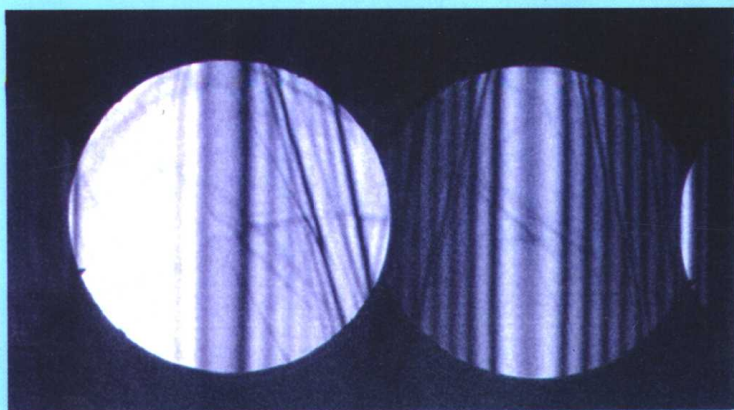
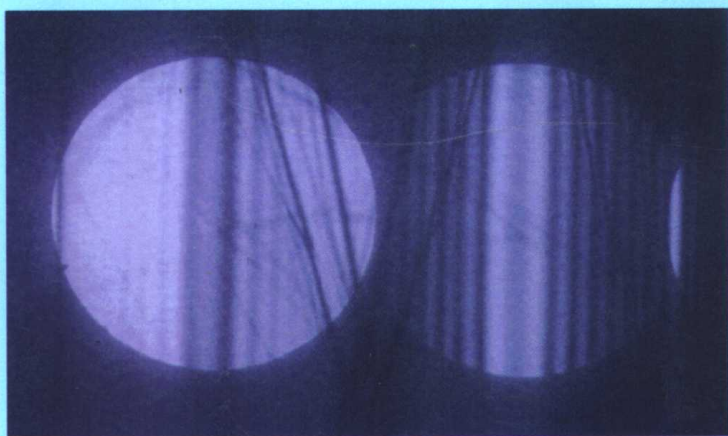
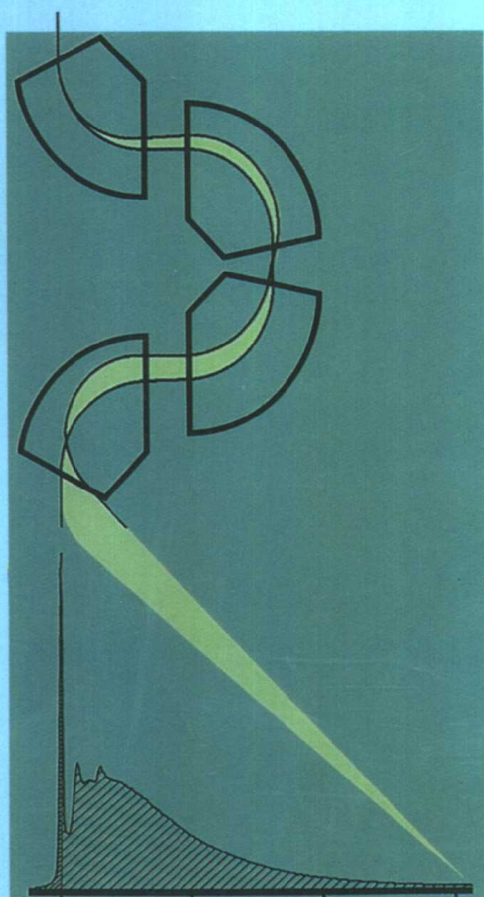


材料评价的分析 电子显微方法

〔日〕 进藤 大辅 合著
及川 哲夫
刘安生 译



冶金工业出版社

材料评价的 分析电子显微方法

[日] 进藤 大辅 合著
及川 哲夫
刘安生 译

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2001

北京市版权局著作权合同登记号图字:01-2001-0619 号

ANALYTICAL ELECTRON MICROSCOPY FOR MATERIALS SCIENCE

Originally published in Japanese by

Kyoritsu Shuppan Co., Ltd., Tokyo, JAPAN

Copyright © 1999 by Daisuke Shindo & Tetsuo Oikawa

All Rights Reserved.

图书在版编目(CIP)数据

材料评价的分析电子显微方法/[日]进藤 大辅,[日]及川 哲夫著;刘安生译. —北京:冶金工业出版社, 2001.10

ISBN 7-5024-2735-X

I. 材... II. ①进... ②及... ③刘... III. 材料—电子显微镜分析 IV. TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 14780 号

材料评价的分析电子显微方法

出版人 曹胜利(北京市东城区沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009;网址:www.cnmp.com)

作者 [日] 进藤 大辅,及川 哲夫 合著

译者 刘安生

责任编辑 张 卫(联系电话:010-64027930; E-mail:bull.zw@sina.com.cn)

美术编辑 李 心

责任校对 符燕蓉

责任印制 牛晓波

版式设计 宋京萍

出 版 冶金工业出版社

发 行 冶金工业出版社发行部(电话:010-64044283; 传真:010-64027893)

冶金书店地址:北京东四西大街 46 号, 邮编 100711; 电话:010-65289081

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京百善印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 12.25 印张

字 数 295 千字

页 数 181 页

版 次 2001 年 10 月第 1 版

印 次 2001 年 10 月第 1 次

印 数 1~2500 册

书 号 ISBN 7-5024-2735-X/TB·58

定 价 38.00 元

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

内 容 简 介

本书全面地介绍了各种分析电子显微方法。对两种最重要的电子显微分析技术——电子能量损失谱和 X 射线能谱分析方法的理论基础、实验技术、谱的解析,进行了系统的讲解,指出了定量分析时的注意事项。书中详细地讲述了能量过滤方法,比较了各种类型的能量过滤器的原理、结构和特点,并介绍了确定杂质原子或添加元素原子位置占有率的通道增强微分析方法、纳米束电子衍射和会聚束电子衍射技术、罗伦兹电子显微方法、电子全息照相术、高角度散射暗场的扫描透射电子显微方法等。

本书除了介绍方法原理和实验技术外,还用较大的篇幅对分析电子显微镜和各种分析装置的基本结构以及工作原理进行了详细的讲解。同时,讲述了电子显微镜的基本操作技术和最佳使用条件的设定方法等。书中还简要地介绍了有关的试样制备技术和方法的要点,附录中列出了许多有用的参数和有关的计算机软件目录。

本书内容系统实用、论述深入浅出,是一本既注重理论基础,又侧重于仪器和实验技术的科技专著。它可供电子显微学工作者、材料研究人员和大专院校有关专业师生阅读参考。

译者的话

分析电子显微方法和高分辨电子显微方法是现代电子显微学领域中的两个重要的组成部分,是从微观尺度认识和研究物质结构的非常有力的手段。现代电子显微镜、各种分析装置和分析方法的进步,不仅使我们可以获得原子分辨率为 0.1nm 的原子排列图像,同时,还可以分析物质中小于 1nm 的微小区域的微结构和组成。现代分析电子显微镜和分析方法具有高空间分辨率和高原子分辨率的特点。因此,它引起了大批电子显微学、材料科学、生物医学、信息产业、地质、石油化工和其他相关学科的工作者的关注,并被大量地用于各个领域的研究与开发中,已成为微结构观察和微区组成分析的不可缺少的工具。然而,微分析技术是建立在近代物理学基础上的,分析仪器的性能也越来越高,因此,研究和分析人员,除了应熟知分析方法的原理和有关的物理基础外,还应深入了解现代仪器的具体结构,熟知应用技巧。只有这样,才能实现仪器的最佳空间分辨率和原子分辨率,充分发挥仪器的性能,获得满意的实验结果。本书正是一本系统地讲解分析电子显微镜和各种附属分析装置的原理、基本结构、各种微分析方法,以及它们的理论基础的专著。本书首先讲述了电子与物质相互作用的机制,并重点阐述了电子与物质间发生的非弹性交互作用的各种现象。分析电子显微方法就是通过探测这些非弹性交互作用的信号,来获取物质的组成、电子态、成分分布、杂质原子位置等信息。同时,对分析中所涉及的一些基本物理参量也进行了简洁的论述。接着,本书全面地讲解了分析电子显微镜的原理和基本结构,对电子枪、加速管、镜筒的各透镜系统、试样台、观察和记录装置都分别作了较为详细的介绍。在此基础上,还讲述了电子显微镜的基本操作技术和最佳使用条件的设定方法。电子能量损失谱分析方法是分析电子显微方法中最重要的技术之一。近年来,这种技术有很大的发展,并已日趋成熟和完善。它不仅对轻元素分析特别有效,而且,已经可以对材料的微区组成进行定量分析。本书以较大的篇幅详细地讲解了电子能量损失谱方法,以及它的理论基础。同时,还举出一些典型的例子来说明解析能量损失谱的具体步骤。可应用的、高性能的能量过滤器的研制成功是近年来电子能量损失谱技术发展中的一个亮点。书中也比较全面地介绍和比较了各种类型的能量过滤器的原理、结构和特点。X射线能谱分析已是一种成熟的技术,作为分析电子显微镜的基本方法,已经被广泛应用。本书对其基础知识及其应用作了系统而简洁的讲解。重点讲述了定量分析时的注意事项。同时,比较详细地讲解了X射线能谱的强度随晶体学取向而变化的物理本质和由此发展起来的确定杂质原子或添加元素原子位置占有率的通道增强微分析方法的原理和定量分析技术。在正文的最后,介绍了分析电子显微方法的各种周边技

4 译者的话

术,包括纳米束电子衍射和会聚束电子衍射技术、罗伦兹电子显微方法、电子全息照相术、扫描电子显微方法和有关的试样制备技术等。附录列出了有关物理参数、电子结合能和特征X射线的能量表格,以及有关计算机软件目录等。总之,本书内容系统实用,论述深入浅出,是一本既注重理论基础的讲解,又侧重于仪器和实验技术介绍的比较全面的分析电子显微方法及其在材料科学中应用的技术专著。

本书的一位作者是日本东北大学多元物质科学研究所的进藤大辅教授,他一直从事电子显微学、图像解析和材料的微分析方面的研究工作。另一位作者是日本电子株式会社的及川哲夫主任研究员,他一直从事电子光学、图像工程和分析电子显微学的研究工作。他们分别是日本电子显微镜学会的理事和常务理事,鉴于他们在电子显微学研究中做出的贡献和在材料评价应用方面取得的创新性成果,他们曾多次获得奖励。进藤教授于1982年获日本电子显微镜学会濑藤奖,1995年获日本金属学会功绩奖。他非常重视科学实验,在技术上精益求精,具有丰富的实践经验,他拍摄的许多电子显微图片都相当完美,受到各国同行的赞誉,1989、1991、1993年均获得了日本金属学会的图片奖。进藤大辅教授与东北大学金属材料研究所平贺贤二教授合作撰写的《材料评价的高分辨电子显微方法》的中译本已于1998年由冶金工业出版社出版,本书正是该书的姊妹篇。本书是根据日本共立出版株式会社1999年出版的《材料評価のための分析電子顕微鏡法》一书日文版翻译的。

本译著的出版得到原著作者的支持和帮助,在此对他们致以诚挚的谢意。同时,译者还要衷心感谢译者所在单位北京有色金属研究总院和日本电子株式会社社长江藤辉一先生对本书出版的支持。最后,译者还要对冶金工业出版社为提高本书的编辑出版质量所做的细致工作和付出的辛勤劳动,表示深切的谢意。

译 者

2000年5月

前 言

先进材料的研究与开发是支持 21 世纪新兴科学技术的基础,而先进材料研究与开发的最基本和最重要的问题是弄清其结构。对于纳米尺度堆积的多层薄膜和从原子尺度控制结构与组成的梯度材料,要搞清楚它们的特性,必须准确地知道纳米范围的结构和组成。作为这样微小区域的结构和组成的分析手段,现在,可以寄希望于既具有高原子分辨率(约 0.1nm)特性,又具有小于 1nm 微小区域分析功能的分析电子显微方法。然而,电子显微镜主机和各种分析装置的性能愈来愈高,要充分发挥仪器特有的性能,就必须深入了解和掌握有关这些仪器的硬件和软件两方面的知识。

根据这种情况,作者出版了这本详细讲述最新的分析电子显微镜的硬件和软件,以及有关各种分析方法的专著。本书的一位作者(进藤大辅)以前执笔撰写的《材料评价的高分辨电子显微方法》(与日本东北大学平贺贤二教授合著)是以电子显微像的观察方法和像的解释为中心内容。而本书则是以仪器的硬件和分析方法为重点。但是,不管是哪一种情况,都是以材料评价为背景,所以,都冠以“材料评价的”书名。

与《材料评价的高分辨电子显微方法》一书相似,本书不仅可供有关电子显微技术的研究人员使用,也尽可能使从事材料研究与开发的有关研究人员和学生更容易阅读。因此,特地给出许多装置的示意图和分析数据。在详细叙述电子显微镜硬件的工作原理的同时,还围绕 EELS(电子能量损失谱)和 EDS(X 射线能谱)两种分析方法的原理和应用进行了通俗易懂的讲解。

本书第 1 章首先叙述了分析电子显微镜的原理和作为其分析方法的基础的电子与物质的相互作用。对计算散射截面和平均自由程等所必要的基本的物理参量也进行了说明。第 2 章介绍了构成分析电子显微镜的硬件,即场发射电子枪、电子透镜等的工作原理和它们的性能。同时,还根据它们的原理,讲解了进行分析时有关硬件的最佳使用条件的设定方法。第 3 章详细地讲解了 EELS 分析方法。在叙述伴随各种非弹性散射过程的能量损失谱的解释的同时,还介绍了最近生产出的能量过滤器的原理和应用。第 4 章讲述了作为分析电子显微镜的基本分析功能,也是用得最多的 EDS 的基础知识及其应用,以及介绍了定量分析时的注意事项。同时,详细地讲述了这种 X 射线能谱分析方法与电子衍射效应结合起来的确定杂质原子位置占有率的通道增强微分析方法(ALCHEMI)的原理和定量分析技术。第 5 章讲述了分析电子显微镜的周边技术。具体地说,简洁地介绍了电子衍射方法、电子全息照相术、扫描电子显微技术等原理和应用,以及试样制备方法。

6 前言

书中所列举的用分析电子显微方法研究材料的许多内容,得到了日本东北大学金属材料研究所的平贺贤二教授,以及作者所属的日本东北大学和日本电子株式会社的许多研究人员的帮助和支持。特别是,本书所采用的一部分数据是与日本东北大学多元物质科学研究所的谷山明博士(现在住友金属工业公司)、村上恭和博士、梁俊模博士(现在韩国现代电子公司)、池松阳一、以及朴英吉共同获得的。另外,本书的出版也得到日本电子株式会社社长江藤辉一先生和共立出版株式会社编辑部副部长古川昭政先生的大力支持。在此一并致以谢意。

作 者

1999 年 4 月

目 录

第 1 章 分析电子显微方法的基础知识	(1)
1.1 电子与物质的相互作用	(1)
1.1.1 电子的散射	(1)
1.1.2 描述电子散射的基本参量	(2)
1.1.3 散射过程的模拟	(6)
1.2 电子的非弹性散射和分析电子显微方法	(7)
1.2.1 电子能量损失谱(EELS)分析方法和 X 射线能谱(EDS)分析方法的概述	(7)
1.2.2 分析电子显微方法和材料评价	(10)
1.3 仪器的计算机控制和分析数据的计算机处理	(12)
参考文献	(13)
第 2 章 分析电子显微镜的构成和基本操作.....	(15)
2.1 分析电子显微镜的基本结构	(15)
2.1.1 电子枪	(16)
2.1.2 高压发生器和加速管	(21)
2.1.3 照明透镜系统和偏转系统	(23)
2.1.4 试样台和试样架	(24)
2.1.5 放大和成像透镜系统	(27)
2.1.6 观察室和照相室(记录系统)	(32)
2.2 电子显微镜的基本操作	(42)
2.2.1 各种透镜的合轴调整和消像散	(42)
2.2.2 物镜聚焦的调整	(47)
参考文献	(49)
第 3 章 电子能量损失谱(EELS)分析方法	(50)
3.1 电子的非弹性散射和 EELS	(50)
3.2 EELS 的谱仪.....	(52)

3.2.1 能量色散	(52)
3.2.2 谱仪的光学系统	(52)
3.2.3 串行探测方式和并行探测方式	(53)
3.2.4 杂散磁场的校正	(55)
3.3 EELS 的分析技术	(56)
3.3.1 加速电压	(56)
3.3.2 接收角	(58)
3.3.3 分析模式	(58)
3.4 EELS 的理论基础	(59)
3.5 能量损失谱的解析	(65)
3.5.1 等离子激发的谱	(65)
3.5.2 非弹性散射平均自由程的测量和试样厚度的确定	(67)
3.5.3 内壳层电子激发谱	(70)
3.6 能量过滤方法的原理和应用	(81)
3.6.1 能量过滤器的光学系统	(81)
3.6.2 能量过滤器的种类和特点	(84)
3.6.3 能量过滤方法的应用	(85)
参考文献	(93)

第 4 章 X 射线能谱(EDS)分析方法

(95)

4.1 特征 X 射线的产生	(95)
4.2 X 射线探测器的种类和原理	(98)
4.2.1 铍窗口型	(98)
4.2.2 超薄窗口型	(98)
4.3 EDS 的分析技术	(101)
4.3.1 X 射线的测量	(101)
4.3.2 空间分辨率	(101)
4.3.3 峰/背比(P/B)	(101)
4.3.4 元素的面分布分析方法	(102)
4.4 定量分析	(103)
4.4.1 k 因子	(103)
4.4.2 定量分析实验	(105)
4.5 定量分析时的注意事项	(106)
4.5.1 试样对 X 射线的吸收	(106)
4.5.2 统计误差	(107)

4.5.3 逃逸峰、合峰等	(108)
4.5.4 晶体试样分析时的注意事项	(108)
4.6 原子位置确定的通道增强微分析(ALCHEMI)方法	(113)
4.6.1 ALCHEMI 的原理	(113)
4.6.2 用 ALCHEMI 确定位置占有率	(116)
4.6.3 ALCHEMI 的精度和注意事项	(118)
参考文献	(121)

第5章 分析电子显微方法的周边技术

(123)

5.1 电子衍射方法	(123)
5.1.1 纳米束电子衍射方法	(123)
5.1.2 会聚束电子衍射方法	(124)
5.2 罗伦兹电子显微方法	(132)
5.2.1 离焦方法	(132)
5.2.2 正焦方法	(136)
5.3 电子全息照相术	(138)
5.3.1 电子全息照相术的原理	(138)
5.3.2 用全息图像测量试样的厚度	(139)
5.3.3 用电子全息照相术研究磁性	(142)
5.4 扫描电子显微方法	(144)
5.4.1 扫描电子显微镜的原理和应用	(144)
5.4.2 高角度散射暗场 STEM 方法	(148)
5.5 试样制备方法	(150)
5.5.1 粉碎和分散方法	(150)
5.5.2 电解减薄方法	(150)
5.5.3 化学减薄方法	(151)
5.5.4 切片方法(超薄切片法)	(152)
5.5.5 离子减薄方法	(152)
5.5.6 会聚离子束(FIB)方法	(153)
5.5.7 真空蒸涂方法	(155)
5.5.8 试样观察时的注意事项	(155)
参考文献	(156)

附录

(158)

附录1 物理常数、转换系数和电子波长等	(158)
---------------------------	-------

10 目录

附录 2 电子结合能和特征 X 射线的能量	(159)
附录 3 真空排气系统	(168)
附录 4 分析电子显微方法的有关计算机软件	(170)
参考文献	(174)
索引	(175)

专栏

1) 电子透镜的工作原理	(29)
2) 高压颤动器和像颤动器	(46)
3) 能量过滤器的像差和单色性	(83)
4) 表示电子能量状态的量子数	(96)
5) 布拉格公式和高阶反射	(130)
6) 三维信息和立体观察	(143)

第 1 章 分析电子显微方法的基础知识

在详细介绍分析电子显微镜的装置和具体的分析方法之前,本章将概述其基础知识:电子与物质的交互作用、分析电子显微方法的原理和分析数据的处理方法。

1.1 电子与物质的相互作用

1.1.1 电子的散射

如图 1-1 所示,在透射电子显微镜(TEM: transmission electron microscope)主体的中部,被高电压加速的电子照射到试样上。在这里,入射电子与试样之间发生各式各样的相互作用。对于非常薄的试样,有许多电子不与试样发生相互作用而穿过试样,这种电子称为透过电子。除这种电子外,其余的电子与试样相互作用而发生散射,试样愈厚,被散射的可能性愈大。物质对电子的散射,可以分为弹性散射(elastic scattering)和非弹性散射(inelastic scattering)两类。对于弹性散射,被散射电子的方向发生变化,但是,散射电子的速度(和能量)不变。引起布拉格反射的衍射波和背散射电子是一种弹性散射。与这类弹性散射电子不同,电子的速度(和能量)发生变化的所有的电子都属于非弹性散射电子。明场·暗场方法、高分辨电子显微方法等的像观察方法主要是利用弹性散射电子,而分析电子显微方法(analytical electron microscopy)则着眼于非弹性散射电子。在非弹性散射中,存在各种激发过程,主要是:

(1) 晶格振动引起的散射(声子激发, phonon excitation);

(2) 价电子集体激发(等离子激发, plasmon excitation);

(3) 带间跃迁;

(4) 内壳层电子激发(核心的激发);

(5) 自由电子激发(二次电子激发);

(6) 韧致辐射(连续的 X 射线激发, bremsstrahlung); 等有关的各种散射过程中的能量损失,请参见 3.1 节。

关注这样的电子能量损失过程,将散射电子展开成谱就是电子能量损失谱方法(EELS: electron energy-loss spectroscopy)。而另一方面,试样接受入射电子的能量产生特征 X 射线,将这种特征 X 射线按能量展开成谱,就称为 X 射线能量色散谱方法(EDS: energy-dispersive X-ray spectroscopy),也叫 EDX 或 EDXS,或简称为 X 射线能谱方法。这两种方法是分析电子显微镜

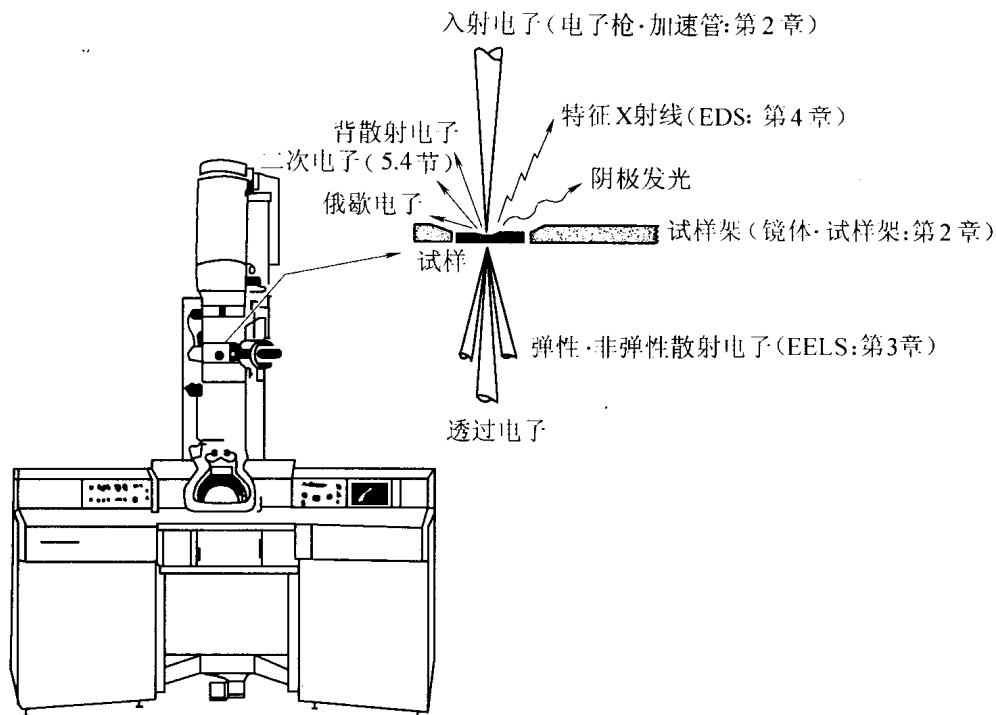


图 1-1 透射电子显微镜内入射电子与试样的相互作用

中用得最多的分析方法。为了掌握分析电子显微方法的概况,1.2.1 节概述了这两种方法的原理。其原理和应用的详细内容将分别在第 3 章和第 4 章中介绍。

1.1.2 描述电子散射的基本参量

物质内电子散射的类型和它的概率随构成物质的元素的种类和入射电子的能量等而变化。电子散射的状况可以用以下所示的几个基本参量来描述。

1.1.2.1 散射截面

散射截面(scattering cross section)能定量地描述散射过程。可以用散射产生的概率来定义散射截面 σ :

$$\sigma = \frac{N}{n_m n_e} \quad (1.1)$$

式中, N 是单位体积中特定散射(弹性散射、内壳层电子激发等)发生的次数,单位是次数/ cm^3 ; n_m 为物质中单位体积的原子数,单位是原子数/ cm^3 ; n_e 是单位面积入射电子的数目,单位是电子数/ cm^2 。式 1.1 中的次数、原子数、电子数是量纲为 1 的物理量。这样,散射截面的单位就是面积, cm^2 。各类散射的散射截面可以用散射角、能量损失等多个物理参量从理论上表述。

包含有总散射角、总损失能量宽度等所有散射结果的散射截面称为总散射截面(total scattering cross section)。由于观测仪器的原因,只能观测特定的散射角宽度和特定的能量损

失宽度等一些特定的量,在这样的限定条件下的散射截面称为部分散射截面(partial scattering cross section)。

A 弹性散射截面

在弹性散射情况中的散射截面称为弹性散射截面(elastic scattering cross section)。入射电子通过原子核附近时,由于原子核库仑力的作用,入射电子轨道弯曲,这种散射被称为核的散射,也称为卢瑟夫散射(Rutherford scattering)。考虑到入射电子的相对论修正和内壳层电子对原子核的屏蔽,文策尔(Wentzel)^[2]以及莫特(Mott)和马西(Massey)^[3]将卢瑟夫散射截面表示成如下公式:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2 e^4}{16E^2} \left\{ \sin^2\left(\frac{\Theta}{2}\right) + \frac{\Theta_0^2}{4} \right\}^{-2} \left\{ 1 - \beta_r^2 \sin^2\left(\frac{\Theta}{2}\right) + \pi\alpha\beta_r \left[\sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) - \sin^2\left(\frac{\Theta}{2}\right) \right] \right\} \quad (1.2)$$

式中 Ω ——立体角;

$$d\Omega = 2\pi \sin\Theta d\Theta \quad (1.3)$$

$\Theta (0 \leq \Theta \leq \pi)$ ——散射角,后面的式 2.5 中的衍射角 θ 与 Θ 的关系为:

$$\Theta = 2\theta \quad (1.4)$$

Z ——原子序数;

E ——以 keV 为单位的入射电子的能量;

Θ_0 ——屏蔽参数(screening parameter);

$\beta_r = v/c$ (c 为光速)可以用下式计算(参见附录 1):

$$\beta_r = \{1 - [1 + (E/511)]^{-2}\}^{1/2} \quad (1.5)$$

式中 511keV——相对于电子静止质量的能量。

$d\sigma/d\Omega$ 是微小立体角中的散射截面,称为微分散射截面(differential cross section)。在式 1.2 中,屏蔽参数 Θ_0 ^[4] 和常数 α ^[5] 依赖于原子序数和入射电子的能量。虽然,微分散射截面与 $(Z/E)^2$ 没有直接的比例关系,但是,一般来说,当原子序数增大和加速电压降低时,微分散射截面有增大的倾向。

考虑到电子的波动性,根据波动方程可以推算出衍射强度分析中所用的原子散射因子 f 与弹性散射截面有如下的关系式:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f|^2 \quad (1.6)$$

B 非弹性散射截面

非弹性散射发生时的散射截面称为非弹性散射截面(inelastic scattering cross section)。在非弹性散射中,有各种类型的散射过程,可以定义各种各样的散射截面。

下面公式表示等离子激发的微分散射截面:

$$\frac{d\sigma(\Theta)}{d\Omega} = \frac{1}{2\pi a_0} \frac{\Theta_p}{\Theta^2 + \Theta_p^2} \quad (1.7)$$

式中, a_0 是波尔半径 (Bohr radius), 它等于 0.0529nm ; $\Theta_p = \Delta E_p / 2E$, ΔE_p 是等离子激发的能量。在式 1.7 中, ΔE_p 的大小从几个电子伏到 30eV , 较之入射电子的能量 (E) 要小得多, 因为 Θ_p 具有很小的值, 随着散射角 Θ 增大, 散射截面将急剧减小。

下式表示了内壳层电子激发的散射截面:

$$\sigma = \frac{\pi e^4 b_s n_s}{\left(\frac{m_0 v^2}{2}\right) E_c} \left\{ \lg \left[c_s \left(\frac{m_0 v^2}{2} \right) / E_c \right] - \lg(1 - \beta_r^2) - \beta_r^2 \right\} \quad (1.8)$$

式中, E_c 是离化能, n_s 是内壳层电子数, m_0 是电子的静止质量, v 是入射电子的速度, e 是电子的电荷, b_s 和 c_s 是依赖于电子壳层 (K 壳层、 L 壳层等) 的常数。因此, 可以看出, 内壳层电子激发的散射截面在很大程度上受常数 b_s 和 c_s 控制。通常也可以根据实测的散射截面来确定这些常数。

1.1.2.2 平均自由程

入射电子在引起某种散射前行走的距离的平均值, 称为平均自由程 (mean free path), 可用 λ 表示。下式表示了散射截面为 σ 的散射平均自由程:

$$\lambda = \frac{A}{\sigma N_0 \rho} \quad (1.9)$$

式中, N_0 是阿伏伽德罗常数 (Avogadro's number), A 是原子质量, ρ 是密度, λ 的单位为 cm 。对于特定的散射现象 i , 只要将其散射截面 σ_i 代入式 1.9 中就能求出其平均自由程 λ_i 。

电子入射到试样并从试样出来期间, 仅发生一次散射的情况, 称为单次散射 (single scattering); 在试样中发生两次至多次散射的情况, 称为多次散射 (plural scattering); 发生更多次的散射的情况, 称为多重散射 (multiple scattering)。

1.1.2.3 束的扩展

很细的电子束照射到试样时, 由于试样对电子束的散射, 引起束扩展。根据戈尔茨坦 (Goldstein) 等人提出的单次散射模型^[8], 可以估算束的扩展。在这个模型中, 散射过程被简化了, 如图 1-2 所示。

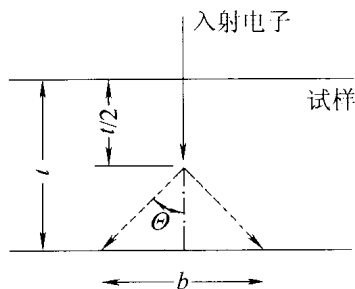


图 1-2 试样中电子束扩展模型的示意图

入射电子在厚度为 t 的试样中只发生一次散射。束的扩展可以用电子散射造成的圆锥形在试样下表面的直径来定义。这个模型将含有 90% 散射的底面的直径定义为束的扩展 (beam broadening) b , 可以用下式表示:

$$b = 6.25 \times 10^2 (\rho/A)^{1/2} (Z/E) t^{3/2} \quad (1.10)$$

式中, b 和 t 的单位为 cm, ρ 的单位为 g/cm^3 , A 的单位为 g/mol , E 的单位为 keV。根据这个关系式, 束的扩展随试样厚度的 $3/2$ 次方增加, 与原子序数成正比, 与加速电压成反比。在实际分析时, 充分地认识这种扩展的趋势是必要的。

1.1.2.4 吸收系数和穿透能力

电子在物质中前进微小距离 dt 时, 强度降低 dI , 它比例于这个位置的电子束强度 I 和通过的距离 dt , 可以写成:

$$dI = -\mu_0 I dt \quad (1.11)$$

式中, μ_0 是比例常数, 它可以用长度单位的倒数来表示, 称为吸收系数 (absorption coefficient) 或线吸收系数。用质量除吸收系数, 就称为质量吸收系数, 它随物质不同而不同。但是, 它是不随物质的集合状态而变的量。在电子吸收过程中, 包含有各种各样的非弹性散射过程。式 1.11 的右边的负号表示它是一个减少的量。入射电子的强度为 I_0 时, 积分式 1.11, 电子束的强度 I 为

$$I = I_0 e^{-\mu_0 t} \quad (1.12)$$

电子通过物质的能力, 即是穿透能力 (penetration power) 可以用吸收系数的倒数来表示。图 1-3 给出了加速电压与穿透能力的关系。对于同样的加速电压, 穿透能力随不同物质而异, 在图 1-3 中, 加速电压与试样穿透能力的关系是以 100kV 的穿透能力为基准进行估算的。一般来说, 随着加速电压升高, 穿透能力增加。

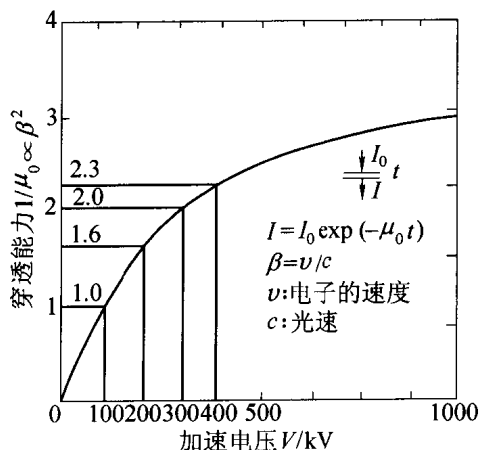


图 1-3 加速电压与试样穿透能力的关系