

文章编号: 1002-2082 (2020) 04-0711-06

# 飞焦级激光能量计校准系统及方法研究

秦艳<sup>1</sup>, 韩占锁<sup>1</sup>, 林利红<sup>2</sup>, 汪建刚<sup>1</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 王兵<sup>1</sup>, 杨鸿儒<sup>1</sup>

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 北方科技信息研究所, 北京 100089)

**摘要:** 为了解决飞焦级激光能量计的校准问题, 提出了一种专用的校准系统和方法。该系统采用固定和可变二级衰减机构相结合的方式, 实现了对响应波长 1 064 nm、脉宽 5 ns~1 μs、飞焦量级的激光能量计的校准。阐述了校准系统的工作原理、设备组成和方法。对系统的关键组件和整机性能进行了描述, 并给出了相应的测试结果, 能量重复测量的不确定度为 3%, 系统的测量不确定度可以达到 11%。最后, 提出了该校准系统未来的改进方向。

**关键词:** 校准; 激光能量计; 飞焦; 衰减

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0407004

## Study on calibration system and method of femtojoule laser energy meter

QIN Yan<sup>1</sup>, HAN Zhansuo<sup>1</sup>, LIN Lihong<sup>2</sup>, WANG Jiangang<sup>1</sup>,  
LI Jie<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>1</sup>, YANG Hongru<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. North Institute for Scientific & Technical Information, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to solve the calibration problem of the femtojoule laser energy meter, a special calibration system and method were proposed. The combination of fixed and variable two-stage attenuation mechanism was adopted in this system, which realized the calibration of laser energy meter with response wavelength of 1 064 nm, pulse width of 5 ns~1 μs and energy of femtojoule. The working principle, equipment composition and method of the calibration system were described. The key components and engine performance of the system were also described, and the corresponding test results were given: the uncertainty of energy repeat measurement was 3%, and the measurement uncertainty of the system could reach to 11%. Finally, the future improvement direction of the calibration system was proposed.

**Key words:** calibration; laser energy meter; femtojoule; attenuation

## 引言

近年来随着激光测距、预警、医疗, 尤其是微弱激光信号探测技术的发展, 皮焦、飞焦级激光能量的探测愈来愈重要<sup>[1]</sup>。目前能够被准确校准的激光能量计其测量下限值已达到 1 000 fJ, 但低于 1 000 fJ 的校准, 国内报道较少。为了解决飞焦量级范围内激光能量计的校准问题, 研制了一种飞焦级激光能量计校准系统<sup>[2]</sup>, 该系统采用固定和可变二级衰减机构相结合的方式<sup>[3-4]</sup>, 将飞焦级标准激光光源的能量值传递到被校能量计上, 实现了对响应波长 1 064 nm、脉宽 5 ns~1 μs 的飞焦级激光能量计的

校准<sup>[5]</sup>, 使飞焦级激光能量计的量值处于受控状态。

## 1 系统组成

飞焦级激光能量计校准系统如图 1 所示。校准系统由纳秒脉冲微能量激光器、激光器电源、激光器控制器、分束器、监视能量计、参考能量计、半波片、起偏器、固定衰减器、扩束镜组、反射式可变衰减器、耦合透镜组组成。

激光器输出能量为 1 nJ~10 nJ、脉宽 10 ns~100 ns 的激光, 经半波片、起偏器后形成线偏振光<sup>[6]</sup>, 经固定衰减器衰减, 再经扩束镜组和反射式可变衰

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-05-22

基金项目: 国防科工局技术基础项目 (J092011B003)

作者简介: 秦艳 (1975-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光谱辐射计量测试技术研究。E-mail: 335183173@qq.com

减器后,形成飞焦级能量的脉冲激光输出<sup>[7]</sup>。监视和参考能量计用于实时监测输出激光能量的变化并确定分束比,固定衰减器在较宽能级范围内对光信号进行衰减,反射式可变衰减器的旋转角度为确定值时,其透过率值也唯一确定。根据此特点,可以在一定的激光能量范围内,获得更加精准的激光能量<sup>[8]</sup>。扩束准直镜用于形成特定直径的准直光束。

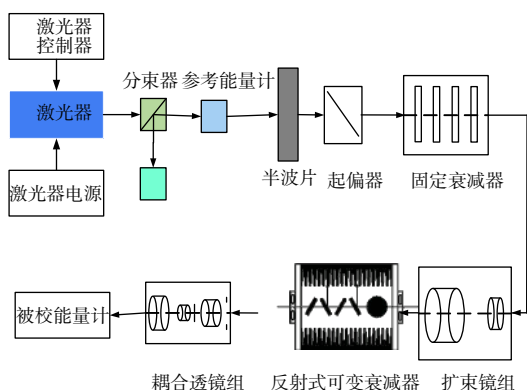


图 1 飞焦级激光能量计校准系统

Fig. 1 Calibration system of femtojoule laser energy meter

在大量实验的基础上,我们发现影响飞焦级能量值实现的主要因素有:激光器的输出能量值、分束器分束比、衰减器透过率。一旦这 3 种因素得到正确评定,则校准系统输出能量即可确定。

## 2 校准系统特性分析及实验

### 2.1 微能量激光器工作特性研究

校准系统中的微能量激光器为半导体激光器,其输出能量值的大小取决于半导体发光器的工作电流,不损坏发光元件时工作电流范围为 200 mA~900 mA,当脉冲宽度为 50 ns 时,可输出 0 nJ~30 nJ 的激光能量<sup>[9]</sup>。然而由于阈值与饱和这 2 个客观因素的作用,在输出能量较小或较大时,激光能量计的线性响应将受到影响<sup>[10]</sup>。为此,实际工作中应选用激光器的最佳工作电流,使能量计处于线性工作状态。从 300 mA 开始,每隔 10 mA,记录经过分束器后监视能量计和参考能量计的能量输出值,主要特征数值列于表 1 中。

表 1 不同工作电流下激光能量监测值

Table 1 Laser energy detection values of different working current

电流/mA	能量计	能量/nJ					
		1	2	3	4	5	6
900	监视能量计	12.84	12.88	12.86	12.88	12.84	12.84
	参考能量计	14.49	14.49	14.54	14.47	14.47	14.51
800	监视能量计	11.78	11.71	11.73	11.71	11.71	11.69
	参考能量计	11.84	11.87	11.87	11.78	11.87	11.82
700	监视能量计	9.04	8.93	8.97	8.99	9.08	9.02
	参考能量计	9.06	9.02	9.04	9.06	9.11	9.08
600	监视能量计	6.48	6.44	6.37	6.44	6.41	6.46
	参考能量计	6.5	6.5	6.44	6.48	6.48	6.5
500	监视能量计	4.03	4.03	3.99	4.01	3.99	4.03
	参考能量计	4.06	4.08	4.03	4.06	4.06	4.03
400	监视能量计	1.95	1.954	1.956	1.952	1.956	1.954
	参考能量计	1.97	1.995	1.981	1.992	1.986	1.981
300	监视能量计	0.354	0.363	0.37	0.363	0.363	0.354
	参考能量计	0.372	0.374	0.37	0.372	0.365	0.368

从表 1 中可以得出,若激光器的工作电流在 300 mA~400 mA 时,参考和监视能量计的相对示值误差小于 4%;工作电流在 400 mA~800 mA 范围内时,示值误差小于 1%;工作电流在 800 mA~900 mA 时,由于能量计非线性响应因素的影响,参考和监视能量计的示值相对误差达到了 11%,已经

严重影响后续标准能量值的选用。

为了保证激光标准源的可靠性和准确性,我们选择 300 mA~800 mA 为激光器的工作电流范围。

### 2.2 分束器工作特性分析

分束器的主要作用是协助监视能量计对激光器的脉冲输出能量进行检测,实时测量各中性滤

光片的透过率。由于激光器输出能量范围较大,为了确定分束比对输出能量值的影响程度,必须对分束器在不同激光能量下分束比的变化情况进行

测量分析<sup>[11]</sup>。

利用监视能量计和参考能量计在不同的激光输出能量下进行实验,实验数据如表2所示。

表2 分束器分束比随能量变化情况

Table 2 Situation of beam splitting ratio varied with energy

激光器工作电流/mA	参考能量计示值/nJ	监视能量计示值/nJ	分束比(参考/监视)
800	11.84	11.72	1.010 237
700	9.06	9.01	1.006 293
600	6.48	6.43	1.007 772
500	4.05	4.01	1.009 975
400	1.98	1.95	1.015 385
300	0.37	0.36	1.027 778

从表1中的测试数据可以看出,在0.37 nJ~11.84 nJ范围内,分束器分束比的相对变化量不超过1%。

### 2.3 中性滤光片性能分析

一般情况下,中性滤光片的光学密度(OD)值,在1 064 nm波长处可以从1到4进行选择,激光波长确定后,OD值变化很小。基于此优点,在飞焦级能量计校准系统中采用了2种类型的中性密度滤光片,作为激光能量衰减片,第1种为金属中性密度滤光片;第2种为吸收型中性密度滤光片。

中性滤光片在大能量和小能量激光作用状态下,OD值不为定值,为了实现飞焦级能量,需要在小能量下对OD值进行校准。目前国外最先进商用能量计的最低测量值在500 fJ左右,可以解决500 fJ以上中性滤光片透过率的测量问题。但若激光能量小于500 fJ时,为确定所使用中性滤光片的OD值,只能通过拟合的方法予以实现。

OD与透过率 $\tau$ 的关系为 $\tau = 10^{-OD}$ ,确定OD值,也就是求透过率的问题。透过率拟合过程在监视、参考能量计作用下,利用数值分析方法实现。我们对3组共15种滤光片进行了测量和分析计算,相关的配置如表3~表5所示。

表3 第1组吸收型中性滤光片配置

Table 3 Configuration of the first group absorbent neutral filters

序号	型号	标志
1#	FSR-OD300	OD300
2#	FSR-OD70	OD70
3#	FSR-OD60	OD060
4#	FSR-OD50	OD50
5#	FSR-OD80	OD80

表4 第2组吸收型中性滤光片配置

Table 4 Configuration of the second group absorbent neutral filters

序号	型号	标志
1#	FSR-OD30	OD30
2#	FSR-OD20	OD20
3#	FSR-OD10	OD10
4#	FSR-OD15	OD15
5#	FSR-OD05	OD05

表5 第3组金属中性滤光片配置

Table 5 Configuration of the third group absorbent neutral filters

序号	型号	标志
1#	FBR-ND20	ND20
2#	FBR-ND15	ND15
3#	FBR-ND02	ND02
4	FBR-ND05	ND05
5#	FBR-ND	ND30

从能量25.3 pJ开始,对第1组衰减片中的1#~5#滤光片透过率进行了测量,对测量数据进行最小二乘拟合,1#~5#滤光片在小能量范围内的透过率拟合结果分别如图2~图6所示。

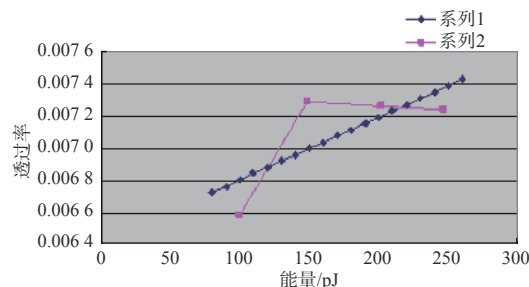


图2 1#滤光片透过率拟合情况

Fig. 2 Fitting of filter 1# transmittance

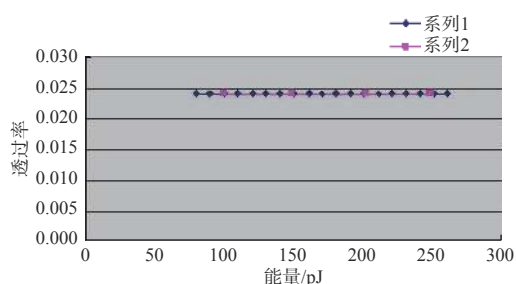


图 3 2#滤光片透过率拟合情况

Fig. 3 Fitting of filter 2# transmittance

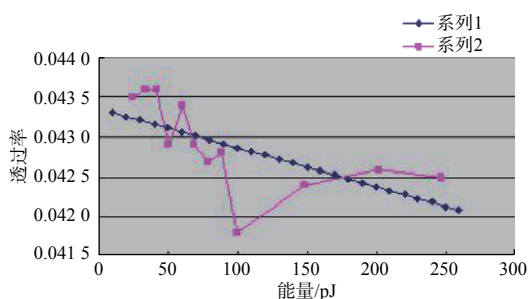


图 4 3#滤光片透过率拟合情况

Fig. 4 Fitting of filter 3# transmittance

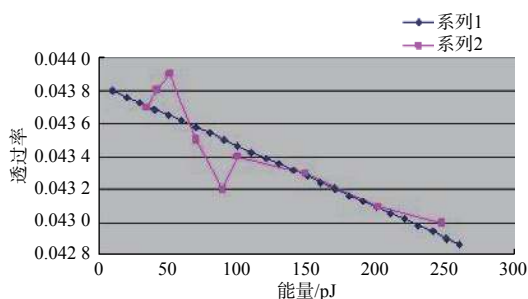


图 5 4#滤光片透过率拟合情况

Fig. 5 Fitting of filter 4# transmittance

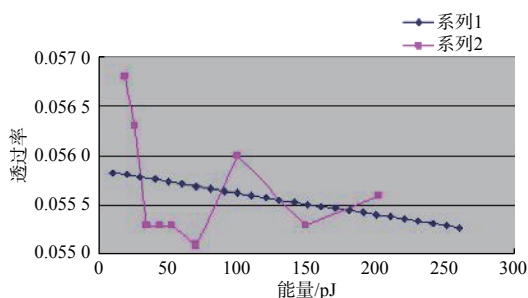


图 6 5#滤光片透过率拟合情况

Fig. 6 Fitting of filter 5# transmittance

1#滤光片透过率拟合方程为

$$\tau = 3.88186 \times 10^{-6} E + 0.006419 \quad (1)$$

式中:  $E$  为入射在滤光片上的能量。

2#滤光片透过率拟合方程为

$$\tau = 0.024 \quad (2)$$

3#滤光片透过率拟合方程为

$$\tau = -4.92058 \times 10^{-6} E + 0.043362 \quad (3)$$

4#滤光片透过率拟合方程为

$$\tau = -3.702 \times 10^{-6} E + 0.043838 \quad (4)$$

5#滤光片透过率拟合方程为

$$\tau = -2.216 \times 10^{-6} E + 0.055849 \quad (5)$$

按照同样的方法,将第2组、第3组滤光片的透过率在低能量状态下,进行最小二乘拟合,按照拟合结果,计算出实际微能量使用条件下的透过率。

数学意义上讲,经过拟合的中性滤光片,其透过率可在任意小的激光能量下使用。但在物理意义上讲,不同能级下,滤光片的透过率有许多不确定因素。目前我们使用的拟合法是一种折衷的方案,是在滤光片透过率线性较好的假设下进行的。

实现飞焦级的激光能量,需要采用多级中性滤光片和一级可变衰减器,中性滤光片只能在一个小能量范围内实现衰减,特别小的细分量值由可变衰减器完成<sup>[12]</sup>。

例如,激光器输出为 1 nJ 时,先用 OD=1 的中性滤光片,这时激光器相对稳定时的输出能量为 100 pJ 左右,100 pJ 激光能量经过反射式可变衰减器 222 倍衰减后可达到 450 fJ,其余激光能量量值的实现依此类推<sup>[13-14]</sup>。

## 2.4 反射式可变衰减器

反射式可变衰减器是校准系统中的一个核心器件。一级衰减用的中性滤光片只能在一个确定的范围内进行衰减,如果想得到精准的飞焦级激光能量值,衰减器的衰减系数必须非常精准。本系统中的可变衰减器由 4 级衰减片配对组成,在衰减的同时,不影响光束的传播方向。衰减系数随着转动角度而变,可以微小地改变整体的透过率,从而实现非常精确的输出激光能量<sup>[15-16]</sup>。

## 3 飞焦级激光能量测量不确定度分析

使用飞焦级激光能量校准系统对飞焦级激光微能量计进行校准,根据测量不确定度评定要求<sup>[17]</sup>,对能量计进行了 10 次测量,其不确定度分析详见表 6。

表 6 激光能量测量不确定度分析

Table 6 Uncertainty analysis of laser energy measurement

不确定度来源	不确定度/%	类别
光源能量不稳定引入的不确定度分量	0.6	B
光束入射位置定位不准确引入的不确定度分量	0.4	B
标准微能量计引入的不确定度分量	4	B
可变衰减片透射比引入的不确定度分量	1.5	B
中性滤光片透射比引入的不确定分量	1.5	B
大气衰减引入的测量不确定度分量	0.2	B
能量计探头响应度非均匀性引入的不确定分量	0.1	B
探测器响应度引入的不确定分量	0.5	B
探测系统非线性引入的不确定分量	0.3	B
光机组件定位不准引起的不确定度分量	0.2	B
数据采集系统引起的不确定度分量	0.3	B
能量重复测量引入的不确定度分量	3	A
相对合成标准不确定度	5.5	
相对扩展不确定度( $k=2$ )	11	

4 结论

飞焦级激光能量计校准系统实现了对响应波长 1 064 nm、脉冲宽度 5 ns~1  $\mu$ s 的激光微能量计在飞焦级能量范围内的校准,测量不确定度可以达到 11%( $k=2$ )。在微小能量使用状态下,目前研制的校准系统衰减机构所用中性衰减片的透过率是采用拟合方法得到的,实际使用中会存在一定的误差。为了实现更准确的测量,下一步我们将利用高精度辐射探测系统把测量不确定度提升到更高的量级。

参考文献:

[ 1 ] SUN Lijun. Measurement of pico-joule optical pulse energy[J]. [Semiconductor Optoelectronics](#), 2003, 24(4): 254-255.  
孙力军. 皮焦耳光脉冲能量测试[J]. [半导体光电](#), 2003, 24(4): 254-255.

[ 2 ] LIU Guorong, WU Hongcai. Research of calibration method for high energy laser energy meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6): 982-985.  
刘国荣, 吴洪才. 高能激光能量计校准方法研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(6): 982-985.

[ 3 ] HU Taiguang, WU Aiqing, LIU Qiuhua. The optical variable attenuators[J]. *Study on Communications*, 1993(1): 22-26.

胡台光, 吴爱清, 刘秋华. 光可变衰减器[J]. *光通信研究*, 1993(1): 22-26.

[ 4 ] LI Ying, JIANG Xiaoqing, LI Xihua, et al. Research development of variable optical attenuator[J]. [Study on Communications](#), 2004(4): 67-70.  
李鹰, 江晓清, 李锡华, 等. 光可变衰减器的研究进展[J]. *光通信研究*, 2004(4): 67-70.

[ 5 ] CHEN Juan, YANG Hongru, YU Bing, et al. Measurement method for femto-Joule level pulse laser energy[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 525-530.  
陈娟, 杨鸿儒, 俞兵, 等. 飞焦级脉冲激光能量测量方法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 525-530.

[ 6 ] RASMUSSEN A L, SANDERS A A. Transfer standards for energy and peak power of low-level 1.064 micrometer laser pulses and continuous wave laser power[J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(2): 277-285.

[ 7 ] LI Gaoping, LIU Guorong, LI Siwei, et al. High precision micro energy laser calibration technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 148-151.  
黎高平, 刘国荣, 李四维, 等. 高精度激光微能量校准技术研究[J]. *应用光学*, 2013, 34(1): 148-151.

[ 8 ] GAO Xuesong, GAO Chunqing, GAO Mingwei, et al. Investigation and evaluation of cuneiform prism and neutral glass slices used as laser attenuator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 189-192.  
高雪松, 高春清, 高明伟, 等. 高精度激光参数测量系统中衰减系统的研究与评价[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(2): 189-192.

[ 9 ] RODNEY W, LEONHARDT. Low-level pulsed 1064 nm laser radiometer transfer standard[J]. *Digital Library*, 2011, 28(58): 151-159.

[ 10 ] CAO Yuansheng. Study on stability of output power of CW Nd: YAG laser[J]. *China Measurement Technology*, 2003, 29(6): 3-5.  
曹远生. 连续Nd: YAG激光器输出功率稳定性研究[J]. *中国测试技术*, 2003, 29(6): 3-5.

[ 11 ] LIU Xiaojun, SONG Hao, WANG Yimin, et al. A novel laser beam splitter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 31-34.  
刘晓军, 宋浩, 王益民, 等. 一种激光平行分束器的设计[J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 31-34.

[ 12 ] MU Tingkui, LI Guohua, PENG Handong. Study of the attenuator for the high extinction ratio testing system[J]. [Laser Technology](#), 2007, 31(1): 71-73.  
穆廷魁, 李国华, 彭捍东. 高消光比测试系统衰减器的

- 研究[J]. *激光技术*, 2007, 31(1): 71-73.
- [ 13 ] LIU Yun'an, PENG Handong, LI Guohua. Continuous-adjustable light intensity attenuator of circularly polarized light[J]. *Physics Experimentation*, 2007, 27(2): 30-32.  
刘云安, 彭捍东, 李国华. 光强连续可调的圆偏振光衰减器[J]. *物理实验*, 2007, 27(2): 30-32.
- [ 14 ] BING Yukai, TONG Shoufeng, SONG Hongfei, et al. The laser energy attenuator of wide range, high precision and stepless[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(11): 48-51.  
邴昱凯, 佟首峰, 宋鸿飞, 等. 宽范围高精度无级激光能量衰减器的研究[J]. *光电工程*, 2010, 37(11): 48-51.
- [ 15 ] LYU Zheng, MA Chong, XU Dagang. A novel continuously adjustable laser attenuator[J]. *Modern Measurement and Test*, 1998, 6(2): 42-45.  
吕正, 马冲, 徐大刚. 一种新型的连续可调的激光衰减器[J]. *现代计量测试*, 1998, 6(2): 42-45.
- [ 16 ] XUE Zhanli, YU Bing, WU Pei, et al. Study on reflective adjustable laser attenuator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(3): 469-474.  
薛战理, 俞兵, 吴沛, 等. 反射式可调激光衰减器的研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(3): 469-474.
- [ 17 ] LIU Cuncheng, WU Yue, HAN Gang, et al. Tracing the source of microenergy pulsed laser light source and considering the development scheme[J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2010(10): 24-27.  
刘存成, 吴越, 韩刚, 等. 微能量脉冲激光光源量值溯源与研制方案的思考[J]. *国防技术基础*, 2010(10): 24-27.