

# 微小离子流探测器

肖桂里

(中国科学院科学仪器厂)

## 一、引言

微小离子流探测器在质谱学、核物理实验、宇宙科学、表面科学以及真空技术等很多近代科学技术领域里，它都是一个很重要的研究课题。它对这些学科的发展起非常重要的作用。以质谱学为例，目前质谱仪器能分析 $10^{-10}$ — $10^{-18}$ g 极微量样品，能测定几十个  $\mu$ s 的瞬态过程中成分的变化，其主要原因之一，就是因为有了高性能的微小离子流探测器。可以预计，随着科学技术的发展和需要，必将研制出更多的新型高性能的离子探测器。标志离子探测器性能一般有以下几个主要技术指标：(1)灵敏度(或探测极限)；(2)测量精度；(3)反应时间；(4)质量分歧效应；(5)测量范围；(6)稳定性；(7)结构。

## 二、常用的微小离子流探测器

目前，微小离子流探测器的类型和品种很多<sup>[1]</sup>，其中常用的有：离子干板，直流放大器，二次电子效应离子探测器以及闪烁离子探测器等。

### 1. 离子干板

离子干板与普通照相用干板相似，即在平整的玻璃板上涂有几个  $\mu$ m 厚的 AgBr。具有一定能量的离子与 AgBr 作用使  $Ag^+$  还原，干板显影后变黑，其黑度就标志所测离子流的大小。离子干板测量离子流的过程是累计的，原则上只要增加测量时间就可以测量任意小的离子流。实际上，在大

多数情况下测量时间受到限制，其灵敏度只可达到相当于  $10^{-18}$ A 左右。离子干板的优点是：适合于测量不稳定的离子流；易制成大面积可供同时测量多种离子束；结构简单以及不怕电磁干扰稳定可靠等。其缺点是：测量精度较差(5—10%)，结果处理麻烦。

### 2. 直流放大器

直流放大器是测量离子流的电荷量以计量离子流大小。这类放大器的主要优点是没有质量分歧效应，测量精度较高(1%以上)。图1是一种线性、对数微小离子流放大器原理图。它的作用原理是：被测离子流的电荷流经一高电阻，在该电阻上产生的压降，采用100%电压负反馈的电流放大器放大，其输出可以用表头显示或用记录仪记录。直流放大器的灵敏度最高为  $10^{-15}$ A，反应时间为  $10^{-3}$ —1 sec，测量范围为  $10^{10}$ ( $10^{-5}$ — $10^{-15}$ A)，属于这类探测器的还有振荡静电计，其灵敏度可到  $10^{-6}$ A。

### 3. 二次电子效应离子探测器

二次电子效应离子探测器是根据有些物质在具有一定能量的离子或电子的轰击下，将产生大于入射的离子或电子数的二次电子这一物

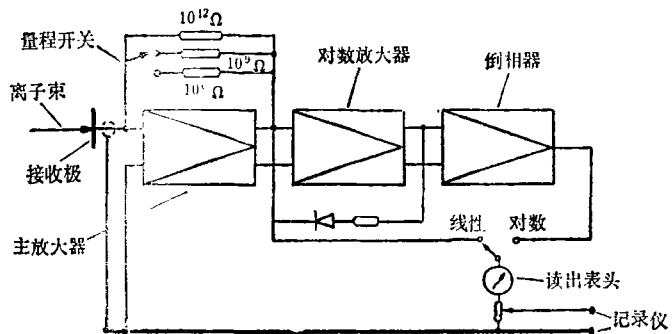


图1 直流放大器原理图

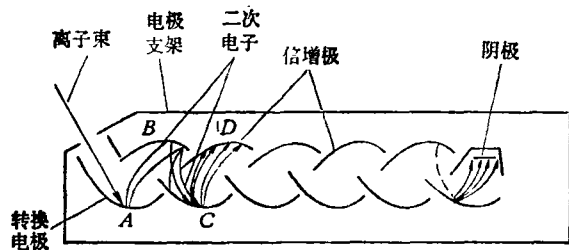


图2 瓦片式电子倍增器

理特性设计的。如图2所示， $A, B, C, D, \dots$  为用这类材料制成的电极。当一个具有一定能量的离子轰击电极  $A$  时，从  $A$  电极中将溅射出假定为两个的二次电子。这两个二次电子在具有电位  $V_A$  的  $A$  电极和具有电位  $V_B$  的  $B$  电极所形成的加速场作用下，获得所需要的能量  $[U = e(V_B - V_A)]$  去轰击  $B$  电极而溅射出四个二次电子。这四个二次电子又在电极  $B$  和电极  $C$  所形成的加速场作用下去轰击  $C$  电极而又倍增成八个二次电子……经过多次这类过程，最后可得到大量的电子，从而使难于观测的一个离子（或少量离子）变成可以测量的大量电子。这类探测器的特点是灵敏度高 ( $10^{-18} - 10^{-21}A$ )，反应速度快 ( $10^{-6} - 10^{-11}sec$ ) 和测量精度高 (1% 以上)。其主要品种有：

### (1) 静电型电子倍增器

这是一种用于探测电子流的探测器<sup>[2]</sup> (见图2)，在1936年由 Zworykin 首次用它来探测离子流。为了提高离子产生二次电子数，一般是尽可能加大离子的能量 (keV 以上) 和采用具有高二次电子发射系数的材料，如活化 Cu-Be 合金、 $Al_2O_3$  等，作为第一个倍增电极。作为其它电极的材料一般是采用 Cu-Be (2%) 或 AgMg (1.27%) 合金，经活化处理的这类材料，其二次电子发射系数 (即一个电子产生二次电子数) 可到 3—10。这类探测器的增益为  $10^5 - 10^8$ ，测量范围  $10^{-10} - 10^{-19}A$ ，反应时间  $10^{-6} - 10^{-9}sec$ 。目前存在的主要问题是暴露大气后性能变坏，这一问题仍没有完全解决。

### (2) 磁电子倍增器

这种倍增器是 Smith 于 1951 年首次制成<sup>[3]</sup> (见图3)。其倍增电极是放在同一个方向，从电极上产生的二次电子，在受相邻的两个电极所形成的加速场作用下得到能量的同时还受到一横向磁场的作用，因此，二次电子要走一弧形轨道去轰击下一个电极。这样做的优点是第一个电极可做成平面，可供测量较大截面的离子束；另一个优点是时间零散度较小 (阳极脉冲上升时间可到  $10^{-10} - 10^{-11}sec$ )。这类探测器的增益为  $10^5 - 10^8$  (倍增极数有 15—18 极)，噪声为 1—0.3 个脉冲/sec (效率为 90% 以上时)。要求性能稳定时，倍增极材料可采用不活化的 Cu-Be 合金。

### (3) 连续式电子倍增器

由于半导体材料科学的迅速发展，多种具有高二次发射系数的新型半导体倍增极材料也相继研制成功。这些新型材料的出现使这类探测器的性能获得了显著的提高。用这类半导体可使原来分离的倍增电极做成一个整体 (见图4)。利用其高阻特性，在其两端加上所要求的电压，则在每一区段都有所需要的加速场，使各次倍增的二次电子获得一定的能量去轰击下一区段使能得到更多的二次电子。因倍增极可以做成一个整体，其结构将可大大简化，从而大大减小体积和重量，并且容易实现较多次数的电子倍增 (一般在 30 次以上，分离式需要 30 个倍增极，结构上实现是有困难的)。此外，二次电子的收集效率也高，所以其增益也得到明显的提高。由于这类半导体材料对暴露大气不敏感，故其稳定性也得到显著改进。目前这类探测器测量离子流上限以及使用寿命还有待进一

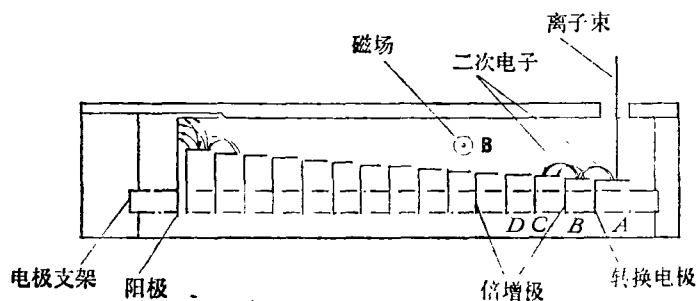


图3 磁电子倍增器

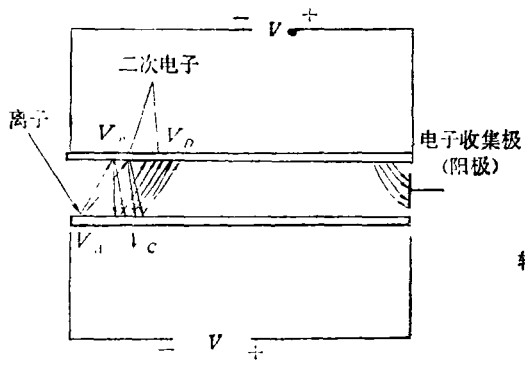


图4 连续式电子倍增器原理图

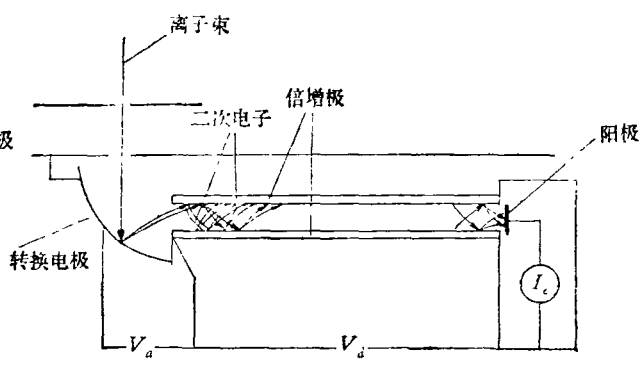


图6 平板型电子倍增器

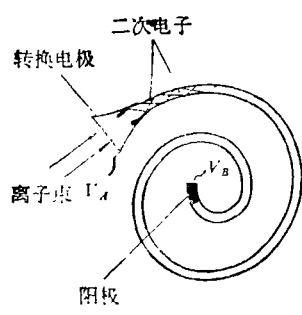


图5 毛细管电子倍增器

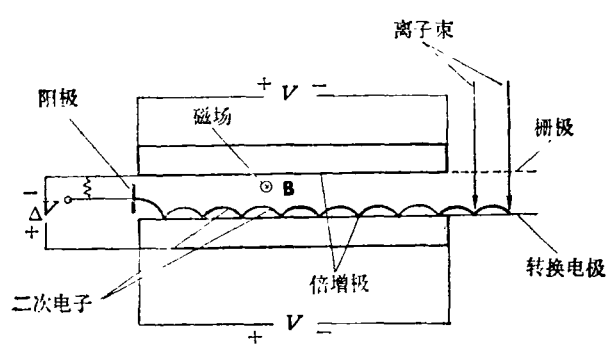


图7 平板型磁电子倍增器

步研究提高。

图5所示是一种称为毛细管型的电子倍增器<sup>[4]</sup>，国内外都已有商品。它是用高铅玻璃（PbO玻璃 + Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）制成内径为φ1—3mm，壁厚为0.5mm的毛细管，并弯成螺旋状（其螺旋圈数1/2, 2/3, 1或2以上各种规格）。被测离子流轰击其喇叭口，产生的二次电子进入管内，逐级倍增，最后用阳极收集。这种探测器的增益一般都在10<sup>8</sup>左右，噪声只有0.1—0.5个脉冲/sec，测量范围10<sup>-14</sup>—10<sup>-20</sup>A，重量只有十几g。

图6是一种平板型电子倍增器<sup>[5]</sup>，其电极是用二块半导体材料制成的平板，其增益一般为10<sup>6</sup>—10<sup>9</sup>，其它性能与毛细管型相近。

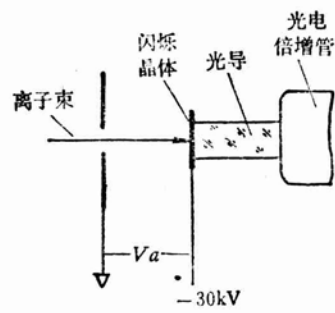
图7所示是一种平板型磁电子倍增器，其工作原理与磁电子倍增器完全一样，所不同的是其倍增极是用半导体材料制成一整体。这种探测器的性能比前者有了提高，以Goodrich研制的为例<sup>[6]</sup>，其倍增板大小为25 × 55mm<sup>2</sup>，板间距离为5mm，当磁场强度为400G，工作电压

为1.7kV时，增益为1.7 × 10<sup>7</sup>，噪声为0.02个脉冲/sec，阳极脉冲上升时间为5ns，这种探测器已广泛应用在飞行时间质谱计上。

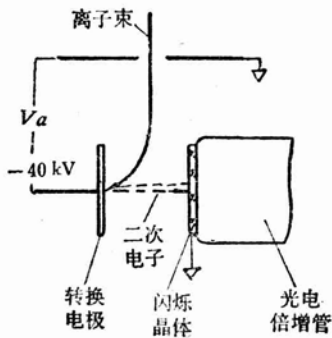
#### 4. 闪烁离子探测器

闪烁离子探测器是目前灵敏度最高的一种离子探测器，已经达到10<sup>-22</sup>A。另外还有性能稳定（基本上消除了暴露大气的影响）、可测量大截面离子束（50 × 50mm<sup>2</sup>）和亚稳态离子等特点。它的其它性能基本上与二次电子效应离子探测器相同。

闪烁离子探测器是Richards于1950年研制的<sup>[7]</sup> [见图8(a)]。被测离子流加速使其得到所需要的能量，直接轰击闪烁晶体，离子能量在晶体中的消耗使晶体发光。这些微弱的光用光电倍增管（先转换成电子，然后电子再经过多次倍增）放大得到大量电子流，从而使离子流信号得到放大以便计量。由于离子流直接轰击晶体，不仅光产额低，而且晶体很快被损坏。60年代初Daly<sup>[9]</sup>对此做了重大改进 [见图8(b)]，他把被测离子加速后先轰击一个用高二次电子发



(a)



(b)

图8 闪烁离子探测器原理图

射系数材料制成的转换电极，使离子转换成电子，然后再使电子加速获得足够的能量去轰击晶体，这不仅完全克服了原有的缺点，而且使灵敏度有很大提高。目前这类探测器已经有几个品种，可供不同需要选用。

### (1) 闪烁离子探测器

这是一种经典的只能测量正离子的闪烁离子探测器(见图9)，结构较简单。转换电极是

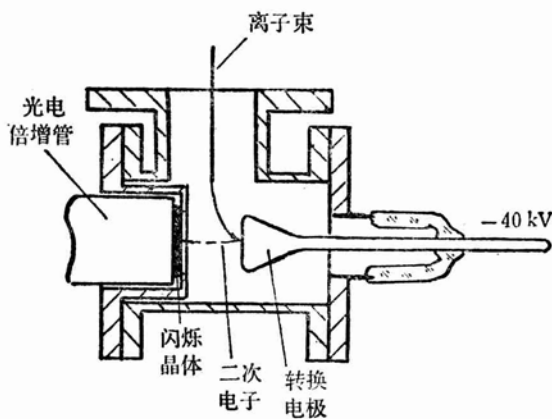


图9 闪烁离子探测器

在不锈钢底座上镀一薄层Al( $75 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )制成。当离子能量为40keV时，其二次电子发射系数可到6。闪烁晶体为有机闪烁体，对着二次电子面镀有约1000Å厚的Al膜。这种探测器的灵敏度为 $10^{-19}$ — $10^{-20}\text{A}$ 。

### (2) 能测正负离子的闪烁离子探测器

这种探测器可测正负离子(见图10)。其

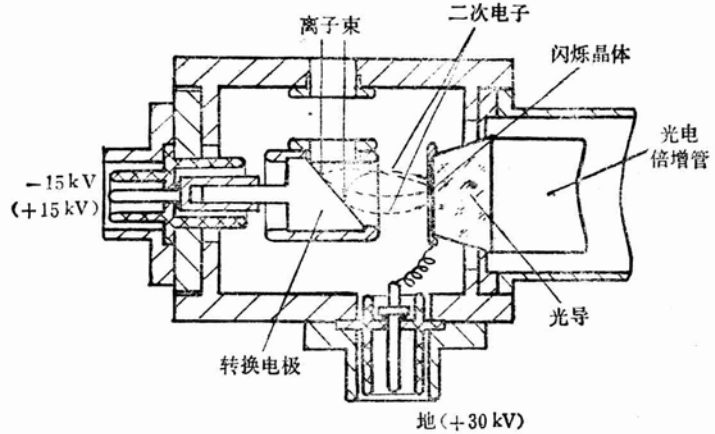


图10 测正、负离子闪烁离子探测器

转换电极用不锈钢做成斜面，其外有一个不锈钢圆筒，它的作用是为了在测负离子时，不致因电子加速场而把负离子拉去直接轰击晶体。测负离子时，其有关电极电压为括号内数值。闪烁晶体为ST-401型塑料闪烁晶体，光电倍增管为GDB-52。它的灵敏度为 $10^{-19}\text{A}$ 。

### (3) 超高灵敏度闪烁离子探测器

这是一种灵敏度最高的闪烁离子探测器<sup>[8]</sup>(见图11)。其转换电极材料为Al或Cu-Be(2%)合金，制成一圆筒形，使离子入射角大以提高二次电子产额。闪烁晶体厚度为 $5\mu$ 的CsI(Tl)晶体，发光效率高。灵敏度可达 $10^{-22}\text{A}$ 。

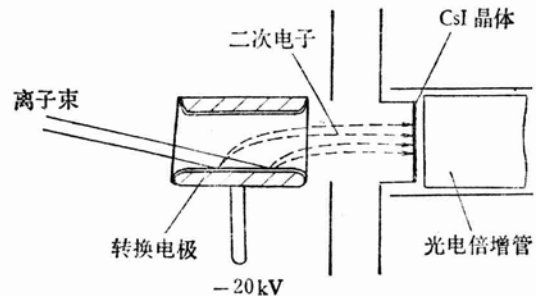


图11 超高灵敏闪烁离子探测器

#### (4) 能测亚稳态离子的闪烁离子探测器

这种探测器<sup>[9]</sup>可选择地测量不同能量的离子(图 12)。被测离子先加速,然后进入晶体电极和转换电极所组成的减速场使其减速到零。由于减速场不是平面场(由转换电极导致的变形),结果在离子减速到零后回转加速打到转换电极上,所产生的二次电子被加速打到闪烁晶体,晶体产生的光用光电倍增管测量。调节晶体电极上的电压,可以使高于某一能量的离子直接打到晶体上,而因光产额低,结果信号小而

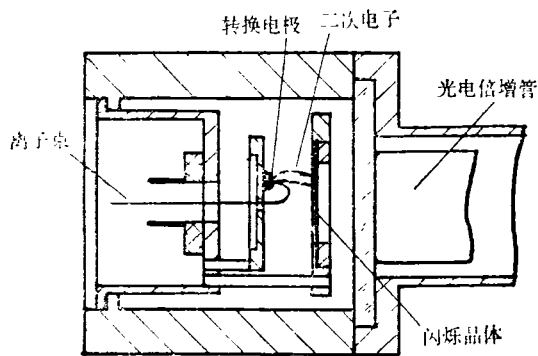


图 12 测亚稳态离子闪烁离子探测器

不被测量,因此通过调节晶体电极上不同电位,就可测出离子能量的分布。

此外,还有如 G-M 计数管、半导体探测器、微波二次电子倍增器以及新型微电子倍增板等,目前很少使用。总之,微小离子流探测器的品种很多,其中以采用半导体材料作倍增极的二次电子效应离子探测器和闪烁离子探测器性能较好。前者性能好、结构简单、轻巧,它将会受到更大的重视。

#### 参 考 文 献

- [1] 道嶋正美, 应用物理, **37** (1968), 2.
- [2] L. A. Dietz, *Rev. Sci. Instrum.*, **36**(1965), 1763.
- [3] L. G. Smith, *Rev. Sci. Instrum.*, **22**(1951), 166.
- [4] B. J. O'Brien, *Rev. Sci. Instrum.*, **38**(1967), 1058.
- [5] C. A. Spint, *Rev. Sci. Instrum.*, **36**(1965), 775.
- [6] G. W. Goodrich, *Rev. Sci. Instrum.*, **32**(1961), 846.
- [7] P. I. Richards, *Rev. Sci. Instrum.*, **21**(1950), 99.
- [8] Blauth, *J. Vacuum Sci. and Tech.*, **8**(1971), 384.
- [9] N. R. Daly, *Int. J. Mass Spec. and Ion Phys.*, **11**(1973), 255.

## 高压下氙变成金属,硫变成了超导体

对于任何物质加足够高的压力,由于体积减少和电子密度增加,一定会变成金属。人们也会更进一步地认为,在足够高以及足够低的温度下,这些物质大概也会变成超导的。最近,美国康奈尔的一个小组报告,采用静态方法制备出了金属氙。通用电器公司的一个小组和苏联的两个小组报告发现了硫的超导性,实验都是在几十万个大气压下进行的。人们从事这方面研究的一个重要目标是希望能制备出金属氢,理论上预言金属氢是高温超导体,并希望在压力去掉之后仍能保持超导的金属态。估计这将需要 3—5 Mbar 大气压。为达到这样高的压力和将之检测出来,还需要做很大的努力。人们曾把非金属碘、碲、硒、硫等加高压变成了金属,对于惰性气体,金属氙是第一个。在高压技术方面的改进主要有二,一是使用平顶的金刚石砧,在 30K 时使氙凝聚在平顶砧上,达 1000—2000 Å 厚,然后压上一个球面尖顶的金刚石压头,二是使用了指状组合型电极,便于区分是出现了金属性还是发生了压头之间的短路。结果在 330kbar 下,在 32K 时电阻下降 9

个数量级,电阻率近似  $0.1 \Omega \cdot \text{cm}$ 。但是,目前尚不能确定是一级相变,还是能隙连续压缩机制。

室温高压下,硫早已被发现是金属态。最近,在 460—480kbar 下,发现其电阻随温度变化的行为特殊。高压下为金属性的硒、碲等在一定低温下突然进入超导态。而硫在从室温开始降温时,电阻随之下降,在 100—150K 时变平,然后直到比较低的温度电阻随温度下降而上升,在 12K 时上升速率有突然变化,在 4—5K 时电阻又重新增加。如果把硫的电阻看成是由金属性与半导体性两部份所组成的,那么可以从总的电阻里扣除掉半导体部份,那么从 5K 到 12K 时,金属部份的电阻就出现了一个突然的可重复的转变,好像是一个被抹平了超导转变。有人认为,这似乎也可以解释为结构相变。但苏联的两个小组,报告了类似的结果,一个是报道在 400—500kbar 下,在 9.7K 有电阻突变。另一个报道,在 200kbar 下,在 5.7K 有超导转变。

(赵忠贤摘译自 *Physics Today*, April 1978)