

# 高功率激光装置调频脉冲时间波形测试技术研究

孙志红 董 军 夏彦文 吕嘉坤 彭志涛 刘 华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 高功率激光装置的多路红外激光脉冲波形测量系统由光纤取样耦合、传输、合束、光电转换和数据采集处理单元构成,采用缩束与光学成像系统的光纤耦合方法克服了高功率激光束长距离传输后的指向漂移,针对正弦调频脉冲输出,实验和理论分析了测试光路存在像差、测试空间不同位置时间特性差异和传感器带宽等因素对测试的影响。实验结果表明,采用光纤取样的时间波形测量方式可以准确地反映基频调频脉冲全口径积分波形的轮廓从而实现基频调频脉冲波形监测。

**关键词** 测量;脉冲波形;激光技术;调频脉冲;高功率激光

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1102009

## Temporal Profile Measurement of Frequency Modulation Beams for High Power Laser Facility

Sun Zhihong Dong Jun Xia Yanwen Lü Jiakun Peng Zhitao Liu Hua

(*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

**Abstract** The configuration and principle of the temporal profile measurement system are introduced, which are used for multi-beam infrared laser of the high power laser facility. The system is composed of sampling and coupling, fiber transmission, multiplexing coupler, photoelectric conversion and data acquisition unit. The reduced beam and optics imaging method are adopted in sampling of optical fiber in order to solve the problem of the great drift of beams. Because of the laser beam of sinusoidal frequency modulation, the influence of the temporal profile on measurement is systematically evaluated. Optical aberration caused by diagnostic system, the temporal characteristic of different regions, and the bandwidth of sensor are analyzed experimentally and theoretically. The experimental results show that the measurement system of temporal profile based on optical fiber can provide the profile of integral entirely beam of frequency modulation, and monitor the profile reliability.

**Key words** measurement; temporal profile; laser technology; frequency modulation pulse, high power laser

**OCIS codes** 140.3460; 140.3295; 060.5060; 060.2300

## 1 引 言

脉冲时间波形是衡量大型激光装置综合性能的重要指标和关键参数<sup>[1-4]</sup>。目前高功率激光脉冲时间波形的测量主要采用光电管和高带宽示波器,采用这种测量方法,一套测试单元只能对单路激光束进行测量,而不能实现多路激光束的单发次同时测量,因此不适用于多束激光装置的脉冲波形测量;另外这种测试方式易受高强度电磁辐射的干扰,在强

电磁场环境下不易使用。随着高功率激光装置输出激光束数量逐渐增多,采用光纤取样的时分复用技术与数字示波器通道相结合的技术方案是降低成本、提高诊断系统抗干扰能力的有效方法。

高功率激光装置为了抑制受激布里渊散射(TSBS)效应以及满足光谱色散平滑技术(SSD)的要求,在前端系统中采用正弦相位调制器对光谱进行展宽,产生 0.3 nm 的小宽带脉冲,其光谱分布为贝塞尔

收稿日期: 2013-05-21; 收到修改稿日期: 2013-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61377102)

作者简介: 孙志红(1965—),女,硕士,副研究员,主要从事光学检测和光子晶体等方面的研究。

E-mail: sunzh01@163.com

函数,光谱结构为离散分布的梳状光谱。与窄带脉冲相比,相位调制脉冲是一种时谱关联性强,光谱敏感的激光脉冲,在激光传输和放大过程中,光谱成分的微弱失衡都能引入调频到调幅转变(FM-to-AM)效应。FM-to-AM 效应是正弦调频脉冲最显著特征<sup>[5-6]</sup>,它是指经过频率调制(即相位调制)具有一定带宽的信号,在传输过程中由于光谱畸变而出现时间调制的现象,这种效应对时间波形及测量会带来一系列后果,故采用光纤取样的调频脉冲时间波形测量应对光束与光纤耦合、测量光路系统以及被测光束本身都提出更高的技术要求。调频脉冲的时间特性测试技术研究在国内首次开展,国外应有这

方面的测试,但可能由于其存在技术难度或保密原因,相关方法未见报道,故开展调频脉冲光纤取样时间波形测量技术的研究具有非常重要的意义。

## 2 时间波形测量组件

高功率激光装置脉冲时间波形测量系统由光纤取样与耦合单元、光纤传输单元、光纤合束与光电转换单元、数据采集单元构成,测量组件示意图见图1。该测量系统采用近场耦合光纤取样,时分复用的光纤传输技术,利用一套示波器和一台光电转换器实现红外多路激光脉冲时间波形的测试。

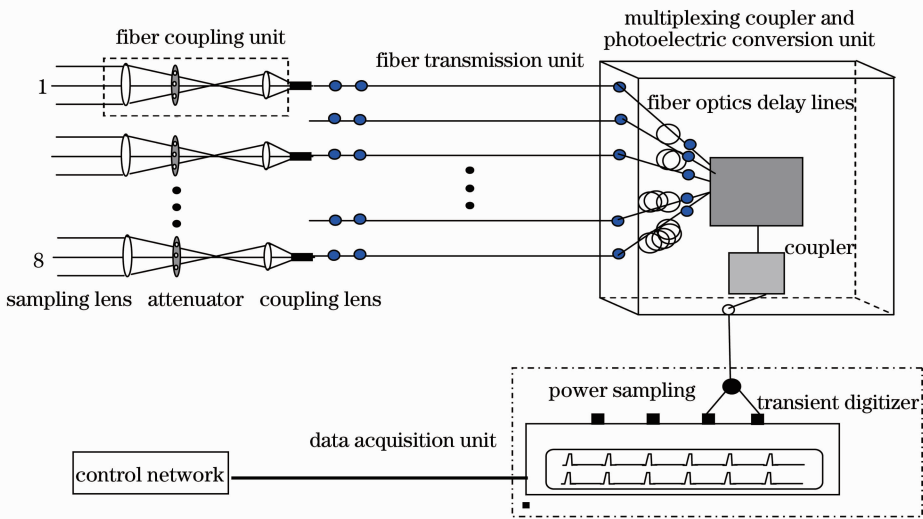


图1 多路激光脉冲波形测量原理图

Fig. 1 Principle diagram of multi-beam laser profile measurement

激光束经长距离传输到参数诊断包取样透镜处存在较大的角漂和横向偏移,光角漂变化约±2 mrad,取样光束本身的横向平移量约±2 mm,这些特性决定了不能采用直接远场耦合的方法。为了解决光纤取样的稳定耦合问题,初期设计采用匀光棒对光束进行匀化取样,认为只要匀光棒的端面足够大,近场不“漂移”出匀光棒端面即可实现光纤的稳定耦合。然而,在随后的验证实验中发现,匀光棒的匀化效果与其端面的粗糙度密切相关,经匀化器匀化后的光束同样存在小尺度的“散斑”结构,且随不同的发次脉冲幅度会有起伏<sup>[7]</sup>。为此,对光纤耦合取样作了技术调整,采用望远缩束与成像技术相结合的方法实行近场耦合<sup>[8-9]</sup>。采用的红外基频光测量的取样光束口径为50 mm×50 mm,光纤耦合单元采用双透镜共轴缩束设计,如图1所示。取样透镜焦距为250 mm,通过可调衰减器后的能量变化范围是2.1~12.1 mJ,耦合透镜焦点前放置衰

减片,耦合透镜焦距为11 mm。光纤传输单元由红外单模光纤构成,光纤芯径6 μm,数值孔径(NA)为0.12,传输损耗小于等于1.5 dB/km,48束光纤的束间相差5 m,长度分别为5、10、15、…、200 m,对应的延迟分别为25、50、75、100、…、1000 ns。延迟后的光信号经合束器耦合进单模光纤,从单模光纤出来的脉冲序列进入高灵敏、快响应的光电探测器转换为电脉冲序列,经瞬态示波器记录信号,数据处理完成脉冲时间波形的测量。

## 3 实验结果及分析

激光装置种子源为相位调制器产生的正弦调频脉冲,输出光场可以表示为

$$E_{out} = A_0 \exp[-t^2/(2t_0^2)] \exp(i\omega_c t + iM \sin \omega_m t), \quad (1)$$

式中  $M$  为相位调制度,光脉冲的初始相位为  $\omega_c t$ 。作

傅里叶变换得到

$$\tilde{E}_{out}(f) = \tilde{E}_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(M) \cdot \delta(f - kf_m - 2\pi f_c), \quad (2)$$

式中  $f_c$  为中心频率,  $f_m$  为调制频率,  $J_k(M)$  是  $k$  阶贝塞尔函数, 带宽  $\Delta\lambda = 2(M+1)f_m\lambda^2/c$ , 带宽集中了 98% 的信号能量。调制深度  $M$  决定了光谱的宽度, 而调制频率  $f_m$  决定了相位调制光谱梳之间的间隔。为了说明调频脉冲光谱与时间波形调制关系, 数值模拟调频脉冲丢失一条边谱的情况, 假设一条边谱能量占总光能比分别为 0.0001、0.0007、0.0058、0.0328 和 0.0631, 它所引起的时间调制分别为 4.17%、10.95%、30.29%、70.35% 和 95.07%; 可以看出, 丢失的边谱即使在总能量中占非常低的比例也会引起非常显著的调制。所以, 光谱离散型宽带光束的传输以及耦合, 必须保证脉冲光谱振幅在光束空间各点的完整性, 否则会由于 FM-to-AM 效应导致时间波形出现大的调制。实验发现光纤和光电管测试的同一发次脉冲时间波形调制略有差异, 以下就测试中几个主要影响因素进行实验分析和理论探讨。

### 3.1 取样透镜与耦合透镜的非共轴对测量产生附加调制

实验中, 若将取样透镜和耦合透镜调节为有一

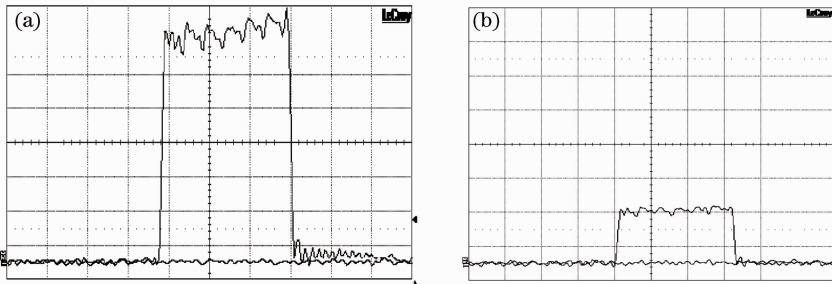


图 2 转动耦合透镜及光纤时间波形 (a) 最大和 (b) 最小幅度时间波形幅度变化对比

Fig. 2 (a) Maximum and (b) minimum amplitudes temporal profile while rotating the coupling lens and optical fiber

由于光束与光纤之间的耦合是入射光束通过取样和耦合透镜进入光纤, 对于测量光路中的缺陷对测量结果的影响主要从耦合透镜入射到光纤的光线出射角变化考虑。当光线以窄带光入射到光纤时, 光线以接近光纤数值孔径角  $\beta$  进入光纤, 见图 3 中光线 0#; 但是, 当入射光线为宽带时, 由于波长对透镜折射率的影响导致不同波长出射光线有不同的出射角, 对应图 3 中光线 -1# 和光线 1#, 其夹角为  $\gamma$ ; 考虑不同波长的光纤数值孔径角  $\beta$  不相同, 引起的变化量为  $\Delta\beta$ , 当  $\gamma > \Delta\beta$  时 (对不同波长,  $\gamma$  和  $\Delta\beta$

定夹角的非共轴系统, 夹角约为  $2^\circ$ , 将耦合透镜与光纤头 (见图 1 中光纤耦合单元) 作为整体绕光轴转动, 测得的最大和最小幅度的时间波形见图 2, 说明取样透镜与耦合透镜间带有夹角的非共轴光路对测量结果产生附加调制, 所以, 光纤取样测量方式对入射光束的指向性和光束质量有较高的要求。实际测试中, 如果取样与耦合透镜之间的同轴精度太低, 或取样与耦合透镜间的离焦量过大, 使得出射光束的光束质量差, 光束偏折角过大等都会导致调频脉冲各光谱不能完整进入光纤, 引起时间波形的附加调制。若将取样透镜与耦合透镜精密调节使其共轴共焦, 并在光束进入取样透镜前加入取样反射镜而将部分光导入一光电管, 采用光电管和光纤同时测试时间波形, 比对实验结果表示, 光路为共轴共焦时的光电管和光纤测试的时间波形基本一致。为了保证输出的激光束是平行光且正入射到光纤端面上, 对激光装置红外脉冲时间波形测量系统的设计和安装精度进行限定, 要求取样透镜光轴与测量包主光轴夹角不超过 1 mrad, 光纤耦合器光轴 (耦合透镜和光纤整体) 与取样透镜光轴夹角不超过 5 mrad, 同时为了调试方便, 将光纤耦合器安装在五维调节架上, X 和 Y 轴方向平动调节范围为  $\pm 5$  mm, 转动调节范围为  $\pm 2^\circ$ , Z 轴方向平动范围为  $\pm 5$  mm。

的变化趋势是一致的), 由于 -1# 光线入射角大于光纤数值孔径角  $\beta$  而不能或部分进入光纤, 而 1# 光线入射角小于光纤数值孔径角  $\beta$  而顺利进入光纤。因此, 对离散型宽带入射光而言, 光纤耦合端面可以看成是光谱振幅调制器, 当光纤输出脉冲光谱振幅发生变化, FM-to-AM 效应将导致时间波形出现调制。

如果采用平行光耦合方式, 光线以接近  $0^\circ$  的角度进入光纤, 波长引起的入射光线角度变化  $\gamma$  远小于光纤数值孔径角  $\beta$ , 故所有波长对应的光线均可

顺利进入光纤, 光纤取样测试的脉冲时间波形不会引入调制。如果光束波面为复杂波面时, FM-to-AM 效应将更为复杂, 在复杂波面下, 光纤所对应的波面局部的法线并不平行于光纤光轴, 不同波长的光纤

数值孔径角  $\beta$  与色散角  $\Delta\beta$  共同作用下, 将出现前面讨论的倾斜光束耦合方式引起的 FM-to-AM 效应, 从而影响光纤耦合后的时间波形。

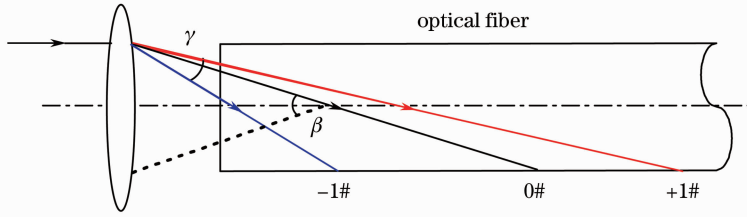


图 3 光纤锥光耦合示意图

Fig. 3 Schematic of coupling between tilt beams and optical fiber

### 3.2 光束空间不同位置的时间波形存在差异

为了考察光束空间各点的时间波形, 在图 1 所示的某一测试光路中, 将单根单模光纤改为 20 根单模

光纤的集束, 再经过光纤传输、延时和合束, 进入光电管和示波器, 得到空间取样不同点的时间波形, 如图 4(a) 所示, 图 4(b) 为 8 个点时间波形测试的对比。

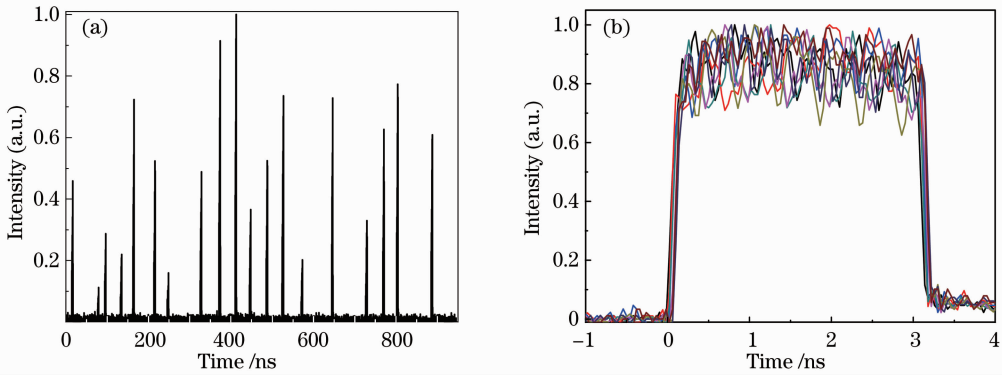


图 4 空间不同位置时间波形。(a) 20 点测试; (b) 空间多点对比

Fig. 4 Temporal profile of different regions. (a) 20 beams coupling to one fiber; (b) comparison of 8 profiles

由图 4(a) 可以看出由于空间各点的强度分布不均匀, 各点时间波形幅度有差别; 随机选取 8 个点的时间波形进行对比, 图 4(b) 显示, 空间各点的时间波形调制也存在差异, 波形调制不一致的原因可以这样解释, 激光装置前端系统输出光束经多级扩束后, 光束口径由 1 mm 扩大到近 50 mm, 光束传输经过多个负透镜和正透镜, 对于小宽带脉冲, 透镜为色散元件, 多个透镜将引起色散并逐个累积至输出光束就具备了一定色散量, 这些色散对光束空间像差带来的影响可忽略不计, 但是会导致输出光束口径边缘部分出现光谱的空间分离, 随着传输距离的增大, 分离程度变大, 这种分离将引起光束边缘各点与靠近光束中心部位点在光谱调制上的微弱差异, 如果再考虑光束口径边缘不同波长的衍射效应, 这种光束边缘部位与中心部位各点时间特性的差异会进一步地放大。对离散光谱脉冲而言, 光谱的变化就可能引起时间上的调制, 因此输出光束口径内不

同点的时间特性不同。通过测试耦合透镜后的光束中心及口径边缘部分, 实验也观察到光束中心部位的时间调制小于边缘部位。

### 3.3 光纤和光电管的响应不一致引起调制不同

在光束进入取样透镜前加入反射镜, 将部分光反射导入一光电管, 光电管和光纤对比测试同一发次调制脉冲时间波形。测试结果表明, 两者的变化趋势一致, 但调制有差异, 光纤耦合探测器 (Newfocus) 测得的调制要稍大于光电管 (R1328), 如图 5 所示。测试中光纤耦合探测器到示波器的电缆长度为 1 m, 光电管到示波器的电缆长度为 5 m。

不同探测器得到的时间波形调制不同, 可以这样解释, 假设入射脉冲为  $f(t)$ , 光纤探测系统 (不包括示波器) 的脉冲响应为  $h_1(t)$ , 双平面二极管探测系统 (不包括示波器) 的脉冲响应为  $h_2(t)$ , 经两套系统后得到的脉冲分别为  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$ ; 光纤耦合探测器实测上升时间小于 40 ps, 双平面二极管实测



上升时间约 100 ps, 由于光纤耦合探测器响应时间比双平面二极管快得多, 可以粗略认为光纤耦合探测器为  $\delta$  响应,  $g_1(t) \approx f(t)$ , 所以  $g_2(t) \approx \int f(t)h_2(\tau-t)d\tau$ . 选取响应函数为  $h_2(t) = \exp[-(t/100 \text{ ps})^2]$ , 将 Newfocus 测试结果作为输入, 经 100 ps 脉冲响应(约为 R1328 的响应时间)后得到图 5 中模拟结果(蓝色曲线)(彩图见网络电子版). 从图 5 可以看出, 模拟结果与光电管实测结果基本一致, 因此可以推断, 探测器的响应是引起光纤和光电管测试时间波形调制不一致的另一个主要原因.

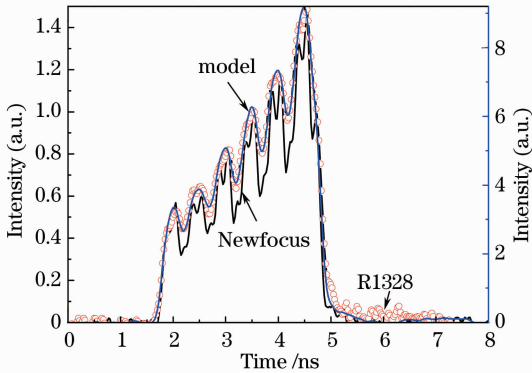


图 5 光电管和光纤耦合探测器测量与模拟的时间波形对比  
Fig. 5 Comparison of temporal profiles measured by detector of optical fiber, photoelectric tube with simulated result

## 4 结 论

为了满足高功率激光装置的调频脉冲时间波形测试要求, 离散型宽带光束的传输以及耦合中必须保证脉冲光谱振幅在光束空间各点的完整性, 否则极易导致时间波形出现调制. 采用缩束与光学成像结合的光纤取样耦合方法, 即平行光以接近  $0^\circ$  的角度进入光纤的耦合方法以减少光谱丢失, 降低测量系统带来的附加调制. 从时间波形测试结果来看, 光纤耦合探测器与光电管两者测试的时间波形变化趋势一致, 但调制略有差异, 这主要是由前级注入系统多个光学元件干扰和不稳定性、测量系统光路中的缺陷共同作

用, 当然探测器带宽也是造成光纤耦合探测器测得的调制稍大于光电管的主要原因. 测试结果显示, 采用光纤取样的时间波形测量方式可以准确地反映基频调频脉冲全口径积分波形的轮廓.

## 参 考 文 献

- 1 S Glenzer, O Jones, D R Speck, *et al.*. 3 $\omega$  Power Balance Procedure on the NIF[R]. UCRL-ID-142777, 2001. 1-10.
- 2 Sun Zhihong, Wang Wenyi, Liu Hua, *et al.*. The technology of power balance measurement of multi-beam laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1493-1497.  
孙志红, 王文义, 刘 华, 等. 多路激光功率平衡测量技术研究[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1493-1497.
- 3 Li Hai, Liang Yue, Zhao Runchang, *et al.*. Waveform control technique of high power laser pulse shaping[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2377-2380.  
李 海, 梁 越, 赵润昌, 等. 高功率激光整形脉冲波形控制技术[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2377-2380.
- 4 Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi, *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG II laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702001.  
赵东峰, 王 利, 林尊琪, 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702001.
- 5 Lu Xinghua, Wang Jiangfeng, Jiang Youen, *et al.*. Theoretical study of FM-AM effect of broadband pulsed laser in a regenerative amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502012.  
卢兴华, 王江峰, 姜有恩, 等. 宽带光再生大幅度调制效应的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502012.
- 6 Wang Fang, Feng Bin, Li Fuquan, *et al.*. Formation and suppression of amplitude modulation in frequency conversion[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302014.  
王 芳, 冯 斌, 李富全, 等. 频率转换过程中强度调制的形成机制及抑制方法[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302014.
- 7 Xia Yanwen, Lu Zonggui, Tang Jun, *et al.*. Reserch on sampling of optical fiber for pulse shape measurement for high power laser[J]. Acta Metrologica Sinica, 2009, 30(6A): 167-169.  
夏彦文, 卢宗贵, 唐 军, 等. 高功率激光脉冲光纤耦合取样技术研究[J]. 计量学报, 2009, 30(6A): 167-169.
- 8 Lu Zonggui, Xia Yanwen, Tang Jun, *et al.*. Pulse-shape measurement technology for multi-beams infrared laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1129-1132.  
卢宗贵, 夏彦文, 唐 军, 等. 多路红外激光脉冲波形测量技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1129-1132.
- 9 Wang Wenyi, Zhao Runchang, Su Jingqin, *et al.*. Preliminary laser pulse shaping experiment on technical integration line[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1051-1054.  
王文义, 赵润昌, 粟敬钦, 等. 神光-III 原型装置初步的激光脉冲整形实验[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1051-1054.

栏目编辑: 何卓铭