

软 X 射线绝对光强测量系统及其标定*

崔聪悟 崔明启

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

易荣清

(中国工程物理研究院核物理与化学所 成都 610003)

摘要 详细介绍了软 X 射线绝对光强测量系统的设计和结构及其标定的情况和结果. 测量系统包括电离室、监测(或待标定)探测器及其传动系统两部分, 可作为 50—2000eV 软 X 射线绝对强度测量的一级标准探测器. 并给出了系统的偏差.

关键词 软 X 射线绝对光强测量 电离室 标定

1 引言

随着软 X 射线(一般定义为 50—2000eV)学科的发展, 在软 X 射线显微术、农作物软 X 射线辐照、惯性约束聚变的软 X 射线探测器灵敏度标定、托克马克等离子体诊断用探测器标定、半导体材料改性辐照、类生物材料吸收测量等许多应用领域, 都要求对软 X 射线的绝对强度进行测量, 对同步辐射光束线的绝对辐射光强进行测量也是 X 射线测量及同步辐射在其它学科中应用的一个重要课题.

对 X 射线绝对光强测量的关键在于有一个标准探测器, 但是该能区是对 X 射线进行测量最困难的能区, 至今世界上还没有软 X 射线强度绝对测量的计量标准, 尤其是在 250—2000eV 能段.

如果有一个标准光源, 将探测器标定后就可以进行绝对测量. 如果没有标准光源, 则只能根据探测器原理对测量结果中各种可能的误差仔细研究、修正后, 建立一个标准探测器.

同步辐射是各种光源中可能成为标准光源的最佳光源. 它具有从可见光、软 X 射线到硬 X 射线的连续能谱分布, 并具有高准直性、高亮度、确定的脉冲时间结构等一系列优异特性, 尤其是它的光源特性可以精确计算, 使它成为最理想的标准光源. 但同步辐射光在经过单色器等一系列的光学元件后, 一些光学特性会发生变化, 作为标准光源还需要很

1997-02-04收稿

* 国家高技术863资助项目

多复杂的工作。在软 X 波段, 目前除了美国国家标准技术局 (NIST) 在 SURF II 同步辐射储存环上有 50—250eV 的标准同步辐射光束线外^[1,2], 还没有其它同步辐射的标准光源。

在探测器方面, 可以用于 X 射线绝对光强测量的如光电倍增管、正比计数器、盖革计数器及各种固体探测器等都存在窗口材料对软 X 射线的强烈吸收或量子效率问题, 不能作为一级标准探测器。而软 X 射线(限于长波软 X 射线)电离室较好地解决了这些问题, 它可以通过外推气压方法得到零气压下的绝对光谱辐射强度。同时气体电离室原理和结构都比较简单, 便于设计和对测量结果进行修正, 因此软 X 射线电离室成为公认的进行软 X 射线绝对光强测量的一级标准探测器^[3]。

鉴于对软 X 射线绝对强度进行测量的需要, 我们设计了一套以电离室为主的软 X 射线绝对光强测量系统, 在标定后, 可以作为一级标准探测器进一步标定其它传输探测器。该套装置将安装在北京同步辐射装置 (BSRF) 新建的 3W1B 光束线上。

2 测量系统工作原理

本测量系统的主要部分是一个工作在低压强范围的稀有气体电离室 (IC)。入射光通过电离室内的气体时, 光子被气体原子吸收, 气体原子被电离, 产生离子-电子对, 通过测量光电离子电流就可以得到入射光的辐射通量, 并由此得到光谱辐射强度。

入射到 IC 中的绝对光通量 I_0 与电离离子流 i 之间通过光电离产生率 γ 联系起来^[4]:

$$\gamma = \frac{\text{产生的总离子数}}{\text{被吸收的光子总数}} = \frac{i/e}{I_0[1 - \exp(-\sigma nL)]}, \quad (1)$$

其中 e 为电子电荷, σ 为气体的光吸收总截面, n 为气体的原子数密度, L 为吸收气体的长度。但在光子能量较高时, 由光电子引起的二次电离会对测量结果有较大影响, 需要在低气压下进行修正, 结果如下:

$$i = I_0 \gamma_0 e [1 - \exp(-\sigma nL)] [1 + (1 - \exp(-Qnl)) Y], \quad (2)$$

其中 γ_0 为气体多重电离度; Q 为电子散射截面; I 为光电子到达阳极的平均距离; Y 为有效电子产额。由式 (1)、(2) 可得

$$\gamma = \gamma_0 \{1 + [1 - \exp(-Qnl)] Y\}, \quad (3)$$

在低气压下可近似为

$$I_0 \gamma = I_0 \gamma_0 [I + (QY)n]^{[4]}, \quad (4)$$

将曲线外推至零气压可求得截距 $I_0 \gamma_0$, 如果已知气体在不同能量的 X 射线入射时的电离情况, 即可得入射光的辐射通量 I_0 。

3 测量系统的结构和工作方式

测量系统主要包括两个部分(图 1), 一部分是一个双电离室结构, 可以根据不同的实验要求作为单或双电离室来使用; 另一部分是监测探测器(或待标定探测器, 本实验采用硅光电二极管), 该探测器可以在整个电离室长度范围内移动, 这一部分主要用于对实验过程中同步辐射光束线出射光强稳定性的监测和能量标定及其它实验设想。

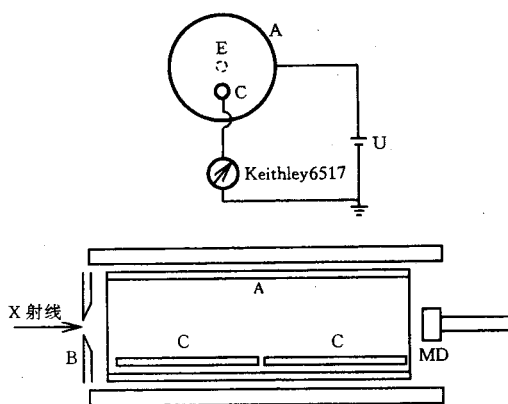


图 1 软 X 射线绝对光强测量系统示意图

A: 阳极; B: 光阑; C: 收集极; U: 电源; MD: 监测/待标定探测器; E: 电离区。

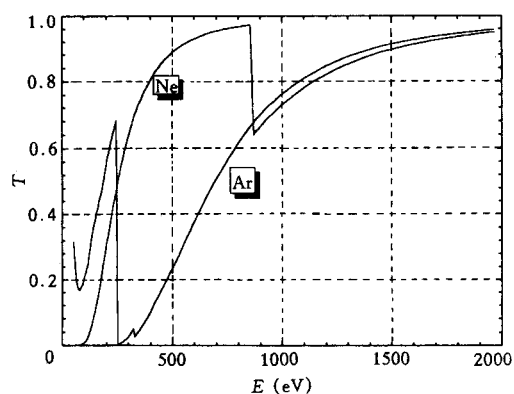


图 2 电离室工作气体对 X 射线的吸收

气压 10^2 Pa, 吸收长度 35 cm,

T 为透射率。

3.1 工作方式

由于软 X 射线的能量较低,大多数材料都对它有强烈吸收,尤其是在 200 eV 以下,很难找到一种合适的窗口材料。即使使用薄窗,也会由于吸收而使强度降低很多,使误差增大,测量的灵敏度降低。因此在该能区,尤其是在低能区,系统应工作在无窗状态,电离室内气体压强保持动态稳定。

3.2 工作气体

由于在吸收边附近,情况比较复杂,不易得到可靠结果,因此光强测量应避免吸收边。通过气体对软 X 射线吸收情况(图 2)的计算并考虑到吸收边的影响,选择氩气和氖气作为工作气体。

3.3 工作压强

由于系统主要工作在同步辐射光束线上,采用无窗方式时必须解决与光束线的真空匹配。考虑到真空差分问题,在压强高时,实现真空差分比较困难,而且在压强较高时由光电子引起的气体的二次电离或多次电离增多,使实验结果的修正困难。因此,系统的工作压强不宜太高,而压强过低测量灵敏度也会很低。该测量系统的真空前级是实验站真空,为 10^{-4} Pa。综合考虑,系统工作在 10^2 — 10^{-1} Pa 范围较为合适。可使二次电离尽量减少,对测量结果进行压强外推修正也比较容易得到可靠结果,同时通过真空差分系统实现与前级的真空匹配也容易一些。

3.4 系统结构

系统采用偏心圆筒式双电离室结构(图 1),收集极位于阳极内部偏离轴线位置。通过联接或断开两收集极连线决定采用单电离室还是双电离室,以适用于不同要求。电极间的电场分布可以求解,其截面电场分布如图 3。

3.5 监测系统

在系统中设置一个监测探测器,该探测器通过传送系统可以沿电离室轴线在其整个长度范围内移动,对电离室轴线上不同位置的光强以及对轴线上不同位置的压强一致性进行测量。另外,也可以用电离室作为一级标准探测器对其进行标定。

整个测量系统通过真空差分系统或薄窗与光束线实现真空匹配或隔离。为保持电离室内的压强和无窗要求, 在轴线位置设置入射光阑, 在该光阑上可以方便地安装或去掉窗口薄膜, 使系统既可以作为薄窗式又可以作为无窗式系统使用。通过压强控制系统、补气系统与分子泵机组配套保持工作气体压强稳定。

信号通过低噪声同轴电缆引出, 由 Keithley 6517 微电流计测量。阳极所需偏压也通过同轴电缆由 Keithley 6517 提供。压强用薄膜式压强计测量。

4 标定实验及结果

本套测量系统的标定在美国 Brookhaven National Laboratory 的 NSLS 同步辐射装置上进行。使用的光束线为 X8A 和 U3C, 其基本性能见文献 [5]。

实验内容有:

(1) 测定电离室轴线上压强均匀性。利用监测探测器及其传输系统测量系统电离区(即电离室轴线附近)的压强均匀性。

(2) 确定工作电压。测量系统在不同 X 光能量 E 、工作压强 p 情况下的坪曲线, 确定电离室的工作电压。

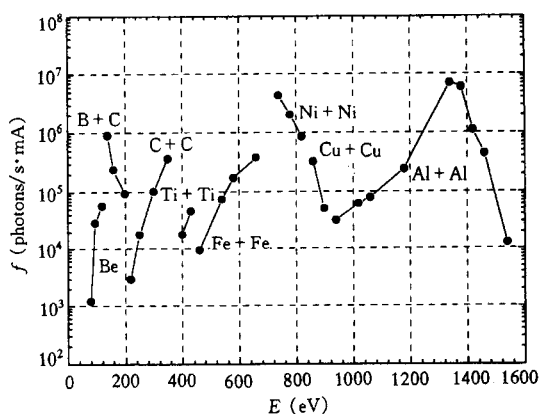


图 4 由软 X 射线绝对光强测量系统测得的光子通量。本结果在 Brookhaven National Laboratory 的 NSLS 同步辐射光源 U3C 束线上测得, 图中所示光通量 f 为在经过滤光片和薄 Si_3N_4 窗后探测器接收到的通量, 所标元素符号表示所用的滤光片。

光能量时随压强变化的量子效率。

测量误差:

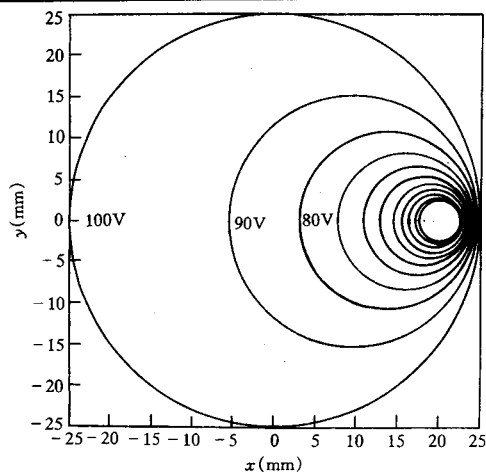


图 3 电离室截面上的电场分布
所加电压为 100V。

(3) 分别对能量、压强进行扫描, 测量 IC 和光电二极管 (PD) 分别在 IC 前面和后面时的信号。工作气体分别采用 Ar 气和 Ne 气。

(4) 光源稳定性测量。固定 X 光能量、IC 工作压强、IC 偏压, 在不同时刻对 IC、PD 的信号和束流同时监测记录, 共持续 5 小时(一次注入的寿命)。

实验结果:

将结果在低压强条件下外推到零气压以消除二次电离的影响并考虑到光电离在不同能段时的情况, 在经过气体吸收、多重电离等各项修正后, 可以得到进入 IC 的绝对光通量(图 4)和 IC 在不同 X

本测量结果的误差全部由与测量过程相关的误差构成,主要有以下几项:

弱电流放大器的仪器误差	1%;
压强计的仪器误差	0.5%;
压强的测量值与理论计算的偏差	4%;
压强在电离区(即 IC 轴线上)的不均匀性	2%;
PD 在 IC 轴线上移动时位置的读数误差	0.01%;
光源不确定性	9.8%.

对各项误差总计的标准偏差为 10.8%. 因光源不确定性为光源在长达 5 小时范围内的变化,而实际标定在每个能点所需的时间大约为半小时,同时在计算以上各项误差时存在不可分开的重复计算情况,我们认为实际偏差要小于这个结果.

5 结论

通过对整个测量系统性能的测量和标定,该套软 X 射线绝对强度测量系统可以用于对软 X 射线的绝对强度进行测量和作为一级标准探测器对传输探测器进行标定.

探测器系统的标定工作在美国 Brookhaven National Laboratory 的 NSLS 同步辐射光源 X8A 和 U3C 束线上完成,并得到了 U3C 的 Warren Towell 先生和 Gong Pingpo 先生及 X8A 的 Michael Sagurton 先生的大力帮助,作者在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- [1] W W W. NIST Home page: http://www.nist.gov/item/NIST_Synchrotron_Ultraviolet_Radiation_Facility
- [2] Ott W R, Canfield L R, Ebner S C et al. SPIE: X-ray Calibration Techniques, Source, and Detectors, 1986, 689:178—187
- [3] Kunz C. Synchrotron Radiation Techniques and Applications. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1979. 141
- [4] Samson J A R, Haddad G N. J of the Optical Society of America, 1974, 64:47—54
- [5] User's Manual: Guide to the VUV and X-ray Beamlines. National Synchrotron Light Source, edited by: Nicholas F. Gmur, 1993

Design and Calibration of the Measuring System for Soft X-ray Absolute Intensity

Cui Congwu Cui Mingqi

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100039)

Yi Rongqing

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, The Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

Abstract We described the design of the measuring system for soft X-ray absolute intensity in detail. The system consists of two parts: the ionization chamber and the monitoring (or, to be calibrated) detector and its transferring system. The system can be used as the primary standard detector for the measurement of soft X-ray absolute radiation flux in the energy range from 50 to 2000eV after calibrated. The uncertainty of the system is also given.

Key words soft X-ray absolute intensity measurement, ionization chamber, calibration