

“十二五”
国家重点图书

Handbook of Analytical Chemistry

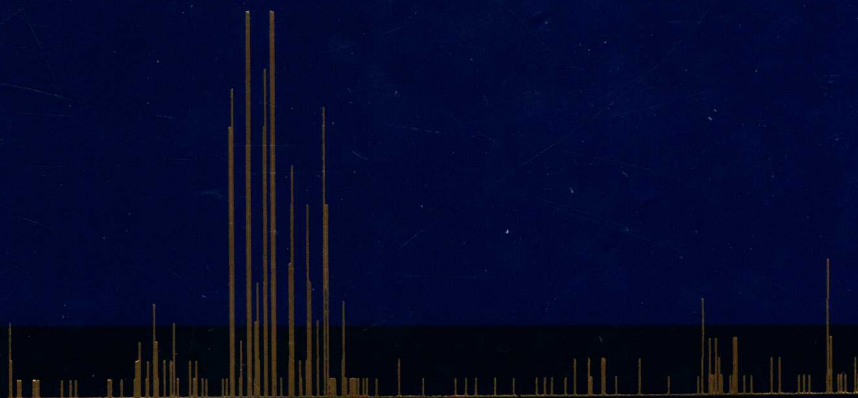
分析化学手册

第三版

9B

无机质谱分析

赵墨田 主编



化学工业出版社

分析化学手册

第三版

9B

无机质谱分析

赵墨田 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《分析化学手册》第三版在第二版的基础上作了较大幅度的增补和删减，在保持原手册 10 个分册的基础上，将其中 3 个分册进行拆分，扩充为了 6 册，最终形成 13 册。

《无机质谱分析》是其中一个分册，共分四篇，包括总论、同位素质谱分析、元素质谱分析和辅助技术。首先概括性介绍无机质谱的发展历史、背景、质谱种类，根据质谱方法和研究对象的异同划分，分别对每种方法进行介绍，包括方法概述、仪器、基本原理和方法特点，通过具体的实例阐释实验步骤、分析结果计算。书后还附有无机质谱研究中经常要用到的一些数据、参数以及主题词索引和表索引，方便读者查阅。

本书适合地质、矿产、核分析科学与技术、化学相关领域的研究人员和技术人员学习与查阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

分析化学手册. 9B. 无机质谱分析 / 赵墨田主编.

3 版. —北京: 化学工业出版社, 2016.7

ISBN 978-7-122-27291-1

I. ①分… II. ①赵… III. ①分析化学-手册②无机
分析-质谱法-手册 IV. ①O65-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 126507 号

责任编辑: 傅聪智 李晓红 任惠敏

文字编辑: 向 东

责任校对: 边 涛

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 37¼ 字数 986 千字 2016 年 10 月北京第 3 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 128.00 元

版权所有 违者必究

《分析化学手册》(第三版)编委会

主任:汪尔康

副主任:江桂斌 陈洪渊 张玉奎

委员(按姓氏汉语拼音排序):

柴之芳	中国科学院院士 中国科学院高能物理研究所
陈洪渊	中国科学院院士 南京大学
陈焕文	东华理工大学
陈 义	中国科学院化学研究所
丛浦珠	中国医学科学院药用植物研究所
邓 勃	清华大学
董绍俊	发展中国家科学院院士 中国科学院长春应用化学研究所
郭伟强	浙江大学
江桂斌	中国科学院院士 中国科学院生态环境研究中心
江云宝	厦门大学
柯以侃	北京化工大学
梁逸曾	中南大学
刘振海	中国科学院长春应用化学研究所
庞代文	武汉大学
邵元华	北京大学
苏 彬	浙江大学
汪尔康	中国科学院院士 中国科学院长春应用化学研究所
王 敏	浙江大学

吴海龙	湖南大学
许国旺	中国科学院大连化学物理研究所
严秀平	南开大学
杨峻山	中国医学科学院药用植物研究所
杨芑原	复旦大学
杨秀荣	中国科学院院士 中国科学院长春应用化学研究所
姚守拙	中国科学院院士 湖南大学, 湖南师范大学
于德泉	中国工程院院士 中国医学科学院药物研究所
俞汝勤	中国科学院院士 湖南大学
张新荣	清华大学
张玉奎	中国科学院院士 中国科学院大连化学物理研究所
赵墨田	中国计量科学研究院
郑国经	北京首钢冶金研究院 (现北冶功能材料有限公司)
郑 健	中华人民共和国科学技术部
朱俊杰	南京大学
庄乾坤	国家自然科学基金委员会化学科学部

本分册编写人员

主 编：赵墨田

编写人员（按姓氏汉语拼音排序）：

曹永明	复旦大学
陈 刚	赛默飞世尔科技（中国）有限公司
冯连君	中国科学院地质与地球物理研究所
冯流星	中国计量科学研究院
郭冬发	核工业北京地质研究院
姜 山	中国原子能科学研究院
李志明	西北核技术研究所
刘虎生	北京大学
逯 海	中国计量科学研究院
罗修泉	中国地质科学院
宋 彪	中国地质科学院
孙立民	上海交通大学
王 军	中国计量科学研究院
王同兴	中国原子能科学研究院
翟利华	西北核技术研究所
张有瑜	中国石油勘探开发研究院
张玉海	中国地质科学院
赵墨田	中国计量科学研究院
周 涛	中国计量科学研究院

序

分析化学是人们获得物质组成、结构及相关信息的科学，即测量与表征的科学。其主要任务是鉴定物质的化学组成及含量测定、确定物质的结构形态及其与物质性质之间的关系。分析化学是一门社会和科技发展迫切需要的、多学科交叉结合的综合性科学。现代分析化学必须回答当代科学技术和社会需求对现存的方法和技术的挑战，因此实际上已发展成为“分析科学”。

《分析化学手册》是一套全面反映现代分析技术，供化学工作者使用的专业工具书。《分析化学手册》第一版于 1979 年出版，有 6 个分册；第二版扩充为 10 个分册，于 1996 年至 2000 年陆续出版。手册出版后，受到广大读者的欢迎，成为国内很多分析化验室和化学实验室的必备图书，对我国科技进步和社会发展都产生了重要作用。

进入 21 世纪，随着科技进步和社会发展对分析化学提出的种种要求，各种新的分析手段、仪器设备、信息技术的出现，极大地丰富了分析化学学科的内涵、促进了学科的发展。为更好总结这些进展，为广大读者服务，化学工业出版社自 2010 年起开始启动《分析化学手册》（第三版）的修订工作，成立了由分析化学界 30 余位专家组成的编委会，这些专家包括了 10 位中国科学院院士、中国工程院院士和发展中国家科学院院士，多位长江学者特聘教授和国家杰出青年基金获得者，以及各领域经验丰富的专家。在编委会的领导下，作者、编辑、编委通力合作，历时六年完成了这套 1800 余万字的大型工具书。

本次修订保持了第二版 10 分册的基本架构，将其中的 3 个分册进行拆分，扩充为 6 册，最终形成 10 分册 13 册的格局：

- | | | | |
|----|-----------|----|---------------|
| 1 | 基础知识与安全知识 | 7A | 氢-1 核磁共振波谱分析 |
| 2 | 化学分析 | 7B | 碳-13 核磁共振波谱分析 |
| 3A | 原子光谱分析 | 8 | 热分析与量热学 |
| 3B | 分子光谱分析 | 9A | 有机质谱分析 |
| 4 | 电分析化学 | 9B | 无机质谱分析 |
| 5 | 气相色谱分析 | 10 | 化学计量学 |
| 6 | 液相色谱分析 | | |

其中，原《光谱分析》拆分为《原子光谱分析》和《分子光谱分析》；《核磁共振波谱分析》拆分为《氢-1 核磁共振波谱分析》和《碳-13 核磁共振波谱分析》；《质谱分析》新增加了无机质谱分析的内容，拆分为《有机质谱分析》和《无机质谱分析》，并对仪器结构及方法原理进行了全面的更新。另外，《热分析》增加了量热学方面的内容，分册名变更为《热分析与量热学》。

本版修订秉承的宗旨：一、保持手册一贯的权威性和典型性，体现预见性和前瞻性，突出新颖性和实用性；二、继承手册的数据查阅功能，同时注重对分析方法和技术的介绍；三、着重收录了基础性理论和发展较成熟的方法与技术，删除已废弃的或过时的内容，更新有关数据，增补各领域近十年来的新方法、新成果，特别是计算机的应用、多种分析技术联用、分析技术在生命科学中的应用等方面的内容；四、在编排方式上，突出手册的可查阅性，各分册均编排主题词索引，与目录相互补充，对于数据表格、图谱比较多的分册，增加表索引和谱图索引，部分分册增设了符号与缩略语对照。

手册第三版获得了国家出版基金项目的支持，编写与修订工作得到了我国分析化学界同仁的大力支持，全套书的修订出版凝聚了他们大量的心血和期望，在此谨向他们，以及在编写过程中曾给予我们热情支持与帮助的有关院校、科研院所及厂矿企业的专家和同行，致以诚挚的谢意。同时我们也真诚期待广大读者的热情关注和批评指正。

《分析化学手册》(第三版)编委会
2016年4月

前 言

质谱分析成为分析化学不可替代的测试方法是从研究同位素开始,同位素质谱的成就为无机质谱的孕育、发展和成熟提供了借鉴;无机质谱的定性、定量方法主要借助元素的核素、同位素谱线测量,一些重要的质谱分析方法既可用于同位素测量,又可用于元素测量。如今,虽说同位素质谱分析理论、技术已经基本解决,但是仪器性能的提高、分析技术的改进仍在延续,应用范围也在不断拓宽,常规分析任务也是大量的。

无机质谱从测量元素开始,并伴随物质成分分析发展而逐渐成熟。20世纪50年代后期,火花源质谱对杂质和超纯物质分析的业绩,在无机质谱发展史上留下辉煌一页。20世纪70年代后期,特别是进入80年代,由于材料学、精密机械加工、超高真空技术和微电子学等新兴学科、技术的成就,尤其是计算机及其软件的广泛引用,为质谱仪器制造业发展和新型质谱仪器商业化奠定了物质和技术基础。伴随科学技术及国民经济的发展,不同类型高性能的同位素质谱仪、无机质谱仪相继问世。电感耦合等离子体质谱法、辉光放电质谱法、激光电离和激光共振电离质谱法、加速器质谱法等新的同位素、元素质谱分析方法逐渐孕育、发展和成熟;与此同时,气体稳定同位素质谱法、热电离质谱法、静态真空质谱法、二次离子质谱法、同位素稀释质谱法和同位素示踪质谱法在研究与应用过程中,采用了多种新技术、新工艺,方法的灵敏度、精密度和探测极限有了显著改善。这些新老技术、方法的结合,促进应用范围进一步拓宽,测试对象不再局限于金属元素同位素或无机成分分析,而是延伸到包括H、C、O、N、S、P等有机元素和卤族、惰性气体等非金属元素在内的元素周期表的几乎所有元素。

如今,通过常规分析、微区分析、表面-截面分析、深度剖析和元素的空间成像,为相关学科研究、国民经济发展提供同位素、元素的定性、定量,以及物体表面与深度的元素图像等多种信息,成为名副其实、应用广泛的分析学科的重要分支。不但是传统的地质学、核科学与核工业、冶金学、材料科学、化学、生物学、医药学等学科、专业的重要测试方法,也是微电子技术、生物工程、环境科学和宇航探测等新兴学科研究与发展不可替代的测试方法。无疑,它在促进科学技术发展和国民经济高速增长的过程中具有举足轻重的地位。

本书内容分为四篇:第一篇总论,包括导论和质谱仪器两章,简要介绍同位素质谱仪、无机质谱仪及同位素质谱法、无机质谱法的孕育、发展、内容和有关信息知识;第二篇同位素质谱分析,包括气体稳定同位素质谱法、热电离质谱法、加速器质谱法、静态真空质谱法、多接收电感耦合等离子体质谱法、高分辨双聚焦二次离子质谱法和激光共振电离质谱法等七章;第三篇元素质谱分析,包括电感耦合等离子体四极杆质谱法、高分辨电感耦合等离子体质谱法、飞行时间二次离子质谱法、双聚焦二次离子质谱法、辉光放电质谱法和同位素稀释质谱法等六章。第二、三篇是本书的核心,重点介绍各自的方法原理、实验技术、仪器和应用,内容主要选取和调研了国内外相关文献,结合作者实验室的有关实验积累;第四篇辅助技术,包括样品制备技术、计算机在质谱分析中的应用、质谱分析误差、标准物质与质谱分析法等四章,内容主要选自相关文献和作者的工作经验总结,其目的是为了使读者更加完整地理解、掌握和运用分析方法,提高分析效率,获取有效信息。为了便于读者查阅,篇、章

划分没有完全遵从传统质谱学理念，而主要根据各章内容释义、对象和获得信息编排。鉴于火花源质谱法和四极杆二次离子质谱法目前国内很少使用，故没有将其编入书中；由于电感耦合等离子体质谱、二次离子质谱仪器、方法的扩展和应用的延伸，分别将其编排为三章叙述。

本书编写初衷是希望它的出版能增进读者对同位素质谱和无机质谱分析的了解，并促进其应用与发展。在编写过程中注重物理概念的叙述，尽量减少数学推导；对一些较深、复杂的理论问题，力求作言简意赅的概括，避免冗长的文字解释；受篇幅限制，更多地采用图、表替代文字释义。

作者主要来自科研院所和高校，他（她）们都从事质谱专业工作多年，具有较丰富的专业知识和实际工作经验。各章的编写分工如下：第一章、第四章赵墨田；第二章张玉海；第三章冯连君；第五章姜山；第六章罗修泉、张有瑜；第七章王军；第八章宋彪；第九章李志明；第十章刘虎生；第十一章郭冬发；第十二章孙立民；第十三章曹永明；第十四章周涛、陈刚；第十五章逯海；第十六章周涛；第十七章翟利华；第十八章王同兴；第十九章赵墨田、冯流星。参加稿件审阅的专家有（按姓氏汉语拼音排序）：曹永明、郭春华、韩永志、李金英、梁汉东、刘虎生、刘咸德、龙涛、肖应凯、张子斌、朱凤蓉等，最后由赵墨田审阅、统编全部书稿。

感谢《分析化学手册》（第三版）编委会增设《无机质谱分析》分册及对篇、章设置与内容选择给予的热诚指导和帮助；化学工业出版社领导、尤其是本书责任编辑，不辞劳苦，默默奉献，所付出的辛勤劳动和做出的贡献为本书的出版奠定了良好基础；张艳娟、肖陈刚、王同胜、任同祥、巢静波、韦超等以不同方式对本书编写给予帮助和支持，在此，一并向他们表示诚挚的谢意。

本书虽经各位编者、审者反复校阅，限于编者学识和从事专业限制，在选材、表述方面难免存在不妥、疏漏之处，真诚欢迎各位专家与广大读者提出批评、改进意见。

赵墨田

2016年8月

目 录

第一篇 总 论

第一章 导论	2	三、原子轰击型离子源	25
第一节 质谱学发展简史	2	四、放电型离子源	26
一、质谱仪器	2	五、热电离离子源	27
二、同位素质谱法	4	六、电感耦合等离子体离子源	28
三、无机质谱法	5	七、其他类型的电离技术	29
第二节 名词、术语	6	第四节 质量分析器	30
一、基础名词、术语	6	一、磁式质量分析器	30
二、仪器相关名词、术语	10	二、双聚焦质量分析器	31
三、方法相关名词、术语	11	三、飞行时间质量分析器	31
第三节 相关基本常数和单位制	15	四、四极滤质器	33
一、基本物理常数	15	五、离子阱质量分析器	34
二、国际单位制的相关基本单位和导出单位	15	六、傅里叶变换离子回旋共振质量分析器	34
三、相关的单位换算	16	第五节 离子检测及数据处理	35
第四节 获取信息的主要途径	16	一、法拉第杯检测器	35
一、学术机构	16	二、电子倍增器	35
二、期刊	17	三、其他类型的离子检测装置	37
参考文献	18	四、数据处理	38
第二章 质谱仪器	21	第六节 真空系统	40
第一节 质谱仪器的基本结构和分类	21	一、质谱仪器的真空要求	41
一、质谱仪器的基本结构	21	二、真空的获得及真空测量	41
二、质谱仪器的分类	21	三、各种真空组件	42
第二节 进样系统	22	第七节 质谱仪器的主要技术指标	43
一、直接进样系统	22	一、质量范围	43
二、间接进样系统	22	二、分辨本领	43
第三节 离子源	22	三、灵敏度	44
一、电子轰击型离子源	22	四、丰度灵敏度	44
二、离子轰击型离子源	23	五、精密度和准确度	44
		参考文献	45

第二篇 同位素质谱分析

第三章 气体稳定同位素质谱法	48	第一节 气体稳定同位素质谱概述	48
----------------	----	-----------------	----

一、进样系统	48
二、离子源	49
三、质量分析器	50
四、检测系统	50
第二节 样品制备技术	50
一、水中氢同位素制备技术	50
二、碳同位素制备技术	53
三、氮同位素制备技术	59
四、氧同位素制备技术	63
五、硫同位素制备技术	72
第三节 稳定同位素质谱分析法	74
一、稳定同位素的表示方法、标准 及其分析流程	74
二、质谱分析数据计算	76
三、稳定同位素质谱分析误差	87
参考文献	88

第四章 热电离质谱法

第一节 热电离质谱法原理	90
一、热电离	90
二、离子束聚焦、拉出	93
三、质量分离	94
四、离子检测	94
第二节 热电离质谱仪	95
一、离子源	95
二、质量分离器	97
三、离子检测器	97
四、附属设备	102
第三节 试验方法	102
一、测量前的工作程序	102
二、测量方法	111
三、测量结果的表达	113
四、影响准确测量的主要因素	115
五、方法的主要特点	120
第四节 热电离质谱法的应用	120
一、碱金属、碱土金属元素同位素 测量	121
二、过渡元素测量	122
三、稀土元素测量（原子量测量）	123
四、铜系元素测量	126
五、硼、氯、溴、氧、氮等非金属元素 同位素测量	129

参考文献	132
------------	-----

第五章 加速器质谱法

第一节 加速器质谱方法原理与特点	134
第二节 AMS 分析装置	135
一、离子源与注入器	136
二、加速器	137
三、高能分析器	138
四、离子探测器	139
五、基于其他加速器的 AMS 装置	139
第三节 加速器质谱测量过程与定量 分析方法	140
一、测量过程	140
二、定量分析方法	140
三、测量实例	140
四、一些主要核素的测量情况	143
五、AMS 测量极限与限制	143
第四节 加速器质谱应用研究	144
一、 ^{14}C	144
二、 ^{36}Cl	145
三、 ^{10}Be	145
四、 ^{129}I	146
五、 ^{41}Ca	146
六、其他核素	147
参考文献	147

第六章 静态真空质谱法

第一节 静态真空质谱仪及其组成 和类型	150
一、基本组件	150
二、真空系统	151
三、熔样装置和进样装置	152
四、纯化系统	153
五、仪器类型	154
第二节 Ar 同位素分析	155
一、Ar 同位素分析方法	155
二、Ar 含量计算方法	156
三、K-Ar 法测年	157
四、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测年	157
五、Ar 同位素测年在地质学中的应用	160
第三节 He 同位素分析	166
一、He 同位素分析方法	166

二、He 含量计算方法	166	三、双聚焦	194
三、He 同位素的应用	167	第二节 仪器	194
第四节 Ne 同位素分析	168	一、仪器结构	194
一、Ne 同位素分析方法	168	二、仪器举例	197
二、Ne 同位素研究的应用	169	第三节 方法及其应用	201
第五节 Kr 同位素分析	169	一、含铀矿物 U-Th-Pb 同位素	201
第六节 Xe 同位素分析	170	二、地球物质的同位素	203
一、Xe 同位素分析方法	170	三、陨石、月球、星际物质的稳定同位素	205
二、Xe 同位素的应用	170	四、古气候	207
参考文献	171	五、地球早期生命	207
第七章 多接收电感耦合等离子体质谱法	174	六、环境微生物生态学	208
第一节 方法原理和特点	174	七、核电站安全性监测	210
第二节 质谱仪	175	八、掺杂成分浓度分析	211
一、进样系统	175	九、深度分析	212
二、电感耦合等离子体源	175	参考文献	213
三、单/双聚焦质量分析器	176	第九章 激光共振电离质谱法	215
四、离子检测器	177	第一节 LRIMS 分析原理	215
第三节 测量方法	178	一、概述	215
一、测量方法概述	178	二、LRIMS 方法原理与特点	215
二、测量中的常见问题及解决方法	180	第二节 激光共振电离质谱仪	216
第四节 技术应用	184	一、激光共振电离离子源	217
一、复杂基体样品中同位素比值测量	184	二、激光共振电离激光器系统	219
二、高纯物质中同位素组成和原子量测量	188	三、质量分析器	219
三、激光剥蚀与多接收电感耦合等离子体质谱联用技术的应用	189	四、探测器	219
参考文献	192	第三节 LRIMS 定量分析方法	219
第八章 高分辨双聚焦二次离子质谱法	193	一、激光共振电离方案选择	220
第一节 双聚焦原理	193	二、激光诱导同位素选择效应	223
一、能量聚焦——静电分析器	193	三、LRIMS 分析实例	223
二、方向聚焦——磁分析器	194	第四节 LRIMS 装置及应用	224
		一、高元素选择性的 LRIMS	224
		二、高同位素选择性的 LRIMS	226
		三、其他一些先进的 LRIMS 装置	228
		参考文献	229

第三篇 元素质谱分析

第十章 电感耦合等离子体四极杆质谱法	234	一、电感耦合等离子体质谱技术发展概况	234
第一节 概述	234	二、ICP-MS 仪器的基本结构	235

三、ICP-MS 的特点	236
四、ICP 质谱仪的性能对比	237
第二节 ICP 离子源	237
一、作为离子源的 ICP	237
二、射频发生器	239
三、ICP 放电的一般性质	240
第三节 样品引入系统	240
一、液体样品引入	240
二、气体样品引入	242
三、固体样品引入	242
第四节 质量分析器	243
第五节 离子检测器	243
第六节 ICP-MS 的干扰及其克服	243
一、质谱干扰	244
二、非质谱干扰	246
第七节 ICP-MS 定性半定量及定量分析	246
一、定性分析	246
二、半定量分析	246
三、定量分析	247
第八节 ICP-QMS 法的应用	248
一、ICP-QMS 在地质科学中的应用	248
二、ICP-QMS 在环境检测中的应用	252
三、ICP-QMS 在生物与医药卫生中的应用	255
四、ICP-QMS 在食品科技中的应用	260
五、ICP-QMS 在冶金工业中的应用	265
六、ICP-QMS 在放射性核素监测中的应用	268
七、ICP-QMS 在元素形态分析中的应用	271
参考文献	277

第十一章 高分辨电感耦合等离子体质谱法

第一节 HR-ICP-MS 仪器的基本结构及特点	278
一、离子源	278
二、接口锥及真空系统	279
三、离子调制	279
四、质量分析器	279
五、检测器	283

第二节 HR-ICP-MS 质谱仪的品质因素	283
一、分辨率	283
二、灵敏度	304
三、分辨率与灵敏度的相关性	304
四、背景噪声	304
第三节 HR-ICP-MS 的应用	305
一、HR-ICP-MS 在半导体测量中的应用	305
二、HR-ICP-MS 在材料科学中的应用	306
三、HR-ICP-MS 在地质与冶金中的应用	306
四、HR-ICP-MS 在核科学中的应用	308
五、HR-ICP-MS 在化学与石化中的应用	308
六、HR-ICP-MS 在环境科学中的应用	308
七、HR-ICP-MS 在农业中的应用	309
八、HR-ICP-MS 在法证学中的应用	310
九、HR-ICP-MS 在生物与医疗中的应用	310
十、HR-ICP-MS 在食品与药物中的应用	311
参考文献	311

第十二章 飞行时间二次离子质谱法

第一节 飞行时间二次离子质谱法原理	313
一、TOF-SIMS 发展历史	313
二、SIMS 检测原理	314
三、SIMS 主要分析模式和仪器操作模式	314
四、SIMS 仪器的优点及局限性	315
五、对样品的要求	316
六、TOF-SIMS 的应用	317
第二节 飞行时间二次离子质谱仪	317
一、仪器结构	317
二、一次离子源	318
三、二次离子分析系统——TOF 质量分析器	320
四、进样系统及载样控制台	324
五、真空系统	325

第三节 仪器的操作模式	325
一、TOF-SIMS 仪器的操作模式	325
二、绝缘样品的荷电补偿	328
第四节 定性定量分析方法	328
一、定性分析	328
二、定量分析	335
第五节 方法应用	337
一、腐蚀科学：氧化皮的分析	337
二、电子材料表征	338
三、多相催化剂的研究	339
四、环境检测：气溶胶及汽车尾气颗粒表面成分分析	340
五、煤科学：煤表面成分及其赋存情况的表征	341
六、冶金：矿物浮选的研究	342
七、有机材料的表征	343
参考文献	344

第十三章 双聚焦二次离子

质谱法

第一节 一次离子源	345
一、双等离子体离子源	346
二、金属表面直接加热电离源——Cs ⁺	347
三、液态金属离子源——Ga ⁺	348
四、一次离子源的选择	348
第二节 离子光学	349
一、一次离子束的合轴和扫描	350
二、二次离子光路中的浸没透镜	350
第三节 二次离子发射机理	351
一、溅射产额	351
二、二次离子产额	356
第四节 质量分析器与离子检测系统	359
一、质量分析器	359
二、离子检测系统	360
第五节 二次离子质谱仪	362
一、双聚焦二次离子质谱仪的分类	362
二、IMS 系列 SIMS	363
三、样品需求	364
第六节 二次离子质谱法的功能	365
一、深度剖析	365

二、质谱分析——质量扫描	376
三、线扫描（二次离子质谱的横向线分析）	377
四、微区分析	378
五、三维分析	378
六、定量分析	379
第七节 二次离子质谱法的应用	381
一、宇宙尘埃质谱分析	382
二、深度剖析的应用	382
三、线扫描分析（金属中杂质氢的检测）	386
四、同位素分析——核燃料 ²³⁵ U 是否给周围环境带来放射性污染的检测	387
五、二次离子图像分析	389
六、绝缘样品的分析——杂质在 SOI 材料中的分布	390
七、硅中痕量硼二次离子质谱定量分析的异常现象	390
第八节 双聚焦二次离子质谱分析常用数据	392
一、检测限	392
二、溅射产额	399
三、质量干扰	400
四、相对灵敏度因子 (RSF)	403
参考文献	413

第十四章 辉光放电质谱法

第一节 方法原理	414
一、辉光放电的产生	414
二、样品的溅射和电离	415
三、质谱干扰	416
第二节 辉光放电质谱仪	416
一、质谱仪器	416
二、离子源	418
三、质量分析器	418
四、检测系统	418
第三节 实验方法及特点	420
一、样品制备与预处理	420
二、分析参数的选择与分析过程	420
三、分析特点	421
四、分析重现性	423
五、干扰峰的排除	425

第四节 半定量与定量分析	425	二、稀释剂溶液的制备	441
一、半定量分析	425	三、最佳稀释比计算	441
二、定量分析	425	四、混合样品的制备技术	442
第五节 方法应用	428	五、同位素丰度测量	442
一、金属及半导体材料分析	429	六、结果计算	442
二、非导体材料分析	431	第四节 制约测量值不确定度的	
三、深度分析	432	主要因素	443
四、同位素丰度测量	433	一、稀释剂的选择和混合样品的制备	443
五、测量用标准物质	433	二、混合样品的最佳稀释比	443
参考文献	434	三、混合样品的均匀性	444
第十五章 同位素稀释质谱法	436	四、实验过程的流程空白	444
第一节 基本原理	436	第五节 同位素稀释质谱法的应用	446
一、同位素稀释技术	436	一、IDMS 在核科学研究中的应用	446
二、双同位素稀释技术	438	二、IDMS 在地学中的应用	448
第二节 使用仪器	439	三、IDMS 在环境科学中的应用	449
一、高精度天平	439	四、在生命科学中的应用	453
二、质谱仪	439	五、高纯物质分析	454
第三节 实验方法	440	六、IDMS 在化学计量中的应用	455
一、实验程序	440	参考文献	457

第四篇 辅助技术

第十六章 样品制备技术	460	参考文献	476
第一节 质谱测量对样品的基本要求	460	第十七章 计算机在质谱分析	
第二节 水与酸的提纯	461	中的应用	479
一、分析空白	461	第一节 数据采集与处理	479
二、水的提纯	461	一、离子信号的数据采集	479
三、酸的提纯	462	二、质谱数据处理	482
第三节 气体样品制备	469	第二节 控制仪器运行	486
一、样品预处理	469	一、仪器的基本控制	486
二、气体样品制备实例	469	二、仪器的复杂控制	487
第四节 溶液样品制备	471	第三节 仪器的自动保护	488
一、样品分解	471	一、高压保护	488
二、直接稀释法	471	二、真空系统的保护	489
三、酸分解法	472	三、其他保护	489
四、碱熔融法	474	第四节 仪器故障诊断	489
五、样品的分离富集	474	参考文献	490
第五节 固定样品制备	475	第十八章 质谱分析误差	491
一、固体样品制备特点	475	第一节 有关误差的基本术语	491
二、固体样品制备实例	475		

一、误差的定义.....	491	第十九章 标准物质与质谱分析法	512
二、误差的相关术语	491	第一节 概述	512
三、统计的相关术语	491	一、标准物质的概念	512
四、误差的分类	492	二、标准物质的特性	513
第二节 分析误差	492	三、标准物质的分类	515
一、质量歧视效应	492	四、标准物质的分级	516
二、空间电荷效应	494	第二节 有证标准物质的功能和使用	518
三、谱峰叠加的干扰	495	一、有证标准物质的功能	518
四、记忆效应	497	二、标准物质的使用原则	519
五、仪器的死时间	498	第三节 标准物质与质谱分析法的	
六、双电荷离子	498	关联性	520
七、非质谱干扰	498	一、标准物质在质谱分析中的作用	520
第三节 测量值的不确定度	499	二、质谱分析法在标准物质研制	
一、不确定度术语	499	中的作用	521
二、A类标准不确定度评定	499	第四节 标准物质的研制	524
三、B类标准不确定度评定	502	一、立项、技术路线和研制程序	524
四、合成标准不确定度	502	二、同位素标准物质的研制	525
五、扩展不确定度	505	三、化学成分量标准物质的研制	540
六、测量不确定度报告	506	第五节 标准物质信息的获取	546
第四节 测量值的校正	508	一、国际标准化组织/标准物质委	
一、内部校正法	508	员会	546
二、外部校正法	508	二、国际标准物质数据库	547
第五节 测量值的溯源性	509	三、天然基体标准物质数据库	548
一、溯源性的含义	509	四、欧洲标准物质	548
二、化学测量的溯源性	509	五、中国国家标准物质信息	
三、同位素测量量值的溯源性	510	服务平台	550
参考文献	511	参考文献	550
附录	552		
I 元素原子量	552		
II 原子质量表	555		
III 元素同位素组成	559		
IV 元素同位素及同量异位素	566		
V 元素的基本参数	570		
VI 元素周期表	573		
主题词索引	574		
表索引	582		