

# 真空紫外电离室的研究\*

钱莉民 金 蕾 李福田 陈星旦

**摘要:**软X线—真空紫外辐射计量测试工作发展十分迅速。描述我们研制成功的真空紫外稀有气体电离室绝对型探测器的工作原理、结构和性能。讨论基于McPherson 247掠入射真空紫外单色仪的探测器性能测试装置及性能评价结果。

## 一、引 言

近年来在空间光学、受控聚变、等离子体物理及短波段激光研究的推动下,软X线—真空紫外辐射计量测试工作进展十分迅速。许多工业先进国家在利用同步辐射和壁稳弧建立软X线—真空紫外标准辐射源的同时,还利用稀有气体电离室建立了软X线—真空紫外辐射标准探测器。这方面具有代表性的工作是美国的Samson和Canfield<sup>[1],[2],[3]</sup>。

软X线—真空紫外稀有气体电离室利用气体光电离原理工作,是目前软X线—真空紫外波段最准确和重复性最好的绝对型探测器。稀有气体电离室工作开始于五十年代。Watanabe等人用绝对黑体标定真空热电偶探测器,测出NO的光电离截面并在此基础上利用搭载在火箭和卫星上的NO电离室研究了太阳发射的氢L<sub>α</sub>线(121.57nm)的绝对强度<sup>[1]</sup>。

六十年代Samson系统地研究了稀有气体电离室的理论,研制成功真空紫外稀有气体单电离室及双电离室<sup>[1]</sup>。

目前电离室是测量真空紫外光谱辐射绝对强度的重要手段。美国国家标准局(现NIST)Canfield等人在建立5nm~400nm探测器标准时,5nm~102.2nm间采用稀有气体电离室作为标准探测器<sup>[1]</sup>。

为适应国际上的发展和国内短波段光学基础技术发展的需要,我们研制了真空紫外稀有气体电离室。本文描述电离室的设计、结构与工作原理,讨论测量方法及误差并给出性能综合评价结果。

## 二、结 构 与 原 理

真空紫外稀有气体电离室利用气体光电离原理工作,是真空紫外波段目前最准确和重复性最好的绝对型探测器。我们研制的电离室由不锈钢真空室、收集极、排斥极组成,结构如图1所示。不锈钢真空室直径80mm,长250mm。排斥极呈圆筒状,直径为40mm。收集极为棒状,直径5mm。收集极和排斥极经金属—陶瓷真空密封电极与真空室外的静电计及为电离室提供电场的直流电源连接。金属—陶瓷真空密封电极是专门设计制作的,保证漏电流小于 $10^{-16}$ A。电离室光栏为狭缝状,高10mm,宽度可调,一般取0.5~1mm。电离室内工

\* 本项工作得到国家自然科学基金资助

作气体为He、Ne、Ar、Kr、Xe等,视工作波段而定。工作气压为 $(10^{-2} \sim 10^{-3})$  Torr。高纯惰性气体经两级微调阀进入电离室,为保证电离室内气压稳定,在电离室前方配置了差分泵,差分泵由机械泵泵浦,抽速为4L/s。电离室后方与光电倍增管相接,靠水杨酸钠荧光屏密封。水杨酸钠荧光屏用来将真空紫外辐射变为可见光,由光电倍增管探测。

进入电离室的光子使电离室内的气体原子(或分子如NO)电离。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。

我们研制的电离室有两种工作模式,即单电离室工作模式和双电离室工作模式。单电离室模式下,设入射到电离室的真空紫外辐射强度为 $I_0$ ,由于工作气体吸收在电离室末端衰减为 $I$ ,离子流为 $i$ ,光电子产额为 $\nu$ ,则

$$\begin{aligned} \nu &= \text{每秒形成的离子/每秒吸收的光子} \\ &= i/e(I_0 - I) \end{aligned}$$

$$I_0 \nu = i/e(1 - I/I_0) \quad (1)$$

其中 $e$ 为电子电荷,等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。离子流 $i$ 的单位为A。 $I/I_0$ 为工作气体透过率,由于位于电离室末端的光电倍增管分别测量充气状态下的 $I$ 及排空状态下的 $I_0$ 给出。

为保证所产生的离子都能被收集,光栏和处于正电位的排斥极要相互联接。此时电场分布如图1所示。

双电离室模式下,设 $I_0$ 为入射的真空紫外辐射强度, $I_1$ 和 $I_1'$ 为进入和离开第一收集极的辐射强度, $I_2$ 和 $I_2'$ 为进入和离开第二收集极的辐射强度。在第一收集极,每秒产生的离子总数为 $i_1/e$ , $i_1$ 为第一收集极电流,单位为安培。每秒吸收的光子数等于 $I_1 - I_1'$ 。根据朗伯定律:

$$I_1 - I_1' = I_0(1 - e^{-\mu d}) \quad (2)$$

$$\text{同理, } I_2 - I_2' = I_0 e^{-\mu d}(1 - e^{-\mu d}) \quad (3)$$

其中 $\mu$ 为工作气体压强 $P$ 时的吸收系数, $d$ 为收集极长度。由光电离产额的定义。

$$\nu = \frac{i_1}{e I_0 (1 - e^{-\mu d})}$$

$$\text{和 } \nu = \frac{i_2}{e I_0 e^{-\mu d} (1 - e^{-\mu d})}$$

$$\text{得出 } I_0 \nu = \frac{i_1^2}{e(i_1 - i_2)} \quad (4)$$

在双电离室情况下,只要测出第一收集极和第三收集极电流,由(4)式可以计算出入射辐射强度。

(1)和(4)式中 $\nu$ 为电离室工作气体的光电离产额。对多原子分子气体如NO等,由于吸收的光子能量可能用来使分子离解并使部分或全部结构原子处于激发态,因而光电离产额小于100%。对单原子分子气体,如氮、氖、氩、氪、氙等,吸收的光子能量全部用来使原子电离,因而光电离产额等于100%。在自电离态情况有些特殊,但理论表明,此时光电离产额仍可以认为近似等于100%。Canfield和Samson以氩、氖、氙等惰性气体为例,从

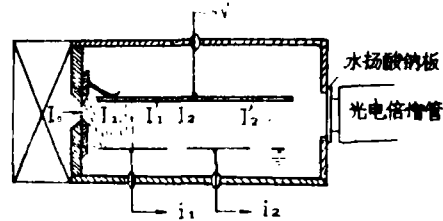


图1 电离室结构原理图

实验上证明了它们的光电离产额为100%。表1给出真空紫外波段(30—100)nm 电离室使用的一些惰性气体的电离势能, 图2给出了它们的吸收系数随波长的变化。

在(1)和(4)式推导中实际上假定进入电离室的真空紫外辐射不足以引起工作气体原子的二次电离, 电离所产生的光电子也不可能获得足够能量继续使其它工作气体原子电离。而且假定进入电离室的真空紫外辐射

表 1 一些惰性气体的电离势能

气 体	电 离 势 能 (A)	
	$^2P_{3/2}$	$^2P_{1/2}$
He	50.426	
Ne	57.493	57.237
Ar	78.672	77.796
Kr	88.562	84.542
Xe	102.214	92.275

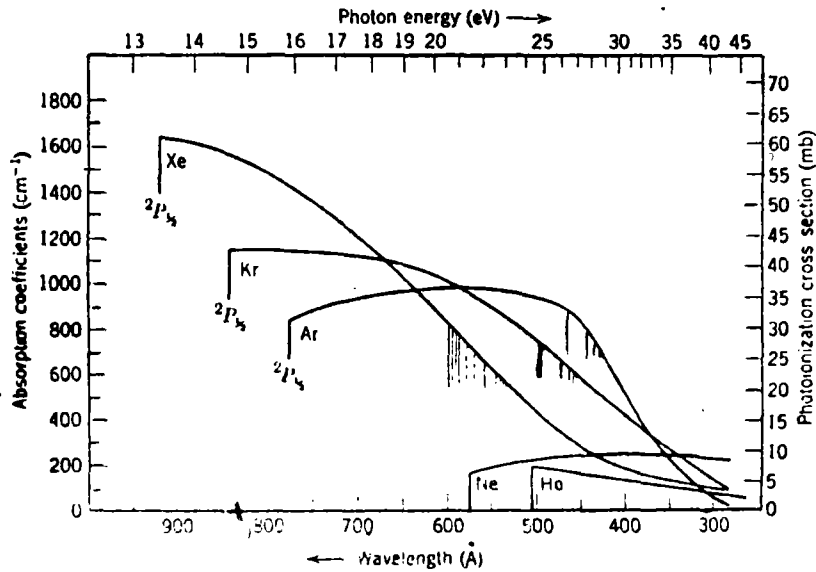


图 2 惰性气体吸收系数随波长的变化

是纯单色的, 无光栅色散引起的二次或高次光谱。对 28.6nm 以下的真空紫外辐射, 由于光电子产生二次电离, 且二次电离的效率因电离室工作电压和气压及气体类型各异, 因而情况变得很复杂。(1) 和 (4) 式将不适用这一情况。这时需要改变电离室气压, 测出不同压强下离子电流, 而后外推出无二次离子电流影响时的离子电流值。基于这一原理, 我们研制了适于 30nm 以下软 X 线波段使用的 1 米稀有气体电离室, 并发展了相应的数据处理方法, 这一部分将单独讨论。

### 三、测 试 装 置

真空紫外稀有气体电离室性能测试装置由真空紫外空阴极光源、真空紫外双等离子体光源、McPherson 247 掠入射真空紫外单色仪、稀有气体电离室、Keithley 617 数字静电计及微机系统组成(图 3)。空阴极光源工作气体为氦、氩、氖等, 工作气压  $10 \sim 10^{-2}$  Torr, 工作电压 500~2000V, 工作电流 100~400mA, 能在 20~200nm 波段产生丰富的原子和离子谱线。光源由高压直流稳流电源供电, 电流稳定度好于 0.5%, 光谱辐射稳定性优于  $\pm 1\%$ 。McPherson 247 掠入射真空紫外单色仪中, 使用了一块曲率半径 2.2m, 刻线密度

600线/mm的凹面光栅，其闪耀波长为120nm，使用的掠入射角为 $87^\circ$ 。单色仪内真空度达 $10^{-6}$  Torr，而光源内气压达 $10\sim 10^{-2}$  Torr。为维持这一压差，在光源和单色仪之间引入一级差分泵系统，差分泵用一台4L/s的机械泵系浦。电离室的输出电流为pA量级( $10^{-11}$  A)，为此利用Keithley 617型数字式静电计进行弱电流检测。617型静电计输出经过IEEE-488接口送至计算机，在程序控制下完成数据采集处理及打印。

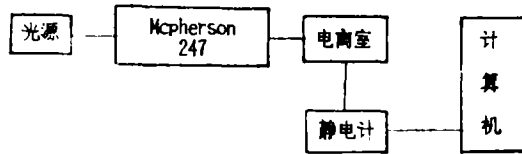


图3 测试装置方框图

## 四、性能

### 1. 电离室伏安特性

图4给出电离室第一收集极和第二收集极的伏安特性曲线。可以看出，开始时随工作电压升高，收集极电流上升很快，当工作电压到达一定值时，光电离产生的离子全部到达收集极，收集极电流达到饱和。由曲线看出电流达到饱和时的相应电压为25V，我们取25V为电离室工作电压。

### 2. 电离室内气压均匀性

根据Samson的经验，当电离室长度大于300mm，直径70mm，光栅缝宽 $50\mu\text{m}$ 时可以不考虑电离室内气压梯度的影响。我们采用空阴极光源，和Samson使用的真空电容火花光源相比强度低两个数量级。为获得足够的辐射强度，我们将电离室入缝宽度增加到0.5mm。这样当电离室内气压较高时，由于电离室内气压分布不均匀，第一收集极处气压偏低，第一收集极电流相应偏低，使标定的绝对强度偏低。图5给出对恒定的真空紫外辐射(HeI 58.4nm谱线)电离室标定的辐射强度随气压的变化情况。为保证结果的可靠性，电离室内气压不能太高。

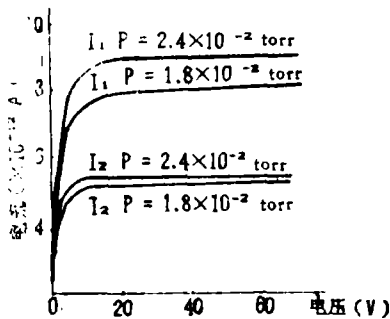


图4 电离室伏安特性曲线

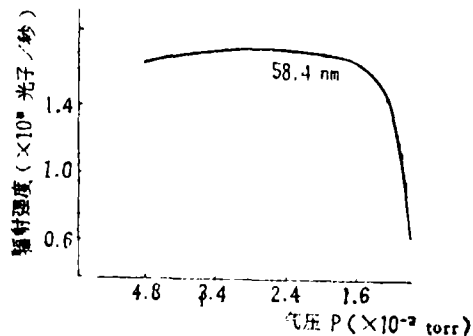


图5 辐射强度随气压的变化

### 3. 稳定性与重复性

在恒定的He 58.4nm 真空紫外辐射下, 检测了稀有气体电离室的稳定性和重复性。表 2 给出了电离室稳定性和重复性的测试结果。测试结果表明, 电离室稳定性和重复性好于  $\pm 2\%$ 。

为验证 He 58.4nm 辐射的稳定性, 实验前曾用通道电子倍增器和光电倍增管进行过测量, 表明辐射稳定性优于  $\pm 0.5\%$ 。

### 4. 单电离室和双电离室的比较

在恒定的真空紫外辐射下, 以单电离室模式和双电离室模式进行测量, 表明一致性达  $\pm 4\%$ 。存在较大差别的原因:

(1) 在双电离室工作模式下, 电离室内工作气压不均匀, 测量结果偏低;

(2) 在单电离室工作模式下, 残余气体使气透过率测量值偏高, 致使最终结果偏高。

表 3 给出单电离室和双电离室的测量结果的比较。

表 2 稀有气体电离室响应度的稳定性和重复性

时间 (min)	58.4nm	辐射强度稳定性 ( $\times 10^8$ 光子/s)
10		1.7537
20		1.7358
30		1.7779
40		1.7588
50		1.7873
60		1.7584

表 3 单电离室与双电室的比较

工 模 作 式	58.4nm 光谱辐射强度	误 差
单	$1.573 \times 10^8$ p/s	$\pm 4\%$
双	$1.456 \times 10^8$ p/s	

## 五、误 差

电离室定标误差来源有以下几个方面:

### 1. 待标定光源稳定性误差

本实验采用真空紫外空阴极光源提供真空紫外辐射。该光源稳定性为  $\pm 1\%$ , 表现为随机起伏和系统漂移, 因此会引入测量误差。

### 2. 单电离室模式下气体透过率测量误差

单电离室模式下气体透过率测量结果由于光电倍增管稳定性、光源起伏、残余气体影响而引入一定的误差, 估计为  $\pm 2\%$ 。

### 3. 双电离室工作模式下气压分布不均匀误差

双电离室模式下气压不均匀引入标定误差, 这一误差估计为  $\pm 2\%$ 。

### 4. 电流测量误差

电离室收集极电流为 pA ( $10^{-12}$ ) 量级, 电磁干扰、接触电阻、接地电阻等都会影响其绝对量值测量精度。本实验采用 Keithley 617 静电计, 虽性能稳定, 抗干扰强, 但仍有较大残余误差, 估计误差为  $\pm 1\%$ 。

### 5. 其它误差

由于真空紫外单色仪二级光谱引起二次电离, 电离室电场分布不均匀造成光生离子逃逸等影响引入误差, 估计在  $\pm 1\%$  以内。

以上诸项引入的电离室绝对定标误差为  $\pm 5\%$ 。

## 六、结 论

已研制成真空紫外稀有气体电离室，并进行真空紫外辐射绝对定标。实验表明电离室性能稳定，重复性和稳定性优于 $\pm 2\%$ ，光谱辐射绝对定标误差小于 $\pm 5\%$ 。

### 参 考 文 献

- [1] K. Watanabe et al., *Phys.Rev.*, 91, 1155, 1953
- [2] J. A. R. Samson, *J. O. S. A.*, 54,6, 1964
- [3] J. A. R. Samson, *J. O. S. A.*, 64, 47, 1974
- [4] L. R. Canfield et al., *Appl. Opt.*, 12, 1611, 1973

## A Study for VUV Ionization Chamber

Qian Limin Jin Lei Li Futian Chen Xingdan

### Abstract

With the development of space science, plasma physics and short wavelength laser study in recent years, there is a great progress on soft X-ray and Vacuum Ultraviolet spectral radiation metrology. This paper discusses the operating principle, the structure and the performance of VUV rare gas ionization chamber standard detector developed in this Lab, describes the evaluating equipment of the detector performance which is based on McPherson 247 grazing incidence VUV monochromator, and finally presents the measurement results.