第37卷，第10期
2017年10月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 37, No. 10, pp3242-3248
October, 2017

新一代高温黑体和同步辐射装置及其在地外太阳光谱辐照度测量中的应用

李志刚，李福田*

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033

摘 要 在地外太阳光谱辐照度测量和大气定量遥感等项研究的推动下，近二、三十年，国际上光谱辐射计量技术发展十分迅速。基于先进的高温技术、优异的高温热解石墨材料和独特的设计，全俄光学物理测量研究所(VNIIOFI)研制出温度高达3 200～3 500 K、具有高均匀性和高稳定性的大面积普朗克高温黑体光源。基于低温绝对辐射计的滤光片辐射计迭代测温技术，使高温黑体温度测量不确定度小于0.5 K。在德国物理技术研究院(PTB)，将这种高温黑体直接用于国际空间站地外太阳光谱测试仪器(SOLSPEC)的辐射定标，定标综合不确定度小于0.5%～1%。2008年德国物理技术研究院(PTB)建成名为计量光源(MLS)的新一代专用同步辐射存储环并投入使用。为调节同步辐射的光谱分布，稳态下其能量可设置为105～630 MeV任意值，相应特征波长随之从735 nm改变至3.4 nm。为在不改变光谱分布情况下改变光强，电子束流可调节11个量级，即从1个存储电子(相当于1 pA)到200 mA。美国国家标准技术研究院(NIST)在同步辐射紫外辐射装置(SURF Ⅲ)3号光束线上建立了使用同步辐射的光谱辐照度定标装置(FICUS)，为紫外传递标准光源定标，光谱范围200～400 nm，相对测量不确定度1.2% ($k=2$)。新一代同步辐射装置为地外太阳光谱辐照度测量仪器，如SUSIM，SOLSTICE，SBUV，SIM和SOLSPEC等，短波段高精度辐射定标奠定了技术基础。该文描述新型高温黑体和同步辐射装置的建立与发展，光谱辐照度和光谱辐亮度标准的传递及国际比对并评述它们在太阳光谱辐照度测量中的应用。

关键词 辐射度；高温黑体；同步辐射；低温绝对辐射计

中图分类号：O432.2 **文献标识码**：A **DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2017)10-3242-07

引 言

近年，在环境科学、大气物理、太阳物理、气象学、气候学等研究的推动下，为获取构造大气模型所需的高精度地外太阳光谱辐照度，也为研究太阳活动的周期性和变化规律，国际上先后研制了太阳紫外光谱辐照度监测仪(SUSIM)、太阳恒星辐照度比较实验仪(SOLSTICE)、光谱辐照度监测仪(SIM)、太阳光谱仪(SOLSPEC)、太阳后向散射紫外谱仪(SBUV)等，进行了高精度地外太阳光谱辐照度测量[1-5]。我国也相继研制了FY-3臭氧垂直探测仪、FY-3臭氧总量探测仪和SZ-3太阳紫外光谱监视器等，用于高精度地外太阳光谱辐照度和臭氧测量[6-8]。

在需求推动下，国际上光谱辐射计量技术发展迅速，出现了新一代以精密高温黑体和同步辐射专用存储环为基准的真空紫外-紫外-可见-近红外波段光源型光谱辐射标准及以低温绝对辐射计(ACR)为基准的探测器型光谱辐射标准。其中以美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology，NIST)、德国物理技术研究院(Pysikalisch-Technische Bumdesanstalt，PTB)、全俄光学物理测量研究所(All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements，VNIIOFI)、英国国家物理实验室(National Physical Laboratory，NPL)的工作最有特色。基于先进的高温技术、优异的高温热解石墨材料和新奇的设计，全俄光学物理测量研究所(VNIIOFI)研制出温度高达3 200～3 500 K、具有高均匀性和高稳定性的大面积普朗克高温黑体光源。低温绝对辐射计工作在液氦温度，突破了环境和材料的限制，不确定度比常温绝对辐射计降低约一个量

收稿日期：2017-01-02，修订日期：2017-04-18

基金项目：国家自然科学基金项目(61378063)资助

作者简介：李志刚，1972年生，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员 e-mail：lizhg@ciomp.ac.cn

*通讯联系人 e-mail：li_futian@aliyun.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

级，不确定度为 0.01%。基于低温绝对辐射计的滤光片辐射计迭代测温技术，使高温黑体温度测量不确定度低于 0.5 K。在 PTB，高温黑体直接用于国际空间站太阳光谱仪(SOLSPEC)定标，综合不确定度为 0.5%(近红外)至 1%(可见)。PTB 和 NIST 新一代同步辐射专用存储环光谱辐射标准的建立和发展，使光谱定标范围在短波段延伸至 7 nm，为短波段高精度地外太阳光谱测量仪器如 SUSIM，SBUV，SOLSTICE，SIM 和 SOLSPEC 等的辐射定标奠定了基础。

本文评述新一代精密高温黑体和同步辐射专用存储环为基准的真空紫外-紫外-可见-近红外波段光源型辐射标准的创新与发展，讨论新一代高精度辐射标准在地外太阳光谱仪器定标中的应用。

1　精密高温黑体

当温度确定后，腔形辐射体构成的高温黑体的光谱辐亮度由 Planck 公式计算给出，可用作光谱辐射标准[9]。

$$L_{BB}(\lambda,T)=\varepsilon_{eff}(\lambda,T)\frac{C_1}{\pi\lambda^5 n^2}\Big/\left(\exp\frac{C_2}{n\lambda T}-1\right) \qquad (1)$$

式(1)中，$L_{BB}(\lambda,T)$为黑体的光谱辐射亮度；$\varepsilon_{eff}(\lambda,T)$为有效发射率；$C_1$ 和 C_2 为第一和第二辐射常数；λ 是真空中波长；n 是折射率；T 是黑体腔体温度。

与其他热光源相比，高温黑体具有许多优点，如光谱辐射重复性好、稳定性好、有效发射特性对腔壁材料光学特性变化不敏感等。一些工业先进国家，如美国 NIST、俄罗斯 VNIIOFI、英国 NPL、德国 PTB 等，早在 20 世纪 60 年代起就陆续将高温黑体用作近紫外-可见-近红外光谱辐射基准。经三、四十年发展，在高温黑体研制与测温技术两方面取得突破性进展。以俄罗斯 VNIIOFI 为例[10]，从 20 世纪 70 年代起研制了一系列用于辐射计量的高精度黑体，黑体温度从

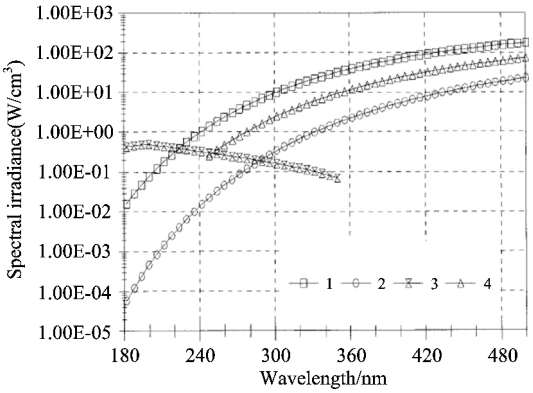

图 1　光源光谱辐照度

1：3 500 K 黑体、距离 1 m、孔径 15 mm；2：2 800 K 黑体、距离 1 m、孔径 15 mm；3：氘灯、距离 0.5 m；4：1 000 W FEL 石英卤钨灯、距离 0.5 m

Fig. 1　Spectral irradiance produced

1: Blackbody at 3500 K, distance of 1 m, aperture diameter of 15 mm; 2: Blackbody at 2 800 K, distance of 1 m, aperture diameter of 15 mm; 3: Deuterium lamp, distance of 0.5 m; 4: Quartz halogen lamp FEL-1000, distance of 0.5 m

80～3 200 K，覆盖波段范围从紫外至远红外。高温黑体常采用 1 000 W 石英卤钨灯和 30 W 氘灯作传递标准光源，为减小传递误差，要求高温黑体温度为 3 000～3 500 K，外设孔径光阑尺寸为 15～20 mm，以便使高温黑体光谱与灯的光谱匹配，见图 1。先进的高温技术、来源于火箭工程的热解石墨材料和独特的设计使 VNIIOFI 有能力研制温度高达 3 200 K、具有高均匀性和高稳定性的大面积普朗克黑体光源。这种大面积高温黑体将使新一代光谱辐照度标准综合不确定度仅为 0.1%。VNIIOFI 研制的精密高温石墨黑体 BB22p 和大面积高温热解石墨黑体 BB3200pg，具有高稳定性和高均匀性，工作温度范围分别为 1 800～2 900 和 1 800～3 300 K，见图 1。大面积高温热解石墨黑体 BB3200pg 结构见图 2。目前已被多个国家采用作为国家光谱辐射基准，如加拿大国家研究院(NRC)、德国物理技术研究院(PTB)、中国计量院(ICM)等。

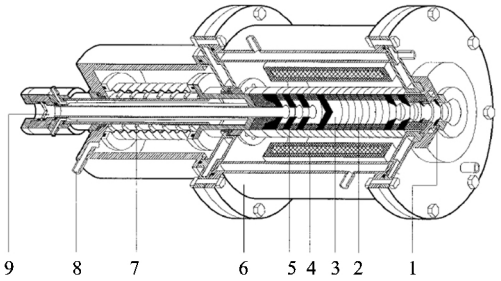

图 2　高温热解石墨黑体 BB3200pg

1：辐射体输出光阑；2：辐射体热解石墨环；3：辐射腔底；4：绝热单元；5：热屏；6：水冷室；7：夹持弹簧；8：惰性气体入口；9：后石英窗

Fig. 2　High temperature pyrolytic graphite blackbody BB3200pg

1: Output diaphragm of the radiator; 2: Pyrolitic graphite rings of the radiator; 3: Bottom of the radiating cavity; 4: Thermal insulation unit; 5: Thermal shields; 6: Water-cooled chamber; 7: Clamping spring; 8: Inert gas purge inlet; 9: Rear quartz window

影响高温黑体光谱辐射亮度(照度)的因素，除材料和几何形状决定的黑体空腔发射率、温度均匀性、温度稳定性外，重要的是黑体空腔温度绝对值。黑体空腔的测温技术由初期光学高温计法，发展到金点黑体法和目前的由低温绝对辐射计定标的滤光片辐射计法。以 NIST 为例[11-13]，图 3(a)为导出基于光源的用于实现 NIST 1990 和 1992 光谱辐照度标准的测量链路，以金点黑体为准，在 655 nm 标定出 1 337.3 K 金点真空钨丝灯，又传递出 1 530 K 钨丝灯，进一步以 1 530 K 钨丝灯为准标定出 1 614～2 654 K 变温高温黑体的温度。采用变温黑体目的是使高温黑体光源光谱分布与待定标的传递标准光源光谱分布较接近，减少传递误差。变温高温黑体通光口直径 2 mm，发射率 0.999 0±0.000 5。以变温高温黑体为基准，定标给出积分球光谱辐亮度，给积分球加精密光阑，根据几何关系，定标给出一组光谱辐照度传递标准光源 1 000 W 石英卤钨灯光谱辐照度，完成光谱辐照度传递。

因热解石墨高温黑体的研制成功，也因高精度低温绝对辐射计的出现、光谱功率响应度定标不确定度的降低，发展出基于探测器的光谱辐照度标准传递方法[12]，图3(b)为导

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

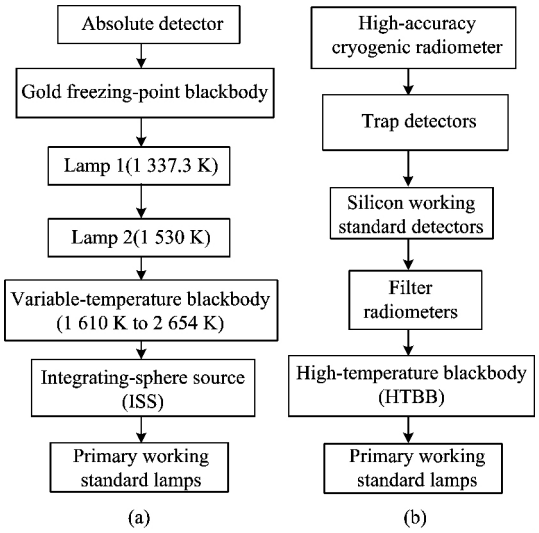

图 3 (a) 导出基于光源的用于实现 1990 和 1992 光谱辐照度标准的测量链路；(b) 导出基于新探测器的 2000 光谱辐照度标准的测量链路

Fig. 3 (a) Measurement chain used to derive the source-based spectral irradiance scale used in the 1990 and 1992 scale realization; (b) Measurement chain used in the new detector-based spectral irradiance scale of 2000

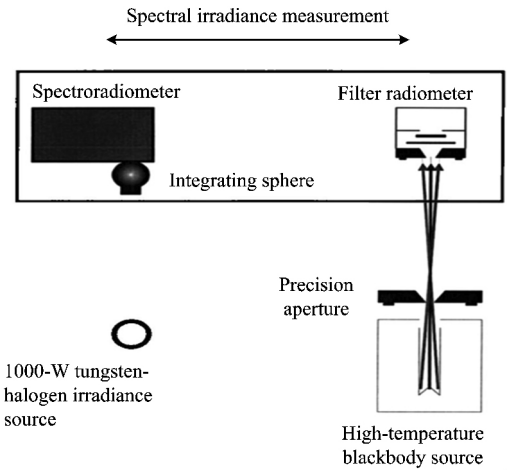

图 4 NIST 用于实现光谱辐照度标准的实验装置，表明高温黑体、滤光片辐射计、光谱辐射计和 FEL 灯的位置

Fig. 4 Schematic of NIST laboratory setup used for the spectral irradiance scale realization showing the positions of the HTBB, the FRs, the Spectroradiometer, and the FEL lamp

出基于新探测器的 NIST 2000 光谱辐照度标准的测量链路。图 4 表示用于实现光谱辐照度标准的实验装置，光谱辐射计和滤光片辐射计位于光学平移台，滤光片辐射计用于测量高温黑体亮温。已知高温黑体亮温、高温黑体前光阑面积、光谱辐射计积分球前精密孔径光阑面积、积分球前光阑与黑体前精密孔径光阑距离，可导出光谱辐射计光谱辐照度响应度，进一步定标得到 1 000 W 石英卤钨灯光谱辐照度。滤光片辐射计由恒温的宽带滤光片和恒温的硅探测器构成，精密光阑直径 4 mm 左右，位于滤光片-探测器组合前方。在 NIST 光谱比较装置(FSC)定标得到探测器光谱功率响应度，已知前光阑面积，得到探测器光谱辐照度响应度。探测器的输出[12]

$$S = \frac{G\pi r_{BB}^2 \pi r^2 (1+\delta)}{D^2} \varepsilon \int R(\lambda) L(\lambda, T) \mathrm{d}\lambda \qquad (2)$$

式(2)中，$L(\lambda, T)$是 Planck 定律给出的黑体光谱辐射亮度；$R(\lambda)$是滤光片辐射计绝对光谱功率响应度；ε 是黑体发射率；$D^2 = r^2 + d^2 + r_{BB}^2$；$r$ 为探测器前光阑半径；d 为两光阑间距离；r_{BB}为黑体前光阑半径；$\delta = r^2 r_{BB}^2 / D^4$；$G$ 是前级放大器增益。

改变式(2)中的温度，根据滤光片辐射计输出迭代求得黑体辐亮度温度，不确定度小于 0.5～1 K。图 5 给出 NIST 1 000 W 光谱辐照度石英卤钨标准灯和氘灯(200～400 nm)光谱辐照度定标的相对扩展不确定度。

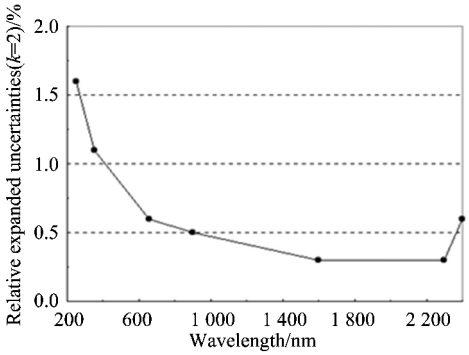

图 5 NIST 光谱辐照度定标的相对扩展不确定度

Fig. 5 Measurement uncertainty for NIST spectral irradiation calibrations

NIST 光谱辐亮度标准传递过程与图 3(a)所示的 NIST 光谱辐照度标准传递过程类似。先以金点黑体为准，在 655 nm 标定出 1 337.3 K 金点真空钨丝灯，又传递出 1 530 K 钨丝灯，进一步以 1 530 K 钨丝灯为准标定出 1 614～2 654 K 变温黑体的温度。以变温黑体为基准，石英窗口钨带灯为传递标准，定标一组石英窗口钨带灯，完成光谱辐亮度标准传递。图 6 给出用于光谱辐亮度定标的 FASCAL 系统光路图。

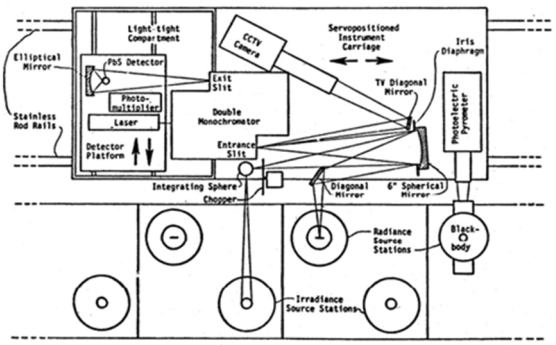

图 6 FASCAL 系统光学布局(俯视)

Fig. 6 Optical arrangement of FASCAL system(top view)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1987 年版 NIST 光谱辐亮度传递定标结果表明：在 225 nm 不确定度 2.09%，在 655 nm 不确定度 0.62%，在 2 400 nm 不确定度 0.39%[14]。

1997 年国际光度与辐射度咨询委员会(CCPR)发起使用钨带灯作为传递标准在波长 220～2 500 nm 范围进行光谱辐射亮度国际比对[15]。参加者有法国 BNM/INM、美国 NIST、加拿大 NRC、德国 PTB 和俄罗斯 VNIIOFI。比对测量从 1998 年进行到 2002 年，最终报告形成于 2008 年[16]。排除个别波长，一致性为±1.5%。排除个别非常点，一致性为±1.0%，见图 7。

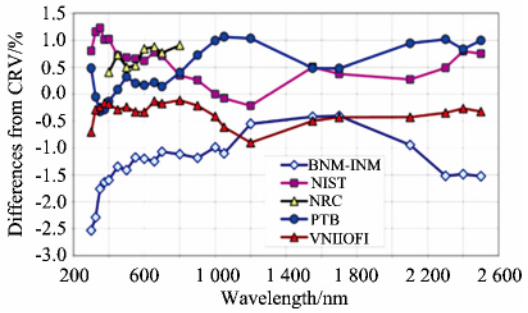

图 7　300～2 500 nm 波长范围与比对参考值(comparison reference value)的差别

Fig 7　Differences from the CRV for the range from 300 to 2500 nm

2　同步辐射

20 世纪 70 年代利用壁稳电弧或同步辐射建立软 X 射线和真空紫外波段光谱辐射标准研究十分活跃，其中，壁稳电弧方面以 NIST 的壁稳氢弧、NPL 和 PTB 的壁稳氩弧工作具有代表性。其工作原理是处于局部热力学平衡态的壁稳电弧中的氢等离子体或氩等离子体，当利用等离子体光谱学诊断技术测得其温度和电子密度后，其氢等离子体连续光谱的光谱辐亮度或氩等离子体中痕量物质的黑湾谱线光谱辐亮度可精确计算出，可以用作辐射标准。但是，随同步辐射作为辐射标准所展现的优势日益增加，目前壁稳电弧辐射标准已逐步淡出，这里不再赘述。同步辐射早期工作以NBS(现

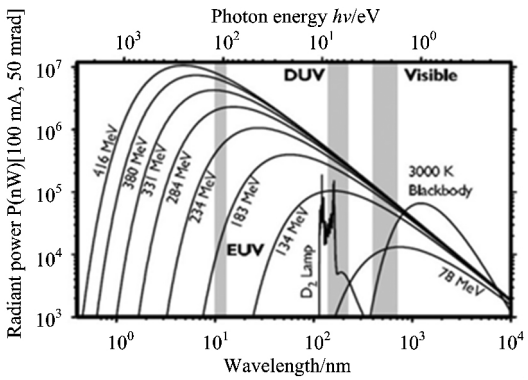

图 8　同步辐射辐射功率同 3 000 K 黑体和 30 W 氘灯比较

Fig 8　Synchrotron radiant power compared with high temperature blackbody at 3 000 K and 30 W deuterium Lamp

NIST)，NPL 和 PTB 的工作具有代表性[17-23]，近期工作以 PTB 和 NIST 具有代表性。工作原理是，在同步辐射存储环内，处于圆周运动的相对论电子，其同步辐射可由 Schwinger 方程计算出，可以作为辐射标准。图 8 给出同步辐射功率同 3 000 K 黑体和 30 W 氘灯的比较。

1984 年 PTB 进行了 BESSY Ⅰ电子存储环同步辐射特性研究，用 BESSY Ⅰ同步辐射作为标准，在 115～350 nm 标定了传递标准 MgF_2 窗口氘灯，在 115 nm 处氘灯光谱辐亮度相对不确定度为 22%。1999 年德国 PTB 同步辐射存储环 BESSY Ⅱ建成并投入使用，成为欧洲主要的辐射标准光源。在电子存储环 BESSY Ⅱ的 PTB 辐射计量实验室采用正入射单色仪系统标定待测光源，光谱范围 40～400 nm[24-25]。用于光源定标的正入射单色仪光束线如图 9 所示。

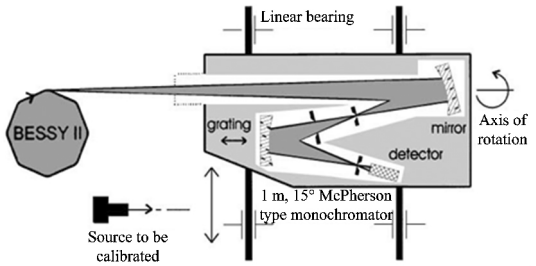

图 9　PTB BESSY Ⅱ辐射计量实验室用于光源定标的正入射单色仪光束线

Fig 9　The normal incidence monochromator beamline for source calibration at PTB BESSY Ⅱ radiation metrology laboratory

2008 年 PTB 建成并投入使用的、当今技术最先进、规模最大的专用同步辐射存储环计量光源(MLS)，布局见图 10。MLS 是周长 48 m 的同步辐射专用存储环。稳态下，能量可设置为 105～630 MeV 之间的任何值，以调节同步辐射光谱分布，相应特征波长从 735 nm 移动到 3.4 nm。电子束流可调节 11 个量级，即从 1 个存储电子(相当于 1 pA)到 200 mA，籍此，可为满足不同应用的需要，在不改变其光谱形状下改变同步辐射强度。在 7 个光束线口设置了 12 个实验站，覆盖的光谱范围从远红外/太赫兹(far IR/THz)至极紫外(EUV)。其中光束线 BL2a 和 BL2b，见图 11，用于 7～400 nm 同步辐射标准光源相关工作，可进行光谱仪定标，也

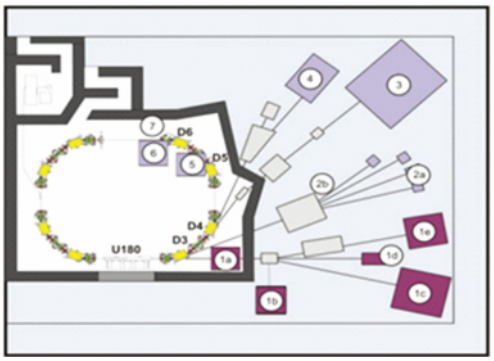

图 10　PTB 的计量光源(MLS)

Fig 10　Metrology light source (MLS) at PTB

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可进行待测光源定标，如氘灯传递标准光源或空心阴极灯传递标准光源定标，给出待测光源光谱辐射强度或光谱辐射亮度[26]。

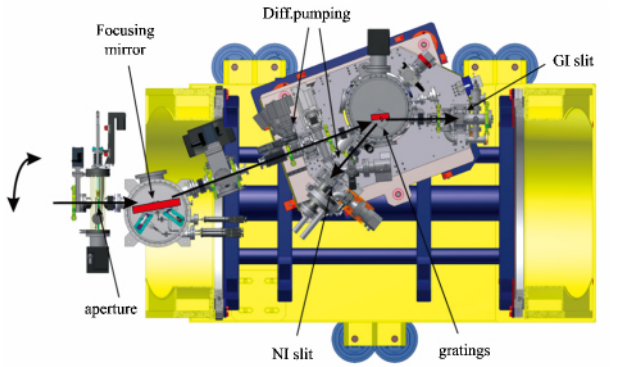

图 11 用于 7～400 nm 波长范围辐射光源定标的光谱仪系统

椭球聚光镜将光源(或者计量光源 MLS 或者待定标的气体放电光源)成像于单色仪出射狭缝，转台上的 6 块光栅在 GI 掠入射模式覆盖光谱范围 7～50 nm，在 NI 正入射模式覆盖光谱范围 40～400 nm

Fig. 11 Overview of the spectrometer system for calibration of radiation source in the 7 to 400 nm wavelength range

The elliptical focusing mirror images the source (either MLS or discharge source to be calibrated) to the monochromator exit slit. Six gratings in a rotatable mounting cover the spectral range from 7 to 50 nm in GI and 40 to 400 nm in the NI configuration

美国国家标准技术研究院(NIST)在同步辐射存储环紫外线辐射装置(SURF Ⅲ)3 号光束线上建立了同步辐射光谱辐照度定标装置(FICUS)，为待测紫外传递标准光源定标，光谱范围 200～400 nm，相对测量不确定度 1.2%($k=2$)[27-28]。FICUS 光束线、标准氘灯及定标设备如图 12 所示。定标传递设备由积分球、0.25 m Czerny-Turner 光栅单色仪和致冷的光电倍增管探测器组成。NIST 传递标准氘灯定标不确定度见图 5。

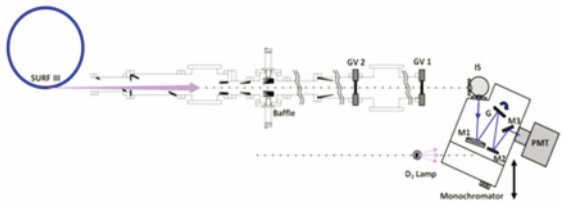

图 12 FICUS 装置

Fig. 12 FICUS Facility

3 高精度地外太阳光谱仪器及辐射定标

在 250～3 100 nm，精密高温黑体通过传递标准光源如 1 000 W 光谱辐照度标准石英卤钨灯或直接应用于太阳谱仪辐射定标。在 120～400 nm，同步辐射通过传递标准光源如标准氘灯或直接应用于太阳谱仪辐射定标。典型实例是 SUSIM 和 SOLSPEC。

1991 年美国海军实验室研制成太阳紫外光谱辐照度监测仪(SUSIM)并搭载 UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)卫星，取得地外太阳紫外光谱辐照度的重要数据资料。该仪器由两个相同的扫描单色仪、七个探测器、一个紫外定标光源、一个太阳传感器、一个微处理器和电子学系统构成[29]。仪器密封、充 1.1 个大气压的氩气，以防仪器或壳体放气污染。工作波段 120～400 nm，随入射和出射狭缝宽度的改变，光谱带宽为 0.15～5 nm。图 13 给出美国 SUSIM 光机结构。采用由英国国家物理实验室和美国标准技术研究院同步辐射定标的标准氘灯在轨实时定标，标准探测器在轨辅助核对，两台相同谱仪又相互核对，在轨测量给出太阳绝对光谱辐照度。在地面以三种不同光谱辐射标准进行标定，见图 14，其中石英卤钨灯光谱辐照度传递标准在 250～400 nm 间不确定度为±3%。氩弧紫外光谱辐射传递标准在 200～400 nm 间不确定度为±3%，140～200 nm 间为±6%，而 140 nm 以下为±11%，它以高功率氢弧为基准定标。NBS(现 NIST)的 SurfⅡ同步辐射装置在 120～400 nm 间光谱辐射不确定度为±5%。SUSIM 仪器 120～400 nm 测得太阳光谱辐照度不确定度为±6%～±9%。

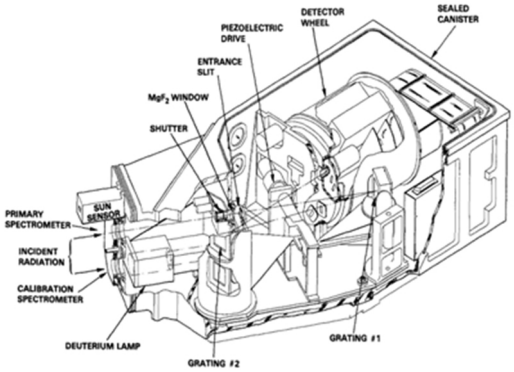

图 13 SUSIM 仪器设计图，表明零部件位置和主光谱仪光路

Fig. 13 SUSIM instrument design showing component placement and light path for primary spectrometer

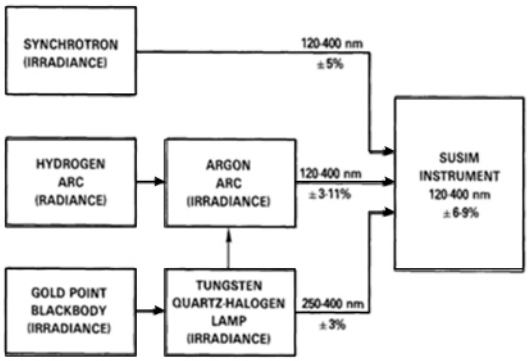

图 14 SUSIM 绝对光谱辐照度定标

Fig. 14 Absolute irradiance calibration for SUSIM

国际空间站太阳谱仪 SOLSPEC[4]，工作波段 165～3 080 nm，由三台凹面光栅双单色仪、光电倍增管和制冷硫化铅探测器、定标光源和电子学系统组成。在 PTB 以精密高

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温黑体和以同步辐射定标的标准氘灯进行地面定标，在轨采用氘灯和钨带灯传递定标，测量给出太阳绝对光谱辐照度，见图 15。SOLSPEC 光谱辐照度响应度不确定度(1σ)从近红外 0.5%、可见 1%、降到 200 nm 2%和 3 000 nm 5%，已考虑了所有绝对的、随机的和系统的不确定度来源。SOLSPEC

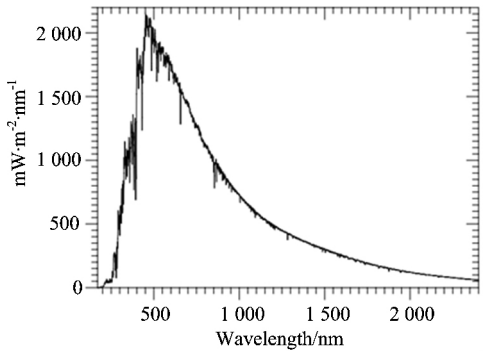

图 15　0.5～2 400 nm 光谱波段太阳光谱辐照度(SOLSPEC)

Fig. 15　0.5～2 400 nm solar spectral irradiance (SOLSPEC)

已于 2008 年搭载国际空间站，进行地外太阳光谱辐照度测量，如今已成功服役 8 年。

4　结　论

先进的高温技术、优异的高温热解石墨材料和独特的设计使 VNIIOFI 有能力研制温度高达 3 200 K、具有高均匀性和高稳定性的大面积普朗克高温黑体光源。低温绝对辐射计工作在液氦温度，突破了环境和材料的限制，不确定度比常温绝对辐射计降低约一个量级，不确定度为 0.01%。由低温绝对辐射计定标的滤光片辐射计迭代测温技术，使高温黑体温度测量精度优于 0.5 K。在 PTB，高温黑体还直接用于国际空间站地外太阳光谱测试仪器(SOLSPEC)定标，定标综合不确定度为 0.5%(近红外)至 1%(可见)。新一代同步辐射光谱辐射标准的建立和发展，使光谱范围延伸至 7 nm，成为短波段高精度地外太阳光谱仪辐射定标的先进装备，在高精度地外太阳光谱载荷辐射定标中发挥了重要作用。

References

[1] Floyd L E, Herring L C, Prinz D K, et al. Proc. SPIE, 1998, 3427: 445.
[2] Rottman G. Woods T. Proc. SPIE, 1995, 2583: 347.
[3] Harder J, Lawrence G, Rottman G, et al. Proc. SPIE, 2004, 4135: 204.
[4] Thuillier G, Foujols T, Bolsée D, et al. Solar Phys., 2009, 257: 185.
[5] Heath D F, Krueger A J, Henderson B D. Opt. Eng., 14: 323.
[6] WANG Shu-rong, SONG Ke-fei, LI Fu-tian, et al(王淑荣，宋克非，李福田，等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2007, 27(12): 2256.
[7] WANG Yong-mei, WANG Ying-jian, WANG Wei-he, et al(王咏梅，王英鉴，王维和，等). Chinese Science Bulletin(科学通报), 2009, 54(23): 3778.
[8] WANG Shu-rong, LI Fu-tian, SONG Ke-fei, et al(王淑荣，李福田，宋克菲，等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(9): 2590.
[9] Sapritsky V I. Metrologia, 1995/96, 32: 411.
[10] Sapritsky V I, Khlevnoy B B, Khromchenko V B, et al. Applied Optics, 1997, 36(22): 5403.
[11] Walker J H, Saunders R D, Jackson J K, et al. NBS Special Publication, 1987, 250: 20.
[12] Yoon H W, Gibson C E, Barnes P Y, et al. Applied Optics, 2002, 41(28): 5879.
[13] Yoon H W, Gibson C E. NIST, Special Publication, 2011, 250: 89.
[14] Walker J H, Saunders R D, Hattenburg A T. NBS Special Publication, 1987. 250: 1.
[15] Khlevnoy B, Sapritsky V, Rougie B, et al. Metrologia, 2009, 46: S174.
[16] Khlevnoi B B, Sapritskii V I, Kolesnikova S S. Measurement Techniques, 2010, 53(7): 748.
[17] Tomboulian D H, Hartman P L. Phys. Rev., 1956, 102: 1423.
[18] Codling K, Madden R P. J. Appl. Phys., 1965, 36: 380.
[19] Key P J. Metrologia, 1970, 6: 97.
[20] Lemke D, Labs D. Appl. Opt., 1967, 6: 1043.
[21] Kaase H. Optik, 1981, 59: 1.
[22] Key P J, Ward T H. Metrologia, 1978, 14: 17.
[23] Einfeld D, Stuck D, Wende B. Metrologia, 1978, 14: 111.
[24] Hollandt J, Becker U, Paustian W, et al. Metrologia, 2000, 37: 563.
[25] Richter M, Hollandt J, Kroth U, et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2001, 467-468: 605.
[26] Klein R, Gottwald A, Kolbe M, et al. AIP Conf. Proc., 2013, 1531: 879.
[27] Shaw P S, Arp U, Saunders R D, et al. Appl. Opt., 2007, 46: 25.
[28] Li Z, Shaw P S, Arp U, et al. Metrologia, 2010, 47: 429.
[29] Vanhoosier M E, Bartoe J D F, Brueckner G E, et al. Solar Physics, 1981, 74: 521.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

A New Generation High-Temperature Blackbody and Synchrotron Radiation Facility and Its Application in Extraterrestrial Solar Spectral Irradiance Measurements

LI Zhi-gang, LI Fu-tian*
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract Under the impetus of extraterrestrial solar spectral irradiance measurement and atmospheric quantitative remote sensing, spectroradiometry technology makes a rapid progress internationally in recent years. Based on the advanced high temperature technology, excellent pyrolytic graphite materials and unique designs, All-Russian Research Institute for Optical Physical Measurements (VNIIOFI) successfully developed large area Planck high temperature blackbody sources with temperature as high as 3 200～3 500 K which had the high uniform and high stable radiation characteristics. By means of filter radiometer calibrated by absolute cryogenic radiometer (ACR), the new iteration temperature measurement technology of high temperature blackbodies made the temperature uncertainty less than 0.5 K. At PTB, high temperature blackbody was directly used for the calibration of solar spectral irradiance measurement instruments, SOLSPEC, on board International Space Station and the uncertainty of calibration was less than 0.5%～1%. The new generation electron storage ring Metrology Light Source (MLS) was set up at PTB in 2008. The electron energy for stable ring operation could be set to any value from 105 to 630 MeV, giving a high flexibility in adjusting the SR spectrum. Through this operation, the characteristic wavelength of the radiation emission could be shifted from 735 nm to 3.4 nm. In order to change the synchrotron light intensity without changing the spectrum, the electron beam current could be adjusted within a range of more than 11 decades, i.e. from one stored electron which was equivalent to the current of 1 pA to the design value of 200 mA. At NIST, the FICUS (Facility for Irradiance Calibration Using Synchrotron) was built on beamline 3 at SURF Ⅲ (Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility) using for the calibration of ultraviolet spectral irradiance transfer standard deuterium lamp. The uncertainty of the 200nm-400nm spectral irradiance was 1.2% (k=2). The new generation synchrotron radiation facilities laid the technical foundations for the high precision calibration of solar spectral irradiance measurement instruments in short wavelength such as SBUV, SUSIM, SOLSTICE, SIM and SOLSPEC. This paper described the establishment and development of the new generation high temperature blackbody and synchrotron radiation facilities, spectral radiance standard and spectral irradiance standard transfer and international comparison, and reviewed their application in solar spectral irradiance measurements.

Keywords Radiometry; High temperature blackbody; Synchrotron radiation; Absolute cryogenic radiometer

(Received Jan. 2, 2017; accepted Apr. 18, 2017)

* Corresponding author

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net