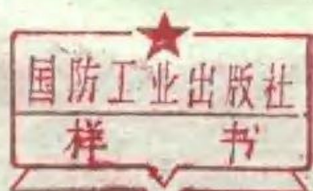


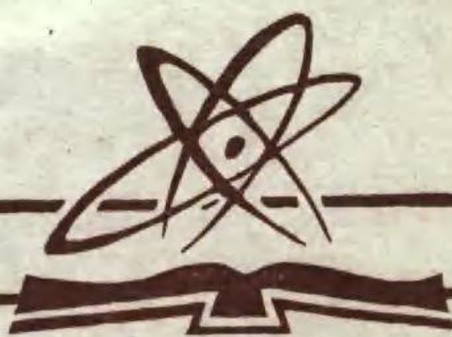
离子注入物理

西安交通大学

罗晋生 主编



国防工业出版社



前 言

本书系高等学校工科电子类半导体器件专业统编选修课教材之一。

全书共分六章，讲授时间为 40 学时。第一章对离子注入装置的各部件及其基本工作原理作简单介绍，使学生及从事这方面工作的读者对装置有所了解，便于学习，讲授可安排 5 学时。第二、三、四章讨论离子注入半导体中的一些基本问题及有关理论；第五章叙述离子注入层一些基本量的测量方法和原理。这四章是本书的基本部分，讲授可安排 30 学时。第六章介绍离子注入技术的应用，讲授时间安排 5 学时，内容可有所选择。第一章附录中给出了一些常用气体离子源的特性，供从事这方面工作的人员参考。由于离子注入技术是近年来发展的一个新兴技术领域，发展较为迅速。限于本书篇幅和编者水平，不可能将所有问题包罗在内，只着重阐述一些基本问题。

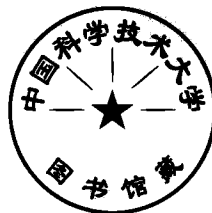
参加本书的编写人员有罗晋生、周彩弟及张屏英三同志，第一、五章由周彩弟同志编写，第二、三章由罗晋生同志编写，第四、六章由张屏英同志编写，全书最后由罗晋生同志修改定稿。

本书初稿完成后，曾由主审单位成都电讯工程学院半导体教研室谢孟贤同志审阅，并提出了宝贵意见。根据这些意见，做了修改，最后完成这本教材。

由于编者水平有限，错误和不当之处在所难免，希望读者提出宝贵意见。

编 者

一九七九年十月



内 容 简 介

本书介绍了离子注入半导体方面的基本问题及有关原理，共分六章，包括：离子注入装置，注入离子的射程分布，离子注入的损伤和退火效应，化合物半导体中的离子注入，测量技术，离子注入技术的应用。内容着重结合半导体方面。

本书可作为工科大学半导体专业及其他有关专业学生的教材，也可作为从事离子注入技术方面人员的参考书。

目 录

第一章 离子注入装置

§ 1.1 离子注入装置的结构	1
§ 1.2 离子源	2
§ 1.3 分析器	12
§ 1.4 偏转扫描	13
§ 1.5 注入剂量的测定	16
附 录 离子注入用主要气体源的性质	17

第二章 注入离子的射程分布

§ 2.1 射程、投影射程及标准偏差	20
§ 2.2 入射离子在固体中的减速过程	20
§ 2.3 非晶靶的射程分布理论	27
§ 2.4 沟道运动及单晶靶中射程分布	37
§ 2.5 射程分布理论的应用	44
附 录 两粒子碰撞的散射角	49

第三章 离子注入的损伤和退火效应

§ 3.1 离子注入引起的损伤	54
§ 3.2 离子注入损伤的分布	59
§ 3.3 热退火效应	63
§ 3.4 其他退火方式	68
§ 3.5 增强扩散	71

第四章 化物半导体中的离子注入

§ 4.1 III—V 族化合物半导体中的离子注入	75
§ 4.2 半绝缘 GaAs 中的离子注入	86
§ 4.3 GaAs 中的质子注入和 O^+ 注入	87
§ 4.4 其他化合物半导体中的离子注入	89

第五章 测量技术

§ 5.1 背散射测量	92
§ 5.2 放射性活化分析	97
§ 5.3 微分薄层电阻率法	100
§ 5.4 霍耳效应测量法	102

§ 5.5 电容电压法	104
-------------------	-----

第六章 离子注入技术在器件中的应用

§ 6.1 离子注入技术的特点	108
§ 6.2 离子注入技术在 MOS 器件中的应用	109
§ 6.3 离子注入技术在双极器件中的应用	116
§ 6.4 在其他器件中的应用	122
§ 6.5 离子注入技术在金属方面的应用	125

第一章 离子注入装置

早期, 研究离子注入技术是用重离子加速器来进行的。由于离子注入技术在半导体器件工艺方面获得广泛的应用, 进一步促进了离子注入装置的发展, 目前它已成为半导体研究和生产的一项重要技术装备。

尽管目前已出现了各种型式的离子注入机, 但就基本工作原理和基本结构来说是相同的。本章从使用离子注入装置的角度, 介绍离子注入装置的基本结构和简单工作原理。

§ 1.1 离子注入装置的结构[1]

离子注入装置的主要部件有离子源、分析器、加速聚焦系统等。图 1-1 为离子注入装置的示意图。离子源(a)是产生离子的部件。将适当的气体或工作物质的蒸汽通入离子源, 在其中电离形成正离子。通常从离子源引出的离子束中, 包括有多种离子(如 BCl_3 气体源中一般包含 H^+ 、 C^+ 、 B^+ 、 Cl^+ 、 O^+ 等), 这些离子在加速器(b)的加速电场作用下加速后, 经光栏(c), 进入磁分析器(d)。磁分析器可分选出所需的离子, 也就是说, 只让其中需要的离子通过, 形成离子束。为了获得均匀大面积的注入, 离子束经中性束偏转器(e)后, 需再经扫描器(f), 使离子束在注入靶片时能够扫描。

为了减少中性束的形成, 从产生离子到注入靶片的整个系统中, 真空度不得低于 5×10^{-8} Torr, 因此离子注入装置必须具有良好的真空系统。常用的真空设备是机械泵和油扩散泵。为了防止抽气设备对离子注入系统, 特别是对靶片的油污染, 可在靶室前增加一个液氮冷阱或采用无油泵。

离子注入装置带有比较复杂的高压设备, 可提供各种所需的电压。此外, 还有一控制台, 可对离子注入装置的各部分进行远距离操作、测量及监控。

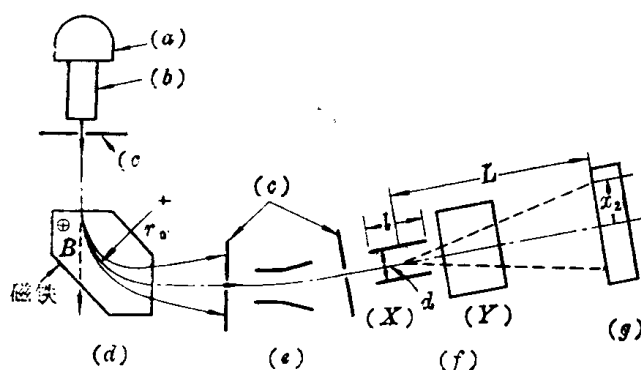


图 1-1 离子注入装置示意图

(a) — 离子源; (b) — 离子加速器; (c) — 光栏; (d) — 分析器;
(e) — 中性束偏转器; (f) — X、Y 扫描器; (g) — 靶室

在图 1-1 所示的离子注入装置中, 由离子源产生的离子束是先经加速器加速, 再由分析器分选出所需要的离子的, 这种装置称为“先加速、后分析”装置。其中, 分析器的电磁铁

处于“地”电位，因此供电、调试方便。但因离子经加速后具有较高的能量，这就需要用大型的电磁铁以产生强大的分析磁场，且加速能量改变时，须同时调节分析器。

有的离子注入机采用“先分析、后加速”装置。在这种装置中，由离子源引出的离子束，经初聚系统后，先进入分析器分选出所需要的离子，再经加速、偏转、扫描后进入靶室。其优点是分析器比较小，改变离子加速能量时不须调节分析器。但是这种装置的束流强度较小。还有注入机采用“前后加速、中间分析”的装置。其分析器不接地，处于高压，分析磁场强度的大小由前加速器的加速电压来决定。

对一台离子注入装置究竟采用什么样的结构，具有多大的能量范围，以及每个部件又采用什么样的结构等，这都需要根据不同的工作要求来决定。因此出现了种种不同式样的离子注入装置。下面仅对离子注入装置的几个主要部件——离子源、分析器、偏转扫描器以及注入剂量测量装置等分别加以讨论。

§ 1.2 离子源[1][2]

1.2.1 对离子源的要求

离子源的作用是使所需要的杂质原子（或分子）电离成为正离子，并通过一个引出系统形成离子束。它对离子注入装置能否获得高质量的离子束，并稳定可靠地工作，起着极其重要的作用。为了满足离子注入技术的需要，离子源必须：

(1) 能产生多种元素的离子。被电离的物质可以是气体，也可以是固体或气体、固体均可。

(2) 要有适当的离子束流强度。考虑到加速传输系统中的损失，对于束流为微安级的离子注入装置，由离子源引出的束流强度，一般应在几百微安到几个毫安的数量级。

(3) 结构简单、束流调节方便、稳定性重复性好、能较长时间使用。

(4) 引出的束流品质好。从离子源引出离子后，需经加速聚焦、分析、扫描等很长的路程才能达到靶室。如果引出束的品质不好，将给以后的聚焦、分析等带来困难，使束流在传输过程中有较大的损失，而且也难于获得整齐的靶点。

束流的品质包括：

1. 离子束的分散度：在成象光学中，用离子束成象处的直径和离子束刚离开引出孔道时的最初散角来表示之。散角是指离子束的最外层离子前进方向与束的轴线之间的夹角，如图 1-2 所示。要求引出束的直径和散角越小越好。

在束流光学中，用发射度来量度离子束的分散度。取离子运动方向相对束流的轴线的斜率 r^1 ，并以该离子在束截面内所处位置的半径 r 和 r^1 作图，这个图叫做束流在该截面的 (r, r^1) 相图。该相图所占的面积叫束流的相面积，用 A 表示。在等势空间内，在同一束流的不同位置处，可得 A 值为一常数，定义 $e = A/\pi$ 为束流的发射度，单位为米·弧度。 e 的值越小，离子束的分散越小。

单位截面积、单位立体角内所包含的束流强度称为亮度。

2. 离子能量的分散度：从离子源引出的每个离子的能量并不完全相同，在离子束内各离子间存在的最大能量差 ΔE 叫做离子束的能量分散度。束流的能量分散会给束流的聚焦、

分析造成困难，因此希望 ΔE 越小越好。

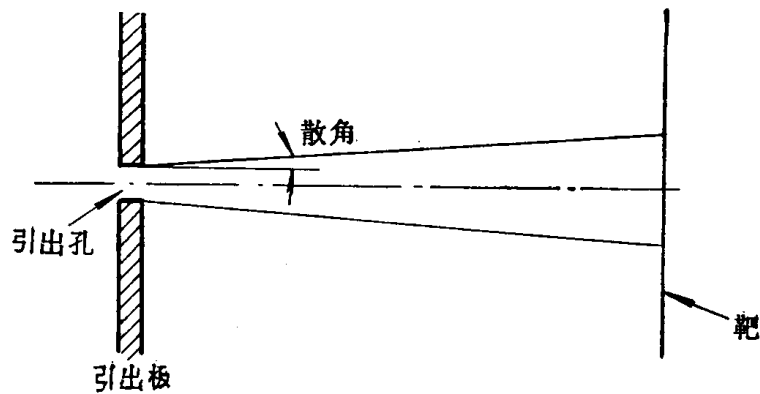


图 1-2 离子束的分散度

3. 其他指标：

离子源的气体利用效率：即离子源的耗气量与引出束流强度之比。要求越小越好。

功率利用效率：即消耗的功率与引出束流强度之比。要求越小越好。

引出束中所需离子的含量：即所需元素离子在引出总流量中所占的比例。要求所需离子的含量要大。

1.2.2 离子源的基本结构

离子源由产生高密度等离子体的腔体和引出部分（吸极）组成。图 1-3 表示一种常见的离子源——高频离子源，图中还画出了离子源与加速聚焦系统之间的连接部分。

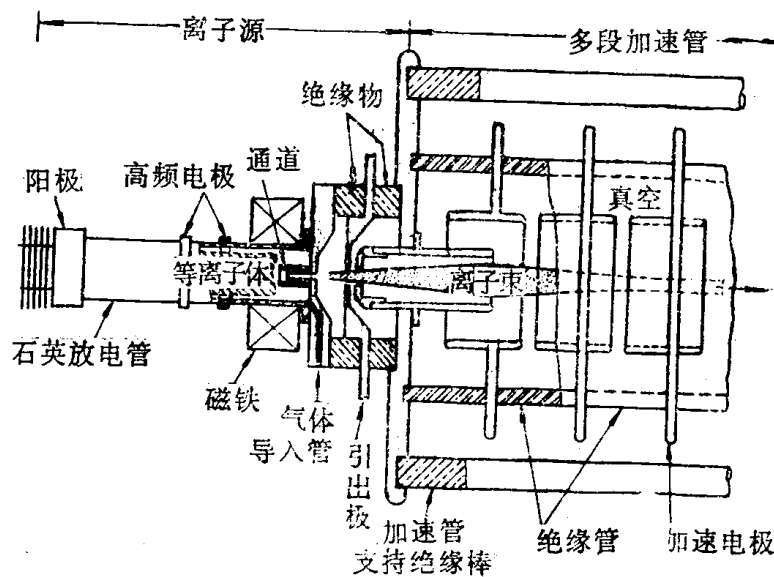


图 1-3 高频离子源的结构

通常，用于离化的物质，可以是固体，也可以是气体，与此相对应就有固体离子源、气体离子源以及固体/气体离子源。气体离子源使用较普遍，如用 H_2 气产生 H^+ ，用 BF_3 、 B_2H_6 气体产生 B^+ 等。使用气体源的优点是供应简便、调节容易，但大多数气体源都有毒、易燃易爆，使用时必须注意安全。最常用的几种气体的特性列于附录的表中。固体离子源主要用在产生金属离子的场合，不如气体离子源使用普遍。

气体离子源是靠进入离子源腔体中的气体放电而得到正离子的，因此，如何形成气体放电并能使之持续进行，是气体离子源能否正常工作的关键。离子源的基本工作原理，也就是气体放电原理。气体放电的类型有许多种，正是利用不同的放电方式制造了不同的离子源。在各种不同的离子源中，常用的放电方式有：(1)高频放电；(2)电子振荡放电(简称EOS)；(3)低电压弧光放电；(4)双等离子电弧放电等。图 1-4 表示这些放电方式形成离子束的离子源结构示意图。

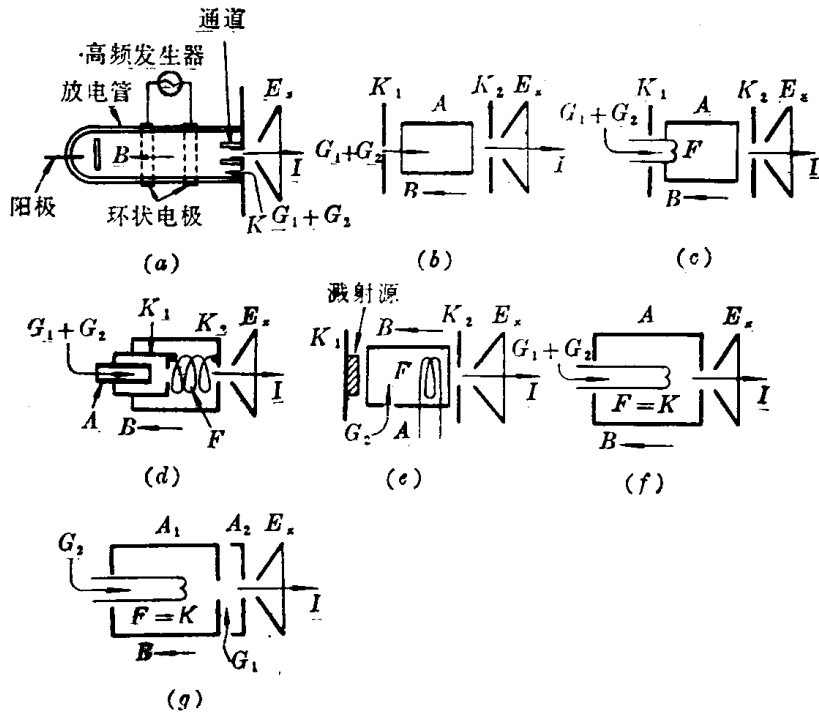


图 1-4 各种放电方式的离子源结构示意图

G_1 —电离物质的气体； G_2 —持续放电用的惰性气体；
 K —阴极； A —阳极； E_s —引出极； B —磁场； F —加热灯丝
 (a)—高频放电型； (b)—冷阴极 PIG 型(EOS)；
 (c)—热阴极 PIG 型(EOS)； (d)—中空阴极 EOS 型；
 (e)—溅射型(EOS)； (f)—低电压电弧放电型； (g)—双等离子体型。

1.2.3 气体放电形成等离子体

将一对平板电极，放在有一定真空度的密封容器中，两电极间加电压 V_0 ，如图 1-5 所示。

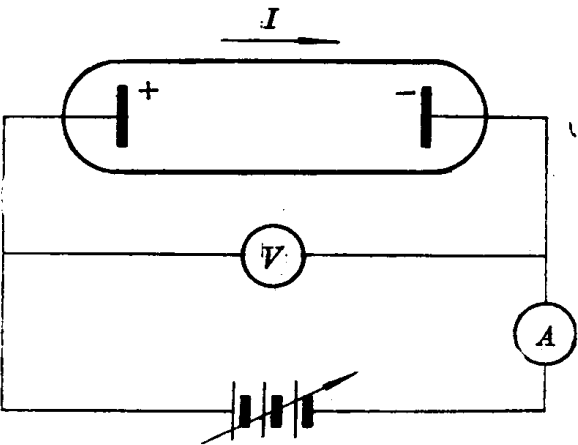


图 1-5 气体放电

如果由于某种原因，在阴极附近出现一个电子，这个电子将在电场作用下获得能量而加速，并向阳极运动。电子在向阳极运动中可能与其他气体原子(或分子)发生碰撞，产生电子和正离子。这些电子又可能与另外的原子(或分子)碰撞，再产生新的电子-正离子对，如此不断地繁殖下去。另一方面，正离子也在电场的作用下向阴极运动，并获得能量。当它们打在阴极上时，会从阴极激发出电子来。这些电子也可加入如上所述的碰撞电离过

程。因此，在阴极附近出现的一个电子，在它移动到阳极的过程中，能产生大量的电子-正离子对。与电离过程同时发生的，还有中性原子（或分子）的被激发过程，即气体中一部分中性原子（或分子）与电子碰撞时获得的能量不足以引起它们的电离，而只是被激发到较高的能态。这些处于激发态的原子（或分子）在极短时间内（ $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 秒）又回到原来的能级，同时将多余的能量以光辐射的形式放出，引起气体发光。如果两电极间所加的电压 V_0 太低，两极间的距离太短，以致使电子不能获得足够的能量和产生上述的电子-正离子对的繁殖，则电离不能发生，也不能持续进行。气体放电是一个比较复杂的物理过程，它与很多因素有关。如气压、电极间距离、阴极材料的逸出功、气体的种类、成分、温度等对气体放电过程都有显著的影响。

图 1-6 表示气体放电后两电极间的电位分布。阳极和阴极电压降区的厚度分别为 d_a 和 d_c ，其大小与两电极间的距离无关，形成放电所需的电压大部分降落在阴极区。如果阴极区的厚度 d_c 小于电子发生二次碰撞平均所走过的路程（平均自由程） L_p 时，则放电不能持续地进行。若要放电持续进行，必须 $d_c > L_p$ 。中间一段电压基本保持不变，其长度随两电极间距离的增加而增加，这个区域就是气体在离子源中放电所形成的等离子体。在等离子体中，电位处处相等，电场强度等于零，其中必然电子数和正离子的电荷数相等。等离子体中的离子密度与等离子体的特性有关，一般为 $10^{10} \sim 10^{14} / \text{cm}^3$ 。

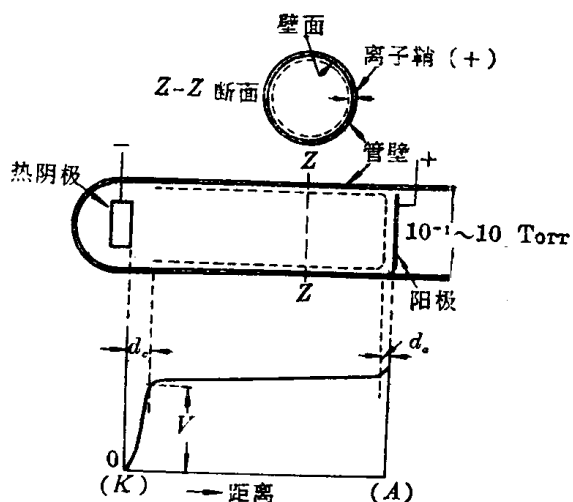


图 1-6 气体放电后两电极间的电位分布

为了使得电子能有效地电离气体，通常都利用附加磁场。因为电子在磁场中受洛伦兹力的作用作螺旋运动，而不是直线地从阴极到阳极，这就增加了电子的运动路程，也就增加了与气体原子（或分子）碰撞的机会。这个附加磁场可以由永久磁铁也可以由电磁铁来形成。

各种离子源其共同点都是靠电离放电形成离子密度很高的等离子体，然而引起气体放电的原因以及放电方式可以是不同的。如图 1-4 所示的冷阴极潘宁源是靠气体中的残留正离子起主要作用的，这些正离子在电场作用下向阴极运动，打击阴极，在阴极发射出电子，然后电子经如前所述的电离放电过程，形成等离子体。这种放电形式的阴极位降区的电压降比较大，约为 100~400 伏，且电流密度比较小，称作辉光放电。而在热阴极的弧光放电情形，由于靠加热阴极产生热电子发射，故阴极电压降很低，仅仅 10 伏左右，且电流密度可达安培数量级。如果在放电管的两电极上加高频交流电，形成高频放电，这时无法区别阴极和阳极，因此高频放电可以是内电极、外电极、甚至无极放电。无极放电是把一个没有电极的放电管置于高频磁场中，使其中自然带电粒子在涡旋电场的作用下运动而产生碰撞电离。

1.2.4 离子束的引出

通过气体放电产生等离子体后，如何从等离子体中引出离子束呢？尽管引出系统的具体结构可以多种多样，但其原理是基本相同的，且都要求能引出分散性小的强束流。此外，还

希望具有大的气阻（因放电区处于低真空，束流的加速区处于高真空，如果通过引出系统的气流过大，会给高真空的获得带来困难，也会降低气体的利用率）。

离子束的引出系统通常有直接引出和间接引出两种。直接引出方式可用图 1-7 表示。它的基本结构是两个带圆孔的金属电极，圆孔的直径是很小的，通常为毫米数量级，其中一个叫阳极，另一个叫引出极（又称吸极）。阳极和引出极之间加电压 V_e ，电压的正极接阳极，

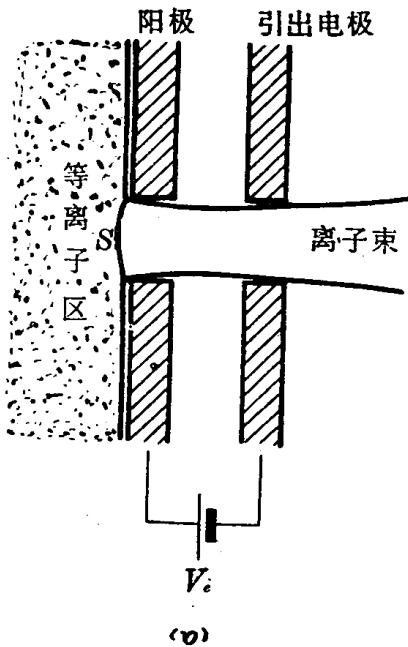


图 1-7 离子束的引出系统

它直接与等离子体相接触，与等离子体处于同电位。电压的负极接引出极，引出极相对于等离子体为负电位，因此在等离子体边界和引出电极之间形成一个加速离子的电场。等离子体边界面的离子被此电场加速，通过引出极中央孔形成离子束。束流的大小用如下方法估算：

等离子体是一个等势体，其中电场强度等于零，形成稳定的等离子鞘的必要条件是离子具有的动能大约为

$$E_k = kT_e / 2 \quad (1-1)$$

式中 T_e 为电子的平均温度。另一方面，离子运动的动能 $= \frac{1}{2} M v^2$ ，因此

$$v = (kT_e / M)^{1/2} \quad (1-2)$$

式中 M 为离子的质量， k 为玻尔兹曼常数， v 为离子运动的速度。当等离子体鞘的 S 面处有引出孔时，从等离子体边界发射面 S 处单位面积上发出的离子电流密度

$$j_p = q n_i v \quad (1-3)$$

式中， n_i 为等离子体中的离子浓度， q 为电子的电荷。将式(1-2)代入式(1-3)得：

$$j_p = q n_i (kT_e / M)^{1/2} \quad (1-4)$$

离子从发射面引出后，立即进入引出电场的加速区。在这区域内，离子一方面要受到引出电场的加速作用，同时也受到由于电子流本身所产生的空间电荷力的阻碍作用。离子电流密度越大，空间电荷密度也就越大。在一定的引出电压下，给出极限值 j_e ， j_e 与吸极电压 V_e 的大小、等离子体到吸极间的距离 d_m 等有关。

$$j_e = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2q}{M} \right)^{1/2} \cdot \frac{V_e^{3/2}}{d_m^2} = 5.45 \times 10^{-8} \frac{V_e^{3/2}}{d_m^2} \cdot \frac{1}{M^{1/2}} \quad (1-5)$$

当引出系统稳定正常工作时，必须：

$$j_e = j_p \quad (1-6)$$

将式(1-4)和式(1-5)代入式(1-6)得到：

$$d_m \propto V_e^{3/4} / n_i^{1/2} T_e^{1/4} \quad (1-7)$$

等离子体发射面的形状对离子束的引出有很大的影响。图 1-8(a) 表示平的等离子发射面，得到平行引出的离子束；内凹的发射面有会聚作用，如图 1-8(b) 所示；外凸的发射面对离子束有发散作用（图 1-8(c)、(d)）然而过于内凹也是不利的。因此适当的调节发射面的形状，对于获得品质好的强束流有重要意义。实际上正如式(1-7)所指出的，引出极相对于等离子体的电位 V_e 和等离子体的离子浓度 n_i 对发射面的形状有很大影响。图 1-9 表明了这一关系。图 1-9(a) 是 V_e 不变， n_i 从小逐渐增加时，发射面的形状由内凹变为外凸的情

形。图 1-9(b) 是 n_i 不变, V_e 逐渐减少时, 发射面的形状由内凹变成外凸, 并且当 $V_e=0$ 时, 不能引出束流的情形。在实践中, 对于某个特定的离子源, 对最佳的束流(强度和品质)相应有最佳的引出电压和最佳的工作气压, 而最佳的工作气压又随放电气体的种类而异。这只能靠在实践中具体探索, 细心调节, 以获得最佳的工作状态。

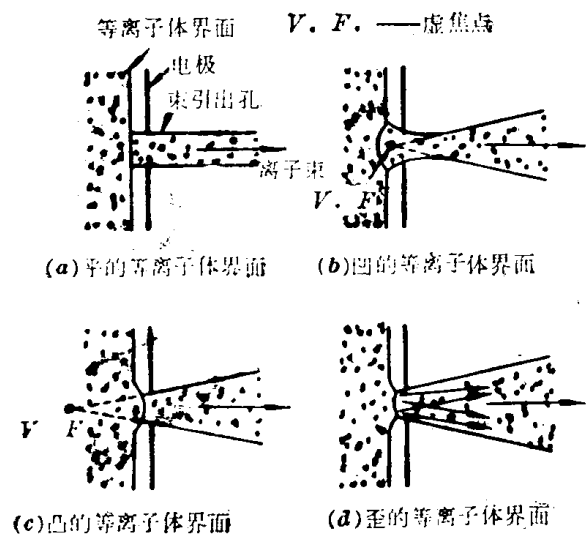


图 1-8 等离子体发射面的形状对离子束引出的影响

束流的间接引出方式如图 1-10 所示。图 1-10(a) 表示 A、B 两电极间插入电极 C, 其中 A 极和 C 极间电位差为 V_1 , C 极和 B 极间电位差为 V_e , B 极作为引出极引出离子束。图中还画出了等离子体发射面的形状。图 1-10(b) 是间接引出方式离子源的结构示意图。在热阴极和中间电极(即 A 极)之间因低电压放电而形成等离子体。阳极(即 C 极)与中间电极间的电位差 V_1 较低, 从放电室引出的正离子向中间极和阳极之间的空间扩展, 实际上在 A、C 两电极间形成一个离子密度较低的等离子体。显然, 这就是双等离子体的情况。

按照离子束引出结构的特点, 又可分为轴向引出和侧向(或称径向)引出两种。所谓轴向引出, 就是放电的主轴与束流方向相平行, 而侧向引出是束流方向与放电的主轴方向相垂直, 分别示于图 1-11(a)、(b)和(c)中。

最后还需指出: 离子源的气体放电室和引出系统的具体尺寸必须精心设计和精密加工, 并细心地安装调试。离子源具有一定的寿命, 使用者在拆装离子源时, 如发现小孔不圆、孔的边缘不整齐、电极有损等情况时, 需要更换零件。装配时必须清洗干净, 使各孔间同心,

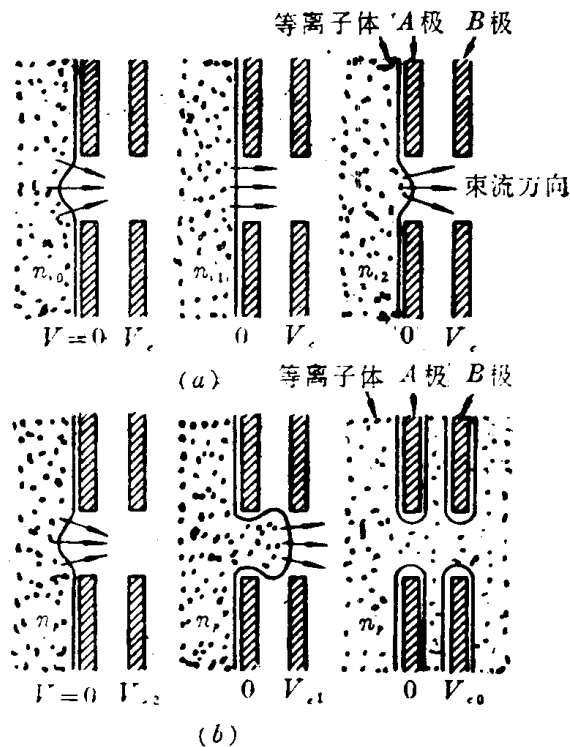


图 1-9 n_i 和 V_e 对发射面形状的影响
(a) — V_e 不变时, 发射面形状随 n_i 的变化 $n_{i0} < n_{i1} < n_{i2}$;
(b) — n_i 不变时, 发射面形状随 V_e 的变化, $V_{e2} > V_{e1} > V_{e0}$

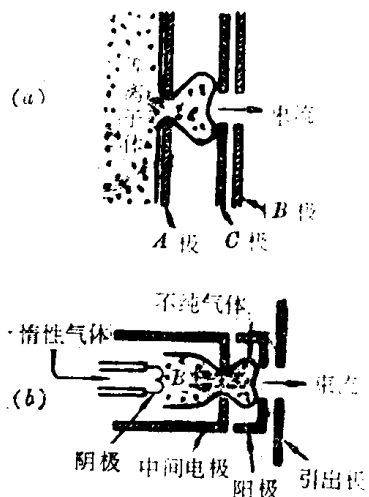


图 1-10 离子束的间接引出方式
a—间接引出系统;
b—间接引出离子源的结构示意图

并注意各电极之间的距离是否与设计要求相一致，否则，不能获得良好的束流。

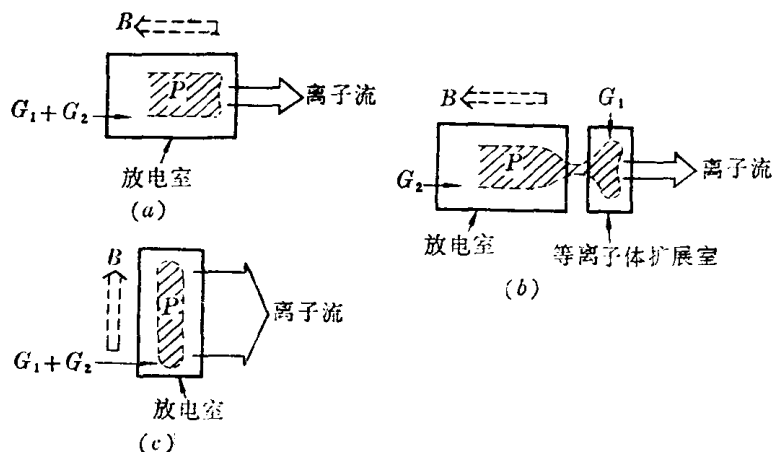


图 1-11 束流引出方式示意图

P —等离子体区； B —磁场（放电的轴向）；

G_1 —电离物质的气体； G_2 —持续放电用惰性气体。

(a)—轴向引出方式；

(b)—轴向引出方式（双等离子体）；

(c)—侧向引出方式。

1.2.5 离子源实例[1]

目前已使用的离子源有许多种，下面介绍几种常用离子源的结构。

（一）高频离子源：高频离子源的寿命长，工作稳定，离子束中单原子离子的含量较高，在离子注入装置中被广泛采用。

图 1-12 是由结构比较简单的放电管组成的高频离子源。由高频振荡器在放电室内产生高频电场来加速自由电子，使其与气体原子（或分子）进行碰撞而引起电离，形成等离子体。高频放电室一般用石英或玻璃作成。放电管的外侧套有一对环状金属电极，它与高频电源的自感线圈相耦合，两金属环形成一个电容器，所以把它称为电容耦合方式。放电时，放

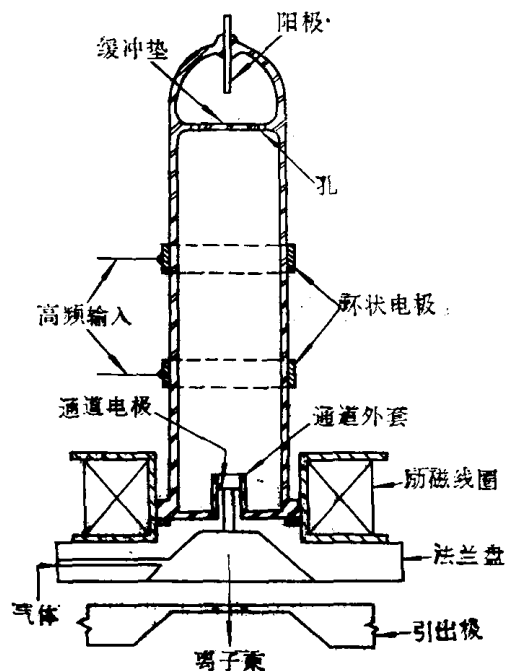


图 1-12 高频离子源

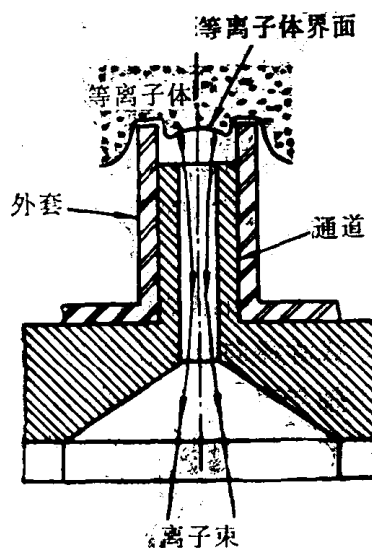


图 1-13 高频离子源的引出系统

电管内的气压约为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Torr。

高频离子源的引出系统由通道、引出极和绝缘屏蔽组成。通道探头是高频离子源的重要部件，其结构如图 1-13 所示。它是一个细长的引出管道，通道的外面套有绝缘外套，离子从中央的孔道中引出，形成离子束。由于管道长，气阻比较大，流出的气流比较小；且对束流有整流作用。直流磁铁的轴向与离子束流的方向一致，这可以显著地改善引出效率。

(二) 电子振荡型离子源: 电子振荡型离子源 (Electron Oscillation Type Source 简称 EOS) 以冷阴极潘宁源 (Penning ionization gauge 简称 PIG) 为代表。图 1-4(c) 的热阴极 EOS 型、(d) 的中空阴极 EOS 型以及 (e) 的溅射 EOS 型也都属于电子振荡型离子源。

图 1-14 是冷阴极潘宁源的基本结构。两个相对安装的阴极 (K_1 和 K_2 , K_2 为引出端) 中间有一个圆筒状的阳极, 组成潘宁源的放电室, 并置于轴向强磁场中。阴极可用钼、钨、石墨等材料作成, 阳极圆筒用石墨作成。图 1-14(a) 为轴向引出方式, 图 1-14(c) 为侧向引出方式。由图可见, 潘宁源的结构简单, 但获得的束流较小。

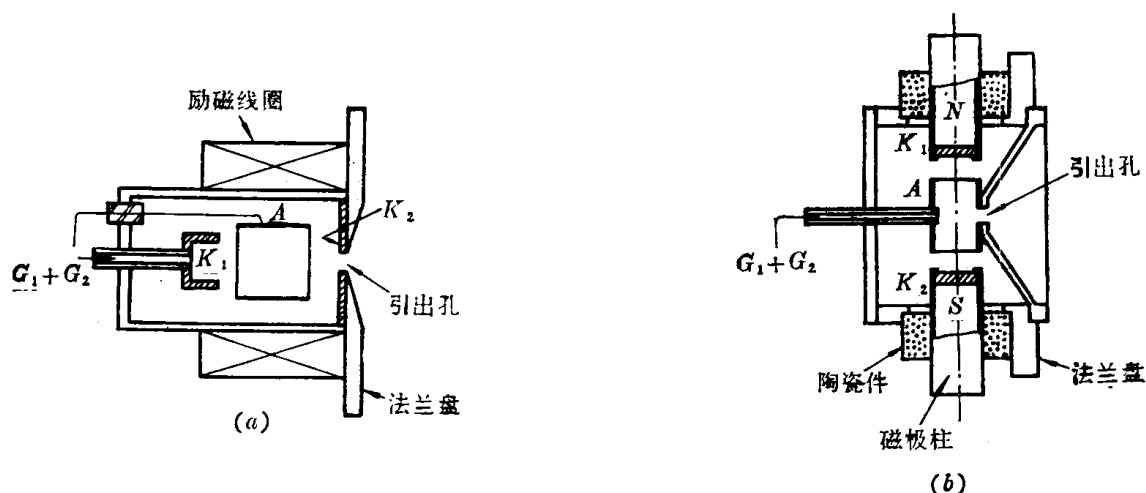


图 1-14 冷阴极潘宁源的基本结构
(a) — 轴向引出方式; (b) — 侧向引出方式。

电子振荡型离子源的基本工作原理都是这样的: 从阴极发射的电子通过中间的阳极而加速, 同时对面的阴极又使电子向后反射, 轴向磁场使电子不能很快地到达阳极, 因此, 电子在二个阴极间来回振荡。电子由于经历了多次振荡, 行走了很长的路径, 这就使得电子与气体原子 (或分子) 发生电离碰撞的几率大大增加, 以致发生电离放电, 形成等离子体。潘宁源不仅能得到单电荷的正离子束, 而且单电荷正离子还有机会与电子碰撞, 使它再失去一个或几个电子, 形成多电荷的正离子束, 可作成多电荷离子源。

图 1-15 为一种热阴极潘宁源。被电离的物质可以是气体, 也可以是固体。如果固体是粉末状物质, 从导入管引入, 被阴极 K_1 加热而汽化。

图 1-16 是中空阴极离子源。在中间有空槽的中空阴极和圆筒状阳极间形成等离子体, 阴极 K_2 作引出端。被电离的物质可以是气体, 也可以是固体。若是固体, 将其放在导入管顶端的坩埚中, 导入管的位置可左右移动, 调整它与等离子体的相对位置, 从而控制被电离物质的加热温度, 以获得合适的蒸汽压。

在溅射型离子源中, 被电离的物质作溅射电极, 放电室中的离子冲击溅射电极, 将溅射电极的原子溅入放电室而被电离成正离子。图 1-17(a) 是轴向引出的溅射型离子源, 图 1-

17(b)是侧向引出的溅射型离子源。图中，阴极 K_1 为溅射电极，阴极 K_2 为引出端，圆筒状的是阳极。图 1-17(b) 的结构比较简单，能获得较大的放电电流。

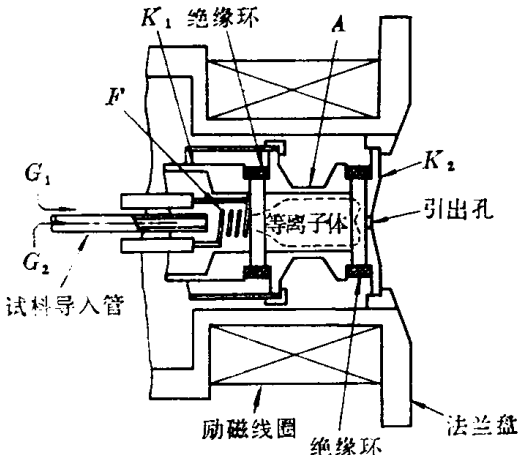


图 1-15 热阴极潘宁离子源

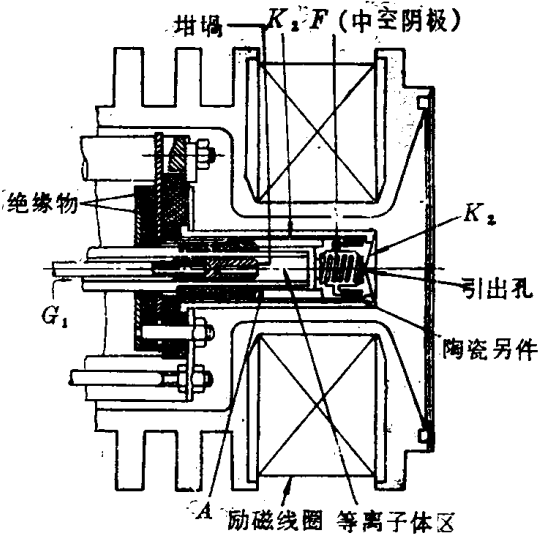


图 1-16 中空阴极离子源

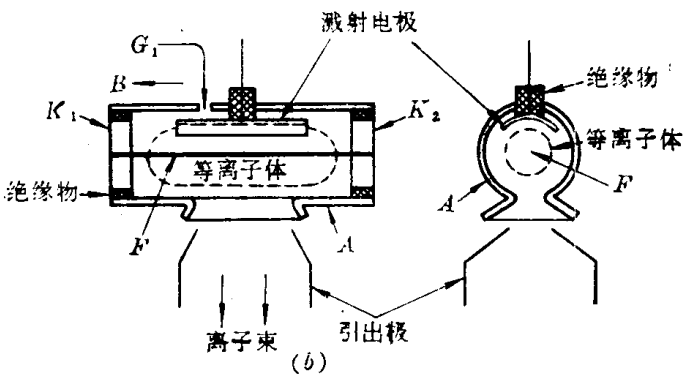
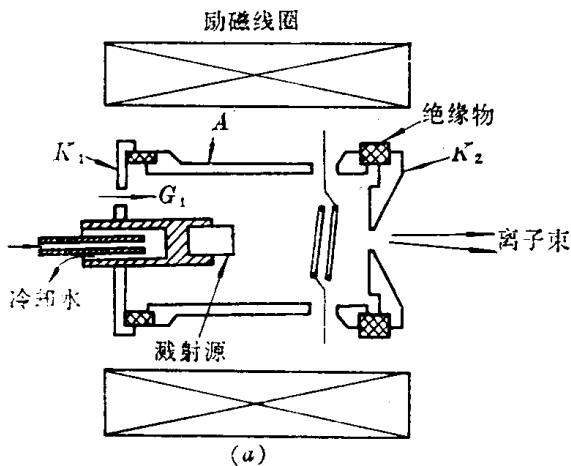


图 1-17 溅射离子源
a—轴向引出方式； b—侧向引出方式。

§ 1.3 分析器

分析器是一种离子分选器。由于从离子源引出的离子束中一般包含有几种离子，而需要注入的是某一种离子，这就需要一个分析器将所需离子分选出来。

目前，离子注入装置中常用的分析器是磁分析器和正交电磁场分析器。在磁分析器中常用扇形分析磁铁，其中 60 度和 90 度扇形分析磁铁最普遍。从分析器小型化角度看，正交电磁场分析器具有离子束不转弯即直线进行的特点，但结构复杂、中性束严重，使用不多。

1.3.1 磁分析器[1]

当离子沿垂直于磁场的方向进入均匀磁场中时，离子将作圆周运动，其轨道半径随离子的能量、荷质比及磁场强度的不同而异。磁分析器就是利用这一原理来分选离子的。

磁分析器大体上是由直流电磁铁和真空盒组成。直流电磁铁由磁轭、磁掌和励磁线圈组成。两极掌的端面（叫极面）互相平行，真空盒放在两极面之间，为离子的通道，极面呈扇形，两极掌间的距离 D 称为极距，一般为几个厘米。磁场的大部分被限制在两个极掌间，磁力线与极面正交，极掌间的磁场基本上均匀，即在距磁极边界一个极距以内的区域中，磁感应强度 B 处处相等，在边界附近磁场沿着边界外法线逐渐变小，直到远处为零，如图1-18(a)、(b)所示。从图1-18(b)看到，由 S 点发出的发射束，其中心束沿垂直于磁极的界面方向射入磁场，离子束进入均匀磁场后，作半径为 r 的圆周运动，最后会聚于 F 点。从图1-19可看

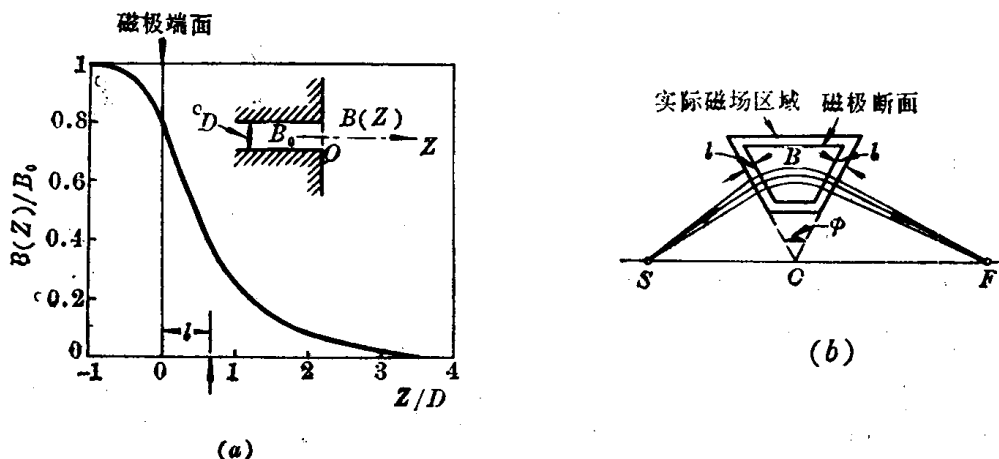


图 18 实际扇形磁场
(a) — 磁铁边界处磁感应强度的变化； (b) — 实际电磁铁的界面情况。

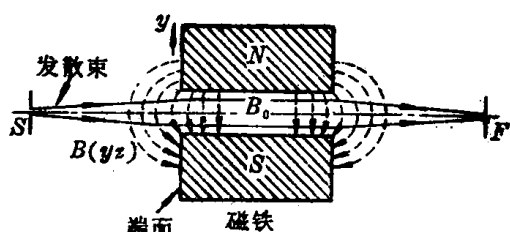


图 1-19 边界磁场对束流的会聚作用

到，边界磁场对束流有会聚作用。一台磁分析器，在被分析离子的质量数较小时，都能容易地达到分选离子和甩掉中性束（离子注入装置的前半部分产生的）的作用。但在分析重离子时，若要制造出性能良好的磁分析器，必须详细地研究其聚焦性能和分辨率。

下面简单介绍一下磁分析器分选离子的基本原理：

为简便起见，讨论均匀磁场的情况。图1-20(a)为均匀扇形磁场。图1-20(b)是位于两磁极中间与磁极平面平行的面（中平面）的俯视图。磁场的方向与中平

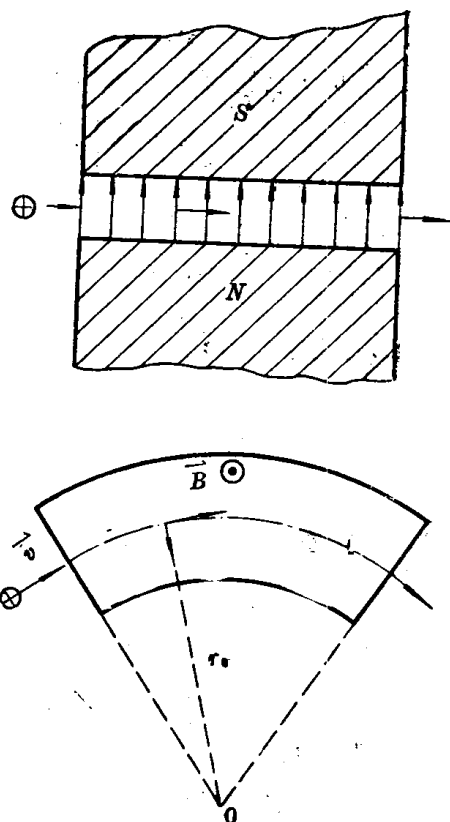


图 1-20 离子在均匀磁场中的运动
(a) — 正视图； (b) — 俯视图

面正交, 从纸的背面指向正面, 用符号 “ $\vec{B} \odot$ ” 表示。扇形的曲率半径为 r_0 。

设有一个正离子, 其质量为 M , 电荷量为 Zq (其中 q 表示电子电量绝对值, Z 表示离子的电荷数), 以速度 $\vec{v}$ 垂直于电磁铁的界面进入磁铁的中平面。带电粒子在磁场中运动时要受到洛伦兹力 $\vec{F} = Zq\vec{v} \times \vec{B}$ 的作用, 力的方向垂直于 $\vec{v}$ 和 $\vec{B}$ 所组成的平面。现在, 离子运动的方向与磁场方向正交, $|\vec{v} \times \vec{B}| = vB$, 故洛伦兹力的大小为 $F = ZqvB$, 这个力对离子运动来说是一个向心力, 使离子作匀速圆周运动。设圆周半径为 r , 又向心加速度 $a_r = v^2/r$, 根据牛顿第二定律可得 $ZqvB = Mv^2/r$, 由此解出

$$r = Mv / ZqB \quad (1-8)$$

设离子进入均匀磁场以前所具有的能量为 E , 因 $v = \sqrt{2E/M}$, 代入上式得

$$r = \sqrt{2ME} / ZqB \quad (1-9)$$

对实用单位制:

$$r = 1.44 \frac{\sqrt{ME}}{ZB} \times 10^{-2} = \frac{1.44}{B} \sqrt{\frac{MV}{Z}} \times 10^{-2} \quad (1-10)$$

式(1-10)中, B 的单位为特 (1特=10000 高斯); E 为电子伏; V 为伏特; r 为厘米; M 为原子量, 为简便起见有时用元素的质量数, 如硼: 原子量为 10.8, 质量数为 11。

式(1-9)反映了磁分析器分选离子的基本原理。从式中看到, 离子在磁场中作圆周运动的半径 r 是由离子的质量 M 、离子的电荷数 Z 、离子所具有的能量 E 以及磁感应强度 B 决定的。若在扇形磁铁的切线延线的前后各设一个狭缝 S_1 和 S_2 来限制离子束, 则在电荷数 Z 、磁感应强度 B 和离子能量 E 一定下, 只有具有某一质量的离子, 可以通过狭缝 S_2 , 而其余离子都不能通过, 这就达到了分选离子的目的 (见图 1-21)。

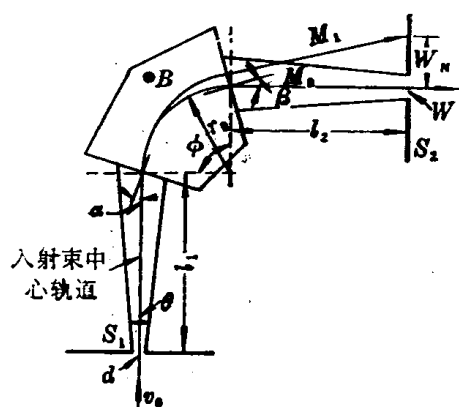


图 1-21 扇形磁铁分选离子的情况

另一方面, 如果 Z 、 r 和 E 固定, 连续地从小到大地调节磁感应强度 B , 即可使各种质量的离子按质量 M 从小到大的次序一一通过狭缝 S_2 , 并在 S_2 后面的测量装置中挨次地得到各种离子的讯号。可在自动函数记录仪上得到各种离子对应的讯号图样, 这种讯号图样称为质谱。图 1-22 是 PIG 离子源 BF_3 质谱的一部分, 图中, 横坐标表示磁分析器电流的安培数, 它反映了磁场强度, 纵坐标表示通过磁分析器的离子电流密度, 各个质谱峰上注明了离子成分。

1.3.2 正交电磁场分析器

下面简单介绍正交电磁场分析器:

正交电磁场分析器的结构如图 1-23 所示。在平行板电极间有一个均匀磁场, 电场为 X 方向, 磁场为 Y 方向, 磁场与电场正交。

当离子束垂直进入均匀的正交电磁场时, 将同时受到电场力和磁场的洛伦兹力的作用, 这两个力的方向正好相反。当某一质量为 M_0 的离子在分析器中所受的电场力和洛伦兹力的数值相等时, 这种离子所受的合力等于零, 因而不发生偏转, 按原来的运动方向通过正交电磁场分析器而达到靶室。质量较 M_0 为大或小的离子, 所受的电场力和洛伦兹力不相等, 因