

文章编号: 0253-2239(2006)04-0541-6

用合肥 800 MeV 同步辐射光源标定氘灯的光谱辐射亮度

邢 进^{1,2} 李福田² 王淑荣² 霍同林³ 周红军³ 刘 颖³

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, 长春 130031
2 中国科学院研究生院, 北京 100039
3 中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230021

摘要: 利用合肥 800 MeV 电子存储环同步辐射(HESYR)作为紫外-真空紫外光谱辐射测量的绝对标准,标定了传递标准-氘灯光源的光谱辐射亮度。采用德国国家物理技术研究院(PTB)的数据处理及不确定度分析方法,得到了两支氘灯在 115~300nm 波段的光谱辐射亮度数据,其相对定标不确定度为 12.1%。详细分析了相关参量对定标不确定度的贡献,指出辐射计量系统偏振特征量的不确定度贡献最大。在 164~300 nm 波段,德国国家物理技术研究院在 BESSY II 同步辐射装置上标定的绝对光谱辐射亮度值与本实验在中国合肥同步辐射装置上标定的绝对光谱辐射亮度值之间一致性优于±20%,在给定的不确定度范围内两光谱辐射标准定标结果一致。

关键词: 光谱辐射定标; 合肥 800 MeV 同步辐射; 紫外-真空紫外光谱辐射标准; 光谱辐射亮度; 氘灯

中图分类号: O536 文献标识码: A

Spectral Radiance Calibration of Deuterium Lamp Utilizing the Hefei 800 MeV Synchrotron Radiation

Xing Jin^{1,2} Li Futian² Wang Shurong² Huo Tonglin³ Zhou Hongjun³ Liu Ying³

1 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031
2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039
3 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230021

Abstract: The spectral radiance of transfer standard-deuterium lamp is calibrated using Hefei 800 MeV electron storage ring synchrotron radiation (HESYR) as an absolute UV-VUV spectral radiometric standard. The data processing and uncertainty analysis method of PTB is employed, in 115~300 nm the spectral radiance values of two deuterium lamps are obtained, and the overall uncertainty for D₂ lamp calibration is 12.1%. A detailed analysis of the contributions to this uncertainty points out that the major part is caused by the uncertainty of the polarization properties of the radiometric instrumentation. In the range of 164~300 nm the D₂ lamp absolute spectral radiant distribution obtained using HESYR China and that derived from BESSY II Germany have a discrepancy within ±20%. They are consistent within the given uncertainties.

Key words: spectral radiometric calibration; Hefei 800 MeV synchrotron radiation; UV-VUV spectral radiometric standard; spectral radiance; deuterium lamp

1 引 言

近二三十年,在原子、分子、凝聚态和表面物理等基础研究领域及生化分析、受控核聚变和空间物

理等技术研究领域^[1,2]的应用实践对紫外-真空紫外波段辐射计量提出了越来越高的要求^[3]。20 世纪 70 年代,世界各国相继开展了同步辐射特性研究并

作者简介:邢 进(1979~),男,辽宁鞍山市人,中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室博士研究生,主要从事短波光学方面的研究。E-mail: xingjin980530@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-01-14; 收到修改稿日期: 2005-06-22

建立了基于同步辐射的紫外-真空紫外光谱辐射国家标准。在这方面,德国国家物理技术研究院(PTB)的工作颇具特色。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量,在利用同步辐射作为光谱辐射绝对标准上取得了很大进展^[4~6]。这也使德国国家物理技术研究院成为国际上少数几个在紫外、真空紫外乃至软 X 射线波段能够提供利用同步辐射进行光源和探测器定标服务的计量机构。

国家同步辐射实验室二期工程中建设了专用的辐射计量光束线,近期,长春光机所开展了利用合肥 800 MeV 电子存储环同步辐射(HESYR)标定紫外-真空紫外波段辐射传递标准氙灯光源的工作,给出了定标相对不确定度,并与德国国家物理技术研究院在 BESSY II 的标定值进行了比对。本次标定为将合肥 800 MeV 同步辐射作为紫外-真空紫外光谱辐射标准提供了可靠的实验数据和结果。

2 计量光束线实验装置

合肥 800 MeV 同步辐射装置主体设备是能量为 800 MeV、平均流强为 100~300 mA 的电子存储环,用一台能量为 200 MeV 的电子直线加速器作注入器。二期工程建设的 Seya-Namioka 光束线是一条专用于光源定标的计量光束线,覆盖光谱波段 60~400 nm,由超环面前置镜、Seya-Namioka 光栅单色仪、限流孔径光阑、探测器及数据采集系统组成。超环面前置镜表面镀 Al+MgF₂ 膜,它距离存储环引出点 10 m,以 30° 的入射角将同步辐射聚焦到距离前置镜 483 mm 的单色仪入缝上。前置镜可以在镜室内绕垂直轴转动,将同步辐射或待测光源以相同的入射角成像,待标定光源到前置镜的距离较小,仅为 2 m,因此所成的像要比同步辐射的像远 120 mm。为此单色仪需沿光轴移动,以便使二者均可以成像于单色仪入射狭缝处。

Seya-Namioka 单色仪在 60~200 nm 波段采用 1200 L/mm 凹面光栅,120~400 nm 波段采用 600 L/mm 凹面光栅,光栅曲率半径为 1 m,入射与出射光夹角为 70°,波长分辨本领优于 500,波长重复性优于 0.1 nm。一个 $\Phi 0.3$ mm 的针孔光阑放置于单色仪入射狭缝前方。原理上,要求同步辐射与待测光源在定标过程中应当照明前置镜和光栅上的相同区位,实际上,由于两个光源与前置镜距离不同而有所差异。研究表明镜反射率的均匀性要比光栅

效率的均匀性好得多^[7],为此将 $4\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的限流孔径光阑安放在光栅前,仅保证同步辐射与待测光源辐射在光栅上的照明区位相同。探测器为日盲型 MgF₂ 窗口光电倍增管,配备 Keithley 6517A 静电计和 IE488 卡进行数据采集和传输。单色仪波长扫描和数据采集由 PC 机在 LABVIEW 软件控制下自动完成,图 1 为该光束线光路图。

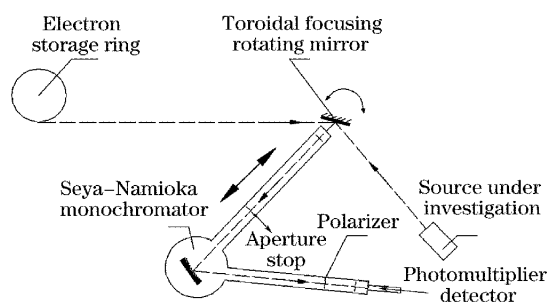


图 1 Seya-Namioka 光束线仪器及光路简图

Fig. 1 The schematic drawing of the instrumentation and optical path of the Seya-Namioka beam line

同步辐射是高度偏振的,而大多数的真空紫外光源辐射是非偏振的。前置镜的反射率,光栅效率以及光电倍增管量子效率都对偏振敏感。因此,引进起偏器并确定整个光谱辐射测量系统的偏振特性,以便正确评估系统偏振特性对比对定标的影响。为此,在 Seya 单色仪出射狭缝与光栅之间安装了起偏器,为了不影响成像,起偏器由两镀铝加氟化镁的平面反射镜和一 MgF₂ 晶体构成,利用布儒斯特角来实现起偏(见图 2)。由于材料的折射率是随波长变化的,起偏器只是在特定的单一波长实现完全起偏。该起偏器在 110~400 nm 消光比好于千分之一,起偏器可以绕光轴旋转 90° 来实现对平行和垂直偏振分量的选取。

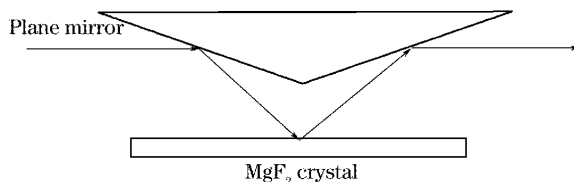


图 2 起偏器简图

Fig. 2 The schematic drawing of the polarizer

3 利用同步辐射标定 VUV 氙灯光源

3.1 原理

当精确测知电子能量、磁场强度、束流强度以及存储环相关几何参量后,可以根据 Schwinger 理论^[8]精确计算出同步辐射的光谱分布,因此同步辐

射可以用作紫外-真空紫外波段的光谱辐射标准。以表示为
从存储环弯转磁铁引出的同步辐射光谱辐射功率可

$$\Phi_{\lambda}^{\text{SR}}(\lambda) = \Phi_{\lambda}^{\text{SR},//} + \Phi_{\lambda}^{\text{SR},\perp} = \frac{2e\rho^2 Ib}{3\epsilon_0 \lambda^4 \gamma^4 d_{\text{SR}}} \left\{ \int_{\Psi_0 - a/2d_{\text{SR}}}^{\Psi_0 + a/2d_{\text{SR}}} [1 + (\gamma\Psi)^2]^2 K_{2/3}^2(\xi) d\Psi + \int_{\Psi_0 - a/2d_{\text{SR}}}^{\Psi_0 + a/2d_{\text{SR}}} [1 + (\gamma\Psi)^2] (\gamma\Psi)^2 K_{1/3}^2(\xi) d\Psi \right\}, \quad (1)$$

其中 $\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$, $\xi = \frac{2\pi\rho}{3\gamma^3 \lambda} [1 + (\gamma\Psi)^2]^{3/2}$, $\rho = \frac{E}{ecB}$, $\Phi_{\lambda}^{\text{SR},//}$ 和 $\Phi_{\lambda}^{\text{SR},\perp}$ 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, I 为电子束的电流强度, c 为真空中的光速, ϵ_0 真空中介电常量, B 为引出点切向的磁感应强度, $K_{1/3}(\xi)$ 和 $K_{2/3}(\xi)$ 为第二类修正贝塞尔函数, b/d_{SR} 为水平发散角, $\Psi_0 - a/2d_{\text{SR}}$ 到 $\Psi_0 + a/2d_{\text{SR}}$ 的区间代表了同步辐射的垂直发散角。图 3 绘出了在本文的实验条件下合肥同步辐射装置的光谱辐射功率分布。

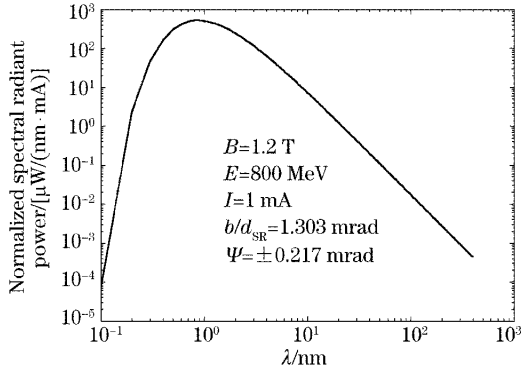


图 3 实验条件下合肥 800 MeV 同步辐射装置的光谱辐射功率分布

Fig. 3 Spectral radiant power distribution of Hefei 800 MeV synchrotron radiation facilities under the experimental conditions

由于是通过相同的光路,将探测器对氙灯的光电流 $i^{\text{D}_2}(\lambda)$ 和探测器对同步辐射的光电流 $i^{\text{SR}}(\lambda)$ 进行对比,再利用同步辐射光谱辐射功率 $\Phi_{\lambda}^{\text{SR}}(\lambda)$ 的计算值,就可以确定出传递标准氙灯光源的待知光谱辐射功率 $\Phi_{\lambda}^{\text{D}_2}(\lambda)$ 。用公式表示如下:

$$\Phi_{\lambda}^{\text{D}_2}(\lambda) = \frac{i_0^{\text{D}_2}(\lambda)}{i_0^{\text{SR}}(\lambda)} \Phi_{\lambda}^{\text{SR}}(\lambda) F_0(\lambda), \quad (2)$$

$$\Phi_{\lambda}^{\text{D}_2}(\lambda) = \frac{i_{90}^{\text{D}_2}(\lambda)}{i_{90}^{\text{SR}}(\lambda)} \Phi_{\lambda}^{\text{SR}}(\lambda) F_{90}(\lambda), \quad (3)$$

角标 0 和 90 表示单色仪的偏振片的起偏方向与水平方向平行或垂直。 $F_0(\lambda)$ 和 $F_{90}(\lambda)$ ^[7] 是与波长相关的函数,表示前置聚焦镜的偏振特性 $R(\lambda)$,单色仪探测

器系统的偏振特性 $S(\lambda)$ 和两光源辐射的偏振度 $P^{\text{SR}}(\lambda)$ 和 $P^{\text{D}_2}(\lambda)$ [对氙灯可认为 $P^{\text{D}_2}(\lambda)$ 为零]:

$$F_0(\lambda) = \frac{I + P^{\text{SR}}(\lambda) \cdot S + R \cdot [P^{\text{SR}}(\lambda) + S]}{I + P^{\text{D}_2}(\lambda) \cdot S + R \cdot [P^{\text{D}_2}(\lambda) + S]}, \quad (4)$$

$$F_{90}(\lambda) = \frac{I - P^{\text{SR}}(\lambda) \cdot S + R \cdot [P^{\text{SR}}(\lambda) - S]}{I - P^{\text{D}_2}(\lambda) \cdot S + R \cdot [P^{\text{D}_2}(\lambda) - S]}, \quad (5)$$

$S(\lambda)$ 和 $R(\lambda)$ 由下列公式给出^[7]:

$$S(\lambda) = \frac{i_0^{\text{SR}}(\lambda) - i_{90}^{\text{SR}}(\lambda)}{i_0^{\text{SR}}(\lambda) + i_{90}^{\text{SR}}(\lambda)}, \quad (6)$$

$$R(\lambda) = \frac{i_0^{\text{D}_2}(\lambda) - i_{90}^{\text{D}_2}(\lambda)}{i_0^{\text{D}_2}(\lambda) + i_{90}^{\text{D}_2}(\lambda)} \cdot \frac{1}{S}, \quad (7)$$

本实验中,用光谱辐亮度 L_{λ} [$\mu\text{W}/(\text{nm} \cdot \text{sr} \cdot \text{mm}^2)$] 来表示传递标准光源的辐射特性:

$$L_{\lambda}^{\text{D}_2}(\lambda) = \Phi_{\lambda}^{\text{D}_2}(\lambda) \frac{d_{\text{D}_2}^2}{M_{\text{D}_2} \cdot A_{\text{EPH}}}, \quad (8)$$

M_{D_2} 为测量氙灯光阑 F 在聚光反射镜上的投影面积; d_{D_2} 为氙灯到前置镜的距离; A_{EPH} 为针孔光阑在氙灯上的投影面积。将(2)式、(3)式代入(8)式,得到

$$L_{\lambda}^{\text{D}_2}(\lambda) = \frac{i_0^{\text{D}_2}(\lambda)}{i_0^{\text{SR}}(\lambda)} \Phi_{\lambda}^{\text{SR}}(\lambda) F_0(\lambda) \frac{d_{\text{D}_2}^2}{M_{\text{D}_2} \cdot A_{\text{EPH}}}, \quad (9)$$

$$L_{\lambda}^{\text{D}_2}(\lambda) = \frac{i_{90}^{\text{D}_2}(\lambda)}{i_{90}^{\text{SR}}(\lambda)} \Phi_{\lambda}^{\text{SR}}(\lambda) F_{90}(\lambda) \frac{d_{\text{D}_2}^2}{M_{\text{D}_2} \cdot A_{\text{EPH}}}. \quad (10)$$

3.2 传递标准氙灯光源定标

2003 年 5 月德国国家物理技术研究院在柏林电子存储环 BESSY II 上为本实验室标定了编号为 V0195 的 MgF_2 窗口氙灯,给出 164~400nm 的光谱辐亮度。尔后,该氙灯与经英国国家物理实验室(NPL)在 Daresburg 同步辐射上标定的编号为 A508 的 MgF_2 窗口氙灯和本实验室 1994 年在合肥同步辐射标定的编号为 A1436 的石英窗口氙灯进行了相互比对,比对结果表明这三只灯在各自给定的不确定度范围内相一致^[9]。

本文报道以 A508 和 A1436 为传递标准光源在合肥同步辐射上标定它们的绝对光谱辐亮度的实验结果,并与德国国家物理技术研究院的标定值作比较。

合肥 800 MeV 同步辐射装置(HESYR)电子存储环平均束流强度为 100~200 mA,束流寿命 8 h 左右,形成的光谱辐射功率比氙灯的光谱辐射功率高 2~3 个量级,直接应用对光学系统的损坏将很严重。实验中发现,若将束流强度降至 3 mA 以下,此时光谱辐射功率只为氙灯的 5~6 倍,平均寿命可以达到 50 h。在进行光谱辐射测量的过程中,束流强度仅降低 3%~5%,这将有助于提高辐射测量精度。进一步,如果在每次测量同步辐射时记录束流强度并对测得的光电流进行归一化处理,可以将束流强度衰减对辐射计量的影响降至最小约为 0.2%。

真空系统极其微量的残余油蒸气对反射镜和光栅表面的污染及光电倍增管光电灵敏度的漂移会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,衰变率约为 $0.2\% \text{ h}^{-1}$ 。由于光谱辐射计系统光谱响应度衰变率随时间保持恒定,我们可通过特定比对步骤消除其影响:

$$\text{SR-D}_2\text{-D}_2\text{-SR-D}_2\text{-D}_2\text{-SR}$$

由于衰变率是时间的函数,因此在测试中应控制单次标定的时间,使每支灯的预热和测试时间都严格相同。氙灯窗口外表面聚集的污染物会影响它所发射的能量,造成标定结果的偏差,在测量前使用高纯氧化铝抛光窗口就能有效清除污染物,恢复到原来的辐亮度值。

在单次标定中每支灯比对测量 4 次,以其平均值作为测量结果,实验中发现 4 次数据的标准偏差(RMS)一般在 0.5% 左右。以三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。

众所周知,氙灯在 165 nm 以下为分子谱,因此在 115~165 nm 需要较精细的光谱扫描,取 0.2 nm/step;165 nm 以上由于是连续谱,可以做间隔较大的光谱扫描,取 2 nm/step。氙灯 A1436 由于是石英窗口所以发射的光谱几乎都是连续谱,只作 2 nm/step 扫描就可以了。图 4 给出了 A508 和 A1436 经合肥同步辐射标定的光谱辐亮度曲线并和德国国家物理技术研究院的标定值作了比较。具体的标定数据见表 1 和表 2。德国国家物理技术研究院出具的氙灯(V0195)定标的相对不确定度($k=2$)为 $\pm 7\%$,由本实验室传递到 A508 和 A1436 后,相对不确定度约为 $\pm 10\%$ 。由于使用日盲型光电倍增管及光栅效率随波长变化等原因,300 nm 以上的光电流很弱,有效的定标只能到 300 nm。

表 1 氙灯 A508 光谱辐亮度

Table 1 Spectral radiance of D₂ lamp A508

Wavelength /nm	Calibrated	Comparison with V0195
164	278.0	251.7
166	120.5	130.0
168	74.8	90.3
170	59.6	71.2
172	54.2	65.5
174	52.6	60.7
176	52.1	58.5
178	52.1	57.3
180	52.0	57.6
190	50.0	66.8
200	46.0	44.6
210	40.6	36.9
220	34.3	31.6
230	28.1	25.8
240	22.6	21.2
250	18.0	17.5
260	14.7	14.9
270	12.4	12.8
280	10.7	11.1
290	9.2	9.7
300	7.9	9.0

表 2 氙灯 A1436 光谱辐亮度

Table 2 Spectral radiance of D₂ lamp A1436

Wavelength /nm	Calibrated	Comparison with V0195
170	54.7	56.7
180	52.8	50.3
190	51.5	52.0
200	47.4	46.1
210	40.8	39.1
220	34.5	33.9
230	29.5	29.2
240	24.8	24.8
250	20.2	21.0
260	16.6	17.4
270	13.7	14.6
280	11.5	12.4
290	9.6	10.8
300	7.9	9.4

从图 4 及表 1、表 2 中可以看出对氙灯 A508 和 A1436 来说,由合肥同步辐射直接标定出的光谱辐亮度及通过与德国国家物理技术研究院定标的 V0195 比对得到的光谱辐亮度一致性优于 $\pm 20\%$ 。至于 A508 在 190 nm 两次标定值有较大差异(34%)的原因可能是因为 A508 平时使用较为频繁所致,至于具体的原因则超出了本文的研究范围。

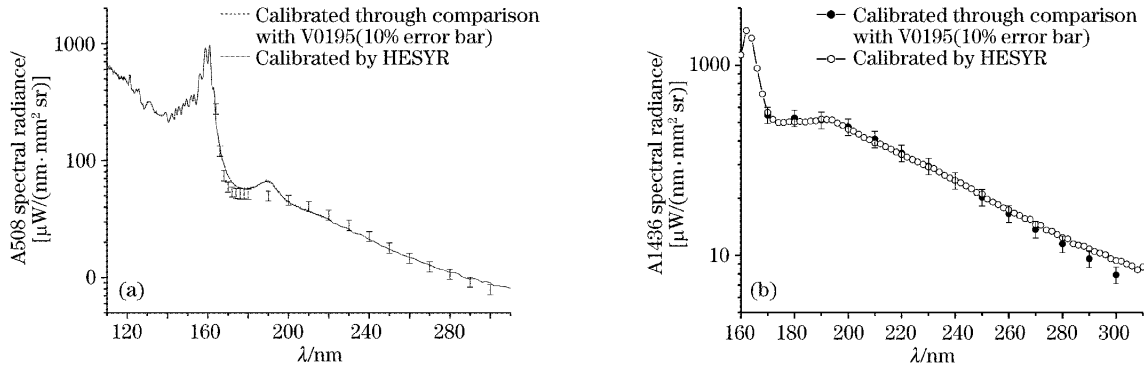


图 4 由 HESYR 标定与德国国家物理技术研究院定标的 V0195 比对得到的光谱辐射亮度曲线之比较。

(a) 氘灯 A508, (b) 氘灯 A1436

Fig. 4 Spectral radiance curves of deuterium lamp A508 (a) and deuterium lamp A1436 (b) calibrated by HESYR and derived through comparison with V0195 calibrated by PTB

4 不确定度估计

根据(9)式和(10)式 $L_{\lambda}^{D_2}$ 不确定度的平方可以表示为

$$\left(\frac{\Delta L_{\lambda}^{D_2}}{L_{\lambda}^{D_2}}\right)^2 = \left\{ \frac{\Delta[\Phi^{SR} F(\lambda) d_{D_2}^2 / (M_{D_2} A_{EPH})]}{\Phi_{\lambda}^{SR} F(\lambda) d_{D_2}^2 / (M_{D_2} A_{EPH})} \right\}^2 + \left[\frac{\Delta(i_{D_2}^{D_2} / i^{SR})}{i_{D_2}^{D_2} / i^{SR}} \right]^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2, \quad (11)$$

即本征不确定度的平方+特定不确定度的平方+由单色仪光栅效率的变化引起的不确定度的平方。

4.1 本征不确定度

$\Phi_{\lambda}^{SR} F(\lambda) d_{D_2}^2 / (M_{D_2} A_{EPH})$ 的不确定度表达式是由与待测光源无关的参量组成,故称作本征不确定度。

现逐项讨论,在 115~300 nm, Φ_{λ}^{SR} 的计算相对不确定度由以下几个参量的相对不确定度构成: 1) 基本常数 m_0, e, c, ϵ_0 ; 2) 贝塞尔函数的近似; 这两项对 Φ_{λ}^{SR} 的计算影响很小,贡献为 10^{-5} ; 3) 电子能量的测量 $E = (800 \pm 5)$ MeV, 磁感应强度的测量 $B = (1.2 \pm 0.009)$ T, 经(1)式计算此项对 Φ_{λ}^{SR} 的计算不确定度贡献为 9×10^{-3} ; 4) 归一化电子束电流强度 $I = (1 \pm 0.002)$ mA, 此项对 Φ_{λ}^{SR} 的贡献为 2×10^{-3} ; 5) 水平发散角 $b/d_{SR} = (1.303 \pm 0.005)$ mrad, 对 Φ_{λ}^{SR} 的贡献为 4×10^{-3} ; 6) 垂直发散角 $\Psi = \pm(0.217 \pm 0.002)$ mrad, 对 Φ_{λ}^{SR} 的贡献为 9×10^{-3} ; 7) 波长精度及重复性 $\Delta\lambda/\lambda = 1 \times 10^{-3}$, 对 Φ_{λ}^{SR} 的贡献为 3×10^{-3} 。故总计 Φ_{λ}^{SR} 的计算不确定度为各分项相对不确定度平方相加再开方,为 1.4×10^{-2} 。

$\Delta f(\lambda)/F(\lambda)$ 是对本征不确定度最主要的贡献,其中 $S(\lambda)$ 的不确定度是对其影响最大, $\Delta S(\lambda)$ 主要

由以下两部分组成:

1) $S(\lambda)$ 的完整表达式应为^[7]

$$S(\lambda) = \frac{i_0^{SR}(\lambda) - i_{90}^{SR}(\lambda) I + P^{SR} R}{i_0^{SR}(\lambda) + i_{90}^{SR}(\lambda) P^{SR} + R},$$

为了方便,确定 $S(\lambda)$ 时舍弃了后面的小量,这部分对 $S(\lambda)$ 的不确定度贡献约为 5%。

2) 起偏器的消光比。由于在 110~300 nm 同步辐射水平分量与垂直分量的比约为 300:1, 尽管消光比优于 0.1%, 在选取垂直分量时还会有约 20% 的水平分量进入探测系统。这部分对 $S(\lambda)$ 的不确定度的贡献约为 5%。

另外,同步辐射偏振度 $P^{SR}(\lambda) = (0.991 \sim 0.995) \pm 0.005$ 和前置镜偏振特性 $R(\lambda) = (-0.05 \sim -0.50) \pm 0.05$ 的计算不确定度对 $\Delta F(\lambda)/F(\lambda)$ 的贡献估计分别为 2% 和 5%。总计 $\Delta F(\lambda)/F(\lambda)$ 的不确定度为 9.1×10^{-2} 。

由于单色仪光栅效率的变化引起的不确定度 $\Delta\tau/\tau = 7\%$ ^[7], 这主要是由于待测光源与同步辐射距前置镜的距离不同导致照射到光栅的面积不同而引起的。当待测光源与同步辐射放置与前置镜相同距离时, $\Delta\tau/\tau = 0$ 。

经以上分析可知,本征不确定度总计为 11.7%。

4.2 特定不确定度

(11)式中的特定不确定度主要由杂散光、探测系统的非线性、光路调整误差以及光学系统的衍射损失等组成(见表 3),这部分都与待标定光源有关,严格来说光源不同结果也不相同,应单独讨论。但由于所使用的传递标准氘灯光源都是英国 Cathoden 公司制造,同种型号之间无论是外形尺寸还是所发射的光谱差异都很小,故可作一般性讨论。

表 3 特定不确定度

Table 3 Specific uncertainty

Contributions to the relative uncertainty of $d(i^{D_2}/i^{SR})/(i^{D_2}/i^{SR})$	115~300 nm
Stray light	$(1\sim 2)\times 10^{-2}$
Nonlinearity and drift of the detecting system	$(1\sim 2)\times 10^{-2}$
Multiplier current i^{D_2}	5×10^{-3}
Multiplier current i^{SR}	1×10^{-2}
Alignment error of the optical path	1×10^{-2}
Diffraction loss of the optical system	1×10^{-3}
$d(i^{D_2}/i^{SR})/(i^{D_2}/i^{SR})$ (addition in quadrature)	$(2.1\sim 3.2)\times 10^{-2}$

同步辐射光源在极紫外和软 X 射线波段辐射能量非常高(见图 3),是所研究的紫外-真空紫外波段的 4~5 个量级,即使使用 MgF_2 滤光片仍然有较强的杂散光,尤其在 110~130 nm 波段,杂散光引入的不确定度见表 3。

实验中发现当探测器的阳极电流在 8×10^{-7} A 时,倍增管的漂移率大约在 -1.5% h^{-1} ;而当探测器的阳极电流在 2×10^{-7} A 时,倍增管的漂移率大约在 -0.2% h^{-1} 。通过合理的设置倍增管高压,使探测器的阳极电流最大值在 3×10^{-7} A 左右,可将倍增管的漂移率控制在 -0.2% h^{-1} 以内。由于测试过程中 115~200 nm 光电倍增管输出信号变化范围较大(约三个量级),探测系统非线性约为 2%,200~300 nm 由于信号变化范围不大(一个量级)估计探测器非线性约为 1% 以内。

在光束线中,使用前置镜将同步辐射与待测光源分别成像于单色仪入射狭缝,前置镜旋转的微小误差会对光电流比对带来影响(见表 3)。传递标准氙灯光源在定标时需重复安装,尽管由于在制造过程中每支氙灯都会有所不同,但由于氙灯光辐射输出对安装误差并不敏感^[10],因此通过调整径向与辐向位置,使氙灯有最大的光谱辐亮度输出,就可以保证氙灯位置的重复性。

光源经前置镜成像到单色仪的入射狭缝上,由于在孔径光阑处的衍射使光栅面上的辐射能量分布不均匀,其光谱辐照度沿径向从中心向边缘减小。衍射损失引起的测量不确定度^[11]如表 3 所示。

综合本征不确定度与特定不确定度,在 115~200 nm 利用合肥 800 MeV 电子存储环同步辐射标定氙灯光谱辐亮度的相对不确定度估计为 11.9%~12.1%。

5 结 论

研究了将合肥同步辐射作为紫外-真空紫外光谱辐射绝对标准的可行性,利用合肥 800 MeV 电子存储环同步辐射标定了两只氙灯的光谱辐亮度,给

出了定标相对不确定度。在 164~300 nm 波段由德国国家物理技术研究院在 BESSY II 同步辐射装置上定标的氙灯绝对光谱分布值和合肥同步辐射装置上定标的氙灯绝对光谱分布值之间一致性好于 $\pm 20\%$,在各自给定的不确定度范围内相一致。

致谢 中国计量院薛凤仪研究员以及长春光机所唐玉国研究员、卢启鹏研究员的热心帮助。

参 考 文 献

- Li Zhigang, Wang Shurong, Li futian. Development of Fourier transform spectrometer for ultraviolet and vacuum ultraviolet regions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 459~462 (in Chinese)
李志刚,王淑荣,李福田. 紫外真空紫外傅里叶光谱仪的研制 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 459~462
- Gao Hongyi, Chen Jianwen, Xie Haonglan. Experimental results of X-ray diffraction enhanced phase contrast imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1151~1152 (in Chinese)
高鸿奕,陈建文,谢红兰. X 射线衍射增强相衬成像的实验结果 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1151~1152
- Li Zahozhou, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu. Temperature characteristics research of high-precision spectral radiometer standard detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 401~407 (in Chinese)
李照洲,郑小兵,吴浩宇. 高精度光谱辐射标准探测器的温度特性研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 401~407
- M. Stock, J. Fischer, R. Friedrich *et al.*. Present state of the comparison between radiometric scales based on three primary standards [J]. *Metrologia*, 1993, **30**: 439~449
- D. Arnold, G. Ulm. 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
- M. Richter, J. Hollandt, U. Kroth *et al.*. Source and detector calibration in the UV and VUV at BESSY II [J]. *Metrologia*, 2003, **40**: S107~S110
- J. Fischer, M. Kuhne, B. Wende. 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
- J. Schwinger. On the classical radiation of accelerated electrons [J]. *Phys. Rev.*, 1949, **75**: 1912~1921
- Xing Jin, Wang Shurong, Li Futian. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(4): 373~379 (in Chinese)
邢进,王淑荣,李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对 [J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(4): 373~379
- R. D. Saunders, W. R. Ott, J. M. Bridges. Spectral irradiance standard for the ultraviolet; the deuterium lamp [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **17**(4): 593~600
- W. R. Blevin. Diffraction losses in radiometry and photometry [J]. *Metrologia*, 1970, **6**(2): 39~44