

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.10

超短脉冲激光时域参数计量标准装置

邓玉强

(中国计量科学研究院 光学所, 北京 100029)

摘要: 长期以来, 由于缺乏超短脉冲激光时域参数计量标准装置, 导致超短脉冲激光器和超短脉冲激光测量仪器无法溯源。针对此问题, 研制了超短脉冲激光光谱相位干涉测量仪, 利用小波变换技术实现了飞秒脉冲激光光谱相位的自动准确提取, 精确还原了超短脉冲光谱相位, 重建了脉冲时域波形, 测量范围覆盖 10~500 fs, 测量不确定度 $U_{rel}=8%$ ($k=2$); 研制了大量程自相关测量装置, 实现了 10 fs~50 ps 量程超短脉冲宽度的准确测量和量值溯源, 解决了超短脉冲时域参数测量仪器的溯源问题, 测量不确定度 $U_{rel}=10%$ ($k=2$); 建立了“超短光脉冲自相关仪校准装置”国家计量标准, 测量范围覆盖 10 fs~12 ps, 测量不确定度 $U_{rel}=10%$ ($k=2$), 为超短脉冲测量仪器提供了精确校准手段, 对于保障超短脉冲时域参数测量结果精准统一具有重要意义。

关键词: 超快光学计量; 计量标准; 相位还原; 自相关法

中图分类号: TB96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)05-0097-06

Measurement standard for temporal parameters of ultrashort pulse laser

DENG Yuqiang

(Optics Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Temporal parameters of ultrashort pulse laser and ultrashort pulse laser measuring instrument cannot be traced to the International System of Units for a long time due to the lack of measurement standards. This paper introduces the measurement standard for time-domain parameters of ultrashort pulse laser at the National Institute of Metrology (NIM), China. An instrument based on Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction (SPIDER) was constructed. The spectral phase of femtosecond pulse laser was automatically and accurately extracted with wavelet-transform technology, and the time-domain waveform of the ultrashort pulses was precisely reconstructed with the inverse Fourier-transform technique. The expanded uncertainty is $U_{rel}=8%$ ($k=2$) in a measurement range of 10~500 fs. A large range autocorrelator was developed. The accurate measurement and traceability of ultrashort pulse width in the range of 10 fs~50 ps are realized, and the expanded uncertainty is $U_{rel}=10%$ ($k=2$). The national measurement standard "Calibration setup for ultrashort optical pulse autocorrelators" was established, and the expanded uncertainty is $U_{rel}=10%$ ($k=2$) in a measurement range of 10 fs~12 ps. The measurement standard provides an accurate traceable standard for ultrashort pulse measurement instruments, and plays an important role in ensuring the accuracy and consistency for the measurement results of ultrashort pulse temporal parameters.

Key words: ultrafast optical metrology; measurement standard; phase retrieval; autocorrelation

0 引言

超短脉冲激光具有极短的持续时间、极高的

峰值功率和极宽的光谱宽度, 在超快信号产生和探测、超精细微纳加工、非线性光学、超精细激光光谱学、激光约束核聚变等众多领域具有独特

收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2022-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(11874333); 河北省重点研发计划项目(22342001D)

引用格式: 邓玉强. 超短脉冲激光时域参数计量标准装置 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 97-102.

Citation: DENG Y Q. Measurement standard for temporal parameters of ultrashort pulse laser [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 97-102.



且不可替代的应用价值^[1]。超短脉冲激光作为一种有力工具,在计量测试领域也引发了重要变革。经过重复频率锁定和载波-包络相位锁定的飞秒脉冲序列提供了一系列高精度的时间频率标准,可用于时间频率计量和激光波长测量^[2];飞秒光学频率梳在绝对长度计量和位移测量领域发挥了重要应用^[3];以飞秒激光作为泵浦源和探测源是实现太赫兹产生和探测的重要途径^[4],超短脉冲激光在太赫兹时域光谱计量方面发挥了关键作用^[5-6];飞秒光学频率梳经频率下转换产生太赫兹频率梳,可作为太赫兹频率精准测量的工具^[7];利用飞秒脉冲激光激发超快光电探测器或超快光电导天线产生超快电脉冲,是实现超快电脉冲时间特性计量和探测器频率响应及高速示波器计量的重要手段^[8]。

超短脉冲时域波形和脉冲宽度是超快光学计量的重要参数。超短脉冲激光时域测量引起了科研人员的重视和关注,新的测量技术不断涌现。国际上先后产生了自相关法^[9]、光学频率开关法(FROG)^[10]和光谱相位相干直接电场重建法(SPIDER)^[11]等超短脉冲时域参数测量方法。自相关法因结构简单、使用方便,被广泛应用。但自相关法只能得出脉冲宽度信息,难以获得脉冲时域波形信息。光学频率开关法可以获得脉冲时域和频域的全部信息,但需要使用迭代算法对测量结果解析,存在迭代结果不收敛的风险。光谱相位相干直接电场重建法具有较复杂的光路结构,但能较准确地获得脉冲光谱相位信息,从而重建脉冲时域波形。

为解决短脉冲激光时域参数计量溯源问题,开展了超短脉冲计量标准装置研究,研制了光谱相位干涉测量仪,利用光谱相位相干直接电场重建法测量超短脉冲波形和脉宽。光谱测量结果溯源到光谱辐射照度国家基准,利用小波变换技术消除了传统傅里叶变换技术滤波窗口引入的测量不确定性,实现了光谱相位的精准测量和脉冲时域波形的准确重建。研制了超短脉冲自相关仪,测量结果溯源到光谱相位干涉测量仪,实现了自相关仪的量值溯源。

1 光谱相位干涉测量仪研制与相位还原

光谱相位相干直接电场重建法将入射的飞秒脉冲复制为两个具有微小时间延迟和微小频率间隔的复制脉冲,这两个脉冲在光谱仪中干涉,脉

冲的相位可以从干涉条纹中摄取^[11]。根据光谱相位相干直接电场重建法原理,研制了飞秒脉冲光谱相位干涉测量仪,其光路图如图1所示^[12]。

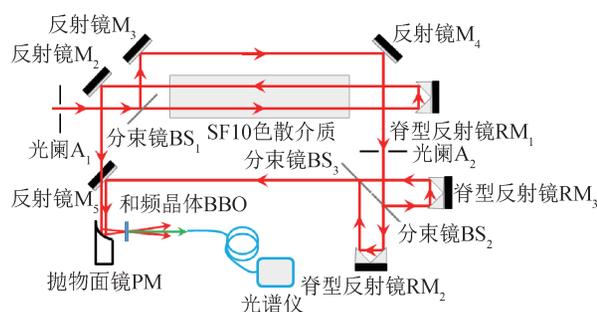


图1 光谱相位干涉测量仪光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction

飞秒激光经光阑 A_1 入射到光谱相位干涉测量仪,经分束镜 BS_1 分为两束。透过分束镜 BS_1 的激光入射到100 mm长的SF10色散介质中,透过SF10色散介质后经脊型反射镜 RM_1 反射,再次经过SF10色散介质,展宽为皮秒脉冲,经反射镜 M_2 反射后入射到抛物面镜 PM 上。经分束镜 BS_1 反射的飞秒脉冲经反射镜 M_3 和 M_4 反射后,入射到改进的迈克尔逊干涉仪上。改进的迈克尔逊干涉仪由分束镜 BS_2 和 BS_3 以及脊型反射镜 RM_2 和 RM_3 组成。飞秒激光经过改进的迈克尔逊干涉仪后,被复制成具有微小时间延迟的两个脉冲,经反射镜 M_5 反射后入射到抛物面镜 PM 上。入射到抛物面镜 PM 上的皮秒展宽脉冲和具有微小时间延迟的两个飞秒脉冲串方向相互平行,在垂直方向具有微小的位移,经离轴抛物面镜 PM 聚焦后入射到和频晶体 BBO 上。两束激光在 BBO 晶体中发生自倍频、和频、干涉。具有微小时间延迟的两个飞秒脉冲分别与皮秒啁啾脉冲不同频率成分的光谱发生和频,形成频率上转换的两个和频光,这两个和频光在频域干涉,即为测量的脉冲光谱剪切干涉信号。两个和频信号在频域中的间隔为光谱剪切量^[11-13]。两束飞秒脉冲在非线性光学晶体 BBO 中分别产生自倍频,两个自倍频光在频域发生干涉,可作为参考光谱干涉信号消除还原光谱相位的一阶项。

光谱相位干涉测量仪实物如图2所示,其光谱测量范围为650~1150 nm,脉冲宽度测量范围为10~500 fs,脉宽测量分辨力为0.2 fs,测量扩展不确定度为 $U_{rel} = 8\%$ ($k = 2$)。

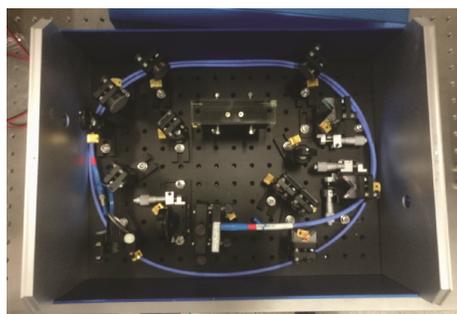


图2 光谱相位干涉测量仪

Fig.2 Setup of spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction

利用光谱相位干涉测量仪测量得到的脉冲光谱相位剪切干涉如图3所示。传统的光谱相位还原采用傅里叶变换滤波技术，不同宽度的滤波窗口包含的噪声成分不同，产生了相位还原的不确定性^[13]。利用小波变换还原相位，在小波变换强度图的极大值处选取相位信息，获得了确定的脉冲频域相位，消除了滤波窗口宽度的影响，故重建的脉冲时域波形是确定的^[14]。

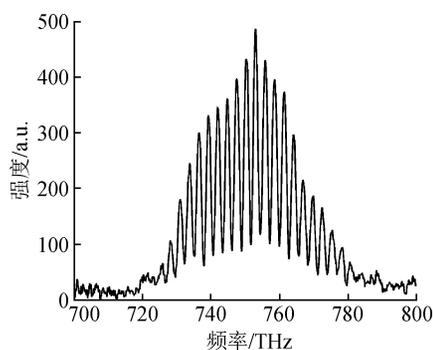


图3 脉冲光谱剪切干涉测量结果

Fig.3 Measured spectral shearing interferogram

对脉冲光谱剪切干涉作小波变换的结果如图4所示，从小波变换的强度图处选取每一频率处的极大值，然后在相位图中相应位置读取相位，即可获得脉冲光谱剪切相位^[13-14]。

利用同样的方法，对参考光谱剪切干涉作小波变换，提取参考光谱剪切相位；接着将脉冲光谱剪切干涉相位与参考光谱剪切干涉相位相减，获取光谱剪切干涉相位差；然后用积分方法对光谱剪切相位差积分还原，再除以光谱剪切量；最后将包裹的相位展宽，即可获得被测飞秒脉冲激光的光谱相位，如图5(a)所示。

飞秒脉冲的光谱通过光谱仪测量，光谱仪可

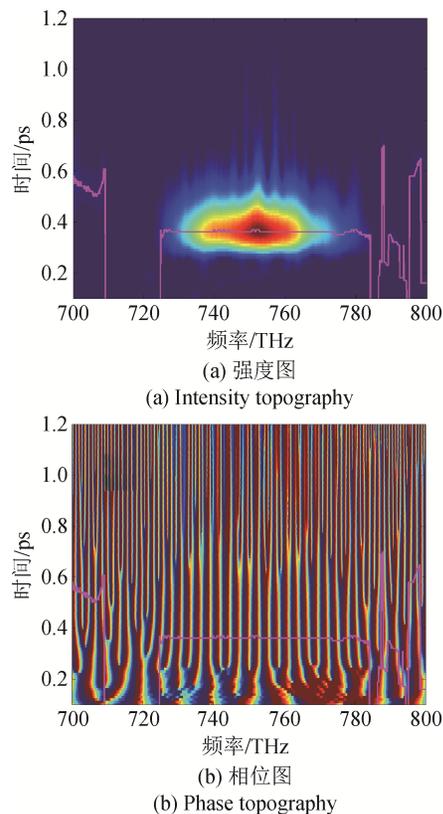
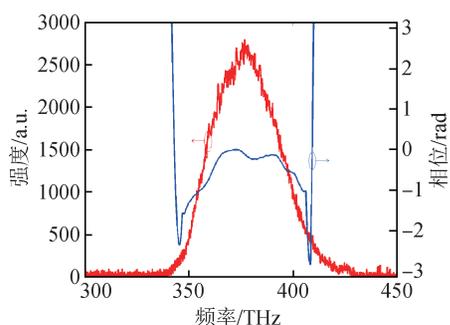


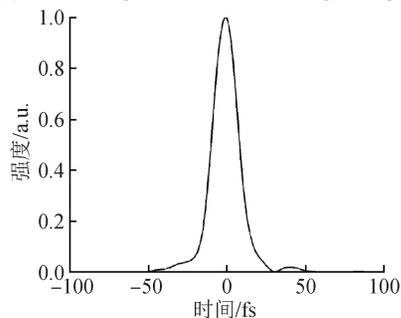
图4 光谱剪切干涉的小波变换结果

Fig.4 Wavelet-transform of spectral shearing interferogram



(a) 光谱和还原的相位

(a) Measured spectrum and retrieved spectral phase



(b) 重建的脉冲波形

(b) Reconstructed pulse waveform

图5 测量的飞秒脉冲光谱相位和重建的脉冲波形

Fig.5 Retrieved femtosecond pulse spectral phase and reconstructed pulse waveform

溯源到光谱辐射照度国家基准。根据飞秒脉冲光谱和光谱相位,利用傅里叶反变换算法,可重建得出飞秒脉冲时域波形,结果如图5(b)所示。从飞秒脉冲波形中,可获得脉冲时域宽度信息,脉冲时域半高度处全宽度(FWHM)为18.2 fs。

2 自相关仪研制与超短脉冲激光测量

自相关法的测量原理为:将飞秒脉冲激光分为两束,对其中一束激光施加可变延迟,使两束激光相互扫描,通过和频晶体获得飞秒脉冲激光的自相关信号。从自相关信号中可获取脉冲的自相关宽度。通过假设脉冲波形,可获得脉冲时域宽度。尽管假设脉冲波形会对测量结果的准确度产生一定影响,但因为自相关法简单方便,仍被广泛使用,成为目前最常用的超短脉冲测量方法。

为实现飞秒脉冲激光自相关测量,研制了一种大量程自相关仪,如图6所示。飞秒激光入射到自相关仪,经反射镜反射到分束镜后分为两束。分束的两束激光分别由两个脊型反射镜反射,在另一片分束镜上合为一束,照射到抛物面镜上,最后入射到双光子探测器上。双光子探测器兼具和频晶体加探测器的功能。其中一个脊型反射镜安装在电控位移平台上,电控位移平台行程为50 mm,对应的扫描实验延迟为166 ps,因此自相关仪可测量的自相关宽度范围达55 ps。

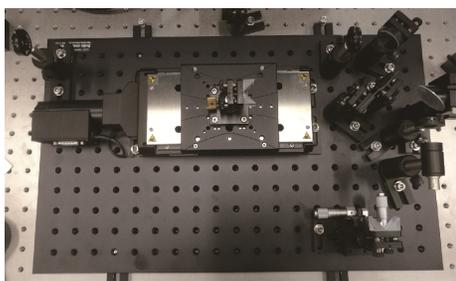


图6 大量程自相关仪

Fig.6 Autocorrelator with large measurement range

移动电控位移平台,采集双光子探测器探测的信号,即可获得脉冲的自相关信号。自相关法可分为强度自相关和条纹分辨自相关两种类型。调整电控位移平台的扫描速度,可获得强度自相关和条纹分辨自相关两种结果。当电控位移平台的扫描速度远大于被测激光波长与探测器的响应时间之商时,测量结果为强度自相关;当电控位移平台的扫描速度远小于被测激光波长与探测器

的响应时间之商时,测量结果为条纹分辨自相关。利用该自相关仪测量与图3相同的飞秒脉冲,测量结果如图7所示^[15]。

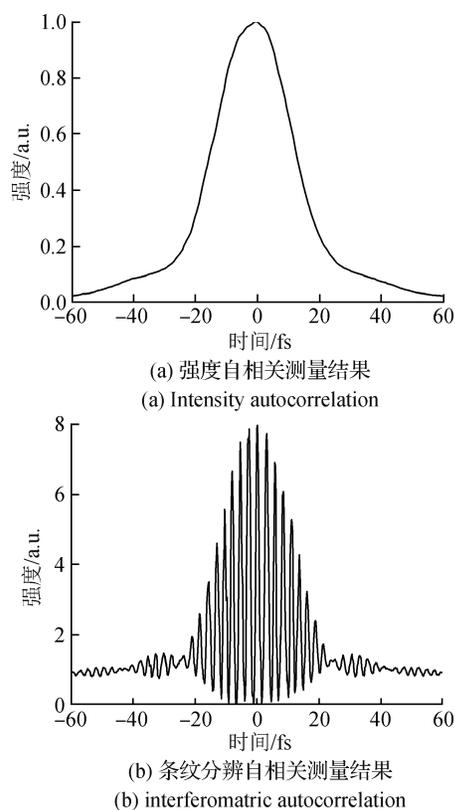


图7 测量的20 fs自相关结果

Fig.7 Measured autocorrelation for a 20 fs laser pulses

根据飞秒脉冲光谱相位干涉仪的测量结果重建的脉冲波形可计算出脉冲的自相关信号,计算的自相关信号与图7的实验测量结果精确吻合,验证了图6的自相关仪测量的准确性^[12, 15]。

采用条纹分辨自相关法测量脉宽较长的脉冲时,需要较长的扫描时间才能完成条纹分辨自相关的测量,且要求严格的光路准直性和较高的脉冲稳定性。图8为利用图6的自相关仪测量500 fs自相关宽度的测量结果。

3 自相关仪校准规范制定与计量标准建立

为了规范超短脉冲激光测量仪器的校准方法,统一超短脉冲激光参数测量量值,保障超快光学研究、超短脉冲激光器研制及超短脉冲激光在各领域应用中的量值准确可靠,制定了超短脉冲激光测量仪器校准规范。

中国计量科学研究院制定了JJF 1493-2014《超短光脉冲自相关仪校准规范》^[16-17]。因为自相

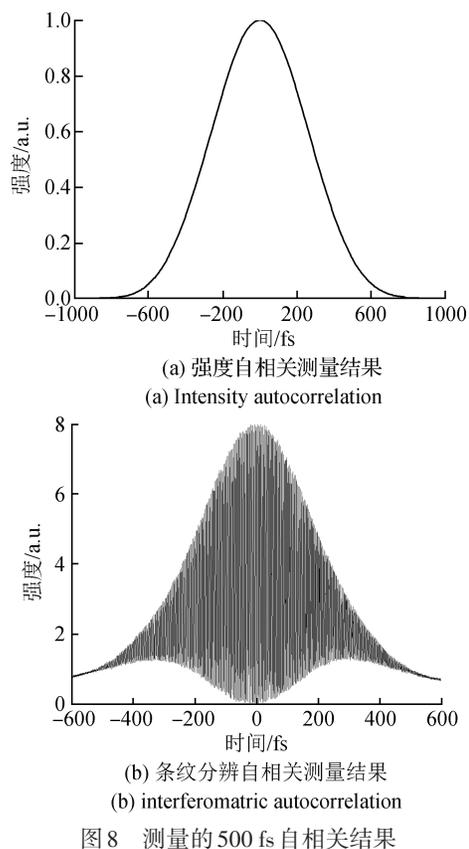


图8 测量的500 fs自相关结果

Fig.8 Measured autocorrelation for a 500 fs laser pulses

关仪是目前最为常用的超短脉冲激光测量仪器，所以制定的超短脉冲自相关仪校准规范具有更广泛的实用性。自相关仪的测量结果为自相关宽度，激光脉冲时域宽度由假设脉冲时域波形获得。为了降低假设脉冲波形引起的测量不确定度分量，JJF 1493-2014校准规范将自相关宽度作为校准项目，避免人为假设脉冲波形不适当产生的测量不确定度。对于超短脉冲激光时域宽度的测量，由使用者根据激光器特性或自身经验选择合适的反卷积因子^[16]。

自相关仪校准的量值溯源传递图如图9所示。标准自相关仪的测量结果溯源至光谱相位干涉测量仪。根据光谱相位干涉测量仪测量的飞秒脉冲时域波形可获得脉冲的自相关信号，对自相关仪的测量结果进行校准。光谱相位干涉测量仪所用的光谱仪溯源到光谱辐射照度国家基准，同时保证光谱相位干涉测量仪测量光路中没有引起附加相位，无改变被测脉冲波形的色散器件。标准自相关仪经溯源校准后，对被校自相关仪进行校准，对测量结果进行修正，保障被校自相关仪测量结果的准确可靠。

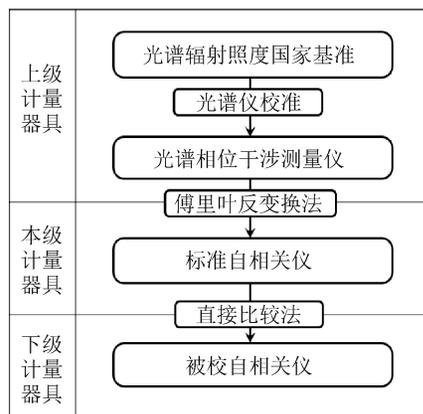


图9 自相关仪校准溯源传递框图

Fig.9 Block diagram of tracing and transferring for autocorrelator calibration

中国计量科学研究院建立了国家计量标准装置和社会公用计量标准装置：“超短光脉冲自相关仪校准装置”（[2017]国量标计证字第318号）。受目前实验室超短脉冲光源的限制，“超短光脉冲自相关仪校准装置”的测量脉冲宽度范围为15 fs~12 ps，测量扩展不确定度为 $U_{rel} = 10\%$ ($k = 2$)。利用飞秒脉冲激光光谱相位干涉测量仪对飞秒脉冲激光时域波形精确测量，对标准自相关仪校准，实现了被校自相关仪的量值传递。利用超短光脉冲自相关仪校准装置开展量值传递，保障了自相关仪测量结果的准确可靠。

2022年发布了GB/T 41572-2022《脉冲激光时域主要参数测量方法》国家标准^[18]，也对超短脉冲激光时域参数测量方法进行了标准化的规定，为保障超短脉冲激光时域参数的准确测量提供了技术依据。

4 结论

介绍了研制超短脉冲激光计量标准装置的成果与进展。根据光谱相位相干直接电场重建法研制了光谱相位干涉测量仪，利用小波变换技术消除了传统傅里叶变换滤波方法因不同宽度的滤波窗口产生的相位还原不确定性，实现了精确的相位还原和飞秒脉冲激光时域波形重建。将光谱相位干涉测量仪所用的光谱仪溯源到光谱辐射照度国家基准，实现了飞秒脉冲波形和脉冲宽度的量值溯源。研制了一种大量程的自相关仪，通过调整扫描速度实现了强度自相关和条纹分辨自相关的测量，测量范围为10 fs~50 ps。自相关仪的测量

结果溯源到光谱相位干涉测量仪,实现了自相关仪的量值溯源。制定了超短光脉冲自相关校准规范,并建立了“超短光脉冲自相关仪校准装置”国家计量标准装置,脉冲宽度范围为15 fs~12 ps,测量扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=10\%$ ($k=2$)。利用国家计量标准装置开展自相关仪量值传递,保障了超快光学测量仪器的量值准确可靠。

参考文献

- [1] ELL R, MORGNER U, KÄRTNER F X, et al. Generation of 5 fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser [J]. *Optics letters*, 2001, 26(6): 373-375.
- [2] HALL J L, YE J. A new era of frequency standards and optical frequency measurement [J]. *Optics and photonics news*, 2001, 12: 44-50.
- [3] HYUN S, KIM Y, JIN J, et al. Absolute length measurement with the frequency comb of a femtosecond laser [J]. *Measurement science and technology*, 2009, 20: 95302.
- [4] DAI J, XU X, ZHANG X C. Detection of broadband terahertz waves with a laser introduced plasma in gases [J]. *Physics review letters*, 2006, 97(10): 103903.
- [5] DENG Y, SUN Q, YU J. On-line calibration for linear time-base error correction of terahertz spectrometers with echo pulses [J]. *Metrologia*, 2014, 51(1): 18-24.
- [6] NAFTALY M, DUDLEY R. Linearity calibration of amplitude and power measurements in terahertz systems and detectors [J]. *Optics letters*, 2009, 34(5): 674-676.
- [7] FÜSER H, JUDASCHKE R, BIELER M. High-precision frequency measurements in the THz spectral region using an unstabilized femtosecond laser [J]. *Applied physics letters*, 2011, 99(12): 121111.
- [8] BIELER M, SPITZER M, HEIN G, et al. Time-domain characterisation of non-coplanar high-frequency components up to 300 GHz [J]. *Electronics letters*, 2002, 38(18): 1038-1039.
- [9] DIELS J M, FONTAINE J J, MCMICHAEL I C, et al. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy [J]. *Applied optics*, 1985, 24: 1270-1282.
- [10] KANE D J, TREBINO R. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency-resolved optical gating [J]. *Optics letters*, 1993, 18: 823-835.
- [11] IACONIS C, WALMSLEY I A. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses [J]. *IEEE journal of quantum electronics*, 1999, 35: 501-509.
- [12] DENG Y, SUN Q, CAO S, et al. Accurate and automatic characterization of femtosecond optical pulses [J]. *Metrologia*, 2012, 49(2): 39-42.
- [13] DENG Y, WU Z, CHAI L, et al. Wavelet-transform analysis of spectral shearing interferometry for phase reconstruction of femtosecond optical pulses [J]. *Optics express*, 2005, 13(6): 2120-2126.
- [14] DENG Y, WU Z, CAO S, et al. Spectral phase extraction from spectral interferogram for structured spectrum of femtosecond optical pulses [J]. *Optics communications*, 2006, 268(1): 1-6.
- [15] DENG Y, SUN Q, CAO S, et al. Measurement of ultrashort optical pulses [Z]// Luigi Cocco, *Modern Metrology Concerns*. InTech Press, 2012: 349-362.
- [16] 邓玉强, 孙青, 于靖, 等. JJF 1493-2014《超短光脉冲自相关仪校准规范》的解读 [J]. *中国计量*, 2015, 233: 124-126.
- DENG Y, SUN Q, YU J, et al. Interpretation of JJF 1493-2014 “Calibration specification for ultrashort optical pulses autocorrelators” [J]. *China metrology*, 2015, 233: 124-126. (in Chinese)
- [17] 国家市场监督管理总局. 超短脉冲自相关仪校准规范: JJF 1493-2014 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2014. State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Calibration specification for ultrashort optical pulses autocorrelators: JJF 1493-2014 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2014. (in Chinese)
- [18] 国家市场监督管理总局. 脉冲激光时域主要参数测量方法: GB/T 41572-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. State Administration for Market Regulation. Measurement methods for main parameters of pulsed laser in time-domain: GB/T 41572-2022 [S]. Beijing: China Standard Press, 2022. (in Chinese)

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 邓玉强 (1976—), 男, 研究员, 博士, 长期从事超快光学计量、太赫兹计量、激光辐射度计量研究, 主持国家自然科学基金、科技支撑计划等项目课题10余项, 发表学术论文100余篇, 获得授权专利10余项, 制(修)订国家标准10项、国家计量技术规范9项, 建立国家社会公用计量标准4项, 获省部级科技奖5项, 学会奖2项。