

# 软X射线辐射测量

陈星旦 李福田

**摘要:** 在软X射线辐射测量中,和光度学一样,光源标准和探测器标准都同时存在,长春光机所八十年代初,研制了真空紫外光谱区的标准光源,近两年研制了软X射线标准探测器稀有气体电离室和传递标准探测器  $Al_2O_3$  光二极管。电离室光谱响应的稳定性和重复性好于 $\pm 2\%$ ;光谱辐射绝对定标的不确定度小于 $\pm 5\%$ 。 $Al_2O_3$ 光二极管光谱响应稳定性好于 $\pm 2\%$ ,数只二极管的一致性好于 $\pm 6\%$ 。

和光学中的光度学一样,辐射测量是软X射线科学技术中的重要基础之一。国外在六十年代开始进行此项研究,至今尚在不断完善中。最全面和最有代表性的是美国 NBS (现名 NIST) 和德国 PTB 的工作。

在光度学中,光强的测量,可以用标准光源,也可用标准探测器。例如,早期用铂点和金点黑体腔作光度基准,由白炽灯传递;近年来,发展了用绝对辐射计或自校准硅光电二极管作探测器标准,并有取代前者的趋势。

在软X射线区,光源标准和探测器标准两种办法都存在。目前国际上通用的是:(1)同步辐射作为标准光源,用氩弧和其他气体放电光源或激光等离子体传递;(2)电离室作为标准探测器,由光电二极管传递。

## 同步辐射

NBS 在六十年代中即开始研究用同步辐射作为标准辐射源并建造了专用装置。目前运转中的 SURFII, 能量 300MeV, 光谱辐照度的不确定度为 $\pm 2.5\%$  (at 100nm) 和 $\pm 7.4\%$  (at 4nm)。PTB 在柏林 BESSY 的辐射计量实验室建于八十年代中,有多条计量专用光束支线,能量 800MeV, 光谱光子通量的不确定度为 $2\%$  (at 5keV)。

## 电离室

NBS 最早在六十年代就发展了电离室作为绝对标准探测器。它最适用的光谱区是 25—102nm。若用于更短波长,需进行实验修正,目前已扩展到 5nm。电离室测量辐射的不确定度为 $3\%$ — $6\%$  (不同光谱区)。

## 传递标准光源

氩弧和其他气体放电光源,如空阴极光源、Penning 放电光源,都可作为传递用。但大都是线谱光源,适用的波长范围有限。近几年许多实验室发展了激光等离子体作为软X射线连续谱标准光源。PTB 的 800mJ Nd:YAG 激光系统,脉冲可复现性为 $5\%$ ,长时间稳定性 $10\%$ 。后来又发展了一种小型的 200mJ Nd:YAG 系统作传递光源标准。NBS 的 500

mJ Nd:YAG系统, W靶在20nm的辐射, 10个脉冲的不一致性在2%以内。

### 传递标准探测器

NBS研究过用于无窗光二极管的光阴极材料, 认为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  最稳定, 可用于波长 $>5\text{nm}$ 光谱区。经电离室标定, 不确定度约10%。PTB计划发展Si(Li)探测器用于更短波长的光谱区。

## 二

长春光机所自七十年代末开始真空紫外光谱辐射测量研究。八十年代先后由于软X射线天文望远镜和同步辐射光束线等任务的推动, 辐射测量工作向短波段发展。前几年主要研制了适用于不同工作波段的高稳定度标准光源, 包括壁稳氩弧光源、Penning 放电光源、空阴极光源等。近两年, 在国家自然科学基金的资助下, 研制了标准探测器电离室和传递探测器 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 光二极管。

### 1. 壁稳氩弧

电弧用限弧片加以限制和压缩, 可形成轴向温度均匀的高电子密度等离子体弧柱。由于壁稳氩弧辐射的稳定性和重复性都很高, 国外许多实验室将它用于光谱学基本参量测量和等离子体热学、电学性质的研究, 并已发展成为紫外—真空紫外标准光源。长光所八十年代初研制了适应不同用途的三种氩弧。2.5kW氩弧有八块限弧片, 弧长20mm, 10kW氩弧有十七块限弧片, 弧长60mm, 弧柱直径均为3mm。当电流70A时, 弧等离子体温度14 200K, 电子密度 $2.4 \times 10^{23}\text{m}^{-3}$ 。氩弧的光谱辐射稳定性、重复性好于0.3%, 名义尺寸相同的氩弧之间, 光谱辐射度的一致性好于 $\pm 1\%$ 。相对光谱分布的理论计算准确度在 $\pm 5\%$ 以内。带窗的氩弧, 适用的光谱范围受窗口材料限制。加之窗口材料易受油污染和强紫外辐照变色, 不宜用作高精度辐射测量。带差分泵的氩弧, 免除了这些限制, 工作波段可扩展到90nm。

### 2. Penning 放电光源

在气体放电通道的轴向施加一个强的均匀磁场, 在放电区中心形成的等离子体, 产生工作气体和电极材料的高次离子谱线。Penning 放电光源与一般气体放电光源相比, 有较好的短波特性和稳定性。选择不同的工作气体与阴极材料搭配, 可适用于不同的波段。短波段可延伸到10nm以下。光源稳定性由工作气压和电源稳定性及电极表面状况决定。Al IV 16.01nm谱线的稳定性好于5%小时。由于溅射, 光源在使用一段时间后要更换阴极。一对阴极的工作寿命与阴极材料及放电电流有关, 大约数十小时到数小时。阴极更换非常方便。

### 3. 空阴极光源

早在本世纪初, 就有人利用空阴极光源进行光谱学研究。在七十年代初, 将光源的阴极、阳极同时水冷, 空阴极采用溅射率极低的铜钨合金, 发展为稳定的短波段光源。空阴极光源较Penning光源有较好的光谱辐射稳定性, 但适用的波长区较长。当工作气体为Ar或He时, 可在20—200nm波段获得Ar I、Ar II 和 He I、He II很多强的原子、离子谱线。He II 30.4nm比 He I 58.4nm 谱线要强, 稳定性可达 $\pm 1\%$ 小时。这种光源结构简单、操作方便、可长时间连续稳定工作。PTB已采用它作为软X射线—真空紫外光谱辐射传递标准。

### 4. 稀有气体电离室

电离室是一种气体电离探测器, 是最早的核辐射探测器之一, 至今还应用于粒子的强度

和能谱测量、反应堆控制、剂量监测等。其工作原理是：入射粒子（光子）引起电离室气体电离，产生电子和正离子（离子对），在外加电场作用下，光电离产生的正负离子各自向收集极和排斥极运动，形成电流。通过测量电子流或离子流，可以得知光电离产生的离子或电子数目，进而得出入射的光子流强度。因此，作为软X射线的绝对强度探测器，必须保证电离室吸收所有波长的每一个光子，一个光子产生一个离子对。即是说，光电离效率必须为1。这样，不同工作气体，只适用于不同波长范围。长春光机所研制了真空紫外稀有气体单电离室、双电离室和软X射线稀有气体电离室，测定了HeI 58.4nm和HeII25.6nm谱线的绝对强度。电离室光谱响应的稳定性和重复性（读数在一小时内的变化）好于±2%；光谱辐射绝对定标的不确定度，经分析和比较核对，小于±5%。误差的主要来源为：光源起伏、电离室内气压分布和电场分布不均匀、残余气体影响、单色仪二级光谱引起的二次电离以及收集极电流（ $10^{-12}$ 安量级）测量误差等。

### 5. $Al_2O_3$ 光电二极管

原则上，许多材料都可用作软X射线光电二极管的阴极。选择材料的标准是量子效率的时间稳定性、空间均匀性以及光谱响应等。 $Al_2O_3$ 光电二极管作为软X射线传递标准探测器已有许多年了。近年在发展GaAsP一类内光电效应的固体光电二极管，它较之外光电效应的光电二极管有高得多的灵敏度。 $Al_2O_3$ 光电二极管阳极呈筒状，由不锈钢制成；阴极 $Al_2O_3$ 薄膜，制备在石英基底上，最佳膜厚15nm。长光所研制的光电二极管，光谱响应稳定性好于±2%，数只二极管的一致性（量子效率）好于±6%。工作电压25—30V，输出电流 $10^{-10}$ — $10^{-12}$ A。

## 三

国内在软X射线辐射测量方面，已初步开展了一些工作，但远不能满足有关科研项目的需要，更谈不上建立国家标准。从长远来考虑，应在合肥或北京建立同步辐射计量专用光束线。以此为基础，发展为辐射标准实验室。这需要国家专项投资。目前，应在长光所已有的工作基础上，予以充实提高。研究激光等离子体用作传递标准光源；研究电离室用于更短波长的辐射；研究GaAsP一类高灵敏度传递探测器；开展其他光源、探测器（如底片）和测试系统的定标工作。

## Soft X-ray Radiometry

Chen Xingdan Li Futian

### Abstract

For soft X-ray radiometry source and detector standards are required. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics supports a research and development program in the vacuum ultraviolet and soft X-ray region of the spectrum with the goal of providing radiometric

source and detector standards for measurement applications. The primary standard used in these calibrations is a rare gas ionization chamber. Calibrated  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diodes are available as transfer detector standards with a calibration uncertainty of  $\pm 6\%$