

文章编号: 0253-2239(2006)04-0547-4

用同步辐射源建立紫外及真空紫外光谱区 光谱辐射度基准的研究

熊利民¹ 刘金元¹ 李 平¹ 薛凤仪¹ 杨永刚¹ 李大欣¹ 陈 赤¹ 周洪军² 霍同林²

(¹ 中国计量科学研究院光学处, 北京 100013
² 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230039)

摘要: 叙述了中国科学技术大学国家同步辐射实验室 800 MeV 电子储存环同步辐射的特性及作为光谱辐射亮度基准的原理和方法, 精确计算出同步辐射光源光谱功率空间分布, 并在计量学上将同步辐射“经典”理论与标定氘灯光谱辐射亮度结合起来, 对“同步辐射作为标准源进行光谱辐射功率计量”进行深入的研究。介绍了国家同步辐射实验室计量光束线站的装置, 该装置利用同步辐射波长范围宽、亮度高、辐射特性可精确计算等特点, 可用于标定传递标准氘灯的光谱辐射亮度(115~350 nm), 并进行了不确定度分析。并与德国技术物理研究院(PTB)标定的氘灯光谱辐射亮度进行比较, 两者符合。

关键词: 计量学; 紫外和真空紫外光谱辐射度基准; 同步辐射; 氘灯

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

Ultraviolet and Vacuum Ultraviolet Spectral Radiance Standard with Synchrotron Radiation Source

Xiong Limin¹ Liu Jinyuan¹ Li Ping¹ Xue Fengyi¹ Yang Yonggang¹ Li Daxin¹
Chen Chi¹ Zhou Hongjun² Huo Tonglin²

(¹ Optical Division, National Institute of Metrology, Beijing 100013
² National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230039)

Abstract: The characteristics of the 800 MeV electron storage ring of National Synchrotron Radiation Laboratory (NSRL, located in University of Science and Technology of China) are introduced. The theory and the method used to build spectral radiance standard with the synchrotron radiation are presented, and the spatial spectral power distribution of the synchrotron radiation source is calculated accurately. The classical theory of the synchrotron radiation and the spectral radiance luminance calibration of the deuterium lamp are related, and the spectral radiance power metrology using the synchrotron radiation as the standard source is studied extensively. The metrological beamline of NSRL with wide wave range, high luminance and accurately calculated radiance properties is presented, which can be used to calibrate the spectral radiance luminance of the deuterium lamp (1115~350 nm), and the uncertainty is analyzed. The calibration result is consistent with that of physical research institute (PTB) of Deutschland.

Key words: metrology; ultraviolet (UV) and vacuum ultraviolet (VUV) spectral radiance standard; synchrotron radiation; deuterium lamp

1 引 言

同步辐射(SR)是近 50 年来迅速发展起来的一种新型辐射源,是继电光源、X 射线源、激光之后的又一次对人类文明带来革命性推动的新辐射源。由于同步辐射波长范围宽、亮度高、辐射特性可精确计

算等特点,随着同步辐射技术的发展,利用同步辐射作为光谱辐射标准的研究必然会突破传统上用黑体建立光辐射计量基准的局限,而扩展到更宽广的光谱区,对若干新兴的科学技术和光学计量科学本身都会产生深远的影响。国内关于对同步辐射软 X

作者简介: 熊利民(1972~),江西靖安人,中国计量科学研究院副研究员,硕士,主要从事光探测器、同步辐射计量的研究。E-mail: xlmin@nim.ac.cn

收稿日期: 2005-04-28; 收到修改稿日期: 2005-08-03

射线的应用发展十分迅速^[1~3]。

2 同步辐射装置及计量光束线站 使用的合肥国家同步辐射实验室(NIM)计量

光束线是由 B₁₂ 转弯磁铁处引出的, 计量院与国家同步辐射实验室合作在光束线末端建成标准光源标定(115~350 nm)和标准探测器标定(10~100 nm)的实验站。其空间排列如图 1 所示。

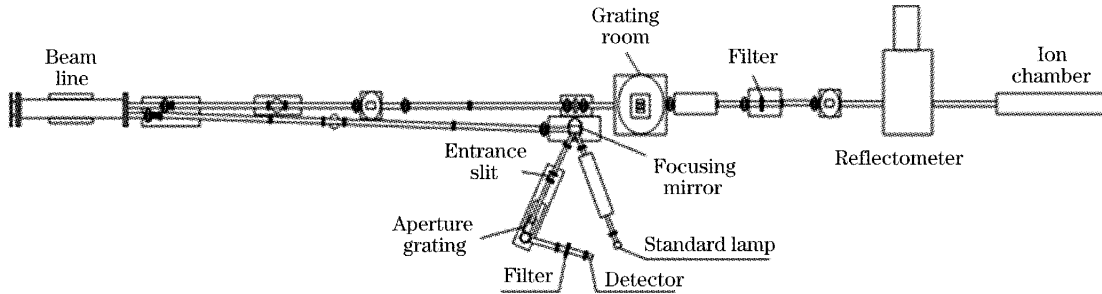


图 1 计量线站空间排列示意图
Fig. 1 Schematic view of the metrology beamline

3 光谱辐射亮度单位量值的复现装置、原理和量值传递方法

3.1 复现装置

标定氙灯光谱辐射亮度在正入射(标定光源)线上, 同步辐射由储存环轨道引出, 到计量站。先通过超环面前置镜^[2], 再经过濂谷-波冈(Seya-Namioka)单色仪, 视场光阑、孔径光阑、滤光片, 偏振片等, 投射在光电倍增管上, 如图 2 所示。

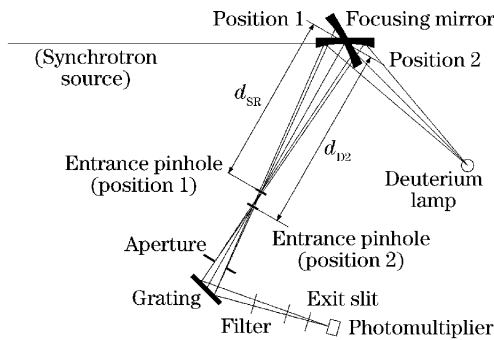


图 2 氙灯光谱辐射亮度测量示意图
Fig. 2 Schematic view of deuterium lamp spectral radiance luminance measurement

3.2 氙灯

同步辐射计量站选用氙灯(D2)作为传递标准。根据同步辐射经典理论^[4]可以知道: 波长为 λ 的光子, 在带宽为 kλ 范围内, 单位电子束流(mA), 单位水平发散角内(mrad), 在与电子轨道平面垂直夹角为 φ 时(mrad), 单位时间内(s), 平行偏振光和垂直偏振光的光子数(phps), 单位为 phs/(s · k · mA · mrad²)

$$N_{//} = 3.46 \times 10^6 \times (1 + x^2)^2 k\gamma^2 y^2 K_{2/3}^2(\xi), \quad (1a)$$

$$N_{\perp} = 3.461 \times 10^6 \times X^2 (1 + X^2) k\gamma^2 y^2 K_{1/3}^2(\xi), \quad (1b)$$

其中 $\gamma = 1957 \cdot E \text{ GeV}$, 为无量纲参量, $y = \lambda_c / \lambda = 18.64 / (B \cdot E^2) \lambda$ 为无量纲参量, $X = \gamma \cdot \phi / 1000$, $\xi = \lambda_c (1 + X^2)^{3/2} / (2\lambda)$, $K_{3/2}(\xi), K_{1/3}(\xi)$ 为贝塞尔函数。E 为储存环电子能量(GeV); B 为磁场强度(T)。

3.2.1 同步辐射光谱功率空间分布计算

同步辐射光谱功率在水平发散角度方向上是均匀的, 在垂直发散角度方向呈正态并与电子轨道平面为对称平面如图 3 所示。

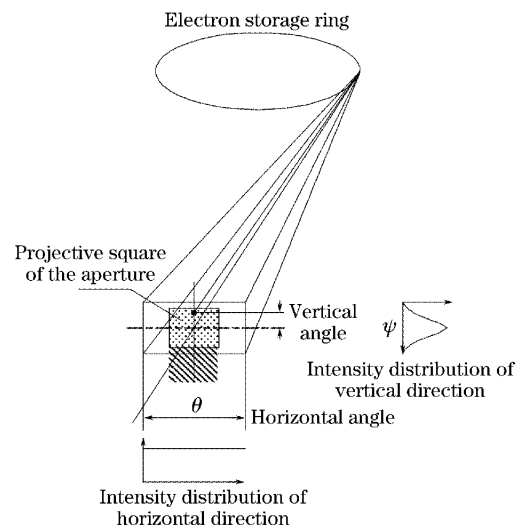


图 3 同步辐射出射示意图
Fig. 3 Emitting view of the synchrotron radiation

对(1a)、(1b)式进行积分, 可以知道, 波长为 λ 的光子, 在带宽为 kλ 范围内, 单位电子束流, 单位水平发散角内, 在与电子轨道平面垂直发散夹角 φ 范围内, 单位时间, 平行偏振光和垂直偏振光的辐射功率光谱密集度:

$$\phi_{\perp} = \frac{hc}{\lambda} \times \frac{1}{k\lambda} \times \int_0^{\psi} \phi_{\perp} d\psi, \quad (2a)$$

$$\phi_{\parallel} = \frac{hc}{\lambda} \times \frac{1}{k\lambda} \times \int_0^{\psi} N_{\parallel} d\psi, \quad (2b)$$

h 为普朗克常量, c 为真空中光速。

3.2.2 氙灯光谱辐射亮度的标定^[5]

如果将光电探测器接收到的同步辐射的光谱功率定义为 $\phi_{\lambda,SR}(\lambda)$, 产生的光电流为 $i_{SR}(\lambda)$; 光电探测器接收到的氙灯的光谱功率定义为 $\phi_{\lambda,DZ}(\lambda)$, 产生的光电流为 $i_{DZ}(\lambda)$ 。可知

$$i_{SR}(\lambda) = \int \phi_{\lambda,SR}(\lambda') S(\lambda') [1 + p_{rad}(\lambda') p_{SR}(\lambda')] \times R(\lambda - \lambda') d\lambda', \quad (3a)$$

$$i_{DZ} = \int \phi_{\lambda,DZ}(\lambda') S(\lambda') \times R(\lambda - \lambda') d\lambda', \quad (3b)$$

其中 $S(\lambda)$ 为光电探测器的光谱响应度, $R(\lambda)$ 为光谱仪的分辨函数。考虑到同步辐射光为偏振光, 引入同步辐射偏振度 $p_{SR}(\lambda)$, 辐射计的偏振系数 $p_{rad}(\lambda)$ 。

辐射计偏振系数 $p_{rad}(\lambda)$ 是用同步辐射标定氙灯过程中必须考虑的一个参量, 需要测量得出。根据斯托克斯(Stokes)公式, 辐射计的偏振系数 p_{rad} 为

$$p_{rad} = (V - p_{pol} \cdot p_{hw}) / (p_{pol} - V \cdot p_{hw}), \quad (4)$$

p_{hw} 指测量辐射的偏振度, p_{pol} 是偏振器的偏振效率。

在同步辐射测量过程中, 由于同步辐射的高偏振性, 存在 $p_{hw} = p_{SR} > 0.99 \approx 1$ 。

而测量氙灯时, 氙灯发出的是非偏振光, 因此 $p_{hw} = 0$ 。

由此在这两测量过程中(4)式可化为

$$p_{rad} = (V_{SR} - p_{pol} \cdot p_{SR}) / (p_{pol} - V_{SR} \cdot p_{SR}), \quad (5a)$$

$$p_{rad} = V_{DZ} / p_{pol}, \quad (5b)$$

根据(5a), (5b)两式, 辐射计偏振系数 p_{rad} 由下列公式得出:

$$p_{rad} = \frac{V_{DZ} - V_{SR}}{2V_{SR} p_{SR}} + \sqrt{\left(\frac{V_{DZ} - V_{SR}}{2V_{SR} p_{SR}}\right)^2 + \frac{V_{DZ}}{V_{SR}}}, \quad (6)$$

其中 p_{rad} 为同步辐射的平面偏振度。只要测量出偏振片在 $0^\circ, 90^\circ$ 两种位置时, 探测器分别测量到同步辐射和氙灯的光电流信号, 并记录当时储存环中的电子束流, 就可以得到辐射计偏振系数 p_{rad} 。

由于 $\phi_{\lambda,SR}(\lambda)$, $p_{rad}(\lambda)$, $p_{SR}(\lambda)$, $R(\lambda)$ 在整个带宽 $R(\lambda)$ 范围内可以认为是常数, 而 $\phi_{\lambda,DZ}(\lambda)$ 在大于 165 nm 的范围是连续的, 在带宽 $R(\lambda)$ 范围内也可以认为是常数(在小于 165 nm 情况下, 氙灯光谱辐射功率是线谱, 需要引入修正因子修正)。

由此, (3a), (3b)式可以转化为

$$i_{SR}(\lambda) = S(\lambda) \phi_{\lambda,SR}(\lambda) [1 + p_{rad}(\lambda) p_{SR}(\lambda)], \quad (7a)$$

$$i_{DZ}(\lambda) = S(\lambda) \phi_{\lambda,DZ}(\lambda) W(\lambda), \quad (7b)$$

其中 $W(\lambda)$ 为考虑到氙灯在带宽范围内的光谱辐射亮度和光谱辐射计响应度变化因子, 存在^[5]

$$W(\lambda) = 1, \quad \lambda > 165 \text{ nm} \quad (8a)$$

$$0.97 < W(\lambda) < 1.07, \quad \lambda \leq 165 \text{ nm} \quad (8b)$$

由于氙灯光谱功率和光谱辐射亮度具有如下关系:

$$\phi_{\lambda,DZ}(\lambda) = L_{\lambda,DZ}(\lambda) \Omega A_{DZ}, \quad (9)$$

其中 $L_{\lambda,DZ}(\lambda)$ 为辐射亮度, Ω 为接收的氙灯辐射立体角, 根据几何关系有

$$\Omega = \frac{F_{DZ}}{S_{DZ}^2} = \frac{F_{SR}}{S_{DZ}^2} \left(\frac{d_{DZ}}{d_{SR}}\right)^2, \quad (10)$$

其中 F_{DZ} 、 F_{SR} 分布为测量氙灯和同步辐射时计量光阑在前置镜上的投影面积在轴线垂直位置的分量, 也是计量光阑在前置镜上的投影面积在氙灯至前置镜轴线垂直位置的分量。 S_{DZ} 为前置镜到氙灯的距离, d_{DZ} 为测量氙灯时入射针孔到前置镜的距离, d_{SR} 为测量同步辐射时入射针孔到前置镜的距离, A_{DZ} 为入射针孔投影到氙灯上的面积, 存在如下关系:

$$A_{DZ} = A_{EPH} (S_{DZ} / d_{DZ})^2, \quad (11)$$

A_{EPH} 为入射针孔面积。代入(7)式并进行运算可以得出

$$L_{\lambda,DZ}(\lambda) = \frac{P(\lambda) \cdot \varphi W(\lambda) [1 + p_{rad}(\lambda) p_{SR}(\lambda)] \times \frac{i_{DZ}(\lambda)}{i_{SR}(\lambda)} \frac{d_{SR}^2}{A_{EPH}}}{F_{SR}}, \quad (12)$$

由于 $P(\lambda)$, φ , F_{SR} , $W(\lambda)$, d_{SR}^2 , A_{EPH} 都是固定实验条件下的已知量, 所以在实验中只需测量出(测量中要考虑同步辐射光是高度偏振的, 因此要测量偏振片在水平和垂直两种状态时的参量)以下参量: 光电倍增管不同波长下接收氙灯的电流信号 $i_{DZ}(\lambda)$, 光电倍增管不同波长下接收同步辐射的电流信号 $i_{SR}(\lambda)$ 。并同时记录测量同步辐射电流时同步辐射的起始电子束流 I_{start} , 终了电子束流 I_{end} (认为电子束流在测量过程时段是线性衰减的, 则可以计算出在测量光电倍增管信号的同步辐射电子束流)。计算出同步辐射的平面偏振度 $p_{SR}(\lambda)$, 计算辐射计的偏振系数 $p_{rad}(\lambda)$ 。

确定上面各个参量后, 可以通过(13)式计算出氙灯辐射亮度的光谱密集度。

4 测量结果及不确定度分析^[7,8]

4.1 测量结果

氙灯光谱辐射亮度测量结果见图 4。

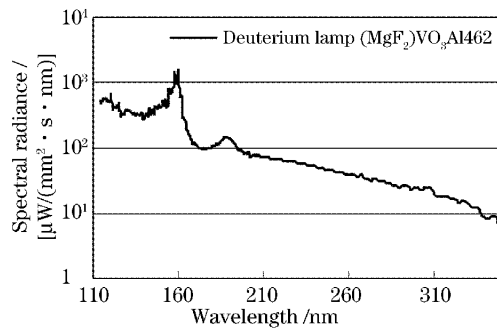


图 4 氘灯辐射亮度

Fig. 4 Spectral radiance luminance of the deuterium lamp

与德国技术物理研究院(PTB)标过的氘灯的光谱辐射亮度测量结果的比较见表 1(鉴于氘灯的使用寿命,为避免过长时间使用,下表中氘灯与上面不确定度分析用氘灯不为同一只)。

表 1 测量结果的比较

Table 1 Comparison of the results

Wavelength /nm	NIM Data /[$\mu\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{nm})$]	PTB data	Deviation /%
138.0	341	331	2.9
147.8	397	391	1.4
155.2	794	716	11.0
158.0	1420	1305	9.0
160.0	1560	1398	11.0

可以看出,在光谱辐射亮度值比较大的波长范围,NIM和PTB测量结果的偏差 $\leq 11\%$,根据文献[7,8]中方法,计量院测量氘灯光谱亮度不确定度分析可如图 5 所示。

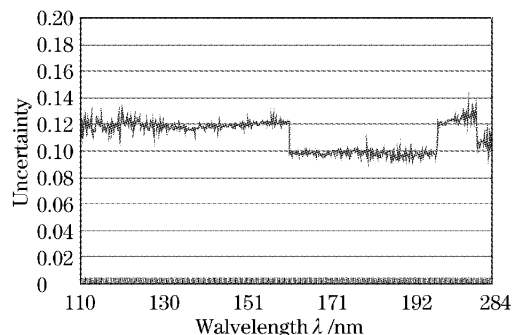


图 5 测量不确定度曲线

Fig. 7 The uncertainty curve

可以看出,氘灯辐射亮度 $L_{\lambda, D_2}(\lambda)$ 的测量不确定度小于 15%。

5 结 论

与国家同步辐射实验室合作研究,开展的计量站的建设,为我国今后开展这方面的研究工作提供了条件。为建立国家紫外、真空紫外光谱范围的辐射度基准打下了良好的基础。

利用同步辐射光源进行辐射计量标准的研究,在世界上也属于前沿课题,我们国家在这方面起步晚,要想赶上发达国家的水平,还需要做很多工作。

致谢 感谢长春光机所合作建立计量光束线的工作。

参 考 文 献

- Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 371~375 (in Chinese)
刘颖,李福田.若干材料紫外-真空紫外漫反射特性的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 371~375
- Lü Lijun. Study of ultraviolet and soft X-ray varied line-space plane grating monochromator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 141~144 (in Chinese)
吕丽军.极紫外、软 X 射线变线距平面光栅单色仪的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 141~144
- Sun Kexu, Yi Rongqing, Huang Tianxuan *et al.*. Reflectivity calibration of soft X-ray planar mirror in the BSRF[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 379~382 (in Chinese)
孙可照,易容清,黄天旭等.软 X 光平面镜反射率标定实验[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 379~382
- H. Winick, S. Doniach. *Synchrotron Radiation Research* [M]. New York: Plenum Press, 1980
- Erich Tegeler. Determination of the spectral radiance of deuterium lamps using the storage ring Bessy as a primary radiometric standard [J]. *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research*, 1989, **A282**: 706~713
- Metrology Department of General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Evaluation and Denotement Manual of Measurement Uncertainty* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2000 (in Chinese)
国家质量技术监督局计量司组编. 测量不确定度评定与表示指南 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2000
- Liu Jinyuan, Xue Fengyi. The standard ultraviolet (UV) and Vacuum UV lamp-deuterium lamp[J]. *Metrology Technology*, 2002, (3): 19~21 (in Chinese)
刘金元,薛凤仪. 紫外和真空紫外光谱辐射标准灯-氘灯[J]. *计量技术*, 2002, (3): 19~21