



真空冶金与表面工程

—第八届真空冶金与表面工程学术会议论文集

Vacuum Metallurgy and Surface Engineering
Proceedings of the 8th Vacuum Metallurgy and Surface Engineering Conference

主 编：巴德纯

Editor in Chief: Ba Dechun

副主编：张世伟 刘 坤

Subeditor: Zhang Shiwei Liu Kun



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

真空冶金与表面工程

—第八届真空冶金与表面工程学术会议论文集

Vacuum Metallurgy and Surface Engineering

—Proceedings of the 8th Vacuum Metallurgy and Surface Engineering Conference

主 编:巴德纯

Editor in Chief: Ba Dechun

副主编:张世伟 刘 坤

Subeditor: Zhang Shiwei Liu Kun

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是2007年在中国沈阳举办的第8届真空冶金与表面工程学术会议的论文集,收录了来自国内外的53篇投稿论文,反映了近年来在真空冶金、表面工程和真空技术等领域的许多最新科研成果。内容主要包括真空冶金、真空热处理、真空冶金涂层、表面改性技术、生物材料表面工程、纳米表面工程和纳米摩擦学、超薄薄膜与功能薄膜、气相沉积技术、摩擦学、腐蚀与防护、纳米新材料的真空制备技术、表面工程基本问题、真空技术及应用、真空设备故障诊断、大型真空冶金设备的自动化等,可供从事真空与表面工程方面的研究和应用领域的学者、技术人员和研究生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

真空冶金与表面工程:第八届真空冶金与表面工程学术会议论文集/巴德纯主编. —北京:电子工业出版社,2007.6

ISBN 978-7-121-04043-6

I. 真… II. 巴… III. ①真空冶金—学术会议—文集 ②金属表面处理—学术会议—文集 IV. TF13-53 TG17-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第075180号

责任编辑:竺南直 董亚峰

印 刷:北京智力达印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:23.5 字数:603千字

印 次:2007年6月第1次印刷

定 价:120.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

大会组织机构

学术委员会

戴永年	院士	(昆明理工大学)
闻立时	院士	(中科院金属研究所)
李正邦	院士	(北京钢铁研究总院)
卡尔·劳	教授	(美莱斯大学)
杨乃恒	教授	(东北大学)
姜燮昌	教授	(中国真空学会)
薛增泉	教授	(北京大学)
吴锦雷	教授	(北京大学)
潘 峰	教授	(清华大学)
巴德纯	教授	(东北大学)
陈充林	教授	(美国德州大学圣安东尼奥分校)
屠基元	教授	(澳大利亚墨尔本皇家理工大学)
杨 斌	教授	(昆明理工大学)
董 闯	教授	(大连理工大学)
李争显	教授	(西北有色金属研究院)
田修波	教授	(哈尔滨工业大学)

组织委员会

主 任:	巴德纯	教 授	(东北大学)
副主任:	苏 原	教 授	(沈阳真空技术研究所)
	雷震霖	研究员	(国家真空仪器装置研制中心)
	杨 柯	研究员	(中科院金属研究所)
秘书长:	张世伟	副教授	(东北大学)
	刘 坤	博 士	(东北大学)

Organizational Structure

Academic Committee

Prof. Dai Yongnian	(Kunming University of Science and Technology)
Prof. Wen Lishi	(Institute. of Metal Research Chinese Academic of Science)
Prof. Li Zhengbang	(Steel Research Institute of Beijing)
Prof. Carl Rau	(Rice University)
Prof. Yang Naiheng	(Northeastern University)
Prof. Jiang Xiechang	(Chinese Vacuum Society)
Prof. Xue Zengquan	(Beijing University)
Prof. Wu Jinlei	(Beijing University)
Prof. Pan Feng	(Tsinghua University)
Prof. Ba Dechun	(Northeastern University)
Prof. Chen Chonglin	(University of Texas at San Antonio)
Prof. Tu Jiyuan	(RMIT University)
Prof. Yang Bin	(Kunming University of Science and Technology)
Prof. Dong Chuang	(Dalian University Of Technology)
Prof. Li Zhengxian	(Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research)
Prof. Tian Xiubo	(Harbin Institute of Technology)

Organizing Committee

- Prof. Ba Dechun (Northeastern University)
- Prof. Su Yuan (Institute. of Vacuum Research Chinese Academic of Science)
- Prof. Lei Zhenlin (National Research and Fabrication Center of Vacuum Equipments and Instruments of China)
- Prof. Yang Ke (Institute Of Metal Research Chinese Academy Of Sciences)
- Dr. Zhang Shiwei (Northeastern University)
- Dr. Liu Kun (Northeastern University)

鸣 谢

兰州真空设备有限责任公司
爱发科中北真空(沈阳)有限公司
三特真空冶金技术工业(锦州)有限公司
中科院沈阳科学仪器研究中心有限公司
沈阳百乐真空技术有限公司
日扬电子科技(上海)有限公司

Appreciation and Thanks

LANZHOU Vacuum Equipments Co. ,Ltd.
ULVAC (Shenyang) Zhongbei Vacuum Tech. Co. ,Ltd
SANTE (Jinzhou) Vacuum Metallurgy Tech. Industry Co. ,Ltd
SKY Technology Development of Chinese Academy of Sciences Co. ,Ltd.
BELLA (Shenyang) Vacuum Tech. Co. ,Ltd.
HIGHLIGHT (Shanghai) Tech. Co. ,Ltd

前 言

“真空冶金与表面工程学术会议”是由中国真空学会真空冶金专业委员会主办的学术年会,自 1978 年至今已举办了 7 届。2003 年起,改为每两年举办一次,该年会的目的是为真空冶金与表面工程领域的专家、学者、工程技术人员提供一个交流的平台,以推动我国该领域的科技发展和应用。

第八届中国真空冶金与表面工程学术会议于 2007 年 6 月 16 日至 19 日,在辽宁沈阳东北大学举办。本次会议由东北大学真空与流体工程研究中心承办,邀请了国内外知名学者和专家将做十余场精彩的大会特邀报告。

截止到 2007 年 5 月 10 日,会务组共收到投稿论文 90 多篇。经大会学术委员会评审,论文集共收录 53 篇,论文作者包括来自中国、韩国、澳大利亚等在内的多个国家和地区。

本次会议将开设真空冶金、表面工程和真空技术三个分会场的学术交流,还将组织参会代表赴相关企业进行考察,本次会议将成为大学、研究部门和企业之间的桥梁。在举办过程中,会议得到了多家单位的支持和赞助,在此一并表示感谢。

感谢电子工业出版社的辛勤劳动和各位论文作者的出色工作,使得这本论文集得以付梓。论文集的出版与发行,将对我国真空冶金与表面工程领域的学术与技术交流的蓬勃发展起到重要的作用。

中国真空学会真空冶金专业委员会

2007 年 5 月 10 日

Preface

Vacuum Metallurgy and Surface Engineering Conferences are sponsored by the Vacuum Metallurgy Committee of Chinese Vacuum Society (CVS-VMC), which have been already held seven times since 1978. Moreover, the next conference was held every two years since 2003, which is to provide a chance for experts, scholars, technical engineers and etc. in these areas to communicate with each other, then as a result science and technology in these area can be rapidly developed .

The 8th Vacuum Metallurgy and Surface Engineering Conference will be held in June 16th to June 19th of 2007 in Shenyang, Liaoning Province of China. This conference is sponsored by Vacuum and Fluid Engineering Research Center of Northeastern University. Over 10 well-known scholars or professors will give wonderful invited speeches at the conference.

Close till May 10, 2007, we totally received more than 90 articles and papers. This book gathered 53 pieces of papers selected by the Academia Committee. The Authors comes from several countries include China, Koran, Australia and etc.

There are three grouped conference include Vacuum Metallurgy, Surface Engineering, Vacuum Science and Technology. We also organized visits to some related factories. We hope that the meeting could become the bridge of universities, research departments, factories and enterprises. We should appreciate the support and sponsor of several enterprises.

; Thanks for the hard work of Electronics Industrial Publication House and the outstanding work of each author, which make it become true that this book can be printed and issued. We also hope that our work will be meaningful for the academic and technical development of vacuum metallurgy and surface engineering.

CVS-VMC
May 10, 2007

目 录

第一部分 真空冶金

- 真空蒸馏除磷提纯冶金级硅研究
Purification Metallurgical Grade Silicon Removal Phosphorus by Vacuum Distillation
..... 马文会 魏奎先 杨斌 刘大春 戴永年(3)
- 吹 NH₃ 冶炼高氮钢(HNS)在 AOD 工艺中的应用探讨
How to Smelt High - Nitrogen Steel (HNS) by Blowing Ammonia Gas in AOD Process
..... 储少军 马绍华 翟丹 季爱兵(9)
- RH 真空精炼过程的数值模拟方法
A Numerical Simulation Approach for Predicting the RH Refining Processes
..... 王晓冬 Sherman C. P. Cheung J. Y. Tu(17)
- 放电等离子烧结 TiAl 基金属间化合物的过程研究
Process Study of Manufacturing TiAl Based Intermetallic Alloy by Spark Plasma Synthesis
..... 夏力 丁辉 汪大海(27)
- 铝合金表面微弧氧化脉冲频率优化研究
Study on the Optimization of Pulse Frequency in The Micro - arc Oxidation of Aluminum
Alloys 张以忱 徐辉 杨英福(33)
- 硼铁型粉末渗硼剂中硼铁含量对渗层的影响研究
Effects of Ferro - boron Content in B - Fe Power Boriding Pack on Boride Layer
..... 衣晓红 李风华 樊占国(41)
- 真空热处理工艺制备 NdFeCoBZrGa 磁粉
Preparation NdFeCoBZrGa Magnetic Powder by Vacuum Heat Treatment Process
..... 尤俊华 连法增 徐铁伟(46)
- 冶金级硅的真空氧化除硼研究
Removing Boron from Metallurgical Grade Silicon by Vacuum Oxidation Refining
..... 伍继君 马文会 戴永年 魏奎先(51)
- 钕铁硼真空薄片铸造方法及其工艺改进
Fabrication of NdFeB Magnetic Powders by Developed Strip Casting Method
..... 王晓冬 王旭 孙宝玉 房也(57)
- 功能梯度材料作为活塞热障涂层的热分析研究
Thermal Analysis of Functional Gradient Materials as Thermal Barrier Coating of Piston
..... 杜双松 胡献国 冯忆艰 程继贵(64)

钕铁硼真空快速凝固——薄板铸造法及其结构改进
Fabrication of NdFeB Magnets by Improved Splint Casting Mold 王晓冬 王旭 商凯东 王冬(70)

利用图像处理技术构建真空炉内温度场数据库的方法
Constructing a Database for the Temperature Field of the Vacuum Furnace by Using Image Process Technology 雷金辉 赵晓侠 戴永年(76)

真空下从铝土矿中直接提取铝的新工艺研究
Experimental Study on Extracting Aluminium by Disproportionation of Subfluoride 李秋霞 戴永年(80)

国内外真空氢粉碎装置现状及发展趋势 娄树普 陈蓓新 王强(84)

纯镁及镁合金 AZ91HP 强流脉冲电子束处理微观组织分析
Investigation on Microstructure of the Surface Modified Layers of a HCPEB - treated Pure Mg and Mg Alloy AZ91HP 高波 赵铁钧 田小梅 涂赣峰 陈磊 郝胜智 董闯(89)

SS - VOD 真空精炼技术浅析
Technology of SS - VOD in Stainless Steel - making 李实 任乐 刘竑 李波 董志平(96)

第二部分 表面工程

ZnO 纳米线的光致激光和电致近紫外发光
Near Ultraviolet Light Emitting of ZnO Nanowires under Electrical Excitation and Optically Pumped Lasing of Theirs 吴锦雷(103)

塑料瓶壁体等离子体增阻技术
Enhance of Barrier Properties of Inner Wall of Plastic Bottle 田修波 李景 杨士勤(110)

非平衡磁控溅射制备 Ti - N - C 薄膜性能研究
Properties of Ti - N - C Films Prepared by Unbalanced Magnetron Sputtering 张以忱 吴宇峰 巴德纯(117)

镁合金 AZ91 和 AM60 在不同介质中的腐蚀特性
Corrosion Characteristics of AZ91 and AM60 in Different Environments 芦笙 侯志丹 周晓燕 王军 陈留桥 王保华(124)

中频反应磁控溅射制备 TiO₂ 薄膜的微观结构及光学性能
Microstructure and Optical Properties of TiO₂ Films Prepared by Reactive MF Magnetron Sputtering 段永利¹ XU Sheng² 巴德纯¹ and FAN Chuizhen²(131)

热障涂层在加热/冷却循环条件下的寿命预测研究
Research on Life Prediction of TBCs in Heating、Cooling Cycle Condition 徐中 曾小兰 崔健超(136)

自偏压对 PMMA 基底上沉积的含氢非晶碳膜的影响 Effect of Bias Voltage on Hydrogenated Amorphous Carbon Film Deposited on Pmma Substrate	蔺增 李明 王凤 巴德纯 In - Seop Lee(140)
射频反应磁控溅射法在高速钢基底上制备 SiO ₂ 薄膜 Preparation of SiO ₂ Thin Films on High Speed Steel Substrates by RF Reactive Magnetron Sputtering	曾其勇 周娟 徐军 邓新禄(147)
太阳电池 TiO ₂ 减反射薄膜的制备与特性研究 Fabrication and Characterization of TiO ₂ Antireflection Thin Film Deposited on the Solar Cell	王贺权 巴德纯 沈辉 闻立时(155)
中频反应磁控溅射法制备 Al ₂ O ₃ :Ce ³⁺ 发光薄膜工艺条件优化 Optimization of fabrication parameters of Al ₂ O ₃ :Ce ³⁺ Films Prepared by Medium Frequency Reactive Magnetron Sputtering	廖国进 巴德纯 闻立时 刘斯明 阎绍峰(161)
Analysis of All - optical Switching in PPLN Waveguide with Homocentric Semicircle Domain Structure	王锦仁 Zhou Zhong xiang(167)
薄膜传感器在智能切削刀具中的应用研究 Thin Film Sensor Application in Smart Cutting Tools	张以忱 陈述平 张健(173)
大功率 LED 薄膜封装结构的传热研究 Heat Transfer in Thin - film Packaging of High - power LED	王德苗 苏达 王耀明(182)
各向异性(110)衬底上薄膜生长的蒙特卡罗模拟 The Monte Carlo Simulation of Thin Film on (110) Anisotropic Substrate	陈丹丹 李林 滕春禹 钟钰 梁焕巢(187)
中频孪生靶磁控溅射沉积氮化锆薄膜的研究 Study on ZrN Coatings by Mid - frequency Twin - target Magnetron Sputtering Technique	李新领 孙维连 周智男 邢雅周 王会强 蒋辉(191)
氧化时间对铝合金表面微弧氧化膜层的影响 Influence of Oxidation Time on Micro - arc Oxidation of Aluminum Alloys	张以忱 徐辉 郭元元(196)
直流反应磁控溅射相关工艺条件对 TiO ₂ 薄膜表面形貌的影响 Influence of Relative Parameters on Surface Properties of TiO ₂ Thin Film Prepared by DC Reactive Magnetron Sputtering	王贺权 巴德纯 沈辉 闻立时(203)
TiO ₂ 薄膜表面能计算 Surface Energy Calculating Of TiO ₂ Thin Film	常学森 巴德纯 闻立时 刘坤(209)
射频偏压等离子体鞘层流体动力学模拟 Fluid Model For Radio Frequency Plasma Sheath with Bias Voltage	吕少波 蔺增 巴德纯 李明 姚红冉(214)

电子束物理气相沉积钇钛合金薄膜的组分和厚度分布

Thickness and Component Distributions of Yttrium - titanium Alloy Films in Multi - electron - beam Physical Vapor Deposition 李帅辉 舒勇华 樊菁(222)

类金刚石掺杂 Ti/N 薄膜的制备与性能研究

Preparation and Properties of Ti/N Doped DLC Film 张以忱 于大洋 马胜歌 巴德纯(235)

二硫化钨固体润滑薄膜润滑机理及研究现状

Tribological Properties and Current Status of Tungsten Disulfide Solid Lubricant Films 杜广煜 巴德纯 王晓光 惠秀梅(240)

微弧氧化过程中电流密度对膜层性能的影响

Effects of Current Density on Properties of Coatings during Micro - arc Oxidation 张以忱 徐辉 董连俊(246)

等离子改性工艺对硼铸铁汽缸体表面组织和性能的影响

Effects of Microstructure and Property of Plasma Beam Improving Performance Treatment on Boron Cast Iron Engines Cylinder's Surface 李安生 谢欢(252)

含氢非晶碳膜可见光拉曼与紫外拉曼光谱的对比研究

Comparative Study in Visible Raman and UV Raman Spectra of Hydrogenated Amorphous Carbon Films 王凤 蔺增 巴德纯 周福君 李明(260)

真空中平行钼丝辐射加热下的 6 英寸单晶硅基片的温度分布

Temperature Distribution over 6 - inch Mono - crystal Silicon Substrate Heated by Parallel Molybdenum Filaments in Vacuum 李帅辉 舒勇华 唐锦荣 樊菁(266)

聚甲醛基滑动轴承纳米复合材料的传热特性研究

Thermal Properties of Polyoxymethylene - based Nano - composites Used for Sliding Bearings 刘祥宽 胡献国(278)

直流辉光放电等离子体鞘层流体动力学模拟

Hydrokinetics Simulations of DC - glow Discharge Plasma Sheath 姚红冉 蔺增 巴德纯 张海明(285)

原子层沉积高 k 介质膜的新进展

Atomic Layer Deposition of High - k Dielectrics 叶位彬 黄光周 朱建明 戴晋福(291)

第三部分 真空技术

真空获得设备的最新进展

Recent Development of Vacuum Pumps 姜燮昌(301)

基于稳态温度场的涡旋真空泵涡旋齿高设计

Design of Scroll Wrap Height for Scroll Vacuum Pump Based on Stable Temperature Field 强建国 刘振全(309)

国外高真空直排大气干泵的发展现状	
State - of - art of Dry Vacuum Pump Pumping from High Vacuum Directly into Atmosphere	
..... 刘坤 巴德纯 杨乃恒 常学森 李涛 陈瑶	(318)
Application of Ag/Graphite Seal Rings in Heat Extraction of Oil	
..... 汤卉 邵俊鹏 高维丽	(323)
玉米低温塔式真空干燥技术与设备的研究	
Maize Low Temperature Continuous Tower Vacuum Drying Technology and Equipment	
..... 张志军 徐成海 张世伟 何翔	(330)
基于 DSMC 方法的圆环通道盘型分子泵 3D 流场数值模拟	
Numerial Simulation of 3D's Flow Field to Disk - Type Molecular Pumps with Annulus Chan-	
nel Based on DSMC Method	
..... 刘波 巴德纯 钟亮	(338)
Thermal Error Analysis and Modeling for Error Compensation on Gear Hobbing Machine	
..... 郭前建 Yang Jianguo Wang Xiushan	(343)
旋片真空泵的遗传算法优化设计	
Optimum Design of the Rotary Vane Vacuum Pump Based on Genetic Algorithm	
..... 岳向吉 巴德纯 刘波 巴要帅	(350)

第1部分

真空冶金

真空蒸馏除磷提纯冶金级硅研究

马文会^{1,2} 魏奎先^{1,2} 杨斌^{1,2} 刘大春^{1,2} 戴永年^{1,2}

- (1. 真空冶金国家工程实验室, 昆明理工大学材料与冶金工程学院;
2. 云南省有色金属真空冶金重点实验室, 昆明 650093 云南)

摘要:随着太阳能电池产业的快速发展,半导体工业的硅废料已不能满足硅太阳能电池发展需要,且未来10~15年这些废料不会有明显的增长。因此,必须开发一种不依赖传统工艺的太阳能级硅生产工艺。其中一种降低太阳能电池价格的途径就是使用由冶金级硅直接制备太阳能级硅作为电池转换材料,其中该新工艺过程中冶金级硅的磷杂质去除是一个关键环节。本文讨论了真空蒸馏法去除冶金级硅磷杂质的分离系数以及最大蒸发速率与温度间的关系,最后实验验证了理论分析的可靠性,为进一步研究奠定了理论基础。

关键词:太阳能级硅;冶金级硅;真空蒸馏;磷去除

Purification Metallurgical Grade Silicon Removal Phosphorus by Vacuum Distillation

Ma Wenhui^{1,2} Wei Kuixian^{1,2} Yang Bin^{1,2}

Liu Dachun^{1,2} Dai Yong nian^{1,2}

- (1. National Engineering Laboratory of Vacuum Metallurgy, Faculty of Metallurgical and Materials Engineering, Kunming University of Science and Technology;
2. Key Laboratory of Vacuum Metallurgy of Non-ferrous Metals of Yunnan Province, Kunming 650093, P. R. China)

Abstract: With the development of photovoltaic industry and the insufficient feedstock of semiconductor industry scrap which was used as raw material of photovoltaic industry and impossible to increase markedly within next 10~15 years. Therefore, it is inevitable to establish an independent feedstock system of solar grade silicon (SOG-Si) material. One of the effective paths to decrease the price of solar cell is to utilize SOG-Si produced from metallurgical grade silicon (MG-Si) directly. Removal of impurity phosphorus from metallurgical grade silicon is one of the major problems on purification of metallurgical grade silicon for solar grade silicon. In this paper, thermodynamics on vacuum refining process of the metallurgical grade silicon has been studied by using separation coefficient of impurity phosphorus in the metallurgical grade silicon and relationship between maximum evaporation rate and temperature. Then an experiment was conducted to provide useful information for future in

Correspondence: Ma Wenhui (1973~), Professor, Tel: +86-0871-5107208; E-mail: mwhui@kmust.edu.cn