

离子注入 与 分析基础

王贻华 胡正琮 编

航空工业出版社

离子注入与分析基础

王贻华 胡正琮 编

航空工业出版社

1992

(京)新登字161号

内 容 简 介

本书以工科普通物理学和高等数学为基础,介绍了离子注入学科(包括离子注入材料分析方法)的一般原理和应用。编写内容侧重金属材料离子束改性的原理、方法和应用,并且也简要地介绍了某些功能材料的离子束改性。

本书可作为高等学校应用物理、材料科学及其他有关专业学生的教材或参考书,也可作为离子注入材料改性的技术培训教材。对于从事离子束材料改性和表面分析的各类工程技术人员,也是一本较好的参考书。

离子注入与分析基础

王贻华 胡正琮 编

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号)

—邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售

煤炭工业出版社印刷厂印刷

1992年7月第1版

1992年7月第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16

印张: 11.75

印数: 1—1600

字数: 282千字

ISBN 7-80046-424-5/G·061

定价: 3.50 元

前 言

本书是编者多年来在北京航空航天大学从事离子注入材料改性研究及讲授离子注入物理选修课所用讲稿的基础上编写的，主要内容包括离子注入的一般原理和被注入材料表层的测试与分析方法两大部分。教学参考时数为40—50学时。根据不同专业的需要及已修课程的情况，本书讲授时某些章节的内容可以酌情精简或删减。

目前国内正式出版的有关离子注入原理和应用的书籍，主要是以半导体材料离子束改性的理论和应用为重点。鉴于金属材料在工业和科学技术上的应用很广，它对国民经济的发展有巨大的影响，而且近十几年来金属材料离子束改性的研究有了较大的发展，所以本书确定以金属材料的离子束改性作为编写重点，并以较大的篇幅介绍了离子注入材料表层的分析原理和方法，以适应航空航天及其他高科技领域发展的需要。在教材内容的处理上，我们注重物理概念和基本原理的阐述，同时也重视离子注入技术的实际应用，力图体现教学与科研相结合、科研为教学和生产服务的思想。

中国科学院王启明教授仔细审阅了全书，系统全面地提出了许多宝贵的修改意见；北京航空航天大学谢希文教授、北京师范大学低能核物理研究所林文廉副研究员，审阅了本书部分章节并提出许多宝贵意见，在此我们一并表示诚挚的谢意。

本书第一、三、四、七、八章由王贻华编写；第二、九章由胡正琼编写；第五、六章由两人共同编写；全书由王贻华统编定稿。

由于离子注入是一门由多学科交叉产生的新兴边缘学科，许多内容还处于不断发展和探索之中，加之编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

王贻华

胡正琼

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 离子注入学科的作用和意义	(1)
§ 1-2 国内外离子束研究概况	(2)
§ 1-3 离子注入技术的特点	(4)
第二章 离子注入装置的物理基础	(6)
§ 2-1 概述	(6)
§ 2-2 基本工作原理	(7)
第三章 离子与固体相互作用的物理基础	(17)
§ 3-1 离子与固体相互作用的基本概念	(17)
§ 3-2 粒子弹性碰撞	(19)
§ 3-3 离子与固体表面的相互作用	(26)
第四章 注入离子的射程分布理论	(30)
§ 4-1 非晶靶中的射程分布理论	(30)
§ 4-2 单晶靶中的射程分布理论	(37)
附录4-1 离子注入投影射程表	(43)
第五章 离子注入材料分析方法 (I)	(52)
§ 5-1 离子注入材料分析概述	(52)
§ 5-2 二次离子质谱技术 (SIMS)	(53)
§ 5-3 背散射能谱技术 (RBS)	(60)
§ 5-4 核反应分析法 (NRA)	(73)
§ 5-5 质子激发X荧光分析技术 (PIXE)	(78)
附录5-1 串行加速器	(85)
第六章 离子注入材料分析方法 (II)	(86)
§ 6-1 俄歇电子能谱分析 (AES)	(86)
§ 6-2 X射线衍射结构分析 (XRD)	(90)
§ 6-3 电子显微镜分析 (TEM、SEM)	(94)
§ 6-4 电子自旋共振技术 (ESR)	(100)
§ 6-5 正电子湮没技术 (PAT)	(104)
第七章 金属物理基础	(117)
§ 7-1 金属的电子理论.....	(117)
§ 7-2 金属的结构.....	(120)
§ 7-3 合金的结构.....	(123)
§ 7-4 金属和合金中的扩散.....	(126)
§ 7-5 固态相变.....	(130)
附录7-1 周期表中部分元素的晶体结构、原子直径及核外电子分布总表.....	(135)

第八章 金属材料的离子束改性	(136)
§ 8-1 金属离子注入的基本效应	(136)
§ 8-2 金属材料离子束改性的方法及特点	(138)
§ 8-3 金属材料离子束改性的原理及应用实例	(142)
§ 8-4 金属材料离子束改性的机理	(156)
第九章 功能材料的离子注入	(162)
§ 9-1 半导体材料的离子注入	(162)
§ 9-2 绝缘材料的离子注入	(171)
§ 9-3 磁性材料的离子注入	(173)
§ 9-4 光学材料的离子注入	(175)
§ 9-5 超导材料的离子注入	(176)
参考文献	(180)

第一章 绪 论

§ 1-1 离子注入学科的作用和意义

一、离子注入与材料改性

在近代科学技术发展中,离子束、电子束及光子束(简称“三束”)技术,在大规模及超大规模集成电路、光电子集成、固态工艺、材料科学和工程技术的各个领域,发挥着独特的作用。其中,离子束技术在近20年来的发展,更是引人注目。

离子束研究的内容涉及离子注入(包括离子反冲注入及离子束混合等多种技术)对材料表面的改性、离子束刻蚀和离子束表面分析等内容。所谓离子注入,就是在离子注入机(实际上是一个小型加速器)中把离子(例如 N^+ 、 C^+ 、 O^+ 、 Cr^+ 、 Ag^+ 、 Y^+ 等多种非金属或金属离子)加速成具有几万至几十万(甚至几百万)电子伏能量的束流,并注入于固体材料的表层。离子注入将引起材料表层的成分和结构的变化以及原子环境和电子组态等微观状态的扰动,由此导致材料各种物理、化学或机械性能的变化。这一技术称为离子束材料改性,其内容主要包括三个方面:

1. 改善物理性能 例如改善材料表面的电磁学及光学性能,提高超导的转变温度等;
2. 改善化学性能 例如提高材料表面的抗腐蚀、抗氧化性能;
3. 改善机械性能 例如改变材料表面的摩擦系数,提高表面硬度和抗磨损能力,改善材料的疲劳性能等。

对于不同的材料,注入不同元素的离子,在不同的条件下,可以获得不同的改性效果。

二、离子束研究的发展及意义

早在30年代,人们便已把离子注入作为辐照的一种手段,用以模拟核反应堆材料中的辐射损伤。50年代开始,人们应用离子束作为掺杂手段来改变固体表面层的性质。60年代初,研制成功了磷离子注入硅的大面积浅结二极管,第一次获得离子注入的核粒子探测器,奠定了离子注入在半导体、金属、磁性材料、绝缘体和超导材料中应用的基础。近二十年来,在离子注入的物理理论、离子注入装置、离子注入应用等方面,都取得了一系列的重要成果。例如离子注入半导体的研究推动了微电子工业的革命,促成了标志当代高技术的超大规模集成电路及超高速电子计算机的产生。离子束金属材料表面改性的研究,开辟了一种新的表面强化和保护方法,这种方法已经从实验室研究走向实际的工业应用。

目前,离子注入已经成为一门由多种学科交叉发展出来的新兴边缘学科,它主要涉及原子碰撞理论以及凝聚态物理和材料科学等方面的内容,并包括加速器及各种现代技术。为了适应我国改革开放,面向世界,面向未来的新形势,我们必须积极开创新的技术应用领域,大力加强离子束应用的基础研究,并促使研究成果尽快转化为生产力,以加速四化建设的步伐,使我国成为技术进步、经济发达的世界强国。

我们知道, 固体材料(包括金属和非金属材料)是国民经济建设的重大支柱, 各国工业和科学技术的发展都离不开固体材料, 因此, 材料科学是当前各学科发展前沿中较为活跃的学科之一。未来的世界, 人们将采用最先进的技术来改善材料的性能, 并将人工设计各种新型优质材料, 以满足建设高度现代化社会的需要。

近十几年来, 随着高科技的迅速发展, 对固体材料, 特别是金属材料的表面性能提出越来越高的要求。各种适用于高负荷、高转速、低耗损、长寿命的金属零部件, 都在大力研制之中。磨损和腐蚀是金属材料的大敌。在磨损方面, 国内统计资料表明, 我国机械行业的钢材, 几乎有一半用于磨损件的修配; 我国机械泵类的故障原因, 大约有50%—70%是由于磨损造成的。在腐蚀方面, 据估算, 我国一年中因材料腐蚀造成的损失高达数百亿人民币。因此, 采用新技术、新工艺改善材料的表面性能, 以减少材料损耗, 提高机器使用寿命, 是当前经济建设的迫切任务。离子注入是进行材料表面改性的新技术, 目前英、美、日、法、意、原苏联及我国都有专门的队伍从事离子注入的研究。英国政府自60年代以来就把离子注入材料改性的研究列为国家重点科研项目之一。据了解, 英国 Rolls-Royce 股份有限公司为了解决飞机发动机叶片材料的微振磨损, 曾比较了46种不同的表面处理工艺, 最后优选了三种, 其中之一就是离子注入新工艺。由此可见, 离子注入技术是一种富有生命力并具有重大经济价值的新技术, 它将在我国四化建设中发挥越来越大的作用。

§ 1-2 国内外离子束研究概况

一、国外研究概况

1. 应用基础研究

许多国家较早地开展了离子与固体相互作用的研究, 丹麦是基础研究开展最早的国家, 60年代林哈德(J. Lindhard)等人提出了固体中离子射程的理论(称为LSS理论), 奠定了本学科的理论基础。

美国加州理工学院、康奈尔大学、斯坦福大学在离子注入的基础研究方面, 思想非常活跃, 他们在离子注入、离子束混合、退火效应和离子束分析等方面都曾开创了新的研究领域。

日本学术界也十分重视离子束应用的基础研究, 在“离子束与固体交互作用”方面, 他们开展协同研究, 联合攻关, 使日本的离子束理论研究迅速发展。

2. 应用技术研究

在半导体材料方面, 美国贝尔实验室、IBM公司、西德西门子公司等单位开展了超大规模集成电路的生产, 曾处于领先地位。日本为了赶超世界先进水平, 曾组织了日立、松下等六个大公司, 形成一个联合研究集团, 研究超大规模集成电路及离子束、电子束和光子束技术。由于协同研究, 使日本在管芯上超过了美国, 并于1978年首次制出了256k存贮器, 以后又生产了512k存贮器, 并研制了1M以上的存贮器。

在非半导体材料方面, 英国哈威尔(Harwell)原子能研究中心多年来积极开展离子注入提高材料抗磨损、抗腐蚀的研究, 使离子注入的模具、刀具等的耐磨性提高几倍到几十倍, 并且首先研制出强束流大靶室的金属离子注入机, 形成了英国的离子注入研究中心。英国

N. E. W. Hartley在离子注入改善工业金刚石耐磨性方面的研究成果, 获得英国专利。美国田纳西州橡树岭国家实验室和亚拉巴马大学的科学家们, 将氮离子注入人造钛合金髌关节后, 使磨损寿命延长上百倍。在抗氧化、抗腐蚀方面, 美国海军实验室研究成功离子注入改善轴承抗海水腐蚀的方法, Chan等人用离子束混合方法研究了Cr-AISI-52100钢系统的Fe-Cr表面合金问题, 提高了军用飞机轴承的抗腐蚀性能。原苏联在半导体低能(1—20keV)离子注入及金属材料脉冲强离子束(PIB)注入方面进行了深入的研究, 取得了新的进展, 给工业应用带来新的希望。

离子注入应用于绝缘材料的改性也是一个广阔的领域。法国、意大利、美国在绝缘材料离子束改性方面做了大量的工作。研究表明, 用能量为0.5—1keV的 Ar^+ 注入聚酰亚胺和氟乙烯丙烯这两种用于太空飞船上的聚合物, 可使其表面电阻率下降 10^{11} 量级; 用能量为1.5MeV的 Ar^+ 注入绝缘的光阻材料HPR-204, 其电阻率从 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 下降到 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$, 这方面的研究成果将为反应堆工程和空间工程提供新型的材料。此外, 耐高温陶瓷材料的离子注入, 为航天工业、高温电站提供了理想的材料。

国外离子注入设备发展迅速, 目前世界上已有几千台大小离子注入机投入运转, 其中英国哈威尔原子能研究中心研制的强束流注入机, 流强达25mA, 靶室尺寸为 $\phi 2.5 \times 2.5 \text{m}$, 可用来处理上吨重的大型工件, 这标志着离子注入已经走向实际的工业应用。有些注入机, 兼有溅射镀膜功能, 可同时或分别进行溅射镀膜和离子注入, 也可按增强扩散或级联碰撞混合等方式进行工作。近几年又发展了一种新型的等离子体源离子注入机, 它以负高压脉冲方式加速正离子, 使之沿各个方向垂直注入工件表面。这种注入机适用于对大型笨重、外观复杂的工件进行全面积的注入, 且离子流强可高达100—1000mA, 在工业上具有较大的应用价值。

二、国内研究概况

我国进行半导体离子注入的研究是从60年代末开始的, 而非半导体材料(金属、绝缘体、聚合物等)的离子束改性始于1978年前后。在研制离子注入设备和开展材料离子束改性研究的同时, 也进行了一些应用基础研究。经过二十多年的努力, 已经形成了一支专业队伍, 据不完全统计, 现有近百个单位从事本学科的研究工作。

1. 应用基础研究

二十年来, 我国在离子注入的应用基础研究方面取得了较好的成绩, 中国科学院物理研究所和上海冶金研究所及一些高等学校, 如山东大学等单位, 在离子注入射程分布理论的研究上有新的发展。关于离子在固体中的基本参量的理论和实验研究及计算机的模拟研究也取得较大成果, 对推动离子注入的应用起到了良好的作用。北京师范大学关于离子束混合机理的理论研究及清华大学关于离子束混合获得非晶态合金的研究成果达到国际水平。清华大学确立的离子束混合形成非晶态合金的“结构差异规则”及“两相区竞争规则”, 得到国际同行学者的肯定。此外, 由于我国成功地建立了原子对撞机实验装置, 它为理论研究提供了先进的实验条件, 使得我国在快分子离子与固体相互作用的理论研究中, 也取得了显著的成绩。

多年来, 我国离子注入学科的科技人员多次参加国际学术会议, 在国外期刊上发表了数百篇论文, 在国内期刊上也发表了大量的论文, 并且出版了几套有关离子注入的专著。这些论文和书籍对推动本学科的发展起了积极的作用。

2. 应用技术研究

我国最早开展的应用研究项目是硅半导体注入,许多成果已用于器件生产中,使半导体器件的生产进入现代化水平。北京师范大学、中国科学院半导体研究所和上海冶金研究所都较早地开展了离子注入 GaAs 及其他材料的研究,并与北京一些半导体器件厂研制成了 MOS 门电路、微波低噪声器件和 CMOS 电路等十几种新产品,推动了我国大规模集成电路的发展。目前,离子注入的 GaAs 场效应管已经应用于卫星地面站的设备上;离子注入的 HgCdTe 红外探测器已应用于国防、遥感、医学、铁路运输等方面;离子注入的 SOS-CMOS 电路也已用于卫星控制系统上。

我国非半导体材料的离子束改性,已由金属材料扩展到绝缘材料及聚合物方面。离子注入应用于刀具、模具、磁头、人工关节及其他一些零部件的抗磨延寿上,取得一些较好的成果。北京师范大学的“人造多晶金刚石耐磨性研究”、“离子注入金刚石拉丝模延寿试验”及清华大学的“氮离子注入 Ti-6Al-4V 人工全髋关节”的研究成果,都已进行了技术鉴定。

我国离子注入设备的研制和生产也有较大的进展。1968 年以北京师范大学为主与其他几个单位联合攻关,研制成功我国第一台离子注入机,该机至今仍在为教学、科研和生产服务。现在国内已有一百多台自制或进口的离子注入机投入使用,并取得明显的经济效益。目前,国内离子注入机的研制已由适合于半导体掺杂的弱流机向适合于非半导体材料改性的高剂量注入的强流机发展,并且镀膜与注入兼备的双功能注入机已研制成功并通过技术鉴定。

为了给国内外学者提供实验条件和研究基金,科学院上海冶金所设立了离子束开放实验室。我国还在大连理工大学建立了“三束”国家重点实验室,该实验室拥有核工业部 585 所与大连理工大学联合研制的多功能“三束”同步处理机、国外进口的全元素强束流离子注入机、连续大功率 (2.5kW) CO₂ 激光器以及离子束增强的等离子体气相沉积设备。这个国家实验室的开放,将大大推动非半导体材料“三束”改性的工业应用。

可喜的是,我国研制生产的离子注入机,不仅可以满足国内需要,而且具备了向国外出口的能力,有力地打破了国外对我国禁运注入设备的局面。

三、国内外学术交流概况

离子束研究领域的国内外学术交流十分活跃,通常两年召开一次国际会议的研究领域有:固体中的原子碰撞、离子束材料改性、离子束分析、金属离子注入、绝缘体离子注入、离子束在腐蚀科学中的应用、离子束设备及离子注入工艺学等。

在国内,基本上两年召开一次的全国性学术会议有:“三束”学术年会、离子注入学术讨论会、非半导体材料离子束改性学术讨论会等。通过以上的学术交流,有力地促进了离子注入学科的发展。

§ 1-3 离子注入技术的特点

离子束所提供的新技术、新工艺、新方法,与某些传统的技术工艺相比,具有一些突出的特点,概括如下:

1. 在半导体掺杂技术方面,过去采用热扩散工艺,其缺点是由于浓度极低和很浅的陡变结很难控制,还容易引起高温下的热离解和热沾污,并难于实现工艺过程的自动化。离子

注入技术控制的是电参量，人们可以自由地支配两个独立参量（注入离子的能量和剂量），从而能精确地控制掺杂的深度和浓度分布，且掺杂的均匀性好，重复性高，有利于器件及集成电路的大规模生产。

2. 在金属材料的表面处理方面，常规的化学热处理和渗氮及渗碳表面强化、离子喷涂、电镀、离子镀、气相沉积等，有的是借助高温条件下的热动力作用使物质扩散进入表层，有的是靠涂复一层不同的材料加以保护，这些传统方法存在如下缺点：

（1）高温热扩散往往因再结晶偏析、晶粒长大、应力腐蚀等导致表层与基材界面附近的机械性能降低；

（2）热扩散受元素迁移率的限制；

（3）高温过程耗能大（渗氮温度约450℃；渗碳温度约950℃），且易引起工件变形，不利于精密零件的强化处理；

（4）高温处理表面容易形成氧化膜等屏蔽层，当所受外力较大时，会发生脱落现象；

（5）沉积涂层常有瘤状物产生，影响光滑表面精确公差的控制。镀层、涂层与基体之间有明显界面，也易产生表层脱落现象。

相比之下，离子注入表面改性有其无可比拟的优越性，主要有如下几方面：

（1）离子注入是借助于电场力将添加物（以离子形式）注入基体材料中，离子进入固体的过程是一个非平衡过程，原则上可以将任何元素引入到固体中，而不受固溶度和热平衡的限制。注入离子在基体中进行原子级混合可以形成固溶体、化合物或新型合金，获得用其他方法所不能得到的新材料。因此有人认为离子束技术是进行“材料设计”的手段之一，是实现“从天然材料进入人造材料时代”的关键。

（2）注入离子在基体中与基体原子混合，无明显界面，不会像镀层或涂层那样发生脱落现象。

（3）离子注入一般在常温（或低温）下及真空中进行，整个过程是洁净的，没有环境污染。被注入的材料或零件不会变形，其表面不会产生氧化脱碳，能保持原有的尺寸精度和表面粗糙度，因此特别适用于作为精密零部件表面加工的最后工序。

（4）离子注入金属是以表面合金代替整体合金，因此在某些场合可以用贱金属代替贵重金属作为基体材料，节约大量稀缺金属或贵重金属材料。

离子注入技术虽然有许多优点，但也存在一定的局限性，例如由于离子束的直线前进，使复杂工件的内外表面难于均匀注入。并且，由于离子注入层通常较薄（ $<1\mu\text{m}$ ），因此在某些应用领域，例如抗磨损抗腐蚀场合，磨损速率不宜过大，使用温度不宜过高，否则表层注入离子的浓度下降太快，将影响改性效果。随着注入机靶室结构的改进或专用化以及采取多种新的注入工艺，例如斜角注入、多重能量注入、高能（MeV级）注入和低温注入等措施，上述某些缺点可在一定程度上得到克服。最新发展的等离子体源离子注入（PSII）技术，虽能对各种复杂外形的工件进行均匀注入，但目前注入能量较低（50keV左右），注入深度较浅（ $0.1\mu\text{m}$ 左右），且通常只适用于气体离子的注入，故仍有待于进一步改进。

第二章 离子注入装置的物理基础

§ 2-1 概述

目前,离子注入机虽然出现了各种各样的形式,但就基本工作原理和基本结构来说是相同的,一般由以下几个基本系统组成:(1)离子源系统;(2)离子的引出和加速系统;(3)质量分析系统;(4)离子束聚焦和扫描系统;(5)靶室和真空系统。其装置如图2-1所示,图中A—离子源;B—离子加速器;C—光阑;D—质量分析器;E—中性束偏转器;F—x、y扫描器;G—靶室。

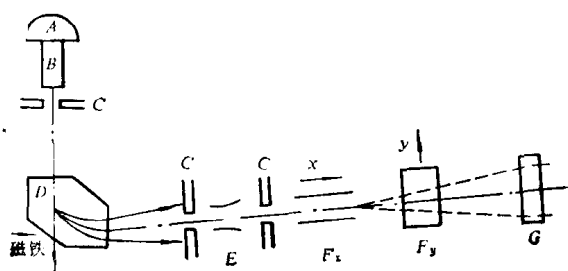


图 2-1 离子注入装置示意图

在离子源中产生的离子,经引出电极引出后,进入加速器,离子在加速器中得到加速,然后进入质量分析器,分离出所需要的离子,分离出的离子再经聚焦和扫描器进入靶室,射在靶片(试验样品)上。为了减少离子束流在传输过程中的损失防止中性束的形成,从产生离子到注入靶片的全过程,系统都保持真空(真空度在 5×10^{-6} Torr以上)。

离子注入机按注入能量的大小,可粗略地区分为低能机(200keV以下)、中能机(200keV—1MeV)和高能机(1MeV以上);按离子束电流强度区分,可分为小束流机(1—100 μ A以下)、中束流机(100 μ A—1mA)和强束流机(1mA以上);若按用于不同对象区分,又可分为半导体用离子注入机(一般为弱流机)和金属用离子注入机(一般为强流机)。

金属离子注入机与半导体注入机相比,具有以下特点:(1)离子种类多:半导体常用的离子有 B^+ 、 P^+ 、 As^+ 三种,金属材料离子注入需要多种元素离子,甚至需要化合物分子离子。例如在提高金属表面硬度,降低摩擦系数,提高耐磨性,改善金属表面防腐蚀抗氧化性能等研究工作中经常用到 N^+ 、 B^+ 、 C^+ 、 S^+ 、 Cr^+ 、 Mo^+ 、 Ti^+ 、 Pb^+ 、 In^+ 、 Sn^+ 、 Ag^+ 、 Y^+ 、 Ta^+ ...等十多种离子。(2)束流强度大:半导体注入工艺中一般的注入剂量为 10^{12} — 10^{14} ions/cm²,束流一般在数十至数百微安就够用,而金属离子注入剂量要求达到 10^{17} — 10^{18} ions/cm²才有明显效果,因此相应的束流要大于1mA才有实用意义。(3)靶室结构复杂:半导体离子注入的样品,加工的形状一般都是薄而平整的晶片,尺寸规格较统一,而金属零部件的形状复杂多样,尺寸大小不一,设计通用靶室十分困难。另外,由于束流大,剂量高,真空中散热条件差,热效应显著,因此要求具有有效的冷却系统,从而增加了靶室的复杂性。(4)注入精度要求不高:半导体用注入机主要用来对半导体材料掺杂,杂质的种类、数量及分布状态对半导体特性的影响十分显著,因而要求精确控制注入参数,但对金属材料改性而言,只要注入能量、剂量适当,注入精度和杂质影响不大。因此,为简化设备,降低成本,金属用注入机可以不带质量分析器。

本章以金属离子注入机为主,介绍离子注入装置的基本结构和简单的工作原理。

§ 2-2 基本工作原理

下面仅就离子源、加速器、分析器、扫描器和剂量测量等系统的工作原理作简要介绍。

一、离子源

离子源的作用是产生所需要的离子束。对半导体材料的注入，主要用 P^+ 、 As^+ 和 B^+ ，而对于金属的表面改性，则往往需要用 N^+ 、 C^+ 、 B^+ 、…等非金属离子及多种金属离子，因此要求离子源能产生多种元素的离子束。为了满足离子注入技术的需要，离子源还必须满足如下几点要求：（1）适当的离子束流强度 对半导体材料的注入，由离子源引出的束流强度，一般在几十至几百微安，而对金属材料的注入则要求在毫安级以上。（2）好的束流品质 从离子源引出的离子束，需再经分析器、加速聚焦等很长的路程，才能到达靶室。如果引出的束流品质不好，会给分析及加速聚焦带来困难，使束流在传输过程中有较大的损失，而且难以获得均匀的离子分布。（3）长寿命的离子源 离子源的寿命越长越好，以满足长时间使用。（4）操作简便性能稳定 要求离子源结构简单，束流调节方便，稳定性重复性高。

离子源的基本结构是由产生高密度等离子体的腔体和引出系统组成。气体离子源是靠离子源腔体中的气体放电形成等离子体而引出正离子的。因此，如何使气体放电并能持续进行，是气体离子源能否正常工作的关键。金属离子源是将金属气化电离，因而仍旧是要形成气体放电并能持续进行的问题。引出系统要求能引出分散性小的强束流，并希望具有大的气阻（因放电区处于低真空状态，而束流的加速区处于高真空状态，如果通过引出系统气流过大，会给高真空的获得带来困难，也会降低气体的利用率）。引出系统通常有直接引出和间接引出两种。直接引出系统是由两个带圆孔（圆孔直径很小，为毫米级）的金属电极构成，一个是阳极，一个是引出极（也叫吸极），其间加一电压，阳极与等离子体同电势。这样，等离子体边界和引出极间形成一电场，使等离子体附近离子加速，由引出极中央圆孔引出离子束。间接引出系统是在阳极和引出极间插入另一阳极，在两阳极间形成一个离子体密度较低的等离子体，形成双等离子体。

气体放电有许多类型，常用的方式有：高频放电，电子振荡放电（简称EOS），低电压弧光放电，双等离子电弧放电等。图2-2表示这些放电方式产生离子束的离子源结构示意图。

现将离子注入机中常用的离子源介绍如下：

1. 高频放电型离子源 高频放电型离子源的特点是寿命长，可工作数百小时至1500小时左右；功耗小，约在100—500W左右；离子束中原子型离子占的比例大，可达80%—90%；结构简单。这种离子源在离子注入装置中被广泛采用。高频放电型离子源是由高频振荡器在放电室内由产生的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。高频放电采用横置感应线圈的电感偶合方式，振荡频率为25MHz。放电时，放电管内的气压约为 10^{-2} — 10^{-3} Torr。高频离子源的引出系统为直接引出方式；而供气系统由进气口和挥发炉组成，可用气态、液态或固态物质当源。图2-2中(a)为高频放电型离子源。

2. 电子振荡型离子源 电子振荡型离子源(*Electron Oscillation Type Source* 简称EOS)，以潘宁源(*Penning Ionization Gauge*简称PIG)为代表，潘宁离子源具有工作稳定可

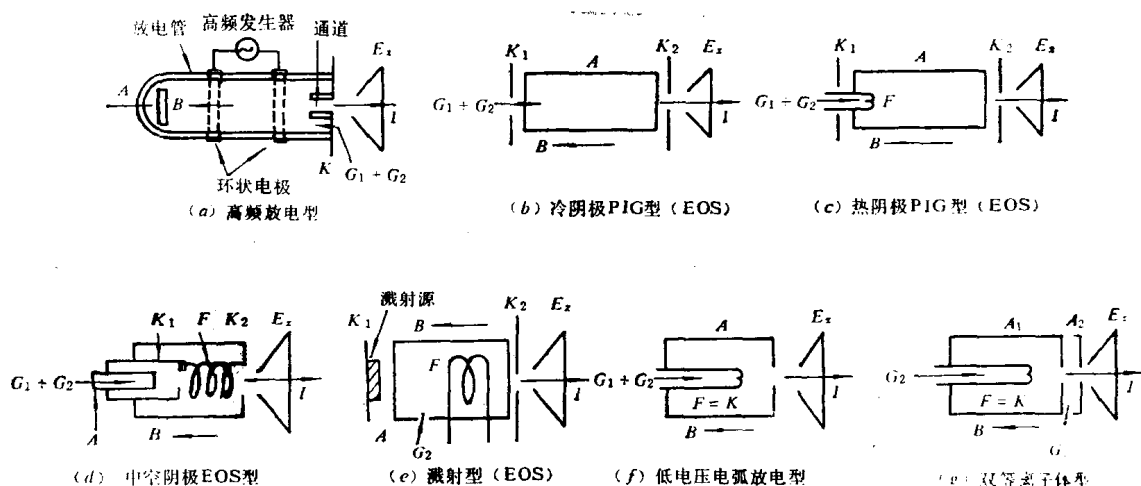


图 2-2 各种放电方式的离子源结构示意图

(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_x —引出极; B —磁场; F —加热灯丝)

靠、电源简单、束流调节方便等优点。电子振荡型离子源的基本工作原理是:从阴极发射的电子通过中间的阳极加速,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,因而在磁场中沿轴向作螺旋形运动。因此,电子在两个阴极间振荡,在振荡过程中增加路程长度,从而使电子与放电室内的气体分子发生碰撞的几率显著增大,以致发生电离放电形成等离子体。潘宁源不仅可以产生带一个电荷的正离子,而且可以通过碰撞产生带两个或多个电荷的正离子。图2-2(b)——(e)都属于电子振荡型离子源,其结构为在两个相对安装的阴极(K_1 和 K_2 , K_2 为引出端)中间有圆筒状的阳极,组成放电室并置于轴向磁场中。

3. 双等离子体型离子源 双等离子体型离子源具有发散度低、亮度高、引出束流大(大于几十毫安)、电离效率高等一系列优点,因而被广泛地用于加速器、分离器和注入机作强流源。双等离子体离子源结构示意图如图2-2(g)所示,这种源的放电结构由热阴极(灯丝)、中间电极和产生激励场的线圈组成,引出系统为间接引出方式。

双等离子体型离子源实质上是三电极低气压放电系统,其放电过程为:当电子从炽热灯丝(阴极)发射出来,首先经阴极电势降区加速,获得一定能量后与原子碰撞形成等离子体。在靠近阴极区域,经加速的电子分布很分散,能量也较低,因而等离子体密度也低,当电子接近中间电极时,由于磁场的作用,使等离子体密度增高,实现等离子体的第一次压缩。经第一次压缩后的等离子体通过中间电极孔进入阳极区域,由于锥形的中间电极和细小阳极孔的压缩,从而在阳极孔产生一个密度更高的等离子体层,实现第二次压缩。由于两次压缩,电离效率高,因此能引出很强的离子束电流。

4. 其他类型的离子源 国内外近十多年研制出数种适用大束流离子注入机的离子源,现介绍三种类型的强流源。

(1) Freeman源 该离子源的特点是发射面很稳定,束流强度大(如 B^+ 为5—6mA)。该源在60年代初首先由英国Harwell原子能研究中心的J. H. Freeman 研制成功,它是一种新型热阴极低压弧源,该源成功地用于同位素分离器中。随着该源的不断改进,使之结构简单,功效高,应用面进一步扩大,利用它创建了新型工业用高强度离子注入机和其他类型的

注入机。中国原子能科学研究院设计的Freeman源,在放电室上下两端安装了钨制电子反射屏,用以增强碰撞电离,提高电离效率,从而使引出的 B^+ 束流经分析器后流强达到5—6mA,最大可达6.5mA。由于提高了电离效率和引出效率,使离子比和流强都有较大提高,成为高离子比强流源。

(2) Calutron源和Bernas源 Calutron源是一种磁型热阴极弧光放电离子源,阴极发射的电子被弧电压加速并由附加磁场准直,通过电子窗进入弧光放电室内,电子与工作物质的气体碰撞,使之电离,形成等离子体,通过引出系统将离子引出。1967年ORNL首先用它建成Calutron注入机(*The calutron implanter*),得到毫安束。我国北京市机电研究院加速器激光技术研究所和北京市辐射中心、北京师范大学低能核物理研究所,于1984年成功地研制出小型Calutron离子源,它是一种磁型热阴极弧光放电离子源,该源具有流强大,原子离子比高,气、固两用等优点。将Calutron源的灯丝小型化并移置于放电室内部即成为Bernas源。1975年Balzers把它装到IBM注入机,后来又应用于SCAIBAL-SCL-218机器上。Bernas源是长缝型的热阴极弧光放电离子源,灯丝位于放电室内。灯丝加热发射电子,电子在弧电压和外加磁场的作用下作螺旋线运动。电子与放电室内的气体分子碰撞,使气体分子电离形成等离子体,再由引出电极引出。北京自动化研究所和北京仪器厂研制的ZLZ-200型中束流离子注入机上所选用的离子源就是Bernas型源,而且为气、固两用的Bernas源。

(3) 微波源 日立公司1980年首先用在预淀积机器上,它是利用2.45GHz微波功率放电的无灯丝离子源。

微波源是一种适用于大束流离子注入机的离子源,这种源利用了强磁场中微波放电(频率为2.45GHz),并采用多电极狭缝透镜,故可引出大截面的离子束。实践表明,在强磁场中的微波放电,能产生高密度的等离子体,这种离子源具有工作压力低($<10^{-2}$ Torr)、电离效率高、使用寿命长等优点。

二、离子束的加速

在离子注入设备中,不能采用通常低能设备的空气绝缘高电压加速器结构,通常是采用静电加速器和直线加速器等结构形式。

静电加速器属直流高压型加速器,直流高压型加速器是历史上最早(30年代初)发展的一种,它是使带电粒子(离子)通过高压电场来获得能量的装置。

大家知道,在真空电场中,当带有电荷 $q = |Ze|$ 的离子由电势 U_1 处移动到电势 U_2 处时,离子在电场作用下获得的能量由下式表示:

$$W = q(U_1 - U_2) \quad (2-1)$$

1. 静电加速器

高压型加速器一般由高压发生器、高压加速管、带电粒子源和其他附属设备组成。高压发生器有倍压整流电路、静电起电机、绝缘芯变压器和高频高压发生器等几种类型,这里我们只对静电起电机高压发生器作简单介绍。

由静电学可知,当导体处于静电平衡时,金属球所带的电荷都分布在它的外表面。因此,若将另一带电体置入金属球内并与其内侧接触,或使带电体反复与其内侧接触,电荷都将全部移至金属球外表面。这样一来,只要重复上述过程,就可使金属球表面带上相当多的电荷,并使金属球具有电势为

$$U = \frac{Q}{C} \quad (2-2)$$

式中 C 为金属球的电容； Q 为金属球所带的电量。当 Q 很大时，金属球的电势也将很高，从而获得高电压。范德格喇夫 (Van de Graaff) 在1931年建造的起电机就是应用了这一原理，获得了1.5MV的电压，后来利用起电机建成了静电加速器。

由式 (2-2) 可知，要想获得很高的电压，必须不断增加输送上去的电荷。但当输送的电荷过多时，高压电极将会使周围空气击穿，发生击穿放电。已知大气的击穿电场强度 $E_{\text{击穿}} = 3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，因此金属球表面的最大电场强度

$$E_{\text{max}} = \frac{V}{r} = E_{\text{击穿}} \quad (2-3)$$

式中 r 为金属球的外半径， V 为金属球对地的电压。由式 (2-3) 看出，要想在大气压下获得很高的电压，球的半径必须做得很大。例如，要求得到3.0MV的电压，球半径应为

$$r = \frac{V}{E_{\text{击穿}}} = \frac{3.0 \times 10^6}{3.0 \times 10^6} = 1.0 (\text{m})$$

这就使得整个加速器装置要做得很大。由此可见，采用增大球形电极的直径来获得高电压是有限的。为了提高加速器的工作电压，必须改善整个装置的耐压性能。为此，近代静电加速器都放在钢筒内，并在钢筒内充以绝缘性能良好的气体介质（例如氮气、氟里昂或六氟化硫等气体），在高气压（气压为10—20atm）下提高了气体的击穿电场强度，进而提高加速器的工作电压。

2. 直线加速器

直线加速器是一种谐振式加速器，它使带电粒子连续多次通过电压不很高的加速电场来获得很高的能量。1928年Widroe建成了第一台直线谐振加速器。

图2-3是直线加速器的工作原理图。沿着轴线排列着一系列长短不一的金属圆筒状电极（称为漂移管），将其中奇数电极和偶数电极分别连接高频电源的两个输出端，在金属圆筒状电极间形成很多间隙，这些间隙即为加速区。当离子在间隙（如图中 a ）中运动时，高频电场正好是正电场，使离子得到加速。加速的离子进入漂移管时，高频电源转换电极的极性，当离子跑出漂移管时，高频电源又一次转换电极极性，使电场正好又是正电场，离子在间隙（图中 b ）中又得到加速。在高频电源如此周期性地变化电压极性的情况下，离子就能得到一次一次的加速。当离子在漂移管内运动时，由于屏蔽作用，金属圆筒内的电场强度为零，使离子在管内只作惯性运动。这样一来，离子经 n 个加速间隙后，所获得的能量 W 为

$$W = n \cdot q \cdot V_0 \cos \varphi \quad (2-4)$$

式中 V_0 是高频电压的幅值； φ 是离子通过加速间隙中心时加速电压的相角（称为加速相角）。

设离子通过第 n 个漂移管所需要的时间为 τ_n ，高频电压的周期为 T ，则谐振加速的条件为：

$$\tau_n = k \cdot \frac{T}{2} = \text{常数} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2-5)$$

另外，上述条件亦可用第 n 个漂移管的长度 L_n 和离子通过第 n 个漂移管的速度 v_n 来表示

$$\tau_n = \frac{L_n}{v_n} \quad (2-6)$$

由式 (2-4) 一式 (2-6) 可知, 漂移管长度应满足

$$L_n = kT \sqrt{\frac{W}{2m}} = \frac{k}{f} \sqrt{\frac{W}{2m}} \quad (2-7)$$

由上式看出, 漂移管的长度随离子能量的增大而增长。这样, 为了获得很高的能量, 就必须使整个加速器的长度变得非常长, 这是我们不希望的。为了缩短加速器的长度, 可采用提高高频电源的频率 f (例如用到微波频段) 来达到。二次世界大战后, 由于微波技术的发展, 直线加速器也得到迅速的发展。

三、分析器

分析器是一种质量分选器。分析器有磁分析器、正交电磁场分析器、四极质量分析器和高频质量分析器等多种形式。离子注入机通常采用磁分析器或正交电磁场分析器, 下面就磁分析器和正交电磁场分析器作一简要介绍。

1. 磁分析器

磁分析器结构原理如图2-4所示。它是由扇形直流电磁铁和真空盒组成的。其基本原理是利用带电粒子在磁场中运动受到洛伦兹力的作用发生偏转而进行质量分选。当质量为 m , 电量为 q 的粒子, 以速度 v 垂直于均匀磁场运动时, 则粒子作匀速圆周运动。它所受的洛伦兹力为

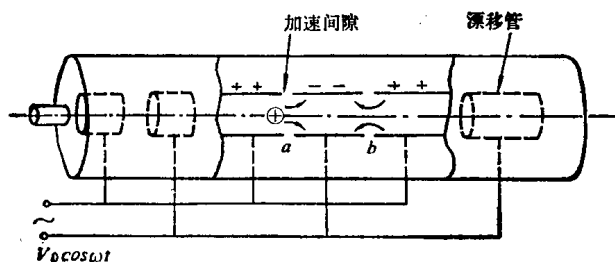


图 2-3 直线加速器工作原理图

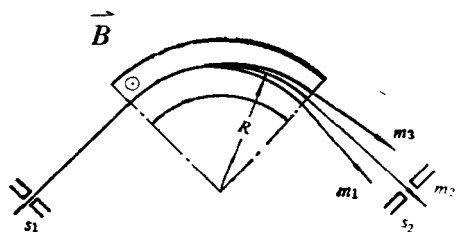


图 2-4 磁分析器结构原理图

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (2-8)$$

其大小为 $F = qvB$, 因该粒子作匀速圆周运动, 由向心力公式 $F = mv^2/r$ 可得运动轨道半径为

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (2-9a)$$

设离子进入均匀磁场前所具有的能量为 W , 因 $v = \sqrt{2W/m}$, 所以

$$r = \frac{\sqrt{2mW}}{qB} \quad (2-9b)$$

从式 2-9b 中可以看到, 当离子的电量 q 、磁感应强度 B 和离子能量 W 一定时, 离子运动半径 r 随其质量 m 而变。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, 则只有具有某一质量的离子才能通过狭缝 s_2 。如果 q 、 r 和 W 固定, 要想获得某质量的离子, 则必须调