

# 多路脉冲激光参数分时法在线测试技术研究

胡 云<sup>1,2</sup> 王大辉<sup>1</sup> 赵学庆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 在高功率准分子系统中,为实现窄脉宽激光放大和满足辐照均匀性的要求,采用了光学角多路技术,系统光束数量多、传输环节多,具有很高的光学复杂性。为保证系统高效稳定运行,需要实时监测和评价各个环节的工作状态,即对“平台”中每一放大级和众多光束的激光参数进行在线诊断和测量。为此,针对高功率准分子激光系统的特点,提出了一种分时测量技术,并进行了原理性实验研究。该技术可采用一套测试元件实现多路激光能量和波形参数的在线测量,优点是不仅可以提高测试效率,可降低测试系统的复杂度和造价,而且可避免由不同测量元件带来的系统误差。

**关键词** 激光器; 高功率激光; 准分子; 角多路技术; 参数测量

**中图分类号** TN 248.2 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.1002005

## Study of Online Parameter Measurement Technique of Multiple Laser Pulses Based on Time-Sequence Method

Hu Yun<sup>1,2</sup> Wang Dahui<sup>1</sup> Zhao Xueqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

<sup>2</sup>Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621700, China

**Abstract** In high power excimer laser system, in order to achieve short pulse amplification and fine spot uniformity, angular multiplexing technique is adopted. So there are many laser beams and optical transmission links, which make the system complicated. In order to ensure the system working stably and efficiently, it needs to monitor and evaluate the status of all the links of system, which means online measurement of each amplification stage and multiple laser beams. Therefore, considering the character of the high power excimer laser system, a measure technique based on time-sequence method is proposed and principle experiments are carried on. Using this technique, online measurement of multiple beams using only one set of measuring elements can be achieved. The merit of this method is not only measurement efficiency can be promoted, but also the complication and cost is brought down, and the system errors caused by different elements are also avoided.

**Key words** lasers; laser optics; excimer laser; angular multiplexing technique; parameter measurement

**OCIS codes** 140.2180; 140.3280; 140.3290

### 1 引 言

在高功率准分子激光系统中,为实现窄脉冲放大和辐照均匀性的要求,常采用平滑化光学角多路技术<sup>[1-7]</sup>,系统光束数量多、传输环节多,具有较高的光学复杂性。为实现系统高效稳定运行,需要实时监测和评价“平台”中各个环节的工作状态,即对每一级放大系统和众多的光束激光参数进行在线诊断测量。系统包括

收稿日期: 2015-04-16; 收到修改稿日期: 2015-05-27

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1106)

作者简介: 胡 云(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光光学及激光器件等方面的研究。

E-mail: huyun@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 江少恩(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光聚变、等离子体物理及高能量密度物理等方面的研究。

E-mail: jiangshn@vip.sina.com

一个前端和5个放大级<sup>[7]</sup>,在第二个放大级进行角多路编码成为3束,从第3级开始编码成为18束。若对5个放大级采用传统的独立测试元件,对每一级每一路激光均进行诊断测量,统计至少有58个测量点的激光参数需要诊断测试。这样的测试方式不仅结构复杂,而且性价比不高,需要探索更为高效的测试方法。

为此,充分结合角多路高功率准分子激光主振荡功率放大(MOPA)系统自身光路结构特点,提出一种多路激光参数“分时”测量法,并进行了原理性实验研究。

## 2 分时测量原理

分时法多路激光参数测试技术原理如图1所示。光路包括取样光路、延迟光路、缩束光路和合束分光光路等几个部分。在被测系统中,首先通过取样光路从主光路中导出取样光束,通过延迟光路,使得各路激光相互之间产生一定量的时间延迟 $\Delta t$ ,然后通过缩束镜 $L_1\sim L_3$ 进行缩束,再经过反射镜MM12~MM34进行合束,最后通过分束镜MM35进行分光。其中反射光用于能量计对能量的监测,透射光用于光电管对波形的监测。能量计测量结果为各路激光脉冲总能量,光电管则得到各路激光脉冲波形,以延迟时间 $\Delta t$ 为间隔在时间上分开,形成脉冲序列。当延迟时间 $\Delta t$ 大于激光脉宽时,相邻脉冲波形无重叠,各路激光脉冲均可得到完整波形。若光电管工作于线性范围内,即输出电压正比于光强,且各脉冲形状相似,则由脉冲串中各脉冲幅值之比即可知各脉冲能量之间的比例。根据比例对总能量 $E$ 进行重新分配,即可得到相应脉冲波形所对应的能量值,完成多路激光信号的测量。

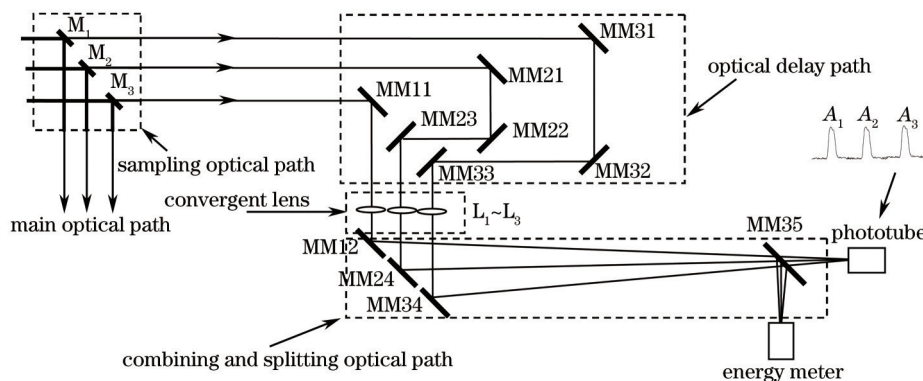


图1 分时法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of time-sequence method

以3路激光为例,设光电管工作于线性范围,脉冲形状相似。总能量测量值为 $E=E_1+E_2+E_3$ 。此时较为简单的模型是认为测量所得波形幅值与脉冲能量成正比,即 $A \propto E$ 。设3路激光波形幅值为 $A_1$ 、 $A_2$ 和 $A_3$ , $A_1:A_2:A_3=k_1:k_2:k_3$ 。那么有

$$E_1 = \frac{A_1}{A_1 + A_2 + A_3} E, E_2 = \frac{A_2}{A_1 + A_2 + A_3} E, E_3 = \frac{A_3}{A_1 + A_2 + A_3} E$$

另一种模型则是取整个波形的积分 $M(t) = \int A(t) dt \propto E$ ,这样3路激光波形可以不同,有

$$E_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2 + M_3} E, E_2 = \frac{M_2}{M_1 + M_2 + M_3} E, E_3 = \frac{M_3}{M_1 + M_2 + M_3} E$$

## 3 分时测量原理性实验

### 3.1 光路布局

为验证分时测量技术原理,分析测试精度,利用高功率准分子激光单路MOPA系统前端至激光放大器(AMP1)的部分光路构造了多束激光光路结构,并进行了分时法多路激光参数测量原理性实验。分时实验光路如图2所示,采用前端振荡器作为光源。测试光束从AMP1三程4f像传递结构的第一个透镜后引出,此处光束为准平行光束,光斑大小为15 mm,脉宽约为5.8 ns。光束引出后先通过分束器BS<sub>1</sub>、BS<sub>2</sub>和BS<sub>3</sub>构造出多路光束,再经过反射镜M<sub>2</sub>~M<sub>5</sub>产生延时,最后形成3束强度大致相同,但彼此间有一定时间间隔的子光束,分别为B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>和B<sub>3</sub>。时间间隔由相邻两束的光程差决定,图2中设为4.5 m,即对应15 ns时间延迟。子光束经

过透镜  $L_1 \sim L_3$  进行缩束, 焦距  $f=3.2 \text{ m}$ , 缩束后的光束由反射镜  $M_6 \sim M_8$  组成的合束光路在焦点处合为一束。分束镜  $M_9$  对合束后的光束进行分束, 透射束由光电管测量脉冲波形, 反射束由能量计测量其光束总能量。光电管采用 HAMAMATSU 1193-54, 上升沿时间为  $270 \text{ ps}$ , 下降沿时间为  $100 \text{ ps}$ , 能量计采用 OPHIR PE10, 接收孔径为  $\Phi 12 \text{ mm}$ , 波长范围为  $0.15 \sim 12 \mu\text{m}$ , 校准精度为  $\pm 3\%$ 。

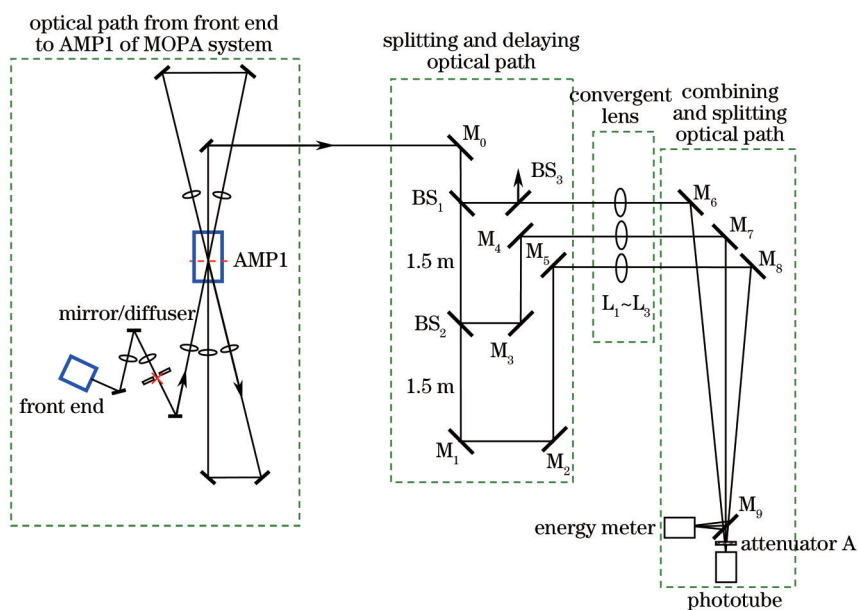


图2 分时测量原理实验光路

Fig.2 Experimental optical layout of time-sequence method

### 3.2 实验结果

3通道同时测量, 光束间的延时  $\Delta t_{B1-B2}=15 \text{ ns}$ ,  $\Delta t_{B2-B3}=12.8 \text{ ns}$ 。首先测量得到3束脉冲激光总能量  $E$  和3束激光脉冲波形, 采用波形幅值比例对总能量进行分配的方式求出各路激光能量值  $E_i (i=1 \sim 3)$ 。然后分别测量各路激光能量, 测量时均采用多次测量取平均的形式, 测量结果作为每路激光能量测量值  $E'_1$ 、 $E'_2$  和  $E'_3$ 。最后由每一路激光的计算值和测量值求出测量的相对误差:

$$R = (E_i - E'_i) / E'_i \times 100\% . \quad (1)$$

表1为能量测量值, 分别测量了总能量  $E$  和每一束能量  $E'_i (i=1 \sim 3)$ , 结果为10次平均。图3是典型的测量波形, 各路激光脉冲波形以延迟时间间隔形成脉冲序列, 表2给出了子波形的脉冲幅值  $A_i (i=1 \sim 3)$ , 并根据幅值对能量进行了计算。计算结果表明, 3路激光能量相对误差分别为  $-2.93\%$ ,  $1.74\%$  和  $-3.45\%$ , 均小于  $\pm 5\%$ , 该结果说明分时测量技术可以给出置信度较高的测量结果。

表1 能量测量结果

Table 1 Results of energy measurement

	Measured value										Average
Total energy $E / \mu\text{J}$	4.82	4.75	4.59	4.78	4.71	4.6	4.71	4.92	4.74	4.72	4.73
B1 $E_1 / \mu\text{J}$	1.93	2.03	1.9	1.92	1.97	1.99	1.97	1.87	2.08	2.05	1.97
B2 $E_2 / \mu\text{J}$	1.59	1.46	1.49	1.51	1.47	1.56	1.48	1.52	1.45	1.53	1.51
B3 $E_3 / \mu\text{J}$	1.27	1.22	1.21	1.27	1.26	1.31	1.24	1.29	1.3	1.23	1.26

表2 波形测量及计算

Table 2 Waveform measured and calculated

	B1	B2	B3
Waveform amplitude $A_i / \text{mV}$	4960	3880	2960
Energy calculated $E_i / \mu\text{J}$	1.990	1.557	1.188
Energy measured $E'_i / \mu\text{J}$	1.97	1.51	1.26
Relative error /%	-2.93	1.74	-3.45

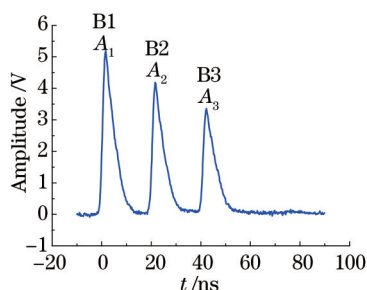


图3 典型测量波形

Fig.3 Typical measured waveform

#### 4 分时测量法在角多路 MOPA 系统中的实现

对于激光脉冲参数的分时测量法来说,有两个主要结构,一是延迟光路,二是激光光束的缩束光路。若相邻的两路激光间需要产生 10 ns 延时,那么两路之间需要 3 m 的程差,第 3 路则需要 6 m 的程差,如此则光路系统仍需占据较大的空间。另一方面,由于能量计和光电管口径有限,激光束需要缩束到一定的大小以匹配探测器口径。以上两点将对分时测量光路结构带来一定的复杂性。

但结合平滑化角多路 MOPA 系统的特点<sup>[1-7]</sup>,可以使得上述两个问题得到很好的解决,从而可以采用较为简单的光路就可以实现多路光束的分时测量。系统中有两个特点:一是系统中存在角多路编码光路结构,编码后各路激光间存在延时 $\Delta t$ ,并且各路激光脉冲波形间是相互复制的关系,仅是强度略有不同;二是为满足均匀辐照的要求,整个系统采用了像传递光学结构,主光路中存在较多会聚光束,故若能在适当位置采用反射镜透射法对主光路进行取样,则取样光束保持主光路传输特性,仍为会聚光束,可直接进行光束的合束测量。

由以上两个特点出发,在系统中可以采用较为简单的光路、非常便利地实现多路激光脉冲的分时测量。图 4 是角多路系统中多路激光参数分时测量法的一种实现方式,其中已编码光束通过像传递透镜  $L_1 \sim L_3$  后继续向前传播,透镜与透射取样镜  $M_1 \sim M_3$  间距离小于  $f$ ,取样光束将继续保持会聚特性。取样光束通过反射镜  $MM_1 \sim MM_3$  构成的引导光路合束,再通过分光镜  $MM_4$  进行能量和波形的测量,分时测量光路结构得到了很大的简化。

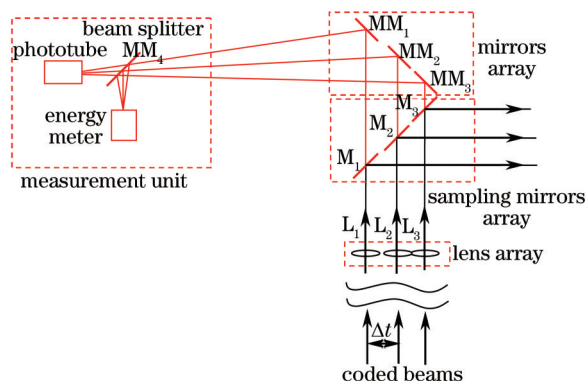


图4 角多路 MOPA 系统分时测量示意图

Fig.4 Time-sequence method in angular multiplexing MOPA system

#### 5 结 论

提出了一种多路激光脉冲的分时测量技术,该技术可以采用同一套测量设备完成多路激光脉冲的测量,并能在高功率准分子激光角多路 MOPA 系统中非常方便的实现。完成了分时测量技术的原理性实验,验证了测量方法,最小能量测量相对误差在 $\pm 5\%$ 以内。由于采用同一套测试设备,该测试方法的一个显著优点是可避免由于采用不同测试设备分别测量所引起的系统误差。该方法也可以推广应用于其类似场合。

#### 参 考 文 献

1 Y Owadano, I Okuda, Y Matsumoto, *et al.*. Performance of the ASHURA KrF laser system and its upgrading plan[J]. Laser and

- Particle Beams, 1993, 11(2): 347-351.
- 2 S P Obenschain, S E Bodner, D Colombant, *et al.*. The Nike KrF laser facility: Performance and initial target experiments[J]. Phys Plasmas, 1996, 3(5): 2098-2107.
- 3 Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. ASE suppression in the high power excimer laser MOPA system based on electro-optical switch[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102008.  
胡 云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102008.
- 4 Hu Yun, Zhao Xueqing, Zhu Yongxiang, *et al.*. Study of gain control method based on electro-optical switch for ASE suppression of excimer laser[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(4): 0402002.  
胡 云, 赵学庆, 朱永祥, 等. 基于电光开关的增益控制法准分子激光 ASE 抑制技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402002.
- 5 Gong Kun, Ma Jinglong, Xiang Yihuai, *et al.*. Development of the angular multiplexing system of the MOPA in Heaven-I[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(5): 671-676.  
龚 堃, 马景龙, 向益淮, 等. 天光一号 MOPA 光学角多路系统的研制[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(5): 671-676.
- 6 Xiang Yihuai, Gao Zhixing, Tong Xiaohui, *et al.*. Development of new angular multiplexing for "Heaven I"[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 795-799.  
向益淮, 高智星, 佟小惠, 等. 天光一号平滑化角多路系统的建立[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 795-799.
- 7 Zhang Yongsheng, Zhao Jun, Ma Lianying, *et al.*. Optical design of high power excimer laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7): 1857-1860.  
张永生, 赵 军, 马连英, 等. 高功率准分子激光系统光学设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1857-1860.

栏目编辑: 宋梅梅