

英国国家物理研究所(NPL)的紫外和真空紫外光谱发射标准研究

陈 星 旦

由于等离子体物理、空间物理、光化学以及激光器的发展,需要在紫外和真空紫外光谱区进行精确的辐射测量。和其他光谱区一样,根据不同的情况,可以使用标准光源或标准探测器。紫外和真空紫外探测器标准,可以用绝对温差电偶和电离室技术,并已发展了相应的传递探测器。关于发射标准的建立,已经使用两种方法——同步辐射和壁稳弧。同步辐射的相对光谱发射特性已由 Schwinger 原理导出,决定于电子能量和轨道半径。这两个参数在专门设计的同步辐射装置中可以精确测量,因此同步辐射的光谱辐射度可以在一个很宽的波长范围内得到很高的准确度。过去十年,同步辐射已成为建立紫外和真空紫外光谱发射标准的很实用和很准确的技术。美国和西德以及英国(NPL),已经用同步辐射建立 160nm 以上的发射标准,采用氘灯作为传递标准,其准确度可达到 3—4%。

高温壁稳弧作为紫外和真空紫外光源标准,有两种不同的方法。一是高功率氢弧,工作在大约 20000K,其连续发射谱可以计算,在 124nm—360nm 可作为绝对发射标准。其光谱发射度的准确度,主要受有效弧长的误差的限制,可以达到 $\pm 5\%$ 。另一是壁稳氩弧,加入痕量气体,在真空紫外区产生光学厚共振线。这些谱线中心的辐射度为黑体限,可以根据温度来计算。这个方法的缺点是只能有少数的谱线可用。

在紫外和真空紫外,有两种传递标准光源:氘灯和微型氩弧。用这些光源和同步辐射或黑体限共振线进行校准,可以在 110nm 以内得到 $\pm 5\%$ 的准确度。但是,更短的波长,至今尚未有适当的光源,能作为传递标准。

用同步辐射建立光谱发射标准

在可见和近紫外,一个已知温度的黑体辐射,可用来校准其他标准光源和探测器,到 350nm 可以得到 1% 的准确度。但波长再短,辐射度降低很快,不能再使用。近年来,有许多国家应用同步辐射来建立光谱发射标准。因为同步辐射从可见光直到真空紫外和 X 线区,都具有可以理论计算的和很强的辐射。NPL 在 1971 年开始即进行同步辐射的辐射度测量,并用它建立 $\lambda < 400\text{nm}$ 的光谱发射标准。最初的工作在 Glasgow 大学的 340MeV 电子同步加速器上进行,1972 年底这台加速器关闭后,在 Daresbury 5 GeV 机器上进行^[1]。由于同步辐射存在偏振和垂直的角分布特性,用它作为标准时存在严重的实际上的问题。此外,强的紫外和 X 线辐射,要对光学元件引起辐照损伤。辐射的脉冲特性和有效发射点位置的不稳定,也都给测量带来困难。要成功的应用这种原理,在实验上需要非常仔细的注意事项。

由于贮存环中电子流的测量达不到足够的准确度,同步辐射作为绝对标准还很困难。目前尚只能用作相对光谱分布标准。

对辐射源本身参数和测量系统所引入的系统误差进行修正,用同步辐射校准的精度在

200nm 为 $\pm 2.5\%$ ，在 165nm 为 $\pm 3.7\%$ ^[1]。测量系统的误差包括镜子的反射率、窗户的透过率、杂光、探测器的线性、传递用灯的重复性等。

壁稳弧作为标准光源

壁稳电弧作为一个稳定的和可复现的紫外和真空紫外标准光源，已在许多国家应用。NPL 的壁稳氩弧^[2]由一组十七块相互绝缘的厚3毫米的水冷铜片组成，总长55毫米，中心孔直径3毫米，在钨钨阴极和空心铜阳极之间形成等离子体，温度 12,000—14,000K。温度大小决定于氩的压力、电流、等离子体柱直径。在最大弧电流75安培下使用时，光谱发射系数的稳定度在数分钟内为 $\pm 0.2\%$ ，1 小时内为 $\pm 0.5\%$ 。使用 100 小时后，需要清理电极的溅射物。

氩气用干冰冷却的分子筛陷阱和惰性气体净化器提纯，主要杂质含氮 4ppm，氧 3ppm，氢 5ppm，碳 $< 0.2\text{ppm}$ 。氩的高纯度是非常必要的，它影响弧的长时期重复性和辐射的光谱纯度，否则将出现杂质的光谱发射。弧的总压力为 $1.75 \times 10^5 \text{pa}$ ，压力稳定度 $\pm 2 \times 10^2 \text{pa}$ 。

电弧是这样点燃的：首先将弧体用扩散泵抽空，再充氩到 10^3pa 。这时，通过电极间的电容器放电，用一 500 伏 0.5 安培的辅助电源维持低电流弧。接着将氩压很快增加，然后加上主电源。弧电流 28—75 安培，相应的功率消耗 2.7—10 千瓦。弧电流在 4 小时内保持稳定 ± 0.02 安培。

壁稳氩弧作为辐射标准的原理是这样：在氩弧中引入 Kr，N₂ 和 CO₂ 痕量气体以产生黑体限共振线。所谓“黑体线”，就是当开始引入痕量气体时，该气体的共振谱线强度随气体引入量而增加，而当达到某一极限时，虽然痕量气体再增加，谱线的强度也不再增加。这时谱线中心的辐射度即等于该等离子体温度下黑体的辐射度。NPL 已在 95nm—200nm 得出 C, O, N 和 Kr 共 22 根黑体限共振谱线。

NPL 发展了以上两种独立的方法，建立紫外和真空紫外光谱发射标准，即同步辐射和氩等离子体中的黑体限谱线技术。曾对这两种方法进行比较，用四支氩灯作为传递标准，所得结果非常一致^[3]。如下表。

灯号	786	787	808	810		
电流 (mA)	250	300	300	250		
波长 (nm)	辐射度 ($10^{10} \text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1}$)				平均 A/S比	
165.7	A	8.88	11.46	9.53	10.37	1.014
	S	8.80	11.03	9.38	10.44	
	A/S	1.009	1.039	1.016	0.993	
167.0	A	6.39	8.28	7.12	7.07	0.990
	S	6.47	8.28	7.09	7.29	
	A/S	0.987	1.000	1.004	0.969	
174.3	A	4.28	5.18	4.62	4.43	0.997
	S	4.23	5.25	4.63	4.47	
	A/S	1.012	0.987	0.998	0.991	
193.1	A	4.38	4.93	4.63	4.47	0.998
	S	4.32	4.99	4.65	4.49	
	A/S	1.014	0.987	0.995	0.996	

表中: A——用氩弧校准的氙灯辐射度
S——用同步辐射校准的氙灯辐射度

MgF₂ 窗氙灯作为传递标准光源

氙灯用于 $\lambda < 370\text{nm}$ 的光谱辐射度传递标准已有许多年。因为它既使用方便, 又很稳定, 可复现性达 0.1% 水平, 老化率为百小时 2%。但过去用石英窗, 限制了它的使用下限约为 160nm。虽曾想用 MgF₂ 窗以便用于更短波长, 但因使用氯化银或环氧树脂封接, 在光谱中引入杂质谱线。近来 NPL 解决了 MgF₂ 与玻璃直接封接技术^{[4][5]}, 使得氙灯的使用范围延伸到 115nm。

氙灯的发射面积通常为 $\phi 1$ 毫米, 典型的工作电流和电压分别为 200 毫安和 70 伏。用直接加热阴极点燃。测量必须点燃 30 分钟后进行。灯经过 80 小时老化后, 发射稳定。在 260nm, 辐射度下降率为 $0.05\%h^{-1}$, 而在其他波长为 $0.03\%h^{-1}$ 。这是由于 MgF₂ 在 260nm 形成 F 色心。

MgF₂ 窗氙灯的结构和石英窗氙灯相似, 只是窗户离发射面远了些。

微型氩弧作为传递标准光源

在美国 NBS 和西德 PTB 已用 MgF₂ 窗微型氩弧作为 $\lambda > 114\text{nm}$ 的辐射度传递标准。NPL 认为带窗户的微型氩弧虽然使用方便, 但由于 MgF₂ 材料色心的形成 (260nm 带形成 F 色心, 370nm 带形成 M 色心) 以及电极等蒸发物质在窗户表面的不断积累, 严重的限制了它的应用。他们发展了带差分泵系统的微型氩弧^[7], 用于 92nm—200nm, 稳定性和可复现性大为提高。总功率消耗 < 2.5 千瓦, 辐射度较之 NBS 和 PTB 的约大一个数量级。

弧由八块水冷铜片组成, 铜片厚 2 毫米, 中心孔 $\phi 3$ 毫米。片与片之间用厚 2.25 毫米的聚四氟乙烯隔开。氩纯度 99.998%, 压力 $1.75 \times 10^5 \text{pa}$ 。工作前, 抽空到 10pa , 引入氩达到 $3 \times 10^3 \text{pa}$ 时, 通过电极间的 0.01 微法电容放电点燃。一辅助电源 (500 伏 0.5 安) 带 1 千欧姆镇流电阻保持低电流放电。当氩压增加到 $0.6 \times 10^5 \text{pa}$ 时接上主电源, 最大电流通常为 40 安, 消耗功率 2.3 千瓦。在正常工作下, 压力保持稳定 $\pm 0.2\%$, 电流稳定 $\pm 0.1\%$ 。在数小时以内, 辐射度稳定 $\pm 0.3\%$ 。多次点燃电弧, 辐射度的可复现性为 $\pm 0.5\%$ 。

由于弧的径向辐射度分布和差分泵的抽气孔道尺寸限制, 这种微型氩弧的相对孔径约 $f/60$ 。

参 考 文 献

- [1] P. J. Key, T.H. Ward, Metrology, 1978, 14, 17.
- [2] R. C. Preston, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1977, 18 337.
- [3] P. J. Key, R. C. Preston, Appl. Opt. 1977, 16, 2477.
- [4] G. H. C. Freeman et al., Opt. Acta 1977, 22, 875.
- [5] G. H. C. Freeman, P. J. Moore, J. Phys. E: Sci. Instrum., 1978, 11, 980.
- [6] P. J. Key, R. C. Preston, J. Phys. E: Sci. Instrum., 1980, 13, 866.
- [7] R. C. Preston et al., J. Phys. E: Sci. Instrum., 1980, 13, 1206.