

微通道板在真空紫外光谱仪中的应用研究

檀慧明 陈愈炽

摘要: 本文介绍了一个装置, 该装置把微通道板作为成像光谱探测器应用于真空紫外光谱仪中, 可清晰地观察和拍摄到 60~190 nm 之间几种气体元素的各种原子谱线; 本文还分析了该探测装置作为探测器的主要性能, 讨论了进一步进行此项研究工作的方向。

一、引言

传统光谱仪的光谱探测可归纳为三种方法: 目视直接观察、摄谱和光电探测。在真空紫外波段, 只能摄谱和光电探测。利用摄谱板摄谱, 可以同时得到一个波段内的光谱, 而且通过增加曝光时间还可拍摄到弱的谱线。但这种方法有很多缺点。如灵敏度较低; 装卸谱板时要破坏真空; 真空紫外谱板目前国内尚不能生产等。尤其是摄谱方法不能实时观测谱线, 使这种方法在很多场合受到限制。传统的光电探测方法与摄谱探测方法比较, 具有测量精度高、速度快、效率高、使用方便以及电信号易于处理和显示等优点。但由于不能同时获得一个波段内的光谱, 因此, 瞬时过程的光谱无法记录。

微通道板是一种可以成像的光电探测器件和电子倍增器件, 同时具有图像的探测和增强两种功能, 因此可以兼有摄谱和光电探测两种方法的全部优点:

1) 微通道板具有一定的增益, 可对弱信号放大, 探测能力高于摄谱干板。对强谱线可通过降低工作电压, 防止信号过强造成饱和, 影响测量精度。

2) 微通道板具有成像能力, 可以实时探测一个波段范围内的光谱, 如果在微通道板后面接上荧光屏, 可方便地观察到真空紫外光谱图像, 结构简单, 紧凑。

3) 荧光屏输出的已转换成可见光的真空紫外光谱可用一般的照像机和胶卷直接拍照, 也可用电视摄像管或其它对可见光敏感的光电器件记录。如将微通道板输出的电子图像直接读出, 尚可通过计算机直接进行处理。

4) 微通道板的时间分辨率高, 可实时观察和记录不断变化的谱线。

微通道板用于真空紫外光谱仪中的主要缺点是光谱面比较小, 因此一次使用的波段较窄。克服这一缺点的办法是利用扫描机构进行分段探测或通过降低光谱分辨率来扩展探测范围。

二、微通道板探测器装置的设计

本装置使用的光谱仪是长春光学精密机械研究所研制的N-100真空紫外光谱仪^[1]。该仪

器的成像系统是 Seya-Namioka系统, 波段范围: 50—300nm; 光栅曲率半径: 1m; 刻线密度: 1200条线/mm; 波长分辨能力: 优于0.1nm。

1. 微通道板的位置与方向

凹面光栅光谱仪的焦面是罗兰圆, 如图1, 而所用微通道板的输入面是平面。当光栅转动到不同位置时, 出射狭缝处对应的中心波长发生变化, 同时罗兰圆的切线方向也不同。因此, 放在原出射狭缝处的微通道板输入面不可能与谱面吻合。为了减少离焦对谱线分辨能力的影响, 要找一个微通道板输入面的最佳位置和方向, 使所有的中心波长所对应光谱区间的所有可探测波段离焦量的平方和最小。

根据图1, 选取坐标原点在出射狭缝处, 坐标轴 y 在出射狭缝和光栅中心连线方向, x 轴通过狭缝中心并与 y 轴垂直。谱面任一点的位置坐标:

$$\left. \begin{aligned} x &= S' \sin \delta \\ y &= S'_0 - S' \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

S' : 所要计算波长的像点位置到光栅中心的距离; S'_0 : 出射狭缝, 即中心波长的像点到光栅中心的距离; δ : 经过光栅分光后, 中心波长的方向与计算波长方向的夹角。

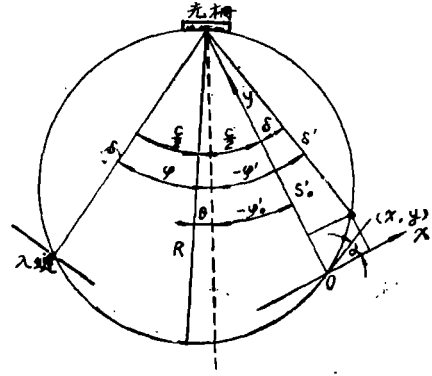


图1 凹面光栅光谱仪的光路图

根据图1中各个角度之间的关系, 凹面光栅的光栅方程, 凹面光栅子午光束聚焦条件和Seya-Namioka成像系统的性质可得出下列表达式:

$$\delta = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda_0}{2d \cos\left(\frac{C}{2}\right)} \right] - \frac{C}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{d} - \sin \varphi \right) \quad (2)$$

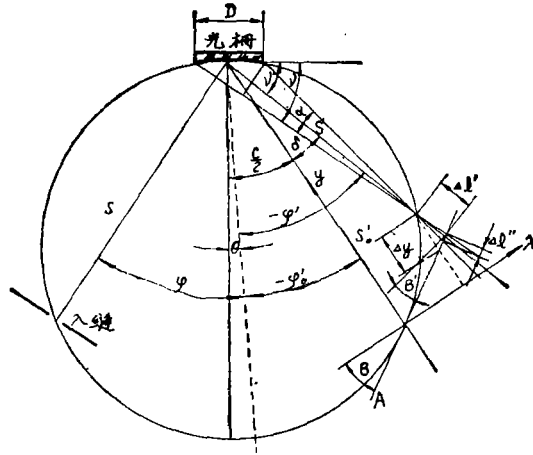
$$S' = \frac{\cos \varphi^2 - \frac{\lambda^2}{d^2} - \frac{2\lambda}{d} \sin \varphi}{\frac{\cos \varphi}{R} - \frac{\cos^2 \varphi}{S} + \sqrt{\cos^2 \varphi - \frac{\lambda^2}{d^2} - \frac{2\lambda}{d} \sin \varphi}} \quad (3)$$

式中, λ_0 : 中心波长; λ : 计算波长; C : 入射狭缝与出射狭缝间的夹角; d : 光栅常数; R : 光栅曲率半径; S : 入射狭缝到光栅中心的距离; φ : 入射光束与光栅法线的夹角,

$$\varphi = \frac{C}{2} + \sin^{-1} \left[\frac{\lambda_0}{2d \cos\left(\frac{C}{2}\right)} \right] \quad (4)$$

把(2)式和(3)式代入(1)式就可得到对应中心波长 λ_0 的谱线 λ 的坐标。

在设计中, 考虑到微通道板的输入面长度有限, 故把整个探测光谱范围分成若干段谱面, 每个谱面中心对应中心波长 λ_0 , 对每个谱面取一定数量的点, 每个点对应波长 λ 。然后根据(1)~(4)式计算该波长的谱线坐标, 即点的坐标。根据最小二乘法, 把所有谱面的点与一条直线拟合, 这条直线所对应的位置和方向就是微通道板输入面的最佳位置和方向。把这个平面与由(1)式计算的罗兰圆位置相比较, 可计算离焦量以及由于离焦引起的光谱线的扩散量 $\Delta\lambda$ 。下面根据图2 推导计算 $\Delta\lambda$ 的公式。图中直线A是计算的微通道板的最佳位置和方向。由于谱面长度及光栅宽度比光栅曲率半径 R 小很多, 可有下式成立:



微通道板输入面与实际焦面不完全重合引起的离焦

$$\frac{D \sin(90^\circ + \varphi')}{S'} \approx \frac{\Delta l'' \cos \beta'}{\Delta l'} \quad (5)$$

$$\Delta y \approx \Delta l' \quad (6)$$

D : 光栅宽度, β' : 直线 A 与 S' 的垂直方向的夹角, $\Delta l'$: 计算波长的离焦量, $\Delta l''$: 由于离焦引起的光谱线扩散量的空间距离。

根据图2可以看出, 由于 δ 很小和直线 A 的方向近似于出缝处罗兰圆的切线方向, 可以认为

$$\beta' \approx \beta \approx -\varphi' \quad (7)$$

这样由(5)、(6)和(7)式,

$$\Delta l'' = \frac{D \Delta y \sin(90^\circ + \varphi')}{S' \cos(-\varphi')} = \frac{D \Delta y \cos \varphi'}{R} \quad (8)$$

由于离焦引起的光谱线的扩散量

$$\Delta \lambda = \Delta l'' \frac{d\lambda}{dl} = \Delta y \frac{D}{R} \cos \varphi' \frac{d\lambda}{dl} \quad (9)$$

$\frac{d\lambda}{dl}$ 是光谱仪线色散率的倒数, Δy 可以从计算离焦量求得。(9)式只是在光栅曲率半径比

光栅宽度和谱面长度大很多时才成立, 本光谱仪及微通道板探测器装置满足这个条件。由(9)式也可看出, 离焦量对光谱分辨率的影响还与 φ' 有关。波长越长, φ' 的绝对值越小, 分辨率越差。

根据微通道板的有效直径, 谱面长度为 28mm, 相应的一次成像光谱区间为 20nm。参考国外文献报导的微通道板在真空紫外波段的探测效率的测量结果^{[2][3]}, 取总的探测光谱范围

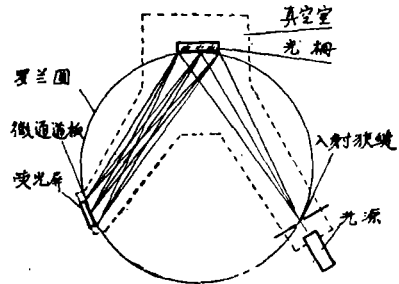


图3 微通道板应用在真空紫外光谱仪上的光路示意图

为50~200nm,并分为两段,分别为50~120nm波段和120~200nm波段。每个波段所对应的微通道板的最佳位置和方向可根据上述分析求得,其法线与光线的夹角分别为 $32^{\circ}50'$ 和 30° ,中心位置到原出射狭缝的距离分别是0.78mm和0.86mm。如此,由于离焦而引起的最大光谱线扩散量为0.016nm,显然,此影响是可以允许的。图3是微通道板应用在真空紫外光谱仪上的光路示意图。

2. 微通道板探测器的结构

图4是微通道板作为真空紫外成像光谱探测器的结构。1和2是陶瓷绝缘垫圈及陶瓷绝缘环。3是光阑,窗口长26mm,在微通道板输入面的投影长31mm,高10mm。4是光阑压圈。5是探测器主体法兰,右边端面有一定的斜度,其斜度对应于微通道板法线与光线的夹角,共设计两种,分别用于50到120nm和120到200nm两个不同的波段。9是开口式微通道板像增强器,是由微通道板、荧光屏、陶瓷环和可伐环等元件封接在一起的组件,微通道板输出端到荧光屏间距离是0.7mm。由于真空室很小,不配备专用的真空系统,而与光谱仪主体真空系统连接。工作时,要求真空度达到 10^{-6} Torr。否则,当微通道板工作时会产生离子反馈,使噪声增大。另外,微通道板输出端到荧光屏之间近贴聚焦,场强很高,真空度过低会在微通道板输出端和荧光屏之间放电,使器件损坏。图5是整个器件装到光谱仪上的外形图。

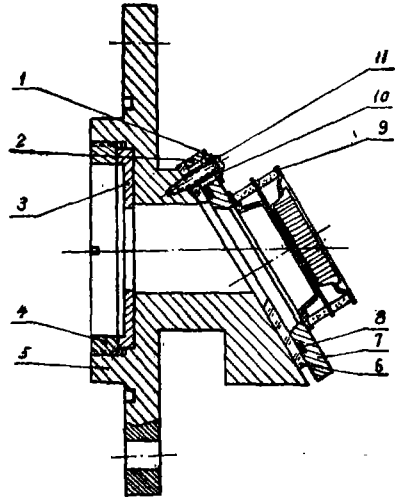


图4 微通道板探测器装置的结构

三、微通道板探测器工作参数的选择

1. 微通道板输出端到荧光屏之间的收集电压

微通道板输出端到荧光屏之间的收集电压及距离是决定微通道板探测器成像质量的主要因素,提高收集电压可改善其成像质量。但收集电压的提高受微通道板及荧光屏的耐高电场能力的限制。为了防止器件损坏,不能过高地提高收集电压。图6是开口式微通道板像增强器调制传递函数的计算结果*。当收集电压为3000V、微通道板输出端到荧光屏之间的距离为0.7mm、微通道板工作电压为800V时,其极限分辨率可好于22对线/mm,即可分辨的

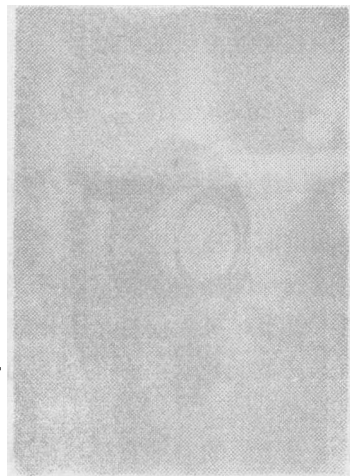


图5 微通道板探测器装到光谱仪上的外形图

* 开口式微通道板像增强器调制传递函数的计算准备另文发表。

空间最近距离为 $45.5\mu\text{m}$ ，如波长为 120nm ，可算得光谱分辨率为 $0.7 \times 0.0455 = 0.0318\text{nm}$ 。再加上微通道板输入面与实际谱面的不重合引起的离焦，可求得整个探测器的光谱分辨率为 0.036nm ，此值与使用原探测器时的光谱分辨率相当，实用结果也证明了这一点。因此，选收集电压最高为 3000V 。

2. 微通道板的工作电压

图7是开口式微通道板像增强器的调制传递函数随微通道板工作电压变化的计算结果。由图可见，工作电压的改变对分辨率的影响并不大。微通道板工作电压的改变只对增益有影

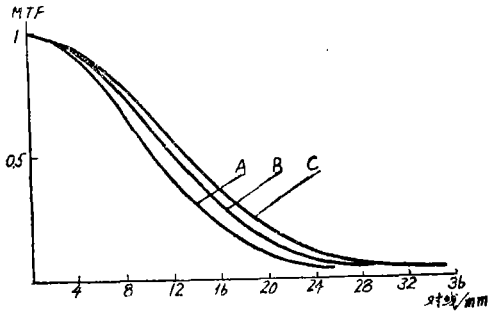


图6 调制传递函数随收集电压的变化

- A) $V_H = 3\text{kV}$ $H = 0.7\text{mm}$ $V_L = 0.8\text{kV}$
- B) $V_H = 4\text{kV}$ $H = 0.7\text{mm}$ $V_L = 0.8\text{kV}$
- C) $V_H = 5\text{kV}$ $H = 0.7\text{mm}$ $V_L = 0.8\text{kV}$

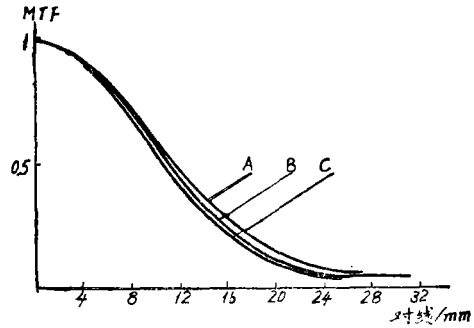


图7 调制传递函数随微通道板工作电压的变化

- A) $V_H = 3\text{kV}$ $H = 0.7\text{mm}$ $H_L = 0.6\text{kV}$
- B) $V_H = 3\text{kV}$ $H = 0.7\text{mm}$ $H_L = 0.7\text{kV}$
- C) $V_H = 3\text{kV}$ $H = 0.7\text{mm}$ $H_L = 0.8\text{kV}$

响。图8是三种不同型号的微通道板在输入电流不同时微通道板电流增益随工作电压 V_L 变化的测量结果。本装置使用光36微通道板。由图可见，微通道板工作电压为 900V 时，其电流增益高于 2×10^3 。工作电压再增加，离子反馈和暗电流急剧增加，使噪声增加，而且微通道板易放电损坏。因此，选择最高工作电压为 900V ，并可根据谱线的强弱在 $700\text{V} - 900\text{V}$ 之间进行调整。

四、微通道板探测器的应用结果及性能参数

1. 对光源光谱分布的测量结果

微通道板探测器装在N-100真空紫外光谱仪上对真空紫外惰性气体放电光源的光谱分布进行了测量^[4]。光源在充氙气的同时，保留部分空气。观察和拍摄了 $60 - 190\text{nm}$ 之间氙、氮、氧、氢、碳的一些原子谱线和一次电离谱线，如图9。测量从短波开始，每隔 10nm 拍一次。探测到的最短波长为 66.19nm ，是氙的一次电离谱线，如图10。可清楚的探测到的最长波长是氮的原子谱线 174.53nm ，如图11。实际测量结果表明，一次成像光谱区间宽于 20nm ，如图12。还探测到一些二级谱线，如图13。图9到图13中， V_L 为微通道板工作电压， V_H 为微通道板收集电压。谱线的辨认根据文献^[5]。

2. 光谱分辨率

图14是为了确定微通道板成像光谱探测器的光谱分辨率而拍摄的两段光谱图像。测量中微通道板工作电压为 900V ，收集电压为 3000V 。真空紫外惰性气体放电光源的工作电压为 1500V ，工作电流为 300mA 。入射狭缝宽为 0.02mm 。图14左中可以分辨 120.022nm 与

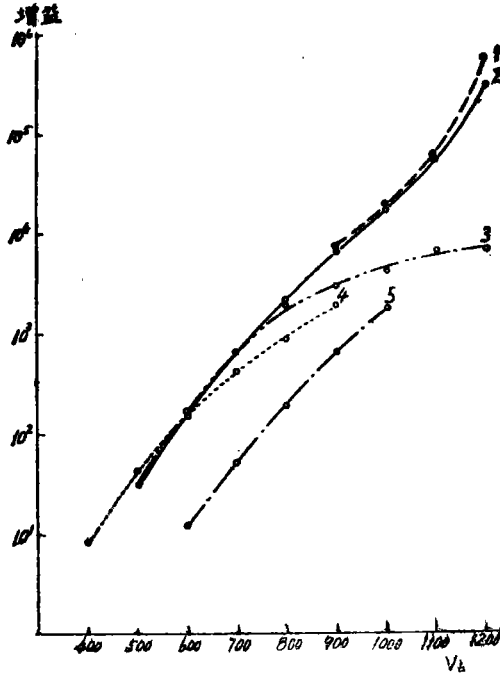


图8 微通道板的电流增益随工作电压的变化

- | | | | |
|---------|-------------------------------|---------|-------------------------------|
| 1—G6025 | 输入电流 4.81×10^{-14} A | 2—G6025 | 输入电流 6.02×10^{-18} A |
| 3—G6025 | 输入电流 6.02×10^{-11} A | 4—光36 | 输入电流 2.31×10^{-12} A |
| 5—205 | 输入电流 2.57×10^{-12} A | | |



图9 微通道板探测器探测到的氩、氮、氧、氢的谱线

图10. 微通道板探测器探测到的短波谱线

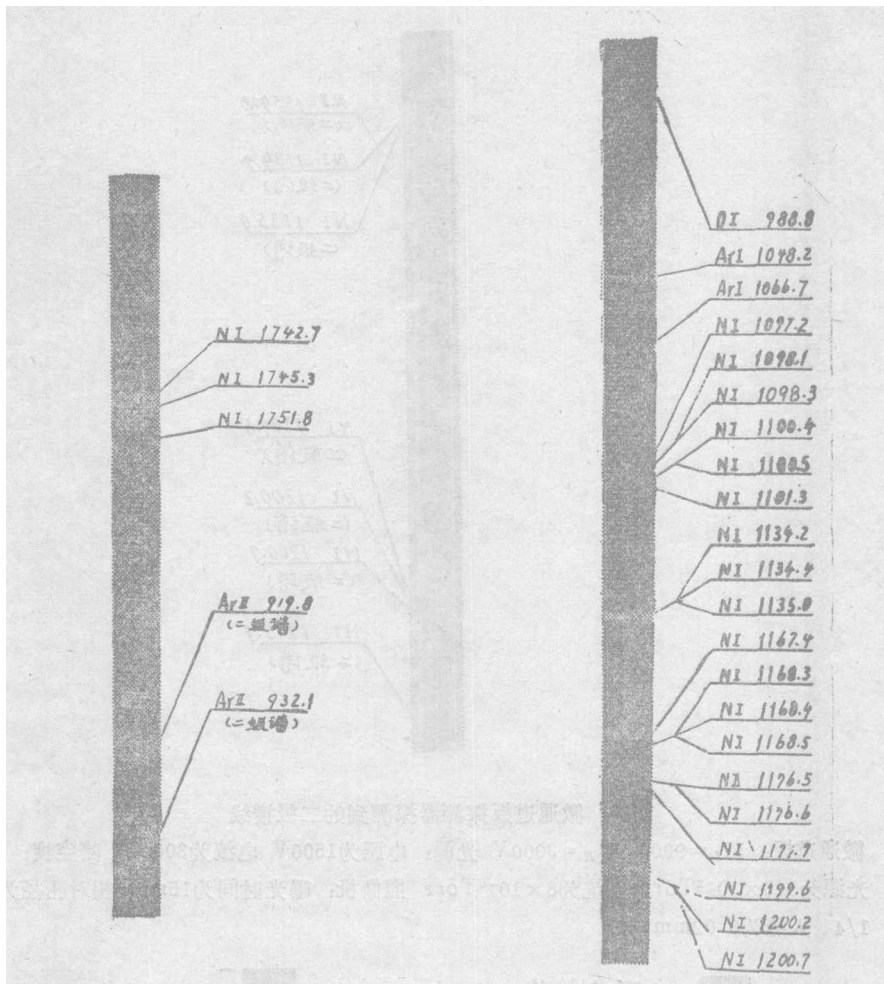


图11 微通道板探测器探测到的长波谱线
 微通道板: $V_L = 900V$ $V_H = 2700V$
 光源: 电压为1500V 电流为290mA
 真空度: 光源为 2.7×10^{-2} Torr
 系统为 8×10^{-6} Torr
 照像机: 曝光时间为20min 相对孔径为1/2.8
 入缝为0.16mm

图12 微通道板探测器的一次成像光谱区间
 微通道板: $V_L = 900V$ $V_H = 3000V$
 光源: 电压为1500V 电流为300mA
 真空度: 光源为 3.3×10^{-2} Torr
 系统为 8×10^{-6} Torr
 照像机: 曝光时间为2.5min 相对孔径为1/4
 入缝为0.02mm

120.071nm两条谱线, 两条谱线的波长间隔为0.049nm。图中可以非常清楚的分辨波长差为0.067nm的119.955nm与120.022nm两条谱线。在图14右中中可以清楚的分辨开波长差为0.056nm的113.442nm与113.498nm两条谱线。用读数显微镜观察光谱图像, 像面各个部分的分辨率基本相同。因此, 微通道板作为成像光谱探测器的光谱分辨率至少可以与原接收系统相当, 并好于国内已报导的在真空紫外光谱仪中的应用结果^[6]。

3. 灵敏度

对光谱图像的底片用测微光度计测量, 可以得到谱线的相对强度。图15是微通道板探测器探测到的谱线的相对强度与原探测系统光电扫描得到的谱线强度比较。图15(下)中强谱线的饱和是由于照像底片的黑度饱和及微通道板输出电流的饱和。

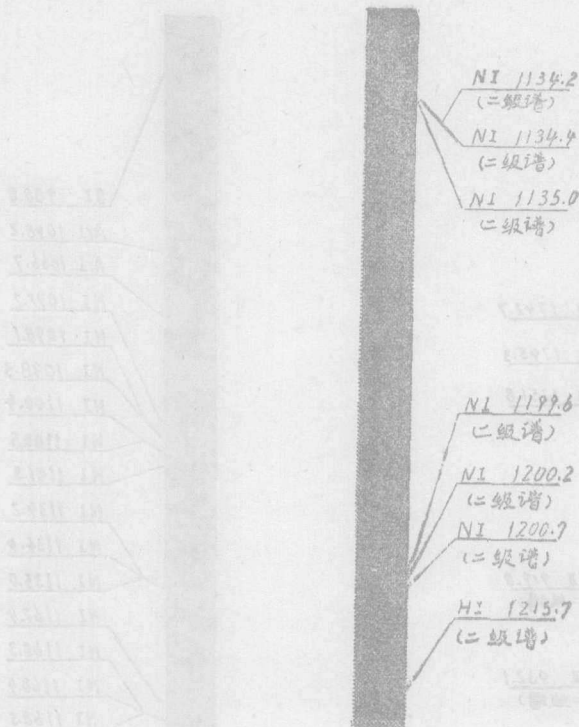


图13 微通道板探测器探测到的二级谱线

微通道板: $V_L = 900V$ $V_H = 3000V$ 光源: 电压为1500V 电流为300mA 真空度: 光源为 $3.3 \times 10^{-2} \text{Torr}$ 系统为 $8 \times 10^{-6} \text{Torr}$ 照像机: 曝光时间为15min 相对孔径为1/4 入缝为0.02mm

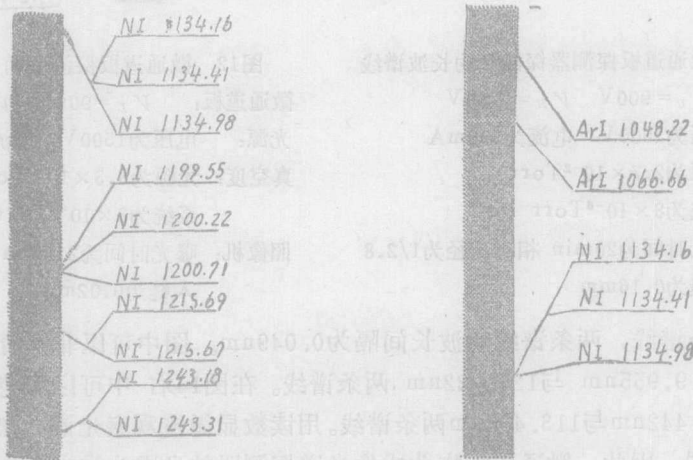


图14 确定微通道板探测器光谱分辨率的照片

左) 光源真空度 $3.8 \times 10^{-2} \text{Torr}$ 系统真空度 $7 \times 10^{-6} \text{Torr}$ 照像曝光时间3.5min 像机相对孔径1/4

右) 光源真空度 $3.6 \times 10^{-2} \text{Torr}$ 系统真空度 $8 \times 10^{-6} \text{Torr}$ 照像曝光时间30s 像机相对孔径1/4

五、对装置及测量方法的进一步考虑

1. 提高光谱分辨率

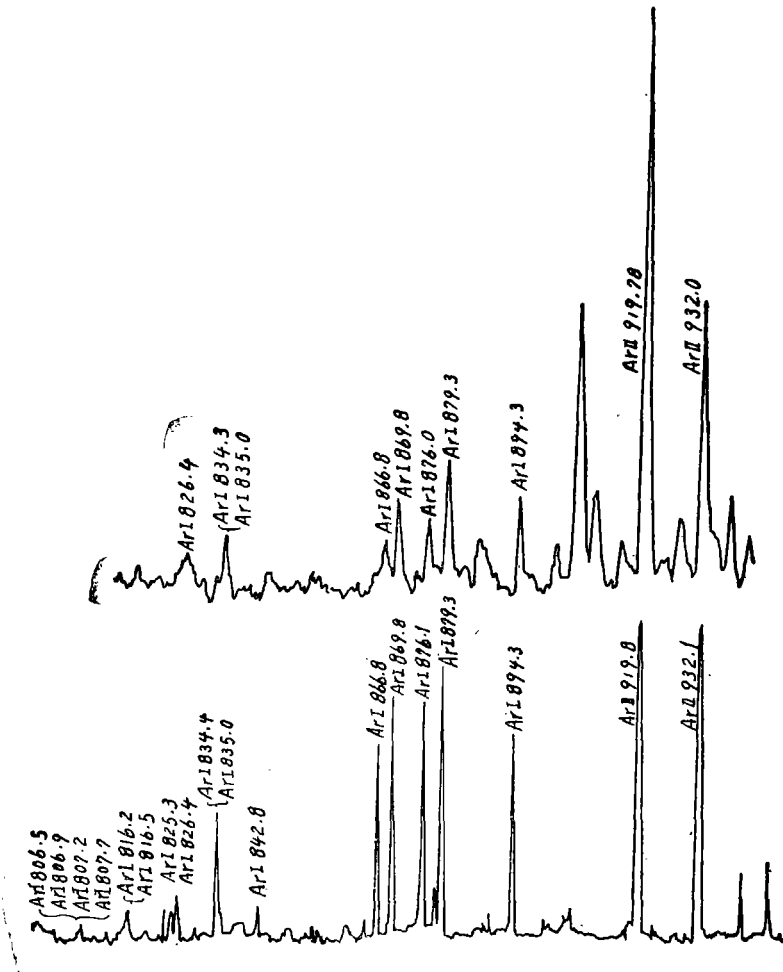


图15 (上) 光电扫描得到的谱线强度

光源工作电流260mA 出缝0.08mm 入缝0.05mm 光源真空度0.05Torr

(下) 微通道板探测器探测到的谱线强度

微通道板工作电压900V 收集电压3000V 光源工作电流300mA 光源真空度0.036Torr 入射狭缝0.02mm

可以用二次曲面与(1)式表示的焦面计算值拟合,把微通道板的输入面按拟合的二次曲面研磨,可使整个探测器的分辨率提高(目前国外已经使用这种微通道板^[7])。

2. 提高灵敏度和扩展工作的光谱范围

在微通道板的输入面镀光电阴极材料,可提高微通道板探测器的灵敏度。目前常用的光电阴极材料是CsI。根据国外的测量结果,微通道板输入面镀CsI材料,不但可以提高微通道板在真空紫外波段的量子效率一倍以上,还可扩展工作波段适用于紫外区^[3]。

3. 对图像读出处理

如把荧光屏输出的图像与其它用电信号读出的可见光成像器件（如电视摄像管或 CCD 等）连接，用示波器直接观察谱线的相对强度，并由计算机处理，预计可以得到灵敏度高、光谱分辨率和时间分辨率好、信息处理快和方便的真空紫外光谱仪的成像光谱探测系统。

本文中装置的设计及实验工作得到了陈淑英、王传基、关志远、李福田、邵景鸿等同志的支持和协助；微通道板性能的研究及工作参数的确定得到了余永正、杨晓文、丁义山等同志的支持和协助。此外，长春光机学院微通道板研究室、兵器工业部第 205 研究所等为本装置提供了微通道板和组装了开口式微通道板像增强器，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 王传基等；N—100真空紫外光谱仪研究总结报告，中国科学院长春光学精密机械研究所，1984。
- [2] C.L.Coleman; Imaging detector for the ultraviolet, Appl. Opt., 1981, 20, No. 21, 3693.
- [3] C.Martin, S. Bowyer; Quantum efficiency of opaque CsI photocathodes with channel electron multiplier arrays in the extreme and far ultraviolet, Appl. Opt., 1982, 21, No.23, 4206.
- [4] 关志远等；真空紫外惰性气体放电光源，中国科学院长春光学精密机械研究所，1984。
- [5] J. Reader, Charles H.Corriss; Wavelength and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions, Part 1, Wavelengths, U.S.Government Printing Office, 1980.
- [6] 李可华；微通道板在真空紫外光谱技术中的应用，核聚变与等离子体物理，1983, 3, 4, 249.
- [7] G.W.Fraser et al.; The gain characteristics of microchannel plates for X-ray photon counting, IEEE Trans.Nucl.Sci., 1983, NS-30, No.1, 455.

A Study on the Application of Microchannel Plate in a Vacuum Ultraviolet Spectrometer

Tan Huiming Chen Yuchi

Abstract

This paper introduces a device in which a microchannel plate is applied to a vacuum ultraviolet spectrometer as an imaging detector. We have observed and photographed many atomic spectrum lines of several gas elements clearly in the region between 60—190nm. Main characteristics using this device as a detector is analysed and the research work we will continue is discussed.