

## 太瓦飞秒脉冲激光峰值功率测量装置及测量不确定度分析

朱光毅 金尚忠 吴磊 薛媛元 莫云龙 尤越 张云龙 俞兵 杨鸿儒 董再天 卢飞

### Peak power measurement device of terawatt femtosecond pulsed laser and measurement uncertainty analysis

ZHU Guangyi, JIN Shangzhong, WU Lei, XUE Yuanyuan, MO Yunlong, YOU Yue, ZHANG Yunlong, YU Bing, YANG Hongru, DONG Zaitian, LU Fei

引用本文:

朱光毅, 金尚忠, 吴磊, 等. 太瓦飞秒脉冲激光峰值功率测量装置及测量不确定度分析[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 398–404. DOI: 10.5768/JAO202445.0203001

ZHU Guangyi, JIN Shangzhong, WU Lei, et al. Peak power measurement device of terawatt femtosecond pulsed laser and measurement uncertainty analysis[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 398–404. DOI: 10.5768/JAO202445.0203001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 飞秒激光脉冲宽度和脉冲波形测试技术

Research on femto-second laser pulse width and pulse waveform measurement technology

应用光学. 2019, 40(2): 291–299 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0203003>

#### 单脉冲飞秒激光时域参数测量技术研究

Research on time domain parameters measurement of single pulse femtosecond laser

应用光学. 2020, 41(4): 690–696 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0407001>

#### 基于可调谐飞秒激光的光学特性测量装置

Optical properties measuring device based on tunable femtosecond laser

应用光学. 2020, 41(4): 717–722 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0407005>

#### 色散管理掺铥光纤激光器高能量脉冲的产生

Generation of high-energy pulses in dispersion-managed Tm-doped fiber laser

应用光学. 2019, 40(4): 551–556 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401004>

#### 弹载脉冲光源有效光强空间分布测量装置研究

Missile-borne measuring device of effective light intensity spatial distribution for pulsed light source

应用光学. 2020, 41(4): 754–760 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0410001>

#### 纳秒脉冲激光对金属丝电爆炸过程的瞬态测量方法研究

Transient measurement on electric explosion of metal wire by nanosecond pulsed laser

应用光学. 2019, 40(6): 1109–1114 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0398-07

# 太瓦飞秒脉冲激光峰值功率测量装置及 测量不确定度分析

朱光毅<sup>1</sup>, 金尚忠<sup>1</sup>, 吴磊<sup>2</sup>, 薛媛元<sup>2</sup>, 莫云龙<sup>2</sup>, 尤越<sup>2</sup>, 张云龙<sup>2</sup>, 俞兵<sup>2</sup>,  
杨鸿儒<sup>2</sup>, 董再天<sup>2</sup>, 卢飞<sup>2</sup>

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 超短超强脉冲激光(飞秒强激光)具有极高的峰值功率,在激光惯性约束聚变、高能物理、激光微加工等领域具有广阔的应用前景。飞秒脉冲激光峰值功率是评价超短超强脉冲激光系统性能的重要参数。介绍了基于光谱相位相干直接电场重构法的太瓦量级飞秒脉冲激光峰值功率测量方法、测量装置组成和工作原理,搭建了一套太瓦量级的飞秒脉冲激光峰值功率测量装置,分析和讨论了影响太瓦激光峰值功率测量结果的测量不确定度分量来源和主要因素。测量峰值功率的重复性为2.9%,测量不确定度达到17.6% ( $k=2$ ),有效解决了太瓦量级飞秒激光峰值功率测量问题。

**关键词:** 飞秒激光; 脉冲宽度; 脉冲波形; 峰值功率; 测量不确定度

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0203001

## Peak power measurement device of terawatt femtosecond pulsed laser and measurement uncertainty analysis

ZHU Guangyi<sup>1</sup>, JIN Shangzhong<sup>1</sup>, WU Lei<sup>2</sup>, XUE Yuanyuan<sup>2</sup>, MO Yunlong<sup>2</sup>, YOU Yue<sup>2</sup>,  
ZHANG Yunlong<sup>2</sup>, YU Bing<sup>2</sup>, YANG Hongru<sup>2</sup>, DONG Zaitian<sup>2</sup>, LU Fei<sup>2</sup>

(1. College of Optical and Electronic Science Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;  
2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Ultra-short and ultra-intense pulsed lasers (femtosecond lasers) possess extremely high peak power, and hold broad application prospects in laser inertial confinement fusion, high-energy physics, laser micro-processing and other fields. The peak power of femtosecond pulsed lasers is a crucial parameter for evaluating the performance of ultra-short and ultra-intense pulsed laser systems. A peak power measurement method of terawatt-level femtosecond pulsed laser based on the spectral phase coherent direct electric field reconstruction was introduced, along with the composition and working principles of the measurement device. A set of peak power measurement device of terawatt-level femtosecond pulsed laser was constructed, and the sources as well as main factors of measurement uncertainty influencing the measurement results of peak power were analyzed and discussed. The repeatability of the peak power measurement is 2.9%, and the measurement uncertainty reaches 17.6% ( $k=2$ ), which effectively addresses the issue of peak power measurement of terawatt-level femtosecond laser.

**Key words:** femtosecond laser; pulse width; pulse waveform; peak power; measurement uncertainty

## 引言

随着飞秒激光脉宽压缩技术的发展和输出功率的不断提高,飞秒激光脉冲宽度达到10 fs以下,

脉冲能量达到 mJ 至 J 量级,峰值功率达到太瓦( $10^{12}$  W)至拍瓦( $10^{15}$  W)量级。因此,超短超强脉冲激光(飞秒强激光)是目前实验室内创造超高

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-08-16

基金项目: 科工局技术基础科研项目 (JSJL2019208C002)

作者简介: 朱光毅 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光参数计量测试技术研究。E-mail: 317350325@qq.com

温、超高压、超高密度, 逼近聚变极端条件的唯一途径, 已成为开展惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)、高能量密度物理(high energy density physics, HEDP)、等离子、粒子加速、太赫兹以及获得阿秒脉冲等研究的主要手段, 准确测量飞秒脉冲激光峰值功率具有重要的应用价值<sup>[1-5]</sup>。

脉冲激光峰值功率主要是通过测量激光脉冲能量和激光脉冲波形(脉冲宽度)间接获得。对于飞秒激光脉冲, 最常见的激光脉宽测量方法是自相关法, 但该方法不能获取激光脉冲波形, 对复杂波形激光, 脉冲宽度和自相关曲线半高宽的转换因子只能根据经验知识近似估计。频率分辨光学快门法(frequency-resolved optical gating, FROG)<sup>[6]</sup>、自参考光谱相位相干电场重建法(self-referencing spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction, SPIDER)<sup>[7]</sup>以及色散扫描法(dispersive scanning method, D-Scan)<sup>[8]</sup>等方法具备飞秒脉冲波形和相位等测量能力; 色散扫描法在有二阶色散或者三阶色散时, 才能达到较高的测量精度; 频率分辨光学快门法光路简单, 但重构算法复杂; 光谱相位相干电场重建法灵敏度低、光路复杂, 但重构算法简单, 测量精度高<sup>[9-15]</sup>。

飞秒激光在激光微加工处理等领域的应用均提出对峰值功率等参数的测量需求。本文介绍了基于光谱相位相干直接电场重构法的太瓦飞秒脉冲激光峰值功率方法及测量装置, 分析和讨论了影响太瓦激光峰值功率测量结果的测量不确定度分量来源和主要因素。

## 1 飞秒脉冲激光峰值功率测量原理

飞秒激光脉冲能量与时域光强分布函数的关系为

$$E_{\text{pulse}} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\text{pk}} \cdot I(t) dt \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{pulse}}$ 为飞秒激光脉冲能量;  $I(t)$ 为归一化脉冲波形函数;  $P_{\text{pk}}$ 为脉冲峰值功率。通过测量飞秒激光脉冲能量、脉冲宽度等参数, 可得到飞秒激光峰值功率测量值。

飞秒激光脉冲峰值功率与脉冲能量、脉冲宽度的关系为

$$P_{\text{pk}} = a \cdot \frac{E_{\text{pulse}}}{\tau_{\text{pulse}}} \quad (2)$$

式中 $a$ 为常数, 由脉冲波形形状决定。

飞秒激光脉冲主要有高斯、洛伦兹、双曲正割等波形。对高斯函数分布的飞秒脉冲波形, 将归

一化脉冲波形函数 $I(t) = e^{-4\ln 2 \frac{t^2}{\tau^2}}$ 代入式(1)可得:

$$P_{\text{pk}} = a \cdot \frac{E_{\text{pulse}}}{\tau_{\text{pulse}}} = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{E_{\text{pulse}}}{\tau_{\text{pulse}}} \quad (3)$$

式中系数 $a$ 与脉宽 $\tau$ 的关系为 $a = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}}$ 。对具有复杂脉冲波形的飞秒激光, 需对脉冲波形进行测量, 以确定系数 $a$ 的值。

## 2 太瓦飞秒激光峰值功率测量装置

太瓦飞秒激光峰值功率测量装置主要由钛宝石飞秒激光源、脉宽压缩及展宽单元、脉冲波形测量单元、激光能量测量单元、计算机处理单元等构成, 其系统组成如图1所示。飞秒激光器出射的激光首先经过分束镜后分成两束光, 一束光进入激光能量测量单元进行脉冲能量测量, 另一束光进入到脉冲波形测量装置获得待测脉冲波形分布函数, 同步触发单元用于脉冲能量测量单元、脉冲波形测量单元与待测飞秒激光同步控制<sup>[16-20]</sup>。

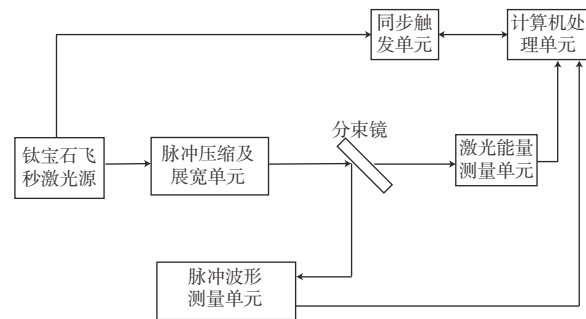


图1 太瓦飞秒脉冲激光峰值功率测量系统组成图

Fig. 1 Composition diagram of peak power measurement system of terawatt-level femtosecond pulsed laser

### 1) 钛宝石飞秒激光源

钛宝石飞秒激光源由连续绿光泵浦源、钛宝石飞秒振荡器、脉冲绿光泵浦源、钛宝石飞秒激光再生放大器组成, 如图2所示。采用钛宝石啁啾脉冲再生放大技术实现脉冲能量1 mJ、脉冲宽度40 fs、重复频率1 kHz的飞秒激光放大输出, 通过空心光纤压缩技术实现10 fs激光脉冲输出。

钛宝石飞秒种子源采用克尔透镜锁模方案。钛宝石晶体的能级相当于一个四能级系统, 吸收谱带较宽, 因此对泵浦源的波长要求不高。在其吸收波段范围内, 波长为532 nm的激光器最容易做到高功率、高光束质量、低成本。要能够形成稳定的飞秒激光种子源输出, 对钛宝石飞秒振荡器谐振腔的腔型, 以及激光器腔的各项参数均有

严格的要求,而且需要对激光器腔中存在的各种效应进行有效抑制和消除。钛宝石飞秒振荡器共焦腔长度 120 mm, 聚焦镜焦距 150 mm, 折叠角 15 度, 共焦腔一端直接两次反射后经过输出镜(透过率 35%), 另外一臂通过一对石英棱镜补偿钛宝石激光色散, 光路图如图 3 所示, 其中镜片全部采用低色散镜片, 扩束镜倍数为 1 : 3, 钛宝石为掺杂浓度 0.5% 的布氏角切割的晶体<sup>[21-23]</sup>。

钛宝石再生放大系统采用重复率 1 kHz, 脉冲能量 20 mJ 的绿光(波长 527 nm)纳秒脉冲, 作为泵浦去激励放大器内的钛蓝宝石晶体为种子光的放大提供增益。钛宝石再生放大系统工作原理图投如图 4 所示。

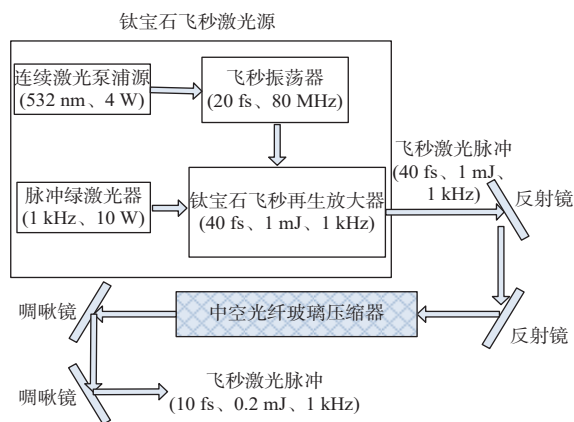


图2 钛宝石飞秒激光源系统组成图

**Fig. 2 Composition diagram of Ti:Sapphire femtosecond laser source system**

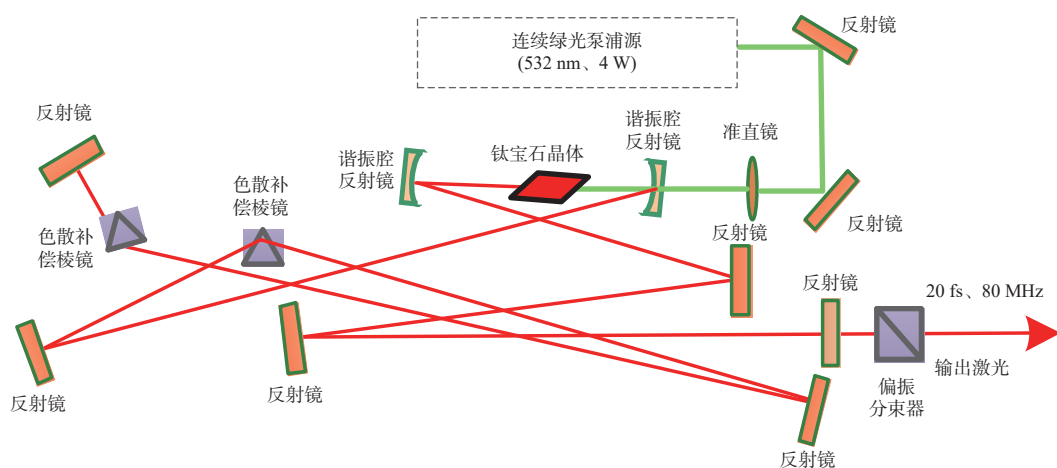


图3 钛宝石飞秒种子源工作原理图

**Fig. 3 Working schematic diagram of Ti:Sapphire femtosecond seed source**

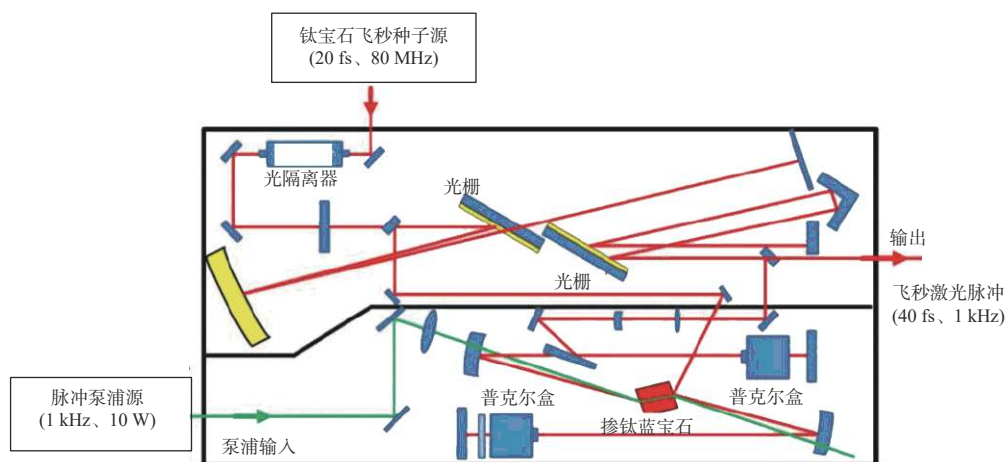


图 4 飞秒再生放大系统工作原理图

**Fig. 4 Working schematic diagram of femtosecond regeneration amplification system**

从振荡器过来的种子光首先经过展宽器,脉宽从 100 fs 被拉伸到 ns 量级,之后注入到再生放大腔。再生放大腔的光路是 Z 字型结构,通过光的

偏振态控制, 左下方端镜旁的普克尔盒负责从每秒钟 80 兆个到来的种子脉冲中均匀地挑选出 1000 个(与泵浦光同步), 注入到腔内进行再生放大, 普



克尔盒负责将放大后的脉冲倒出腔外。最后,放大脉冲经扩束系统后进入压缩器将脉宽重新压窄,最终得到中心波长 800 nm、脉宽优于 40 fs、重频 1 kHz、最大能量 1 mJ 的激光脉冲输出。

2) 飞秒脉冲压缩及展宽单元

钛宝石飞秒激光源输出的激光脉冲,经中空光纤压缩器压缩和啁啾镜补偿后压缩至 10 fs。中空光纤玻璃压缩器主要指标为激光波长 800 nm,脉冲压缩率 1 : 7。采用光栅色散方法进行激光光谱压缩及脉宽展宽,将激光脉宽从 40 fs 展宽至 100 fs,进而实现 10 fs~100 fs 脉宽范围的飞秒激光峰值功率测量。

3) 飞秒脉冲波形测量单元

飞秒脉冲波形测量单元采用光谱相位相干直

接电场重构法。该方法基于光谱剪切相干原理,通过光谱剪切相干获取飞秒激光频率信息和相位信息,进行脉冲波形重构后得到脉冲宽度,工作原理如图 5 所示。待测飞秒脉冲激光通过分束镜分为两束激光,其中一束光通过色散器展宽为啁啾脉冲,另一束光通过迈克尔逊干涉仪分成 2 个具有一定时间延时的脉冲对,然后再聚焦到非线性晶体上进行频率上转换。2 束激光脉冲之间产生了一定的时间延迟,非线性和频后它们的中心频率就会产生微小的变化量,这个频率差就是光谱剪切量。通过光谱仪记录 and 频脉冲对的光谱相干条纹,最后利用反演算法即可得到被测飞秒激光脉冲的时域脉冲波形和相位。

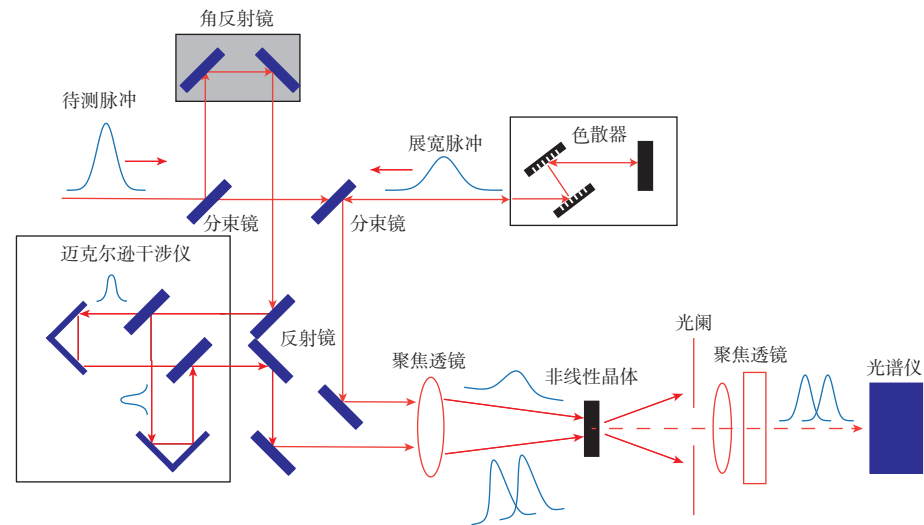


图 5 光谱相位相干直接电场重构法装置原理图

Fig. 5 Schematic diagram of spectral phase coherent direct electric field reconstruction device

4) 激光能量测量单元

激光能量测量单元采用口径为 50 mm×50 mm 的自研热释电能量计。热释电能量计探头方案如图 6 所示,主要包括入射口、衰减片、热释电传感器、数据输入、输出接口等。热释电传感器镀有高损伤阈值的金属氧化膜层,激光能量测试范围为 0.2 mJ~13 J(不含衰减片)、1 mJ~44 J(含衰减片)。

5) 计算机处理单元

计算机处理单元用于控制、协调同步触发单元、激光脉冲波形测量单元等工作,采集和处理 SPIDER 脉冲波形测量单元的干涉信号并进行脉冲波形重构,获得脉冲宽度等参数,完成激光峰值功率测量。

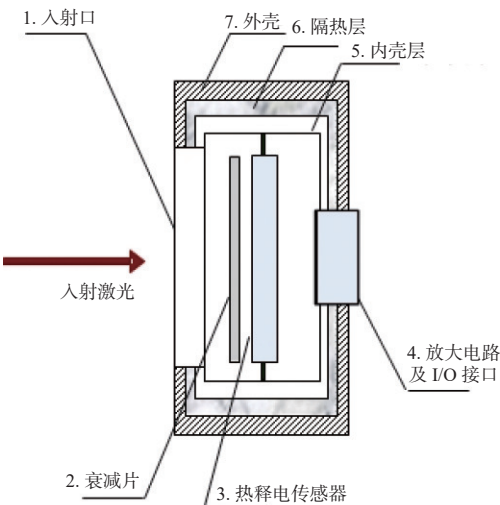


图 6 热释电能量计组成图

Fig. 6 Composition diagram of pyroelectric energy meter

3 太瓦飞秒激光峰值功率测量不确定度分析

影响太瓦飞秒激光峰值功率测量结果的不确定度分量, 来源主要有激光脉冲能量测量、脉冲宽度测量和测量重复性引起的不确定度分量。

1) 飞秒激光脉冲能量测量不确定度

飞秒激光脉冲能量测量结果不确定度来源主要有: a) 激光能量计线性度引入的测量不确定度分量  $u_1$ ; b) 激光能量计(含衰减片)面均匀性引入的测量不确定度分量  $u_2$ ; c) 激光能量计标校引入的测量不确定度分量  $u_3$ ; d) 激光能量测量重复性引入的测量不确定度分量  $u_4$ 。

根据试验结果,  $\mu\text{J}$  至于  $\text{mJ}$  量级热释电激光能量计线性度最大偏差为 1%, 假设为均匀分布,  $u_1 = 1\% / \sqrt{3} = 0.58\%$ ; 激光能量计(含衰减片)面均匀性最大偏差为 3%, 假设为均匀分布,  $u_2 = 3\% / \sqrt{3} = 1.74\%$ 。采用测量不确定度为 2%( $k=2$ )的标准能量计通过分束比法对飞秒激光能量测量单元进行标校, 测量不确定度为 4%( $k=2$ ),  $u_3 = 4\% / 2 = 2\%$ 。脉冲能量测量不确定度如表 1 所示。考虑到激光脉冲能量稳定性等影响, 脉冲能量重复测量 6 次的标准偏差小于 2%,  $u_4 = 2\% / \sqrt{6} = 0.82\%$ 。

表 1 飞秒激光脉冲能量测量不确定度

Table 1 Uncertainty of femtosecond laser pulse energy measurement

测量不确定度分量	测量不确定度值/%	评定方法
能量计线性度 $u_1$	0.58	B类
能量计(含衰减片)面均匀性 $u_2$	1.74	B类
能量计标校 $u_3$	2.00	B类
测量重复性 $u_4$	0.82	A类
相对合成不确定度	2.9	/
相对扩展不确定度( $k=2$ )	5.7	/

2) 飞秒激光脉宽测量测量不确定度

飞秒激光脉冲宽度测量结果不确定度来源主要有: a) 脉冲波形测量时间分辨率引入的不确定度分量  $u_1$ ; b) 分束镜等光学元件脉宽展宽引入的测量不确定度分量  $u_2$ ; c) 脉宽标定引入的测量不确定度分量  $u_3$ ; d) 脉冲宽度测量重复性引入的测量不确定度分量  $u_4$ 。

采用不同曲线拟合算法对脉冲波形曲线进行拟合, 脉冲波形时间分辨率最大偏差为 1%, 假设为均匀分布,  $u_1 = 1\% / \sqrt{3} = 0.58\%$ ; 分束镜等引起

的脉冲展宽小于 0.1 fs, 对 10 fs 脉宽测量, 最大偏差为 1%, 假设为均匀分布,  $u_2 = 1\% / \sqrt{3} = 0.58\%$ 。采用测量不确定度为 12%( $k=2$ )的标准自相关仪对飞秒激光脉宽测量结果进行标校, 测量不确定度为 15%( $k=2$ ),  $u_3 = 15\% / 2 = 7.5\%$ 。10 fs 激光脉冲重复测量 6 次的标准偏差小于 5%,  $u_4 = 5\% / \sqrt{6} = 2.05\%$ 。脉冲宽度测量不确定度如表 2 所示。

表 2 飞秒激光脉冲宽度测量不确定度

Table 2 Uncertainty of femtosecond laser pulse width measurement

不确定度分量	测量不确定度/%	评定方法
脉冲波形测量时间分辨率 $u_1$	0.58	B类
分束镜等光学元件脉宽展宽引入的不确定度 $u_2$	0.58	B类
脉宽标定引入的测量不确定度 $u_3$	7.50	B类
测量重复性引入的不确定度分量 $u_4$	2.05	A类
相对合成不确定度	7.9	/
相对扩展不确定度( $k=2$ )	15.7	/

飞秒激光脉冲能量、脉冲宽度和峰值功率测量重复性如表 3 所示。

表 3 10 fs 飞秒激光脉冲能量、脉冲宽度和峰值功率测量结果

Table 3 Measurement results of 10 fs femtosecond laser pulse energy, pulse width, and peak power

测量次数	脉冲能量/mJ	脉冲宽度/fs	峰值功率/TW
1	0.220	10.1	0.0205
2	0.215	9.9	0.0204
3	0.217	10.4	0.0196
4	0.219	9.6	0.0214
5	0.212	9.8	0.0203
6	0.232	10.6	0.0206
平均值	0.219	10.1	0.0272
测量重复性	3.2%	3.8%	2.9%

飞秒激光峰值功率测量不确定度如表 4 所示。

表 4 飞秒激光峰值功率测量不确定度

Table 4 Uncertainty of femtosecond laser peak power measurement

不确定度分量	测量不确定度/%	评定方法
脉冲能量测量引入的不确定度 $u_1$	2.9	B类
脉冲宽度测量引入的不确定度 $u_2$	7.9	B类
测量重复性的测量不确定度 $u_3$	2.9	A类
相对合成不确定度	8.8	/
相对扩展不确定度( $k=2$ )	17.6	/

根据上述分析,影响飞秒激光峰值功率测量的主要因素是激光脉宽测量引入的分量,其次是由于激光脉冲能量、脉冲宽度不稳定等引入的测量不确定度分量。

## 4 结论

飞秒激光峰值功率的测量是飞秒激光器及其应用的关键技术指标之一,为准确测量其峰值功率,设计和搭建了一套太瓦飞秒激光峰值功率测量装置,激光脉宽测量范围为 10 fs~100 fs,对中心波长 800 nm、脉冲宽度 10 fs 的飞秒激光峰值功率进行了测量,峰值功率测量不确定度达到了 17.6%( $k=2$ ),可满足太瓦量级飞秒激光的峰值功率测量需求。

### 参考文献:

- [1] MAINE P, SKRICKLAND D, BADO P, et al. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification[J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 1988, 24: 398-403.
- [2] PERRY M D, PENNINGTON D, STUART B C, et al. Petawatt laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(3): 160-162.
- [3] WANG Z, LIU C, SHEN Z, et al. High-contrast 1.16 PW Ti: sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2011, 36: 3194-3196.
- [4] YU T J, LEE S K, SUNG J H, et al. Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti: sapphire laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20: 10807-10815.
- [5] CHU Y, GAN Z, LIANG X, et al. High-energy large-aperture Ti: sapphire amplifier for 5 PW laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2015, 40: 5011-5014.
- [6] KANE D J, TREBINO R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating[J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 1993, 29: 571-579.
- [7] LACONIS C, WALMSLEY I A. Spectral phase inteferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Optics Letters*, 1998, 23: 792-794.
- [8] 黄绿红紫. 基于色散扫描法的超短激光脉冲特性测量技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] HUANG Lyuhongzi. Research on ultrashort laser pulse characteristic measurement technology based on dispersion scanning method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [10] GAN Z, YU L, LI S, et al. 200 J high efficiency Ti: sapphire chirped pulse amplifier pumped by temporal dual-pulse[J]. *Optics Express*, 2017, 25: 5169-5178.
- [11] LI M L, WANG Z H, TANG H, et al. Prospects for femtosecond ultrahigh intensity laser system towards Exawatt level[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(2): 024201.
- [12] WANG Z H, FANG S B, TENG H, et al. Femtosecond laser user facility for application research on ultrafast science[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(7): 074204.
- [13] GAO Y, Su Y, Xu S, et al. Generation of annular femtosecond few-cycle pulses by self-compression and spatial filtering in solid thin plates[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 29789-29801.
- [14] 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 271-275.
- [15] ZHANG Zhigang. Femtosecond laser technology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 271-275.
- [16] 邓玉强, 孙青, 吕亮, 等. 飞秒脉冲光谱测量对时域波形重建的影响[J]. *计量学报*, 2017, 38(5): 563-566.
- [17] DENG Yuqiang, SUN Qing, LYU Liang, et al. Effect of femtosecond pulse spectral measurement on waveform reconstruction in time domain[J]. *Journal of Metrology*, 2017, 38(5): 563-566.
- [18] 吴磊, 阴万宏, 俞兵, 等. 飞秒激光脉冲宽度和脉冲波形测试技术[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 291-299.
- [19] WU Lei, YIN Wanhong, YU Bing, et al. Femtosecond laser pulse width and pulse waveform testing technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 291-299.
- [20] 吴磊, 张彪, 俞兵, 等. 单脉冲飞秒激光时域参数测量技术研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(4): 690-696.
- [21] WU Lei, ZHANG Biao, YU Bing, et al. Research on time domain parameter measurement technology of single-pulse femtosecond laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 690-696.
- [22] 丁建一, 李凤娇. 超短激光脉冲宽度的测量方法的研究与实践[J]. *计量与测试技术*, 2023, 50(3): 82-84.
- [23] DING Jianyi, LI Fengjiao. Research and practice of measurement method of ultrashort laser pulse width[J]. *Metrology and Testing Technology*, 2023, 50(3): 82-84.

- [18] 邓玉强, 吴祖斌, 陈盛华, 等. 自参考光谱相干法的小波变换相位重建[J]. *物理学报*, 2005(8): 3716-3721.  
DENG Yuqiang, WU Zubin, CHEN Shenghua, et al. Wavelet transform phase reconstruction by self-reference spectral coherent method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005(8): 3716-3721.
- [19] 文汝红, 刘天夫. 用光谱位相相干电场重构法还原飞秒脉冲相位[J]. *应用激光*, 2006(4): 243-246.  
WEN Ruhong, LIU Tianfu. Reduction of femtosecond pulse phase by spectral potential phase coherent electric field reconstruction method[J]. *Applied Lasers*, 2006(4): 243-246.
- [20] 邓玉强. 超短脉冲激光时域参数计量标准装置[J]. *计量技术*, 2022, 42(5): 97-102.  
DENG Yuqiang. Ultrashort pulse laser time domain parameter measurement standard device[J]. *Measurement Technology*, 2022, 42(5): 97-102.
- [21] 吴祖斌, 王颖, 曹士英, 等. 用改进的光谱相位相干直接电场重构法装置测量飞秒激光脉冲的相位[J]. *中国激光*, 2006(1): 21-25.  
WU Zubin, WANG Ying, CAO Shiyong, et al. Measurement of phase of femtosecond laser pulse by improved spectral phase coherent direct electric field reconstruction device[J]. *China Lasers*, 2006(1): 21-25.
- [22] 张素侠, 李方家, 刘军. 自参考光谱干涉法测量飞秒脉冲的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 010001.  
ZHANG Suxia, LI Fangjia, LIU Jun. Research progress of self-referenced spectral interferometry on the characterization of femtosecond pulses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010001.
- [23] 徐松涛, 武文远, 储浩玉等. 脉冲光峰值功率计的原理[J]. *光电子技术与信息*, 1995(6): 21-26.  
XU Songtao, WU Wenyuan, CHU Haoyu, et al. The principle of pulse light peak power meter [J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 1995(6): 21-26.