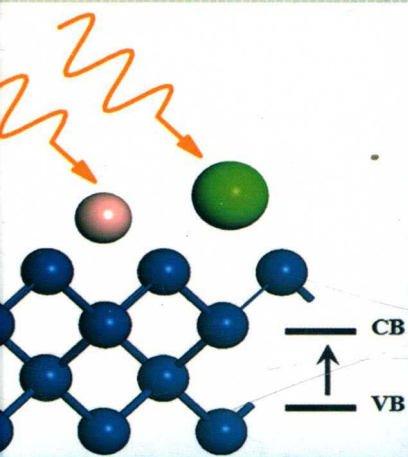


材料科学经典著作选译

第六版

固态表面、界面 与薄膜

Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films
(sixth edition)



Hans Lüth 著

王聪 孙莹 王蕾 译

高等教育出版社

译

第六版

固态表面、界面 与薄膜

Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films
(sixth edition)

Hans Lüth 著

王聪 孙莹 王蕾 译

高等教育出版社·北京

图字：01-2016-7176 号

Translation from the English language edition:

Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films by Hans Lüth

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1993, 1995, 2001, 2010, 2015

Springer-Verlag Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

固态表面、界面与薄膜：第六版 / (德) 汉斯·吕斯著；王聪，孙莹，王蕾译. --北京：高等教育出版社，2019. 3

(材料科学经典著作选译)

书名原文：Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films; sixth edition

ISBN 978-7-04-047854-9

I. ①固… II. ①汉… ②王… ③孙… ④王… III. ①固体-表面-研究②固体-界面-研究③固体-薄膜-研究 IV. ①O481

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 122809 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 卢艳茹 封面设计 杨立新 版式设计 王艳红
插图绘制 杜晓丹 责任校对 胡美萍 责任印制 韩刚

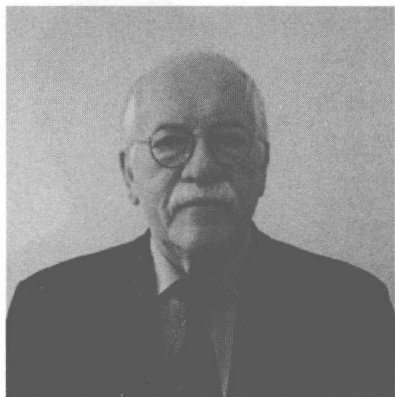
出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京汇林印务有限公司	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.com
印 张	38		http://www.hepmall.cn
字 数	720 千字	版 次	2019 年 3 月第 1 版
插 页	2	印 次	2019 年 3 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	128.00 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 47854-00

作者简介



Hans Lüth, 1940 年出生于德国亚琛, 分别于 1965 年、1968 年在亚琛科技大学获得物理学学士、博士学位。1974—1986 年, 先后在 IBM 托马斯·沃森研究中心(美国)、巴黎大学(法国)、艾克斯-马赛大学(法国)、摩德纳大学(意大利)作为客座科学家和访问学者工作。1980 年, 获得物理学教授职称, 2000 年, 同时成为亚琛科技大学的电子工程学教授。1988 年, 担任德国于利希研究中心生物/纳米系统研究所主任。2006—2007 年, 同时担任于利希研究中心关键技术部主任。由于在新型半导体纳米结构领域独特的贡献, 获得德国真空技术学会的鲁道夫·雅克尔奖; 此外, 凭借在德国-斯洛伐克科技合作中的贡献, 获得斯洛伐克科学院纪念奖。由于他杰出的科学工作以及具有全球影响力的教科书 *Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films* 的出版, 被授予法国上阿尔萨斯大学荣誉博士称号。研究方向主要是半导体界面和纳米结构物理学以及量子电子学等领域。

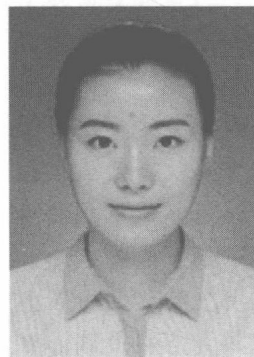
译者简介



王聪：1966年9月生，北京航空航天大学物理学院教授、博士生导师。于1989年、1995年分别在兰州大学物理系、中科院物理所获学士、博士学位，1998年在德国作为洪堡学者工作，2003年在北京航空航天大学获教授资格，2006年入选教育部新世纪优秀人才。曾先后在德国、法国、英国、美国短期访问和工作。2012年获得教育部自然科学二等奖(第四作者)。兼任中国物理学会理事，中国晶体学会理事，多个国际国内学术期刊编委。主要从事凝聚态物理，尤其是功能材料和薄膜物理的研究工作。已发表学术论文200余篇。



孙莹：1983年12月生，北京航空航天大学物理学院副教授。于2005年、2010年分别在中国地质大学(北京)、北京航空航天大学获学士、博士学位，2010—2013年在日本国立材料研究所(NIMS)从事博士后研究工作，2013年通过海外直评获得北京航空航天大学副教授资格。主要从事强关联材料体系反常物性探索，包括反常热膨胀、近零电阻温度系数、压磁等。已发表学术论文80余篇。



王蕾：1983年6月生，北京科技大学物理系讲师。于2008年、2014年分别获得河南师范大学学士学位和郑州大学博士学位。2014年9月至2018年1月在北京航空航天大学、日本东北大学从事博士后研究。主要从事功能材料的反常物性研究，如负热膨胀、负线性压缩等。目前发表学术论文30余篇。

译者序

Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films 的译本终于可以跟广大读者见面了,欣慰之余,也甚感当时任务之繁重与曲折,因此耗费时日,以至于推迟至今。

原著是我做洪堡学者时从德国卡尔斯鲁厄的一个书店购买的,也是我至今从国外书店直接购买的唯一一本英文专业书。记得初见此书时眼前一亮,浏览之后感觉此书基础理论丰富,涵盖面广,是表面、界面与薄膜研究领域难得的一本参考书。当时就曾冒出一种想法:如果能将此书译成中文介绍给国内的同行和专业读者,将是一件很有意义的事,尤其对于从事相关工作的青年教师与研究生非常有用。正如作者前言中所说,甚至可将此书作为研究生教材使用。

2012年,高等教育出版社的刘剑波编辑找我谈著书的事,我就顺便提了这个建议,能否找国内学者将原著翻译成中文,由高等教育出版社出版。刘剑波编辑看过原著后也有同感,欣然接受我的建议,积极与原著的出版社及作者沟通,商谈翻译版权的事宜,顺势也把此书的翻译任务交给了我。

当时,我很乐意地接受了这个光荣的任务,但第一次接受这样的任务,显然小看了翻译工作的艰难与繁重。译书比著书困难,主要问题是不能任意发挥,必须严格把握原著的意思,准确翻译。因此,对有些词的译法不得不字斟句酌,例如大家常见的“solid-state physics”和“bulk solid-state physics”,后者如何翻译才能与前者区别开来?我的理解是,后者可译为“固体物理”,前者应译为“固态物理”,显然,“固态物理”包涵更广,不用区分不同形状,涵盖了表面与界面,而“固体物理”重在“体”上,主要论及三维目标。这些需要谨慎遣词造句的地方很多,甚至有些很难准确把握。由于时间关系及翻译水平有限,中文译本不尽完美,留下许多遗憾。另外,由于不同章节我分配给自己不同的博士生帮助翻译,难免有些概念、名称的翻译在不同章节用了不同的中文词汇与表达,尽管最大限度地作了核对与校正,仍难免疏漏,有待读者提出批评意见后在后续版本中再加以认真修正和完善。

在翻译过程中,我的许多研究生做了大量的工作,分别为当时的博士研究生吴素娟、纳元元、刘宇、褚立华、崔银芳、闫君、薛亚飞、宁玉平、程久珊、邓司浩、武永鑫、史可文、宋平等;硕士研究生丁磊、史再兴、张放放等;以及北京航空航天大学材料科学与工程学院的王瑶副教授。大部分研究生

都已获学位并走上了不同的工作岗位，在这里一并表示真诚的感谢！正是他们的大力支持才使本书繁重的翻译工作得以完成。

王聪 教授

孙莹 副教授

王蕾 讲师

于北京，北京航空航天大学物理学院

2018年12月

中文版序

近几十年来，表面、界面与薄膜物理成为凝聚态物理越来越重要的学科分支，如果没有表面、界面效应的广泛知识，许多本该属于固态物理一般领域的现象和实验技术，例如量子霍尔效应、巨磁阻、用于研究电子能带结构的光电子发射光谱学等将无法讨论。特别是由于纳米结构科学的快速发展，其性质的确定必须依赖于对表面与界面现象的认识。在接近应用学科领域，例如微电子学、催化、腐蚀等，表面和界面物理长期以来已成为必不可少的研究内容。

虽然如此，也不论全球许多大学多少年来都讲授表面、界面与薄膜物理这门课程，综合性地论述此课题的书籍却少之又少。在我自己的教学与科研生涯中，总是有这样的感觉：当新生来攻读学位，尤其是从事博士研究工作时，我能推荐给他们的也只有几篇相关的综述性文章或专题论文，非常缺乏一本能够快速引导学生进入这个令人着迷的现代研究领域的综合性强的入门级教科书，这便是我写此书的初衷。本书就是这样一本教材，能让学生们尽快掌握基本的物理模型、基础实验技术及其与相关应用领域如微观分析、催化、微电子学之间的关系。

本书是一本关于表面、界面与薄膜物理学的教科书，涵盖该学科理论和实验两方面的内容，尤其通过一系列“附录”讨论了超高真空技术，电子光学以及这个领域最重要的分析、表征技术，主要章节清晰、综合性地描述了表面、界面与薄膜的制备方法，还详细考虑了界面的结构、振动态、电学性质，以及表面的层状生长和吸附原理等。另外，由于半导体界面、异质结和空间电荷层在微电子学中的本质作用，特别强调了其内容。由于自旋电子学近些年引起的广泛兴趣，也讨论了自旋轨道耦合对表面态的影响，以及在拓扑绝缘体中拓扑保护表面态上引起的现象。本书还专门辟出一章讨论界面的集体耦合行为：界面和薄膜磁学以及接近界面和薄膜内的超导现象在信息技术，尤其在量子运算中发挥的重要作用。在介观模型方法的框架内而不是原子级别层次上，这两个课题在结合了近年来的最新实验与理论结果的基础上均在本书中被论述。

本书是基于我在亚琛科技大学(RWTH Aachen Technical University)的讲义，以及在学生研讨会和指导学生学位论文等活动中的学术报告整理而成。

我要感谢本书的译者：王聪博士、孙莹博士、王蕾博士，是你们最终让我的思想能够以悠久华夏文明的语言形式得以传播！

Hans Lüth

于亚琛，于利希

2016年

前 言

表面和界面物理一直是现代科学研究许多分支不可缺少的基础，尤其是对于各种纳米科学，正如纳米结构的性质就很大程度上取决于其表面和界面。因而，随着这个科学领域的快速发展，材料和物理现象研究的新领域层出不穷。一个典型的例子是自旋自由度，这个概念已在界面和薄膜物理中出现，而过去仅在磁学中讨论。但不论怎样，电子自旋在自旋电子学 (spintronics) 和量子信息技术中起着越来越重要的作用，它代表着信息的载体，而不像过去在典型纳米电子学中仅考虑电荷。

鉴于这个原因，在新版本中，自旋轨道相互作用作为新的一节已经补充进来，其为从外部控制自旋(不使用外磁场)的主要机制。新版本还讨论了表面态的自旋轨道耦合效应，介绍了新的拓扑绝缘体的材料体系。在那些由相对重的元素，例如 Bi、Sb 等组成的化合物材料表面，由于自旋轨道的强耦合，将会出现新型的十分稳定和不易破坏的表面态。

另一方面，表面、界面与薄膜研究对一些成熟的实验技术的进一步发展 with 提升有很大的兴趣，例如 X 射线衍射、角分辨光电发射谱或光学反射谱。因此，新版本扩展了附录 XII 来描述角分辨光电发射谱 (ARPES) 这一先进技术，同时实时记录了总能量与发射角的关系图。新版本还补充了附录 XIII，主要描述反射各向异性光谱 (RAS)，还增加了一个新的附录 IX，专门描述 X 射线衍射对薄膜体系和异质结的表征，这一重要的、具有实际应用价值的典型表征技术在以前的版本中均被忽略了。另外，10.2 节补充了化学吸附的内容，简短描述了在吸附过程中分子与表面的多维相互作用势。根据复杂而自洽的电荷密度泛函理论 (DFT) 模拟获得更为细致的对吸附过程的描述，有助于很好地理解主要的化学吸附机制。

在新版本的工作中，我得到在于利希研究中心和亚琛科技大学 (RWTH) 工作的一些年轻同事的大力支持。我非常感谢 Gustav Bihlmayer 在自旋轨道相互作用和拓扑绝缘体方面的有益讨论并提供了相关的图片资料，感谢 Christian Pauly 提供的图片材料，感谢 Lukasz Plucinski 关于 ARPES 及其相关图片的讨论，也特别感谢 Gregor Mussler 用他的具体实验支撑本书中与 X 射线衍射相关的新附录的内容，另外在所有新图片的绘制中他也给予了巨大的帮助。

最后，还要感谢 Springer 出版社的 Claus Asheron 对新版本的建议以及在出版过程中的新安排。

Hans Lüth
于亚琛，于利希

第二版前言

近几十年来，表面和界面物理已逐渐成为凝聚态物理越来越重要的研究分支。若没有关于表面和界面效应的广泛知识，许多物理现象和实验技术就不能很好地理解并实现，例如研究电子能带结构的量子霍尔效应和光发射谱，都属于固体物理最基本的研究领域。从现在固态研究的普遍发展趋势来看，纳米结构量子物理学正变得越来越具有相关性。同时，与越来越多的应用研究领域相关，例如微电子学、催化及腐蚀。我们越是试图努力获得对物质在原子级别上的认识，我们对微结构的兴趣就越大，表面和界面物理就变得更具有必要性。

虽然情况如此，但在科学书籍的市场上并没有几本从更为广泛、基本的意义上探讨这一课题的著作，尽管表面和界面物理至今在全世界许多大学已开课多年。在我自己的教学和科研生涯中，我总是有这样的感觉：当我的学生在我的课题组开始从事其学位论文以及博士研究工作时，尽管我能给他们推荐一些好的综述性文章和前沿专著，但是推荐一本真正具有综合性、导论性的探讨现代科学研究中最为前沿和备受关注的研究领域的专业书籍却一直很难。

因此，我决定为我的学生写这样一本书，以便他们能从中学习到基本的物理模型、基本的实验技能及其与某些应用领域如微观分析、催化和微电子相关的内容。

本书包括表面和界面物理的理论与实验两方面内容。一些实际的考虑作为各章后的附录而专门强调，其中描述了超高真空(UHV)技术、电子光学、表面光谱学、界面的电学-光学表征技术等。其主要章节对于表面和界面的制备方法、结构、振动和电子学性质、解吸附和层状生长学内容进行了广泛而详尽的论述。由于在现代微电子学中的本质性作用，重点论述了关于半导体界面和异质结的电子学性质。半导体微电子学作为界面物理学的主要应用被进一步强调，这是由于其应用和基础研究的差距与诸如催化、腐蚀和表面保护的研究相比更小。

本书的形成是基于我在亚琛科技大学(RWTH)的讲义以及与我的同事 Pieter Balk、Hans Bonzel、Harald Ibach、Jürgen Kirchner、Claus-Dieter Kohl 和 Bruno Lengeler 组织的学生研讨会内容。因此，非常感谢参与这些研讨会的同事和同学们，以及他们在这些课题讨论中作出的贡献和营造的学术气氛。我以前的一些博士生，如 Arno Förster、Monika Mattern-Klosson、Richard Matz、

Bernd Schäfer、Thomas Schäpers、Andreas Spitzer 和 Andreas Tulke，也提供了非常有价值的建议。同时，我要感谢 Angela Rizzi 对本稿的审阅以及许多有益的贡献。

原英文稿得到 Springer Verlag 出版社的 Angela Lahee 大刀阔斧的修改、润色与提高。我十分感谢她对我的帮助和提供的许多学术上的线索。我也感谢 Ilona Kaiser 在最后成书过程中与我愉快的合作。另外，此书如果没有 Helmut Lotsch 长期的支持是很难完成的，因此我也非常感谢他。

最后，我要感谢一直关心我的家人在我写此书的过程中所给予的长期耐心的支持，无以言谢。

Hans Lüth

于亚琛，于利希

1992年10月

目 录

第 1 章 表面、界面物理：定义及其重要性	1
附录 I 超高真空(UHV)技术	6
附录 II 粒子光学和光谱学的基础	17
问题	28
第 2 章 严格定义的表面、界面及薄膜的制备	29
2.1 需要超高真空的原因	30
2.2 UHV 条件下的材料界面解理	31
2.3 离子轰击与退火	34
2.4 蒸发与分子束外延(MBE)	36
2.5 利用化学反应外延生长膜	45
附录 III 俄歇电子能谱(AES)	50
附录 IV 二次离子质谱(SIMS)	56
问题	65
第 3 章 表面、界面和薄膜的形貌与结构	67
3.1 表面应力、表面能和宏观形状	68
3.2 弛豫、重构和缺陷	72
3.3 二维点阵、超结构和倒易空间	77
3.3.1 表面点阵和超结构	77
3.3.2 二维倒易点阵列	81
3.4 固-固界面结构模型	81
3.5 薄膜的形核和生长	86
3.5.1 薄膜生长的模型	86
3.5.2 形核的“毛细模型”	90
3.6 薄膜生长研究：实验方法和结果	92
附录 V 扫描电子显微镜(SEM)和微探针技术	105
附录 VI 扫描隧道显微镜(STM)	111
附录 VII 表面扩展 X 射线吸收精细结构(SEXAFS)	121
问题	127
第 4 章 表面和薄膜散射	129

4.1	表面散射运动学理论	130
4.2	低能电子衍射的运动学理论	134
4.3	从 LEED 图中能知道什么	137
4.4	动力学 LEED 理论和结构分析	142
4.4.1	匹配公式化	142
4.4.2	多重散射理论体系	145
4.4.3	结构分析	146
4.5	非弹性表面散射实验的运动学理论	147
4.6	非弹性电子散射的电介质理论	151
4.6.1	固体散射	151
4.6.2	表面散射	154
4.7	薄表面层的介电散射	160
4.8	一些低能电子在表面非弹性散射的实验例子	164
4.9	颗粒散射的经典限制条件	170
4.10	原子碰撞的守恒定律: 表面化学分析	173
4.11	卢瑟福背散射 (RBS): 通道和阻塞	176
附录 VIII	低能电子衍射 (LEED) 和反射高能电子衍射 (RHEED)	187
附录 IX	X 射线衍射 (XRD) 对薄膜特性的描述	195
附录 X	电子能量损失谱 (EELS)	205
问题	213
第 5 章	表面声子	215
5.1	线性链上的“表面”晶格振动的存在	216
5.2	扩展到具有表面的三维固体	220
5.3	瑞利波	224
5.4	作为高频过滤器的瑞利波的应用	227
5.5	表面-声子(等离子体激发)极化子	228
5.6	实验和实际计算的散射曲线	237
附录 XI	原子和分子束散射	243
问题	249
第 6 章	表面电子态	251
6.1	近自由电子模型中半无限链的表面电子态	252
6.2	三维晶体表面态及其带电特征	256
6.2.1	本征表面态	256
6.2.2	非本征表面态	259
6.3	光电发射理论	259