

文章编号: 1002-2082 (2020) 04-0717-06

# 基于可调谐飞秒激光的光学特性测量装置

王卫敏<sup>1,2</sup>, 赫英威<sup>1</sup>, 徐以诺<sup>1,2</sup>, 徐楠<sup>1</sup>, 井绪峰<sup>2</sup>,  
刘想靓<sup>1</sup>, 傅杨挺<sup>1</sup>, 甘海勇<sup>1</sup>

(1. 中国计量科学研究院 光学与激光计量科学研究所, 北京 100029; 2. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 随着激光技术的快速发展, 激光光源在光谱辐射和光学特性测量中得到了广泛的应用。与传统的灯光源相比, 激光光源具有高功率、宽光谱和极低的波长不确定度等优点。建立了一套基于宽波段可调谐激光光源的光电探测器响应定标装置, 其中激光光源的光谱覆盖范围为 190 nm~4000 nm, 激光脉冲宽度约 130 fs, 重复频率约 80 MHz。为了避免高峰值功率脉冲光对探测器定标的影响并提高测量的线性度, 利用光纤的固有特性成功研制了一种可将脉冲光转换成连续光的转换器。同时基于激光光源搭建了一套激光准直和扩束光路, 在波长  $\lambda=550$  nm 时得到了非均匀性为 0.29% 的单色均匀辐射场。该单色均匀辐射场在高精度的探测器定标应用中具有重要的作用, 围绕其搭建的定标测量装置在计量领域具有一定的参考价值。

**关键词:** 可调谐激光; 光学特性; 光谱辐射; 光电探测器

中图分类号: TN247; O432.2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0407005

## Optical properties measuring device based on tunable femtosecond laser

WANG Weimin<sup>1,2</sup>, HE Yingwei<sup>1</sup>, XU Yinuo<sup>1,2</sup>, XU Nan<sup>1</sup>, JING Xufeng<sup>2</sup>,  
LIU Xiangliang<sup>1</sup>, FU Yangting<sup>1</sup>, GAN Haiyong<sup>1</sup>

(1. Optics and Laser Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. School of Optics and Electronics Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** With the rapid development of laser technology, laser sources have been widely applied in the measurement of spectral radiation and optical properties. Compared with the traditional light sources, laser sources have the advantages of high power, wide spectrum and extremely low wavelength uncertainty. A set of photodetector response calibration device based on the wide-band tunable laser light source was established, in which the spectral coverage of the laser light source was 190 nm~4 000 nm, the laser pulse width was about 130 fs, and the repetition frequency was about 80 MHz. In order to avoid the impact of high peak power pulsed light on the calibration of the detector, and improve the linearity of the measurement, a converter of converting pulsed light to continuous light was successfully developed by using the inherent characteristics of the optical fiber. At the same time, a set of laser collimation and beam expansion optical paths was built based on the laser source, and a monochromatic uniform radiation field with an inhomogeneity of 0.29% was obtained at a wavelength of  $\lambda=550$  nm. The monochromatic uniform radiation field plays an important role in the application of high-precision detector calibration, and the calibration measuring device based on it has a positive significance in the field of metrology.

**Key words:** tunable laser; optical properties; spectral radiation; photodetector

收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-05-18

基金项目: 国家重点研究开发计划 (2017YFF0206103); 国家国际科技合作专项项目 (2015DFA60390); 中国计量科学研究院科研项目 (AKY1602, AKYZD1909)

作者简介: 王卫敏 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光应用方面的研究。E-mail: wangweimin@nim.ac.cn

通信作者: 甘海勇 (1977-), 男, 博士, 副研究员。E-mail: ganhaiyong@nim.ac.cn

## 引言

近几十年来,随着光谱学研究、航空与航天遥感、地面遥感等研究领域的发展<sup>[1-4]</sup>,光谱辐射定标的精度要求越来越高。由于激光技术的快速发展,基于灯-单色仪的定标装置已经逐渐被基于激光光源的装置所取代。国际上德国、英国、美国等发达国家的科研机构相继建立了基于激光光源的测量装置<sup>[5-10]</sup>。随着 1970 年可调谐染料激光器的出现,高功率、单色、可调谐光源可供科学使用。Schaefer 和 Eckerle<sup>[5]</sup>于 1984 年在美国国家标准局(NBS)建立了第一套基于激光的辐射测量装置。20 世纪 90 年代,英国国家物理实验室(NPL)<sup>[6]</sup>建立了基于激光的辐射定标装置。该装置的光源由染料激光器、多模光纤、波长计和积分球组成,可以用来实现高度空间相干的激光均匀场,是该定标装置的核心部分。该光源已成功应用于分光光度计中,可测量大型光学透镜的透射率,其不确定度为 $\pm 0.01\%$ 。美国国家标准与技术研究院(NIST)也开发了一种新的基于激光的光谱辐照度和辐射响应度校准装置<sup>[7]</sup>。高功率可调谐激光光源通过光纤被引入到积分球中,产生了辐射通量较高的均匀辐射场。通过与最先进的传输标准辐射计相结合,该装置的辐照度和辐射通量响应度校准的标准不确定度可以达到小于 0.1% 的水平。德国联邦物理技术研究院(PTB)的可调谐激光系统(TULIP)<sup>[8]</sup>最初开发应用于校准大面积的滤波辐射探测器,但它也可以用于测量探测器和图像测量设备的绝对和相对辐射响应度。该装置具有较宽的光谱范围,并且基于锥形多模光纤实现了直径 30 mm 的单色均匀辐射场,不均匀性约为 0.5%。同经典灯-单色仪装置的测量不确定度相比,TULIP 装置的不确定度显然更低。光度计测量的不确定度可以从 0.5% 左右的典型值降低到 TULIP 装置的 0.15%。

激光被广泛应用到光辐射计量装置、光学材料测量和激光检测装置中<sup>[11-12]</sup>,不同测量装置对于激光也有很多不同要求。之前光谱响应度的测量通常使用基于灯-单色仪的装置来实现,但是这些装置限制了系统的信噪比。相比于其它光源,激光光源具有高功率、宽光谱和极低的波长不确定度等优点。本文设计并建立了一套基于掺钛蓝宝石可调谐激光光源的新装置<sup>[13-16]</sup>。该光源具有较

宽的光谱范围,结合光参量振荡技术和倍频技术能够达到更高的光谱功率水平和更宽的光谱范围,基于该光源搭建的探测器响应定标装置在计量领域具有一定的参考价值。

## 1 测量装置设计与讨论

掺钛蓝宝石激光器是目前发展最快,使用最广泛的固体可调谐激光器。本文基于掺钛蓝宝石可调谐激光器开发了可用光谱范围为 190 nm~4 000 nm 的新装置,其中激光光源的原始脉冲宽度约 130 fs,重复频率约 80 MHz。可调谐激光系统的光源是具有高峰值功率的飞秒脉冲光,为了避免脉冲光对探测器光谱响应的影响并且提高测量的线性度,设计了一种光纤束转换器,将脉冲光转换为连续光。经过转换器后,激光束通过单色仪和准直光束光路从而形成了均匀辐射场。理想情况下,光谱响应度的测量应在均匀单色辐射场的曝光下进行,然后对被测器件(DUT)的信号与标准探测器(REF)的信号进行比较,因此高度均匀辐射场的实现是高精度定标测量的基础。

## 2 基于可调谐激光光源的装置

本文使用掺钛蓝宝石激光器作为单色光束的来源。与传统灯源相比,几个数量级的更高光功率和更低的光谱带宽是该光源系统的优点。其中基于可调谐激光光源的光谱辐射定标装置如图 1 所示。该装置主要由可调谐光源系统、脉冲转连续光转换器、单色仪系统、光学匀束准直光路、三维工作平台和计算机控制系统组成。通过计算机系统可以控制激光光源输出不同波长的激光,出射的原始脉冲光经过转换器后转换成连续光,然后通过单色仪后被分束器分为 2 束光,一小束光被反射到监控探测器;另一部分单色光束通过分束器后出射,如果单色光束的辐照度水平改变,系统能够通过监控探测器进行测量校正。出射的光束经过自主设计的光路系统后形成了一个大面积的、均匀的辐射场。DUT 被放置在三维工作平台的均匀辐射场范围内,通过计算机软件控制三维平台,从而实现了 REF 和 DUT 的切换。具有校准孔径的硅探测器可用作 REF,以确定在参考平面上的辐照度,其中 REF 是基于低温辐射计(光辐射功率的主要标准)进行校准的。

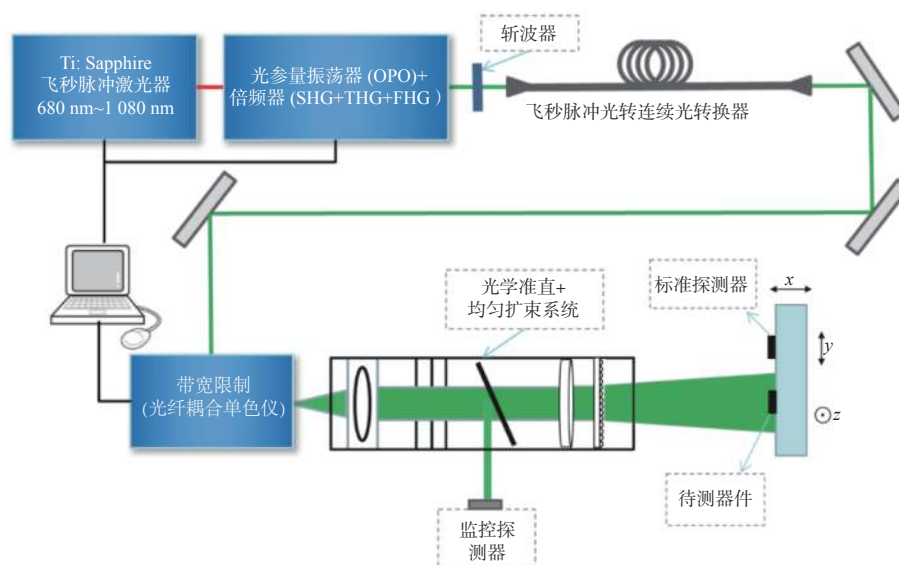


图1 基于可调谐激光光源的光谱辐射定标装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral radiation calibration device based on tunable laser light source

在宽光谱可调谐激光系统的搭建中,难以在可调谐宽光谱的条件下保持较高的光谱输出功率,特别是短波向小于300 nm的紫外波段和长波向4 000 nm的中红外波段进行扩展。目前国际上通用的商用仪器在探测器定标需求波长范围内通常存在不同的波长间断,不能完全实现波长全覆盖的测量。本文搭建的基于掺钛蓝宝石激光器光源

系统的光谱辐射通量分布见图2。该掺钛蓝宝石激光光源可连续输出680 nm~1 080 nm范围内的波长,其中光源平均光谱功率约为1 000 mW,并通过结合光学参量振荡器(OPO)和倍频器(SHG+THG+FHG)产生了190 nm~4 000 nm的宽带光谱。相较于德国PTB的宽光谱可调谐光源系统,补充了1 650 nm~1 700 nm的红外光输出的断档。

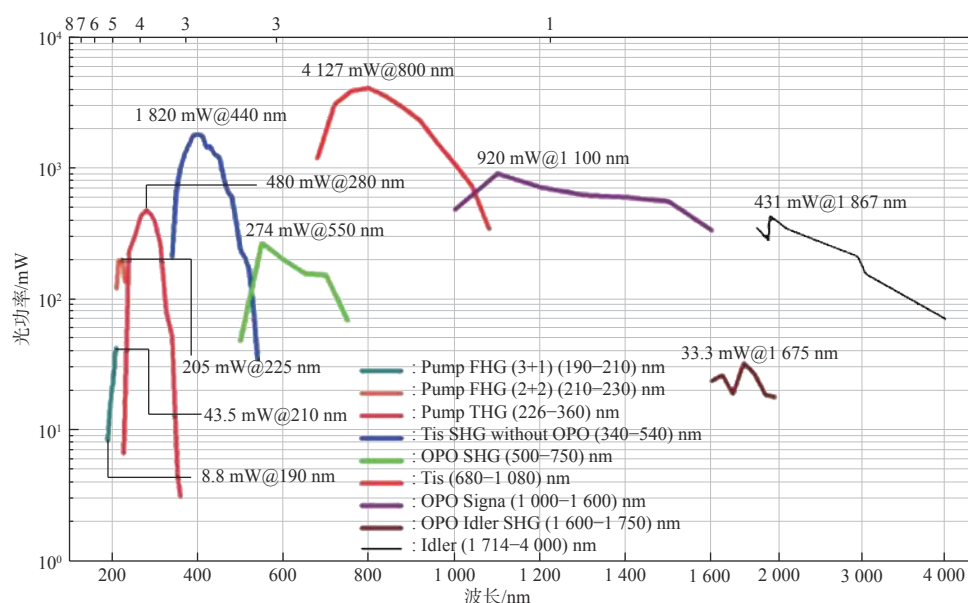


图2 宽波段飞秒脉冲激光光源光谱辐射通量分布图

Fig. 2 Optical radiation flux distribution of wide-band femtosecond pulsed laser light source

### 3 系统建立与应用

本文建立的可调谐激光光源是具有高峰值功

率的飞秒脉冲光。使用基于该光源的装置对探测器进行标定时,过高的脉冲峰值功率会使探测器

产生非线性饱和效应,这种效应对探测器的量值准确性和复现性标定将产生负面影响。在光电探测器辐射定标装置中,我们希望激光光源的功率必须尽可能高,从而在很宽的光谱波长范围内都能够得到很高的信噪比,同时希望避免高峰值脉冲光对探测器精确测量带来的影响。因此,本文设计并制作了一种激光脉冲展宽器,其目的是将脉冲激光转换为能量峰值较低的连续光,脉冲-连续光转换器的示意图如图 3 所示。该转换器由 100 根石英光纤组成,每根光纤的长度差异取决于石英光纤的折射率和脉冲激光的重复时间<sup>[17]</sup>。每个脉冲的时间延迟  $\Delta t_i$  取决于各自的光纤长度  $L_i$ , 折射率  $n$  和光速  $c$ , 即  $\Delta t_i = n \cdot L_i / c$ 。根据此公式,每一个单独的光纤长度对应明确定义的时间延迟。如果光纤之间的长度差相等,那么所有小脉冲在整个周期的分布也是均匀的。原始脉冲的周期大约为 12.5 ns, 使用  $n=1.5$  的光纤折射率和 0.125 ns 的时间延迟差(周期时间/100)来计算所有的光纤长度,其中最短光纤的长度设置为 2.5 m, 这是由实验装置的需求确定的。

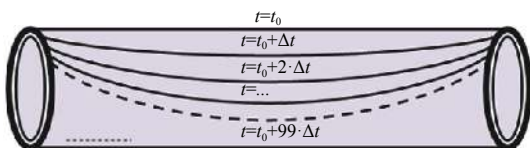
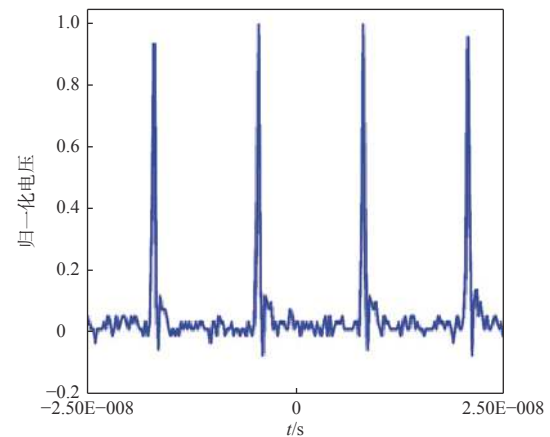


图 3 脉冲-连续光转换器示意图

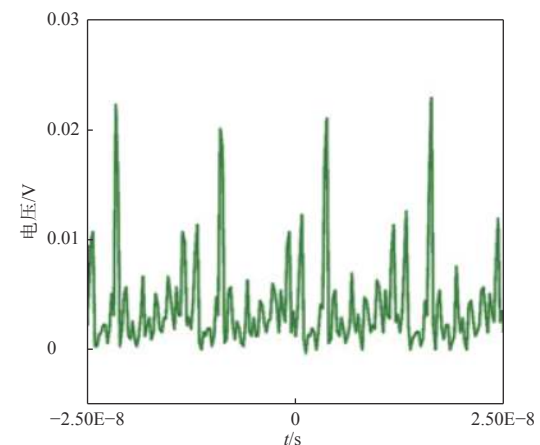
Fig. 3 Schematic diagram of pulsed-to-continuous light converter

在光纤束的入口处,激光脉冲被光纤束同时分为 100 个小脉冲,小脉冲经过不同长度的光纤具有不同的时间延迟,然后将它们重新组合就可以获得在时域上均匀分布的连续光。使用高速探测器和示波器可以测量激光脉冲经过转换器前后的波形,测量得到的前后数据如图 4 所示。通过前后的激光波形对比可以发现脉冲光转换成连续光后峰值功率显著降低,并且脉冲宽度变得远大于 130 fs。但是由于激光束具有高斯光束的轮廓分布,激光入射到光纤束时,每个光纤对应的辐射强度不同,处于光纤束中心位置的光纤耦合的入射光强度明显要大,其对应出射的小脉冲强度也要大于其他小脉冲,所以出射光束在时域上的强度分布难以达到良好的均匀性。

为了优化出射光强度在时域上分布不均匀的问题,我们在转换器中加入了另外 100 根光纤,使



(a) 原始激光脉冲



(b) 展宽后的激光脉冲

图 4 激光转换前后的波形数据比较—

Fig. 4 Comparison of waveform data before and after laser conversion

激光光斑中心附近的光纤和光斑边缘处的光纤进行配对。所有 200 根光纤被分配成 100 对光纤,每对光纤长度是相等的,在经过光纤束后对应的小脉冲在时域上也是重合的。我们测试了经过 200 根光纤转换器后激光脉冲的分布情况,如图 5 所示。激光脉冲被转换成连续光后在时域上的强度分布明显更加均匀,同时进一步降低了脉冲峰值功率。由于原始光斑的分布不均匀,仅仅通过光纤束无法使连续光的强度分布保持一致,若想进一步优化出射连续光强度的均匀性,下一步考虑在激光脉冲转换前搭建一套激光匀束装置,用于形成均匀入射的光斑。

同时为了进一步产生大面积的单色均匀激光辐射场,我们设计并搭建了一套激光准直匀束光路,光路的示意图如图 6 所示。首先,使用 2 个双凸透镜作为扩束器;其次,在 2 个透镜的公共焦点上放置一个旋转散射体;最后,将扩展的光束入射



到微透镜阵列上并通过微透镜阵列, 以形成大面积高度均匀的辐射场。由于激光光束的强相干性在光路中会形成干涉条纹和散斑效应, 该现象对均匀光场的形成造成了很大的困扰。通过加入散射体并且调节其位置来改变场的散度, 因此散斑和干涉图案是随时间变化的, 从旋转散射体发出的光类似于非相干的扩展光源。其中旋转散射体采用的是工程漫射片, 该散射体通过激光刻蚀系统产生, 表面包含了不同的微透镜单元。普通散射片通常仅限用于单色相干光, 与之相比, 工程散射片具有宽带兼容性, 并且可以完美地控制光分布和光束轮廓, 通过该散射片可以消除光路中的激光斑点效应。

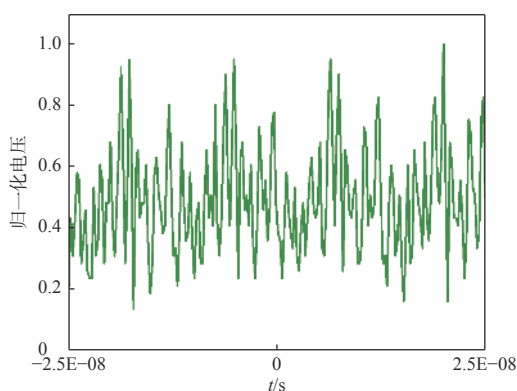


图5 激光经过 200 根光纤转换器后的波形图

Fig. 5 Oscilloscope of laser traveling through 200 optical fiber converters

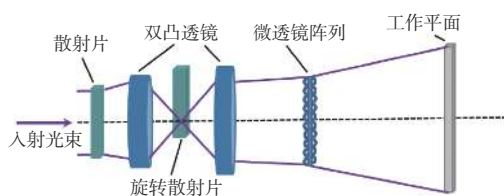


图6 光学准直扩束光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optical collimation and beam expansion optical paths

通过使用均匀性扫描仪可以测量辐射场的强度分布, 该扫描仪是由具有精密孔径光阑的硅标准探测器和三维位移平台组成。通过 1 mm 间隔移动扫描仪并对均匀光场进行扫描测量, 获得了在 30 mm×30 mm 范围内波长  $\lambda=550$  nm 时的测量结果, 结果如图 7 所示。并计算出了在 20 mm×20 mm 范围内我们感兴趣的均匀度, 在  $\lambda=550$  nm 时的激光辐射场不均匀性为 0.29%, 相较于之前 PTB 不均

匀性约 0.5% 的辐射场有了一定的提高, 满足了高精度探测器响应度测量的需求。

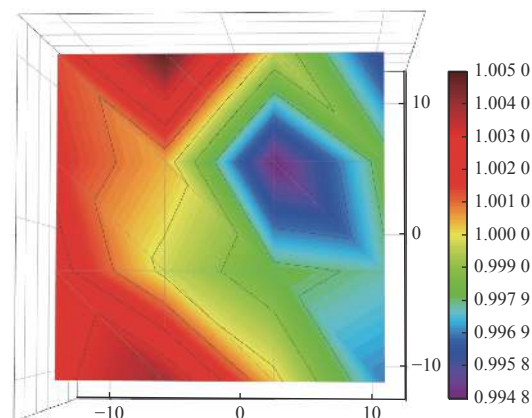


图7  $\lambda=550$  nm 处的激光单色辐射场分布图

Fig. 7 Laser monochromatic radiation field distribution at  $\lambda=550$  nm

基于可调谐激光光源的均匀单色辐射场, 加入监控探测器, 通过替换法可以用来测量 DUT 的响应特性, 该替换法是基于 REF 用于校准其他 DUT 的主要方案, 其测量流程框图如图 8 所示。通过搭建基于可调谐激光光源的光谱辐射定标装置, 构建了均匀单色辐射场, 在宽光谱的范围内可以对 DUT 的信号与 REF 的信号进行比较, 从而得到光谱响应曲线, 该装置的搭建在探测器的精确定标等计量领域具有一定的参考价值。

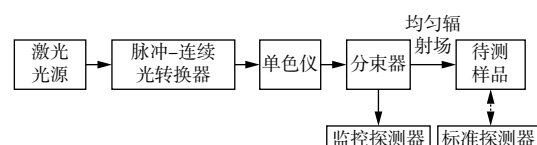


图8 替代法测量探测器量子效率的框图

Fig. 8 Block diagram of measuring detectors quantum efficiency by alternative methods

## 4 结论

本文搭建了一套基于掺钛蓝宝石激光光源的探测器响应测量装置。设计并制作了一种基于光纤的脉冲光转连续光转换器, 使用该转换器能够有效降低飞秒脉冲光的高峰值功率, 避免了脉冲光高峰值功率而导致探测器的非线性饱和问题。同时还搭建了用于产生均匀辐射场的光学准直扩束光路, 在  $\lambda=550$  nm 时得到了不均匀性为 0.29% 单色均匀激光辐射场。该装置在探测器响应特性

定标中具有光谱带宽窄、光谱功率高、定标不确定度低等优点。由于激光光源是可调谐的,可以快速地对激光均匀辐射场进行光谱调谐,可广泛应用于辐射计、空间遥感仪器的高精度光谱辐照度定标,推动光谱学、大气物理、航空航天等科研领域的发展。

#### 参考文献:

- [1] ANDERSON V E, FOX N, NETTLETON D H, et al. Highly stable, monochromatic and tunable optical radiation source and its application to high accuracy spectrophotometry[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(4): 536-545.
- [2] AHTEE V, BROWN S W, LARASON T C, et al. Comparison of absolute spectral irradiance responsivity measurement techniques using wavelength-tunable lasers[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(20): 4228-4236.
- [3] WINTER S, FEY T, KRÖGER I, et al. Design, realization and uncertainty analysis of a laser-based primary calibration facility for solar cells at PTB[J]. *Measurement*, 2014, 51: 457-463.
- [4] EATON S M, NG M L, RAFIQUE T, et al. High refractive index contrast in fused silica waveguides by tightly focused, high-repetition rate femtosecond laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, Baltimore, Maryland. Washington, D.C.: OSA, 2009.
- [5] SCHAEFER A R, ECKERLE K L. Spectrophotometric tests using a dye-laser-based radiometric characterization facility[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(2): 250.
- [6] FOX N, MARTIN J E, NETTLETON D H, et al. Absolute spectral radiometric determination of the thermodynamic temperatures of the melting/freezing points of gold, silver and aluminium[J]. *Metrologia*, 1991, 28(5): 357-374.
- [7] BROWN S W, EPPELDAUER G P, LYKKE K R. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(32): 8218-8237.
- [8] SCHUSTER M, NEVAS S, SPERLING A, et al. Spectral calibration of radiometric detectors using tunable laser sources[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1950-1961.
- [9] NOORMA M, TOIVANEN P, MANOOCHERI F, et al. Characterization of filter radiometers with a wavelength-tunable laser source[J]. *Metrologia*, 2003, 40(1): S220-S223.
- [10] EPPELDAUER G P, ZENG J, YOON H W, et al. Extension of the NIST spectral responsivity scale to the infrared using improved-NEP pyroelectric detectors[J]. *Metrologia*, 2009, 46(4): S155-S159.
- [11] LIU Jianmei, LI Cunlei, GAO Peng, et al. Identification method of crude oil in petroleum pipeline based on laser Raman detection technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 436-441.  
刘建美, 李存磊, 高鹏, 等. 基于激光拉曼检测技术的输油管道原油鉴别方法[J]. *应用光学*, 2018, 39(3): 436-441.
- [12] YANG Aifen. Applications of SWIR lasers in photoelectric reconnaissance and counter-reconnaissance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 937-943.  
杨爱粉. 短波红外激光在光电侦察与反侦察中的应用[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 937-943.
- [13] WANG Changshi, HE Yingwei, GAN Haiyong, et al. Calibration of monochromator wavelength based on continuous spectrum light source and Fourier transform spectroradiometer[J]. *SPIE*, 2018, 10819: 108191P.
- [14] WANG Changshi, HE Yingwei, GAN Haiyong, et al. Two methods comparison and verification for monochromator calibration of wavelength[J]. *SPIE*, 2019, 10839: 108390F.
- [15] HE Yingwei, GAN Haiyong, XU Nan, et al. A large, uniform, laser-based spectrally tunable irradiance field for optical sensors calibration[J]. *SPIE*, 2019, 11338: 113382Y.
- [16] WANG Weimin, GAN Haiyong, XU YINUO, et al. Optical fiber bundles converting pulsed lasers into continuous waves for improved measurement linearity in spectrophotometry[J]. *SPIE*, 2019, 11333: 1133318.
- [17] FEY T, KRÖGER I, WINTER S. Non-linearity effects of a detector due to pulsed radiation[C]//World conference on photovoltaic energy conversion. Frankfurt(DE): [s.n.], 2012: 3697-3699.