

迈入 21 世纪的光辐射计量测试技术

杨照金 于 帅 解 琪

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要 从分析光辐射计量技术的发展现状出发, 介绍了进入 21 世纪光辐射计量技术几个新的研究方向, 包括新的光辐射量传方法和强激光极限计量。量传方法中介绍了黑体辐射量传体系、低温辐射计量传体系、同步辐射源紫外光辐射量传体系等。在激光极限计量中重点介绍了高能激光功率能量测量的各种方法。介绍了国防科技工业光学一级计量站在光辐射计量测试方面的一些工作, 包括光谱辐照度、辐亮度标准、黑体辐射源标准、面源黑体校准装置和光辐射探测器光谱响应度测量装置等。

关键词 光辐射; 计量; 辐照度; 辐亮度; 黑体; 同步辐射

中图分类号 TP751.1 OCIS 120.3940 350.5610 文献标识码 A

Radiation Metrology Technology After Into 21 Century

Yang Zhaojin Yu Shuai Xie Qi

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract Based on analysing development of radiation measurement technology, new metrology research directions after into 21 century are introduced, including new method of radiation metrology transfer and high energy laser limit measurement. Blackbody radiation, cryonic radiometer, and synchrotron radiation ultraviolet value transfer system are described in value transfer methods. In laser limit measurement, measuring high-energy laser power with different methods is of great importance. Then some radiation measurement work in the First Scale Optical Metrology Station of the Commission of Science, Technology and Industry for National Defense is introduced, including spectral irradiance and radiance standard, blackbody radiation source standard, extended area blackbody calibration device, and spectral response measurement device of radiation detector, etc..

Key words optical radiation; metrology; irradiance; radiance; blackbody; synchrotron radiation

1 引 言

光辐射计量是光学计量最重要的组成部分, 它是指对光辐射源参数、光辐射探测器参数、激光辐射参数等的计量和准确测试。21 世纪是光电子技术时代。光电子时代的特征是激光技术、光电探测技术、光传输技术和产业化发展, 光辐射计量测试技术是光电子技术的技术支撑和技术基础。世界各发达国家投入大量人力物力发展光辐射计量测试技术, 美国国家标准技术研究院(NIST)和英国国家物理实验室(NPL)处于国际领先地位。本文一方面总结了光辐射计量测试技术的发展情况, 另一方面介绍了国防科技工业光学一级计量站在光辐射计量测试方面做的一些工作。

2 光辐射计量测试技术的发展趋势

2.1 波长范围从可见光向远红外和远紫外扩展

最早的光学仪器是用人眼观察, 因而工作波长在 380~780 nm 的可见光波段。随着光学材料技术、红

收稿日期: 2009-04-07; 收到修改稿日期: 2009-04-29

作者简介: 杨照金(1953—), 男, 高级工程师, 主要从事光学计量测试方面的研究。E-mail: yzj0508@163.com

外和紫外探测技术、红外热成像技术的发展,光电测量仪器的工作波段正在向紫外、可见、红外全波段发展。其中最具有代表性的是用于军事、侦察和工业部门的红外热像仪,用于航天的紫外相机等。

2.2 量限向超强、超弱两个极限方向扩展

随着激光技术的发展和新型光源的出现,常规光辐射测量仪器满足不了需要,要求探测仪器能承受超大功率激光和光源照射不损伤而且测量准确,响应时间又要满足短到飞秒量级的要求。例如高能激光武器系统把激光能量的测量量限从几千焦耳提高到几十万焦耳。微光夜视技术要求对微弱光探测极限达到 1×10^{-7} lx 的极微弱量值。这一系列新技术的发展为光辐射计量技术提出了新的课题,一方面量限向极限扩展,另一方面要求测量准确度提高。

2.3 原有标准溯源方法的改革

长期以来光辐射计量以金属凝固点黑体为最高标准,形成了比较完备的计量标准体系,由于黑体体积庞大,不便于搬运,国际比对存在许多不便。自从低温辐射计研制成功后,现在逐渐转向以低温辐射计为最高标准,陷阱探测器为传递标准,使原有的量传体系产生根本性的变化。

3 光辐射量传方法的发展

3.1 现有的量传方法

光辐射计量一直是把金属凝固点黑体作为最高标准,其出发点是理想黑体的辐射特性完全由黑体的绝对温度决定,当黑体的温度 T 确定后,它的光谱辐射曲线就唯一的确定了,任意一个波长的光谱辐亮度 $L_{\lambda B}$ 可由普朗克公式给出

$$L_{\lambda B} = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} \{\exp[c_2 / (\lambda T)] - 1\}^{-1}, \quad (1)$$

式中 c_1 为第一辐射常数,其值为 $3.7418 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$; c_2 为第二辐射常数,其值为 $1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$; λ 为真空中的光波长。

金属凝固点黑体是把纯度很高的金属熔化,在降温过程中,从液体向固体转换的过度温度是确定的,把它作为温度的标准,由此给出标准的光谱辐亮度值,以此为标准标定光度测量仪器和光辐射测量仪器。

目前正在使用的金属凝固点黑体镓点黑体、锡点黑体、锌点黑体、铝点黑体、铜点黑体、银点黑体、金点黑体分别为 302.9146, 505.078, 692.677, 1234.93, 1357.77, 933.473 和 1337.18 K。

3.2 低温辐射计为基础的量传体系

普通电替代辐射计也叫绝对辐射计或电校准辐射计,其基本原理是:将接收器做成吸收率无光谱选择性的,当有辐射到达接收器表面时,金黑层吸收辐射,使其温度升高,然后用电流加热接收器,调节电流使其产生的热量与接收器吸收辐射时产生的相等,这时所加电功率就等于辐射功率,原理如图 1 所示。

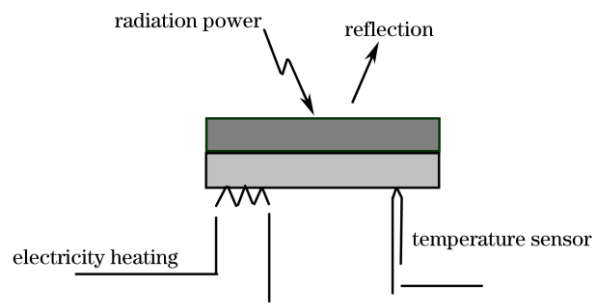


图1 普通电替代辐射计的工作原理图

Fig.1 Schematic of general electric alternative radiometer

由于常温下物质热性能的限制,尽管多年来进行了各种改进,其所能达到的不确定度一直处于 $0.1\% \sim$

0.3%。为了解决普通电替代辐射计存在的问题，英国国家物理实验室研制了一种用液氮制冷的低温绝对辐射计，该辐射计的工作原理与普通电替代辐射计基本相同，但由于其工作于 2~4 K 的液氮制冷环境，彻底解决了常温下物质热性能问题，而且在电替代电路中使用低温超导材料替代电路中的导线，使电能损失大大减小，从而使电替代辐射计的灵敏度和准确度提高了 100 倍，达到了 0.01% 的测量不确定度^[1]。

低温辐射计虽然属于绝对测量，但每开一次机需要花费不少精力，要几天时间。为了解决这个问题，制作一种传递标准，也就是陷阱探测器，每年用低温辐射计对陷阱探测器标定一次，以后再用陷阱探测器标定下一级光功率计。陷阱探测器如图 2 所示，它是用一组探测器，按照一定方式放置，使它的反射率接近于零，可看作为绝对测量。

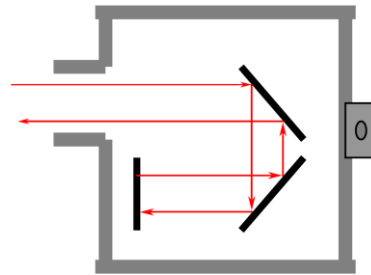


图 2 光陷阱探测器示意图
Fig.2 Configuration of optical trap detector

3.3 以同步辐射源为基础的紫外光辐射量传体系

同步辐射源是速度接近光速的带电离子在磁场中作变速运动时放出的电磁辐射。在光辐射计量中，主要利用同步辐射光源精确的可预知特性，可以用作各种波长的标准光源，由于可见和红外波段有金属凝固点黑体，所以同步辐射光源主要用于紫外波段，作为紫外光辐射最高标准^[2]。

目前主要采用氙灯(SO)作为传递标准光源。通过氙灯与储存环同步辐射(SR)的比对完成对传递标准光源氙灯的标定。标定系统光路如图 3 所示。定标系统包括前置光学系统、分光系统和探测系统。同步辐射光源和被标光源分别经相同的光学系统，测得光电流 i_{SR} 和 i_{SO} ，由定标原理知

$$i_{SR}(\lambda) = S(\lambda)\varphi_{SR}(\lambda)(1 + P_{rad}P_{SR}), \quad i_{SO}(\lambda) = S(\lambda)\varphi_{SO}(\lambda) \quad (2)$$

式中 φ_{SR} 为同步辐射的辐射通量分布，对于某一接收角内是可以计算的； φ_{SO} 为传递标准光源的辐射通量分布； i_{SR} 为同步辐射源照射时的光电流； i_{SO} 为传递标准光源照射时的光电流； $S(\lambda)$ 为系统光谱响应度； P_{SR} 为同步辐射平面偏振度； P_{rad} 为系统的偏振效率。

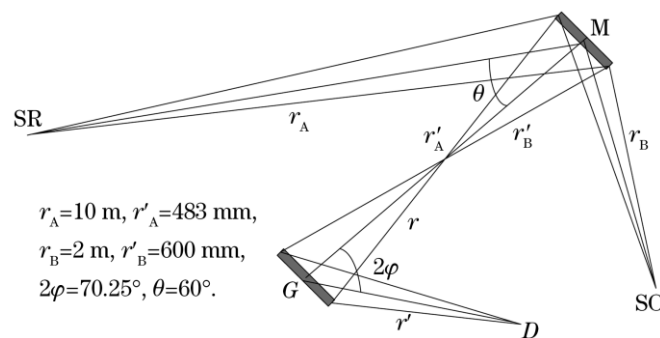


图 3 光谱辐射光源标准光路原理图
Fig.3 Schematic of standard optical path of spectral radiation source

4 强激光功率能量计量测试

强激光计量是常规量限激光参数计量的扩展和延伸，是极限计量。高能量强激光能量的测量方法主要有烧蚀法、相对法和绝对法等。

4.1 烧蚀法

烧蚀称量法其工作原理是用高能量激光烧蚀有机玻璃，根据有机玻璃重量的减少来估计能量值。

4.2 相对取样法

相对式测量方法是通过对激光的时间或空间取样，仅获取一小部分激光能量，因此可承受较高的激光辐射。

1) 积分球形测量法

这种方法是利用积分球作为激光的衰减器，利用积分球的多次反射使激光均匀地分布在积分球内表面，通过测量一个小面积上的功率并记录脉冲时间，获得激光功率和能量值，其测量原理如图 4 所示。

2) 斩波法测量

斩波法是通过激光在空间取样，实现激光能量测量。图 5 为一种扇形取样法的原理图，取样器为高速旋转的扇形指针，指针的两端连接在金属空腔上，由于仪器采用了空腔式结构，绝大多数激光将透过能量计，只有少量的激光辐射能量被扇形指针反射到侧面的吸收体上，扇形指针由金属制成，抛光后形成高反射面。扇形指针在空腔内部高速旋转，对激光束进行空间和时间采样，然后根据指针的取样比、反射率以及旋转速度等参数，利用相应的控制电路将信号读出，换算出激光能量值。

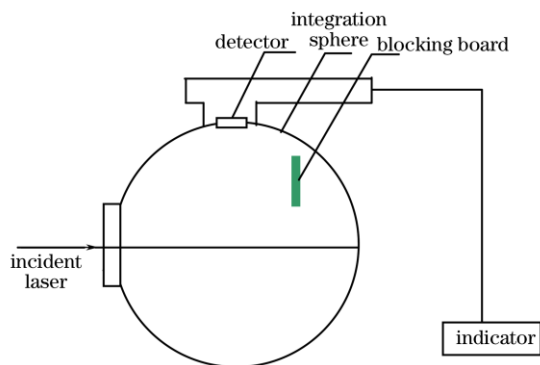


图 4 积分球测量原理图
Fig.4 Schematic of integrating sphere measurement

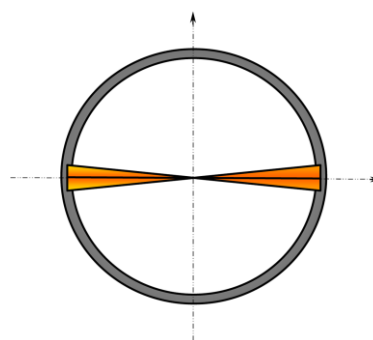


图 5 斩波法测量激光能量原理图
Fig.5 Schematic of laser energy measurement by wave-chopper method

4.3 绝对式测量法

绝对式测量法是利用全吸收型探测器，使高能量激光全部照射进探测器中进行测量^[3,4]。绝对式量热法是采用吸收腔直接吸收全部入射激光，将光能转化为热能，通过在吸收腔的外壁缠绕测温电阻丝来直接测量吸收体的温升，在已知材料质量和比热的条件下，计算出能量。通常吸收腔采用锥形腔和球形腔两种结构。锥形量热计结构如图 6 所示，圆锥多采用铜或铝材料制作而成，为了提高吸收效率，吸收腔内壁发黑形成高吸收面。球形激光能量计是利用光在球内的多次反射吸收实现测量，球内部发黑形成吸收面，吸收全部入射激光。目前采用的一种结构如图 7 所示。在入射口有一喇叭口形反射体，保证入射激光经过几次反射进入吸收球，在入射光束正对的球内表面装一半球形或锥形反射体，减小入射强激光对表面的损伤。

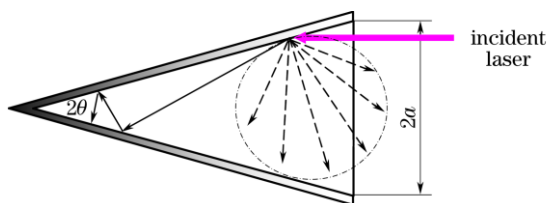


图 6 光束在圆锥内的反射
Fig.6 Reflection beams in the cone

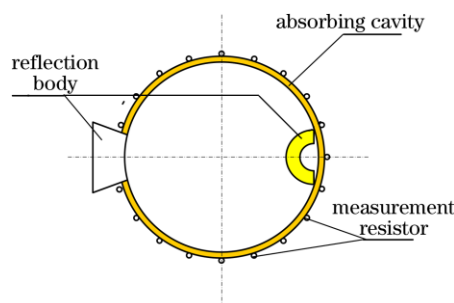


图 7 球形腔高能激光能量测量示意图
Fig.7 Configuration of high energy laser power measurement in spherical cavity

5 国防科技工业光学一级计量站的光辐射计量标准

5.1 光谱辐亮度和辐照度标准

光谱辐亮度、光谱辐照度是光辐射的基本辐射特性。为准确地标定各种辐射源的光谱辐射特性，一般以高温黑体为基础建立光谱辐亮度和光谱辐照度标准装置，其原理如图 8 所示^[5]。

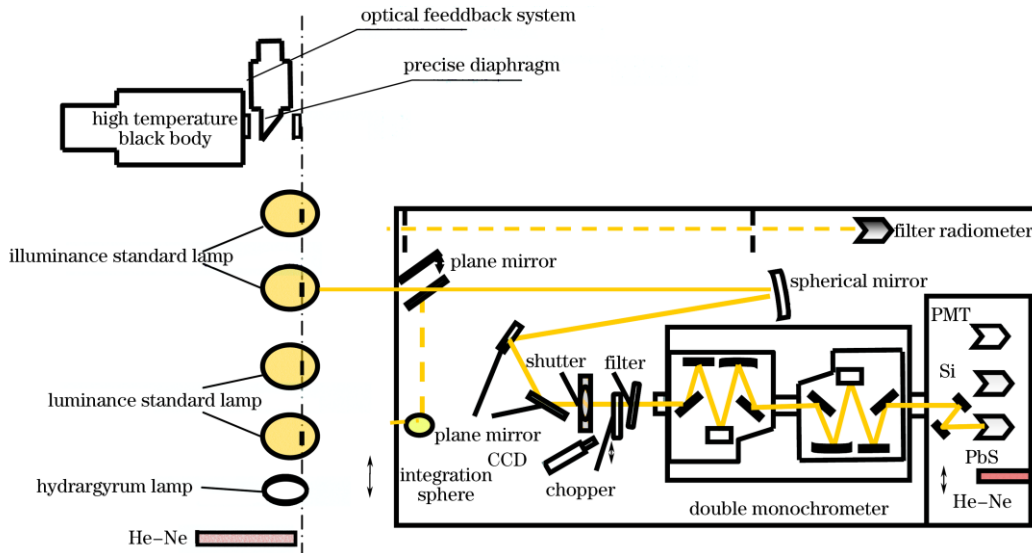


图 8 光谱辐亮度和光谱辐照度标准装置原理图

Fig.8 Schematic of spectral radiation and irradiance standard device

测量装置由四大部分构成：

- 1) 高温黑体及其传递标准。由高温黑体、一组光谱辐亮度标准灯、一组光谱辐照度标准灯及光源色温灯等组成，构成了光辐射测量装置的辐射源系统，其中高温黑体为最高标准辐射源，实现量值的绝对传递。
- 2) 辐射比较测量系统。包括积分球、前置光学系统、双单色仪、一组标准探测器和一组滤光片组成。
- 3) 控制系统。包括锁相放大器、数字电压表、移动平台控制箱、恒温箱、偏压源、一组高精度的直流稳压电源及计算机等对整个系统进行全自动控制。
- 4) 冷却系统。当高温黑体工作在 1800~3200 K 时，包括高温黑体及其配套的设备均需冷却。

5.2 中温黑体辐射源标准

中温黑体一般指工作温度为 323.15~1273.15 K 的黑体,它广泛地应用于科研和生产中。标准装置采用金属凝固点黑体作为最高标准,利用零平衡检定的方法,用金属凝固点黑体检定一级标准黑体,再用一级标准黑体检定工业黑体。零平衡检定的工作原理如图 9 所示。

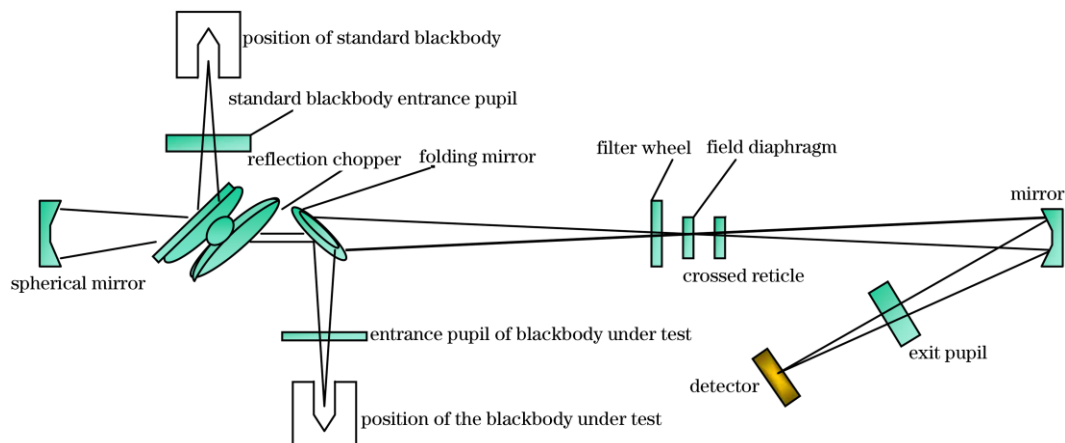


图 9 光谱辐射比对装置简图

Fig.9 Schematic of optical radiation contrast device

标准黑体和被检黑体通过光学辐射比对装置进行辐射亮度比较,当两者辐射亮度完全相等时,比对器显示仪表的指针指向零位。这种比对的方法有两种工作方式。一种是用光谱选择性探测器(PbS, InSb, HgCdTe),计算被检黑体的等效温度(T_e);另一种是用光谱平坦的探测器(LiTaO₃),可计算被检黑体的有效发射率。

5.3 相对光谱响应度测量

图 10 是探测器相对光谱响应度测量装置的光路原理图,可见该装置中央位置是一个双单色仪,前部是光源和输入光学系统,后部是探测器及输出光学系统。探测器及输出光学系统的光路与光源部分相似,从双单色仪出口狭缝出射的单体辐射经球面反射镜和两个平面反射镜成像于标准探测器和待测探测器。探测器安装在一个高精度自动平移滑台上,当需要对某个探测器进行测量时,该探测器将被自动移入光路。光源和斩波器也各安装在一个精密自动滑台上,根据测量时的需要可自动地移入移出光路。在该测量装置上可以标定出探测器可见到近红外波段的相对光谱响应度。

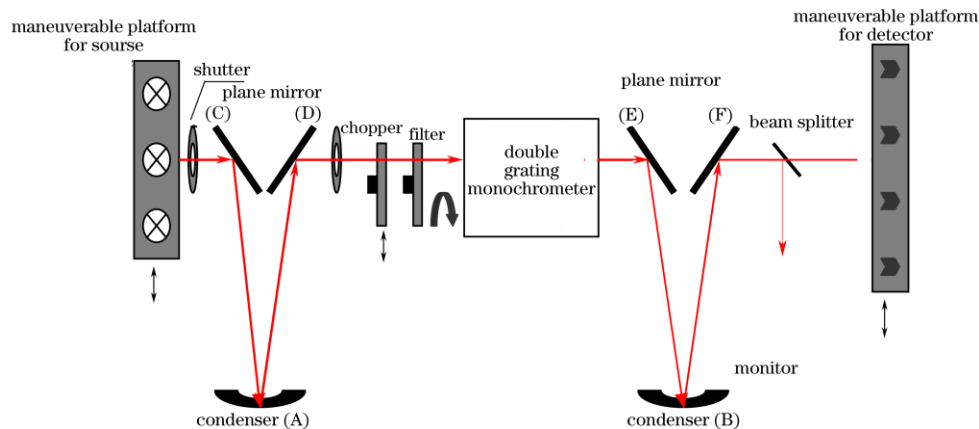


图 10 光辐射探测器相对光谱响应度测量装置原理图
Fig.10 Relative spectral response measurement device of radiation detector

5.4 面源黑体校准

在红外热像仪校准和其他应用中,往往用到面源黑体,与点源腔黑体相比,面源黑体辐射面积大,作为校准装置,不仅要校准发射率,而且要校准辐射面上温度均匀性。因此,需要建立专门的校准装置。243.15~348.15 K 面源黑体辐射特性校准装置如图 11 所示。采用面源黑体与标准(点源)黑体进行辐射量比对的方法,对面源黑体的辐射特性进行校准。

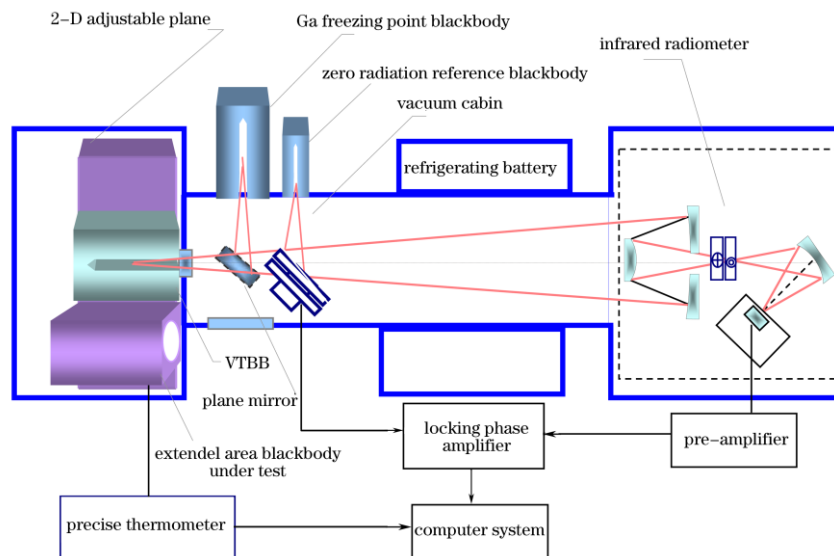


图 11 面源黑体辐射特性校准装置原理框图
Fig.11 Block diagram of radiation characteristic calibration of device extended area blackbody

6 结论与展望

介绍了光辐射计量测试技术的发展趋势及正在发展的光辐射量传方法和强激光计量技术,也介绍了国防科技工业光学一级计量站的光辐射计量标准。光辐射计量测试是光学计量技术重要的一个方面,涉及紫外、可见、红外辐射源,光辐射探测器和光辐射测量仪器等,已经成为光学工业的重要技术支撑和技术基础。随着光学技术和光电子产业化发展,为光辐射计量测试提出了新的课题和新的要求,光辐射计量技术必将得到新的发展。

参 考 文 献

- 1 Fan Jihong, Yang Zhaojin, Qin Yan *et al.*. Radiation metrology transfer system based on cryonic radiometer[J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, 28(Suppl): 163~166
范纪红, 杨照金, 秦 艳 等. 以低温辐射计为基础的光辐射量传体系[J]. *应用光学*, 2007, 28(增刊): 163~166
- 2 Liu Jinyuan, Xiong Limin, Li Ping *et al.*. The application study of synchrotron radiation in metrology[J]. *Adv. Meas. Lab. Manage.*, 2005, 13(4): 3~9
刘金元, 熊利民, 李 平等. 同步辐射在计量学中的应用研究[J]. *现代测量与实验室管理*, 2005, 13(4): 3~9
- 3 Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping *et al.*. Research on temperature characteristics of absolute calorimetric energy meter for high-energy laser[J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, 26(5): 29~32
王 雷, 杨照金, 黎高平等. 绝对式高能量激光能量计温度特性研究[J]. *应用光学*, 2005, 26(5): 29~32
- 4 Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping *et al.*. Resarch od backscatter energy for cone-shapped high energy laser energy meter[J]. *J. Astronautic Metrology Meas.*, 2005, 25(3): 59~64
王 雷, 杨照金, 黎高平等. 锥形腔高能量激光能量计后向散射问题研究[J]. *宇航计测技术*, 2005, 25(3): 59~64
- 5 Yang Zhaojin, Fan Jihong, Yue Wenlong *et al.*. Metrological and test technology of optical radiation[J]. *J. Appl. Opt.*, 2003, 24(2): 39~42
杨照金, 范纪红, 岳文龙 等. 光辐射计量测试技术[J]. *应用光学*, 2003, 24(2): 39~42