

次级电子倍增器型离子泵

横尾邦义 小野昭一

一、前言

近年来,以半导体工业为主,超高压电子显微镜,加速器,表面物理研究等许多领域越来越需要清洁的超高真空。为达到这一目的,将注意力多集中在涡轮分子泵和低温泵方面。两者的优点是均比较容易获得清洁超高真空,而缺点是都需要烘烤出气,安装方向受到限制和需要辅助泵,要获得完全无油的超高真空排气系统似乎还存在一些问题。看来,一定需要清洁超高真空的装置的抽气,目前还是使用在上述方面问题较少,而且使用简便的离子泵。

离子泵存在的问题是按容积计算泵的抽速小,特别是达到高真空后真空度越高抽速下降得越显著。抽速下降是因为气体压强在 10^{-6} 帕以上时电离空间的电子数几乎保持不变,而到更高真空时电子数随着气体压强的下降而减少。

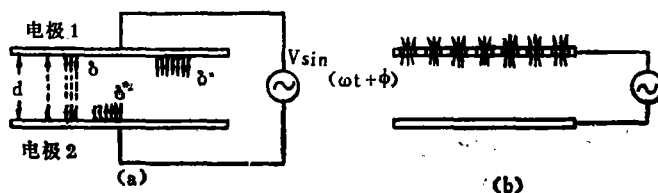


图1 次级电子倍增阴极基本原理

因此,要在高真空下仍保持大的抽速,在离子泵内就必须不断地供给大量电子。以前供给离子泵的虽然是来自放射性同位素的 β 射线的冲击产生的二次电子,但这种方法只能防止在超高真空范围内停止放电和解决开始放电难的问题,还不是增加电离空间的电子数和积极地增加抽速。笔者研究的目的是要得到一种泵,它与以前的离子泵相比,单位容积电离空间内的

的电子数大大增加,抽速增大,同时在高真空下抽速也不会下降。为此采用了次级电子倍增阴极作电子源的方案^[1、2],目前还处于实验研究阶段^[3]。次级电子倍增阴极作为这种离子泵的电子源具有下述有利的特点:1. 容易做成大面积平面阴极,2. 因为用铜、铝这样稳定的纯金属制成冷阴极,所以不会污染真空装置,3. 像下述那样使发射的电子在电离空间往复运动,那么一个电子就能产生很多离子。

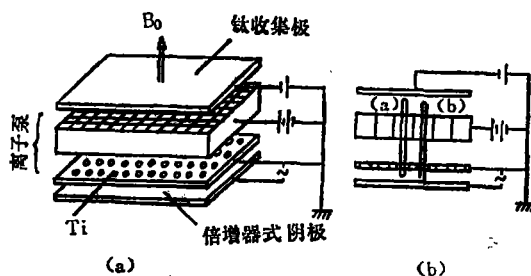


图2 倍增器型离子泵的基本结构

采用次级电子倍增阴极的离子泵(以下简称倍增器型离子泵)的抽速大幅度改善这一初

始目的已在一定程度上达到, 本文介绍其实验结果。

二、倍增阴极

作电子源用的倍增阴极是一种利用高频放电现象(即所谓的次级电子倍增效应)发射电子群的冷阴极。下面先叙述这一效应。

次级电子倍增效应原理如图 1(a) 所示。这种效应是在加有高频电场的二块平行板之间产生的与高频周期同步的二次电子倍增现象。由于某种原因从电极 2 发射的电子由高频电场加速而在电极间运动, 如果满足了(1)式的关系, 运动电子在后半周以(2)式表示的速度与电极 1 碰撞。式中 $\bar{V}$ 和 ω 分别为所加高频电压的振幅和角频率, v_0 , ϕ 为电子离开电极 2 时的初速和高压电压的初始相位。 d 是电极间隔。碰撞时的电子速度

$$\bar{V} = \frac{m(\omega d - v_0 \pi) \omega d}{e(\pi \cos \phi + 2 \sin \phi)} \quad (1)$$

$$v = v_0 + \frac{2e\bar{V}}{m\omega d} \cos \phi \quad (2)$$

如能使电极 1 的二次电子发射系数 δ 超过 1, 就产生二次电子倍增。由于该二次电子与高频电压相位反相而向相反方向运动, 像上述过程一样碰撞电极 2 后再次发射二次电子。重复这种过程, 二次电子数随时间而增加, 碰撞 n 次后则为 δ^n 倍。这种状态继续下去, 无穷大时间后应该产生无穷多的二次电子。但实际上, 在电子数增加的同时空间电荷效应增大, 碰撞速度与开始时不同了, 再加上和高压电压相位关系的变化等原因, 电子数增加到一定程度即达到平衡。这就是次级电子倍增效应, 也可以说是微波共振二次电子倍增现象。我们知道, 大功率微波管的高频功率损失就是这种非常大的电子倍增现象造成的。为防止这一损失, 曾作过重点研究。这种现象虽与一般的气体放电相似, 但它区别于气体放电的是在很高的高真空下也能产生, 目前正在考虑对该特征^[4~7]的各种应用。

若产生次级电子倍增效应的电极之一像图 1(b) 所示的那样在其上开一个孔或多个孔, 二次电子倍增产生的电子的一部分就可通过这些孔射出。这就是次级电子倍增阴极。这种阴极用的电极材料的二次电子发射系数 δ 如果大于 1, 就可作冷阴极用。因为有可能根据用途选择电极材料, 所以笔者选择了适合于作超高真空泵用的不必耽心造成污染的纯金属铜和铝。

次级电子倍增阴极单就工作原理看, 它发射的是与外加高频电压同周期的窄脉冲电流, 当把它用作加速器电子枪的阴极时曾对它作过一些研究^[8、9]。

三、倍增器型离子泵的构造

倍增器型离子泵的基本构造如图 2(a) 所示, 是由倍增阴极和一般的离子泵构成。从阴极孔发射出的电子以螺旋形轨道进入离子泵。这些电子从高频电场获得能量, 具有由(2)式表示的初速从阴极孔中射出。如果对面的离子收集极像普通离子泵那样接地, 那么它们就会被收集极捕获, 只能单方向运动。要使这些电子作往复运动, 使它们的运动距离加大, 如图 2 所示那样, 在离子收集极加一适当负偏压, 就使得射出的电子不再流入离子收集极。这些电子在离子收集极附近受到排斥后返回, 这时的电子运动轨迹如图 2(b) 所示。图中的电子 (a) 和 (b) 的轨迹不同是由于电子返回阴极孔附近时所遇的高频波的相位不同造成的。电子 (a) 返回到阴极孔附近时碰到高频减速电场, 再次被拉回到泵的电离空间。电子在电离空间渡越时间的长短可以调整离子收集极的负偏压或者格状阳极格子的外加加速电压, 使之

恰好像上述的那样,那么电子就能在电离空间作多次往复运动,使残余气体电离。而电子(b)则相反,由高频电场加速,向着对面的次级电子倍增阴极碰撞,再次产生二次电子。采用倍增阴极的优点不仅能供给电离空间大量电子,如能适当调整离子收集极的负偏压或加速电压还能使这些电子在电离空间长时间进行往复运动,使生成的离子数量显著增加。

图3为笔者试制的倍增器型离子泵的截面图。高频谐振器为单脊形三倍波长的矩形波导腔。考虑到高频损失和二次电子发射系数,波导腔用铝材制成。脊峰上开了许多孔。脊峰与对面的波导腔底板之间高频电场强的这一部分构成倍增器阴极。无负荷时谐振器的Q值为200。不锈钢格状阳极格子与钛制离子收集极组成的离子泵单元,装在脊形腔的槽里(见图3)。谐振器以及泵单元安在 $\phi 203$ 斜楔法兰上,然后装入不锈钢容器内。全部容积约为8升,抽速相当于市场上出售的100升/秒的离子泵。

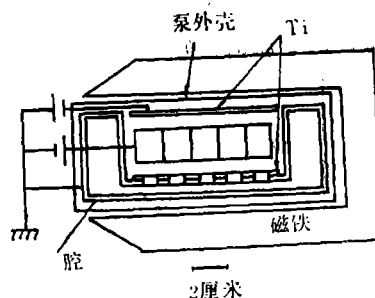


图3 试制的带单脊形波导腔的倍增器型离子泵的截面图

试制的这种泵是由倍增阴极和离子泵单元构成,如果不输入高频功率,就可作一般离子泵使用。因此,这种泵通常作普通泵使用,一旦需要大抽速,即可作为倍增器型泵使用。

四、工作特性

为了比较,用外径 $\phi 42$ 的导管将试制的倍增器型离子泵与市场上出售的抽速为400升/秒的离子泵相接,在两泵中间装上电离规。图5为连接图。

图6为在阳极格子上加上不同加速电压时流入钛制离子收集极的电流的变化。由于集电极加的负偏压远大于从阴极孔发射出来的电子的能量,所以几乎没有电子流入集电极,因此可以认为该电流是与单位时间内在电离空间形成的离子数成比例。离子流随加速电压的变化虽很复杂,有几个峰,但正如上述的那样,这些峰的出现恰好是在电子渡越时间与高频周期同步,发射电子在电离空间进行长时间往复运动的时候,其结果使生成的离子量增加。这是利用倍增阴极作电子源的优点之一。

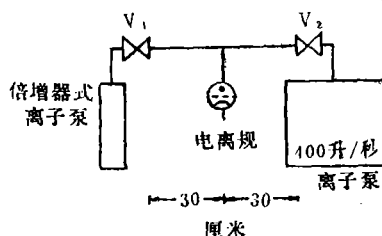


图5 试验装置连接图

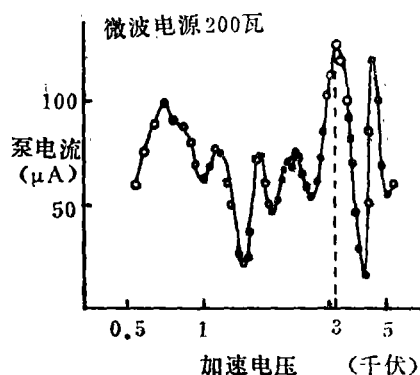


图6 倍增器型离子泵的加速电压与离子流的关系

在普通的离子泵中,无论是流入阳极格子的电子流还是流入钛电极的离子流,与在平衡

态下，在单位时间内电离空间产生的电子或离子数是相等的，把两者几乎看成等量，不管测哪个电流都没有什么区别，一般把它叫泵电流。在倍增器型离子泵中，发射的电子要流入阳极格子和与倍增阴极相配的钛电极，因此泵单元的离子流与电子流不同。在上述的加负偏压的离子收集极上测得的离子流，可以认为是在单位时间内在电离空间产生的离子量的一半，因为生成的离子流入阳极格子两侧对称配置的钛电极中。因此，下面按照对普通离子泵的习惯将该离子流的两倍叫泵电流。

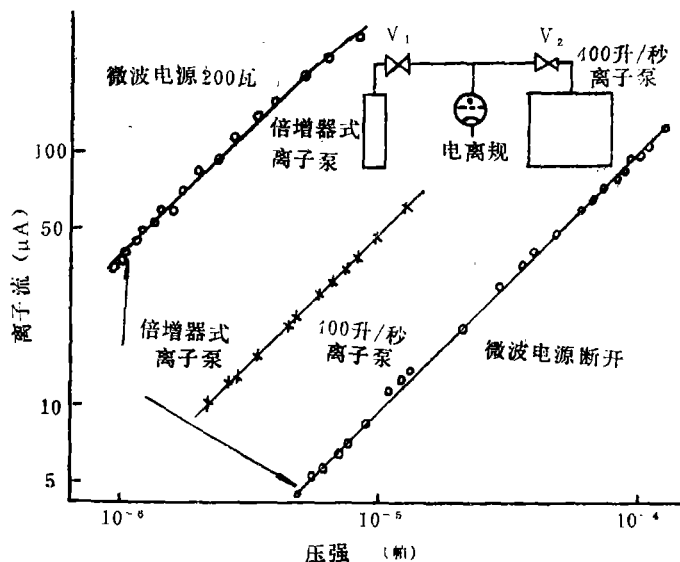


图7 倍增器型离子泵和普通的400升/秒离子泵的泵电流与压强的关系

按试制泵的容积推算大致是恰当的。作为倍增器型离子泵工作时，泵电流相当于400升/秒离子泵的8倍，按单位容积计算，为普通离子泵的30倍。

图8为各泵工作时泵电流与真空度的关系。开始时400升/秒离子泵和试制泵都工作，一边调整针阀一边抽气，使真空度几乎达到一稳定值（区域1）。随后调节高频功率，使两者的泵电流几乎相等。这时的真空度达 4×10^{-6} 帕，各泵的泵电流为 $20 \mu A$ 左右。这时切断离子泵的电子，离子泵停止抽气，如区域2所示的这时的试制泵的泵电流和压强都增加一倍。然后再开动离子泵（区域3），数分钟后几乎回到区域1的状态。这一回则将试制泵的电子切断（区域4），离子泵的泵电流和压强增加一倍后稳定下来。用泵电流推算抽速有很多问题，尤其是对超高真空下的抽速更有待于今后研究。但是现在这一试验结果表明，尽管在泵的放电形式上有变化，泵电流仍能作为具有多大抽速的大致标准。

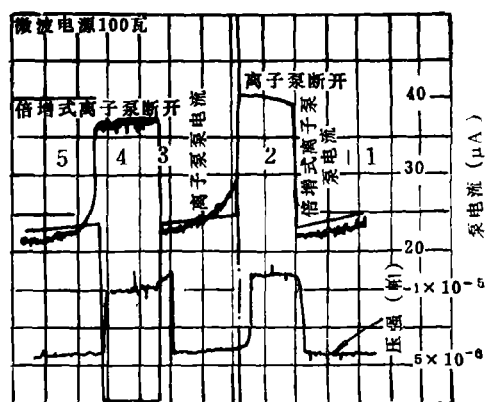


图8 倍增器型离子泵与400升/秒普通离子泵的抽气特性

因此,根据前述的试制泵的泵电流可以推算出,在以往抽速为100升/秒离子泵的体积中,倍增器型离子泵的抽速可望达3000升/秒。此外,为了使射出的电子在电离空间更加有效地使残余气体电离,希望电子尽可能长时间地在电离空间往复运动。获得这种轨道的倍增阴极的孔形状、大小或者磁场强度、方向、阳极格子的形状等许多因素都应选择最佳条件,目前还未达到这一点,因此可以预期更大的抽速。

这种试制泵达到的真空度虽为 9×10^{-7} 帕,这是因为高频电源使谐振器发热,发射的电子流入阳极格子等引起出气。如果适当选择所用材料,进行真空处理,改进倍增阴极和阳极格子的结构以减少流入阳极格子的发射电子,加上冷却谐振器等等,看来是容易达到更高的真空度的。

此外,如果高频功率发生波动,温度随之上升,谐振器会变长,输入高频功率有大的变化,倍增阴极的工作就不稳定,因此必须使输入的高频功率稳定。为了解决这一问题和上述的随着温度上升的出气问题,希望对高频谐振器冷却。

改进后的泵的谐振器采用水冷。如图9所示,谐振器采用双脊形波导腔,在各个脊形腔的槽内都装着泵单元。在上述的单脊形结构中,为使发射电子进行长时间的往复运动,电子在电离空间的渡越时间必须与高频周期同步。但在这种双脊形结构中,射出的电子返回到倍增阴极孔附近时,由高频电场减速的电子a与在所述结构中一样只在一个电离空间往复运动,而被电场加速的电子则飞入对面的电离空间。因而能够在两个电离空间往复运动,所以不需要同步条件,因此更有希望在实际中运用。

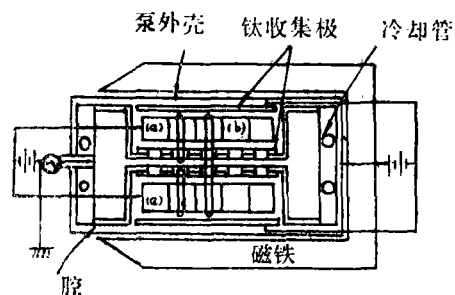


图9 双脊形波导腔的倍增器型离子泵的截面图

波导管型谐振器的侧壁用厚壁无氧铜板作成,在其中真空钎焊上铜管,直接水冷来使谐振器冷却。

改进的结果,容易达到 10^{-7} 帕左右的真空度,而且高频即使变化,倍增阴极也能稳定工作,也解决了高频功率引起的谐振器出气和变长的问题。

另一方面,作为倍增器型离子泵的特性,正如笔者预想的那样,即使改变阳极格子上所加电压,也不会像在单脊形谐振器中那样因电子渡越时间的改变而引起离子流的显著变化。但是构成电子倍增阴极的两个相对电极上的电子发射孔是对着的,因而向电离空间发射的电子数明显减少。这样,尽管在两侧装了离子泵单元,试制泵的全容积约为3.8升,比以前稍大一些,但所得电流与上述的单脊形结构相比减少到1/6,按此估计的抽速为500升/秒。因此,在这种结构中,为要尽量向电离空间发射大量电子,还必须在倍增阴极的结构和调整磁场强度等方面再下功夫。

五、结束语

本文介绍了笔者设计的在离子泵上加倍增阴极,即所谓倍增器型离子泵的研究现状。这种泵与普通的离子泵相比,单位容积的抽速大,尤其是能显著改善超高真空性能。

如上所述,试制泵中还有许多问题需要解决,但就抽速已获得满足初始目标的结果。

至于该泵采用高频电源会造成麻烦的问题,随着近年来半导体技术的进步,高频电源也可能半导体化,该问题就可能解决。笔者作高频电源用的是既便宜又容易买到的频率

为 2450 兆周的电子设备用磁控管。用于离子泵的倍增阴极的频率低到 1000 兆周在结构上有利,而且容易做成。这一频带的 100~200 瓦的高频电源容易半导体化,超高真空装置中所谓利用高频电源这一麻烦即可解除。

如上所述,可预料到,随着离子泵用倍增阴极结构的最佳化等问题的解决,将会出现直至超高真空抽速都很大的泵。

最后,关于用稳定金属制成冷阴极来保持倍增阴极特征,即在任何真空度下都能成为高密度电子源的问题以及不需要磁场的离子泵或者在低气压可得到大离子流的离子源等的实现将留在另稿中叙述。

参 考 文 献

1. 特愿昭 51—84837, 特开昭 53—10111
2. 特愿昭 54—124716
3. S. Ono et al, Proc. of 8th Int. vac. Cong. II (1980) 299
4. 横尾邦义等, 信学技报, ED76—106 (1977) 37
5. 横尾邦义等, IONICS, 47 (1979) 17
6. T. P. Carlisle, IEEE on Microwave Theory Tech. MTT-26 (1978) 345
7. M. P. Forrer et al, Proc. IRE, 50 (1962) 442
8. W. J. Gallagher, Proc. IEEE (Lett.), 57 (1969) 94
9. D. J. Liska, Proc. IEEE (Lett.), 59 (1971) 1253
10. 横尾邦义等, 信学技报 ED79—94 (1979) 65
11. 横尾邦义等, 第 41 届应用物理讲演会 1980

穆永阁译自“真空”24 6 (1981) 371, 兰增瑞校

三栅调制 BA 规的 C 模式调制原理

大岐隆朗

1. 试制的 BA 规的调制方法

这里报告的是利用新方法调制的三栅调制 BA 规的试验结果。

图 1 为这种规的结构简图。栅极是在上下圆形框之间沿纵向拉的细金属丝,各栅极按同心圆配置。图 2 为各电极的标准电位,按该电位调制就叫 C 模式法。 G_2 的电位一直下降到 0 伏附近时 G_2 捕获离子,这时称为 OFF (断) 状态。 V_{g2} 升至稍低于灯丝电位 (V_f) 时,称为 ON (通) 状态法。 V_{g2} 通常都低于 V_f , 电子不会流向 G_2 , 因而不会受电子撞击出气的影响。此外,它还高于地电位, G_2 发生的反 x 射线光电子不会流入收集极。

由于 G_3 的电位一定,既能使收集极周围的电场保持一定,又能减少随调制产生的感应电流的影响。

从容器内壁出来的反 x 射线光电子在到达收集极之前必须通过三个栅极,它差不多已被全吸收了。

2. 实验条件