

新型的电子束偏转电离规*

李旺奎 张 舟

(兰州物理研究所)

几种热阴极电离规采用把离子束引出电离区,使其偏转来减小 α 射线效应和电子碰撞脱附效应。本文从另一个角度,提出了控制电子轨迹与电子接收位置的新方法,使得 α 射线的发射方向背离离子收集极,对新结构进行了计算机模拟计算分析和实验研究。

一、新 规 结 构

新规结构如图1所示,其特点是在阴极电子发射部分和电子接收部分的新设计。阴极在一个柱形电子聚焦极中,它下面是一个环形片状电子引出极。阴极发射的电子受到电子聚焦极的作用向中心孔汇聚,同时受环形电子引出极电位的加速,在获得一定的轴向初速度后进入电离区。电子进入电离区后,虽然受到离轴径向力作用而向边栅运动,但只要获得的轴向初速度足够大,电子就会运动到底端的电子接收极上。电子接收极是片状电极,电子运动到它上面就被接受。离子收集极装在离子聚焦极下面。这样在电子接收极上产生的 α 射线就背离离子收集极, α 射线就不可能直接照到它上面。离子聚焦极具有聚焦离子、防止电子逸出和分离电子碰撞脱附离子作用。

从新规结构可以看到,电子只通过电离区一次,那么新规的灵敏度如何呢?新规结构是否实现了我们的新构思呢?

二、计算机模拟计算结果及讨论

用MDR—Z80微机对图1新规结构进行了模拟计算。用迭代法算出静电场的电位分布,然后用龙格——库塔法计算了电子、离子运动轨迹。计算参数为 $V_1 = V_2 = V_3 = 200$ 伏, $V_f = V_{ES} = 50$ 伏, $V_C = V_{IS} = 0$ 伏。

1. 电子轨迹

如图2所示,在电子聚焦极内的等位线是凸的,使电子向轴聚焦而进入电离区。

图3是阴极上不同位置以 0° 、 45° 、 -45° 角发射的电子运动轨迹。在计算中忽略了电子空间电荷效应和电子与气体分子碰撞对电子轨迹的影响。从图3可以看到,在理想情况

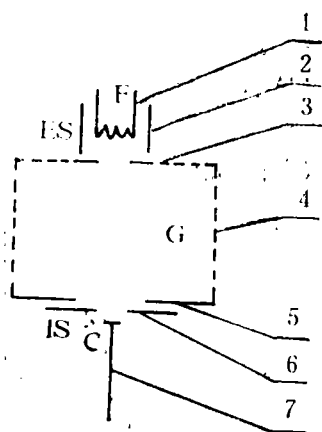


图1 新规结构

- | | |
|---------------------|------------------------|
| 1. 灯丝 (V_f); | 2. 电子聚焦极 (V_{ES}); |
| 3. 电子引出极 (V_1); | 4. 边栅 (V_2); |
| 5. 电子接收极 (V_3); | 6. 离子聚焦极 (V_{IS}); |
| 7. 离子收集极 (V_C); | |

* 1986年3月收到

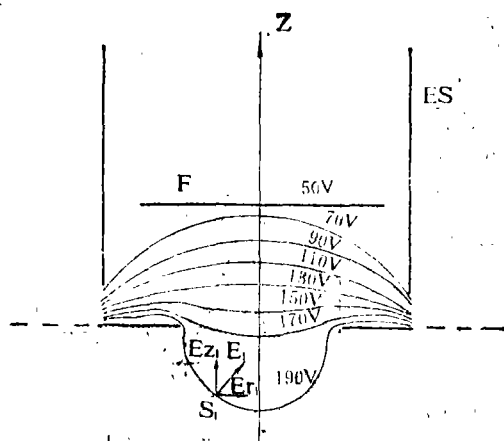


图2 阴极附近的等位线分布

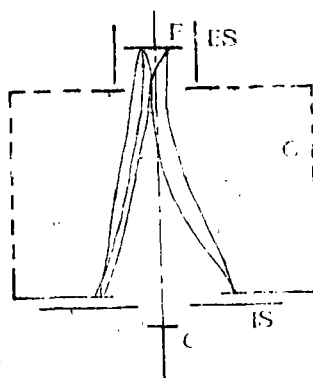


图3 电子运动轨迹

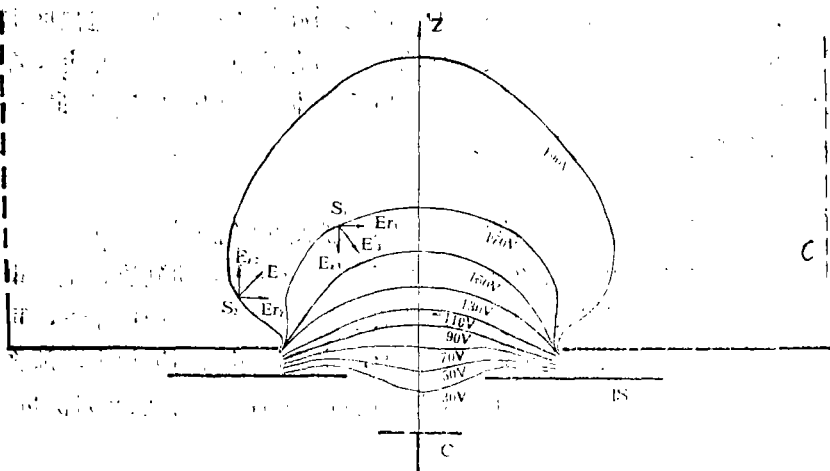


图4 离子收集极附近的等位线分布

下,电子轨迹符合设计要求,都运动到了电子接收极上,而不被边栅所收集。

2. 离子轨迹

图4是离子收集极附近的等位线分布以及 S_2 、 S_3 点处的电场指向图。图5是模拟计算的不同位置产生的离子的运动轨迹,其中(1)、(2)、(3)是模拟计算的气相离子轨迹。它们受到图4中 S_3 点电场 E_3 的作用向离子收集极聚焦,所以新规的收集效率较高。

图5中的(4)、(5)是模拟计算的电子碰撞脱附离子轨迹。在边栅下部产生的电子碰撞脱附离子(4),在向着轴的运动过程中,获得了较大的径向速度,而向着离子收集极的轴向速度较小。从图4中可以看到,70伏以下的等位线变成凹形,即对离子有一定的散焦作用。当离子轴向速度较小时,散焦作用就表现得更显著,使得电子碰撞脱附离子(4),最后从离子收集极与离子聚焦极之间的间隙中穿过。所以,在边栅底部产生的电子碰撞脱附离子不容易被离子收集极所收集。电子碰撞脱附离子(5)在电子接收极上产生,它先在如图4中 S_2 点电场 E_2 的作用下,一方面沿 E_{z2} 向离子收集极的轴向运动,另一方面沿 E_{r2} 向轴线运动。当它越

靠近轴线时, E_{z2} 越小, 直至反向为 E_{z3} , 离子在 E_{z2} 与 E_{z3} 这两种反向电场作用下, 靠近轴线时轴向速度将变为零。但在 E_{r2} 、 E_{r3} 这两种同向电场作用下将获得较大的径向速度, 也不容易被离子收集极收集到, 如图 5 中电子碰撞脱附离子(5)在子午面内被另一边的离子聚焦极收集。这说明了新规能较好地克服电子碰撞脱附效应。

3. 有效电离区的讨论

从图 2、图 4 等位线分布可以看到, 在阳极内电位都大于 100 伏, 即电子在此空间的能量大于 50 电子伏。

若按文献⁽¹⁾中的定义: 电子能量不小于 50 电子伏的区域是有效电离区, 那么新规的电离区 100% 都是有效电离区。

但是, 如图 2 中 S_1 点, 电子在这点的能量达 140 电子伏, 但 E_1 使离子向阴极运动, 不可能被离子收集极所收集。所以, 我们认为, 在这种阴极电位影响电离区电位分布的结构中, 不能只用电子能量来定义有效电离区, 还应加上电场指向的条件。即在电离区中电子能量大于 50 电子伏且电场使离子向离子收集极运动的区域为有效电离区。按此定义算出新规的有效电离区为电离区的 62%。在此有效电离区中, 电子基本上是 140 电子伏的最佳电离能量, 所以新结构中电子的有效电离几率是较高的。

4. 电子与气体分子的碰撞

电子与气体分子碰撞的情况可分为散射、电离、激发和吸收⁽²⁾。在新型规中, 电子受到气体分子的弹性散射, 运动轨迹将会改变, 可能使一部分电子运动到边栅上。电子在使气体分子电离和激发后损失能量, 即电子的轴向速度减小, 则在径向电场作用下, 可能运动到边栅上。电离出的电子以及气体吸收电子后的负离子, 也可能运动到边栅上。那么, 边栅上会收集到电子流, 这些电子在边栅上会产生 x 射线, 这对规的性能, 特别是对测量下限的性能将会有什么影响呢?

显然, 边栅上的电子流是由于电子与气体分子碰撞形成的, 其大小应正比于气体分子密度(或压力)。这就可用边栅上电子流来指示压力, 即所谓“电子散射规”的原理。这些电子产生的 x 射线强度也正比于压力, 那么这些 x 射线在离子收集极上产生的光电流也正比于压力, 即这部分光电流不是新规的本底电流。这就说明, 电子在与气体分子的碰撞中, 使一部分电子运动到边栅上, 但对新规的测量下限没有造成影响。

5. 外电场对灵敏度的影响

如图 6 所示, 由于 BA 规的灯丝处在栅极与外管壁之间, 那么阴极的发射特性就要受到外管壁形状、大小和电位的影响, 进而影响到电子轨迹。电子从阴极发射出来进入栅极区后, 有一部分电子将运动到栅极外面来, 然后在栅极和外壁之间的电场作用下, 又有一部分返回栅极内参与电离, 这部分电子的轨迹也受到外壁形状、大小和电位的影响。例如, 玻璃管规玻璃外壁的电位随着它的带电程度不同, 有着不可预料的变化, 那么, 电子轨迹、灵敏度也将发生不可预料的变化。最典型的是管壁带电使 BA 规发生模式跳变现象。

如图 1 所示, 新规的阴极与 BA 规不同, 它受到电子聚焦极的屏蔽, 发射特性不受外电场的影响。如图 3 所示, 新规的电子轨迹与 BA 规也不同, 电子从阴极发射出来后, 只通过

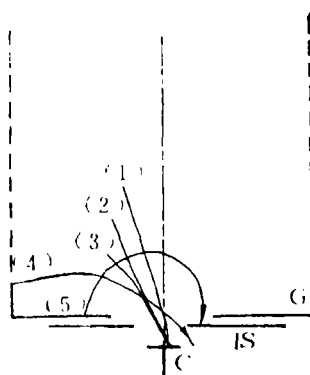


图 5 离子运动轨迹

电离区一次就被收集，并且只在栅极内轴线附近运动。由于栅极的屏蔽作用，电子运动轨迹不受外电场的影响。所以，新规不会出现模式跳变等灵敏度不稳现象，管规和裸规的灵敏度将会很好地一致。

6. 电子发射分布对灵敏度的影响

影响电子发射分布的因素很多，例如：(1) 敷钼灯丝的涂层不均匀，特别是长期使用后涂层部分脱落；(2) 在较高压力下工作时，灯丝上不同位置被氧化的程度不同，发射表面功函数也会发生不同程度的变化；(3) 阴极的截面大小，电阻、热容量的变化，不同加热电流乃至连接芯柱都会使阴极的温度分布发生变化。这些因素会使电子发射分布改变。由于普通BA规一般用V形灯丝，灯丝没有对称性，从阴极上不同位置发射出来的电子运动轨迹长短不同，轨道上的能量不同，使气体分子电离的效率就不同，那么电子发射分布的变化将导致BA规灵敏度有所变化。一般电离规都采用稳发射控制电路，但这只能保证阴极的总发射电流不变，而不能保证发射电子的分布不变。

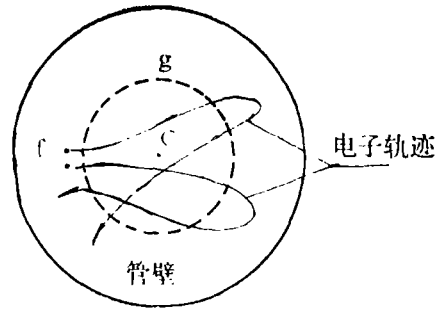


图6 BA规截面图

从图3的电子轨迹可以看到，新规中电子从阴极上不同位置和角度入射时，它们的轨迹在子午面同一侧是基本相同的。又由于电场分布轴对称，那么在轴线周围的电子轨迹是等价的，即阴极上发射的所有电子具有基本相同或等价的轨迹，这说明了新规的灵敏度不会随电子发射分布的变化而变化。所以，新规灵敏度的稳定性和一致性将比BA规好。

三、实验结果

为了方便实验，把阳极分成为图1所示的电子引出极(V_1)、边栅(V_2)和电子接收极(V_3)三部分。经计算，离子收集极距离离子聚焦2毫米就能避开 α 射线的直接照射。

1. 电子聚焦性

图7是进入电离区电子流 I' 点总发射电流 I_0 的比例随电子聚焦极电位 V_{ES} 的变化曲线。当 $V_{ES} = V_f = 50$ 伏时，只有50%的电子进入电离区，聚焦效果较差，但当 $V_{ES} = 0$ 伏时，有95%的发射电子进入电离区，聚焦效果很好。还有5%的电子被电子引出极收集。这些电子产生的 α 射线是背离离子收集极的，故选择电子聚焦极接地($V_{ES} = 0$ 伏)为工作电位。

2. V_3 对边栅电流 I_2 和灵敏度 K 的影响

图8是 I_2 随 V_3 的变化曲线，当 $I_c = 1$ 毫安， $V_1 = V_2 = V_3 = 200$ 伏， $V_f = 50$ 伏时， $I_2/I_0 = 10\%$ ，(其余接地)，这大大超过了由电子与气体分子碰撞产生的边栅电子流。这是由于电子的空间电荷效应和电子在电离区受一定的轴向减速、离轴径向加速作用造成的。

当 V_3 增大时，减小了轴向减速作用， I_2 大大减小。当 $V_3 = 280$ 伏时 I_2 小于1微安，即 I_2/I_0 小于 10^{-3} ，这完全符合对电子流分布的设计要求。

图9是 K 随 V_3 的变化曲线(所用参数与图8同)，当 V_3 由200伏增大到280伏时， K 减小近三倍，但还能保

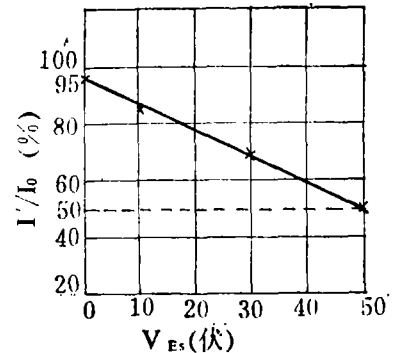


图7

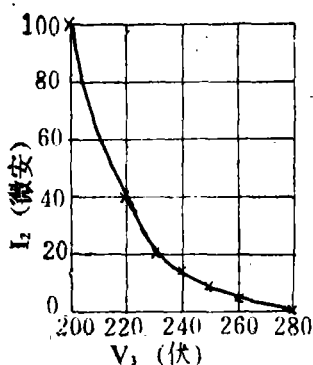


图 8

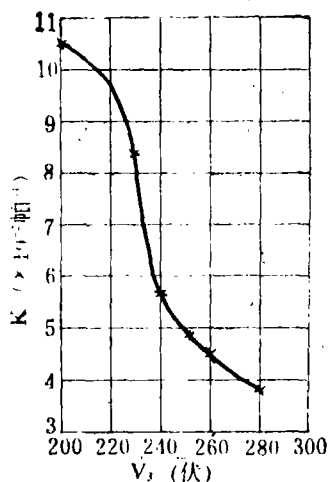


图 9

证 K 为 3.4×10^{-2} /帕。 K 的减小比 I_2 的减小慢得多,所以取 V_3 为280伏是可行的。

由上述实验,新规的工作电参量选择为: $V_f = 50$ 伏, $V_1 = V_2 = 200$ 伏, $V_3 = 280$ 伏, $V_{ES} = V_{IS} = V_c = 0$

3. V_2 对 I_2 和 K 的影响

如图10所示($I_c = 1$ 毫安, $V_1 = V_3 = 200$ 伏, $V_f = 50$ 伏, 其余接地), 当 V_2 由200伏减小到150伏时, I_2/I_0 小于 10^{-3} , 这是由于电子受到的离轴径向力减小所致, 同时灵敏度 K 也减小三倍(图11, 参数与图10相同)。由此可见, 新规的工作电参量也可选择为: $V_f = 50$ 伏, $V_1 = V_3 = 200$ 伏, $V_2 = 150$ 伏, $V_{ES} = V_{IS} = V_c = 0$

4. 空间电荷效应的影响

如图12所示($V_1 = V_3 = 200$ 伏, $V_2 = 150$ 伏, $V_f = 50$ 伏, 其余接地), 总发射电流 I_0 增大时, I_2 并不线性增大。在 I_0 小于1.5毫安时, $I_2 = 0$, 在 I_0 大于1.5毫安时, I_2 迅速增大。这说明了 I_2 受空间电荷效应的影响。由此应选择发射电流小于1.5毫安。

5. α 射线本底

选择上述结构尺寸和工作参量后, α 射线不能直接照到离子收极集上而灵敏度仅比普通BA规低三倍, 按 α 射线反射率为1%, 阳极的透过率为90%估算, 新规的测量下限比普通BA规至少低三个数量级。

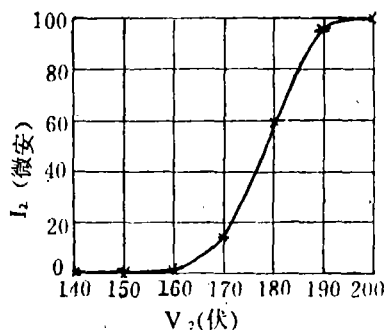


图 10

四、结 论

从控制电子轨迹和电子接收位置的思想出发, 设计了一个结构简单的新型电离规。理论分析和实验证明, 新规的测量下限至少比BA规低三个量级。它还能克服电子碰撞脱附效应, 灵敏度对外电场不敏感, 并且不随电子发射分布的变化而变, 因而灵敏度的稳定性和一致性较好, 是一种有希望测量更低压力的新规型, 进一步的实验工作正在进行。

(下转第17页)

使
$$\sigma = \sum_{i=0}^n [P(V_i) - T_i]^2 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_j V_i^j - T_i^2 \quad (2)$$

达到最小值, 即有 σ 对 a_k 的 n 个偏导数等于零。由此可得到正规方程组

$$\sum_{i=0}^n a_j \sum_{i=0}^m V_i^{j+k} = \sum_{i=0}^m T_i V_i^k \quad (k=0, 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

解正规方程组 (3), 求出 a_j 。

根据上述数学方法, 可以编程求出 a_j 。利用求出的 a_j , 得到 $P(V)$ 。为保证拟合精度, 应对算出的各点 T 值与相应的实际 T 值进行比较, 若误差超过规定的允许误差, 则需对拟合曲线方程增项, 即令多项式的次数为 $n+1$, 然后重新计算 a_j 值, 直到误差满足规定值为止。对于我们的工作测温区, 计算结果表明, n 在 5~7 间已满足要求。

用程序求解正规方程组时, 是采用了全主元高斯消去法, 求解线性代数方程组。

我们采用多项式函数 $P(V)$, 而不用正交函数来求解问题, 是由于: (1) 热偶电势校准曲线线性较好, 多项式拟合法中, 曲线方程次数较低, 正规方程组系数行列式不会出现“病态”的情形; (2) 校准曲线的等精度较好, 故不必考虑正交函数的权函数问题。

参 考 文 献

- (1) H89 微型计算机使用手册
- (2) A. Ebright, 微型计算机, 3 (1981)

(上接第22页)

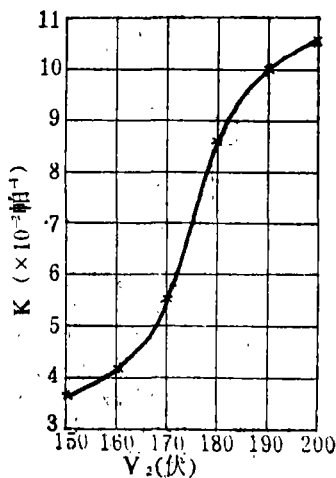


图 11

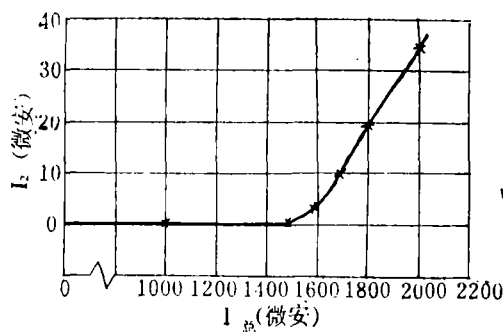


图 12

参 考 文 献

- (1) H. Kobayashi, Vac. Symp. Trans., (1960)
- (2) H. S. W. Masscy, Electronic and Ionic Impact Phenomena, 2(1975)