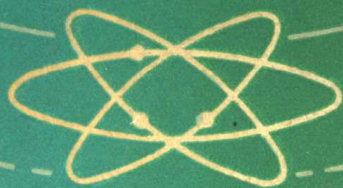


—高等学校教材—

离子注入物理

罗 晋 生 主 编



上海科学技术出版社

671
C1

内 容 提 要

本书为全国高等院校工科电子类半导体专业的选修教材, 主要介绍离子注入技术中的一些基本问题和有关理论。全书共分六章, 包括: 离子注入装置, 离子注入的射程分布, 离子注入的损伤和退火效应, 化合物半导体中的离子注入, 测量技术以及离子注入技术在器件中的应用。

除了作为教材以外, 本书也可供从事半导体器件研制和生产工作的科技人员参考。

高等学校教材

离子注入物理

罗 晋 生 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 7.5 字数 173,000

1981 年 10 月第 1 版 1984 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—3,800

统一书号: 15119·2374 定价: 1.30 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由《电子材料与固体器件》教材编审委员会《半导体物理与器件》编审小组评选审定,并推荐出版。

该教材由西安交通大学罗晋生担任主编,成都电讯工程学院谢孟贤担任主审。编审者均依据《半导体物理与器件》编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时间为 50 学时,其主要内容为:第 1 章简单介绍离子注入装置的基本工作原理和各主要部件,使学生及从事这方面工作的读者对装置有所了解,讲授时间可安排 4 学时。第 2 章着重讲授离子注入非晶固体靶中的射程分布理论及离子注入单晶靶中的沟道效应。第 3 章讲授有关离子注入半导体及其他固体中的损伤问题及各种退火方法。第 4 章着重叙述化合物半导体中的离子注入问题。第 5 章叙述离子注入后一些基本参数的测量原理和方法。第 2~5 章是本书的基本部分,可安排 36~40 学时。第 6 章介绍离子注入技术在半导体器件方面的应用,可安排 6~10 学时。第 1 章附录中给出了一些常用气体离子源的特性,第 2 章附录中给出硅及 GaAs 靶中各种主要离子的射程和标准偏差表,供读者参考。

本教材第 1、5 章由周彩弟编写,第 2、3 章由罗晋生编写,第 4、6 章由张屏英编写,最后由罗晋生统编全稿。参加审阅的还有景惠琼和冯育坤同志,并为本书提出许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前 言

第1章 离子注入装置	1
§ 1-1 装置的结构	1
§ 1-2 基本工作原理	2
附录 1-1 离子注入用主要气体源性质	8
附录 1-2 几种天然元素及离子源工作物质的性质	10
第2章 注入离子的射程分布	11
§ 2-1 射程、投影射程及标准偏差	11
§ 2-2 入射离子在固体中的减速过程	11
§ 2-3 非晶靶的射程分布理论	19
§ 2-4 沟道运动及单晶靶中射程分布	28
§ 2-5 射程分布理论的应用	34
附录 2-1 两粒子碰撞的散射角	37
附录 2-2 Si 靶中各种离子的 R_p 、 ΔR_p 及 Δx 值	40
附录 2-3 GaAs 靶中各种离子的 R_p 、 ΔR_p 及 Δx 值	41
附录 2-4 SiO ₂ 靶中各种离子的 R_p 、 ΔR_p 及 Δx 值	41
第3章 离子注入的损伤和退火效应	43
§ 3-1 离子注入引起的损伤	43
§ 3-2 离子注入损伤的分布	48
§ 3-3 热退火效应	51
§ 3-4 其他退火方式	55
§ 3-5 增强扩散	60
§ 3-6 反冲注入	62
第4章 化合物半导体中的离子注入	64
§ 4-1 注入损伤及其退火特性	64
§ 4-2 半绝缘 GaAs 中的离子注入	71
§ 4-3 GaAs 中的质子注入和 O ⁺ 注入	73
§ 4-4 II-VI 族化合物半导体中的离子注入	75
第5章 测量技术	77
§ 5-1 背散射测量	77
§ 5-2 放射性活化分析	82
§ 5-3 微分薄层电阻率法	85
§ 5-4 霍耳效应测量法	87
§ 5-5 电容-电压法	88
§ 5-6 椭偏光测量法	91

第 6 章 离子注入技术在器件中的应用	94
§ 6-1 离子注入技术特点	94
§ 6-2 在 MOS 器件中的应用	95
§ 6-3 在双极器件中的应用	102
§ 6-4 在其他硅器件中的应用	107
§ 6-5 在化合物半导体器件中的应用	108
§ 6-6 在其他工艺上的应用	110

第 1 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等方面获得广泛的应用,进一步促进了其发展,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 装置的结构^{[1]~[2]}

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^+ 、 O^+ 、 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。

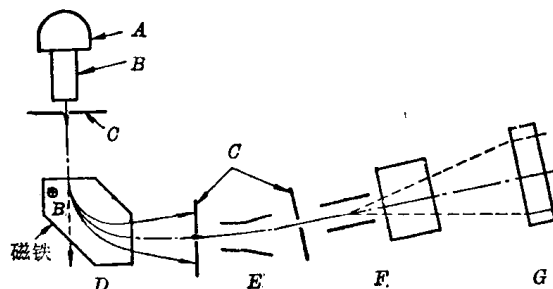


图 1-1 离子注入装置示意图

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

为了减少离子束流在传输过程中的损失及中性束的形成,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^{-6} 托(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。

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“零”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。

还有的注入机采用“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。对半导体器件及集成电路工艺而言,常用的离子注入能量范围为几十~几百 keV,使用束流为 0.1~几百 μA ,当注入剂量大于 10^{16}cm^{-2} 时,最好使用束流为毫安级的离子注入机。

§ 1-2 基本工作原理

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. 离子源 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,离子源必须满足以下几个条件:

① 能产生多种元素的离子。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 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表 1-1,几种天然元素的稳定同位素、天然丰度及离子源工作物质的性质列于附表 1-2。固体离子源主要用于产生金属离子的场合,不如气体离子源使用普遍。

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。要求引出束的分散越小越好,离子能量的分散 ΔE 也越小越好。

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部分(吸极)组成。它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。气体放电有许多类型,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: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 1-2 表示这些放电方式形成离子束的离子源结构示意图。引出系统要求能引出分散性小的强束流,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。直接引出方式的基本结构是两个带圆孔的金属电极,圆孔直径很小,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_0 ,电压的正极接阳极,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

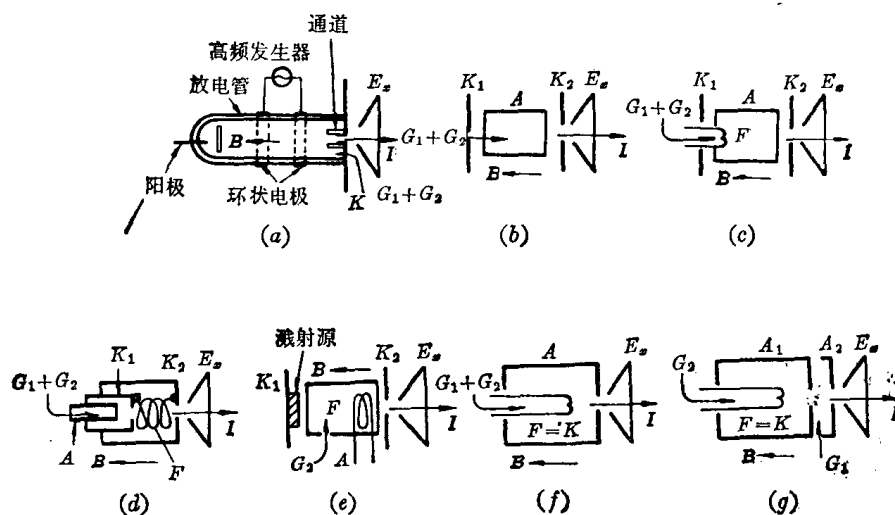


图 1-2 各种放电方式的离子源结构示意图

(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

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

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。间接引出方式是在阳极 A_1 和引出极 E_s 之间插入电极 A_2 , 在 A_1 、 A_2 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,如图 1-2(g) 所示。

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。

① 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 1-3 表示由结构比较简单的放电管组成的高频离子源,图中还画出了离子源与加速聚焦系统之间的连接部分。它是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,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。

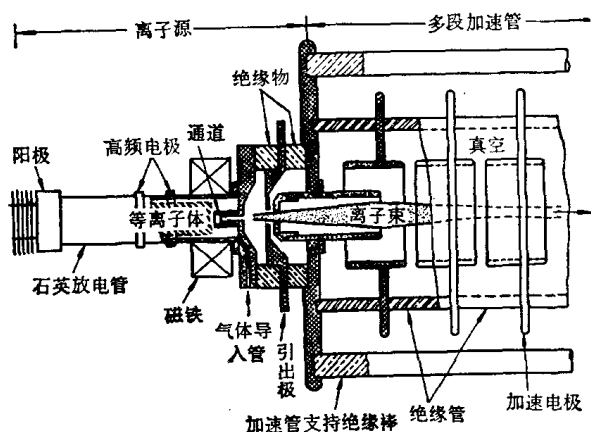


图 1-3 高频离子源的结构

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。图1-2(b)~(e)都属于电子振荡型离子源。图1-4是轴向引出方式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。阴极可用钨、钽、石墨等材料作成,阳极圆筒用石墨作成。由图可见,潘宁源的结构简单,但获得的束流较小。图1-5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1-6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。图1-7是轴向引出的溅射型离子源,其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。

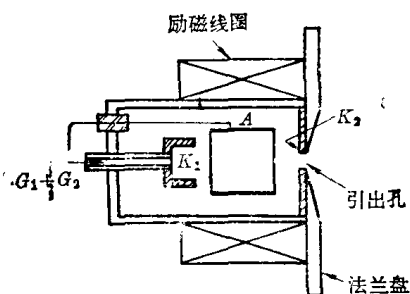


图1-4 冷阴极潘宁离子源

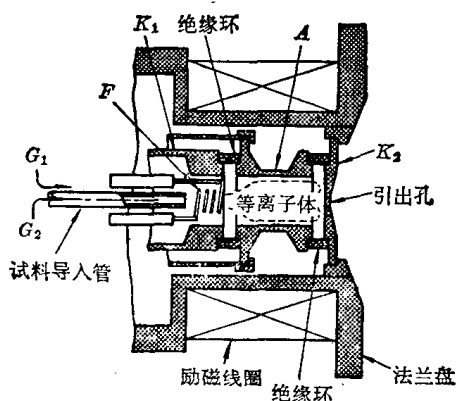


图1-5 热阴极潘宁离子源

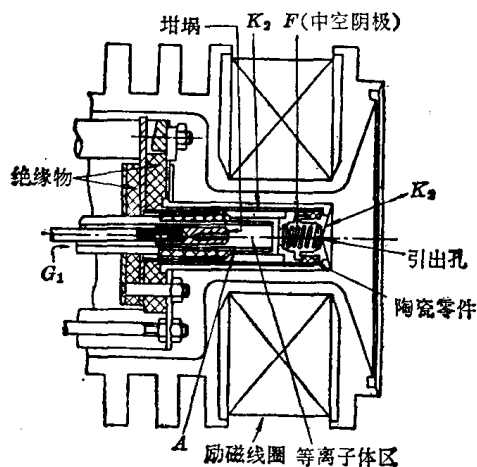


图1-6 中空阴极离子源

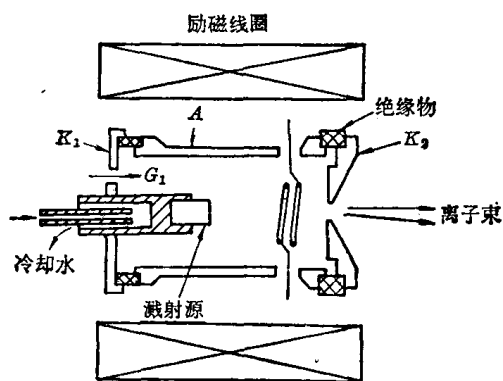


图1-7 溅射离子源

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,电子在两个阴极间来回振荡。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。

2. 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。

磁分析器大体上是一个直流电磁铁,两磁极之间为离子的通道,极面呈扇形,磁力线与极面正交,极掌间的磁场基本上均匀。图 1-8 表示离子在均匀磁场的运动情况。俯视图 中磁场的方向与纸面垂直,从纸的背面指向正面。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 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 $F = Zqv \times B$ 的作用,因离子运动的方向与磁场方向正交,故洛伦兹力的大小为 $F = ZqvB$, 这个力的方向垂直于 v 和 B 所确定的平面,且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

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

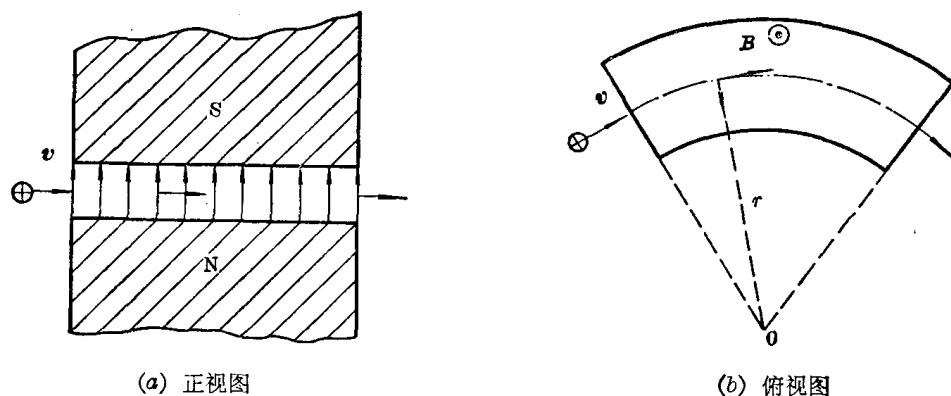


图 1-8 离子在均匀磁场中的运动

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

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

对实用单位制:

$$r = \frac{1.44}{B} \sqrt{\frac{MV}{Z}} \times 10^{-3} \quad (1-3)$$

式(1-3)中, B 的单位为特(T); E 为电子伏特(eV); V 为伏特(V); r 为厘米(cm); 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(1-2)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,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

面的测量装置中依次得到各种离子信号。可在自动函数记录仪上得到各种离子对应的信号图样,这种信号图样称为质谱。

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 1-9 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。

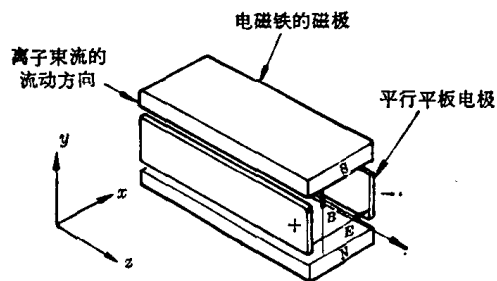


图 1-9 正交电磁场分析器

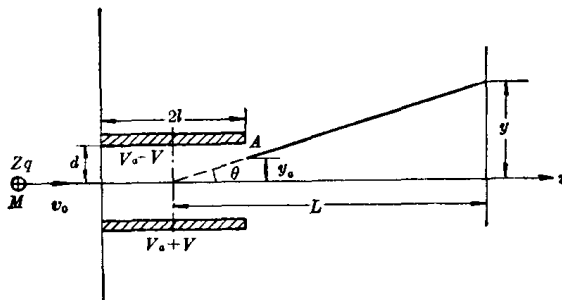


图 1-10 电场对离子的偏转作用

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,因而发生偏转,不能达到靶室。这就达到了分选离子的目的。

3. 偏转扫描 前面已提到,整个离子束是在高真空中行进的。即使是极高的真空,也不免有残留的气体分子。在快速前进的离子中的一些离子可能与系统中的残留中性气体原子(或分子)相碰撞,进行电荷交换,使中性气体原子(或分子)失去电子,成为正离子,但运动的速度不大,而原来为正离子的束流离子获得电子,成为中性原子,但仍保持原来的速度与离子一起前进,成为中性束。真空度越差,中性束越强;束流行进的路程越长,中性束也越强。中性束不受静电场的作用,直线前进而注入靶片的某一点,因而严重地影响注入层的均匀性。为此在系统中设有静电偏转电极,使离子束流偏转 5 度左右后再到达靶室,而中性束因直线前进不能达到靶室,从而解决了中性束对注入均匀性的影响。

通常,离子束流截面是比较小的(数平方毫米),且中间密度大四周密度小。这样的一束离子流注入靶片,注入面积小而不均匀,如不采取措施,根本不能使用。扫描就是使离子在整个靶片上均匀大面积注入而采取的一种措施。扫描的方式通常有:①靶片静止,离子束在 X 、 Y 两方向上作电的扫描;②离子束在 Y 方向上作电的扫描,靶片以 Y 为轴作旋转运动,故 X 方向为机械扫描;③离子束不扫描,完全由靶片的机械运动实现全机械扫描。其中,前两种方式尤为多用。

静电偏转电极和静电扫描器都是平行板电容器。前者两极板上加以直流电压,后者两极板上加变化的电压,使离子束随电压的变化而进行扫描。为了说明静电偏转和静电扫描的基本原理,首先研究离子在静电场中的偏转情况。

图 1-10 所示的两块平行电极的长度为 $2l$, 间距为 $2d$, 平行电极中心到靶片的距离为 L , 两块平行电极的电位差为 $2V$, 考虑电场均匀集中在两平行板之间,在极板边界之外为零的理想情况。显然,两平行板之间的电场强度 $|E| = V/d$, 其方向由正电极指向负电极。离子经加速后进入扫描器,其具有的能量 E 应等于加速电场对离子所作的功 ZeV_0 , 即

$$E = ZqV_a \quad (1-4)$$

式中, V_a 为总的加速电压. 另一方面, 设 v_0 为离子进入扫描器时所具有的速度, 因 $E = M v_0^2/2$, 以之代入(1-4)式中, 则得

$$v_0 = \sqrt{2ZqV_a/M} \quad (1-5)$$

当具有速度 v_0 的离子沿图 1-10 所示的 Oz 方向, 进入平行板范围时, 离子受到 y 方向电场力的作用, 其大小为 $F_y = Zq|E| = ZqV/d$, 这个力在 y 方向引起的加速度为

$$a_y = ZqV/Md \quad (1-6)$$

当 V 不变时, 离子在 y 方向作匀加速运动. 离子在 Oz 方向不受电场力作用, 因此 z 方向的分速度不变, 仍以 v_0 作匀速运动. 这种在 z 方向作匀速运动而 y 方向作匀加速运动的离子, 其运动轨迹为一抛物线.

离子离开平行板区域后, 不再受电场力的作用, 将沿出口处抛物线轨道的切线方向直线前进, 直至靶室. 在出口处, 离子在 z 方向的速度分量 $v_z = v_0$, 在 y 方向的速度分量 $v_y = a_y 2l/v_0$, 因此离子轨道的斜率为

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v_y}{v_z} = \frac{2a_y l}{v_0^2} \quad (1-7)$$

到达靶片的偏转幅度为

$$y = L \operatorname{tg} \theta = \frac{LVl}{V_a d} \quad (1-8)$$

从上面的分析可以看出, 离子受平行板间的电场力作用后, 其运动轨迹发生偏转, 到达靶室时的偏转幅度 y 决定于平行板的结构参数 L, l, d 和平行板上所加的电压 V 以及离子进入扫描器前总的加速电压 V_a . 从式(1-8)可看出, 当总加速电压 V_a 改变时, 要想得到同样大小的偏转, 必须调整加在平行板上的电压 V . 同时也看到, 若 V_a 不变时, y 随 V 的改变而改变. 如果加在平行板上的不是固定电压, 而是一个以线性规律变化的电压(如三角波、锯齿波电压), 就可使束流在靶片上产生上下的往复运动. 同理, 如果在离子注入装置中另设一对 x 方向的平行电极, 并加上线性变化的电压, 则离子束将在靶片上作左右的往复运动, 不难想象, 如果在 x 方向和 y 方向的两对平行电极上同时加上不同频率的线性扫描电压, 即可获得均匀扫描的离子束.

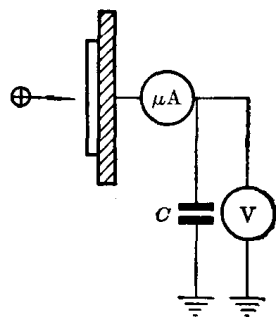


图 1-11 注入剂量的测量

4. 注入剂量的测量 一般使用电荷积分仪测量注入剂量, 其原理如下. 将束流对电容器充电(见图 1-11), 使电容器两端建立起电压. 如在充电初始时刻时, 电容器两端的电压 $V_c = 0$, 则经时间间隔 Δt 的充电后, 电容器两端的电压

$$V_c = \frac{1}{C} \int_0^{\Delta t} I_c dt \quad (1-9)$$

电容器上积累的电荷量就是 Δt 时间内注入靶片的正离子的总电荷量 $Q_1 = Zq N_{DS}$, N_{DS} 为注入靶片的杂质总量, 因此

$$CV_c = Zq N_{DS} \quad (1-10)$$

由式(1-9)和(1-10)得

$$N_{DS} = \frac{1}{qZ} \int_0^{\Delta t} I_c dt \quad (1-11)$$

如果束流稳定, 则

$$N_{DS} = \frac{I_c \Delta t}{qZ} \quad (1-12)$$

若注入面积为 A , 则单位面积的注入离子数即为

$$N_s = \frac{I_c \Delta t}{A q Z} \quad (1-13)$$

式(1-13)只能用来粗略地估算注入剂量, 为了准确的实现数字显示, 一般将束流转换成频率为 f 的脉冲, 然后用计数电路对脉冲计数。例如, 可以使束流对电容器 C 充电到某一给定电压值 V_p 时, 使电容器迅速放电, 形成锯齿波脉冲。这样, 当束流对电容器继续充电时, 电容器就不断地充放电而产生一系列脉冲。对于给定的电容 C 和电压 V_p 而言, 束流强则充电快, 单位时间内产生的脉冲数就多。设充电时间为 τ_1 , 放电时间为 τ_2 , 若 $\tau_2 \ll \tau_1$, 则锯齿波脉冲的频率

$$f = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2} \approx \frac{1}{\tau_1} \quad (1-14)$$

假定束流在 τ_1 时间内稳定不变, 则

$$V_p = \frac{1}{C} \int_0^{\tau_1} I_c dt = \frac{\tau_1}{C} I_c \quad (1-15)$$

由式(1-15)中解出 τ_1 代入式(1-14)中, 则得

$$f = \frac{1}{CV_p} I_c \quad (1-16)$$

将式(1-16)代入式(1-11)得

$$N_{DS} = \frac{CV_p}{qZ} \int_0^{\Delta t} f dt \quad (1-17)$$

将上式除以注入面积 A , 则得单位面积的注入离子数(称注入剂量)

$$N_s = \frac{CV_p}{AqZ} \int_0^{\Delta t} f dt \quad (1-18)$$

式(1-18)中, CV_p/AqZ 为常数, 也就是一个脉冲所代表的注入剂量。只要测得 Δt 时间内的脉冲总数, 就能求得注入靶片的剂量。当注入离子的能量较高时, 可从靶片表面激发出二次电子, 这会影响测量的精确度。因此在靶片的前方设一抑制栅, 使它相对于靶为负电压, 以便将二次电子抑制回去, 从而保证测量的准确性。

电荷积分仪的基本单元包括 $I-V$ 转换、 $V-f$ 转换(两者合称 $I-f$ 转换)、十进制计数电路(包括译码显示电路)以及控制电路等。

附录 1-1 离子注入用主要气体源性质

品 名	主 要 性 质	危 害 性	预 防 事 故 的 措 施
砷化氢 (AsH ₃)	分子量: 77.946 蒸气压(21.1°C): 14.4 kg/cm ² 沸点(1atm): -62.48°C 蒸气密度(0°C, 1atm): 3.48 g/l 相对于空气的比重: 2.695 无色、蒜臭。	剧毒。允许剂量为 0.05 ppm, 剂量为 6.25 ppm 时 30~60 分钟 中毒。 易燃、易爆。 有腐蚀性, 要用聚四氟乙烯器 皿。	使用的稀释气体: 氮、氩、氦、 氖。 保管、处理: 需在通风柜中操作 和贮藏。或使用防毒面具。要禁 止与氧气以外的氧化剂及易燃、 易爆物质混合。可用氨检漏器等 进行检漏。 简易检验方法为氯化汞试纸。

(续表)

品 名	主 要 性 质	危 害 性	预 防 事 故 的 措 施
三氯化硼 (BCl_3)	分子量: 117.17 蒸气压 (20°C): 0.81 kg/cm ² 沸点 (1atm): 12.5°C 冰点: -107°C	腐蚀性极大。加水分解成盐酸, 在湿空气中也发生作用, 生成硼酸。 有毒性。要注意防止吸入人体或与人体接触。注意保护眼睛。操作时使用眼镜、手套、围裙, 最好使用防毒面具。	保管和处理: 器皿必须很清洁, 必须贮藏在通风柜中。泄漏时发烟。使用蒙氏合金、聚乙烯、聚四氟乙烯、氯化乙烯树脂等材料做的器皿。
三氟化硼 (BF_3)	分子量: 67.81 沸点 (1atm): -100.3°C 冰点: -127.1°C 相对于空气的比重: 2.37 蒸气密度 (0°C, 1atm): 3.077 g/l 无色, 在湿空气中伴随有发烟, 有窒息气味。 蒸气压: (21.1°C): 112.3~126.4 kg/cm ² (-12.25°C): 50.6 kg/cm ²	不易燃, 也不易爆。腐蚀性极大, 易溶于水。对人体有害。不要吸入人体; 保护眼睛。 允许剂量: 1 ppm	保管和处理: 在通风柜中操作、贮存, 或使用防毒面具。要避免与氧气、油、水等一起存放。 检漏方法: 喷氨水时发生白烟。使用不锈钢、蒙氏合金、镍、硼硅酸玻璃、聚四氟乙烯、聚乙烯 (80°C) 等材料的器皿。
二硼化氢 (B_2H_6)	分子量: 27.67 沸点 (1atm): -92.8°C 自燃温度: 37.8~51.1°C 无色、呕吐物臭。	剧毒。 允许剂量: 0.1 ppm, 对肺等呼吸器官、肾脏引起中毒症状, 也侵入皮肤。 没有腐蚀性。但最好不要使用油脂、橡胶等。 易燃、易爆。与空气的容积比为 0.8~98% 时易爆。	使用的稀释气体: 氢、氦、氮、氩。 保管和处理: 使用通风柜或防毒面具。要贮藏在通风柜中, 并使气体流通无阻, 气体流通不充分时要爆炸。禁止和氧气、氧化物物质及易燃物质混合使用。使用不锈钢、聚乙烯、聚四氟乙烯、石墨等材料的器皿。
磷化氢 (PH_3)	分子量: 34.00 蒸气压 (21.1°C): 41.7 kg/cm ² 沸点 (1atm): -87.74°C 冰点 (1atm): -133.78°C 相对于空气的比重: (20°C, 1atm) 1.164 无色、有烂鱼臭。	剧毒。 允许剂量: 0.3 ppm 或 0.05 ppm。1.4~2.8 ppm 时呈中毒症状。侵入中枢神经、肺机能、血液, 产生胸有压迫感、头痛、视力衰退、食欲减退、干渴, 易燃、易爆。	保管和处理: 使用通风柜和贮存器。其他参照二硼化氢。使用无腐蚀性的材料。保存时要避免加热。
五氟化磷 (PF_5)	分子量: 125.966 蒸气压 (21.1°C): 约 28.1 kg/cm ² 沸点 (1atm): -84.8°C 冰点 (1atm): -93.8°C 无色、发烟、刺激臭。	剧毒。 允许剂量: 3 ppm 对氟化磷或氟酸有置换作用。侵入皮肤、眼、喉头。	保管和处理: 要用通风柜或防毒面具等。其他参照三氟化硼。 泄漏检测: 用喷氨水时发生白烟检测, 或用检漏器。 使用蒙氏合金、不锈钢、硼硅酸玻璃、石蜡等材料的器皿。
硅烷 (SiH_4)	分子量: 32.112 沸点 (1atm): -112°C 冰点 (1atm): -185°C 无色、恶臭。 蒸气压 (21.1°C): 35.1 kg/cm ²	易燃、易爆: 即使 1.0% 的稀释气体在空气中往往要爆炸。 有毒性。	保管和处理: 要保持压力状态, 不能低温冷凝; 要设置能充氮、氢等的清洗管道; 设有通风柜时, 不可与氧、卤素气体物质共用。 要严格检漏。
三氟化磷 (PF_3)	分子量: 87.97 无色 蒸气压 (21.1°C): 68.7 kg/cm ²	剧毒 允许剂量: 1 ppm	参照五氟化磷
四氟化硅 (SiF_4)	分子量: 104.08 无色 蒸气压 (21.1°C): 98.3 kg/cm ²	剧毒	参照三氟化硼

附录1-2 几种天然元素及离子源工作物质的性质

原子序数	原子名称	原子符号	原子量	主要天然同位素及丰度	离子源工作物质			原子序数	原子名称	原子符号	原子量	主要天然同位素及丰度	离子源工作物质		
					名称	熔点(°C)	备注						名称	熔点(°C)	备注
1	氢	H	1.008	1 99.98 2 0.02	H ₂	-259	易爆	26	铁	Fe	55.847	54 5.84 56 91.68 57 2.17 58 0.31	Fe FeCl ₂ FeO	1535 677 1420	
2	氦	He	4.003	3 0.3 4 99.4	He	-272		30	锌	Zn	65.37	64 48.89 66 27.82 67 4.14 68 18.54 70 0.617	Zn ZnS	417 1185 升华	
3	锂	Li	6.939	6 7.52 7 92.48	Li LiCl	179 614		31	镓	Ga	69.72	69 60.2 71 39.8	Ga GaI ₃ Ga ₂ O ₃	30 212 1900	
4	铍	Be	9.012	9 100	Be BeCl ₂ BeF ₂	1280 405 803	有毒	33	砷	As	74.922	75 100	As AsCl ₃	810 -18	有毒 见附录1-1
5	硼	B	10.811	10 18.98 11 81.02	B BCl ₃ BF ₃ B ₂ H ₆	2300 -107 -128 -86.5	见附录1-1	34	硒	Se	78.96	74 0.87 76 9.02 77 7.85 78 23.52 80 49.80 82 9.19	GaAs Se SeO ₂ CdSe	1238 217 345 1350	有毒
6	碳	C	11.2	12 98.2 13 1.1	CO CO ₂ CCl ₄	-207 -78 -24	有毒	48	镉	Cd	112.40	106 1.215 108 0.875 110 12.39 111 12.75 112 24.07 113 12.26 114 28.86 116 7.58	Cd CdS	321 1750	
7	氮	N	14.007	14 99.6 15 0.4	N ₂	-210		49	铟	In	114.82	113 4.22 115 95.77	In InCl ₃	156 586	
8	氧	O	15.999	16 99.76 17 0.03 18 0.2	O ₂ CO CO ₂	-218 -207 -78	腐蚀离子源灯丝有毒	50	锡	Sn	118.69	112 0.96 114 0.65 115 0.34 116 14.02 117 7.57 118 24.01 119 8.58 120 32.97 122 4.71 124 5.98	Sn SnCl ₄	232 -33	
9	氟	F	18.998	19 100	F ₂ KF	-220 880	有毒	51	铋	Sb	121.75	121 57.25 123 42.75	Sb	631	有毒
13	铝	Al	26.982	27 100	Al AlCl ₃	660 190		52	碲	Te	127.60	120 0.089 122 2.64 123 0.87 124 4.61 125 6.99 126 18.71 128 31.79 130 34.49	Te	450	有毒
14	硅	Si	28.086	28 92.27 29 4.68 30 3.05	Si SiCl ₄ SiS ₂ SiH ₄	1410 -70 1090 -185									
15	磷	P	30.974	31 100	P PCl ₃ PH ₃	237 -28 -133.78	注意易燃性 见附录1-1								
16	硫	S	32.064	32 95.06 33 0.74 34 4.18	S SO ₂	115 -75									
17	氯	Cl	35.453	35 75.4 37 24.6	Cl ₂ CCl ₄	-103 -23									
18	氩	Ar	39.948	36 0.33 38 0.06 40 99.6	Ar	-189									
24	铬	Cr	51.996	50 4.31 52 83.76 53 9.55 54 2.38	Cr CrCl ₃ Cr ₂ O ₃	1890 1150 1990									

参 考 资 料

- [1] 伊藤糾次, 鶴島稔夫, 谷田和雄, 大泊巖: “イオン・インプランテーション”, 第3章。
 [2] G. Dearnaley, J. H. Freeman, R. S. Nelson and J. Stephen: *Ion Implantation*, Chap. 4, 1973.

第 2 章

注入离子的射程分布

本章主要讨论注入离子在固体中的分布情况。这方面的系统理论是由 Lindhard, Scharff 及 Schiott 三人首先确立的, 简称 LSS 理论^[1]。为了方便, 以后称离子入射的固体为靶。如果固体中的原子排列情况是紊乱的, 称为非晶靶。LSS 理论是针对非晶靶情况的, 但在一定条件下也可适用于单晶靶。本章先介绍有关离子注入的一些基本概念, 并分析离子进入固体中受到阻力的原因, 然后导出 LSS 理论的基本方程及计算离子分布的方法, 最后讨论离子沿低指数晶向射入单晶固体中时发生的沟道效应及离子分布情况。

§ 2-1 射程、投影射程及标准偏差

固体由原子核和电子组成, 故射入固体的离子就要和其中的原子核及电子发生碰撞。在碰撞时, 离子的运动方向发生偏折并失去能量, 因此, 具有一定初始能量的离子入射到靶中, 将走过一个十分曲折的路径, 最后在靶中某一点停止下来。

离子从进入靶起到停止点所通过总路程称做射程, 射程在离子入射方向投影的长度称做投影射程, 以 x_p 表示之; 射程在垂直于入射方向的平面内的投影长度, 称做射程横向分量, 以 x_t 表示之。一个入射离子进入靶后所经历的碰撞过程是一个随机过程, 因此尽管入射离子及其能量都相同, 但各个离子的射程和投影射程却不一定相同。我们以 R 表示大量入射离子射程的统计平均值; 以 R_p 表示其投影射程的统计平均值, 称为平均投影射程。各入射离子的投影射程分散地分布在其平均值周围, 引入标准偏差

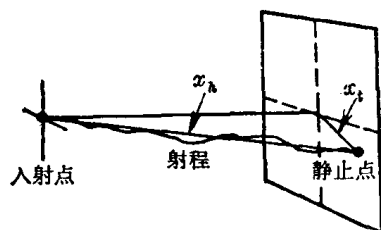


图 2-1 射程与投影射程

表示大量入射离子射程的统计平均值; 以 R_p 表示其投影射程的统计平均值, 称为平均投影射程。各入射离子的投影射程分散地分布在其平均值周围, 引入标准偏差

$$\Delta R_p = [(\overline{x_p - R_p})^2]^{1/2} \quad (2-1)$$

表示 x_p 的分散情况。

虽然单个离子的射程是无规则的, 但对于大量以相同能量入射的离子来说, 仍然存在一定的统计规律性。在一定条件下, 其射程和投影射程都具有确定的统计平均值。射程分布理论就是研究这种统计规律的。在叙述这一理论前, 先考虑入射离子在靶中所受的碰撞情况。

§ 2-2 入射离子在固体中的减速过程

离子进入靶后, 通过与靶原子核及其中电子碰撞而损失能量, 这两种碰撞的情况完全不同。当离子和靶原子核碰撞时, 由于两者的质量一般属于同一数量级, 因此散射角较大, 即经过碰撞, 离子运动方向发生较大的偏折。在每次碰撞中, 离子失去的能量, 即传递给靶原子核的能量也较大。如果是晶体靶, 当离子与靶原子碰撞时传递的能量大于晶格中原子的