

离子注入机基础

北京出版社

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了离子注入机的工作原理、设计原则，并简要地介绍了它的结构和现状。可供离子注入机的设计、制造和运行人员学习参考，也可做为从事粒子加速器及其他有关粒子束设备的科技人员、教师和学生的专业参考书。还可供具有中专以上水平的科技人员阅读。

离子注入机基础

北京市辐射中心，北京师范大学
低能核物理研究所加速器研究室

*

北京出版社出版
(北京崇文门东兴隆街51号)

新华书店北京发行所发行
北京印刷一厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20.25印张 450,000字

1981年9月第1版 1981年9月第1次印刷

印数1—1,300

书号：13071·125

定价：2.25元

前 言

60年代以来,离子注入技术在国外得到了较快地发展。我国从60年代末期开始了离子注入技术的研究工作。现在,离子注入技术已经得到广泛地实际应用。为了普及有关离子注入机知识,在全面了解离子注入机工作原理的基础上,提高对离子注入机的设计、生产水平和运行、维修能力,我们编写了这本《离子注入机基础》。

我们从60年代末期就开始从事离子注入机的研制和运行工作,本书主要是在总结多年来工作经验的基础上写成的。在编写过程中得到了有关兄弟单位的大力支持,同时也部分地吸取了国外有关经验。

本书初稿经有关单位的专业人员进行了审定。主审为山东大学物理系王承瑞教授。参加审定的还有:山东大学(雷震寰、张永恩),北京大学(赵渭江、宋执中),西安交通大学(戴震东、遆宁),上海核子所(毛羽),上海冶金所(乔壖),长沙1448所(屈保春),一机部自动化所(刘友光),邮电部508厂(杨宝山、尹崇义),700厂(遇衍澄、陆逢涛),北京机电院(张兆熊)等。他们经过认真审阅,提出了许多宝贵意见,在此对他们及其他给以帮助的同志一并表示感谢。

由于我们的水平所限,错误之处在所难免,请读者提出宝贵意见。

本书系集体编写,其分工如下:

第一章 绪论	吴 猛 张荟星
第二章 离子源	马明修 王维国
第三章 离子束的聚焦	张荟星 韩主恩
第四章 质量分析器	张孝吉 张荟星
第五章 带电粒子束的传输	马明修
第六章 真空系统和注入机的终端设备	王文勋 吴 猛 张荟星
第七章 注入机的电器设备	潘世友 陈如意 官秉舜
统 编	马明修

编者

1980年

目 录

第一章 绪论.....	(1)
第一节 离子注入技术及其对离子注入机的要求.....	(1)
第二节 离子注入机的结构和类型.....	(5)
第三节 离子注入机的发展状况.....	(11)
第二章 离子源.....	(16)
第一节 离子源的要求和类型.....	(16)
第二节 气体放电的物理基础.....	(19)
第三节 离子束从等离子体中的引出.....	(27)
第四节 双等离子体离子源.....	(40)
第五节 潘宁源和尼尔逊源.....	(44)
第六节 弗利曼型离子源.....	(50)
第七节 高温中空阴极源.....	(54)
第八节 高频离子源.....	(58)
第九节 离子源参数的测量.....	(69)
第十节 离子源结构材料和工作物质.....	(73)
第三章 离子束的聚焦	(88)
第一节 轴对称电场的离子光学性质.....	(88)
第二节 离子光学与光线光学的一致性.....	(92)
第三节 静电透镜的工作特性.....	(98)
第四节 等梯度加速管.....	(106)
第五节 四极透镜.....	(112)
附 录 静电透镜的光学特性.....	(124)
第四章 质量分析器	(158)
第一节 磁分析器的结构和带电粒子在磁场中的运动.....	(158)
第二节 单向聚焦的磁质量分析器.....	(161)
第三节 双向聚焦的磁质量分析器.....	(166)

第四节	延伸边缘场效应	(174)
第五节	质量分辨率	(184)
第六节	磁分析器设计举例	(187)
第七节	正交电磁场分析器	(191)
第五章	带电粒子束的传输	(202)
第一节	相空间和刘维定理在束流传输中的应用	(202)
第二节	在束流传输中发射相图的变化	(208)
第三节	椭圆方程和束流传输的状态方程	(211)
第四节	束流传输中的束包络	(214)
第五节	“腰—腰”传输	(223)
第六节	束流光学与离子成象光学的一致性	(230)
第七节	接受相图和束流传输的匹配	(233)
第八节	空间电荷效应概述	(243)
第六章	真空系统和注入机的终端设备	(249)
第一节	离子注入机真空系统概述	(249)
第二节	离子束的扫描	(256)
第三节	注入靶室	(264)
第四节	离子注入机几个主要参数的测量	(267)
第七章	注入机的电器设备	(276)
第一节	高压稳压电源	(277)
第二节	磁分析器稳流电源	(293)
第三节	扫描电路	(300)
第四节	电流积分仪	(310)

第一章 绪 论

第一节 离子注入技术及其对

离子注入机的要求

一、离子注入技术简介

离子注入，是将某种元素的原子进行电离，并使其在电场中进行加速，获得较高的速度后射入固体材料表面，以改变这种材料表面的物理或化学性能的一种技术。

近十几年来，关于离子注入技术的研究和应用已相当广泛，它已扩展到许多新的领域，形成了一种多学科性的边缘科学技术。例如，在金属表面注入某些离子，可以获得一般冶金工艺很难得到的表面“合金相”，从而提高金属表面的硬度、耐磨性、抗腐蚀性等性能。用离子注入技术可以改变石英玻璃的折射率，这已成为“集成光学”中的一项有效技术。此外，利用离子注入技术在研制记忆元件（如磁泡）以及提高超导材料的超导转变点等方面的研究，也都有了一定的进展。但是，目前离子注入技术最重要的应用领域，还是在半导体的掺杂方面。今天它已成为一种成熟的半导体离子注入技术，在生产上得到广泛应用，并且在继续进行深入的研究。

1952年美国贝尔实验室利用20~30 keV的氢离子，轰击温度为300~400°C的硅单晶片，结果改善了点接触型二极管的特性，作出了具有短波长响应的太阳能电池。1954年又提出了用离子注入法制作P-N结的专利，并预见到，采用这种方法制作基区很薄的高频晶体管。但是，由于当时对高速离子轰击所造成的晶格缺陷缺乏认识，另外当时还没有良好的离子注入装置，所以离子注入没有引起人们的足够注意。与此同时，热扩散技术在半导体制造工艺方面获得了很大的成功，所以人们的兴趣都转向热扩散法，致使离子注入技术的发展，在一段时间内受到一定的阻碍。随着科学技术的发展，对电子器件的性能提出了更高的要求，热扩散法逐渐暴露出一些弱点。同时离子束与固体表面的相互作用的研究也有了迅速发展，因而使人们再次注意到离子注入技术的研究。自六十年代以来，在半导体领域内的离子注入技术有了迅速的发展，它比热扩散法显示出了以下多方面的优越性：

(1) 离子注入可以通过分别调节注入离子的能量、数量，精确地控制掺杂的深度和浓度。热扩散法对于这两个量都不能独立控制。特别是在需要浅结和特殊形状的情况下，利用热扩散法是很困难的，而离子注入法则可以充分保证它的精确度和重复性。

(2) 离子注入没有横向扩散。在进行半导体掺杂时，往往在半导体片表面制作一层

的，需要注入的剂量是很不同的。从表 1.1-1 和 1.1-2 所列举的例子可知，对于半导体注入，一般在 $10^{11} \sim 10^{16}$ 离子/cm²，金属注入则需要 10^{17} 离子/cm² 以上。例如，要求注入剂量为 10^{17} 离子/cm²，当注入电流只有 10 微安时，注入一片直径 40 mm 的样品就需要 7 个多小时。这样的注入工作效率太低了，因此要求提高注入的离子电流。如果注入电流提高到 1 毫安，在同样的条件下，注入一片样品的时间将下降到 4 分多钟。注入产量与注入剂量、注入电流强度的关系见图 1.1-2。从图中看出，当注入剂量超过 10^{14} 离子/cm² 时，在 60 微安的注入电流下，每小时注入的样品数开始下降。在这种情况下，提高产量的办法主要是提高注入电流强度，而不是缩短装拆样品的处理时间。

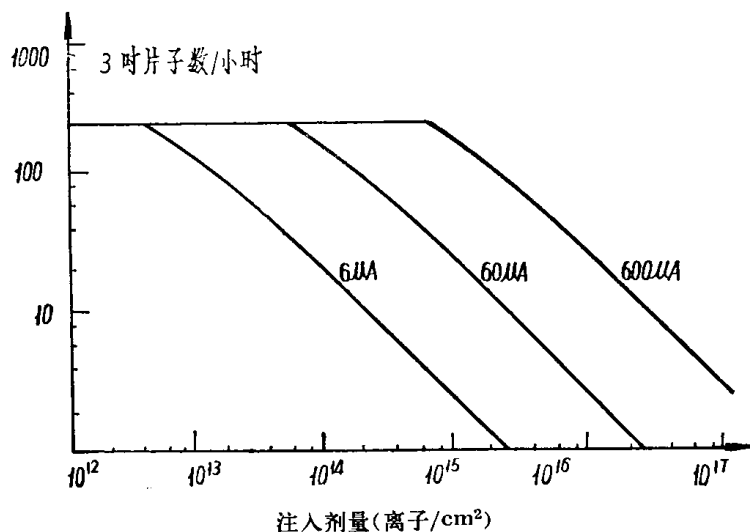


图 1.1-2 注入产量与注入剂量、注入电流的关系

一般说来，对半导体离子注入有数十微安到数百微安的束流就够了，而对于金属注入则需要毫安级的束流强度。

3. 要考虑注入的离子种类

从表 1.1-1~1.1-3 可以看到，需要注入的离子种类是相当广泛的，目前已注入过的元素已有数十种之多，就其质量数来说，从原子量为 1 的氢到原子量为 200 以上的元素都有。但是对于硅注入来说，主要是硼、磷、砷三种。

4. 要有好的注入均匀性

均匀性好是离子注入技术的主要优点之一。均匀性（有的也叫不均匀性）的量度，通常是用测量注入基片上不同点的薄层电阻而得到的标准偏差来表示，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}{(N-1)}}$$

其中 N 是测量点的数目； R_i 是测量点的薄层电阻； \bar{R} 是平均薄层电阻。根据生产大规模集成电路的需要，对于直径为 5 cm 的基片，离子注入机的注入均匀性应作到

$$\sigma/\bar{R} \leq \pm 1\%$$

5. 其它要求

为确保注入基片的清洁，要求注入机的真空系统无油，以免沾污基片。

表 1.1-1 离子注入硅半导体片所需要的条件

器 件	离 子 种 类	能 量 (kev)	剂量(离子/cm ²)
P 沟道 MOS	B ⁺	50~100	最大 10 ¹⁵
N 沟道 MOS	P ⁺	~100	最大 10 ¹⁵
MOS 器件	B ⁺	~30	10 ¹¹ ~10 ¹²
调阈值电压	P ⁺	~50	10 ¹¹ ~10 ¹²
结型场效应	P ⁺ (n ⁺ 层)	300~400	10 ¹²
晶体管	B ⁺ (p ⁺ 层)	50~100	10 ¹⁵
npn 晶体管	B ⁺ (基区)	50~150	5 × 10 ¹⁴
	P ⁺ (发射区)	50~200	
	As ⁺ (发射区)	100~450	2 × 10 ¹⁶
pnp 晶体管	P ⁺ (基区)	50~200	10 ¹⁴
	B ⁺ (发射区)	60	2 × 10 ¹⁶
IMPATT 二极管	B ⁺ (p ⁺ 层)	60~100	
	B ⁺ (p层)	80~200	10 ¹⁵
可变电容二极管	P ⁺ (n 层)	300	10 ¹²
集成电路用高值	B ⁺	30~55	5 × 10 ¹² ~10 ¹⁴
电阻器			
光电二极管	P ⁺	150	10 ¹⁴ ~10 ¹⁵
核探测器和医用探测器	B ⁺	20~40	3 × 10 ¹⁵
	P ⁺	40	3 × 10 ¹⁵

表 1.1-2 离子注入化合物半导体

名 称	能 量 (kev)	离 子 种 类	剂量(离子/cm ²)
Ga As 制备 n 型薄层	100~150	S ⁺	-1~1.5 × 10 ¹³
双异质结激光器制备隔离区	1000~2500	O ⁺	1 × 10 ¹⁴
Ga As P 发光管	20~150	Zn ⁺	2~6 × 10 ¹⁵
	100~200	N ⁺	5 × 10 ¹⁴
Hg Cd Te 红外探测器	250	Al ⁺	5 × 10 ¹⁵
	30	Hg ⁺	10 ¹² ~10 ¹³
In Sb 红外探测器	100~150	Mg ⁺	10 ¹⁴ ~10 ¹⁵

机器的性能要求稳定可靠，并具有较好的重复性，以保证不同次的注入条件有较好的一致性。

注入靶室要求能够进行高低温注入，高温一般要求能做到 400~500°C，低温能做到液氮的温度。

表 1.1-3 离子注入金属样品

注入目的	离子种类	能量 (kev)	剂量 (离子/cm ²)
耐腐蚀	B C Al Ti Ar Cr Fe Ni Zn Ga Y Mo In Eu Ce Ta Ir	20~100	>10 ¹⁷
耐磨损	B C Ne N S Ar Co Cu Kr Mo Ag In Sn Pb	20~100	>10 ¹⁷
改变磨擦系数	Ar S Kr Mo Ag In Sn Pb	20~100	>10 ¹⁷

另外,注入机工作时有X射线产生,还要使用一些有毒的物质,因而要求有较好的防护条件。

总之,一台好的注入机,必须具备稳定可靠、效率高、适用范围广、操作维护方便等优点。

第二节 离子注入机的结构和类型

一、离子注入机的结构

各种离子注入机的结构,在细节上虽有所不同,但它们都是由相同的几部分组成的。图 1.2-1 是离子注入机的结构示意图,现将它的组成部分作一简单介绍。

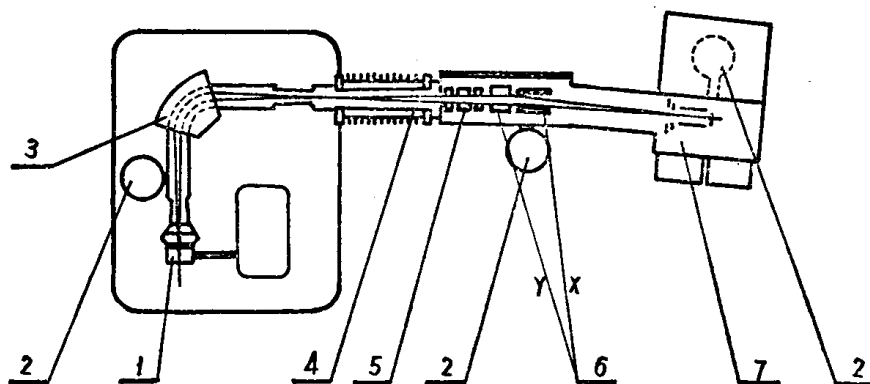


图 1.2-1 离子注入机结构示意图

1. 离子源 2. 真空泵 3. 质量分析器 4. 加速管 5. 四极透镜 6. 扫描系统 7. 靶室 8. 高压电源

1. 离子源

离子源的作用,首先是把需要注入的元素的原子电离成为离子。所谓电离就是打掉原子外围的一个或几个电子,使原子带上一个或几个正的电子电荷,这样离子才能在电场中得到加速。离子源的第二个作用,是使离子从离子源中引出,形成离子束。离子束的截面通常是圆形,有的是长条形,由离子源引出口的形状而定。

离子源是离子注入机最重要的部件之一。一台离子注入机能够注入什么离子种类和

能够提供多大的束流强度，主要取决于离子源的性能。离子源的种类很多，设计一台离子注入机必须根据注入的离子种类和束流强度等要求，选择合适的离子源。

2. 质量分析器

需要注入的离子束是某一种特定元素的离子。然而，从离子源引出的离子束并不是纯净的，除去我们需要的一种离子外，它往往还包含着几种甚至十几种其它元素的离子。质量分析器的作用，就是把我们需要的一种离子从离子束中分选出来，将不需要的离子种类偏离掉。在离子注入机中，质量分析器多采用磁分析器。它是一个具有某一离子偏转半径的电磁铁，具有同样能量和不同质量的离子进入磁场中，就按离子质量的不同以不同的半径偏转，经过磁分析器后，原来的离子束就以离子质量的不同分成了几束，从而达到了分选离子的目的。磁质量分析器的优点是结构简单，工作稳定可靠，其缺点是造价较高。在离子注入机的设计中，必须仔细地选取它的参数，其中主要是偏转半径和磁感应强度，这两个量决定了磁分析器能够偏转和分选离子的能力。

3. 加速系统

加速系统的任务是形成电场，离子在电场力的作用下，受到加速而得到预定的能量。在离子加速器中，离子的加速主要有两种类型，即静电场加速的高压加速器类型和高频电场加速的周期加速类型。离子注入机一般都属于前一种类型。如果离子所带的电荷 $q = Ze$ (e 为电荷，其绝对值等于一个电子的电荷量； Z 为离子的电荷数)，加速管两端间的电压差为 V ，那么，离子通过加速管所获得的能量为

$$E = Z \times V$$

这里 V 、 E 分别以伏和电子伏为单位。1 电子伏 = 1.6×10^{-12} 尔格，就是一个电子受到 1 伏电位差的加速获得的能量。这一单位的引入，使离子加速能量的计算变得十分方便。如离子带的电荷数 $Z=1$ ，那么离子的能量就等于加速电压的数值。显然，电子伏这一单位是很小的，在离子注入机中的实用单位，一般是用千电子伏 (keV)。加速系统除去具有加速离子的功能外，还有聚焦离子束的作用，使离子保持在预定的空间内运动。

在高压型粒子加速器中，通常要用到规范化电势这一概念，即规定以粒子的动能为 0 的点的电势为 0 来计算的电势。这样，粒子所具有的动能 (以电子伏为单位)，在数值上就等于该离子所在点的规范化电势 (如果粒子的电荷数为 1)。使用规范化电势的优点在于，不管加速带正电荷或负电荷的粒子，其所用到的物理表示式都是一样的。

这里需要说明的另一点是，在离子注入机的离子动力学计算中，是否能应用经典力学公式，还是必须利用相对论力学公式的问题。我们知道，当运动物体的速度 v 大大小于光速 c 时，可以应用经典力学的公式，而离子注入机的能量一般在数十到几百 keV 之间。例如对于 600 keV 的硼离子来说，其速度为

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 6 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-12}}{1.67 \times 11 \times 10^{-24}}} = 3.4 \times 10^8 \text{ cm/秒}$$

而光速 c 为 3×10^{10} cm/秒，可以满足应用经典力学公式的条件，因而在本书中一般只计

论非相对论的情况。

4. 聚焦透镜

离子从离子源引出，最后到达靶室，一般要飞行几米到十几米的距离。为了减少离子在行进中的损失，通常要在途中设置一些聚焦透镜，以实现离子束的聚焦。在离子注入机中经常应用的聚焦透镜，主要有四极透镜和单透镜等。

5. 扫描和靶室系统

为了保证离子注入的均匀性，必须使离子束在注入样品上进行反复地均匀扫描，扫描系统就是为了实现这一目的而装置的。目前使用的扫描系统，主要有电扫描和机械扫描两种。前者是注入样品固定不动，由离子束进行扫描；后一种是固定束流位置，由移动样品的位置来实现扫描。

注入靶室是装载注入样品的装置。对机械扫描来说，扫描和靶室是合二为一的。目前已有许多种靶室，对它的要求主要是能装载样品的数量多，更换样品的速度快，以便提高生产效率。其次，要求靶室具有能精确测量束流强度的接收装置。有的靶室还要求在高温、低温以及不同角度下进行注入。

6. 真空系统

离子束要在真空系统中进行传输，否则离子就会和空气的分子发生碰撞而被散射或中和掉。系统的真空度一般要优于 1×10^{-5} 托(毫米水银柱)，注入靶室的真空度要求优于 1×10^{-6} 托，而且最好要有液氮冷阱以冷却油蒸汽，避免沾污注入样品。一台注入机通常都有两套以上的抽气机组。如图 1.2-1 所示的注入机，就有三套抽气机组，以保证注入机的各部分具有足够好的真空度。

7. 电器设备和控制系统

离子注入机的电器设备，主要有：产生高压电场加速离子束的高压电源，其稳定度一般在 10^{-3} 以上；用于供给电磁铁激磁电流的磁分析器电源，其稳定度一般在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间；用于供离子束扫描的扫描电源，它一般为锯齿形或三角形电压波；以及用于记录注入样品离子数的电荷积分仪。

关于控制系统，主要是控制离子源、真空系统和靶室等部分的工作。目前注入机的控制系统逐步向自动化的方向发展，以保证注入机安全运行和生产程序的自动化。

二、离子注入机的类型

离子注入机有几种不同的分类方法。从能量上可分为低能、中能和高能离子注入机。这种分法没有严格的规定，根据实际注入所需要的能量，可把 100 keV 以下的注入机称为低能注入机，100~300 keV 范围的称为中能注入机，300 keV 以上的称为高能注入机。

从注入机的工作范围可分为专用机和多用机。专用机一般能量可调范围较小，只能注入少数几种元素的离子束，这类注入机主要供工业上某方面的生产用，针对性比较强。多用机的能量可调范围较宽，可提供多种类的离子束，有的可作到全离子。这种机器主要供研究使用。

从可提供的束流强度的大小，可分为弱流机和强流机。束流强度在微安级的称为弱流机，在毫安级的称为强流机。

在结构方面(主要从质量分析器和加速管的安排次序上)可分为先分析后加速，先加速后分析和加速、分析再加速(或减速)等三种类型。下面仅就这几类不同结构形式的注入机作一些分析比较。

1. 先分析后加速类型

这种结构形式如图 1.2-1 所示。离子束从离子源引出后直接(或经过初聚系统)进入质量分析器，然后再进行加速。它的特点是：进行分析时离子的能量较低，分析器可以做得比较小，造价较低；由于先分析，使不需要的离子在加速前就偏离掉了，因而所要求的高压电源功率比较小，机器所产生的 X 射线也相应地减少，高压电源的电压波动也不致影响分析器的分辨率；此外，改变离子的能量无需改变分析器电流，为调节机器带来了方便。由于具有这些优点，目前国内外多数定型产品，如我国生产的 J 5960 型 (20-150 keV，如图 1.2-2 所示)、LG-2 型和 LG-3 型 (如图 1.2-3 所示) 注入机，都采用了这种类型的结构。

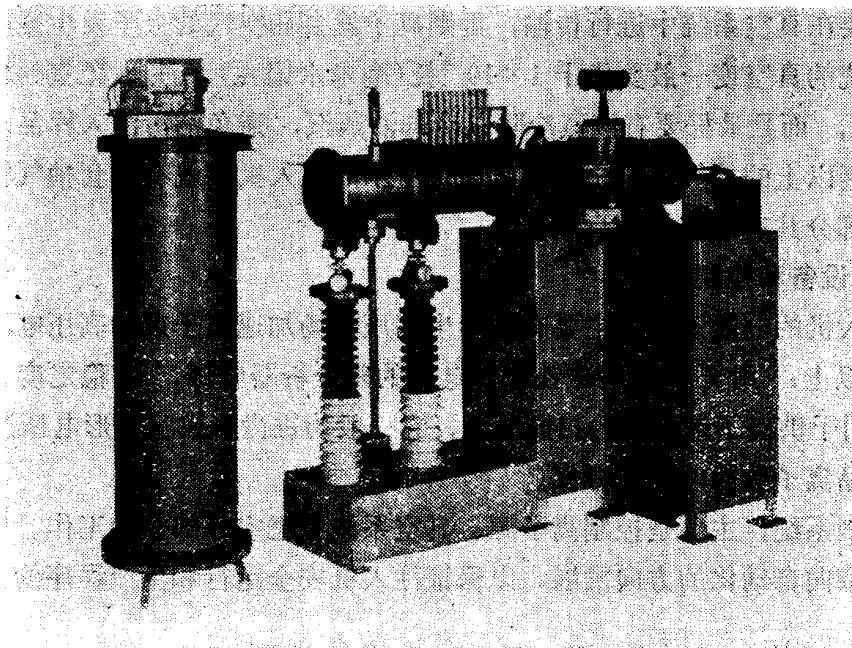
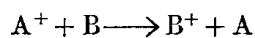


图 1.2-2 20~150 keV 离子注入机

这种类型的主要缺点，是离子束在低能段的飞行距离较长，离子与系统内剩余气体分子进行电荷交换的几率较大，空间电荷效应也较严重，离子损失较多。同时，离子经过分析器后，由于电荷交换产生的其它元素的离子，即



也可以得到加速而打到注入样品上，从而影响注入离子的纯度。

这种结构有两种供电办法：

- (1) 离子源和分析器处于地电位，靶室处于高电位。

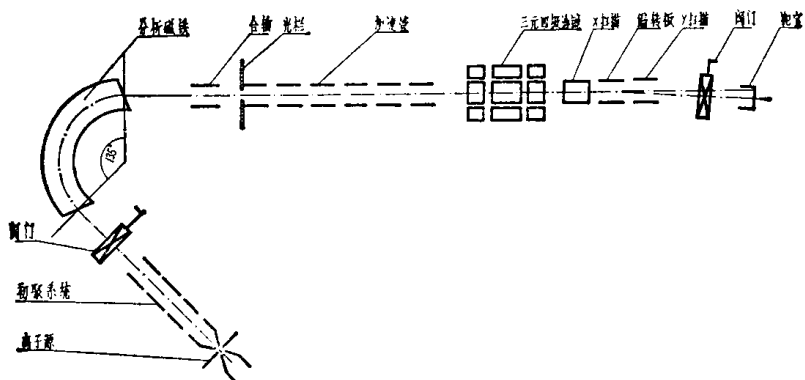


图 1.2-3 LG-3 型注入机结构示意图

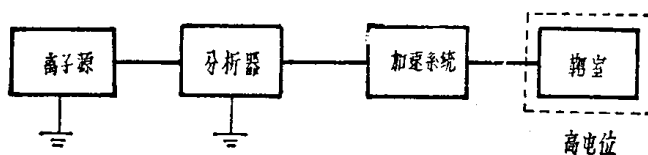


图 1.2-4 注入室处高电位的供电方式

这种供电形式，离子源和分析器的供电和调试方便。但是，由于靶室处于高电位，对观察、操作样品很不方便。特别是进行高低温注入更困难。对于具有装片容量大、自动化程度高的注入室，上述缺点大大减少，可以采用这种供电方式。J 5960 型离子注入机，就是采用这种结构和供电方式的。

(2) 离子源和分析器处于高电位，靶室处于地电位。

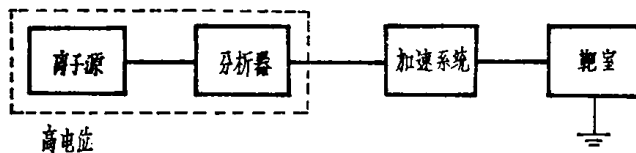


图 1.2-5 离子源和分析器处高电位的供电方式

这种供电方式，使靶室处于地电位，具有处理样品方便的优点。相对说来，这种供电方式较前一种应用的更多。但是，分析器处于高电位，却带来了调试和供电的困难。

2. 先加速后分析类型

这种类型的注入机，是离子束从离子源引出后，首先进行加速达到预定的能量，然后进行质量分析。图 1.2-6 是这种注入机的结构布置示意图。

这种注入机的供电方式如图 1.2-7 所示，离子源处于高电位，分析器和靶室处于地电位。

这类注入机的主要优点，是离子束从离子源引出后立即加速到较高的能量，离子束在低能段的漂移距离较短，因而减小了空间电荷和电荷交换效应。这对于强流束注入机是很重要的。其次，由于在分析器后，因电荷交换而产生的其它元素的离子，得不到加速，打不到注入样品上，这样也提高了注入元素离子的纯度。另外，由于靶室和分析器

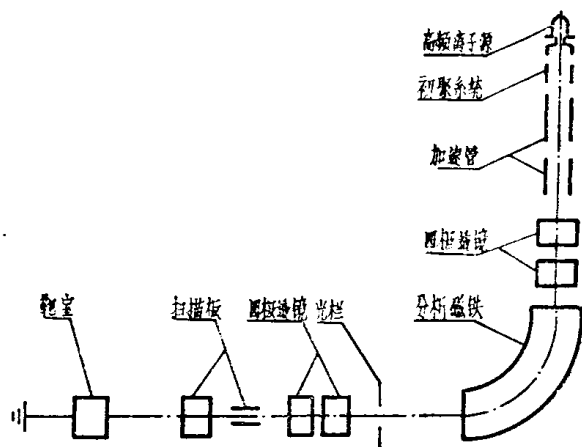


图 1.2-6 前加速离子注入机示意图

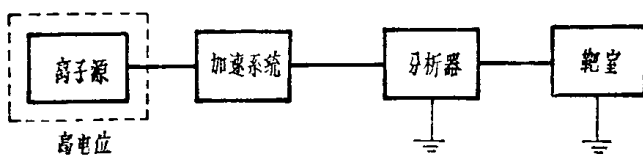


图 12.-7 先加速后分析注入机供电示意图

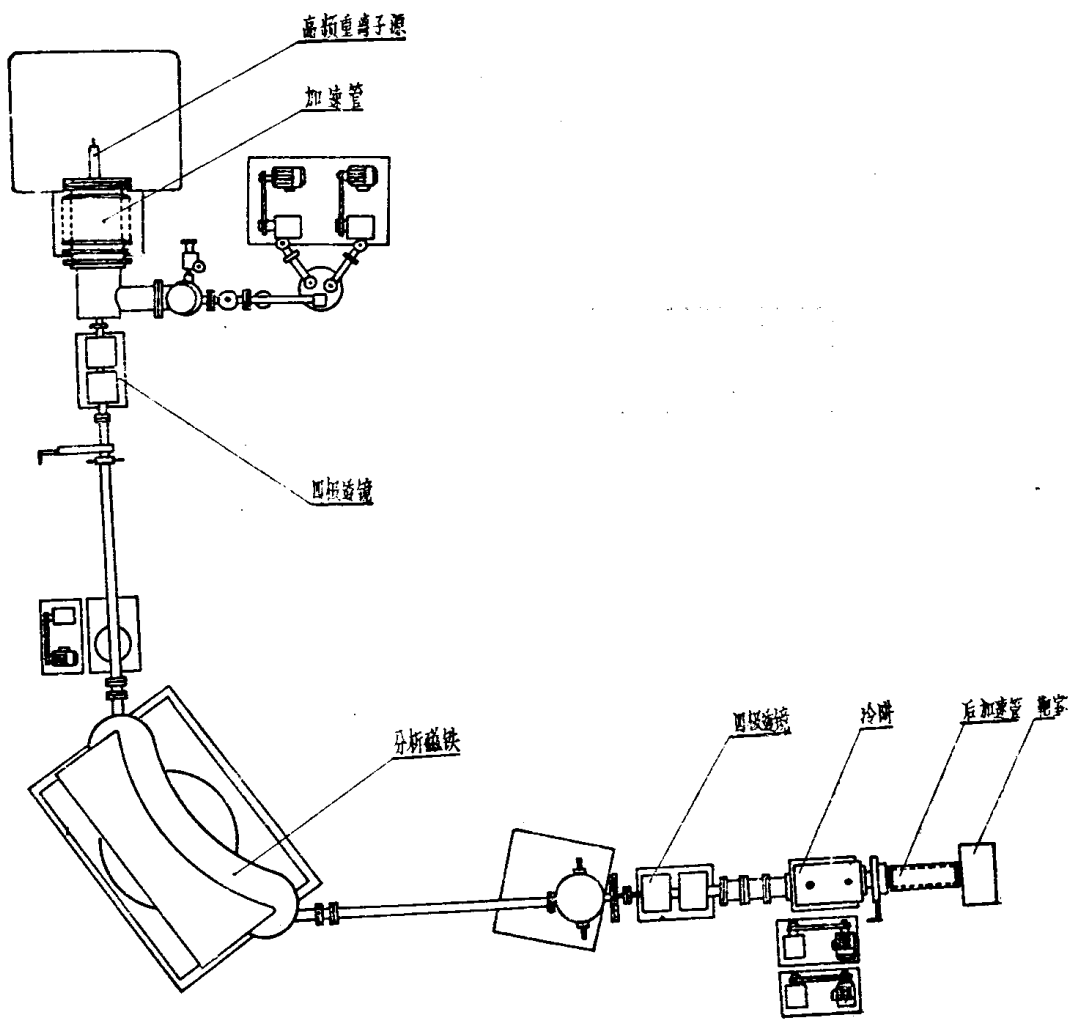


图 1.2-8 北京师范大学 400 keV 注入机示意图

处于地电位，也带来了处理注入样品和给分析器供电的方便性。

这种类型的主要缺点，是由于进行质量分析时，离子的能量较高。一般说来，这就需要较大的磁分析器。另外，前面所述的先分析后加速类型的其它优点，也正是这种类型的缺点。

从实际使用的情况看，采用这种结构类型的注入机要少于先分析后加速的类型。

3. 前后加速中间分析类型

图 1.2-8 是北京师范大学 400 keV 注入机的结构图，它的供电方式如图 1.2-9 所示。

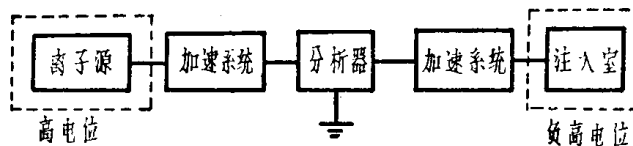


图 1.2-9 前后加速中间分析型注入机供电示意图

这种注入机结构的基本特点，是将需要加速的离子最高能量分做两半，一半在分析器前加速，另一半在分析器后加速。注入机总能量为 400 keV，前加速用 200 kV 正高压电源，后加速用 200 kV 负高压电源。很明显，这种结构的主要缺点是机器的两端都处于高电位，给操作带来了很大的不方便。但它突出的优点，是离子能量的可调范围较宽。它的后加速装置可设计成可装卸的，当有后加速时，可进行高能注入，拆去后加速装置，它就成为一台先加速后分析的中低能注入机。另外，后加速电源还可装成可变极性的，也就是既可输出负高压，也可输出正高压。当用正高压时，就成为后减速，离子束可以从前加速得到较高能量，使其较为顺利地通过质量分析器，直到靶室前进行减速，这就大大减小离子束在低能段的传输距离，也就减少了离子在传输过程中的损失，使机器在低能注入时也能得到较大的束流强度。这种类型的注入机，在保证有一定束流强度下，离子的能量可在数 keV 到 400 keV 之间调节，能够适应多方面的需要，这对于研究工作是十分有利的。

第三节 离子注入机的发展状况

60 年代，离子注入机处于研制阶段，它是随着离子注入技术的发展而发展的。初期的注入机，多数是由原来供核物理实验用的小加速器或同位素分离器改装成的。例如，英国将原来主要作为中子发生器使用的 500 keV 高压倍加速器^[1]，后来改为既能做离子注入工作，也能做中子辐照，以及 X 射线分析和背散射等工作，成为一机多用（其结构见图 1.3-1 所示）。又如，美国将一台 400 keV 静电加速器^[2]改装成为离子注入机（如图 1.3-2 所示）。一般说来，早期的这些注入机，束流强度较弱，靶室简单，生产效率低，注入均匀性也较差，不适应半导体工业大规模生产的需要。60 年代末 70 年代初，离子注入机进入工业生产阶段，开始生产定型的离子注入机。初期工业生产的离子注入机，束流强度仍然较

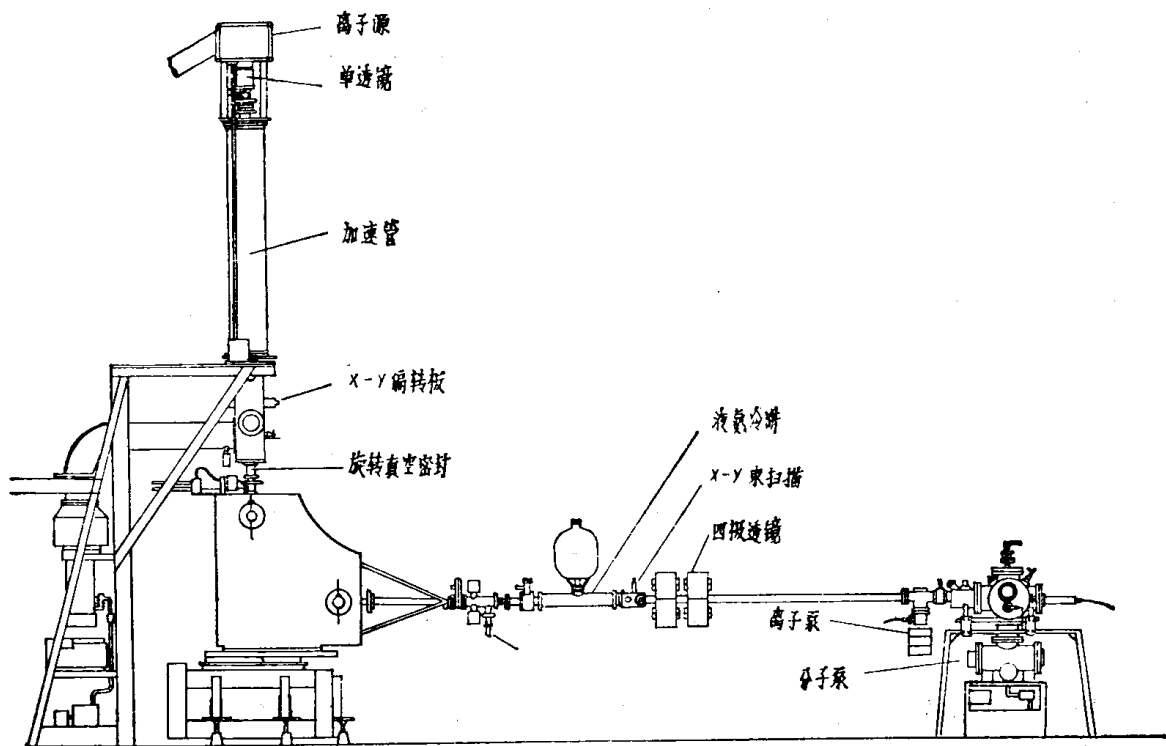


图 1.3-1 英国哈威尔原子能中心 500 keV 高压倍加器

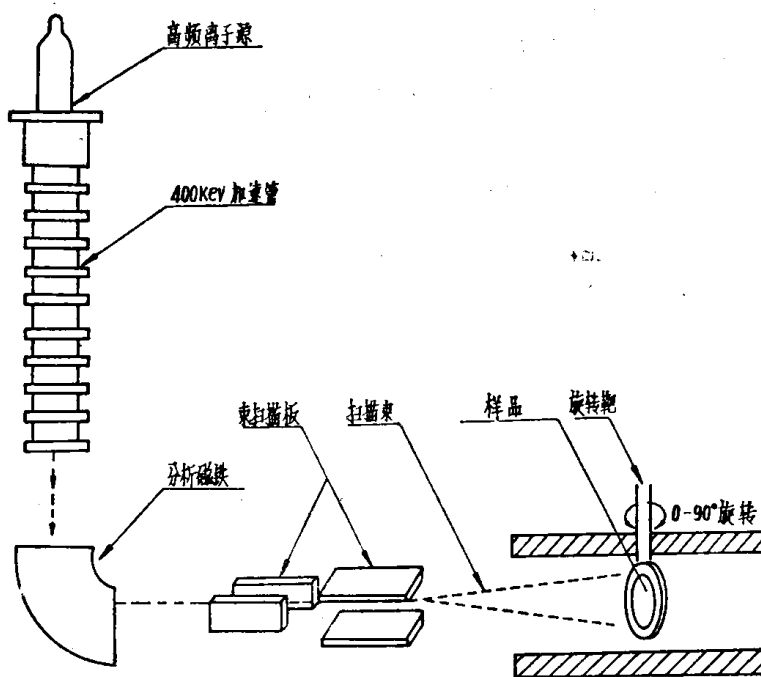


图 1.3-2 美国离子物理公司用静电加速器改装的离子注入机

弱，离子电流一般为几十微安到几百微安，属于中、弱流离子注入机，注入均匀性，靶室结构、生产效率和自动化程度也都有待提高。70年代中期，开始生产强束流离子注入机，硼离子电流提高到毫安数量级，并对离子源、质量分析器、扫描方式和结构、注入室等进行了大量的研究，研制出了毫安级强束流、高均匀性、高效率的离子注入机。