

文章编号 1004-924X(2004)04-0373-07

## 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对

邢进<sup>1,2</sup>, 王淑荣<sup>1</sup>, 李福田<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**建立了高精度光谱辐射计量系统,给出了164~300 nm波长间3个光谱辐射标准氙灯光源的比对结果。其中3个光谱辐射标准氙灯光源分别以德国国家物理技术研究院(PTB) BESSY 同步辐射、英国国家物理实验室(NPL) Daresburg 同步辐射、中国合肥(国家同步辐射实验室)同步辐射为标准标定。实验中采用相互交替的比对顺序、微机控制比对时间以及抛光氙灯端窗等方法有效的消除了系统误差。实验数据分析结果表明:3个光谱辐射标准氙灯光源的相对光谱分布,在各自给定的不确定度范围内相一致,这也间接的验证了各国建立的紫外-真空紫外辐射标准的一致性。实验中比对引进的误差为1.7%。同时也研究了氙灯的光谱辐射特性。

**关键词:**紫外-真空紫外光谱辐射标准;氙灯;同步辐射;光谱辐射亮度

**中图分类号:** O482.31 **文献标识码:** A

## Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources

XING Jin<sup>1,2</sup>, WANG Shu-rong<sup>1</sup>, LI Fu-tian<sup>1</sup>

(1. *State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China*)

**Abstract:** A high precision spectroradiometric system was established, and the comparisons between three spectral radiant standard sources - deuterium lamps in the range of 164~300nm were given. The three transfer standard deuterium lamps are calibrated based on: BESSY Synchrotron Radiation of German National Institute of Science and Technology for Metrology (PTB), Daresburg Synchrotron Radiation of National Physical Laboratory (NPL) in UK, and Synchrotron radiation of HeFei National Laboratory of Synchrotron Radiation in China, respectively as primary standard sources. A series of methods, such as alternative sequence of comparison, computer controlled time consuming, and polishing the window of the deuterium lamp, was adopted to eliminate the systemic error efficiently. And the experimental result data were analyzed. It shows that the relative spectral radiant distributions of the lamps are consistent within the uncertainties designated respectively. It also shows that the consistency between UV-VUV radiometric standards established by different countries is confirmed. The error arising from the comparison is estimated at 1.

收稿日期:2004-04-22;修订日期:2004-07-18.

基金项目:应用光学国家重点实验室资助项目

7%. Meanwhile the spectral radiation characteristics of deuterium lamps are demonstrated.

**Key words:** UV-VUV spectral radiometric standard; deuterium lamp; synchrotron radiation; spectral radiance

## 1 引言

随着等离子体物理、受控核聚变、紫外辐射的生化效应及空间光学等领域研究工作的深入开展,对紫外-真空紫外光谱辐射标准的精度提出了越来越高的要求。70 年代开始,美、英、德、法等国利用同步辐射和壁稳电弧光源相继建立起紫外-真空紫外光谱辐射国家标准,并开展了同步辐射型和壁稳电弧型光谱辐射标准间的比对工作<sup>[1-10]</sup>。在利用同步辐射建立光谱辐射标准方面德国国家物理技术研究院(PTB)颇具特色,他们在 BESSY 电子存储环上建立了专用辐射计量光束线,精确地测定了存储环相关参数,在利用同步辐射作为光谱辐射绝对标准方面取得了很大进展<sup>[10]</sup>。

80 年代,中国科学院长春光机所研制成 2.5 kW 及 10 kW 壁稳氩弧紫外-真空紫外光谱辐射标准光源,90 年代在合肥 800 MeV 电子存储环装置开展了同步辐射特性研究并以同步辐射为标准完成 165 ~ 300 nm 光谱辐射传递标准氙灯光源的定标<sup>[11-12]</sup>。利用传递标准氙灯光源的比对定标可以将国际上公认的同步辐射标准引入到实验室中来。在本文中,研究了德国物理技术研究院(PTB, BESSY)、英国国家物理实验室(NPL, DARESBURO)及本实验室分别以同步辐射为标准定标的紫外-真空紫外光谱辐射标准氙灯光源间的比对及其比对结果,比对结果表明这 3 个标准光源一致性优于 5%。

## 2 同步辐射标准光源比对

### 2.1 同步辐射标准

相对论性高能电子( $v \rightarrow c$ ),在磁场中沿曲线轨道做回旋加速运动时,沿轨道切线方向发出同步辐射,当精确测知轨道半径、磁场强度及束流强

度后,其光谱分布值可以由 Schwinger 理论精确计算出,因此同步辐射可以作为紫外-真空紫外波段的光谱辐射标准。同步辐射的光谱辐射流可以表示为:

$$S^R(\omega) = S^R_{\parallel} + S^R_{\perp} = \frac{2e^2 J b}{3 \epsilon_0^4 d^4 d^{SR}} \times \left\{ \begin{array}{l} \int_0^{a/2d^{SR}} [1 + (\omega d^{SR})^2]^{-2} K_{2/3}(\omega d^{SR}) d\omega + \\ \int_0^{a/2d^{SR}} [1 + (\omega d^{SR})^2]^{-2} (\omega d^{SR})^2 K_{1/3}(\omega d^{SR}) d\omega \end{array} \right\}, \quad (1)$$

其中,  $\omega = \frac{E}{m_0 c^2}$ ,  $\frac{2}{3} = \frac{2}{3} [1 + (\omega d^{SR})^2]^{3/2}$ ,  $\frac{E}{ecB}$

$S^R_{\parallel}$  和  $S^R_{\perp}$  分别是电矢量平行和垂直于电子轨道平面的光谱辐射分量,  $E$ ,  $e$ ,  $m_0$  分别是电子束中电子的能量、电荷和静止质量。 $J$  是电子束的电流强度、 $c$  是真空中光速、 $\epsilon_0$  是真空中介电常数、 $B$  是观察点切向的磁感应强度。 $K_{1/3}(\omega d^{SR})$  和  $K_{2/3}(\omega d^{SR})$  是第 2 类修正贝塞尔函数,  $a$ ,  $b$ ,  $d^{SR}$  和  $\epsilon_0$  是存储环的相关几何参数。

德国物理技术研究院(PTB)在柏林电子存储环(BESSY)上构造了专用辐射计量光束,建立了基于同步辐射的软 X 射线-真空紫外-紫外光谱辐射国家标准。PTB 在 BESSY 的相关参数和几何量的测定上作了大量的工作<sup>[13]</sup>(见表 1),使同步辐射可以用作光谱辐射绝对标准。

参与本次比对的编号为 V0195 的  $MgF_2$  窗口氙灯于 2003 年由德国物理技术研究院在 BESSY 上完成定标,定标的波段范围为 164 ~ 400 nm,不确定度为 3.5%;编号为 A508 的  $MgF_2$  窗口氙灯于 1980 年由英国国家物理实验室在 Daresburg 同步辐射装置上完成定标;编号为 A 1 436 的石英窗口氙灯于 1994 年由本实验室在合肥国家同步辐射装置上完成定标。

表 1 在不同波长处参数测量的不确定度对测量存储环 BESSY 光谱辐射流  $E$  的相对不确定度的贡献

Tab. 1 contributions from the uncertainties of the measured parameters to the relative uncertainty of the spectral photon flux  $E$  of the storage ring BESSY at different wavelengths

在不同波长处的相对不确定度 $E/E$				
待测存储环参数	测试方法	测量结果	= 1000 nm	= 1 nm
电子能量 $E$	电子的共振消偏法	$E = (850.0 \pm 0.1) \text{ MeV}$	0.000 8 %	0.16 %
磁感应强度 $B$	核磁共振探针	$B = (1.592\ 6 \pm 0.000\ 2) \text{ T}$	0.000 8 %	0.08 %
电子电流 $J$	直流束流变压器	$J = (10.000 \pm 0.005) \text{ mA}$	0.05 %	0.05 %
光源大小 $y$	软 X 射线偏振仪	$y = (33.5 \pm 7.5) \mu\text{rad}$	0.002 %	0.25 %
距离 $d^{SR}$	延长切点到光阑距离	$d^{SR} = (6\ 468 \pm 5) \text{ mm}$	0.15 %	0.09 %
孔径光阑半径 $r$	显微镜测量	$r = (2.501 \pm 0.001) \text{ mm}$	0.08 %	0.05 %
发射角 $\theta$	测量同步辐射的垂直角分布	$\theta = (0 \pm 15) \mu\text{rad}$	0.001 %	0.11 %
总计			0.18 %	0.35 %

2.2 传递标准光源

160 ~ 400 nm 波段各国通用的光谱辐射传递标准光源为英国 Cathoden 公司制造的 V03 型或 V04 型熔石英窗口或氟化镁窗口的氙灯,结构如图 1 所示。氙灯的工作电流 300 mA,工作电压约 70 V,直热式阴极,发光点直径约 1 mm。

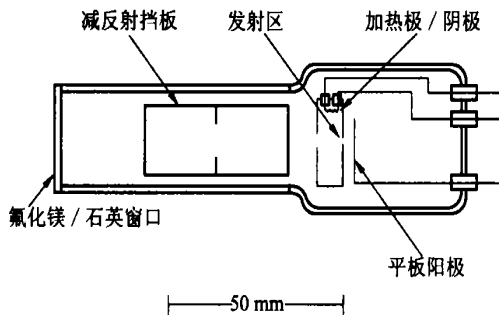


图 1 V03 型氙灯简图

Fig. 1 Schematic drawing of a Deuterium lamp V03

图 2 给出这种类型氙灯实测的光谱辐亮度径向分布,可以看出,在 170 ~ 290 nm 光谱区间,氙灯的光谱辐亮度径向分布差别很小 (< 1 %),当趋近 161.6 nm 谱线时,由于氙弧等离子体温度和电子密度的变化,氙灯光谱辐亮度径向分布与其他波长相比有较明显的改变<sup>[3]</sup>。

这种类型氙灯有很好的光谱辐亮度长期和短期稳定性。一般,在预热 30 min 后,稳定性可优于 0.03 %  $h^{-1}$ <sup>[3]</sup>。应注意,在真空环境下使用时,真空系统残余油蒸汽在紫外线作用下分解而成的污染物会聚集在窗口外表面,造成氙灯光谱辐亮度的衰减。研究发现:使用高纯度氧化铝抛

光氙灯的氟化镁端窗,能有效的去除污染物,恢复到原来的光谱辐亮度值。此外,氙分子电弧的放电位置对光谱辐射输出的影响很大。监测氙灯工作电压可以有效地判定氙灯工作状态的稳定性,工作电压的变化(约几 V)预示着放电模式有所改变,应关灯重开,当然这种情况并不多见。

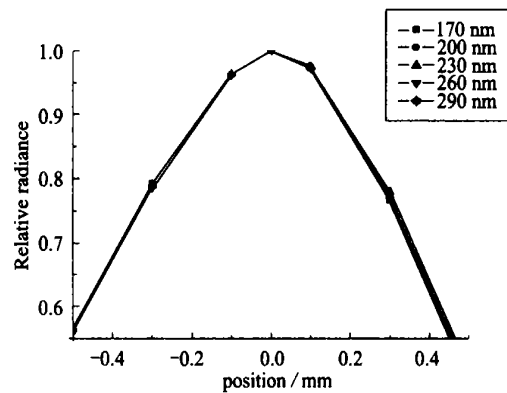


图 2 A1436 在几个波长处对 0.9 mm 孔径的相对径向分布

Fig. 2 Relative radial distribution at several wavelengths of A1436 for a centralized circular area of radius R ( 0.9 mm)

3 实验装置

紫外-真空紫外标准光源比对工作在本实验室高精度光谱辐射计装置上进行,该装置由前置光学系统、Mcpherson 2253M5 紫外-真空紫外单色仪、探测器、电子学-微机系统及涡轮分子泵真空系统组成,如图 3 所示。

前置光学系统由一平面镜和一凹面镜组成,将氙灯源 1:1 成像到 Mcpherson 3 m 单色仪的入射狭缝上。氙灯通过 X-Y 调节架连接到真空系统中,调节架的调节精度为微米( $\mu\text{m}$ )级,光源可以精确的沿其光轴的垂向移动。视场光阑是置于单色仪入射狭缝处的 0.9 mm 孔,孔径光阑直径 17 mm 置于凹面镜上,凹面镜焦距 1 m,这样形成的接受辐射的立体角是  $2.27 \times 10^{-4}$  sr。

Mcpherson 2253M5 真空紫外单色仪工作波段为 50 ~ 300 nm,所用凹面光栅曲率半径为 3 m,刻线密度 1 200 lines/mm,刻线面积  $65 \text{ mm} \times 104 \text{ mm}$ ,光栅在 220 nm 处闪耀,波长准确度  $\pm 0.01 \text{ nm}$ ,波长重复性 0.01 nm,150 nm 处的光谱分辨率为 0.002 nm,杂光系数  $5 \times 10^{-3}$ ,单色仪由涡轮分子泵抽空,工作时的真空度可达  $10^{-4}$  pa。探测器是美国 EMR 公司的 541-05M-13 型蓝宝石窗口光电倍增管。在计算机控制下完成波长扫描、数据处理、最终输出测试结果。

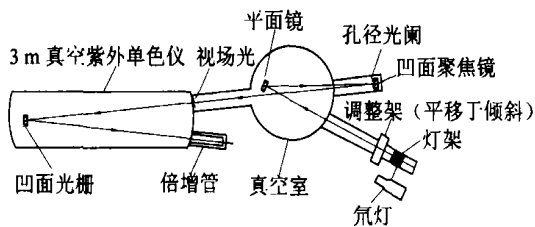


图 3 紫外-真空紫外高精度光谱辐射计试验装置简图  
Fig. 3 Schematic drawing of UV-VUV spectroradiometric system

## 4 比对与误差分析

### 4.1 比对

本次比对实验以德国物理技术研究院定标的 V 0195,英国国家物理实验室定标的 A508 及本实验室定标的 A 1436 互为标准相互比对而完成。比对光源的光谱分布  $D^P(\lambda)$  可从待测光源和标准光源的信号  $D^I(\lambda)$  和  $S^I(\lambda)$  以及标准光源的光谱辐射分布  $S^P(\lambda)$  得到:

$$D^P(\lambda) = S^P(\lambda) D^I(\lambda) / S^I(\lambda), \quad (2)$$

真空系统极其微量的残余油蒸汽对反射镜和光栅表面的污染及光电倍增管探测器光电灵敏度的漂移造成光谱辐射计系统光谱响应度的衰减。测试数据表明:光谱辐射计系统光谱响应度随时间衰变,且衰变率与波长有关。如果光谱辐射计

系统保持真空状态下 3~5 天后再使用,衰变率将大大降低( $\sim 0.5\% \text{ h}^{-1}$ )且衰变率变得几乎与波长无关<sup>[5]</sup>。由于光谱辐射计系统光谱响应度衰变率随时间保持恒定,可通过特定比对步骤消除其影响:

A508-A1436-A508-V0195-A508

由于衰变率是时间的函数,因此在测试中应控制每支灯单次标定的时间,使每支灯的预热和测试时间都严格相同。自然,由于是在真空环境下使用,氙灯窗口外表面污染问题就凸显出来,为清除窗口外表面的污染物,在测量前应使用高纯氧化铝抛光窗口。

在单次标定中每支灯比对测量 3 次,以其平均值作为测量结果,实验中发现三次数据的标准偏差(RMS)一般在 0.6% 左右。以多次标定的数据的平均值作为比对的最终结果,有效地消除了随机测量误差。

为验证上述方法的有效性,重新校准光路并取 A508 与 V0195 进行比对

A508-V0195-A508

所得到的比对数据与上述结果偏差  $< 0.5\%$ ,证明氙灯比对精度性很好。A508 重新定标得到的光谱辐亮度绝对值与 V0195 的光谱辐亮度绝对值曲线见图 4。

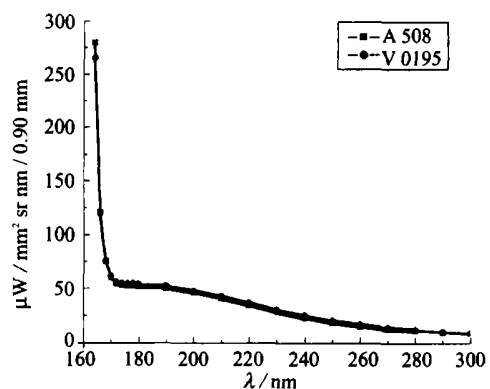


图 4 氙灯 A508 和 V0195 的光谱辐亮度  
Fig. 4 Spectral radiance of deuterium lamps A508 and V0195

A508, A1436 本次比对定标所得光谱辐亮度绝对值与分别在 NPL 和合肥定标所得光谱辐亮度相对值曲线见图 5 和图 6(在 250 nm 处归一)。

A508, A1436 两次标定数据的相对比例分别见表 2 与表 3。从图表中可以看出 A508 前后两次定标光谱辐亮度分布最大差异出现在 210 nm

为 2 % ,A1436 最大差异出现在 200 nm 为 5 %。

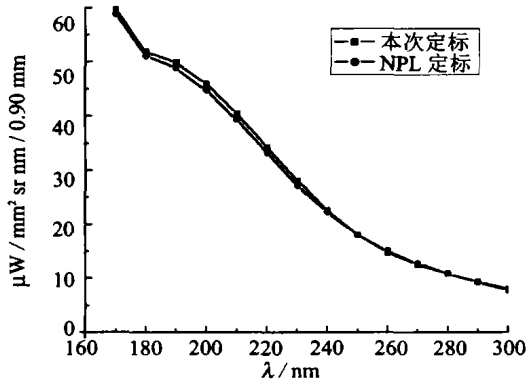


图 5 本次 A 508 光谱辐亮度标定和 NPL 标定值(在 250 nm 归一)

Fig.5 A 508 spectral radiance calibrated this time and by NPL normalized at 250 nm

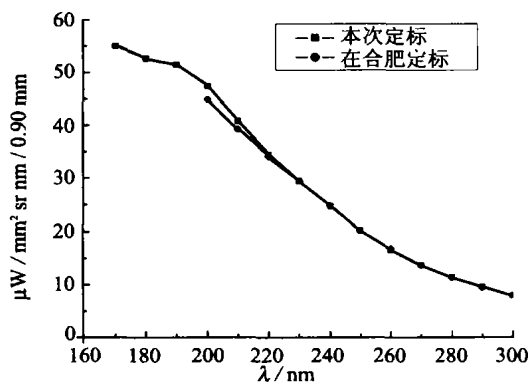


图 6 A 1436 光谱辐亮度标定和在合肥标定值(在 250 nm 归一)

Fig.6 A 1436 spectral radiance calibrated this time and by Hefei normalized at 250 nm

表 2 A508 标定数据的相对比例

Tab.2 The relative ratio of A 508 calibration data

/ nm	归一化比值
170	1.003
180	1.005
190	1.013
200	1.013
210	1.019
220	1.018
230	1.018
240	1.008
250	1.000
260	0.986
270	0.991
280	0.997
290	1.000
300	0.999

表 3 A1436 标定数据的相对比例

Tab.3 The relative ratio of A 508 calibration data

/ nm	归一化比值
200	1.046
210	1.029
220	0.999
230	0.991
240	0.999
250	1.000
260	0.983
270	0.989
280	0.999
290	0.998
300	0.981

#### 4.2 误差分析

德国 PTB 基于 BESSY 同步辐射定标传递标准氙灯 V0195 的相对不确定度为 3.5 % (1 水平);英国 NPL 定标氙灯 A508 的相对不确定度为 ±2.5 % (>200 nm)和 ±3.7 % (165 nm)<sup>[11]</sup>;基于合肥同步辐射定标氙灯 A1436 的相对不确定度为 ±8 %。

氙灯 A508、A1436 与 V0195 比对中测量误差如表 4 所示,最终的测量误差是单项测量误差的平方之和再开方。

表 4 氙灯 A508, A1436 和 V0195 相互比对中的测量误差百分比

Tab.4 Contributions to the measurement error of comparison between A508, A1436 and V0195

误差来源	误差百分比
衍射损失	0.8 %
探测器漂移、线性和重复性	0.5 %
波长精度、光源位置重复性、杂散光等	1 %
面积修正	1 %
总计	1.7 %

光源经前置光学系统 1:1 成像到单色仪的入射狭缝上,由于在孔径光阑处的衍射使像面上的辐射能量分布不均匀,像面光谱辐照度沿径向从中心向边缘减小。考虑到孔径光阑的衍射,光源像面中心照度为<sup>[14]</sup>:

$$N = \frac{r^2}{D_2^2} RB [1 - J_0^2(V_0) - J_1^2(V_0)], \quad (3)$$

其中,  $r$  为前置光学系统中凹面镜孔径光阑半径,  $D_2$  为凹面镜距像面距离,  $R$  为凹面镜反射率,  $B$

为光源亮度,  $V_0 = \frac{2-r_0}{D_2}$ ,  $r_0$  为入缝处视场光阑半径,  $J_0(V_0)$ 、 $J_1(V_0)$  为贝塞尔零级和一级函数。

若  $N = r^2 \frac{RB}{D_2}$  为不考虑衍射条件下的像面光谱辐照度, 则衍射损失  $= \frac{N-N}{N} = J_0^2(V_0) + J_1^2(V_0)$ 。当  $V_0 > 1$  时,  $\frac{2}{V_0} = \frac{D_2}{2r_0}$ 。衍射损失引起的测量误差如表 4 所示。

氙灯在直径约 1.1 mm 的发光面内光谱辐亮度分布不均匀(图 2), 平均的光谱辐亮度和观测面积有关。NPL 的早期研究发现<sup>[3]</sup>, 氙灯中心处辐亮度与其发光面的积分辐亮度的比值是随波长变化的, 他们将这一比值称为面积修正因子, 在 165~200 nm 这一比值的最大差异可达 10%。德国 PTB 定标 V0195 时使用 0.92 mm 视场光阑, 英国 NPL 定标 A508 时使用 0.3 mm 视场光阑, 本实验室对 A1436 进行标定时使用 0.9 mm 视场光阑。为了正确进行辐射标准氙灯光源的比对, 我们测量了每支灯的面积修正因子并将每支灯的定标数据转化为 0.9 mm 视场光阑的光谱辐射亮度。应用面积修正因子对定标结果带来的误差如表 4 所示。

当探测器的阳极电流在  $8 \times 10^{-7}$  A 时, 倍增管的漂移率大约 -1.5%  $h^{-1}$ ; 而当探测器的阳极

电流在  $2 \times 10^{-7}$  A 时, 倍增管的漂移率大约 -0.2%  $h^{-1}$ 。通过合理的设置倍增管高压和单色仪的出射狭缝宽度, 使探测器的阳极电流在  $1 \times 10^{-7}$  A 左右, 将倍增管的漂移率控制在 -0.2%  $h^{-1}$ 。由于测试过程中光电倍增管输出信号变化范围不大(不超过一个量级)探测系统线性可以控制在 0.2% 以内。估计探测器漂移和线性引起的测量误差为 0.5%。

最后, 由波长精度、光源位置重复性、杂散光等引起的测量误差约 1%。

## 5 结 论

建立了高精度光谱辐射计量系统, 研究了 164~300 nm 波段传递标准氙灯光源的光谱辐射特性, 进行了 3 个辐射标准光源紫外-真空紫外光谱辐射特性的比对。在 170~300 nm 由德国 BESSY 同步辐射定标的氙灯和由英国 Daresburg 同步辐射定标的氙灯相对光谱分布一致性好于  $\pm 2\%$ , 200~300 nm 由中国合肥同步辐射定标的氙灯和德国 BESSY 同步辐射定标的氙灯相对光谱分布一致性好于  $\pm 5\%$ , 在测量误差及各自的不确定度范围内, 这 3 个光谱辐射标准光源是一致的。

## 参考文献:

- [1] KEY P J, WARD T H. The Establishment of ultraviolet spectral emission scales using synchrotron radiation[J]. *Metrologia*, 1978, 14(1): 17-29.
- [2] KEY P J, PRESTON R C. Vacuum ultraviolet radiation scales: an accurate comparison between plasma blackbody lines and synchrotron Radiation[J]. *Appl. Opt.*, 1977, 16(9): 2477-2485.
- [3] KEY P J, PRESTON R C. Magnesium fluoride windowed deuterium lamps as radiance transfer standards between 115 nm and 370 nm[J]. *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, 1986, 13: 866-870.
- [4] SAUNDERS R D, OTT W R. Spectral irradiance standard for the ultraviolet: the deuterium lamp[J]. *Appl. Opt.*, 1977, 17(4): 593-600.
- [5] KEY P J, LI F T, NETTLETON D H. NPL Report Qu 65 April. 1983[Z].
- [6] FURST M L, GRAVES R M, MADDEN R P. Synchrotron ultraviolet radiation facility (SURF) radiometric instrumentation calibration facility[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2930-2935.
- [7] LEMKE D, LABS D. The Synchrotron radiation of the 6-GeV DESY machine as a fundamental radiometric standard[J]. *Appl. Opt.*, 1967, 6(6): 1043-1048.
- [8] PITZ E. Absolute calibration of light sources in the vacuum ultraviolet by means of the synchrotron radiation of DESY [J]. *Appl. Opt.*, 1969, 8(2): 255-259.
- [9] FISCHER J, KUHNE M, WENDE B. Spectral radiant power measurements of VUV and soft X-ray sources using the electron storage ring BESSY as a radiometric standard source[J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(23): 4252-4259.

- [10] STOCK M, FISCHER J, FRIEDRICH R, *et al.* Present state of the comparison between radiometric scales based on three primary standards[J]. *Metrologia*, 1993, 30: 439-449.
- [11] 唐玉国. 同步辐射、壁稳氩弧紫外-真空紫外光谱辐射标准的研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1995.  
TANG Y G. *Studies of spectral radiometric standards established using synchrotron radiation and wall-stabilized argon arc source in UV and VUV* [D]. Changchun Institute of Optics and fine Mechanics Chinese Academy of science, 1995. (in Chinese)
- [12] 刘颖, 李福田. 两种紫外-真空紫外光谱辐射标准的比对[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 21(4): 427-431.  
LIU Y, LI F T. The comparison between radiometric scales on two UV and VUV spectral emitting standards[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, 21(4): 427-431. (in Chinese)
- [13] ARNOLD D, ULM G. Electron storage ring BESSY as a source of calculable spectral photon flux in the X-ray region[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, 63(1): 1539-1542.

作者简介:邢进(1979-),男,辽宁鞍山人,现长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室在读博士研究生,主要研究方向为短波光学的研究.