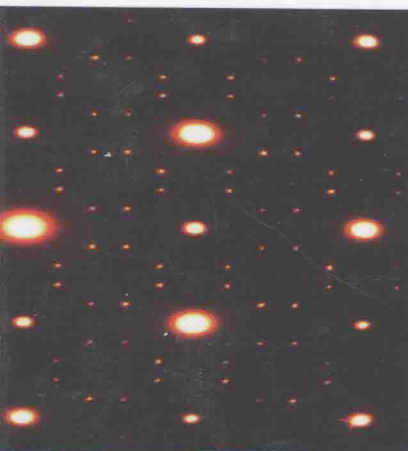


材料科学经典著作选译

第二版

# 透射电子显微镜学 上册

## Transmission Electron Microscopy



David B. Williams C. Barry Carter 著

李建奇 等 译

高等教育出版社

材料科学经典著作选译

TOUSHE DIANZI XIANWEIXUE

第二版

# 透射电子显微学 上册

Transmission Electron Microscopy

David B. Williams C. Barry Carter 著

李建奇 等 译

高等教育出版社·北京

图字：01-2014-7332 号

Translation from the English language edition:

*Transmission Electron Microscopy* by David B. Williams and C. Barry Carter

Copyright © Springer Science+Business Media, LLC 1996, 2009

All Rights Reserved

### 图书在版编目(CIP)数据

透射电子显微学：第2版. 上册 / (美)威廉斯  
(Williams, D. B.), (美)卡特(Carter, C. B.)著; 李  
建奇等译. -- 北京: 高等教育出版社, 2015. 12

(材料科学经典著作选译)

书名原文: *Transmission Electron Microscopy*

ISBN 978-7-04-043150-6

I. ①透… II. ①威… ②卡… ③李… III. ①透射电  
子显微术-高等学校-教材 IV. ①O766

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 136772 号

策划编辑 刘占伟 刘剑波 责任编辑 刘占伟 封面设计 杨立新 版式设计 范晓红  
插图绘制 杜晓丹 责任校对 刘春萍 责任印制 韩刚

---

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京汇林印务有限公司  
开 本 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 42.5  
字 数 760 千字  
插 页 6  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landrac.com>  
<http://www.landrac.com.cn>  
版 次 2015 年 12 月第 1 版  
印 次 2015 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 109.00 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 43150-00

# 译者简介



李建奇，中国科学院物理研究所研究员，博士生导师，入选“百人计划”，国家杰出青年基金获得者。1983年，毕业于西北大学物理系。1990年，在中国科学院物理研究所获得博士学位。1995—1996年，在德国 Max-Planck 固体物理研究所从事高 Tc 超导薄膜微结构分析。1996—1998年，在日本无机材料研究所从事“巨磁阻 Mn-氧化物材料中的电荷有序相变”研究。2001—2002年，在美国 Brookhaven 国家实验室从事“高 Tc 超导材料中电子条纹相”研究。2002年，与物理所其他九位优秀青年学术骨干一起入选国家杰出青年群体。2003年，获北京科技二等奖(排名第一)。现任 *Chinese Physics Letter* 和 *Scientific Reports* 编委。目前主要从事强关联物理系统结构问题的研究，侧重于发展低温电子显微术、EELS 谱分析、时间分辨电子显微术。在国际主要学术期刊上已发表论文 200 多篇。在国际学术会议上做邀请报告 30 余次，并多次在国际知名院所做邀请报告和进行学术交流。组织过多次原位电镜和多铁材料国际研讨会。

# 译者的话

自从 E. Ruska 和 M. Knoll 在 1932 年成功研制出第一台透射电子显微镜 (TEM) 以来, 电子显微镜(电镜)的广泛使用和电子显微学的迅猛发展极大地促进了材料科学、物理学和生命科学的发展。曾经有人说过, 电子显微学发展的历史就是电子与物质相互作用产生的信息不断被利用的历史。高能电子和光波相比具有更短的波长, 因而具有更高的空间分辨率, 透射过样品的电子束携带有强度、相位以及周期性的信息, 这些信息都包含在 TEM 图像中。电子显微学一般包括高分辨电子显微学和分析电子显微学两个方面, 两者相辅相成, 使人们可以在原子尺度上全面认识微观世界。高分辨电子显微方法是一种直接观察材料微观结构的实验技术。自 20 世纪 60 年代以来, 电子显微学的基本理论和实验技术得到了迅速发展, 特别是电镜制造技术和实验室技术的提高、真空技术的发展以及高相干性场发射电子枪的应用, 大大提高了电镜的空间分辨率和微观分析能力。近年来, 球差校正器和电子单色器得到了较为广泛的使用, 透射电子显微镜的分辨率步入了亚埃时代, 球差电子显微镜的普及对电子显微学、材料科学和物理学将产生难以预期的重大影响, 可以解决一些重要的结构问题, 同时也将提出一系列挑战性的新型研究课题。另一方面, 分析电子显微学在数十年的发展中日趋成熟。化学成分分析方法(X 射线能谱分析、电子能量损失谱等)和结构分析方法(选区衍射、会聚束电子衍射等)在金属、半导体、超导体、陶瓷和矿物等材料的结构分析中发挥着不可替代的作用。另外, 不断丰富的研究手段促生了不少新兴的研究领域, 在材料科学和应用器件研究方面取得了诸多突破性的进展。

本书的两位作者 David B. Williams 教授和 C. Barry Carter 教授均是世界上电子显微学领域的著名学者。David B. Williams 教授现任 Alabama 大学 (Huntsville) 校长。从 1976 年开始, 他在 Lehigh 大学的电子光学实验室和电子显微学培训学校从事研究和教学工作 20 余年, 积累了丰富的电镜工作经验。他尤其对原子尺度的元素偏析及其对合金性质的影响有着浓厚的研究兴趣, 其研究团队通过 X 射线能谱和电子能量损失谱的结合发展了一套高分辨微量分析技术方法, 在铝基航空合金、核动力推进反应堆的低合金钢、陨铁、玻璃以及镍基超合金/蓝宝石复合材料的微结构分析中取得了很好的结果。迄今为止, 已合著了 11 本教材和会议论文集, 发表了 220 余篇学术论文, 在 28 个国家的

大学、会议和实验室做了 275 场邀请报告。C. Barry Carter 教授现任 Connecticut 大学化学、材料与生物分子工程系的主任，在博士后期间曾师从著名的 Peter Hirsch 教授，在 Cornell 大学工作的 12 年(1979—1991)期间曾领导了电子显微镜设施的的安装工作，之后在 Minnesota 大学以创办主任的身份建立了高分辨电子显微学中心并担任界面工程中心的副主任，期间建立了一套集合多种显微和衍射功能的标准化表征设备。他的研究方向主要包括陶瓷材料的界面迁移，氧化物相变和固态反应，金属、半导体及陶瓷材料中的位移和陶瓷薄膜生长机制等。迄今为止，已与他人合著过两本教材、6 本会议论文集，发表了 275 篇论文。1990 年以后，总共做了 120 余场邀请报告。这两位材料学领域中卓有建树的作者从事 TEM 相关的教学和研究工作均已超过 35 年，几乎涵盖了 TEM 的所有方面，培养了一批活跃在电子显微学领域的青年科学家。

本书是美国最为流行的教科书之一，并成为世界范围内透射电子显微学的经典教材。*American Scientist* 杂志曾高度评价其为“当今最好的教科书(The best textbook for this audience available)”。全书的写作风格和句式结构适用于课堂讲授，将众多理论性文章和实验性文献的核心内容以简练、明晰的语句并结合实例表达出来。作者在书中建立了完整的理论框架来诠释各项特定的 TEM 技术原理，在保证理论体系严谨的前提下合理地省略了一些物理学和数学处理细节，以保证阅读的流畅性。面对材料工程和纳米科学的研究者，书中不仅包含了大量高质量的图像、谱线和衍射花样，还提供了一系列实际操作说明和实例以供参考。历史是时代进步的基石，电镜相关的技术发展史和经典文献贯穿于全书，使得读者对电子显微学的发展史能够具有更为全面的认识，对现今电镜的发展状况理解得更为深刻。纵观全书，所述内容深入浅出，适合不同专业领域和知识层面的读者研读。

本书分为上下两册，共包含 4 篇：基本概念、衍射理论、成像原理和能谱分析。第一篇主要包括电子显微镜概述、相关的物理知识准备、透镜结构和功能以及样品制备等内容，给读者呈现出清晰的概貌，为后续内容做好铺垫。第二篇详述了诸多与衍射相关的基本概念，包括倒易空间、布洛赫波、衍射图像的获取和分析等内容。第三篇涵盖从基本成像原理到图像获取和分析处理的方法，在结合大量实际材料分析案例的基础上较为全面地阐述了成像的相关内容，其中着重介绍了高分辨电子显微学和图像模拟。第四篇包括 X 射线能谱和电子能量损失谱的分析和成像的相关内容。此次的翻译工作是基于 2009 年出版的 *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science* (第二版) 完成的。全书共计 40 章，每一章又按照知识重点分为诸多精短的小节，在必要的地方均辅以示意图、实验图像和表格进行说明。文中公式众多，但都进行了明晰的推导和清楚的诠释。本书的正文中还别具特色地穿插了不同灰度的方

框来对某些内容进行强调，例如重要的信息、容易犯错的地方、危险的操作或常见的错误。每一章的最后都会对该章节进行简要的总结，并列出了所引用的文献来源。为了方便教学和自学，本书的第二版中新添了大约 800 道自测题和 400 道适用于家庭作业的题目，以增强对教材内容的理解。

在过去 10 年里，随着我国科学事业的发展和国力的增强，很多高等院校和科研院所都购置了高端透射电子显微镜，特别是新型球差校正电子显微镜，目前已经超过 15 台，这些先进设备在材料分析中已成为不可缺少的重要技术手段。值此国内电镜事业蓬勃发展之际，电子显微学人才队伍的培养和技术队伍的建设是我们面临的迫切任务。鉴于该教材具有如前所述的诸多优点，我们本着严谨和求真的精神将英文原版教科书翻译为中文，并修订了原著中的一些印刷或编写错误。希望以此为国内读者提供一本全面而专业的中文教材。由于透射电子显微镜在材料、物理、化学、生物、医学、工程、地质等领域有着广泛的应用，我们希望能够将电子显微学相关的术语和表述本地化、标准化，以增强不同行业间的交流，为从事相关学科研究的读者提供一本易于理解、便于深入的经典教材。

本译著篇幅较长，其中又经历了一次大的原著改版，工作量非常大。在此特别感谢杨槐馨研究员，田焕芳和马超副研究员在本书的校对和统稿过程中所付出的辛勤劳动。此外，译者所在课题组的李俊、王臻、蔡瑶、陈震、王秩伟、施洪龙、曹高龙、王莉、宋源军、卢江波、秦元斌、曾伦杰、曹石、李琳、李莹和潘文等都参与了部分章节的翻译工作，在此对他们致以诚挚的谢意。本译著的出版得到了原著作者的支持和帮助，我们深表感谢。最后译者还要感谢高等教育出版社相关人员为提高本书的出版质量所做的细致工作以及高等教育出版社对本译著出版的资助。

由于译者的水平有限，译作中的错误和疏漏在所难免，恳请广大读者批评指正。

译者

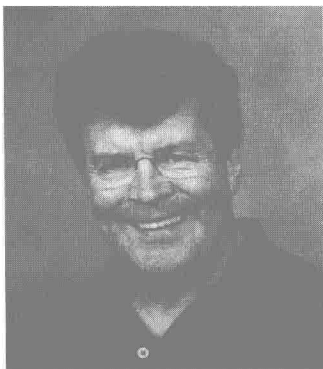
北京

2015 年 4 月

此书献给我们的父母  
Walter Dennis 和 Mary Isabel Carter  
以及  
Joseph Edward 和 Catherine Williams  
由于他们才使得这一切成为可能



# 作者简介



David B. Williams

David B. Williams 在 2007 年 7 月成为 Alabama 大学(Huntsville)的第五任校长。在这之前的 30 多年,他一直在 Lehigh 大学工作,是材料科学与工程(MS&E)系的 Harold Chambers 高级名誉教授。他分别于 1970 年、1974 年、1974 年和 2001 年在剑桥大学获得学士、硕士、哲学博士及理学博士学位,并在那里获得过橄榄球和田径的四次 Blues 奖。1976 年,他转到 Lehigh 大学,最初为助理教授,1979 年升为副教授,1983 年成为教授。1980—1998 年,他负责电子光学实验室,并领导 Lehigh 大学的电子显微镜学院长达 20 多年。1992—2000 年,为 MS&E 系的系主任,2000—

2006 年,为 MS&E 负责研究的副院长。他是多个院校和研究机构的访问科学家,例如新南威尔士大学、悉尼大学、Chalmers 大学(Gothenburg)、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室、德国马普金属研究所(Stuttgart)、法国国家航天研究所(Paris)以及哈尔滨理工学院。

他与别人合著或编辑了 11 本教科书和会议论文集,发表了超过 220 篇期刊文章和 200 篇摘要/会议论文,并在 28 个国家的大学、会议和研究实验室做了 275 个邀请报告。

在许多的奖项中,他获得过美国电子显微学会的 Burton 奖章(1984)、美国微束分析学会(MAS)的 Heinrich 奖章(1988)、MAS 总统科学奖(1997),并且是第一个 Duncumb 奖获得者(2007),以表彰他在显微分析中的杰出成就。在 Lehigh 大学,他获得过 Robinson 奖(1979)和 Libsch 奖(1993),并且是校庆日典礼的演讲人(1995)。他曾多次组织国内和国际电子显微学与分析会议,包括第二届国际 MAS 会议(2000),是第 12 届国际电子显微学会议(1990)的共同主席。他曾是 *Acta Materialia* (2001—2007)和 *Journal of Microscopy* (1989—1995)等杂志的编辑、MAS 的主席(1991—1992)以及微束分析学会国际联合会的主席(1994—2000)。他还是矿物金属与材料学会(TMS)、美国材料学会(ASM)、英国材料学会(1985—1996)以及英国皇家显微镜学会等的会员。



C. Barry Carter

C. Barry Carter 在 2007 年 7 月成为 Connecticut 大学 (Storrs) 化学、材料与生物分子工程系的系主任。在这之前, 他有 12 年 (1979—1991) 在 Cornell 大学的材料科学与工程 (MS&E) 系任职, 有 16 年作为 3 M Heltzer Multidisciplinary 主任在 Minnesota 大学的化学工程与材料科学 (CEMS) 系工作。他分别于 1970 年、1974 年和 2001 年在剑桥大学获得学士、硕士及理学博士学位, 在帝国理工学院 (伦敦) 获得理科硕士学位 (1971) 和 DIC, 并从牛津大学获得哲学博士学位 (1976)。之后在牛津大学其博士论文的指导老师 Peter Hirsch 组做博士后, 1977 年, 他转到 Cornell 大学, 最初为博士后, 然后依次晋升为助理教授 (1979)、副教授 (1983) 和教授 (1988), 并负责电子显微镜设备 (1987—1991)。在 Minnesota 大学, 他是高分辨显微镜中心的创办董事, 随后成为界面工程中心的副主任。他创建了一个综合表征设施, 即在同一位置包含多种显微镜和衍射的装置。他是多个研究机构的访问学者, 例如美国桑迪亚国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室以及 Xerox PARC, 瑞典的 Chalmers 大学 (Gothenburg), 德国的马普金属研究所 (Stuttgart)、Jülich 研究中心、Hannover 大学及 IFW (Dresden), 法国的 ONERA (Chatillon), 英国的 Bristol 大学和剑桥大学 (Peterhouse), 以及日本 NIMS 的 ICYS (Tsukuba)。

他与别人共同编著了两本书 (另一本是与 Grant Norton 共同撰写的 *Ceramic Materials; Science & Engineering*), 并共同编辑了 6 次会议文集, 发表了超过 275 篇的期刊论文以及超过 400 篇的摘要/会议论文。自 1990 年起, 他在多个大学、会议和研究实验室作了 120 多个邀请报告。在诸多奖项中, 他获得过 Simon Guggenheim 奖 (1985—1986)、Berndt Matthias 学者奖 (1997/1998) 以及 Alexander von Humboldt 高级奖 (1997)。他组织过第 16 届固体反应国际研讨会 (ISRS-16, 2007), 曾是 *Journal of Microscopy* (1995—1999) 和 *Microscopy and Microanalysis* (2000—2004) 等杂志的编辑以及 *Journal of Materials Science* 的主编 (2004)。他是 1997 年 MSA 的主席、电子显微学会国际联盟执行委员会的委员 (IFSEM, 1999—2002)。他现在是显微学会国际联盟的秘书长 (IFSM, 2003—2010)。他也是美国陶瓷学会 (1996)、英国皇家显微镜学会、美国材料研究学会和显微镜学会等的会员。

# 前 言

这本书与其他关于 TEM 的书有哪些不同呢？这本书有很多独特的优点，但是我们认为区别于其他这类书的最重要的一点是，这本书是一本真正的教材。这本书是写给高年级的本科生和刚刚开始学业的研究生看的，而不是专门供实验室的研究人员学习的。写这本书时所采用的风格和句子结构与无数课堂使用的讲义一致，而不同于那些正式的科学论文（读的人很少）。因此，我们故意没有给出每个实验事实或理论概念的出处（尽管我们在各章给出了一些提示和线索）。但是，在每章的末尾，我们给出了一些参考文献。当对你自己要寻找的东西更有信心的时候，它们可以引导你找到最好的参考文献，让你了解得更加深入。我们非常相信历史是理解现在的基础的价值，所以将这些技术的历史和重要的历史文献穿插在本书之中。不能仅仅因为一篇文献是上个世纪的（甚至上上个世纪的）就认为它对你没用！类似地，我们从材料科学、工程和纳米技术领域所引用的大量图片，并没有在说明文字中全部给出出处。但是在本书的文前，对于引用了其工作的每位慷慨同事我们都给予了清楚的致谢。

本书由 40 个相对短小的章节组成（一些由 Carter 写的章节例外！）。大部分章节的内容可包含在 50~70 分钟的课程中（特别是当你讲话和 Williams 一样快的时候）。另外，这四卷平装本可以很方便地拿到 TEM 控制台上使用，这样就可以把你看到的和你应该看到的做个对比。也许最重要的是，所有学这门课的学生都可以买得起便宜的平装版。因此我们希望你不必费劲地去理解那些从学长那里弄来的二手的黑白复印书中本该是彩色的复杂图片。我们故意在一些地方采用了彩色图片，而不是它们本来的样子（其实所有的电子信号都不是彩色的），书中有很多框形提示，提醒你注意重要的信息（绿色<sup>①</sup>）、易犯错误的警示（琥珀色<sup>②</sup>）以及危险的操作或常见错误（红色<sup>③</sup>）。

贯穿本书的方法我们试图回答如下两个基本问题：

我们为什么要使用特殊的 TEM 技术？

我们如何将这种技术应用到实践中？

---

① 中文版中用浅灰表示。

② 中文版中用中灰表示。

③ 中文版中用深灰表示。

在回答第一个问题时，我们试图在必要时建立一个坚实的理论基础，虽然并不总能给出所有细节。我们利用这些知识来回答第二个问题，包括用一般的方式解释操作细节，并给出很多说明性的插图。相反，其他 TEM 书籍不是太强调理论就是太注重描述现象(这些书常常包含 TEM 以外的其他内容)。本书协调了这两个极端，它覆盖了足够多的理论而显得比较严格，也不至于招致电子物理学家的愤怒，同时它还包含了充足的操作说明和实际例子，有助于材料工程师和纳米技术人员找到材料问题的答案，而不仅仅是提供花哨的图像、能谱以及衍射花样。我们不得不承认，为了达到这种协调，往往会忽视许多技术背后的物理和数学上大量的细节，但我们要强调的是，这本书的内容大体上是正确的(虽然有时并不是严格准确的!)

这本书覆盖了 TEM 的整个领域，因而在书中不同程度地加入了目前不同种类的 TEM 的技术应用，并试图建立这些仪器诸多方面的一致看法。例如，并没有把传统 TEM 的宽束技术与分析型 TEM 的聚焦束技术分开，而是把它们像一个硬币的两个面那样对待。没有理由认为平行束 TEM 中的“传统”明场像(尽管是更成熟的技术)比聚焦束 STEM 中的环形暗场像更基础。会聚束、扫描束和选区电子衍射同样都是整个 TEM 电子衍射的一部分。

但是，在近 10 年，特别是本书第一版出版以来，TEM 的数量和相关技术有了很明显的增加，显微镜的实验能力变得更加成熟，仪器的电脑控制技术得到了惊人的提高，新的硬件设计和强大的软件开发使其得以处理由几乎完全电子化的设备所产生的大量数据。这个领域内信息的暴增与全球范围内对纳米世界的探索相一致，与仍在生效的摩尔定律也是一致的。在本书的第二版中我们不可能将这些新知识全部加进来，否则会把已经很厚的书变得更加令人望而生畏。在你试图掌握最新进展前，这本再版书可以教会你理解 TEM 的基础知识，这是很重要的。但是我们两人不可能全面理解所有的新技术，特别是，在职业生涯中我们还都身负一些更多的行政职责。因此我们说服了大约 20 个好朋友和同事一起帮我们写了一本配套教材(TEM; a companion text, Williams and Carter (Eds.) Springer 2010)，在本书中我们会经常提到它。这本配套教材就像它自己说的那样——当本书的知识不够用时，它是一个值得咨询的朋友。这本配套教材并不一定更加高深，但是在提供最新的重要进展和复兴传统 TEM 技术方面，它肯定会更加详细。我们汲取了同事们的贡献，并用与本书类似的浅显易懂的方式将这本配套教材重新写了一遍。我们希望通过这种做法以及两本书的深入互引能够指引你走上成为透射电子显微学家的成功之路。

我们两个都有超过 35 年的 TEM 各方面的教学和研究经验。我们研究过不同的材料，包括金属、合金、陶瓷、半导体、玻璃、复合物、纳米和其他颗粒、原子尺度的平面界面以及其他晶体缺陷(但我们都未曾研究过聚合物和生

物材料，这从本书中它们的相对缺失可以看出)。我们培训过一代(希望如此)熟练的电子显微学家，他们中的一些和我们一样，已成为电子显微学领域的教授和研究人员。这些学生代表了我们所热爱的研究领域所做的贡献，我们为他们的成就感到自豪。我们也希望这些仍然相对年轻的人中的一些将来能够写本书的第三版。我们认为，他们会像我们一样，发现写这样一本书会极大地拓宽他们的知识，也会给他们带来很多快乐、挫折，以及长久的友谊。但愿你读本书时可以像我们写这本书那样能获得快乐，我们也希望它不会占用你太多的时间。最后，也希望你能给我们寄来评论，正面的或者负面的都可。可以通过 e-mail 联系到我们：[david.williams@uah.edu](mailto:david.williams@uah.edu) 和 [cbcarter@enr.uconn.edu](mailto:cbcarter@enr.uconn.edu)。

## 第二版序

这本书是进入原子结构世界和材料科学表征的一本很好的入门书，包含如何使用电子显微镜观察和测量原子结构的非常实用的说明。你将从中学到很多，甚至有可能希望在接下来的一生中继续学习（特别是如果某些问题花费了你很大的努力！）。

纳米科学是“下一次工业革命”吗？或许将会是能源、环境和纳米科学的某种结合。无论是什么，这种目前能够在原子水平控制材料合成的新方法将会是纳米科学很重要的一部分，包括从喷气发动机涡轮叶片的制造到催化剂、聚合物、陶瓷和半导体的制造。作为一个习题，计算一下如果飞机涡轮叶片温度可以升高  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，那么跨大西洋的机票价格将会降低多少？现在计算一下由于这种燃煤发电涡轮机温度的提高所导致的  $\text{CO}_2$  释放量的减少以及效率的提高（同样电量而煤炭的使用量减少）。或许你将成为发明这些迫切需要的东西的那个人！美国能源部网站上的重大挑战报告列出了奇异纳米材料在能源研究应用中的重大进展，包括燃料电池分离媒介，以及将来某一天仅使用太阳光就能电解水的光伏材料和纳米催化剂。除了这些功能和结构材料，我们现在也开始首次观察人为制造的原子结构，此时原子可以被单独处理，例如基于可能的量子点的量子计算机。“量子操控”已经实现，并且我们已经观察到了用于标记蛋白质的荧光纳米点。

为了找出所合成的新材料究竟是什么，以及这种材料质量如何（以改进合成方法），这些新的合成方法必须结合原子尺度的组成和结构分析。透射电子显微镜（TEM）已成为实现这一目的的完美工具。它现在可以给出材料的原子分辨图像及其缺陷，以及来自亚纳米区域的能谱和衍射花样。它所使用的场发射电子枪仍然是整个物理学中最亮的粒子源，因此在所有科学研究中，电子微区衍射能从最小体积的物质中给出最强的信号。对于 TEM 电子束探针，我们使用磁透镜（目前进行了球差校正），而相对于 X 射线和中子来说，产生这样的探针（即使非常有限的性能）也是非常困难的。或许最重要的是，结合并行探测，电子能量损失谱能提供无与伦比的空间分辨率（X 射线吸收光谱是不可能达到的，因为被吸收的 X 射线不存在了，而不是损失一部分能量并继续进入探测器）。

材料合成的重大进展得益于半导体工业半个世纪以来的研究。当我们尝试合成和制造其他材料时，对硅而言，目前已经变得很容易了。例如，现在可以

使奇异的氧化物一层层堆叠以形成具有新的有用性质的人工晶体结构。但是这也源于材料表征技术方面惊人的进步和我们在原子尺度观察结构的能力。或许最好的例子是碳纳米管的发现，它最先是通过使用电子显微镜确认的。任何好奇和细心的电子显微学专家现在都能发现新的纳米结构，只要他们在原子尺度仔细观察。重要的一点是，如果这是在一台环境显微镜里观察，他或她将会知道如何制造这些纳米结构，因为使用这种“显微镜中的实验室”可以记录热力学条件。仅仅采用反复尝试的方法就已经发现了很多材料，这或许可以进一步和我们的电子显微镜结合。这是必需的，因为自然界中通常存在“太多的可能性”而无法在计算机上研究——可能结构的数量会随着不同种类原子数的增大而显著增大。

Richard Feynman 曾经说过，“如果在某种大灾难下，所有的科学知识都丢失了，只有一句话可以保存，那么传下去的那句以最少字符包含最多信息的话将是：物质由原子构成。”但是令人惊讶的是，物质由原子构成的这种肯定观点直到近代才发展起来，直至 1900 年，许多人（包括 Kelvin）仍然不相信，即使有 Avagadro 的工作及 Faraday 的电镀实验。Einstein 在 1905 年关于布朗运动的文章以及 Rutherford 的实验最终很具说服力。Muller 第一个观察到了原子（20 世纪 50 年代早期在他的场-离子显微镜中），而 20 年后 Albert Crewe 在芝加哥用他发明的场发射枪扫描透射电子显微镜（STEM）也观察到了原子。希腊原子论者首先提出一块岩石通过反复切割最终将得到不可分割的最小碎片，并且 Democritus 确实相信“除了真空和原子外不存在其他东西。其他一切都是主观的”。Marco Polo 也谈到中国人对眼镜的使用，但正是 van Leeuwenhoek（1632—1723）在 *Phil. Trans.* 的一系列文章中首次使用他大为改进的光学显微镜从而将微观世界带入整个科学界。Robert Hooke 在 1665 年的显微图片中勾画出了通过使用新的复式显微镜所看到的、包括多面体晶体的漂亮图像，而且他用加农炮弹堆叠的图像来解释这些面的角度。或许这是自希腊人之后物质的原子理论的第一次复苏。20 世纪 30 年代 Zernike 的相位板将相位衬度引入到此前无法看见的超薄生物“相位物体”，而这也是高分辨电子显微学相应理论的先驱。

对于材料科学领域的电子显微学家来说，由于电子显微镜的许多模式和探测器的持续快速发展，过去的 50 年是非常令人振奋的。从使我们能够理解晶体及其缺陷的 TEM 图像的 Bragg 衍射衬度和柱体近似的理论发展到应用于原子尺度成像的高分辨电子显微学理论，再到所有强大的分析模式的理论和相关探测器的理论，例如 X 射线、阴极射线荧光及能量损失光谱，我们都能看到稳定的发展。我们总是认为缺陷结构在大多数情况下能够调控性质——最普通的（一级）相变都是从某些特定的位置开始的。在电子氧化物中，电荷密度的激

发和缺陷的整个领域亟待应用电子显微镜来透彻理解。例如，陶瓷的相变韧化理论是 TEM 观察和理论结合的一个完美的例子，同样的例子还有合金析出硬化或者半导体晶体生长的早期阶段。在相变过程中研究缺陷的漫散射随温度的函数关系仍处在初级阶段，虽然我们具有比 X 射线方法强得多的信号。通过定量会聚束电子衍射，器件中纳米尺度的应变场的成像得到了及时发展，以解决半导体路线图上所列出的问题(你的笔记本的速度取决于应变诱导的迁移率增强)。在生物学中，TEM 数据量化更被重视，我们已经进行了很多大的蛋白质的三维图像重构工作，包括核糖体(根据 DNA 指令合成蛋白质的工厂)。这些工作应该成为材料科学界持续追求更好的数据量化的模式。

像所有最好的教材一样，这本教材也是从讲稿中整理出来的，经过很多年和很多代学生的试用纠错。作者们从许多深奥的理论文章和大量文献中提取精髓，用最简单、最清晰的方式(使用很多例子)来解释现代透射电子显微学最重要的概念和实例。这是对该领域和教学世界的巨大贡献。愿你的爱好从原子开始!

J. C. Spence

物理学终身教授

亚利桑那州立大学和劳伦斯伯克利国家实验室



# 第一版序

通过在原子尺度对加工处理-结构-性质的关联的研究，电子显微学使得人们对材料的理解发生了革命性的变化。如今我们甚至可以调整材料的微观结构(或介观结构)从而得到一些特殊的性质。现代透射电子显微镜——TEM——由于其非同寻常的功能，可以给出几乎所有结构、相和晶体学信息，从而使我们能够获得如此之功绩。因此，显而易见，现代材料教育领域的课程都会适当加入电子显微学的相关知识。使用合适的教材对将要从事电镜操作和量化分析的学生以及研究人员进行指导和帮助也是十分必要的。

全书包含 40 章，由 Barry Carter 和 David Williams(和我们当中的很多人一样，他们都在剑桥和牛津接受过很好的电子显微学教育)编著，这正好满足了人们对电子显微学教材的需求。如果你想从电镜样品制备(最终限制)或者仪器构造方面着手学习电子显微学；或者你想知道如何正确使用 TEM 以得到图像、衍射和能谱——都可以从本书中找到答案！据我所知，本书是目前唯一一本涵盖 TEM 领域过去 30~40 年的所有显著进展的完整著作。本书的时间安排恰到好处，而且我个人非常激动的是，我们所做的部分工作也囊括在这些进展中——对材料科学有重大影响的进展。

实际上，电子显微学领域之外的很多人会认为 TEM 只是用于摄取一些漂亮的图片作为参考而已，那么请停下来浏览本书，从中可以知道，电镜工作者为了做出很好的工作，需要掌握以下诸多超乎寻常的知识：晶体学、衍射、图像衬度、非弹性散射以及能谱学。请记住，这些在过去都有其各自的研究领域。如今，要想解决重要的材料科学问题，一个人必须对上述各个领域都有基本的了解。TEM 是一种可以达到原子极限的表征材料的技术手段。对于 TEM 的使用以及结果的解释需要慎之又慎，很多情况下会涉及不同领域的许多专家。当然，电子显微学是基于物理学的，因此有抱负的材料科学家不仅需要掌握诸如固体物理、晶体学以及晶体缺陷等方面的知识，而且还要对材料科学有基本的理解，否则，怎么能够让 TEM 在材料分析中最大限度地发挥其作用？

对 TEM 已说了不少。这部优秀的新著无疑填补了一块空白。对研究与物性相关的结构(尤其是缺陷)感兴趣的科研工作者和研究生而言，本书提供了坚实的基础知识。甚至现在希望本科生也能够了解一些电子显微学的基础知识，而本书或者其中合适的部分可以作为材料科学与工程专业的本科生的