

表面工程实用技术丛书

离子束表面工程技术与应用

张通和 吴瑜光 编著

机械工业出版社

摇摇本书内容主要包括离子束注入技术、离子束增强沉积技术、磁过滤离子束沉积技术、全方位离子注入技术、强脉冲离子束材料改性技术和离子束创建新型制膜工程等，着重给出了这些离子束技术的最新研究成果及其在工业上的广泛应用情况。本书内容系统全面，实用性强。

本书可供表面工程技术人员参考，也可供相关专业在校师生以及研究人员参考。

摇摇图书在版编目（CIP）数据

摇摇离子束表面工程技术与应用 张通和，吴瑜光编著—北京：机械工业出版社，2006.9

摇摇（表面工程实用技术丛书）

摇摇I. ①张…②吴…Ⅱ. 张通和—应用—金属表面处理

摇摇Ⅳ. ①T424.9…②T424.9…③T424.9…Ⅴ. ①T424.9…②T424.9…③T424.9…

摇摇中国版本图书馆CIP数据核字（2006）第144444号

摇摇机械工业出版社（北京市百万庄大街22号）邮政编码100037

策划编辑：陈保华

责任编辑：白瑞刚 版式设计：张世琴 责任校对：申春香

封面设计：陈瑞沛 责任印制：石瑞冉

北京中兴印刷有限公司印刷

2006年9月第1版第1次印刷

开本：185mm×260mm 1/16 印张：12.5 字数：300千字

图例：1—源图例

定价：48.00元

摇摇

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68995166

封面防伪标均为盗版

前 言

离子束材料表面改性技术的研究和推广应用已经取得了巨大的成就，其标志之一是离子注入微细加工技术的发展。离子注入微细加工技术已经成为超大规模集成电路微细加工的关键技术，推动了现代电子工业的飞速发展。目前，集成电路制造产业已经成为继机械、化工和汽车工业之后的第四大制造产业，现在有一千台全自动化的离子注入机正应用在各国的集成电路生产企业中。这项技术的发展，既提高了经济建设和国防建设自动化程度和高技术含量，同时也提高了现代人的生活水平。另外，这项技术在计算机和家电上也得到了普遍应用，现在电子手表、电视机、收音机、洗衣机、数码相机和数码录像机等家用电器所使用的集成电路均是由离子注入微细加工技术制造出来的，这都是人人所能感受到的。

新一代离子束表面工程技术在机械加工和与之相关的产业中，已形成了新的微细加工技术，也已成为其他技术所无法取代的高新技术。这项技术的发展是多学科相互渗透和交叉发展的丰硕成果。这项高新技术与产业部门进行了密切合作，应用范围也迅速深入到国民经济的各个方面：在机械加工制造中，其可以取代常规热处理，可以替换高污染的电镀工业，实现机械工业的绿色革命；许多国家已将离子束表面工程技术用于机械装备上，尤其是军事装备，如改善涡轮机主轴、精密轴承、齿轮、冷冻机阀门和活塞等的性能；离子注入改善人工关节性能已在医学上得到了广泛应用，仅美国每年就用这种技术处理十万只人工关节；继大规模集成电路中半导体离子注入微细加工技术发展之后，在工业中应用最广泛的是氮离子注入，在国际上也已经有数百台离子注入机从事非半导体材料表面优化技术的研究和应用，进一步拓宽工业应用范围；从金属离子注入技术，进一步发展到金属和非金属离子（碳、硼、氮和氧等）共注入和双注入技术，以及高功率强脉冲离子注入和全方位离子注入技术，从而形成了全新的离子注入加工技术。随着这项技术的发展和知识的积累，该技术已经发展到可以进行离子注入表面优化层设计的程度。根据实际需要，可以设计出制备抗磨损、抗腐蚀和氧化的表面优化层加工方案和具体加工方法，也可以设计出制备抗磨损、抗腐蚀和抗氧化兼有的表面优化层加工方案和具体加工方法。随后又发展了离子束增强沉积技术，改善了常规薄膜沉积工艺。离子束增强沉积技术将离子注入的优点与物

理沉积制膜技术的长处结合起来,可以沉积各种高质量硬化膜,如 ~~碳化膜~~ ~~氮化膜~~ 和类金刚石膜。离子束的作用能使沉积膜的密度增加,结构更加致密,从而提高了材料的表面硬度、抗磨损和抗腐蚀特性,特别是提高了沉积膜与工件的结合力,结合力比常规沉积膜结合力提高 ~~圆~猿倍~~ ~~圆~猿倍~~,极大地提高了零件的使用寿命。离子束增强沉积技术的发展极大地拓宽了离子束工业应用范围,将离子束技术发展到了一个新阶段。

目前,正在突飞猛进发展着的离子束技术是离子束纳米多层膜组装技术。利用离子束增强沉积技术和磁过滤离子束沉积技术,可以交替沉积硬化膜和高韧性纳米多层膜,从而制备出具有超高硬度和高韧性的沉积膜,克服了常规技术制备超硬膜低韧性和高韧性薄膜低硬度的缺陷。在多层纳米膜沉积过程中,离子注入可以制备梯度层和缓冲层,从而极大地提高了纳米多层膜与工件的结合特性,使结合力提高 ~~苑园~员圆园~~ ~~苑园~员圆园~~。离子束纳米多层膜组装技术将离子束技术推向新的发展高潮,这种技术是其他技术所无法取代的,这项技术的发展,将会像离子注入微细加工技术推动大规模集成电路的发展那样,极大地推动机械加工产业进行高新技术改造,提高机械加工工业的加工水平。

由此可见,每一个发展阶段都使离子束技术向纵深发展,每次发展都拓宽了这项技术的应用范围。工业应用实践表明,离子束技术可以使零件和工具使用寿命提高 ~~缘~员缘~~ ~~缘~员缘~~倍,使轴承寿命提高 ~~员园~员园~~ ~~员园~员园~~倍。这大大节省了加工时间、劳动力、电力、原材料,而且该技术可取代高污染的电镀工艺。由此可见,离子束技术的确是绿色加工技术,已经成为绿色工业发展的先导。

本书主要介绍了离子注入、高功率强脉冲离子注入、全方位离子注入、离子束增强沉积、磁过滤真空弧离子沉积、离子束创建新型制膜工程等技术,着重给出了在这些方面的最新研究成果和在工业上的广泛应用情况,并进行了分析和展望。

编写本书就是为了让更多的人了解这项技术及其应用,从而促进这项技术的发展,提高我国制造业的加工技术水平。但是由于这项技术的发展所涉及的方面太多,而编者的水平又有限,难免会带来缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 离子束表面工程技术概述	1
1.1 离子束表面工程技术原理	1
1.1.1 离子在固体中的碰撞和级联碰撞	1
1.1.2 注入离子浓度分布	2
1.1.3 能量淀积和晶格损伤率	3
1.1.4 热峰效应与热处理	4
1.1.5 溅射系数的计算	5
1.1.6 饱和注入量的简捷计算	6
1.2 离子束注入的特点和局限性	7
1.3 离子束表面工程技术的发展概况	8
第 2 章 离子束注入技术	9
2.1 离子束注入技术简介	9
2.1.1 离子源	10
2.1.2 几种典型的工业用离子注入机	11
2.2 非金属离子注入	12
2.2.1 氮离子注入	12
2.2.2 碳离子注入金属	13
2.2.3 硼离子注入钢	14
2.2.4 氧离子注入金属	15
2.2.5 气体离子注入材料表面改性综合比较	16
2.3 金属离子注入	17
2.3.1 金属蒸发真空弧 (脉冲式) 离子源金属离子注入	17
2.3.2 钛离子注入钢表面改性	18
2.3.3 重金属离子注入 304 钢的摩擦学特性	19
2.3.4 几种金属离子注入 304 不锈钢	20
2.4 离子注入 304 合金钢	21
2.5 离子注入改善 304 和 316 沉积膜特性	22
2.5.1 三元固溶体的形成	22
2.5.2 离子注入改善 304 沉积膜特性	23

离子注入对聚苯胺的抗氧化特性	源
几种离子注入对聚苯胺膜应力大小的比较	源
长程离子注入	缘
双注入	缘
双注入	缘
双注入	缘
双注入	缘
双注入	源
双注入	源
其他双注入的研究结果	源
共注入	源
共注入	源
共注入	源
共注入	源
离子注入材料的性能改善	缘
金属离子注入材料的性能	缘
抗腐蚀特性	源
离子注入抗氧化	源
离子注入工业应用	源
离子注入工业应用范围和应用实例概述	源
英国哈威尔 (HASEL) 有限公司离子注入工业应用成果	源
美国在塞姆公司离子注入工业应用成果	源
美国军事工业应用研究成果	源
医疗方面的工业应用成果	源
欧洲各国的离子注入工业应用	源
弧源离子注入工业应用	源

第 猿章 离子束增强沉积技术 源

简介	源
离子束增强沉积原理	源
离子束增强沉积的几种结构	愿
离子束增强沉积的参数	愿
金属膜的制备和特性	源
超硬陶瓷膜	愿
氮化钛膜 (TiN) 的制备和特性	愿
碳膜的制备和特性	员
聚苯胺膜的制备和特性	员
三元硬化膜的制备和特性	员

摇摇摇摇类金刚石膜 (阅读)	摇摇摇摇
摇摇摇摇固体润滑膜	摇摇摇摇
摇摇摇摇光学膜	摇摇摇摇
摇摇摇摇鼻膜的制备和特性	摇摇摇摇
摇摇摇摇 β 聚酰胺膜	摇摇摇摇
摇摇摇摇离子增强沉积的工业应用	摇摇摇摇

第 9 章 摇磁过滤离子束沉积技术 195

摇源员摇简介	员源
源员员摇磁过滤离子束沉积的原理和大颗粒的形成	员源
源员员摇磁过滤弯管技术	员源
源员员摇磁过滤系统管道传输特性	员源
摇源圆摇磁过滤离子束金刚石薄膜沉积的应用	员源
摇源猿摇磁过滤改善 匀炭钢抗腐蚀性能	员源
摇源源摇磁过滤改善 匀炭钢共沉积膜的制备及其性能改善	员源
摇源缘摇聚合物表面沉积	员源
源缘员摇沉积钨和钛	员源
源缘员摇非晶金刚石薄膜的合成	员源
摇源远摇磁过滤改善 匀炭钢共沉积膜工艺和特性	员源
摇源苑摇磁过滤改善三元共沉积膜的特性	员源
摇源愿摇靶加热 匀炭钢沉积膜的特性	员源
摇源怨摇高压负脉冲沉积薄膜特性	员源
摇源园摇超厚膜的形成	员源
摇源员摇离子束沉积	员源
源员员摇离子束沉积设备	员源
源员员摇直接离子束沉积原理和技术	员源
源员员摇磁过滤沉积计算机硬盘保护	员源
源员员摇磁过滤膜的沉积和特性	员源
摇源圆摇降低膜的内应力途径	员源
摇源猿摇增强膜与基体粘合强度的途径	员源
摇源源摇磁过滤膜的制备、特性和应用	员源
摇源缘摇磁过滤制膜特性和应用综述	员源

第 4 章 全方位离子注入技术 100

摇纜圓摇全方位离子注入的原理.....	圆蒙
摇纜圓摇孕酮技术的特点和局限性.....	圆蒙

摇缘远瑶孕酮离子注入设备的改进	圆苑
摇缘远瑶孕酮离子注入实验	圆园
缘远瑶孕酮离子注入条件	圆园
缘远瑶注入层结构分析	圆员
缘远瑶离子注入硬度实验	圆苑
缘远瑶孕酮离子注入材料表面摩擦学特性和抗磨损特性	圆员
缘远瑶抗腐蚀特性	圆愿
缘远瑶接收量与工件形状的关系	圆园
摇缘远瑶孕酮沉积膜的制备和特性	圆员
缘远瑶金属膜沉积	圆员
缘远瑶栽膜沉积	圆源
缘远瑶悦膜沉积	圆苑
缘远瑶悦的膜沉积	圆苑
缘远瑶悦膜沉积	圆苑
缘远瑶悦膜沉积	圆愿
缘远瑶脉冲参数对沉积膜特性的影响	圆苑
缘远瑶离子注入、氮化工艺与孕酮工艺比较	圆愿
摇缘远瑶孕酮工业应用	圆源
缘远瑶工业应用实例	圆源
缘远瑶模具处理效果	圆缘
缘远瑶刀具处理	圆缘
缘远瑶塑料瓶内壁悦膜沉积	圆苑
缘远瑶不锈钢管内孔悦膜沉积	圆苑
摇缘远瑶孕酮加工优点及模具加工方法	圆苑
缘远瑶孕酮加工的优点	圆苑
缘远瑶模具孕酮加工条件和模具抗磨损量化测量	圆愿
摇缘远瑶工业用孕酮注入机	圆园

第 远章瑶强脉冲离子束材料改性技术	圆苑
-------------------------	----

摇远瑶强脉冲离子束的形成	圆苑
摇远瑶某些重要的强脉冲离子束设备	圆员
远瑶栽云加速器	圆员
远瑶酝云加速器	圆猿
远瑶粤粤粤粤粤粤粤粤粤粤加速器	圆缘
远瑶悦云加速器	圆缘
远瑶栽云的加速器的酝二极管和薄膜沉积	圆苑
远瑶大面积均匀束的改进	圆苑

第 4 章 国外 离子加速器工作参数	4-1
第 5 章 高能离子射程分布	5-1
第 6 章 强脉冲注入能量沉积	6-1
6.1 强脉冲注入材料的受热过程	6-1
6.2 熔化区域的确定	6-11
6.3 应力波效应	6-19
6.4 间隙原子产生密度与冲击波的关系	6-24
6.5 计算结果举例	6-29
6.6 计算的主要结果	6-34
第 7 章 离子脉冲注入表面改性	7-1
7.1 表面形貌和表面粗糙度的变化	7-1
7.2 表面硬度	7-11
7.3 结构变化和相变	7-19
7.4 摩擦系数	7-24
7.5 离子注入金属抗磨损特性	7-29
7.6 离子辐照抗氧化特性	7-34
第 8 章 离子技术的工业应用	8-1
8.1 离子钻头延长寿命	8-1
8.2 离子丝锥延长寿命	8-11
8.3 离子汽轮机叶片延长寿命试验	8-19
8.4 离子辐照沉积技术	8-24
8.5 离子纳米粉末的制备	8-29
8.6 离子表面淬火	8-34
8.7 工业应用的综合评述	8-39
第 9 章 离子技术的特点	9-1
第 10 章 离子束创建新型制膜工程	10-1
10.1 离子注入改善沉积膜特性	10-1
10.1.1 研究对象	10-1
10.1.2 离子注入过渡层和梯度膜的制备	10-11
10.1.3 离子注入改善沉积膜的特性	10-19
10.2 离子束沉积膜的物理特性和应用实例	10-24
10.3 离子束多层膜优化技术	10-29
10.3.1 多层膜的制备技术	10-29
10.3.2 多层膜改善 率 特性	10-34
10.3.3 多层 膜 沉积特性	10-39
10.4 离子束纳米组装技术	10-44

第 1 章 离子束多层纳米膜的理论考虑和试验研究	1
第 2 章 离子束金属基多层硬化膜沉积	2
第 3 章 离子束塑料基体多层纳米膜沉积的工业应用	3
第 4 章 离子束多层膜沉积切削工具工业应用	4
第 5 章 离子束技术发展展望	5
第 6 章 离子注入的特色	6
第 7 章 离子注入独具特色的离子注入	7
第 8 章 离子注入改善沉积膜机械特性、化学特性和粘合特性	8
第 9 章 多功能离子束技术的发展	9
第 10 章 离子溅射、离子混合和薄膜沉积技术	10
第 11 章 全方位离子注入与沉积技术的结合	11
第 12 章 离子注入与离子镀技术结合沉积多层纳米薄膜	12
参考文献	13

第 1 章 离子束表面工程技术概述

在材料表面工程中，主要的研究目的是探索和研制新的工艺表面。所谓工艺表面是指材料对加工工艺过程、工艺方法和环境都十分敏感的表面。用不同加工工艺、工艺方法和热处理手段可得到具有多种多样特性的工艺表面，以适应各个研究领域和生产中不断增长的特殊需要。不同加工工艺将引起材料表面成分、微结构、形貌和特性诸方面不同的变化，而加工气氛则常常引起表面化学特性的变化，如氧化物、氮化物和氯化物的形成及基体中某些成分的富集和消耗等。离子束材料改性的物理问题是荷能离子在固体中的原子碰撞（能量损失）、离子在固体中停留位置（射程）和引起材料结构变化（能量沉积）问题。离子束材料改性的工程问题是离子注入引起材料表面成分、微观结构变化和新的化合物析出，由此而引起材料表面物理（硬度）、摩擦学特性和化学特性的变化。离子束可控地形成材料表面成分的改变、结构变化和温升效应是离子束材料改性的三把利剑。利用离子束构筑独具特性的工程表面，其特性远优于其他工艺，是其他工艺无法取代的高新技术。

1.1 离子束表面工程技术原理

1.1.1 离子在固体中的碰撞和级联碰撞

离子和固体相互碰撞受到许多因素的支配，如离子速度、离子能量、离子和靶原子（基体原子）尺寸、离子和靶原子质量和原子序数以及离子和靶原子逼近的距离等。一个入射离子在固体中与靶原子进行一系列的碰撞，将自身的能量传递给靶原子，因此引起靶原子位移和靶原子二次的级联碰撞，以此来进行能量转换，同时也伴随有原子电离、晶格原子振动、离子的背散射、靶原子的溅射和二次电子发射。图 1-1 给出了离子注入改性的几种方式：①离子注入改变表面成分（见图 1-1a），也可以看到晶格损伤；②离子注入晶格损伤（见图 1-1b），在级联碰撞体内碰撞的瞬间，全体晶格原子位移，此时碰撞体内达到液化或汽化的温度，这种效应称为热峰效应，这种现象仅发生在低能重离子注入大质量原子的基体中，因为这时射程短而能量集中；③离子束界面混合，在碰撞过程中引起基体原子反向进入薄膜，而薄膜中的原子反冲到基体中，形成相互混合的情况，从而增强薄膜的粘合强度（见图 1-1c）；④离子注入离子溅射表面去层（见图

离子束，可用于表面清洗和抛光。

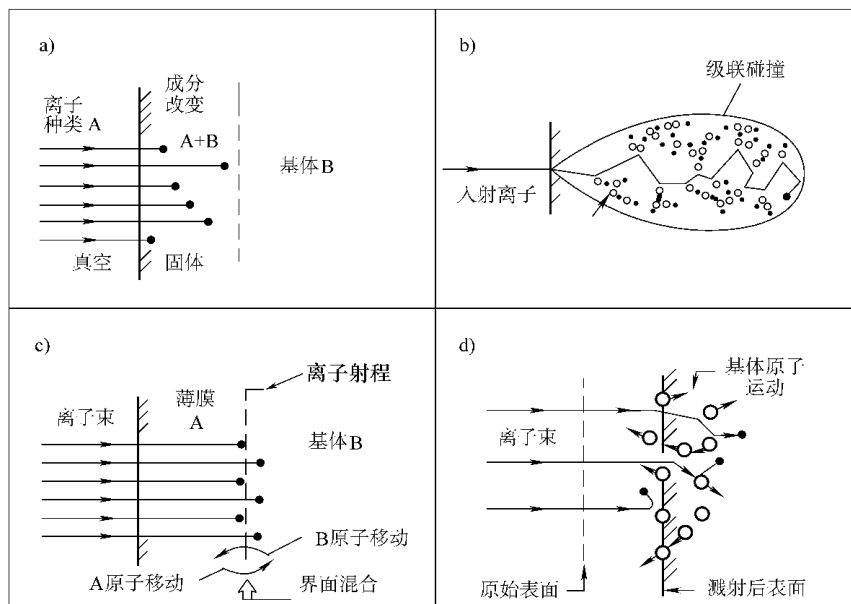


图 1-10 离子注入材料表面改性的几种方式

离子注入改变表面成分 离子注入晶格损伤 离子束界面混合 离子溅射

离子注入离子浓度分布

离子注入的特点是注入杂质可控，以期获得表面改性的最佳效果。为此，首要的问题是弄清注入杂质的浓度和浓度分布。根据林哈德理论入射离子的浓度分布为高斯分布

$$N(x) = \frac{\Phi}{\Delta R \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\Delta R^2}\right) \quad (1-10)$$

式中， Φ 为注入量（离子数）； R 为垂直入射到表面离子的最可几位置（投影射程）； ΔR 为统计偏差。如果考虑注入过程中存在扩散效应，设扩散系数为 D ，注入时间为 t 于是有

$$N(x,t) = \frac{\Phi}{\Delta R \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\Delta R^2} - \frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (1-11)$$

从上式可以看出，注入到材料表面的原子浓度分布，浓度峰值在 R 处。浓度值与注入量成正比，在升温注入时，与注入杂质在材料中的扩散系数和注入时

间相关。因此只要知道这几个参量,就可以知道注入杂质的分布。注入量可精确的控制,注入深度可以通过改变离子能量来实现,二者均能精确控制,因此可以精确控制注入层浓度和厚度。由于材料表面的杂质引入因此形成了新的合金相和化合物,结果引起了材料表面特性的改变。

1.1.2 能量沉积和晶格损伤率

1.1.2.1 能量沉积分布

注入离子在固体中损失了自身的能量,沉积能量到材料表面的过程与注入离子射程分布的计算相似,也是统计计算,用类似的方法可以给出能量沉积参数,如能量沉积最大几率的位置 $\bar{x}_d$ 和统计偏差 Δx_d ,其分布形式是高斯分布。计算这两个值的数学处理中文资料可在相关文献中查找,也可以用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 程序计算。单个入射离子的能量分布形式由下式给出:

$$N(x) = \frac{1}{\Delta x_d \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x}_d)^2}{2\Delta x_d^2}\right] \quad (1.1.2.1)$$

如果注入量为 Φ ,则可以给出能量密度 $N(x)E_d$ 的分布形式为

$$N(x)E_d = \frac{\Phi E_d}{\Delta x_d \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x}_d)^2}{2\Delta x_d^2}\right] \quad (1.1.2.2)$$

式中, Φ 为注入量; $\bar{x}_d$ 为入射离子消耗于核阻止那部分的能量,将在后面给出。

1.1.2.2 核阻止能量 $\bar{x}_d$ 和晶格损伤率的确定

林哈德 (Lindhard) 给出晶格损伤率为

$$\xi(\bar{x}_d) = \frac{1}{\bar{x}_d} \exp\left[-\frac{\bar{x}_d}{\epsilon}\right] \quad (1.1.2.3)$$

那么,用于核阻止的能量 $\bar{x}_d$ 则可用下式计算:

$$\bar{x}_d = \frac{\bar{x}_d}{\xi(\bar{x}_d)} \quad (1.1.2.4)$$

式中, ϵ 为电子阻止常数。

$$\epsilon(\epsilon) = \frac{1}{\epsilon} \exp\left[-\frac{\epsilon}{\epsilon}\right] \quad (1.1.2.5)$$

式中, ϵ 为量纲为 eV 的能量因子。

$$\epsilon = \frac{E_d}{\bar{x}_d} \quad (1.1.2.6)$$

式中, E_d 为入射离子能量; A_1 和 A_2 分别为入射离子与靶原子质量; Z_1 和 Z_2 分别为入射离子与靶原子序数; e 为电子电荷; 屏蔽长度 r_0 为波尔半径。

从式 (1.1.2.6) 可以看出,沉积到材料表面的能量分布也是高斯分布,如果将该式除以原子的晶格移位阈能 E_d ,则表示由于离子在材料中碰撞所引起的晶格

损伤分布。由于随注入量的增加晶格损伤的积累，引起了应力的增加，从而引起了位错的形成和发展，结果导致了材料结构和表面硬度的变化。

离子束热峰效应与热处理

通常的热处理是将工件在高温中加热后迅速将其投入油或水中，利用热工件急冷的过程来提高工件的硬度。其降温速率为 $10^3 \sim 10^4$ K/s。离子注入到固体，在级联碰撞体内碰撞的瞬间，如果全体晶格同时产生原子位移，此时碰撞体内温度达到液化或汽化的温度，这种效应称为热峰效应。热峰效应是一种特殊的级联碰撞过程，这个过程只有 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ s，其降温时间为 10^{-14} s，降温速率比常规淬火的降温速率高 $10^3 \sim 10^4$ 个数量级，因此可以说用离子注入淬火比常规淬火有很多的优越性，如淬火速率快，效果更好；这种淬火仅发生在工件表面，淬火时不会引起工件基体软化；也不会改变工件尺寸，产品成品率高。出现热峰效应的条件取决于临界能量 E_c ，临界能量的大小与材料的原子序数有关，该值由 1964 年给出如下关系式：

$$E_c = 1.6 \times 10^{-19} Z_1^2 Z_2^2 / (Z_1 + Z_2) \quad (10-10)$$

式中， Z_1 为原子序数，当 Z_1 值分别为 1, 2, 3, 4 时， E_c 值则分别为 0.01, 0.04, 0.09 和 0.16 eV。当 $E_c > E$ 时不会发生热峰效应，这里 E_c 为晶格原子移位阈能。由此可见，质量很轻的离子不可能形成热峰效应。这种现象在高能离子注入时出现在离子级联碰撞的末端。利用式 (10-10) 可以获得形成这种独特结构变化的淬火条件，即所选用的离子和相应的能量。

离子束溅射系数的计算

所谓溅射系数 S 是指每个入射离子所打出的靶原子数目，是入射离子从表面打出的原子数与入射离子数之比。席格曼 (Sigmund) 教授根据能量淀积理论推导出计算溅射系数 S 的公式为

$$S = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{E_d}{E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \quad (10-11)$$

式中， α 是离子在靶中的核阻止本领； α 是与离子和靶原子质量相关的常数，一般来说该值为 0.01~0.03； E_d 是表面原子的升华能 (eV)。当核阻止占优势时，该公式是正确的。

$$S = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{E_d}{E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \quad (10-12)$$

离子束饱和注入量的简捷计算

根据斯处尔兹 (Schulz) 等人的理论，可以给出含溅射系数 S 的注入杂质浓

度分布表示式：

$$N(x) = N_0 \left[\frac{(1 - \exp(-\lambda x))}{\lambda x} + \frac{\exp(-\lambda x)}{\lambda x} \right] \quad (1-10)$$

式中， N_0 为基体原子密度； λ 为入射离子在基体表面的溅射系数； Φ 为经注入量 Φ 注入后表面的去层厚度。当 $\Phi \rightarrow \infty$ 时，则 $\lambda \rightarrow 0$ ，于是，式 (1-10) 右边第一项余误差函数的分数值在 1 则为 1，结果我们给出饱和注入量的简捷计算公式：

$$\Phi_{\infty} = \frac{N_0}{\lambda} \quad (1-11)$$

从式 (1-11) 可以看出，注入到材料表面的杂质浓度与溅射系数成反比。这表明由于溅射的影响注入杂质浓度随 λ 的增加而下降。当能量较低的重离子注入时，溅射系数很高，注入到材料表面的原子又很快地被溅射掉。因此，实际注入到材料内的杂质打了折扣，这是离子注入的局限性。

1.2 离子束注入的特点和局限性

1.2.1 离子束注入的特点

(1) 注入的元素和添加的元素可以任意选取。

(2) 注入或添加元素时不受温度和固溶度的限制，可在高温、低温和室温下进行。

(3) 注入和添加到基体中的原子不受基体固溶度的限制，不受扩散系数和化合结合力的影响。

(4) 可精确控制掺杂数量和掺杂深度。可精确地控制注入荷量，因此可精确控制掺杂浓度。掺杂深度可用控制注入束能量的高低来实现。

(5) 离子注入横向扩散可忽略，深度均匀。

(6) 注入掺杂大面积均匀性好。比如在 100mm^2 硅片上可制备出电阻率均匀性到 $\pm 1\%$ 的精度。

(7) 掺杂杂质纯度高。纯度可以达到 99.99% 以上。

(8) 金属和氮离子束束流强度可达 $10^8 \sim 10^9 \text{A/cm}^2$ ，提高了注入效率，适于工业生产。

(9) 适用于各种固体材料和粉末材料的改性要求，如半导体、晶态、非晶态、金属和非金属材料等。

(10) 直接离子注入不改变工件尺寸，特别适合于精密机械零件的表面处理，如航空、航天领域。

(11) 离子束增强沉积可获得大于 $1\mu\text{m}$ 厚的改性层和超硬层，更适于石油、化工领域。

离子束注入的局限性

(员) 常规离子注入深度很浅, 在能量范围为 $10^4 \sim 10^5$ eV 时, 穿入深度约 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm。

(圆) 设备复杂: 真空系统、旋转靶室、离子源和高压加速, 分析、偏转扫描、复杂的加工参数检测系统和全自动计算机控制系统, 因此设备成本高。

(獭) 技术难度大, 它所涉及的技术问题复杂, 如离子碰撞和能量损失问题。

(源) 由于离子的表面溅射效应, 使较重的离子注入很难得到高浓度掺杂。

离子束表面工程技术的发展概况

离子注入大规模集成电路微细加工技术的发展

自 20 世纪 50 年代以来, 首先发展起来了半导体器件和集成电路的精细掺杂工艺, 形成了微细加工技术。离子注入微细加工技术推动着集成电路发展到了超大规模和高速化的阶段, 促使红外器件、发光元件和微波管实现大规模阵列集成化, 出现了今天蓬勃发展的电子工业产业。

氮的强离子束工程技术飞速发展和广泛应用

20 世纪 60 年代初期, 英国哈威尔原子能研究中心的富里曼 (Fryman) 教授等人研制出氮的强离子束注入机。这种注入机的特点是束流强度比以前的离子束注入机大 $10^4 \sim 10^5$ 倍, 从单束注入发展到多束注入。由于该设备简单, 所以可以实现多个离子源多方位注入, 而注入机的靶室可以做得很大。由于氮离子注入技术的发展, 因此很快使氮离子注入实现了工业化。

多种新兴离子束技术的发展

为了克服离子注入的局限性, 在 20 世纪 60 年代先后发展起来了几种新型离子束技术:

(员) 离子束混合的出现对离子束冶金学的发展作出了贡献, 研究了几十种亚稳态合金相的制备, 制备出几十种金属玻璃, 并提出相应的模型。

(圆) 金属蒸发真空弧离子源 (Metal Arc Ion Source) 和其他金属离子源的问世为离子束材料改性提供了强金属离子束。这无论是在基础研究上还是在工业上都提供了更先进的工具, 并且在实际应用上也很快地取得了重要的进展。

(獭) 为克服注入层浅的问题, 开始研究离子束辅助沉积技术 (Ion Beam Assisted Deposition), 又称离子束增强沉积技术 (Ion Beam Enhanced Deposition), 实践表明这种技术在制备厚而硬的表面改性层上独具特色。

(源) 为了解决复杂形状工件的离子注入, 相应地发展了全方位离子注入。

(缘) 高功率脉冲 (Pulsed) 淬火在热处理上有了新的开创, 这些离子束技术在实际应用上都具有重要价值。离子束技术新的开拓也必然会加速离子束材料改

性领域的飞速发展。

(远) 磁过滤离子束沉积等。这些技术的出现,形成了多功能离子束加工新技术,克服了离子注入的局限性,极大地发展了离子束技术使之成为其他技术无法取代的新型技术。

离子束增强多层膜和纳米组装工程

20 世纪 80 年代以后,多功能离子束加工新技术促进了多层膜和纳米薄膜组装技术的发展。

(员) 离子束多层膜沉积。控制多层膜制备应考虑的因素很多,要构筑特性优异的多层膜必须要考虑以下的重要因素:相的种类、晶粒尺寸、化学成分和薄膜厚度等。相的种类和晶粒尺寸对薄膜硬度起着重要的影响;通过调整化学成分可以增强薄膜结构的稳定性;晶粒尺寸和薄膜厚度的合理搭配可以得到多层膜良好的机械特性,可以控制微裂纹的传播和硬度的提高。由于离子束技术的发展对薄膜沉积采用了许多常规工艺无法实现的加工技术,从而增强了薄膜粘合特性、增加了薄膜的致密性、提高了薄膜硬度,合理的多层搭配可以得到更加优异的特性。

(圆) 多层纳米薄膜沉积。超高硬度多层纳米膜,一般硬度能超过 100 GPa,达到超硬膜水平。硬度增加的原因:纳米尺寸的多层膜由于单层厚度薄,界面多,晶界强化效应高,因此晶粒细化,晶界密度高,硬度增加;晶界对位错的反射效应增加了位错穿过界面的难度。金属多层纳米膜出现超高模量效应,因此韧性增强。离子束处理可增加纳米多层膜与基体的结合能力。由于磁过滤多弧束流强度高,与离子束技术结合,可以实现大批量工业化生产,因此,该技术是新一代的材料表面改性技术,必然会成为机械加工和与之相关产业绿色产业革命的重要技术支柱。

本书中我们将对上述离子束技术的特点和应用进行逐一的分析,并给出多功能离子束加工成功的应用示例,供读者参考。