

## 高功率脉冲离子注入金属表面改性\*

宋志敏 江兴流  
(兰州大学现代物理系 兰州 730000)

**摘要** 高功率脉冲离子注入是金属表面改性的一种新手段. 本文简要介绍了高功率脉冲离子束注入金属材料的过程和一些实验结果.

**关键词** 高功率脉冲离子束, 离子注入, 非晶合金.

### 1 引言

离子注入最先应用于半导体器件的生产. 近十几年来, 随着高科技的发展和对金属材料表面性能的更高要求, 人们将离子注入技术应用于金属材料的表面改性, 取得了很大进展.

离子注入按束流的形式可分为连续离子注入和脉冲离子注入. 由于连续离子注入技术已发展了三、四十年, 因此技术比较完善, 束流的各种参数都可以精确地测量并加以控制. 而且以前所进行的研究也主要集中于连续离子注入. 虽然脉冲离子注入技术刚发展不久, 但其在金属表面改性方面已经显示出了巨大的潜力和优点<sup>[1~2]</sup>. 因为连续离子注入机产生的离子束功率密度不高, 束流不强(最高约为 mA 量级), 所以在金属材料表面改性方面有着很大局限性. 例如, 在制备非晶态合金时, 用连续离子注入, 会受到临界剂量及“结构差异规则”等因素的限制<sup>[3]</sup>. 但是, 对于高功率脉冲离子束, 由于它所具有的高功率密度( $\sim 10^8$  w/cm<sup>2</sup>)及极短的脉冲作用时间(几十纳秒), 可以在金属样品中产生离子混合、骤热急冷(冷却速率高于  $10^9$  k/s)以及瞬态冲击压力波等多种作用, 因此很容易在注入区形成含有多种成份的非晶和微晶结构<sup>[2,4]</sup>.

### 2 高功率脉冲离子束与金属相互作用

高功率脉冲离子束与金属相互作用涉及热动力学、气体动力学及等离子体物理学多方

面的内容. 注入过程可分为三个阶段<sup>[1]</sup>:

1) 热作用阶段, 其作用时间对应于脉冲宽度. 在这个时间内离子束能量沉积于金属表面层, 作用深度等于离子在金属中的射程. 沉积的能量转变为金属材料的内能. 由于离子束的高功率密度, 注入区表面层的金属温度迅速升高, 并且熔化, 进而成为等离子体状态.

2) 气体动力学散射阶段. 由于等离子体从靶表面快速蒸发, 在靶中可形成一个压缩脉冲, 其作用于靶内部的压力为<sup>[5]</sup>:

$$P = I\nu/W_s$$

式中,  $\nu$  为表面蒸气流的速度,  $W_s$  为靶材料单位质量蒸发和得到加速度所需的能量.  $I$  为注入离子束的功率密度. 由此可见, 高功率脉冲离子束对靶的作用可分为靶材料表面层和靶材料较深层. 后者是由于压缩冲击波引起内部靶物质的密度瞬间升高, 而导致材料内部结构重建的结果.

3) 阶段是在脉冲作用结束后, 由于金属材料所具有的良好导热性, 可在熔化区产生高于  $10^9$  k/s 直至  $10^{12}$  k/s 的冷却速率, 而且在一定条件下, 冷却速率随脉冲离子能量的减小和束流功率密度的增大而增高. 由于这个急冷过程, 金属表面层可以形成非晶相或亚稳态<sup>[2]</sup>.

### 3 实验和观察

有多种方法可产生强脉冲离子束, 如: 真空二极管 (Vacuum Diode), 多纹二极管 (Streak

\* 国家自然科学基金资助课题

Diode) 等<sup>[1]</sup>. 这里重点介绍火花 (Pseudo-Spark) 脉冲离子源. 基于电场递增效应, 利用多极板放电室可得到高功率毫微秒脉冲的电子束和离子束<sup>[2]</sup>. 离子的产生是由于强电子束轰击阳极表面, 使阳极材料蒸发, 游离而生成的. 由于飞行时间聚束、二次电子、以及电荷剥离等过程, 这种离子束能达到很高的电流密度 ( $\sim 10^4 \text{A/cm}^2$ ). 我们利用这种脉冲离子束进行了下列一些金属改性方面的实验研究.

### 3.1 非晶层的形成

用 25keV 的  $\text{Ti}^+-\text{Ar}^+$  混合离子束注入纯镍 (99.99%) 样品, 用透射电子显微镜对注入区进行电子衍射观察, 可看到呈弥散晕圈状衍射现象, 这表明在注入区有非晶合金形成. 用 50keV 的  $\text{Ti}^+-\text{N}^+$  混合离子束注入碳钢, 观察到非晶合金的形成. 另外, 用扫描电镜观察注入区形貌时, 发现样品表面出现许多微裂纹<sup>[4]</sup>. 俄歇电子能谱分析表明, 注入区的组分与基体有很大差别, 因而物理化学性能也不大相同<sup>[6]</sup>. 微裂纹的形成说明, 注入区经历了熔化和急冷过程, 由于表层与基体的热学性能不相同而出现微裂纹, 与基体的珠光体组织不同, 注入区表层已为微晶和非晶层, 用硝酸酒精进行简单的腐蚀试验, 显示注入区的抗腐蚀性<sup>[4]</sup>比基体强得多. 对样品进行微硬度测量, 发现注入区的微硬度比基体有明显的增加. 这可归结为在注入区内, 钛和氮形成了化合物  $\text{TiN}$ , 因而增加了样品表面微硬度.

### 3.2 形成 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 高温合金

由于镍基铝合金有着优异的高温机械性能和抗氧化性能, 在高温机械中有广泛的应用前景, 我们进行了脉冲铝离子注入镍样品的实验. 利用能量为 50keV 的  $\text{Al}^+-\text{Ar}^+$  脉冲混合离子束对纯镍 (99.99%) 样品进行离子注入. 注入后, 对样品进行高分辨俄歇电子能谱和电子衍射观察分析. 结果表明, 注入区出现晶粒细

化的  $\text{Ni}_3\text{Al}$  多晶. 可见脉冲  $\text{Al}^+-\text{Ar}^+$  离子束注入纯镍可以得到表面  $\text{Ni}_3\text{Al}$  超合金<sup>[7]</sup>.

### 3.3 微合金球的形成

用  $\text{Ti}^+-\text{Ar}^+$  或  $\text{Al}^+-\text{Ar}^+$  混合脉冲离子束注入纯镍样品, 除观察到微晶和非晶结构外, 还发现在注入区存在许多直径为 30~300nm 的微合金球. 在  $\text{Al}^+-\text{Ar}^+$  离子束注入 Ni 样品后, 再用高功率脉冲电子束 (功率密度达  $10^9 \text{W/cm}^2$ , 脉冲宽度为 30ns) 轰击. 用扫描电镜观察, 发现在电子束轰击下, 基体熔化, 而微合金球仅局部熔化, 并且在熔体中滚动, 所到之处, 留下微合金球熔融部份的“径迹”. 由观察结果, 可推断出这些微合金球相对于周围的金属具有较高密度和较高的熔点, 与基体有强的附着力. 而且具有特殊结构<sup>[4]</sup>.

## 4. 结 论

高功率脉冲离子束注入在时间上为纳秒量级, 其空间结构为纳米量级, 它导致了金属非晶和微晶结构的形成, 并且在急冷过程中形成有特殊性能的微结构, 可以预期, 对高功率脉冲离子注入的深入研究, 将使我们对注入过程的液相反应及纳米微结构的形成和性质有较深入的了解, 从而在纳米科技和新材料设计方面发挥重要作用.

## 参 考 文 献

- 1 Pogrebnnyak A D. Phys. Stat. Sol., (a), 1990, 117: 17
- 2 江兴流等. 科学通报, 1987, 32(1): 25~27
- 3 王贻华, 胡正琼. 离子注入与分析基础, 北京: 航天工业出版社, 1992: 156~161
- 4 江兴流等. 科学通报, 1989, 34(7): 495~7
- 5 Halperin W P. Rev. of Modern Phys., 1986, 58: 533
- 6 Jiang X L, et al. IEEE, 1985, NS-32: 3341
- 7 江兴流等. 兰州大学学报(自然科学版), 1986, 22(4): 124

## Metal Surface Modification by High Power Pulsed Ion Beams

Song Zhimin Jiang Xingliu

(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract** The implantation by using high power pulsed ion beams is a new way of metal surface modification. The processes and some experimental results of the implantation by using high power pulsed ion beams into metal are presented.

**Key Words** high power pulsed ion beams, ion implantation, noncristalline alloy.

### 新书介绍——《介子科学的展望》

目前,物理、化学、工程及生命科学等领域都在使用不稳定粒子,如介子、 $\mu$ 介子。《介子科学的展望》一书用全面的观点论述了这种不稳定粒子的应用及前景。全书共有 27 篇特邀论文分别论述了  $\mu$ 介子和  $\mu$ 介子素( $\mu^+$ 介子与电子组合成的耦合系统)自旋旋转、 $\mu$ 介子超精细相互作用、 $\mu$ 介子催化聚变、医学诊断学、奇异原子、原子核中的介子以及介子的奇异衰变等等内容。

本书前十篇主要内容是:磁学、超导、类氢杂质扩散、介子素化学及停留在固体中的正  $\mu$ 介子的运用。还有两篇文章描述了  $\mu$ 介子催化聚变反应的进展。建议使用 14MeV 强中子源生产同位素,用慢负  $\mu$ 介子源开拓介子科学的新领域。还有 10 篇文章论述超核谱学及其它强子引起的核现象,涉及现代核物理及粒子物理的许多方面,包括介子产生及相对论重离子课题。另有三篇文章讨论了当负的带电强子或  $\mu$ 介子停留在凝聚物质中会发生什么的问题,主要涉及奇异原子、低能  $\mu$ 介子和强子物理。Nagamine 和 Ishida 所写的产生

先进  $\mu$ 介子束一文,题目新颖,全文充满了新观点,讨论了从物质表面在发射(已用此方法产生强正电子束)或常用在电子及反质子同步加速器上的束流冷却方法来产生超慢  $\mu$ 介子束。本书还补充了“介子工厂”内容,“介子工厂”一文是由 T. Ericsson, V. Hughes 和 D. Nagle 三人编写,新近由加利福尼亚大学出版,其内容主要介绍介子工厂的研究工作。

本书主要参考资料来源于 Brookhaven, CERN, Los Alamos 和 PSI(瑞士)所做工作,但所举例子主要是日本的 KEK 和温哥华的 TRIUMF 所提供的,这些工作都是在日本研究资助下完成的。

J. H. Brewer 在“低能介子科学”文章中指出“介子科学是二十世纪最引人注目的交叉科学遗产之一……”。读者阅读此书后,相信会很快同意这个观点。

(中国科学院近代物理研究所 蒋西虹供稿)

### 第七届理论物理前沿基础研讨会

本刊讯 第七届理论物理前沿基础研讨会由中国高能物理学会福建会员组、福建省物理学会、福州大学和厦门大学等单位联合举办,于 1993 年 9 月 19~25 日在福州大学召开。来自全国各地的 63 位代表出席了会议,其中有刚从美国和德国回国的学者,有边远地区的学者和少数民族的学者。大会收到论文 84 篇,在大会和分组会上宣读 34 篇,14 位专家到会作了精彩的不同学科的专题报告。报告的内容涉及面

很广,有场论、数学、规范理论、基本粒子、核物理、分形理论、凝聚态物理等学科在理论和实验中的最新进展及各位学者的研究成果。从整体上看,论文的水平比前几届有较大提高,这显示了理论物理届水平的提高和队伍的壮大。所有提交的报告已装订成集。

大会建议请中国科技大学、安徽大学于 1994 年举办第八届研讨会,并增补阎沐霖、孙增灼为理事。