

终端靶场中相位畸变对近场光束质量的影响

焦兆阳^{1,2} 张艳丽¹ 张军勇¹ 朱健强¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 终端靶场聚焦系统中的光学元件上存在不可避免的缺陷致使光场波前发生畸变, 根据高功率激光装置终端靶场系统中强光束传输的特点, 建立了描述光学元件引入的局域相位调制的模型, 研究了终端靶场中具有高斯型相位波前畸变的平顶光束经过透镜会聚, 并在后续防溅射板等熔石英介质中经历非线性增长的传输演变过程, 详细分析了高斯型相位波前畸变、熔石英厚度和透镜焦距对终端靶场聚焦系统中的近场光束质量的影响。结果表明, 高斯型波前畸变越严重、熔石英厚度越长、透镜焦距越短, 近场光束质量越差, 中高频增长越多。

关键词 物理光学; 相位畸变; 终端靶场; 非线性增长; 近场光束质量

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0502004

Influence of Phase Distortion on Near Field Beam Quality in Final Target System

Jiao Zhaoyang^{1,2} Zhang Yanli¹ Zhang Junyong¹ Zhu Jianqiang¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract There are inevitable defects in optical elements of the final target system, which bring in wavefront distortion. According to the intense light beam propagation characteristics of the final target focusing system of high power laser, a model of localized phase distortion brought by optical elements is established. In final target system, a plane beam with Gaussian phase distortion is focused by the lens and then passes through fused silica, such as the subsequent splash-proof panels, in which nonlinear growth is experienced. The influences of Gaussian phase distortion, thickness of fused silica and focal length on the near field beam quality of the final target focusing system are investigated in detail. Results demonstrate that when the wavefront distortion is more serious, the thickness of fused silica is longer, and the focal length is shorter, the near field beam quality is worse and the growth of middle-high frequency component is bigger.

Key words physical optics; phase distortion; final target system; nonlinear growth; near field beam quality

OCIS codes 260.1960; 050.1940; 260.5950

1 引言

高功率激光装置是运行在高通量条件下的复杂激光工程, 对光束质量要求十分苛刻, 为了保障装置安全稳定的运行, 要使光束尽可能保持良好的光束质量, 同时运行在适度的通量水平^[1], 以免造成光学元件损伤。装置中有许多大口径光学元件, 这些光学元件在加工、使用和周围环境的影响下, 不可避免

地存在或多或少的缺陷^[2-7], 如划痕、表面损伤、表面污染、灰尘颗粒等。光学元件的缺陷会对光束产生调制, 从而降低系统的光束质量, 并最终影响整个装置负载能力和物理实验的效果。终端光学系统位于高功率激光装置整个激光链路的末端, 承担着谐波转换并将光束精确聚焦到靶上的任务, 是激光装置与物理实验耦合的关键系统。通常对终端靶场的

收稿日期: 2013-10-20; **收到修改稿日期**: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(11104296, 61205212)、中以高功率激光技术国际合作研究项目(2010DFB70490)

作者简介: 焦兆阳(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光传输演变与质量控制等方面的研究。

E-mail: zhyjiao@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光驱动器总体光学设计、结构设计等方面的研究。

E-mail: jqzhu@siom.ac.cn

聚焦系统研究,人们较多关注的是远场特征。有文献^[8-10]针对波前畸变对远场焦斑形态的影响做过研究,但对焦前特别是离透镜较近位置处的光束近场特征的研究甚少,近场的调制可能引起自聚焦效应^[11-13],对位于此处的元件造成损伤,因而有必要研究光束近场调制变化的规律并对其进行控制。本文基于角谱传输理论^[14-15]和分步傅里叶算法^[16-17],对有波前畸变的光束经过透镜聚焦,并在其后非线性介质熔石英中传输之后的近场分布进行了详细的分析,得出了近场调制随波前畸变、非线性介质长度和透镜焦距变化的规律。

2 终端靶场和相位畸变的模型建立

在高功率激光装置中,典型的终端光学系统除了频率转换晶体外,还包括聚焦透镜、谐波分离光栅和屏蔽片等大口徑光学元件,终端靶场光学元件排布^[18]如图 1 所示。

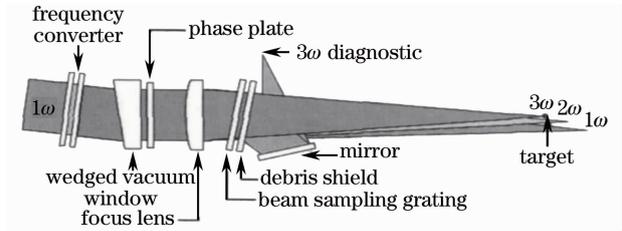


图 1 终端光学系统的示意图

Fig.1 Schematic of final optical system

一般来说,谐波分离光栅和防溅射板位于透镜后面,起到谐波分离和保护光学元件的作用,都采用石英作为材料,其非线性折射率系数为 $2.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$,对于高功率激光系统来说,熔石英的非线性效应不可忽略。在终端靶场的传输演变过程中,着重研究有相位调制的光束经透镜会聚后,在光栅和防溅射板经非线性传输之后的近场光束质量的变化,因为强的调制会使光束出现小尺度自聚焦,可能对光学元件造成严重的损伤。为此建立如图 2 所示的终端靶场的简易模型。

把透镜后面的非线性传输介质等效为厚度为 L 的熔石英厚板来进行研究。有波前畸变的非理想光束的传输过程为先经过焦距为 f 的透镜会聚,再经过一段距离为 d 的自由空间传输,最后经过一段长为 L 的非线性介质熔石英,光束在非线性介质后面的光束质量是要分析和关注的。为了表征光束质量优劣,在此利用 P [峰谷(PV)值]和 C [近场调制对比度(CR)]这两个参数来描述光束调制变化程度,其定义如下:

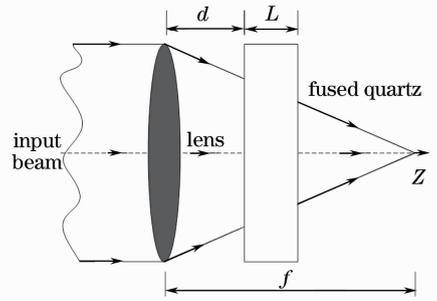


图 2 终端靶场的简易模型

Fig.2 Simple model of final optical system

$$P = I_{\max} - I_{\min}, \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (I_i - I_{\text{avg}})^2}{M}}, \quad (2)$$

式中 I_{\max} 为最大光强, I_{\min} 为最小光强, I_{avg} 为平均光强, M 为采样点数。

光路中光学元件存在的缺陷种类是多种多样的,这些缺陷对通过其中的光束主要产生两种影响,即对光束施加了振幅扰动和相位扰动。研究表明,相位扰动对光束质量和光学元件的破坏比振幅扰动的要严重得多^[3,5-6]。光学元件的凹坑、划痕等缺陷主要引起光束的相位产生局域调制。一般情况下,局域相位调制的透射率函数 $t_0(x, y, z)$ 表达式为^[19]

$$t_0(x, y, z) = \exp[i\phi(x, y, z)], \quad (3)$$

式中 $\phi(x, y, z)$ 表示局域相位畸变的空 间分布。实际装置运行中发现,在众多引起光束波前畸变的缺陷中,微米量级^[20-21]的局部扰动在光学元件中占主导。假设在光束入射面上 $z=0$ 处有一相位缺陷,其对相位的局域调制 $t(x, y)$ 可用高斯函数来表示为^[22]

$$t(x, y) = \exp\left\{i\Delta \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r_0^2}\right]\right\}, \quad (4)$$

式中 Δ 为相位调制深度, r_0 为相位调制的大小, (x_0, y_0) 为相位调制的横向中心坐标。高功率激光装置中运行的是平顶光束,可以用如下超高斯光束模拟输入光场^[23]:

$$E(x, y) = E_0 \exp\left[-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\omega_0}\right)^N\right], \quad (5)$$

式中 E_0 是超高斯光束的平均振幅, ω_0 是超高斯光束的束腰, N 是超高斯光束的阶数。透镜可看作相位变换器,在忽略常数相位因子后,它的透过函数 $t_1(x, y)$ 为^[14]

$$t_1(x, y) = \exp\left[-i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right], \quad (6)$$

式中 f 为透镜的焦距, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为真空中的波数, 其中 λ 为光束的波长。

3 数值模拟与分析

基于第 2 节的物理模型, 用角谱传输理论和分步傅里叶算法对终端系统中的光场传输进行仿真和数值模拟。相位调制源的调制深度、调制尺寸、熔石英的厚度和透镜的焦距是影响近场分布的主要因素, 下边对它们的作用进行分析。

在不增加计算量的前提下, 突出相位调制对终端靶场三倍频光近场调制的影响, 模拟中采用小口径光束进行一维模拟研究。设入射的光束为 12 阶超高斯光束, 波长 λ 为 351 nm, 束腰 w_0 为 3 mm, 光强平均功率密度 I_0 为 5 GW/cm^2 。高斯型相位畸变的尺寸初始大小 r_0 设为 $50 \mu\text{m}$, 调制深度 Δ 初始值设为 $\pi/8$, 中心在轴上。根据终端靶场的实际情况, 近似取透镜焦距 f 为 5 m, 非线性介质与透镜后表面的距离 d 为 0.5 m。熔石英的折射率为 1.48, 其非线性折射率系数为 $2.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$, 非线性介质厚度 L 取为 10 cm。

图 3 为初步模拟的入射光场, 经过透镜会聚到非线性介质前表面的光场, 以及从非线性介质出射的光场分布。从图 3 看出, 初始平滑的振幅分布由于相位畸变的引入使光束通过后续传播发生了明显的近场调制, 再经过非线性介质之后近场调制由于经过非线性 B 积分进一步增长, 光束调制更加严重, 光束质量急剧变坏, P 值从原来的 1.45 增加到 9.22。图 4 所示为非线性介质前后表面的光场的傅里叶频谱分布, 可以看出, 经过非线性介质之后, 光场中的中高频成分相比于进入非线性介质之前的光束频谱有很大程度的增长, 也即中高频成分的增长直接导致了光束近场空间分布调制更加严重。数值模拟的结果与

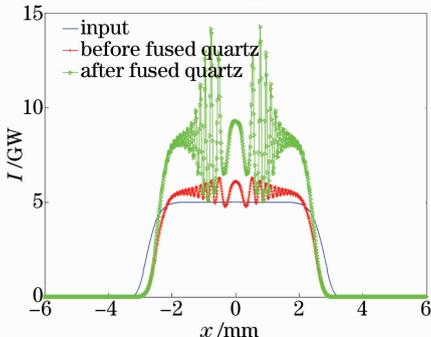


图 3 近场分布

Fig. 3 Near field distributions

Bespalov-Talanov (B-T) 理论^[24] 的描述基本是一致的。

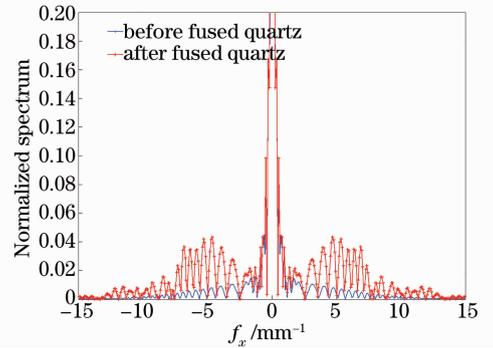


图 4 近场频谱分布

Fig. 4 Near field spectrum distributions

图 5、6 所示为不同的相位调制深度下, 熔石英的厚度 L 从 1 cm 增加到 12 cm 时的近场调制情况。可以看出随着非线性介质厚度的增加, 近场调制的 P 值和近场调制对比度 C 都越来越大, 增长的趋势基本上呈指数增长关系。介质越长, 光束在介质中的非线性 B 积分增长越多, 因此近场调制会越来越严重。同时也可以看出, 当高斯相位畸变的调制深度从 $\pi/16$ 增加到 $\pi/2$ 时, P 值和 C 值呈现增加趋势。初始输入的调制越严重, 经过同样的 B 积分增长之后的近场调制也越严重。

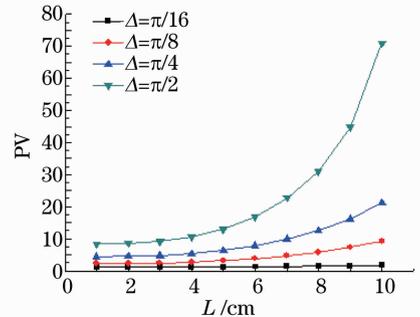


图 5 不同 Δ 时 PV 值随 L 的变化

Fig. 5 PV versus L with different Δ

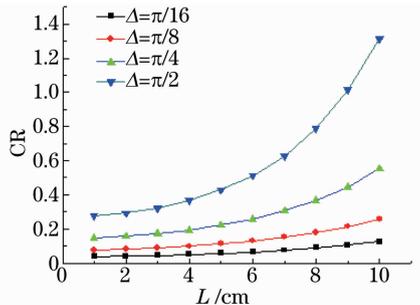


图 6 不同 Δ 时 CR 随 L 的变化

Fig. 6 CR versus L with different Δ

图 7、8 所示为不同的调制尺寸下, 近场调制随熔石英厚度的变化情况, 可以看出: 当 L 小于 6 cm

的时候,调制尺寸越小对应的 P 和 C 越小;相反当 L 大于6 cm时,调制尺寸越小, P 和 C 越大,引起的近场调制越严重。这是因为非线性介质较短的时候,非线性增长过小,主要是线性过程在发挥作用,尺寸越大的畸变引起的调制越大。而在非线性介质超过一定长度时,非线性增长影响已经超过了线性过程。这时高斯相位调制的尺寸越小,调制本身所包含的中高频量越多,而非线性 B 积分的增长,主要是对中高频的增长。因此当经过较长的非线性介质时,尺寸越小,产生的近场调制也越严重。

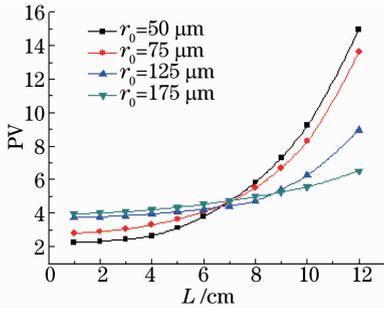


图 7 不同 r_0 时 PV 随 L 的变化

Fig. 7 PV versus L with different r_0

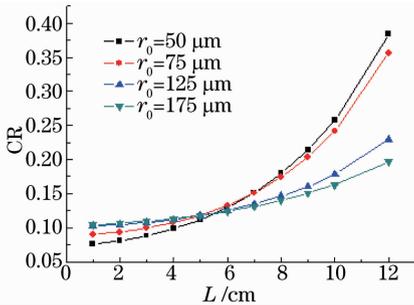


图 8 不同 r_0 时 CR 随 L 的变化

Fig. 8 CR versus L with different r_0

对于高功率靶场聚焦系统,透镜焦距也是很重要的参数,下面研究不同的透镜焦距对光束质量的影响。改变透镜的焦距从 4 m 增加到 5.4 m,研究透镜焦距对近场调制的影响。图 9、10 所示为不同调制深度下,近场调制随焦距的变化规律。由图 9 可以看出,随着焦距的增加, P 和 C 都相应地减小,近场调制下降。这是因为对于透镜后边固定距离 d 处的位置,透镜焦距的增加减缓了光束的会聚,一方面使非线性介质前表面的平均光强减小,这样在熔石英中的 B 积分相应减小,另外一方面畸变本身经过透镜会聚的加剧程度也减弱,这样相当于非线性增长的调制源被减小。因此,随着焦距的增加,近场调制会相应地减小。但是也可以看出,焦距虽然对近场调制有影响,但是敏感度不高。与此同时,在同

样的焦距下,畸变的调制深度越大,最终的近场调制越严重。

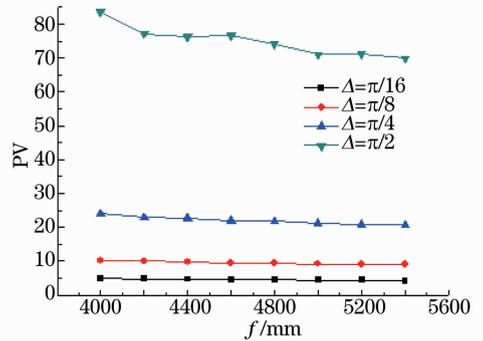


图 9 不同 Δ 时 PV 随 f 的变化

Fig. 9 PV versus f with different Δ

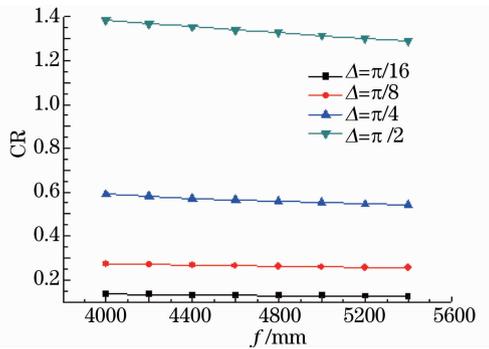


图 10 不同 Δ 时 CR 随 f 的变化

Fig. 10 CR versus f with different Δ

图 11、12 所示为不同调制尺寸下,近场调制随焦距的变化规律。由图可以看出,同样随着焦距的增加, P 和 C 也相应地减小,近场调制下降。在同样的焦距下,畸变的调制尺寸越小,所引起的近场调制越严重。

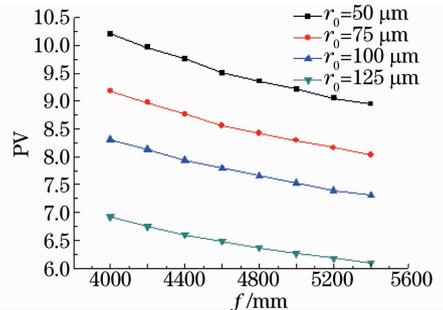
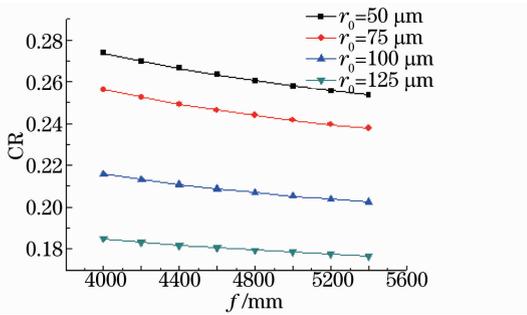


图 11 不同 r_0 时 PV 随 f 的变化

Fig. 11 PV versus f with different r_0

通过上述分析,可以看出,调制深度、调制尺寸、晶体厚度是影响近场调制的主要因素,透镜焦距有一定的影响,但是敏感度不高。在焦距一定的情况下,相位畸变的调制深度越大,调制尺寸越小,融石英的厚度越长,相应的近场光束质量越差。在调制深度、调制尺寸和融石英厚度一定的情况下,随着透

图 12 不同 r_0 时 CR 随 f 的变化Fig. 12 CR versus f with different r_0

镜焦距的增加,近场光束质量有所提高。为了降低光束近场调制,减小光学元件被破坏的风险,必须严格控制畸变相位波前的调制深度不能过大,调制尺寸不能过小,在融石英厚度一定的情况下,尽可能地增加透镜焦距。

4 结 论

建立了终端靶场和高斯型相位畸变的模型,并利用角谱传输理论和分步傅里叶算法模拟了有高斯相位畸变的光束在终端靶场线性和非线性传输时的近场调制的变化规律。详细研究了畸变的调制深度、调制尺寸、非线性介质的厚度和透镜焦距等对近场调制的影响。结果表明,高斯型畸变的调制深度越小、调制尺寸越大、非线性介质的厚度越小、透镜的焦距越长时,近场调制越小,近场光束质量越好。这些结论对高功率激光装置的终端靶场的光束的传输演变以及近场光束质量的控制有一定的参考价值,对终端靶场的参数设计和光学元件被破坏的风险规避有一定的帮助。

参 考 文 献

- 1 B M Vanwonderghem, J R Murray, D R Speck, *et al.*. Performance of the NIF prototype beamlet[J]. *Fusion Technol*, 1994, 26(3): 702–707.
- 2 M D Feit, A M Rubenchik. Influence of subsurface cracks on laser-induced surface damage[C]. *SPIE*, 2003, 5273: 264–272.
- 3 J T Hunt, K R Manes, P A Renard. Hot images from obscurations[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(30): 5973–5982.
- 4 J Neauport, L Laignere, H Bercegol, *et al.*. Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm[J]. *Opt Express*, 2005, 13(25): 10163–10171.
- 5 C C Widmayer, M R Nickels, D Milam. Nonlinear holographic imaging of phase errors[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(21): 4801–4805.
- 6 Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijuan. Hot-image effects in high-power solid state laser systems[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(10): 1315–1322.
- 赵建林, 彭涛, 叶知隽. 高功率固体激光系统中的“热像”效应[J]. *中国激光*, 2007, 34(10): 1315–1322.
- 7 Zhou Lidan, Su Jingqin, Zhang Xiaomin, *et al.*. Effects on beam quality of booster stage induced by “defects” on optics[J]. *High*

- Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(3): 326–330.
- 周丽丹, 栗敬钦, 张小民, 等. 光学元件“缺陷”对助推放大级光束质量的影响[J]. *强激光与离子束*, 2009, 21(3): 326–330.
- 8 J K Lawson, J M Auerbach, R E English Jr, *et al.*. NIF optical specifications; the importance of the RMS gradient[C]. *SPIE*, 1999, 3492: 336–343.
- 9 M L Spaeth, K R Manes, C C Widmayer, *et al.*. National ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 2854–2865.
- 10 Zhang Guowen, Tao Hua, Pu Jixiong, *et al.*. Focusing characteristics of partially coherent square flat-topped electromagnetic pulsed beams focused by a phase modulated lens [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0102005.
- 张国文, 陶 华, 蒲继雄, 等. 部分相干方形平顶电磁脉冲光束经相位调制透镜的聚焦特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0102005.
- 11 S A Akhmanov, A P Sukhorukov, R V Khokhlov. Self-focusing and diffraction of light in a nonlinear medium[J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(5): 609–636.
- 12 Chen Baosuan, Zhang Junyong, Zhang Yanli, *et al.*. Study of small-scale self-focusing in high-power laser system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010002.
- 陈宝算, 张军勇, 张艳丽, 等. 高功率激光系统中的小尺度自聚焦研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010002.
- 13 Deng Jianqin, Zhang Jin, Yang Hua, *et al.*. Condition for suppression of small-scale self-focusing of high-power laser beams by spectral bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0519001.
- 邓剑钦, 张 进, 杨 华, 等. 激光带宽抑制光束小尺度自聚焦效应的条件[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0519001.
- 14 J W Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- 15 J A Ratcliffe. Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1956, 19(1): 188–267.
- 16 M D Feit. Light propagation in graded-index optical fibers[J]. *Appl Opt*, 1978, 17(24): 3990–3998.
- 17 G M Muslu, H A Erbay. Higher-order split-step Fourier schemes for the generalized nonlinear Schrödinger equation[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2005, 67(6): 581–595.
- 18 Qiao Zhanfeng, Lu Xingqiang, Zhao Dongfeng, *et al.*. Arrangement design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(9): 1328–1332.
- 乔战峰, 卢兴强, 赵东峰, 等. 神光 II 升级装置终端光学组件的排布设计[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1328–1332.
- 19 Su Qianqian, Zhang Guowen, Tao Hua, *et al.*. Properties of the intensity distribution and the angular spectrum of a Gaussian beam with local phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1002005.
- 苏倩倩, 张国文, 陶 华, 等. 高斯光束经局域相位调制后的光强分布和角谱特性[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1002005.
- 20 D W Camp, M R Kozlowski, L M Sheehan, *et al.*. Subsurface damage and polishing compound affect the 355-nm laser damage threshold of fused silica surfaces[C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 1998. 356–364.
- 21 J H Campbell, R A Hawley-Fedder, C J Stolz, *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies; an overview[C]. *Laser and Applications in Science and Engineering*, 2004. 84–101.
- 22 Liu Hongjie, Jing Feng, Zuo Yanlei, *et al.*. Nonlinear propagation of localized wavefront deformation in high-power laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(11): 1850–1854.
- 刘红婕, 景 峰, 左言磊, 等. 高功率激光装置中局部波前畸变的非线性传输[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(11): 1850–

1854.

23 Lü Baida. Laser Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.

吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

24 M D FeitJ, J A Fleck. Beam nonparaxiality, filament formation, and beam breakup in the self-focusing of optical beams[J]. J Opt Soc Am B, 1988, 5(3): 633-640.

栏目编辑: 史 敏

百瓦皮秒光纤放大器

以低功率固体被动锁模激光器作为种子源, 经过主振荡功率放大的皮秒高功率光纤放大器, 具备峰值功率高、散热性好、光光转换效率高、光束质量好、体积小、易于集成等优点。因此在激光精细加工、超快光学、非线性光频率转换、军事和国防安全等领域都有广泛的应用。然而在高功率脉冲激光输出时, 光纤放大器受限于光纤纤芯内部的非线性效应, 如受激拉曼散射、自相位调制、放大自发辐射以及掺杂纤芯自身的损伤阈值低等, 基于双包层光纤的单级光纤放大器很难实现百瓦级皮秒输出。

中国科学院半导体研究所全固态光源实验室采用固体皮秒激光器作为种子源经过单级光纤放大器实现了百瓦量级的皮秒脉冲激光输出。种子源是一

个可饱和吸收体被动锁模固体激光器, 其输出平均功率为 3.7 W, 波长为 1064 nm, 线宽为 0.1 nm, 重复频率为 74 MHz, 脉宽为 30 ps。该固体皮秒激光器由于输出平均功率高, 光束质量好, 是单级高功率光纤放大器的理想种子源。种子光经过隔离器后, 准直聚焦耦合入长度为 4.6 m, 纤芯直径为 30 μm , 内包层直径为 250 μm 的双包层光纤纤芯中。纤芯掺杂粒子数分数为 6.5×10^{-3} , 内包层为八角形。光纤两端端面经过 $5^\circ \sim 8^\circ$ 角切割处理, 以防止光纤端面菲涅耳反射以及镜面反射。采用自主设计的抽运耦合系统, 可以将抽运光功率有效耦合入光纤内包层。实验装置如图 1 所示。

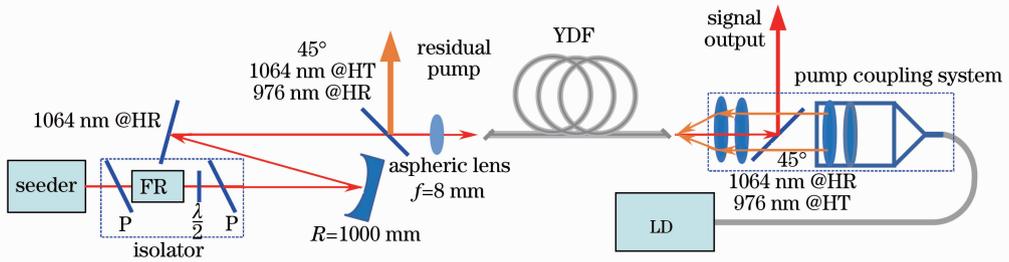


图 1 皮秒单级百瓦光纤放大器实验装置

Fig.1 Experimental setup of the picoseconds single-stage hundred watts fiber amplifier

当耦合入内包层抽运功率为 160 W 时, 获得 121.3 W 的皮秒脉冲激光输出。其中残余抽运 5.17 W, 光光转换效率为 78%, 输出功率曲线如图 2 所示。功率为 121.3 W 输出时激光光束质量 $M^2=1.5$, 对应脉冲宽度为 35 ps, 光谱宽度为 0.4 nm, 峰值功率为 46.8 kW。在高功率输出时没有明显的放大自发辐射、受激拉曼散射、自相位调制等非线性现象, 可以长时间稳定运行。该实验结果处于单级皮秒双包层光纤放大器研究方向的先进水平。

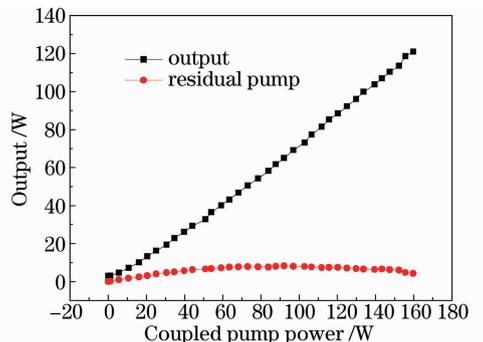


图 2 输出功率曲线

Fig.2 Output power curve

于海娟 孙 伟 张 玲 李晋闽 林学春*

(中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083)

* E-mail: xclin@semi.ac.cn

收稿日期: 2014-02-14; 收到修改稿日期: 2014-02-20