

# 基于积分球的高功率激光多参数测量技术

陈 欣<sup>1,2</sup> 唐顺兴<sup>1</sup> 惠宏超<sup>1,2</sup> 刘代中<sup>1</sup> 欧阳小平<sup>1</sup> 林 强<sup>1</sup> 朱宝强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对传统测量技术对入射光入射方向敏感的缺点, 提出了一种基于积分球的高功率激光多参数测量的分光技术。采用蒙特卡罗法对衰减率、出射光时间波形特性、入射光时间波形恢复这三个方面进行了数值分析和仿真, 验证了积分球作为激光测量系统中的分光元件的可行性。利用积分球对纳秒激光的能量和时间波形进行测量, 实验结果与理论分析相符。实验与仿真均表明在激光参数测量中采用该分光技术, 通过测量出射光各项参数可以恢复入射光的光谱参数、能量参数、时间参数, 克服传统技术中入射光的入射方向对于出射光的各项参数有较大影响的问题。该技术方案占用空间小、易于集成, 可用于多路高功率激光参数测量系统的模块化设计。

**关键词** 测量; 分光; 蒙特卡罗法; 积分球; 模块化设计

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0804002

## High Power Laser Multi-Parameter Measurement Technique Based on Integrating Sphere

Chen Xin<sup>1,2</sup> Tang Shunxing<sup>1</sup> Hui Hongchao<sup>1,2</sup> Liu Daizhong<sup>1</sup>  
Ouyang Xiaoping<sup>1</sup> Lin Qiang<sup>1</sup> Zhu Baoqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Aiming at the disadvantage that the traditional measurement technique is sensitive to the incident direction of incident light, a beam-split technique of high power laser multi-parameter measurement based on integrating sphere is proposed. Numerical analysis and simulation about attenuation rate, time waveform of emergent light, and time waveform recovery of incident light are carried out by Monte-Carlo method, which validate the feasibility that the integrating sphere can be used as beam-splitter in laser measurement system. The energy and time waveform of nanosecond laser is measured based on integrating sphere. The theoretical analysis matches well with the experiment result. Experiment and simulation results show that spectrum parameter, energy parameter and time parameter of incident light can be recovered by measuring the parameters of the emergent light, when the light-split technique is used in laser parameters measurement. The proposed technique can conquer the disadvantage that the incident direction of incident light has great influence on the parameters of the emergent light in traditional technique. The proposed technical proposal possesses small volume and is easy to integrate, which can be used in modular design of multiple beam high power laser parameters measurement system.

**Key words** measurement; beam-splitter; Monte-Carlo method; integrating sphere; modular design

**OCIS codes** 120.3150; 030.5290; 040.1880; 140.3295

## 1 引 言

随着惯性约束聚变(ICF)物理理论不断发展以及精密物理实验要求的不断提高,激光驱动器的光束路数

收稿日期: 2016-03-16; 收到修改稿日期: 2016-04-29

作者简介: 陈 欣(1990—),男,硕士研究生,主要从事高能激光参数测量方面的研究。

E-mail: chenxin900827@foxmail.com

导师简介: 朱宝强(1966—),男,研究员,硕士生导师,主要从事高功率激光非线性技术方面的研究。

E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

急剧增多,光路长度和元器件数目成倍增长<sup>[1-3]</sup>。模块化是新一代激光驱动器的发展趋势。对于高功率激光多参数测量系统,模块化设计要求测量系统集成化高、体积小、调试简单,对于待测光入射方向有一定的宽容度。

激光多参数测量系统常用于测量激光的时间波形、光谱、能量等参数<sup>[4]</sup>。在现有的激光多参数测量系统中,主要有两种分光技术。一种基于光的透反射特性,由多片镀膜石英平板组成<sup>[5]</sup>,通过光学镀膜实现不同配比的分光,这种技术能够精确控制分光配比,通过调节镜片角度可控制输出光路方向。其缺点是针对每一片平板玻璃需要单独调节,费时费力,也不易于集成。另一种分光技术基于光的衍射特性,利用光栅的零级衍射和±1级衍射进行分光,通过设计光栅结构使得光束按照不同配比、不同角度出射<sup>[6]</sup>。这种技术采用单一器件实现分光,解决了集成化的问题。但是光栅的损伤阈值较低,容易被激光损伤。同时,两种方案对于入射光的入射方向要求很高,若入射方向出现一定偏差,出射光就无法准确打到测量设备感光元件上,造成测量精度下降甚至无法读数,不利于测量系统的模块化设计。

为克服上述分光技术的不足,提出一种基于积分球的分光技术和多参数测量方案,可用于测量能量参数、光谱参数、时间参数。采用蒙特卡罗法验证了采用积分球作为测量系统的分光方案的可行性,分析了入射光的入射方向对于测量结果的影响。通过实验对能量测量、时间波形测量进行验证。实验与仿真均表明采用该技术方案,通过测量出射光的各项参数可以恢复入射光的光谱参数、能量参数、时间参数,克服传统技术中入射光的入射方向对于出射光各项参数的测量产生较大影响的不足。

## 2 方案设计与原理

### 2.1 方案介绍

基于积分球的多参数测量系统设计方案如图1所示。积分球是一个内部涂有漫反射涂层的空腔球体,常用于光源的计量与测量仪器的校准<sup>[7-8]</sup>。在该测量方案中,积分球起到了分光的作用。入射光从A孔进入积分球,光束在内部经历多次漫反射,分别由B、C、D孔出射。B、C、D孔分别对应能量参数测量、时间参数测量、光谱参数测量。

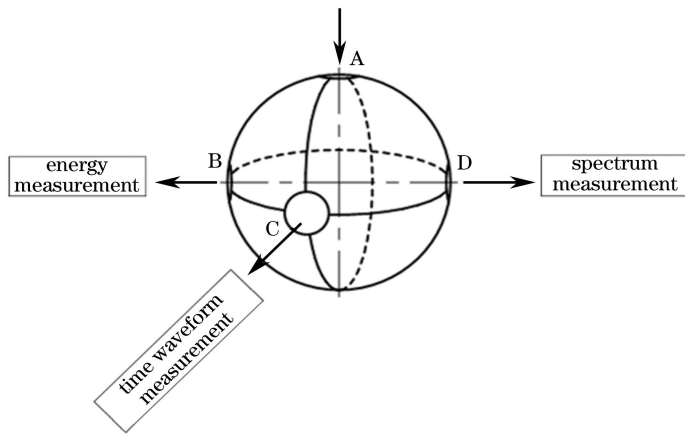


图1 基于积分球的多参数测量系统

Fig. 1 Multi-parameter measurement system based on integrating sphere

### 2.2 测量原理

Goebel<sup>[9]</sup>于1967年给出了积分球的衰减率计算公式。对于入射辐照度 $\phi$ 、输出辐照度 $\phi_{out}$ ,衰减率 $\varphi$ 满足

$$\varphi = \frac{\phi_{out}}{\phi} = \frac{\rho S_{out}}{4\pi R^2 [1 - \rho(1 - f)]}, \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为漫反射涂层的反射率, $R$ 为积分球半径, $f = (S_{in} + S_{out})/S$ 为开孔比, $S_{out}$ 和 $S_{in}$ 分别为出入孔表面积,积分球的衰减率与积分球的反射率、尺寸以及开孔比相关。通过设计积分球结构可以使得出射光能量与入射光能量有一定配比的衰减,达到不同配比的分光。

上述理论得到了衰减率表达式,但无法获得积分球对短脉冲的光功率波形的变换关系。2002年,高学燕等<sup>[10]</sup>提出了积分球的光功率变换理论。在该理论中,提出了可用于非平衡过程的一次反射短时平均等照

度性质。根据该理论推导可得,积分球对于任意输入功率波形的变换公式为

$$P_{out}(t) = \frac{r_c \rho}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_{-\infty}^t P_{in}(\xi) \exp\left(\frac{\xi}{\tau}\right) d\xi, \quad (2)$$

式中,  $P_{in}(\xi)$  为入射波形函数,  $P_{out}(t)$  为出射波形函数,  $\tau$  为衰减时间常数,  $\tau = -4R/\{3c \ln[\rho \times (1-f)]\}$ 。  $r_c$  为出射孔对积分球内部的损耗占到开口损耗的比例,  $r_c = k_c/[1-\rho(1-f)]$ , 其中  $k_c$  为开口损耗,  $k_c = S_{out}/(4\pi R^2)$ 。对(2)式进行反变换,可得

$$P_{in}(t) \propto \left[ P'_{out}(t) + \frac{1}{\tau} P_{out}(t) \right]. \quad (3)$$

根据光功率变换理论,若能测得积分球出射光的时间波形曲线即可获得入射光的时间波形曲线。这为积分球作为分光元件用于时间波形参数测量提供了理论基础。

### 2.3 积分球参数设计依据

光束在积分球内部漫反射次数越多,出光均匀性、稳定性越好。平均漫反射次数  $\bar{n}$  满足

$$\bar{n} \propto \frac{1}{\ln[\rho(1-f)]}, \quad (4)$$

式中,  $\rho$  体现了材料的吸收损耗,  $f$  体现了开孔溢出损耗。  $\rho(1-f)$  越接近于 1, 单次漫反射损耗越小, 平均反射次数越多, 出光的均匀性和稳定性也就越好。常见激光波段中, 商用漫反射涂层反射率可以达到 99%。开孔比与积分球尺寸和开孔口径相关, 在设计积分球参数时要求  $1-f$  与  $\rho$  可比拟。

## 3 数值仿真

蒙特卡罗法是一种分析光的漫反射的数学统计方法<sup>[11-12]</sup>。其主要利用随机变量对大量单个光子的运动轨迹进行描述<sup>[13]</sup>。表 1 为初始仿真参数, 入射光为脉宽 3 ns 的高斯脉冲光, 空间分布满足平顶分布。积分球开孔比  $f=0.0157$ , A 孔中心在  $z$  轴正半轴上, B、C、D 孔中心在  $xoy$  平面上, 以  $z$  轴为中心,  $120^\circ$  夹角依次排列(如图 2 所示)。光束从 A 孔入射, 仿真分析 B、C、D 孔的出光特性。三个出射孔中心对称分布, 分析任意一个出射孔的出光特性即可推广至三个出射孔。

表 1 初始参数

Table 1 Initial parameters

Parameters of integrating sphere	Parameters of incident laser
Radius of integrating sphere: 8 cm	Number of photons: $10^6$
Radius of A aperture: 1 cm	Time waveform: Gaussian pulse
Radius of B aperture: 1 cm	Pulse width: 3 ns
Radius of C aperture: 1 cm	Spatial distribution: flat-top beam
Radius of D aperture: 1 cm	Beam size: 1 cm×1 cm
Reflection: 99%	Incident direction: $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$

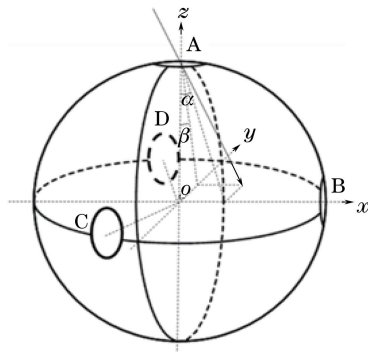


图 2 仿真所用积分球结构图

Fig. 2 Integrating sphere structure in stimulation

### 3.1 出射光空间分布仿真

光子在积分球内部不断漫反射的过程中,由于漫反射材质的吸收损耗和出射孔、入射孔的溢出损耗,积分球内部的光子数不断减少,当积分球内部的光子数不足总数目 0.1% 时,可视为球腔中已无光子。10 次仿真结果统计如表 2 所示。

表 2 光子数目统计表  
Table 2 Statistics of photon number

Stimulation	Photon number in material absorption	Photon number in loss from aperture A	Photon number in loss from aperture B, C, D			Remaining photon number
			B	C	D	
1	390777	152219	152132	151802	152093	977
2	391271	152183	151913	151543	152107	983
3	391156	152331	151519	151816	152192	986
4	391423	152548	151814	151467	151772	976
5	392592	152248	151497	150840	151838	985
6	391410	152223	151907	152332	151144	984
7	390682	151928	152283	152405	151720	982
8	391798	151738	151840	151793	151864	967
9	392254	151970	151959	151596	151229	992
10	391232	151897	151693	152144	152040	994
Average	391459.5	152128.5	151855.7	151773.8	151799.9	982.6

在入射波长一定的情况下,激光能量正比于光子数目,通过计算从出孔溢出的光子数与总光子数的比值可以得到衰减率。该积分球 A、B、C、D 孔的衰减率分别为:15.21%、15.19%、15.18%、15.18%。将积分球仿真参数代入理论公式计算,可得积分球衰减率为

$$\varphi = \frac{\phi_{out}}{\phi} = \frac{\rho S_{out}}{4\pi R^2 [1 - \rho(1 - f)]} = 15.20\%, \quad (5)$$

蒙特卡罗仿真结果与理论值相符。仿真表明:A 孔位于积分球顶端,衰减率略大于理论值,B、C、D 中心对称分布,衰减率略小于理论值。衰减率偏差不得超过 0.03%,积分球的结构对于衰减率的影响是极为有限的。

### 3.2 出射光时间波形仿真

图 3(c)是根据(2)式计算获得的出射光时间波形曲线。入射光在积分球内部进行多次漫反射的过程中,追迹光子在积分球内部走过的光程并将其转化为时间的延迟量可以获得 B 孔出射光光子数目的时间分布曲线,如图 3(a)所示。时间间隔取 0.2 ns,对应采样率为 5 GSa/s 的示波器。图 3(b)是图 3(a)归一化后的光子数目统计分布曲线。对比图 3(b)与图 3(c),有两点区别:1) 出射光时间波形曲线相差  $\Delta t$  延时;2) 蒙

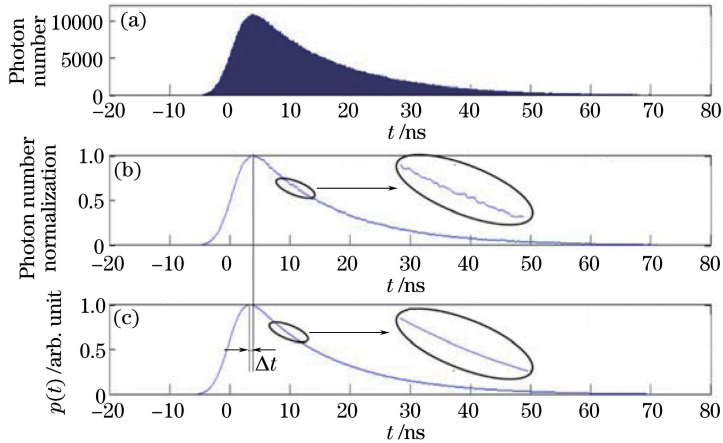


图 3 出射光时间波形仿真。(a)出射光子数目时间统计分布;(b)归一化出射光子时间统计分布;(c)出射光时间波形曲线  
Fig. 3 Time waveform simulation of emergent light. (a) Number of emergent photon time statistical distribution; (b) normalized number of emergent photon time statistical distribution; (c) emergent light time waveform curve

特卡罗法仿真曲线在功率变换理论计算获得的曲线上叠加了一个振荡曲线。对于前者,存在  $\Delta t$  延时的原因是当激光从积分球入孔入射时,并不能立刻产生出射光,光束至少要经过一次漫反射才能到达出孔,出射光对入射光的响应存在延时,而积分球功率变换理论并未考虑这一点。对于后者,功率变换理论是基于一次反射短程平均等照度性质的平均意义下的解,适用于统计时间间隔较大的情况,若取样时间间隔过小则会叠加振荡曲线。若采用(3)式恢复入射光时间波形,振荡曲线对于微分十分敏感,无法准确复原入射光的时间波形曲线。

### 3.3 入射脉冲时间波形恢复仿真

针对这一问题,采用平均滤波器对蒙特卡罗仿真下的出射光时间波形曲线进行匀滑处理,再恢复入射脉冲的时间波形曲线(如图4所示)。图4(c)为光子数为  $10^6$  时,标准的高斯脉冲时间波形、直接恢复的入射脉冲时间波形、滤波器宽度分别为 5、13、21、29 时进行匀滑后恢复的入射脉冲时间波形。仿真表明:不加匀滑时,恢复的时间波形有大量抖动,失真严重;采用平均滤波器进行匀滑时,随着滤波器宽度的增加,恢复的入射光时间波形抖动与毛刺都在减小,但是滤波器宽度过大也会使得恢复的入射脉冲变形。以半峰全宽(FWHM)作为入射脉冲相似度判据,对于脉宽 3 ns 的高斯脉冲,FWHM 为 5 ns;滤波器宽度分别为 5、13、21、29 时恢复的时间波形对应的 FWHM 分别为 5.2、5.2、5.8、6.6 ns。综合考虑,当光子数为  $10^6$  时,平均滤波器宽度取 13 时,恢复的入射脉冲时间波形较准确、毛刺较少。对比图4(a)、(b)、(c),随着仿真光子数目的增加,振荡曲线对于恢复的时间波形曲线的影响在减小。实际测量中,光子数目远大于  $10^6$ ,受限于计算机性能无法进行更大数据量的仿真,平均滤波器宽度的选取还需要在进一步的实验中获得。

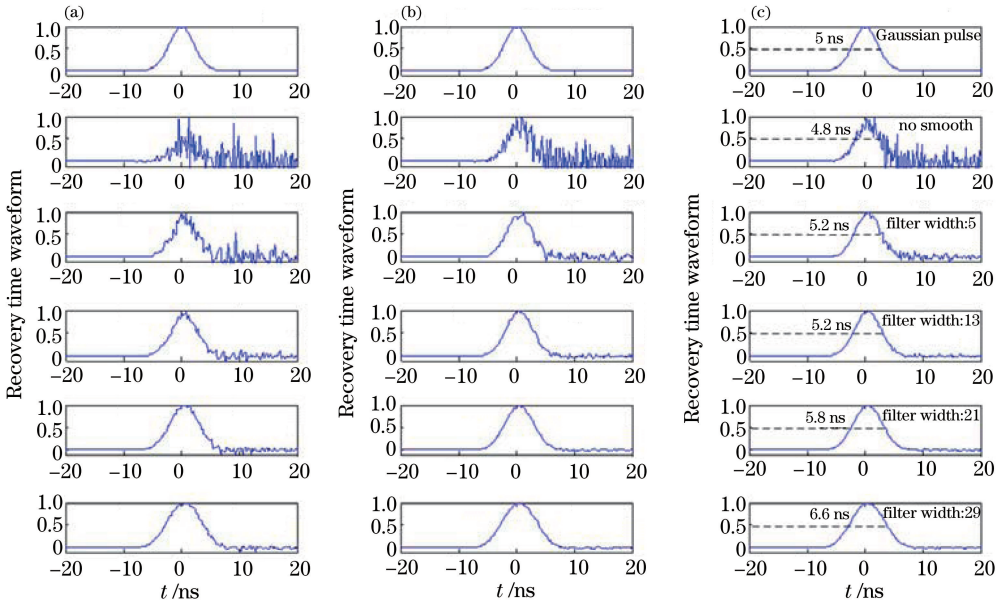


图4 平均滤波器宽度对于恢复的入射光时间波形的影响。(a)光子总数为  $10^5$ ; (b)光子总数为  $5 \times 10^5$ ; (c)光子总数为  $10^6$   
 Fig. 4 Influence of width of average filter on recovery time waveform of incident light. (a) Photon number is  $10^5$ ; (b) photon number is  $5 \times 10^5$ ; (c) photon number is  $10^6$

### 3.4 入射光的入射方向对于测量的影响

在三维空间内,入射方向可分别用  $\alpha$ 、 $\beta$  表示(如图2所示)。 $\alpha = 0^\circ, \beta = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  时,入射方向在  $yo z$  平面上出现倾斜; $\alpha = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \beta = 0^\circ$  时,入射方向在  $xoz$  平面上出现倾斜。B孔衰减率和光强对比度的仿真结果见表3,每个入射方向仿真5次取平均值。

仿真表明,当入射光入射方向出现一定偏差时,经过积分球分光后,出孔衰减率在 15.17%~15.20% 之间。入射方向对于出光衰减率无显著影响。多参数测量系统中,测量设备与积分球相对位置不变,入射光入射方向对于测量结果可忽略不计。

图5(a)为入射方向满足  $\alpha = 0^\circ, \beta = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  时,恢复的入射脉冲时间波形曲线;图5(b)为入射方向满足  $\alpha = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \beta = 0^\circ$  时,恢复的入射脉冲时间波形曲线。采用宽度 13 的平均滤波器对 B 孔出射光时间波形进行匀滑。在不同的入射方向下,恢复的入射脉冲时间波形几乎没有区别,

可见入射光的入射方向对于时间波形测量影响极小。

表 3 出射光衰减率

Table 3 Attenuation rate of emergent light

Incident direction	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = -30^\circ$	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = -15^\circ$	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 15^\circ$	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 30^\circ$
Attenuation rate of aperture B	15.19%	15.17%	15.19%	15.18%	15.20%
Incident direction	$\alpha = -30^\circ$ $\beta = 0^\circ$	$\alpha = -15^\circ$ $\beta = 0^\circ$	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 0^\circ$	$\alpha = 30^\circ$ $\beta = 0^\circ$
Attenuation rate of aperture B	15.19%	15.18%	15.19%	15.20%	15.19%

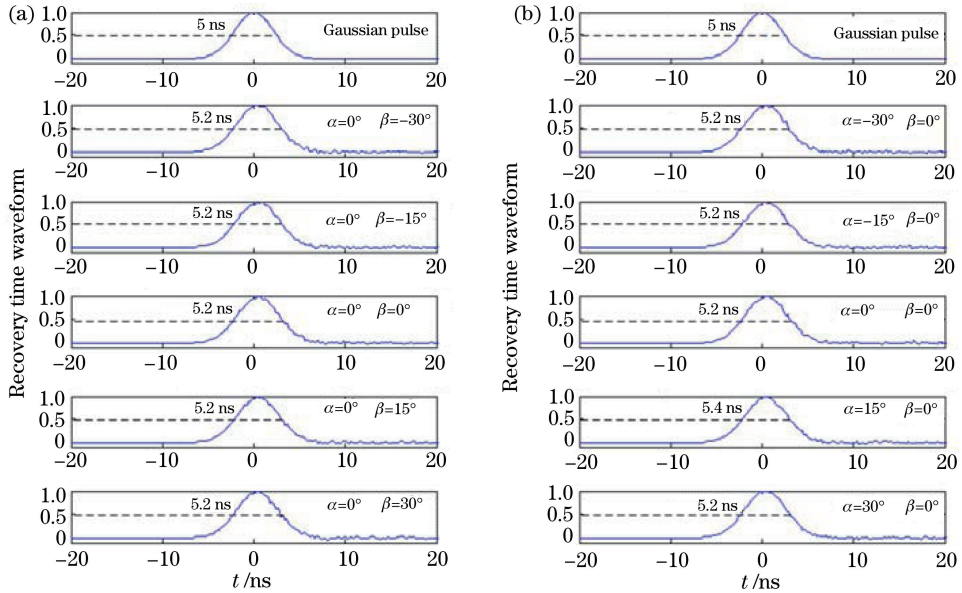


图 5 不同入射方向下恢复的入射脉冲的时间波形曲线。(a)入射方向在  $yoz$  平面上;(b)入射方向在  $xoz$  平面上

Fig. 5 Recovery time waveform of incident pulse in different incident directions. (a) Incident direction is on  $yoz$  plane; (b) incident direction is on  $xoz$  plane

## 4 实验验证

根据现有的实验仪器,主要针对积分球用于能量测量和时间波形测量进行实验验证。选用激光器的工作波长为 1053 nm、频率为 1 Hz、光斑直径为 8 mm;选用积分球的直径为 13.46 cm,两个开孔口径均为 2.54 cm,开孔比为 0.982,开口中心与球心连线夹角为  $90^\circ$ ,漫反射涂层反射率为 99%,衰减时间常数为 10.6 ns。

### 4.1 能量测量验证实验

实验方案如图 6 所示,采用不镀膜的平板玻璃小角度分光取样,取样激光进入能量计 1,剩余激光进入

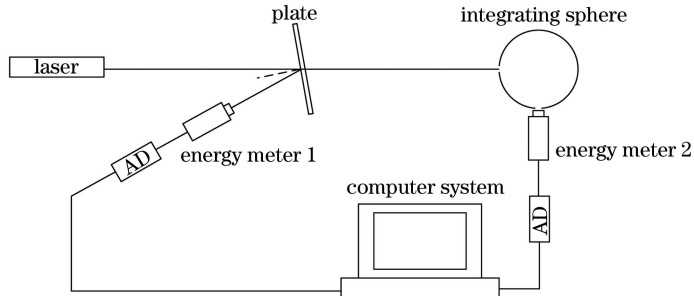


图 6 能量测量实验光路图

Fig. 6 Experimental light path figure of energy measurement

积分球,在积分球出口处用能量计 2 测量出射光能量,能量计 2 与积分球相对位置保持固定。为保证测量的精确性,两个能量计均选用索雷博的 ES120C 型热释电能量计。

能量测量实验数据见表 4。在入射角倾斜  $-20^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  时,  $E_2$  (能量计 2 的测量值)/ $E_1$  (能量计 1 的测量值) 的比值分别为 2.3603、2.3650、2.3807、2.3699、2.3533, 精度[均方根(RMS)]分别为 0.34%、0.29%、0.52%、0.24%、0.21%, 在不同角度下都可以保证测量精度小于 1% RMS。在实验中, 由于能量计的感光面积小于积分球出孔面积, 出射光为发散光, 无法获得准确的积分球衰减率。但这并不影响测量的精确性, 对于基于积分球的激光多参数测量系统, 保证能量探头与积分球相对位置不变, 通过对测量系统定标, 即可准确测量能量参数。

表 4 能量测量实验数据

Table 4 Experiment data of energy measurement

Angle	$-20^\circ$		$-10^\circ$		$0^\circ$		$10^\circ$		$20^\circ$	
Energy meter /mJ	$E_1$	$E_2$	$E_1$	$E_2$	$E_1$	$E_2$	$E_1$	$E_2$	$E_1$	$E_2$
	0.59092	1.4096	0.5976	1.42	0.605	1.424	0.60458	1.4346	0.60092	1.4108
	0.6854	1.634	0.69704	1.6518	0.6953	1.639	0.69744	1.6546	0.69426	1.6268
	0.7971	1.9032	0.80796	1.9306	0.8051	1.8876	0.81396	1.922	0.80464	1.8846
	0.92718	2.1978	0.94112	2.226	0.93794	2.2074	0.95184	2.2562	0.93212	2.183
	1.0798	2.5538	1.087	2.5792	1.0942	2.5492	1.0996	2.6154	1.0814	2.5334
	1.2586	2.9818	1.266	2.9978	1.2686	2.996	1.2756	3.0348	1.2522	2.9468
	1.4494	3.4384	1.4676	3.4804	1.455	3.4434	1.475	3.4874	1.453	3.4006
	1.6706	3.9606	1.6758	3.9712	1.6794	3.9814	1.6938	4.0148	1.6754	3.9424
Fitting equation	$E_2 = 2.3603E_1 + 0.0142$		$E_2 = 2.3650E_1 + 0.0074$		$E_2 = 2.3807E_1 - 0.0256$		$E_2 = 2.3699E_1 + 0.0014$		$E_2 = 2.3533E_1 - 0.0076$	

#### 4.2 时间波形测量验证实验

实验方案如图 7 所示, 用光电倍增管测量时间波形, 示波器采样率设置为 5 GSa/s。

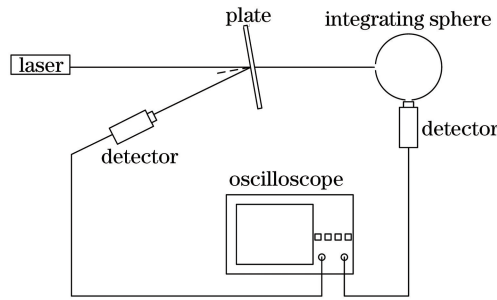


图 7 时间波形测量实验光路图

Fig. 7 Experimental light path of time waveform measurement

时间波形恢复过程如图 8 所示, 待测光垂直入射积分球。图 8(a) 为光电倍增管直接测量激光的时间波形曲线, FWHM 为 8.6 ns; 图 8(b) 为经过积分球漫反射后的时间波形, 出射光时间波形有一定程度的抖动和较为明显的背景噪声。用宽度 19 的平均滤波器对出射光的时间波形曲线进行时行匀滑, 滤波效果如图 8(d) 所示; 图 8(c) 为恢复的待测光时间波形, FWHM 为 8.8 ns。实验表明: 待测光垂直入射积分球, 测量积分球出射光时间波形, 结合平均滤波器和光功率变换理论可以较为准确地恢复入射光时间波形; 恢复波形与直接测量的波形对比, 波形基本一致, FWHM 增加了 0.2 ns, 即一个采样间隔。

图 9 为不同入射方向下, 恢复的时间波形图, 平均滤波器宽度均为 19。以 FWHM 为时间波形相似性判据, 恢复波形的 FWHM 与直接测量波形的 FWHM 最大差值仅为 0.2 ns, 在 5 GSa/s 示波器下, 仅为一个采样间隔。在入射角倾斜  $-20^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  时, 恢复波形与直接测量波形的相关系数分别为 0.9520、0.9971、0.9965、0.9895、0.9740。一般而言, 相关系数大于 0.95 就可以说明两条曲线具有良好的相关性, 采用算法恢复的时间波形准确地复现了激光器真实的时间波形。实验表明, 在基于积分球的测量系统中, 测量精度不受入射光入射方向的影响。对于高功率激光驱动器测量系统, 由于激光驱动器输出光束指向性一般尽

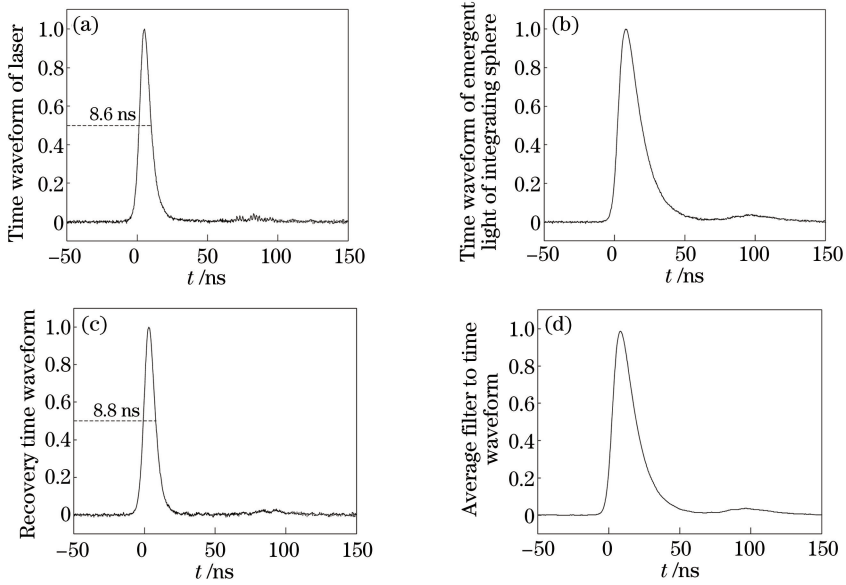


图 8 时间波形恢复过程。(a)直接测量时间波形；(b)积分球出射光时间波形；(c)算法恢复的时间波形；  
(d)平均滤波器匀滑后的时间波形

Fig. 8 Time waveform recovery process. (a) Time waveform by direct measurement; (b) time waveform of emergent light of integrating sphere; (c) recovery time waveform by algorithm; (d) time waveform filtered by average filter

量保证在  $12 \mu\text{rad}$  以内,但是由于激光传输距离很长,引入的光斑漂移依旧很大。此外在高功率激光驱动器测量系统集成化方面,减小测量系统对光束指向性的要求对于测量精度以及测量系统的稳定性均十分必要。从图 9 的实验结果可以看到,采用基于积分球的测量系统对光束指向性基本没有要求,可以极大地提高模块化参数测量系统的稳定性。

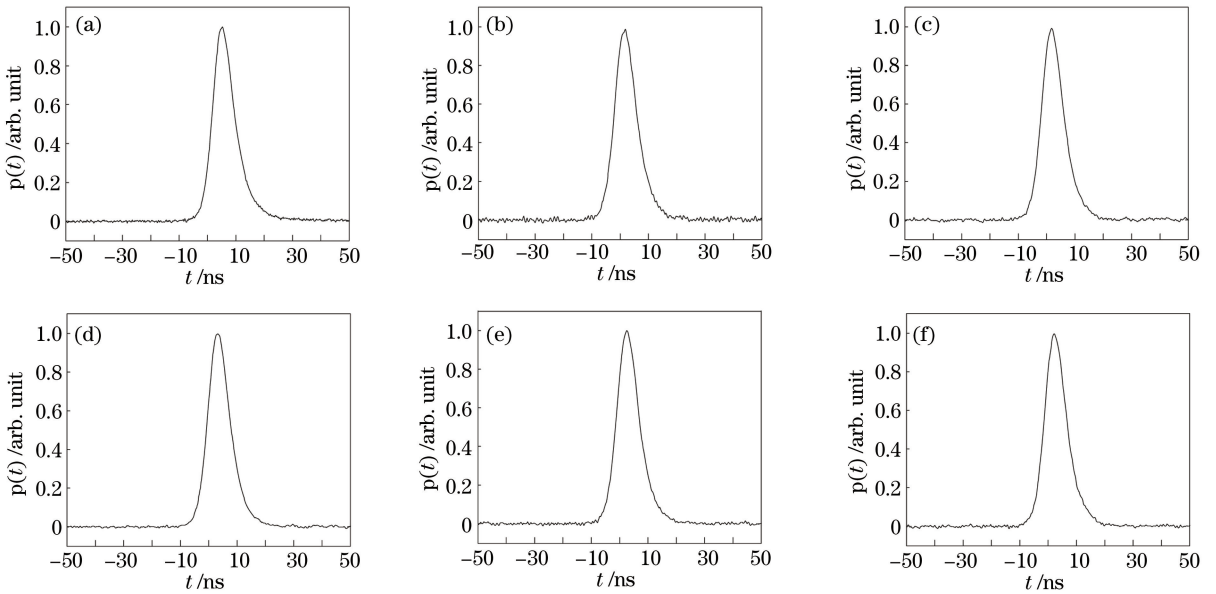


图 9 不同入射角度恢复的时间波形对比。(a) 直接测量；(b)  $-20^\circ$ ；(c)  $-10^\circ$ ；(d)  $0^\circ$ ；(e)  $10^\circ$ ；(f)  $20^\circ$

Fig. 9 Recovery time waveform in comparison with different incident angles. (a) Direct measurement; (b)  $-20^\circ$ ; (c)  $-10^\circ$ ; (d)  $0^\circ$ ; (e)  $10^\circ$ ; (f)  $20^\circ$

## 5 结 论

针对现有激光测量系统中分光技术方案的不足:入射光的方向严重影响测量精度,光路调整复杂,空间



体积大,不宜小型化和模块化,提出了一种基于积分球的分光技术和多参数测量方案。采用蒙特卡罗法分别从衰减率、出射光时间波形、入射脉冲时间波形恢复这三个方面进行了数值模型仿真,论证了该技术的可行性。利用该测量系统对纳秒激光脉冲的能量和时间波形进行测量,能量测量精度小于1%(RMS),测量的时间波形与实际入射时间波形符合得很好,相关系数大于95%。实验与仿真均表明,该基于积分球的参数测量系统可以对出射光的各项参数进行测量,包括入射光的能量数、时间波形参数以及光谱参数。同时实验结果验证了该方案对入射激光的指向性不敏感的特性,有助于提高高功率激光系统参数测量系统的测量精度与稳定性。相比于传统测量方案,采用积分球作为分光元件的测量系统具有易于集成、占用空间体积小等优点。该技术方案对于高功率激光参数测量的模块化设计有重要借鉴意义。

## 参 考 文 献

- Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National ignition facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Study of cavity mirror alignment in multi-pass amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(9): 1161-1165.  
刘代中, 徐仁芳, 范滇元. 多程放大腔镜准直研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(9): 1161-1165.
- Zeng Peiying, Liu Daizhong, Peng Zengyun, *et al.* Research of auto-alignment system based on ethernet[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0302009.  
曾沛颖, 刘代中, 彭增云, 等. 基于以太网的自动准直系统研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0302009.
- Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua, *et al.* Analysis on reliability of diagnostics system for picosecond petawatt laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0108003.  
欧阳小平, 杨琳, 彭永华, 等. 皮秒拍瓦激光的参数测量系统可靠性分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0108003.
- Boyd R D, Bliss E S, Boege S J, *et al.* Alignment and diagnostics of the national ignition facility laser system[C]. *SPIE*, 1999, 3782: 496-501.
- Burkhart S C, Smith I. Beamlet laser diagnostics[J]. *Distribution Category*, 1994: 68.
- Wang Hengfei, Wu Bin, Liu Hongyuan, *et al.* Radiation uniformity calibration method of integrating sphere with large aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s2): s212005.  
王恒飞, 吴斌, 刘红元, 等. 一种新型大孔径积分球辐射均匀性定标方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(s2): s212005.
- Sun Jingxu, Zhang Hanzhuang. Thermal design for a kind of high-light-level integrating sphere calibration source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0312002.  
孙景旭, 张汉壮. 一种高亮度积分球定标光源的热设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0312002.
- Goebel D G. Generalized integrating-sphere theory[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(1): 125-128.
- Gao Xueyan, Zhou Dianhua, Zhou Shan, *et al.* Transformation theory of light power waveform by an integrating sphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4): 465-469.  
高学燕, 周殿华, 周山, 等. 积分球的光功率波形变换理论[J]. *光学学报*, 2002, 22(4): 465-469.
- Crowther B G. Computer modeling of integrating spheres[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(30): 5880-5886.
- Prokhorov A V, Mekhontsev S N, Hanssen L M. Monte Carlo modeling of an integrating sphere reflectometer[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(19): 3832-3842.
- Wang Jinjiang, Yang Zhiwen. The application of random variable in the designing of integrating sphere[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1406-1408.  
王晋疆, 杨志文. 随机变量在积分球设计中的应用[J]. *光子学报*, 2001, 30(11): 1406-1408.