

'94 秋季中国材料研讨会 Ⅲ

# 新型材料及表面技术

中国材料研究学会

C-MRS

2

化学工业出版社

'94 秋季中国材料研讨会会议论文集

'94 C-MRS Materials Conference Proceedings

# 第 III 卷

# 新型材料及表面技术

Vol. III Advanced Materials and  
Surface Techniques

第二分册 束流表面改进、材料的腐蚀与防护

柳襄怀 张荟星 柯 伟

中国材料研究学会 (C-MRS) 编

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字039号

**图书在版编目(CIP)数据**

新型材料及表面技术: 94'中国材料研讨会论文集/中国材料研究学会组织编写. -北京: 化学工业出版社, 1995.9

ISBN 7-5025-1512-7

I. 新… II. 中… III. ①工程材料, 新型-材料科学-学术会议-文集②工程材料, 新型-表面精整-学术会议-文集  
IV. ①TB39-53②TG178-53

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第09244号

---

出版发行: 化学工业出版社(北京市朝阳区惠新里3号)

社长: 棒培宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所

印 刷: 有色金属研究总院印刷厂

装 订: 有色金属研究总院印刷厂

版 次: 1995年6月第1版

印 次: 1995年6月第1次印刷

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 34

字 数: 870千字

印 数: 1-600

定 价: 195元

(1分册60元; 2分册65元; 3分册70元)

# '94 秋季中国材料研讨会论文集 编辑委员会

顾问：师昌绪 严东生

主任：李恒德

副主任：韩雅芳 吴伯群

委员：（按姓氏笔划排列）

马莒生	甘子剑	刘伯操	刘家浚	李诗卓
朱鹤孙	阮雪榆	邹广田	吴人洁	吴伯群
周廉	周本濂	陆盘金	姚熹	姜德生
张兴栋	张允什	张传厉	张荟星	张少卿
张锐生	俞耀庭	侯静泳	柳襄怀	闻立时
胡壮麒	胡黎明	柯伟	钟家湘	袁润章
徐僖	徐懋	海锦涛	章靖国	屠海令
韩雅芳	熊炳昆			

统编人员：侯静泳 韩雅芳  
责任编辑：徐蔓 夏叶清 管德存

# 前 言

本书是中国材料研究学会 (C-MRS) 组织编写的《'94秋季中国材料研讨会会议论文集》之一。“'94秋季中国材料研究会”于1994年11月至15日在北京召开。这是我国材料界最盛大的一次跨学科的学术交流会,参加会议的有来自国内102所高等院校、75个科研院所、15个工矿企业及有关领导机关的材料科学家、企业家共1000余人。中国科协主席、中国工程院院长朱光亚到会作了重要讲话,我国材料界的著名科学家师昌绪、严东生、林兰英、钱人元、葛庭燧等应邀在大会上作了学术报告。日本、韩国、美国、法国、英国、澳大利亚等国家的材料科学家也应邀出席了大会并作了学术报告。会议共收到论文1500余篇,除26位在大会上作综合性报告外,另分23个分会进行了学术交流。23个分会分别为:

1. 智能(机敏)材料
2. 梯度材料
3. 新型工程塑料
4. 超导(高、低 $T_c$ )材料
5. 生物医用材料
6. 超硬材料
7. 薄膜材料与薄膜技术
8. 储氢材料
9. 非晶态、急冷与快速凝固材料
10. 新型轻金属材料
11. 富勒烯球( $C_{60}$ 等)
12. 束流表面改性
13. 超塑性及超塑成形
14. 喷射成形(工艺)技术
15. 反应加工新技术
16. 摩擦学材料
17. 材料的腐蚀与防护
18. 异材连接与封装技术
19. 稀土元素在材料中的应用
20. 计算机在材料研究与工程中的应用
21. 材料研究新技术
22. 超细材料与技术
23. 材料科学前沿

本次大会的论文涉及面广,学术水平较高,反映了在上述领域内我国材料研究的最新成就。所有论文均按照规定的评审程序和正式的出版要求进行了审查,最终收集在本论文集内的论文共1012篇,分四卷,10分册。

第一卷为新型功能材料(含三个分册);第二卷为低维材料(含二个分册);第三卷为新型材料与表面技术(含三个分册);第四卷为材料加工和研究新技术(含二个分册)。

本书对从事材料开发和研究的科学家、工程技术人员、大专院校师生以及有关领导机关的人员均有重要的参考价值。

全书四卷论文集,作者几千人,汇编成书正式出版尚属首次,缺乏经验,且成书时间甚为紧迫,诸多作者联系不便,不足之处在所难免,祈请各界同仁鉴谅并予以指正。考虑到材料科学和应用技术发展日新月异,拟在日后每召开一次研讨会,即将会议交流论文汇集成册,正式出版,此举还望材料界有关人士予以大力支持。

责任编辑：徐 蔓 夏叶清 管德存

《新型材料及表面技术》卷包含的内容主要有：新型轻金属材料、稀土元素在材料中的应用、金属材料的表面改性、材料的腐蚀与防护、超硬材料与摩擦学材料。其中讨论了铝、钛及其复合材料的新工艺、新技术；稀土在钢铁和有色金属中的应用；束流表面改性的范围，包括离子束、等离子体和激光束材料的表面改性；材料的高温腐蚀与防护、环境和力学因素共同作用下的破坏机理；超硬材料、摩擦学材料的制备技术及其特性等。

### 第 I 卷 新型功能材料

- 第一分册 智能(机敏)、梯度和储氢材料
- 第二分册 新型工程塑料及生物医用材料
- 第三分册 超导材料及富勒烯球

### 第 II 卷 低维材料

- 第一分册 薄膜材料与薄膜技术
- 第二分册 非晶态、快凝材料与超细材料及其技术

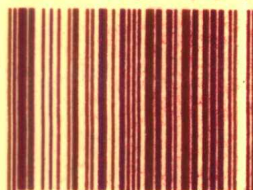
### 第 III 卷 新型材料及表面技术

- 第一分册 新型轻金属材料及稀土元素的应用
- 第二分册 金属材料的表面改性及腐蚀、防护
- 第三分册 超硬材料与摩擦学材料

### 第 IV 卷 材料加工和研究新技术

- 第一分册 超塑成形、反应合成与加工及异材连接
- 第二分册 材料研究新技术及材料科学前沿

ISBN 7-5025-1512-7



9 787502 515126 >

ISBN7-5025-1512-7/Z · 55

定价：195 元

(1 分册 60 元；2 分册 65 元；3 分册 70 元)

TB39-5  
5649  
:3(2)

版  
社

# 目 录

## 束流表面改进

### 同步复合离子注入及其Monte-Carlo模拟

-----李国卿 宫泽祥 张 涛 马滕才 柳襄怀	(1)
强流金属离子束的形成及应用前景-----张荟星 张孝吉 李 强	(6)
铟注入铝, 铁注入银样品的微结构观察-----姬成周 王怡德 宁小光 叶恒强	(12)
离子注入改善航空用金基电接触材料应用性能的研究 -----何安莉 屠明晖 周祖尧 郑志宏	(18)
砷离子对电机护环钢SCC的抑制作用 -----新九成 吴翠兰 钟庆东 王志刚 新 浩 谢 中 史维东	(24)
硬铝材料的离子束强化及其机理-----张 颖 胡正琼 王贻华	(29)
表层规则点状硬化作用对薄钢板拉伸性能的影响研究---沈 还 陈光南 李国琛	(34)
强束流金属离子注入轴承钢的表面改性研究 -----袁晓珉 林文廉 桑吉梅 丁晓纪 徐 骏	(40)
W9Mo3Cr4V高速钢Ti+C双离子注入表面改性的研究 -----徐 骏 桑吉梅 袁晓珉 林文廉 丁晓纪	(46)
Mo离子注入前后碳钢接触疲劳寿命和失效表面形貌特征的研究 -----杨德华 薛群基 张绪寿	(51)
Ti、W和Mo离子注入钢弥散强化最佳效果的研究-----张通和 陈 俊 孙贵如	(56)
轰击参数与Ti、TiN薄膜微观结构及性能的关系-----黄丽娟 李文治	(60)
Ti离子注入氮化硅的界面特性研究 -----常 军 叶小燕 张济忠 陶 琨 张孝吉 林耀军 张荟星	(65)
离子束辅助沉积薄膜与基片界面的高分辨电镜观察 -----陶 琨 何向军 江 海 范毓殿 李恒德	(70)
双能氮分子离子注入在钢上形成AlN层的研究 -----薛建明 赵渭江 秦祖电 王宇钢 颜 莎	(75)
离子束增强沉积Ti/B薄膜的结构和性能研究---杨晓豫 周平南 顾剑锋 蔡 询	(79)
单源低能离子束辅助沉积类金刚石薄膜应力及结合力研究 -----朱 宏 柳襄怀 任琮欣 陈国梁 汤丽娟 邹世昌	(86)
1.5MeV Kr离子辐照Au-Cu双层薄膜中的扩散诱导晶界迁移 -----高愈草 D.E.Alexander L.E.Rehn	(91)
离子束技术制备氧化锆薄膜-----黄宁康	(93)
离子束电子束原子束结合沉积技术及其材料表面改性应用研究-----黄宁康	(98)
离子束溅射制备乙醇气敏膜 -----陈 敏 张通和 王 柯 魏 兵 胡兴定 张文朴	(102)
离子束增强离子镀膜的研究-----陈 俊 张通和 魏 兵 王 柯	(107)
铝与氮化物界面的离子束混合--孙建三 刘 玲 戚震中 W.Bolse A.Traverse	(111)
离子轰击模拟中子辐照对锆合金性能的影响---文献综述 -----白新德 王社管 马春来 何敬皓 陈文莉 范毓殿 陈鹤鸣	(115)
高能量密度等离子体薄膜制备和材料表面改性研究 -----杨思泽 阎鹏勋 鲁 伟 李 兵 刘赤子 任育峰 杨 杰	(120)



轧辊表面脉冲激光点状加工的强化作用研究	-----陈光南 沈 还 孙传香 纪 全 刘东玉	(126)
钛中氢与氮相互作用对气体释放的影响	-----王佩璇 苟成玲 王 宇 方正知	(132)
准分子激光对陶瓷材料表面改性研究	-----张喜民 李恒德 文效忠 余大民 刘伟成	(139)
He <sup>+</sup> 离子辐照前后C-SiC薄膜的微观分析	-----张海龙 夏兴源 汪德志 黄宁康	(145)
双层辉光离子渗金属技术的发展及工业应用前景	-----徐 重 高 原 古凤英 潘俊德 范本惠 郑维能 贺志勇 王从曾 苏永安	(150)
加弧辉光离子表面合金化的研究	-----潘俊德 范本惠 徐 重 贺 琦 李成明 郑维能 韩晋宏	(156)
冷冲模等离子弧表面硬化处理的研究	-----李树河 沈式希 文 予 王红飞 黎富松	(162)
激光作用下金属熔池表面的凝固特征	-----丁培道 刘江龙 石功奇	(166)
在不同温度条件下离子注入InGaAsP化合物半导体形成高阻层的研究	-----赵 杰	(171)
PSII-EX型全方位离子注入装置	-----陈开芹 尚振魁 耿 漫 蒲 薇	
-----邢大中 李家全 曾旭初 王惠三 童洪辉 邵益光 冯铁民 姜元琦		
-----钟光武 陈纳新 沈丽如 陈元儒 王均石 黄 楠 柳襄怀 杨根庆		(175)
<sup>57</sup> Fe注入氧化锆陶瓷的背散射,光电子能谱和喇曼光谱研究	-----王国梅 江 冰 恽怀顺 李兴丹 吴代华 杨生荣	(181)
镍离子注入氧化锆陶瓷的表面电性能和结构	-----恽怀顺 王国梅 江 冰 李兴丹 吴代华 杨生荣	(187)
材料表面改性用电子束蒸发强流金属离子源(EBE)	-----冯毓材 李晓谦 杨松涛 曹 炜	(193)
离子注入高分子膜结构变化的红外光谱分析	-----王宇钢 赵渭江 陈韶林 金长文 颜 莎	(199)
束流强度对Y注入Si生成硅化物及其氧化行为影响	-----孙贵如 孙丽红 张通和 陈 骏 魏富忠	(204)
纳秒激光脉冲粒子束与材料改性研究	-----江兴流 韩丽君 宋志敏	(209)
C <sup>-</sup> 、N <sup>+</sup> 离子注入单晶钽的研究	-----王学军 王维洁 史 绩 王天民 寇昕莉	(214)
低能离子注入对掺碘聚醚砜的电导特性的影响	-----吴洪才 岳喜成 梁 猛	(219)
Co离子注入硅合成硅化钴特性的研究	-----钱卫东 张通和 陈 俊 梁 宏 孙贵如	(225)
用强流金属离子源形成FeSi <sub>2</sub>	-----朱德华 陈益钢 柳百新 孙贵如	(230)
离子轰击对硒化锌光学薄膜性能的影响	-----罗崇泰 熊玉卿 刘定权 黄良甫 李强勇	(234)
碳氮薄膜的制备及结构与性能	-----李文治 崔福斋 贺小明 宋红卫 李恒德	(238)
在铁基基材上激光化学气相沉积TiN类膜层研究	-----冯钟潮 曹立新 张炳春 侯万良 冯 钧 王亚庆	(244)
<b>材料的腐蚀与防护</b>		
碳钢表面钛酸酯和PVC复合修饰膜的耐蚀性研究	-----宋诗哲 王 维	(249)



环境断裂动力学及寿命控制-----	韩恩厚	柯伟	(259)
F28不锈钢在硫酸中的钝化	-----	-----	-----
-----	韩文安	柯伟 姚治铭 邹锋 韩薇 张顺南 张炳大	(266)
NaCl溶液中Z205与316L钢钝化膜稳定性的研究-----	唐子龙	宋诗哲	康翠荣 (272)
SAE2205不锈钢在尿素介质中钝化膜研究	-----	-----	-----
-----	任晓善	胡锡章 陈晓军 韩文安 邹锋 韩薇	(281)
显微组织对高铬白口铸铁耐冲刷腐蚀性的影响	-----	-----	-----
-----	何莉	郑玉贵 姚治铭 魏翔云 柯伟	(285)
碳钢在流动中性水溶液中腐蚀机理的研究-----	林玉珍	徐瑞芬 田震宇 雍兴跃	(291)
由井注汽介质中直焊缝套管腐蚀行为和机理研究	-----	-----	-----
-----	郑玉贵	姚治铭 李生春 何莉 柯伟	(296)
用丝束电极研究防锈油膜下的金属腐蚀-----	钟庆东	吴翠兰 靳九成	(302)
A537钢在3.5%NaCl溶液中应变电极的研究-----	王俭秋	李劲 郑宇礼 柯伟	(308)
N <sub>2</sub> 混合增强Al/Fe体系的耐蚀性能研究	-----	-----	-----
-----	赵渭江	薛建明 王宇钢 秦祖电 颜莎	(314)
铂的高温防护涂层-----	-----	-----	-----
-----	甘株	王俊升	(318)
金属高温硫化研究进展-----	齐慧滨	刘海平 何业东 朱日彰	(322)
精铸、定向凝固和单晶高温合金的热腐蚀	-----	-----	-----
-----	管恒荣	孙晓峰 金涛 唐亚俊 胡壮麒	(328)
抗高温氧化微晶涂层-----	王福会	楼翰一 吴维	(333)
Ni基合金高温氯化反应动力学-----	涂江平	李志章 毛志远	(338)
Ni-La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 共沉积层的氧化机制研究	-----	-----	-----
-----	彭晓	于瀛大 马信清 李美栓 李铁藩	(342)
弥散氧化物影响高温氧化膜初期生长的扩散研究	-----	-----	-----
-----	马信清	彭晓 陈全芳 李美栓 李铁藩	(347)
Si-Cr-Ti涂层及其激光重熔处理对C-103Nb合金高温氧化性能影响	-----	-----	-----
-----	白新德	侯卫红 尤引娟 唐西南 周昌炽 翟金坤	(353)
金属-塑料复合膜防腐技术研究-----	-----	-----	-----
-----	马世宁	时小军	(359)
航空叶片根部阻尼面激光熔敷强化	-----	-----	-----
-----	王茂才	龙康 白林洋 陈江 吴维 段绪海 魏政	(363)
-----	郭殿品	李军 刘秋生 朱铭福 黄庆南 赵光电	
光亮剂促进镍改善电镀锌层耐蚀性的研究-----	何建平	陈网桦 李士嘉	(369)
油田管道和贮罐的涂层防护性能及分形研究	-----	-----	-----
-----	夏熙	张校刚 木合塔尔 李勇 文中新	(371)
陶瓷-金属梯度涂层抗液态析铁高温侵蚀行为研究---	陈华	韩志海 何家文	(377)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 陶瓷表面腐蚀层的组成及显微结构研究--	于政波	李文宏 张光明 李凝芳	(383)
Nd-Fe-B表面镀的新技术——静电粉末喷涂新工艺-----	肖寅昕	靳兰芬	(388)
陶瓷涂层耐强酸腐蚀性的研究-----	阎殿然	何继宁 武建军 邱万奇	(394)
材料腐蚀科学中腐蚀预测的方法及其应用-----	-----	-----	-----
-----	翁永基	李相怡	(399)
腐蚀专题文摘库设计-----	李长荣	屈祖玉 王光雍 熊申海	(405)
不锈钢着色工艺研究——影响不锈钢着色过程的一些因素-----	刘萍	上官永恒	(411)
不锈钢空蚀磨蚀的形貌特征与机制-----	王忠义	徐辉 靳九成	(417)

水冷堆中锆合金的辐照腐蚀

- 白新德 何敬皓 马春来 王社管 陈文莉 范毓殿 陈鹤鸣 (422)
- 核电站结构材料800合金和690合金应力腐蚀破裂研究---刘兴华 张伟国 谢惠佑 (428)
- 氧势对快堆用不锈钢包壳管腐蚀行为的影响-----许咏丽 李军刚 王家英 (435)
- 钴基高温合金疲劳裂纹的修复
- 肖永亮 郭义 周本谦 何治经 廉丕芬 吴庆 姚戈 (441)
- 高温抗氧化合金OR2的组织结构和性能及其在高温工业中的应用
- 李殿国 刘万生 卢亚轩 周波 (445)
- 30CrMnSiNi2A钢表面Cr和Si扩散涂层的抗蚀性-----万修如 R.A.Rapp (451)
- 渗碳层改善TiAl基合金抗高温氧化性的影响
- 黄伯云 曲选辉 贺跃辉 孔高宁 雷长明 (457)
- Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜对Fe<sub>3</sub>Al合金高温氧化的影响-----王永刚 何业东 齐慧滨 朱日彰 (463)
- Ti<sub>3</sub>Al合金高温抗氧化性研究-----邱国华 张澜庭 吴建生 (467)
- 耐1300℃新型变形镍—铁—铬—铝基高温合金性能研究
- 黄进峰 张前发 万红 付小容 邓世平 (470)
- 有序态Fe<sub>3</sub>Al金属间化合物的氧化行为-----刘茂森 涂江平 (476)
- 连多硫酸应力腐蚀开裂机理研究
- 韩顺昌 王彬 王红锋 李德勤 杨之勇 汪秀兰 (480)
- 溶解促进位错发射、运动从而导致黄铜应力腐蚀的TEM原位观察
- 谷 飙 张静武 褚武扬 万发荣 (486)
- 30CrMnSiNi2A超高强度钢应力腐蚀裂纹扩展实时监测
- 余拱信 漆新民 周鞠宁 王广坤 (494)
- 低合金高强钢在动态盐水溶液中的腐蚀疲劳---马常祥 李强 史振宇 周桂芝 (499)
- 热镀锌高强度钢的疲劳性能-----隋玉成 余百年 赵明 (504)
- 激光涂覆处理对22Cr-13Ni-5Mn奥氏体不锈钢抗氢脆性能的影响研究-----谭云 潘清跃 丰杰 周顺期 王彤 李光东 (508)
- 活化与钝化体系力学电化学行为的比较研究---王俭秋 李劲 郑宇礼 柯伟 (512)
- 核电钢A508的腐蚀疲劳研究-----王正 贺菁 任晨星 (517)
- 工程材料在高温水中的环境促进开裂-----杨武 (523)
- 疲劳随机载荷处理中的三参数雨流计数法-----陈进伟 韩恩厚 郑宇礼 柯伟 (528)

# 同步复合离子注入及其 Monte—Carlo 模拟

李国卿 宫泽祥 张 涛 马滕才

(大连理工大学三束实验室 116023)

柳襄怀

(中国科学院上海冶金研究所)

**摘 要** 在纯 Fe 基体上进行 Ti+C, Ti+N, Mo+S 同步离子注入。用 AES, TEM, EDS 等方法对注入层进行分析, 并采用 Monte—Carlo 方法对同步复合离子注入过程进行模拟。结果表明, 同步复合离子注入表面层注入元素的分布有利于多元素间相互增益作用的发挥。

**关键词** 离子注入 表面改性 蒙特—卡罗模拟

## 引 言

离子注入具有良好的材料表面改性效果。在大多数应用场合, 多元素复合注入改性效果要优于单一元素注入改性效果, 这种现象与不同注入元素之间的相互作用有关。但在多元素大剂量复合注入条件下, 先后注入元素的空间分布发生错位。这与溅射作用及靶化学和物理因素的变化有关<sup>[1]</sup>。注入剂量越大, 这种错位就越明显。在注入元素分布出现错位的情况下, 各种元素的相互增益作用不能充分发挥, 多元注入的改性效果受到削弱。针对上述问题, 我们在离子注入材料表面强化、耐蚀及改善摩擦性能的应用中, 尝试同步复合离子注入技术, 产生了明显的效果<sup>[2,3,4]</sup>。为了探讨这种改性效果的机理, 本文以纯铁为基材, 对不同方法离子注入的表面层进行分析, 并建立同步复合离子注入过程的 Monte—Carlo 模拟程序。

## 实验方法

在 MEVVA 和 TITAN 离子注入机上进行离子注入和同步复合离子注入。Ti+C 及 Mo+S 同步离子注入采用组合阴极方法, Ti+N 同步离子注入采用气固源同注方法。为了便于分析比较, 基材皆采用纯铁。用 100CX—II 型透射电镜进行注入层 TEM 分析, 用 EDS 分析相成份, 用 SLA100 表面分析系统分析注入层成份。8×8×2mm<sup>3</sup> 纯 Fe 试片经打磨、抛光成镜面。离子注入完成后, 将试样从背磨薄, 然后制成透射电镜样品。

## 实验结果及讨论

### 3.1 Ti+C 同步离子注入

对试样进行  $40\text{kV}$ 、 $1.5 \times 10^{17}\text{ions/cm}^2$  的 Ti+C 同步离子注入和同样加速电压、注入剂量的 Ti、C 离子先后注入。分析结果表明,前一注入方法的试样注入层中有含 Ti 的  $\text{Fe}_5\text{C}_2$  相,图 1 是 TEM 分析结果,图 2 是对应相的 EDS 分析结果。而后一注入方法的试样注入层中没

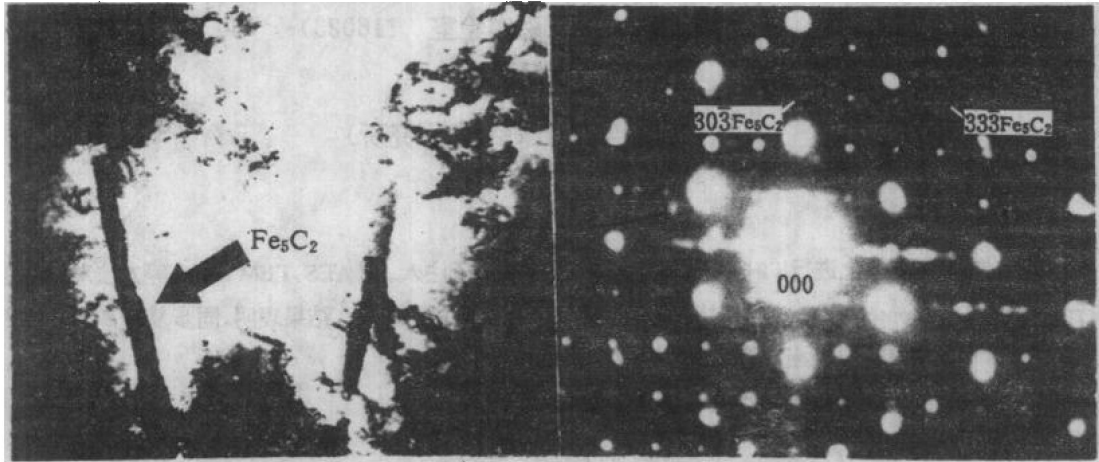


图 1 Ti+C 同步注入纯 Fe 注入层条状  $\text{Fe}_5\text{C}_2$  TEM 分析结果

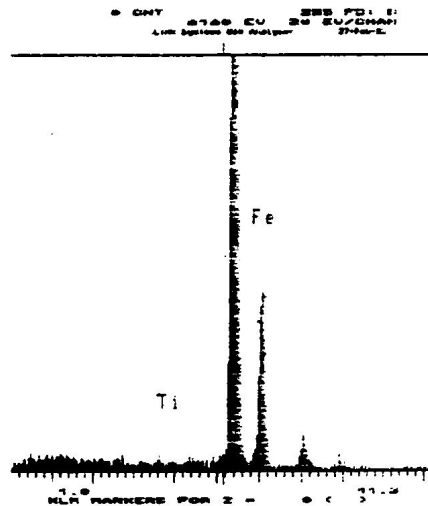


图 2 图 1 条状析出相对应点的 EDS 分析结果

有发现 Ti 与 C 组成的相。这说明同步复合注入过程中 Ti 与 C 之间的作用较强。

### 3.2 Mo+S 及 Ti+N 同步离子注入

Mo+S 同步离子注入的样品注入层 S、Mo 分布重合较好,如图 3。样品随后进行不同剂量的 Mo 离子注入,其注入层 AES 分析结果见图 4、图 5。可见 Mo 离子注入剂量越大,S、Mo

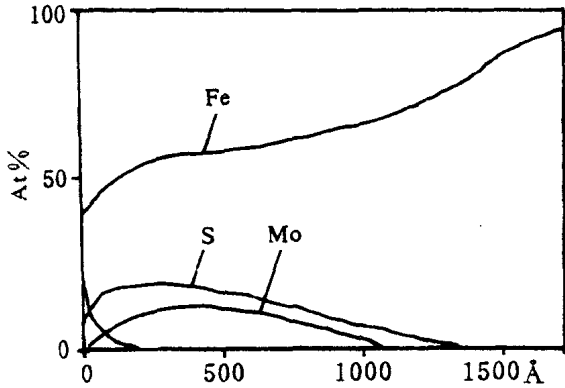


图 3 40KV、 $8 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> Mo+S 同步注入纯铁俄歇谱

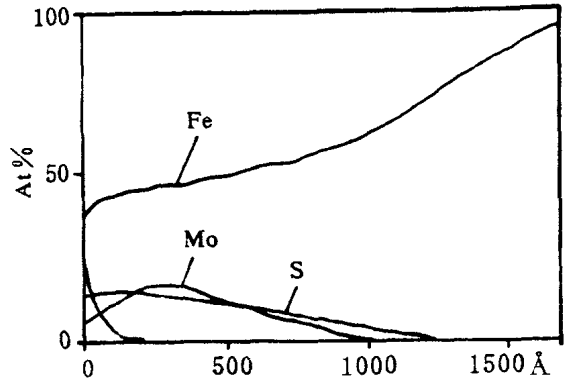


图 4 图 3 样品继续 40KV、 $10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> Mo 注入俄歇谱

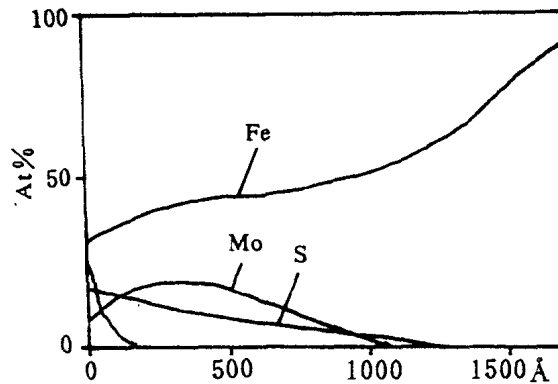


图 5 图 3 样品继续 40KV、 $2 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> Mo 注入俄歇谱

分布的错位程度越大。Mo 原子质量较大,Mo<sup>+</sup>离子注入能造成较强的溅射作用,在大剂量 Mo<sup>+</sup>离子注入时,靶表面层很快被逐层溅射,造果使得内层暴露出来。当然除溅射作用外其他因素也可能起作用,在这里根据 S 的分布变化情况来看,成分分布变化的主要因素是溅射,从图 4、图 5 上 S 分布的变化可以大致判断出溅射的厚度。

N 注入和 Ti+N 同步注入试样注入层 AES 分析结果见图 6、图 7。比较图 6、图 7 可以看出 N 的分布有两点主要差异:①Ti+N 同步注入样品近表面层 N 浓度较高;②Ti+N 同步注入样品 N 的最可几射程减小。TITAN 离子注入机离子源由气体引发金属弧,由于 Ti、N 间强的化学作用,推断 Ti 粒子和 N 粒子相互作用形成 Ti、N 组成的离子团<sup>[5]</sup>。这种离子团在加速过程中,由于其质量大于 N<sub>2</sub><sup>+</sup>质量,其速度低于 N<sub>2</sub><sup>+</sup>速度,结果造成样品近表面层

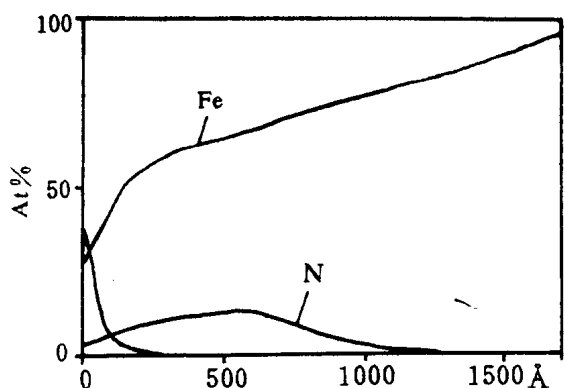


图6 50KV、 $8 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> N注入纯铁俄歇谱

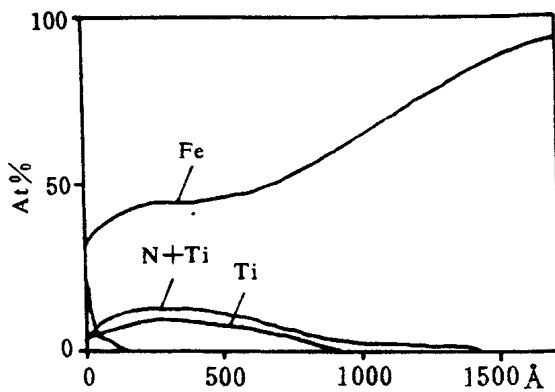


图7 50KV、 $1 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> Ti+N同步注入纯铁俄歇谱

N浓度升高。

### Ti+N 同步注入纯铁 Monte-Carlo 模拟

根据 Ti、N 离子团模型,参考 TRIM 程序和文献[6,7]建立 Ti+N 同步注入纯 Fe 的计算机模拟程序。Ti、N 注入剂量由剂量仪分别测得。根据[8,9]N 离子束流中  $N_2^+$  与  $N^+$  数量比例为 1:5, Ti 离子束流中  $Ti^+$ :  $Ti^{2+}$ :  $Ti^{3+}$  = 3:80:17。( $TiN$ )<sup>+</sup> 占总荷电粒子的百分数分别取为 5%、10%、12%、15%。注入粒子和基底由离子组成,考虑溅射过程。电子阻止、核阻止、位移阈能、溅射阈能、终止能等参数均取自文献[6,7,10],程序框图见图 8。

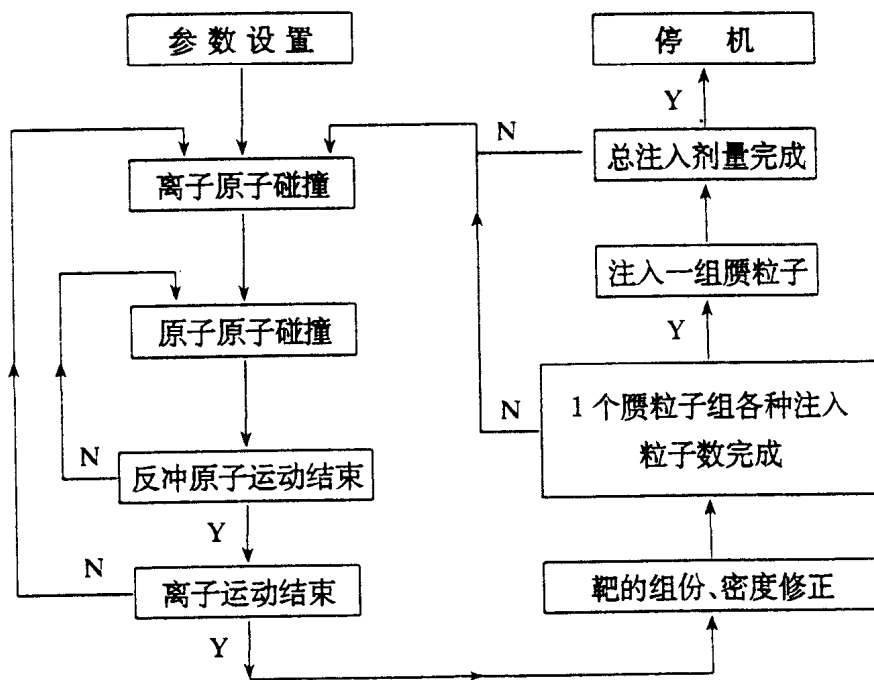


图8 计算程序框图

当( $TiN$ )<sup>+</sup>粒子占总注入粒子的 10%时,计算结果与 AES 分析结果符合较好,如图 9。从以

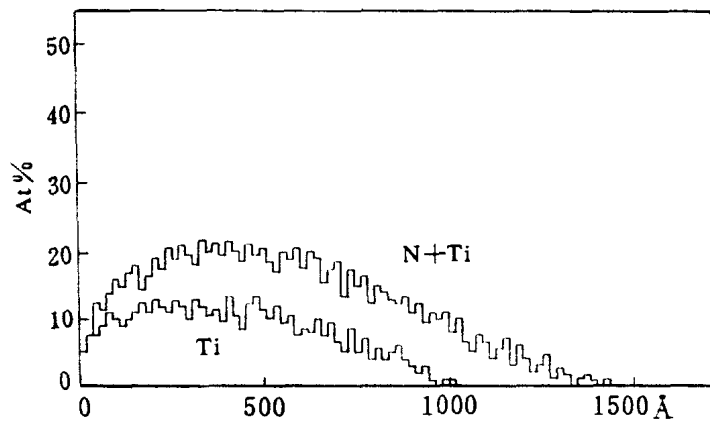


图9 (TiN)<sup>+</sup>含量为10%时成分计算结果

上分析可以看出,金属离子与气体离子同步注入其离子流成分复杂,而计算机模拟似乎提供了一种注入束流能量分布的分析手段。

## 结 论

1. 同步复合离子注入过程不同离子间作用较强,易于形成化合。
2. 同步复合离子注入的元素在靶中的分布错位小,这有利于不同元素间增益作用的发挥。
3. Monte—Carlo 模拟计算可以给出符合实际的注入层成分分布,为分析离子束流中粒子能量分布提供了手段。

## 参 考 文 献

- 1 王广厚,粒子同固体相互作用物理学,科学出版社,1991,P608
- 2 李国卿等,先进材料进展,1993. 2, 87~90
- 3 李国卿等,真空,1993. 6, 15~18
- 4 李国卿等,微细加工技术,1993. 3, 28~32
- 5 陈宝清,离子镀及溅射技术,国防工业出版社,1990, P134
- 6 周建坤等,半导体学报,Vol. 10(1989),7,519~524
- 7 崔福高等,清华大学学报,1988,3,68~73
- 8 I. G. Brown, J. Appl. Phys., Vol. 63, No. 10, 4898
- 9 张涛等,微细加工技术,已录用
- 10 J. P. Biersack, Nucl. Instrum. and Meth. 174(1980)257~269



# 强流金属离子束的形成及应用前景

张荟星 张孝吉 李强

(北京师范大学低能核物理所射线束材料工程开放实验室 100875)

**摘要** 很多离子源都能产生金属离子束,但是要获得工作寿命长,稳定可靠的强流金属离子束却不很容易。由于离子束材料表面改性技术发展的需要,近几年来强流金属离子源得到了较快的发展,以脉冲形式工作的金属蒸汽真空弧离子源(MEVVA源)就是其中的一种。本文介绍的IIB型MEVVA离子源具有引出电流大、离子种类多、束流纯度高、束斑直径大等特点,是从事金属离子注入材料表面改性较为理想的金属离子源。金属离子注入对提高材料表面抗磨损、抗腐蚀、抗高温氧化等性能具有明显的效果,从而提高材料使用寿命。但是由于离子注入的一些弱点,至今未能得到广泛的工业应用。进一步发展新一代的大型金属离子注入设备,预期注入成本会减到工业界能接受的程度。

**关键词** 金属离子束 MEVVA源 材料表面改性

## 1 引 言

离子注入技术的发展已有近30年的历史。我国是从60年代中后期起步的,最初开展半导体离子注入设备及注入工艺研究,并已取得很大成绩,在半导体工业中得到广泛的推广应用,大大促进了微电子技术的发展。70年代末,我国开始从事非半导体离子注入材料表面改性技术的研究,国内不少单位研制了一批氮离子注入设备,取得了一批有很高水平的研究成果。由于多数设备规模较小,注入成本较高,加上一些其他因素,一直未能得到广泛的工业应用,仍停留在实验室研究和少量的或个别特殊的应用上。这几年来,工业应用的研究正在加速发展。在发展和研究氮离子注入材料表面改性的同时,国内外也正在发展和研究金属离子注入材料改性技术。由于金属离子束的形成(特别是强流金属离子束)比氮离子束要困难得多。因此,一直到80年代末,强流金属离子注入材料表面改性技术才得到较快的发展。这是由于这一时期研制成功一些实用的强流金属离子源,例如各种型号的CHORDIS离子源<sup>(1)</sup>、PIG离子源<sup>(2)</sup>、高温Nissin离子源<sup>(3)</sup>

高频重离子源<sup>(4)</sup>以及MEVVA离子源<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup>等。特别是MEVVA离子源的研制成功,大大的促进了强流金属离子注入材料表面改性技术的发展。本文将介绍北师大低能核物理所MEVVA源的研制情况。迄今为止氮离子注入和金属离子注入在材料改性中的应用,特别是在工业中的应用前景一直还受到人们的怀疑,这是由于离子注入技术存在着一些明显的缺点,最主要的是:(1)注入层较浅;(2)注入的工件受注入离子直射性限制;(3)受在真空中处理工件的限制;(4)目前的注入设备规模小,处理工件的成本较高;(5)加上其他各种表面处理技术发展较快,竞争激烈。上述(1)·(2)两条是受技术本身限制,可以选择合适的零部件进行处理,例如选择只处理平面或外缘部件等。对于某些零部件也可以提高注入温度,通过热扩散增加注入改性层的厚度来解决。后几条缺点主要在于注入成本,可以通过研制大型工业注入设备,扩大注入批量来解决降低注入成本的问题。生产MEVVA源注入机的美国ISM技术公司正在研制大型工业设备。他们的目标是把目前的注入运行费用从1~10美元/cm<sup>2</sup>降到0.1美元/cm<sup>2</sup>以下。

## 2 强流金属离子束的形成

大多数的常规离子源可以产生气体离子束，或少量的弱流金属离子束（束流强度为微安量级）。有一些离子源经过改进后，能产生某些种类较强的金属离子束。由于多数离子源中产生离子的放电室中，直接送入气体或气态的氯化物、氟化物或固体被加热蒸发后的蒸汽。对于高熔点的金属，很难以蒸汽的状态送入放电室。因此，在常规的离子源中，很难获得稳定的工作寿命较长的强流金属离子束，特别是很难获得难熔金属离子束。

1985年美国加州大学罗仑兹伯克利实验室的I. Brown博士采用真空弧放电的原理，首先研制成功一种新型的强流金属离子源—金属蒸汽真空弧离子源，也称MEVVA离子源<sup>(7)</sup>。该源有许多突出的优点，主要有：(1)几乎能产生周期表中所有种类的金属离子束，以及某些化合物（导电且能做电极）离子束；(2)能产生很大的束流强度；(3)离子束中高电荷态的离子比例大，因此在相同的引出电压下，可以获得更高的离子能量。(4)离子束纯度高。由于该源工作时，不需要辅助气体，束流的纯度主要取决于阴极材料的纯度，而纯度为98%以上的材料是很容易获得的。由于束流纯度高可以省去复杂且贵重的磁铁分析系统；(5)可以采用大面积引出系统，不用扫描就可获得较大的离子束束斑。(6)结构简单，工作稳定可靠。由于上述特点，很适合用于离子注入材料表面改性技术。为此我们于1988年末在国家科委“863”计划资助下，开始研制为束流表面改性用的MEVVA离子源。到目前为止，已经研制成功I型、II型、III型、II-A型、IIA-H型和IIB型MEVVA离子源，有关该源的基本工作原理、基本结构、工作参数和特色，可参考文献(6)(8)(9)等。现把IIB型源的情况介绍如下：MEVVA IIB离子源是正在研究和发展的一种源型，该源的结构见图1。图2为IIB源的照片。

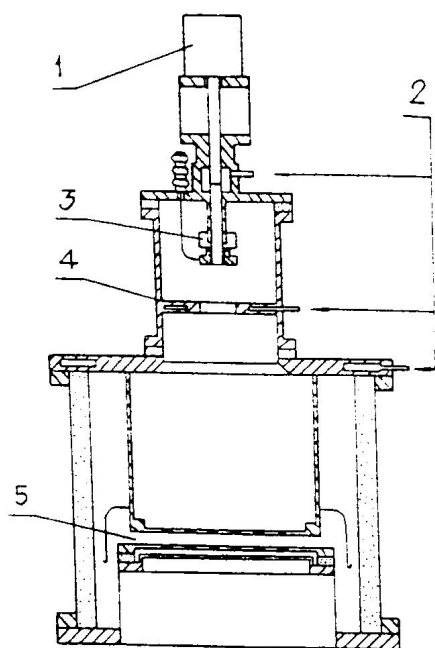


图1. MEVVA IIB源结构图

- (1) 电机；(2) 冷却液入口；(3) 阴极和触发极；  
(4) 阳极；(5) 引出系统

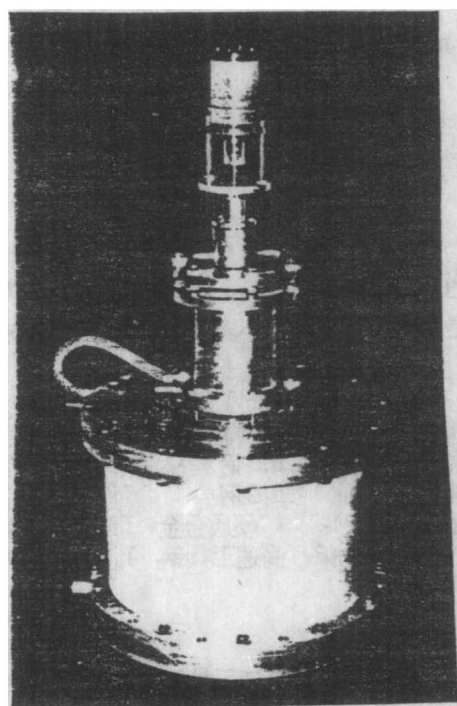


图2. MEVVA IIB源照片