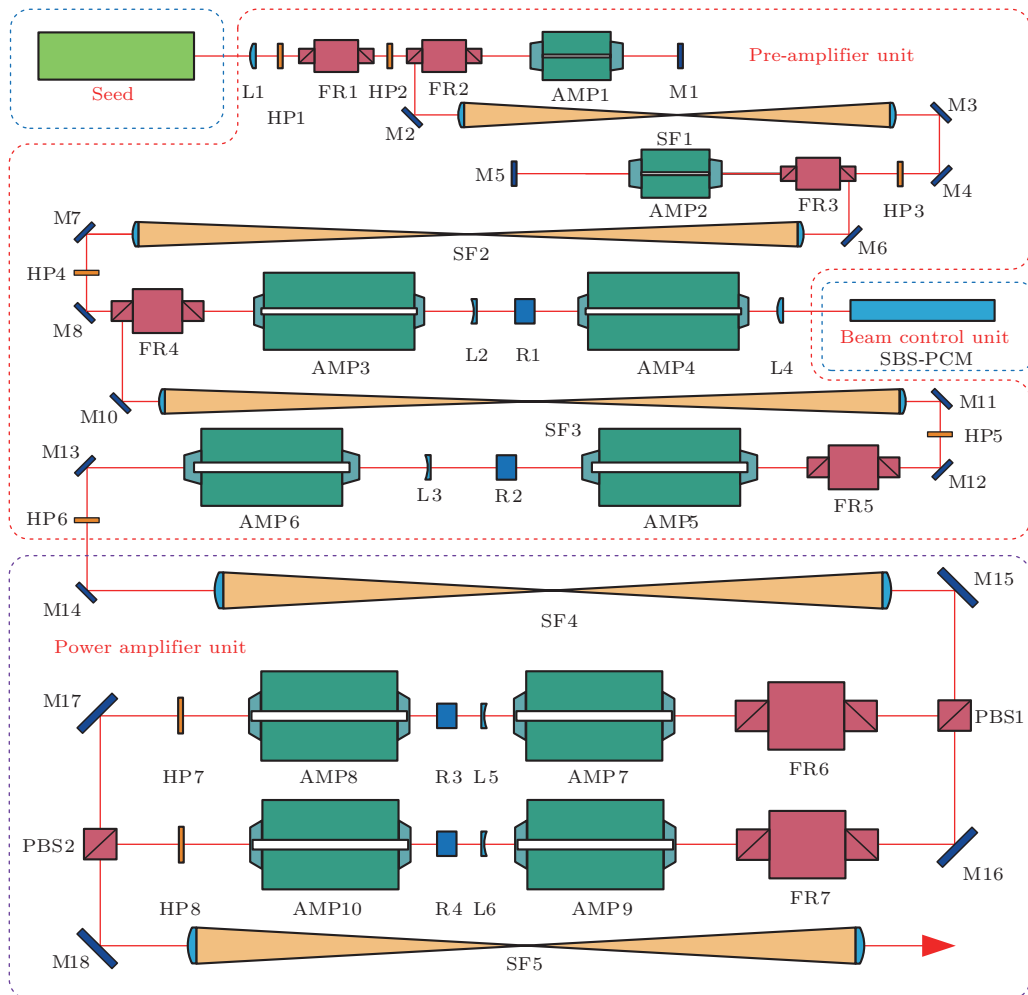


图 1 (网刊彩色) 实验光路图 (L 为透镜, FR 为法拉第隔离器, HP 为 1/2 波片, AMP 为放大器, M 为反射镜, R 为 90° 转子, SF 为空间滤波器)

Fig. 1. (color online) Experimental setup (L, lens; FR, Faraday rotator; HP, 1/2 wave plate; AMP, amplifier; M, mirror; R, 90° quartz rotator; SF, spatial filter).

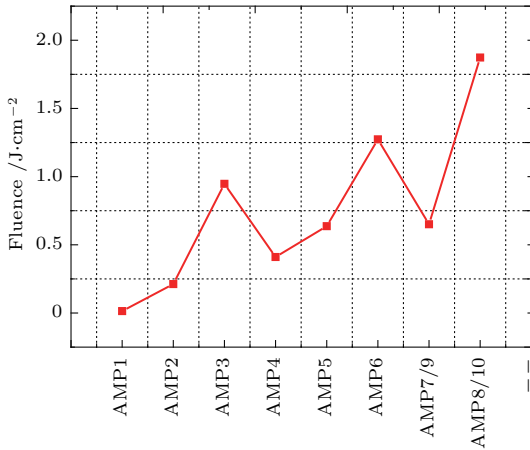


图2 激光器通量分布

Fig. 2. Fluence distribution of the Nd:YAG laser.

3 实验结果

为了补偿各放大器的热透镜效应, 分别测量了各放大器的热透镜焦距, 如图3所示. AMP1, AMP2在抽运电流90 A时的热透镜焦距为850 mm; AMP3, AMP4在抽运电流70 A时的热透镜焦距为750 mm; AMP5, AMP6在抽运电流110 A时的热透镜焦距为1000 mm; AMP7, AMP8, AMP9, AMP10在抽运电流85 A时的热透镜焦距为2500 mm.

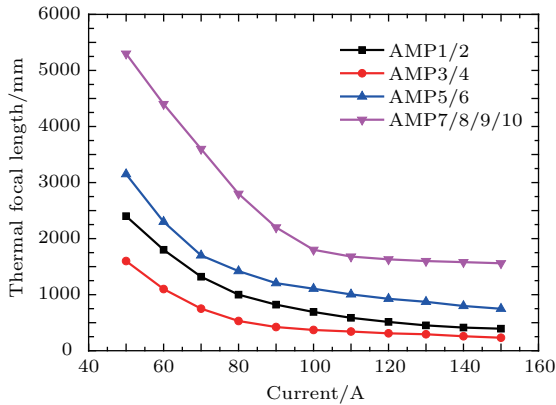


图3 各放大器的热透镜焦距

Fig. 3. Thermal focal length of each amplifier.

使用示波器 (25 G 采样率, 带宽 8 GHz 的 Tektronix 示波器 DSA70804) 与高速光电探测器 (Alphas) 测量了经过SBS后激光的脉冲波形以及最终输出激光的脉冲波形, 分别如图4和图5所示. 工作频率为100 Hz时, 输出激光的脉冲宽度为4.58 ns, 并不呈高斯分布, 主要有两个原因: 一是在相位共轭光束控制单元, 由于进入SBS池的激光

脉宽会被SBS压缩, 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; 二是在功率放大单元, 由于增益饱和效应, 当脉冲能量接近饱和通量时, 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, 使脉冲波形前沿比后沿陡.

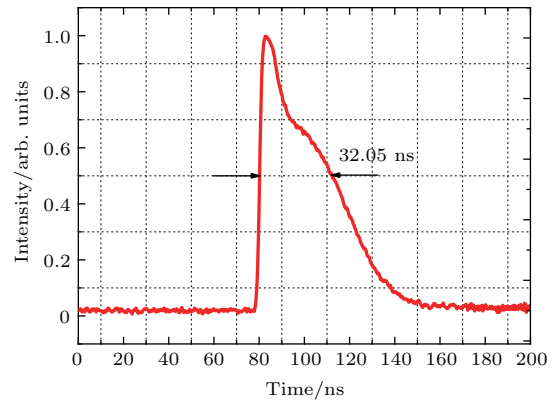


图4 经SBS后的时间脉冲波形图

Fig. 4. Pulse waveform diagram after SBS.

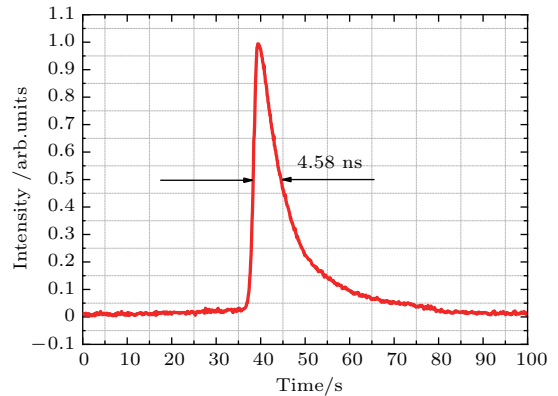


图5 输出激光的时间脉冲波形图

Fig. 5. Pulse waveform diagram of the output laser.

在激光器运行3 min后, 输出能量3.31 J时, 测量了输出激光的远场分布, 如图6所示. 测试透镜焦距1000 mm, 使用的CCD为LASERCAM HR, 像素大小为6.5 μm. 测得远场光斑86.5%能量的光斑直径为2.12倍衍射极限. 使用能量计 (Labmax-top/J-50 MB-YAG) 测量了输出激光的能量. 由单频种子输出的10.73 μJ的单脉冲激光经过预放大单元和功率放大单元后被放大到3.31 J. 测量了300 s内输出激光的能量, 如图7所示, 其能量稳定性 (RMS) 为0.87%.

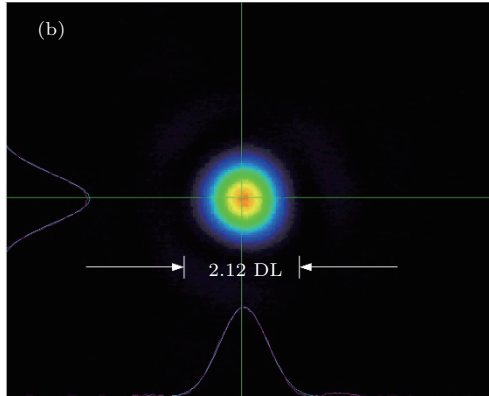
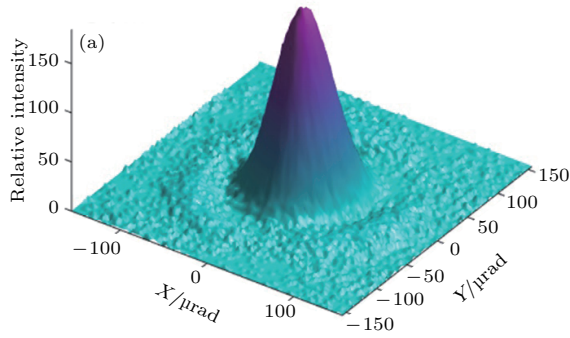


图6 (网刊彩色) 输出光束远场分布 (a) 三维; (b) 二维
Fig. 6. (color online) Output spot far-field distribution: (a) 2D; (b) 3D.

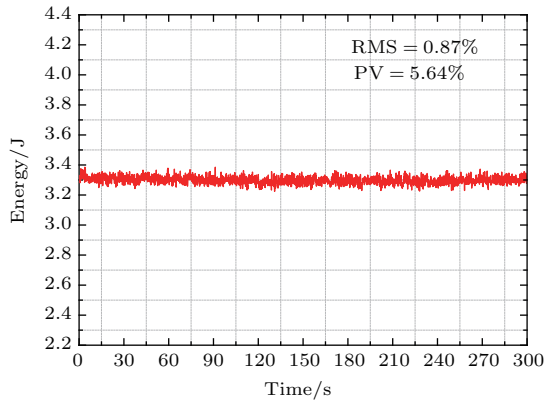


图7 5 min 内激光的输出能量
Fig. 7. Output energy in 5 minutes.

4 结 论

本文针对空间碎片探测所需的高能量、高光束质量Nd:YAG激光器进行了研究. 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、功率放大单元进行能量放大, 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. 重复频率100 Hz时, 输出激光的脉冲宽度为4.58 ns, 光束口径为25 mm, 单脉冲能量为3.31 J. 激光器的光光效率约为48%, 具有良好的光束质量, 能量稳定性(RMS)为0.87%, 远场光斑的光束质量为2.12倍衍射极限. 与文献[16]对比发现, SBS相位共轭镜在激光系统中放置于不同的位置会导致输出光束有着不同的脉冲波形及远场光束质量. 本文对高能激光器的设计有着重要的指导意义.

参考文献

- [1] Dong J H, Hu Q Q 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** S176
- [2] Nalezity M, Majczyna A, Wawrzaszek R, Sokolowski M 2010 *Proc. SPIE* **7745** S178
- [3] Ma X, Wang J, Zhou J, Zhu X, Chen W 2010 *Appl. Phys. B* **103** 809
- [4] Zhang Z P, Yang F M, Zhang H F, Wu Z B, Chen J P, Li P, Meng W D 2012 *Res. Astron. Astrophys.* **12** 212
- [5] Yang H L, Meng J Q, Ma X H, Chen W B 2014 *Chin. Opt. Lett.* **12** 96
- [6] Yu H H, Gao P Q, Shen M, Guo X Z, Yang D T, Zhao Y 2016 *Astronomical Research & Technology* **14** 416 (in Chinese) [于欢欢, 高鹏骐, 沈鸣, 郭效忠, 杨大陶, 赵有 2016 天文研究与技术 **14** 416]
- [7] Biro E, Weckman D C, Zhou Y 2002 *Mater. Mater. Trans. A* **33** 2019
- [8] Andrebe Y, Behn R, Duval B P, Etienne P, Pitzschke A 2011 *Fusion Eng. Des.* **86** 1273
- [9] Kim Y G, Lee J H, Lee J W, 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
- [10] Yoshida H, Nakatsuka M, Hatae T, Kitamura S, Sakuma T, Hamano T 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** L1038
- [11] 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.* **226** 39
- [12] Sun W N, Wang W L, Bi G J, Zhu C, Yang W S 2006 *Chinese J. Lasers* **33(suppl.)** 20 (in Chinese) [孙维娜, 王伟力, 秘国江, 朱辰, 杨文是 2006 中国激光 **33(suppl.)** 20]
- [13] Qiu J S, Tang X X, Fan Z W, Wang H C 2016 *Opt. Commun.* **368** 1
- [14] Qiu J S, Tang X X, Fan Z W, Wang H C, Liu H 2016 *Appl. Opt.* **55** 21
- [15] Qiu J S, Tang X X, Fan Z W, Chen Y Z, Ge W Q, Wang H C, Liu H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 154204 (in Chinese) [邱基斯, 唐熊忻, 樊仲维, 陈艳中, 葛文琦, 王昊成, 刘昊 2016 物理学报 **65** 154204]
- [16] 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

A 100 Hz 3.31 J all-solid-state high beam quality Nd:YAG laser for space debris detecting*

Fan Zhong-Wei^{1)2)4)†} Qiu Ji-Si^{1)2)3)‡} Tang Xiong-Xin¹⁾²⁾³⁾ Bai Zhen-Ao¹⁾²⁾³⁾
Kang Zhi-Jun¹⁾²⁾³⁾ Ge Wen-Qi¹⁾²⁾³⁾ Wang Hao-Cheng¹⁾²⁾ Liu Hao¹⁾ Liu Yue-Liang¹⁾

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

2) (National Engineering Research Center for DPSSL, Beijing 100094, China)

3) (Zhongkeguang Applied Laser Technology Institute Company, Ltd. Tianjin 300304, China)

4) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 28 September 2016; revised manuscript received 13 December 2016)

Abstract

With the rapid development of space technology, human activities into space are increasing, thereby producing lots of space debris. And the space debris impact is the major cause for the mechanical damage to the space crafts and the main factor affecting the service life; it even endangers the life safety of the astronauts working outside the spacecraft and pose a threat to the astronomical observation and studies. Thus, the monitoring and early warning of space debris are gradually attracting wide attention. Obviously, laser detection as a good-directivity and strong anti-jamming active detecting means has a unique advantage in terms of a round-the-clock detection. Therefore, the developing of debris-detecting laser beam source becomes the most direct and effective means for increasing the space debris detection accuracy. The laser detecting ability is restricted by the laser beam quality, the pulse energy and the repetition frequency at the same time. The beam quality could affect the ability to detect and recognize space target. The bigger the laser pulse energy, the higher the repetition frequency and the smaller the detectable debris, the stronger the detecting ability will be. A good detection effect could be achieved at 80–100 Hz laser pulse repetition frequency. A further increase of the repetition frequency will greatly increase the difficulty and cost accordingly but the improvement of the detection performance is not obvious at all. Thus, repetition frequency around 100 Hz becomes the best choice for laser space debris detection. Based on the laser diode side-pumped rod-shaped amplifier, a high-repetition-frequency and high-beam-quality of joule level Nd:YAG nanosecond laser for space debris detection is developed in this work. The laser adopts MOPA structure, mainly including single longitudinal mode, pre-amplifier unit, SBS phase-conjugate beam control unit and energy extraction unit. In the energy extraction unit, beam splitting-amplifying-combining is adopted for reducing the thermal effect on beam quality by reducing the working current of the amplifier. Under the condition of 100 Hz high repetition frequency and 10.73 μJ single pulse energy injected by the single longitudinal mode seed, 3.31 J output energy is gained. The output laser beam has a 4.58 ns pulse width, far field beam spot of 2.12 times the value of the diffraction limit, and 0.87% 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.66.054205

* Project supported by the Special Fund for Research on National Major Research Instruments and Facilities of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. ZDYZ2013-2), China Innovative Talent Promotion Plans for Innovation Team in Priority Fields (Grant No. 2014RA4051), and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences.

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

‡ Corresponding author. E-mail: keith0311@163.com