

165~350 nm 同步辐射与壁稳氩弧 光谱分布的比对

唐玉国 王淑荣 李福田

(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, 130022)

王秋平 周红军 张允武

(中国科技大学国家同步辐射实验室, 230026)

摘 要 以合肥 800 MeV 电子储存环同步辐射和壁稳氩弧作为初级标准光源, 在 165~350 nm 波段, 标定了石英窗口氩灯的光谱分布, 最大偏差为 11%。以石英窗口氩灯为传递标准光源, 在紫外及真空紫外辐射区完成了同步辐射和壁稳氩弧两种基准之间的对比。

关键词 氩弧, 同步辐射。

1 引 言

建立紫外-真空紫外及软 X 射线范围的光谱辐射标准是必不可少的。到目前为止, 许多国家如美、英、西德、日本等都相继开展了这方面的工作^[1~4], 作为紫外-真空紫外光谱辐射标准光源有同步辐射和壁稳氩弧两种。

自 1953 年 Maecker^[5] 提出壁稳弧工作原理并制成第一个壁稳弧以来, 壁稳弧作为一个稳定的等离子体源, 已广泛应用于确定跃迁几率、连续光谱发射系数, 斯塔克(Stark)加宽参量等光谱学工作。1960 年 Boldt^[6] 提出黑体谱线理论, 将壁稳弧的应用推广到紫外-真空紫外光谱辐射计量方面, 此后 Stuck 和 Wend^[7], Ott^[8], Preston^[9] 等人利用这一方法, 分别在西德物理研究院、美国国家标准局、英国国家物理实验室建立了紫外-真空紫外壁稳氩弧光谱辐射标准。

我国已有的光谱辐射计量标准是依高温黑体建立的光谱辐射亮度基准和光谱辐照度基准。在紫外-真空紫外区, 上述标准没有足够的辐射强度, 无论在精度方面还是在波长覆盖面方面已不能适应需要。用同步辐射和壁稳氩弧建立辐射标准是必要的。本文以石英窗口氩灯为传递标准光源, 在 165~350 nm 波段, 完成了 800 MeV 电子储存环同步辐射和壁稳氩弧光源之间的对比。

2 实验装置

在合肥国家同步辐射实验室建立的紫外-真空紫外测试装置如图 1 所示。单色仪为 1 m

正入射真空紫外谱仪, 工作波段为 100~250 nm, 波长扫描由计算机控制步进电机转动光栅完成。单色仪输出的光信号, 经过水杨酸钠窗口由光电倍增管接收。测试系统的真空与束线高真空环境用远紫外石英窗隔开, 在窗口与束线之间加一阀门, 使得石英窗口可以及时更换测试。漫透射板由 CaF_2 制成, 使得同步辐射和氩灯以相同的发散角照射到光栅上, 消除光栅不均匀性影响, 同时抑制同步辐射的偏振性和氩灯非偏振所

带来的测试误差。用此系统可完成 165~250 nm 范围的测量。对 230~350 nm 用 Czerny-Turner 型平面光栅单色仪代替真空紫外谱仪, 此波段范围的测试可在大气条件下完成。

图 2 给出了以壁稳氩弧光源作为标准标定氩灯光谱分布的实验装置。3 m 正入射 Mcpherson 2253 真空紫外光谱仪, 工作波段 100~300 nm, 更换光栅可工作在 250~600 nm。前置光学系统将氩灯和氩弧 1:1 成象于单色仪的入射缝上, 缝宽 0.2 mm, 高 0.2 mm, 通光孔径 $f/60$ 。壁稳氩弧光源由 8 片厚度为 2 mm 的限弧片构成, 中心弧道直径 3 mm, 工作气压 $1.75 \times 10^5 \text{ Pa}$, 最大工作电流 45 A, 电压 55 V。氩弧通过四级差分泵单元接到测试系统, 代替通常所用的窗口, 避免了窗口由于受强紫外线照射透过率下降带的的误差。

本文中的传递标准光源-石英窗口氩灯(英国), 具有尺寸小、功耗低、易操作, 在较大的立体角范围内辐射强度均匀, 在 165~350 nm 波段辐射是连续的等优点, 工作电流 300 mA, 发射面积为 $\phi 1 \text{ mm}$ 。用装置 2 标定的氩灯光谱分布为 $\phi 1 \text{ mm}$ 发射面上辐射均匀的中心一小部分的光谱辐射亮度, 要与用同步辐射标定的光谱辐照度分布进行对比, 还应将辐射亮度转化为辐射照度分布。用“平行孔”法完成了 200~350 nm 波段的辐射亮度向照度的转化。装置如图 3 所示。用源孔限制了有效放射面, 用场孔确定了立体角。

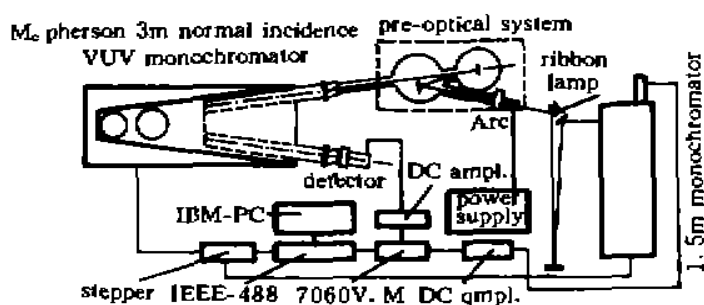


Fig. 2 The system for measurement of radiance and plasma diagnostics

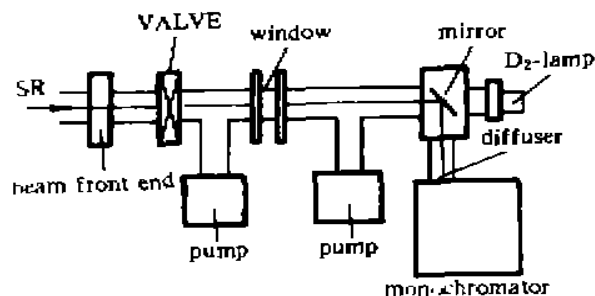


Fig. 1 System for intercomparison of synchrotron radiation and deuterium lamp irradiance

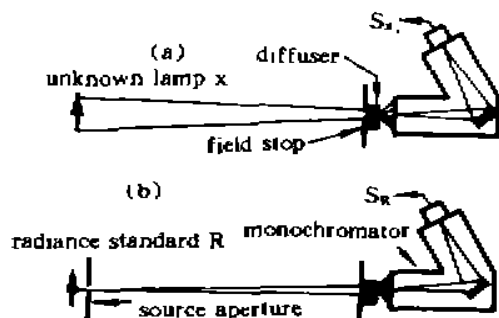


Fig. 3 The optical system used to effect a transfer from spectral radiance to spectral irradiance

3 实验结果与分析

在装置 1 中有:

$$E_D(\lambda) = \frac{S_D(\lambda)}{S_{sr}(\lambda)} P_{sr}(\lambda) \tau(\lambda) \quad (1)$$

式中 $S_D(\lambda)$, $S_{sr}(\lambda)$ 分别为测得氩灯和同步辐射的光谱信号, $\tau(\lambda)$ 为远紫外石英窗口透过率, 在实验前后分别测得。 $P_{sr}(\lambda)$ 为同步辐射理论光谱分布可依 Schwinger^[10] 公式计算得到

$$P_{\text{sp}}(\lambda) = 1.406 \times 10^{-3} IB^2 E^6 (\lambda c / \lambda_0)^3 \int_{\lambda_0/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\zeta) d\zeta \quad (2)$$

$\lambda_0 = 186.4 / (BE^2)$, 对于合肥电子储存环 $E = 800 \text{ MeV}$, $B = 1.2 \text{ T}$, $R = 2.222 \text{ m}$ 。表 1 给出了氙灯的标定结果。

Table 1. The spectral distribution of the deuterium lamp

wavelength (nm)	spectral irradiance (based on SR)	spectral radiance (based on Arc)	spectral irradiance (based on Arc)
165	1442	1333	
170	648	605	
180	632	590	
190	583	569	
200	542	529	521
210	480	468	474
220	426	401	410
230	368	356	341
240	309	285	289
250	256	235	240
260	209	197	204
270	173	165	161
280	142	138	136
290	119	116	117
300	100	100	100
310	87.5	88.7	88.2
320	75.6	75.8	75.5
330	65.8	65.3	64.8
340	57.9	56.8	56.8
350	50.6	49.9	50.0

壁稳氩弧作标准光源, 首先用光谱学方法诊断出在局部热力学平衡(LTE)状态下等离子体温度和电子密度。分别用 log-log 法和绝对强度方法诊断出工作气压为 $1.75 \times 10^3 \text{ Pa}$, 工作电流为 40 A 时等离子体温度为 12827 K, 电子密度为 $1.40 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。在局部热力学平衡状态下, 只考虑自由-束缚, 自由-自由跃迁时, 光性薄氩等离子体连续光谱辐射亮度 ($\text{Wm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\text{m}^{-1}$) 为

$$I_c(\lambda, T) = C_0 \frac{Ne^2(T)}{\lambda^2 T^{1/2}} I_\zeta(\lambda, T), \quad (3)$$

其中 $\zeta(\lambda, T) = [1 - \exp(-C_2/\lambda T)] (g_+/u_+) \zeta_B(\lambda, T) + G \exp(-C_2/\lambda T)$,

$$C_0 = (2\pi/3 \text{ Km}^3)^{1/2} (e^6/24c^2\pi^3\epsilon_0^3),$$

g_+ 为离子基态统计权重, 同 u_+ 为离子的配分函数, G 为自由-自由跃迁的 Gaunt 系数, $\zeta_B(\lambda, T)$ 为自由-束缚系数, l 为等离子体弧长, 用 Hofsass^[11] 给出的 $\zeta(\lambda, T)$ 值及用光谱学诊断得到的等离子体温度和电子密度, 由(3)式可计算出 40 A 时 165~350 nm 氩弧连续光谱辐射亮度分布。在实验装置 2 中有:

$$L_D(\lambda) = \frac{S_D(\lambda)}{S_A(\lambda)} I_c(\lambda), \quad (4)$$

这样在 165~350 nm 波段, 石英窗口氩灯的光谱辐射亮度由壁稳氩弧标定出来, 表 1 给出了实验结果。

在装置 3 中

$$S_R(\lambda) = L_D(\lambda) \alpha(\lambda) \gamma, \quad S_D(\lambda) = E_D(\lambda) \alpha(\lambda) \quad (5)$$

式中 γ 为由辐射亮度决定的几何因子, 包括氩灯有效发射面积, 入射到场孔光束的立体角及场孔的接收面积, 因此有

$$E_D(\lambda) = \gamma \frac{S_D(\lambda)}{S_R(\lambda)} L_D(\lambda) \quad (6)$$

原则上几何因子 γ 可以分别测定出来, 但这将会引入不必要的实验误差, 作者可以现有的光谱辐照度标准石英卤钨灯即可求得几何因子。在图 3(a) 中, 同时测量 1000 W 石英卤钨灯。在 340 nm 处有 $E_D(340) = [S_D(340)/S_q(340)] E_q(340)$, 这样

$$E_D(\lambda) = \frac{S_D(340) S_R(340) E_q(340) S_D(\lambda)}{S_q(340) S_D(340) L_D(340) S_R(\lambda)} L_D(\lambda) \quad (7)$$

表 1 给出了亮度向照度转化结果, 可以看出在 200~350 nm 波段, 亮度和照度的分布是一致的, 与文献[12]中的结果相同, 根据这一结果, 可以外推出 165~350 nm 的辐照度分布。

由表 1 可以看出, 分别以合肥 800 MeV 电子储存环和壁稳氩弧为基准标定的石英氩灯光谱辐照度分布, 最大偏差为 11%。产生偏差的原因大致有:

- 1) 在以同步辐射为基准的标定中, 测量前后远紫外石英窗口的透过率变化 1%;
- 2) 同步辐射光谱分布理论计算, 把电子束流认为是没有横向尺寸的点源, 是由单电子线性求和得到的。实际上束流截面是有一定的大小的;
- 3) 同步辐射是高度偏振的, 而氩灯是非偏振的, 虽然在测量系统中加入了一漫透射板, 对同步辐射的偏振特性有抑制作用, 但这种消偏振是不彻底的, 给测量结果引入一定的误差, 有待于进一步解决;
- 4) 在氩弧为基准的定标中, 氩等离子体连续辐射亮度的计算, 连续发射系数 $\zeta(\lambda, T)$ 的不确定度为 $\pm 8\%$, 直接影响了比对结果;
- 5) 测量系统的不稳定性影响为 0.5%。

结 论 完成了 165~350 nm 合肥 800 MeV 电子储存环同步辐射和壁稳氩弧等离子体辐射之间的对比, 偏差为 11%。用“平行孔”法完成了辐射亮度向辐射照度的转化。标定了石英窗口氩灯 165~350 nm 相对光谱分布。

参 考 文 献

- [1] F. Richie, B. Wende, Establishment of Spectral Irradiance Scale in the Visible and Near Infrared Using the Electron Storage Ring BESSY, *Metrologia*, 1986, 22(2): 75
- [2] J. Mervin Bridges, Development and calibration of UV/XUV radiometric sources. *Proc. SPIE*, 1992, 1764: 262
- [3] P. J. Key, T. H. Ward, The Establishment of Ultraviolet Spectral Emission Scales Using Synchrotron Radiation, *Metrologia*, 1978, 14(1): 17
- [4] W. R. Ott et al., XUV radiometric standards at NBS. *Proc. SPIE*, 1986, 680: 178
- [5] H. Maecker, S. Steinberger, Weiterentwicklung der Kaskadenbogenkammer für Hohe Leistungen. *Z. Angew.*

- Phys.*, 1967, **23**(1) : 456
- [6] G. Boldt, Das thermische plasma als intensitäts normalstrahler im wellen-langenbeereich von 1100 bis 3100 Å. *Space. Sci. Rev.*, 1970, **11**(4) : 728
- [7] D. Stuck, B. Wende, Photometric comparison between two calculabe vacuum ultraviolet standard radiation sources; synchrotron radiation and plasma black body radiation. *J. O. S. A.*, 1972, **62**(1) : 96
- [8] W. R. Ott, W. L. Wiese, Far ultraviolet spectral radiation calibrations at NBS. *Opt. Engng.*, 1973, **12**(3) : 86
- [9] R. C. Preston, Studies of a plasma temperature and radiation standard based on a wall-stabilized arc. *J. Q. S. R. T.*, 1977, **18**(3) : 337
- [10] J. Schinger, On the classical radiation of accelerated electron. *Phys. Rev.*, 1949, **75**(12) : 1912
- [11] D. Hofsaess, Emission continua of rare gas plasma. *J. Q. S. & R. T.*, 1978, **19**(3) : 339
- [12] R. D. Saunders, W. R. Ott, J. M. Bridges, Spectral Irradiance standard for the ultraviolet; the deuterium lamp. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(4) : 539

Spectral Distribution Comparison Between Synchrotron Radiation and Wall-Stabilized Argon Arc in 165~350 nm

Tang Yuguo Wang Shurong Li Futian

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, 130022)

Wang Qiuping Zhou Hongjun Zhang Yunwu

(Nation Synchrotron Radiation Laboratory, USTC 230026)

(Received 4 September 1994)

Abstract In this paper, the spectral distribution of deuterium lamp with a quartz window was calibrated based on the Hefei 800 Mev Electron Storage Ring and a wall-stabilized argon arc source in 165~350 nm. The maximum error is 11%. The deuterium lamp as a radiometric transfer, the comparison of synchrotron radiation and wall-stabilized argon arc plasma radiation was performed in 165~350 nm.

Key words argon arc, synchrotron radiation.