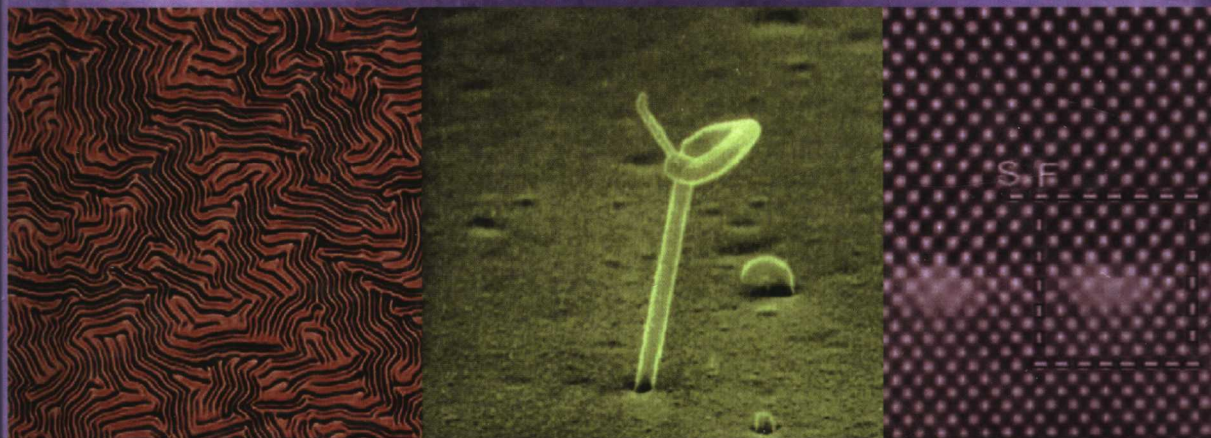


# 薄膜材料

## ——应力、缺陷的形成和表面演化

〔美〕 L.B.Freund, S.Suresh 著

卢磊 等译 王中光 校



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 薄膜材料

## ——应力、缺陷的形成和表面演化

[美] L. B. Freund S. Suresh 著

卢磊等 译  
王中光 校

科学出版社

北京

图字: 01-2005-2775

## 内 容 简 介

本书总结了过去几十年里薄膜材料的研究进展, 同时将重点放在薄膜中内应力的起源、发展及其影响等诸多方面, 书中不仅系统考虑了薄膜-基底系统或多层膜系统的整体变形及薄膜的断裂、脱层和翘曲, 而且还考虑了更小尺度上薄膜中位错的形成及非弹性变形. 薄膜中应力的影响与薄膜材料结构之间的联系贯穿于整书的讨论. 通过举例计算和有实际意义的实例分析及讨论, 更加具体地阐明了书中的基本概念, 并于每章后附有习题.

本书可供从事材料科学和工程及相关研究领域工作, 特别是从事薄膜材料研究的科技人员和微电子机械领域从事设计制造的工程技术人员阅读, 也可作为有关专业的研究生和大学高年级本科生的教材和参考书. 本书英文版被美国哈佛大学、布朗大学、麻省理工学院、斯坦福大学等大学用作研究生教材.

Thin film materials: stress, defect formation, and surface evolution

By L. B. Freund and S. Suresh

© 2003 by Cambridge University Press.

### 图书在版编目(CIP)数据

薄膜材料: 应力、缺陷的形成和表面演化/(美)弗罗伊德(Freund, L. B.), (美)苏雷什(Suresh, S.)著; 卢磊等译. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-013427-1

I. 薄… II. ①弗… ②苏… ③卢… III. 薄膜-工程材料 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 136854 号

责任编辑: 胡 凯 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 安春生 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 40 3/4

印数: 1—3 000 字数: 769 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

## 中文版序

《薄膜材料》英文版(第一版)于2003年12月由英国剑桥大学出版社出版。我们对世界各地的同行和研究人员给予该书的反馈信息深表感谢。

《薄膜材料》中文版的出版为我们提供了一个特别的机会,把我们对这种有趣并且有用的材料的理解以他们自己的语言传播给中国的学生、研究人员和工程师,他们辛勤工作在一个科学技术和教育等领域正经历翻天覆地变化的国度里。我们感谢中国科学院金属研究所的同行对这本书细致的翻译工作。我们特别感谢卢磊研究员的热忱奉献和在开展这项翻译工作中的杰出组织领导;特别感谢金属研究所疲劳与断裂国家重点实验室前主任王中光研究员,在本书整个的翻译过程中,他提供了宝贵的帮助、意见和建议。

我们还要真诚地感谢卢磊研究员以及她的同事,包括陶乃镛博士、张广平博士、史亦农博士、张磊博士、王镇波博士,他们为完成本书的翻译付出了艰辛的劳动。感谢中国工程院前副院长、中国国家自然科学基金委员会顾问师昌绪先生,他热情地为本书中文版作序。感谢中国科学出版社为本书的出版提供了财政支持。同时我们也感谢剑桥大学出版社在组织这次翻译中的合作和协助。

L. B. Freund

S. Suresh

2006年2月

## 译 序

随着电子工业的发展和信息产业的兴起,薄膜材料和薄膜技术已成为材料科学与工程研究领域的重点之一,尤其是在印刷线路的大规模制备和集成电路的微型化方面,薄膜材料更是显示出独有的优势.薄膜材料作为材料科技进展的一个重要组成部分已经渗透到现代科技和国民经济的各个重要领域.除信息电子和光电子以外,诸如航空航天、医药以及其他制造业都离不开薄膜技术和薄膜材料.如今,薄膜材料正在向综合型、跨学科方向发展,它必将对整个材料研究发展起到推动和促进作用.

为了促进国内材料科学和工程的进一步发展,中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室卢磊博士组织了一批年轻的科研工作者,翻译了由著名固体力学家、美国国家工程院院士、Brown 大学的 L. B. Freund 教授和著名材料科学家、美国国家工程院院士、麻省理工学院的 S. Suresh 教授撰写、英国剑桥大学出版社出版的 *Thin Film Materials — Stress, Defect Formation and Surface Evolution* 一书,并由该实验室王中光研究员负责全文校对.

有关薄膜材料制备方法的专著,国内外屡见不鲜,而对影响薄膜性能的应力分析的专著却很少见.作为迄今为止唯一一本对薄膜材料的应力及其影响进行全面和系统论述的专著,该书有以下几个特点:

(1) 内容丰富、涉及面广.该书不仅总结了过去几十年薄膜材料的研究进展,同时将注意力放在了薄膜中内应力的起源、发展及其影响等诸多方面,这是该书有别于以往以介绍制备和表征为重点的其他薄膜材料专著之处.

(2) 在内容选择方面,作者在本书所涉及主题的选择上突出了重点,在阐述每一主题的深度上也有所取舍.书中不仅考虑了薄膜-基底系统或多层膜系统的整体变形及薄膜的断裂、脱层和翘曲,还考虑了更小尺度上薄膜中位错的形成及非弹性变形,以及薄膜中应力的影响与薄膜材料结构之间的联系.

(3) 本书还通过举例计算和有实际意义的实例分析及讨论,进一步深化了书中的基本概念.

(4) 每章后都附有习题,这有助于加深读者对相关内容的理解.

(5) 本书正式出版前的手稿曾作为美国哈佛大学、布朗大学、麻省理工学院、斯坦福大学等著名大学的研究生教材,并得到许多宝贵的反馈意见,使得该书的结构更加合理,陈述更为清晰易懂.

因此,该书对于我国从事材料科学前沿领域及薄膜材料研究的科研人员来讲

无疑是一本极为有价值的参考资料；对于相关专业的研究生和大学生，也是一本很好的教科书或课外参考资料。

感谢 L. B. Freund 教授、S. Suresh 教授和原出版社(Cambridge University Press) 给予中国学者翻译与出版权，感谢科学出版社的大力支持，使本书能够及时问世。

師昌緒  
2006.2.16

## 译者的话

《薄膜材料——应力、缺陷的形成和表面演化》一书于2003年12月由英国剑桥大学出版社出版,恰巧本书译者之一卢磊博士正在美国麻省理工学院访问工作,其合作者是该书的作者之一 Subra Suresh 教授.作为薄膜材料研究领域唯一一本对薄膜材料中应力及其作用进行全面、系统论述的专著,这本书不仅总结了过去几十年薄膜材料的发展,而且最重要的是,它不同于已出版的以制备和表征为重点的其他薄膜材料专著.该书将重点放在了薄膜中内应力的产生、发展及其影响后果方面,这本书不仅可以作为薄膜材料前沿研究的一本有价值的参考资料,也可作为专业人士和研究生的教科书.目前,国内该领域还没有这样一本全面系统的著作.因此在卢磊博士回国后同王中光研究员商议,认为很有必要将该书翻译成中文出版,以满足国内广大读者的需求.通过作者 Suresh 教授的努力,英国剑桥大学出版社同意将本书的中文翻译权转让于我们.在国内经卢柯研究员的推荐,科学出版社欣然同意接受本书的出版工作.

本书的序以及第1、3章由卢磊翻译,第2章由陶乃镛翻译,第4、5章由张广平翻译,第6、7章由史亦农翻译,第8章由张磊翻译,第9章由王镇波翻译,全书由王中光研究员校对及审阅,部分章节由张奇打字输入.在此向为本书翻译出版付出辛勤工作的所有人员表示衷心的感谢.

在本书的翻译过程中,根据原书作者后来提供的勘误表,经作者同意后,原书中的一些错误在中文版中我们已作相应修改.

由于时间仓促,加上译者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者多加指正.

译者

2006年1月15日

# 序 言

在过去的几十年,材料科学与工程领域已经奠定了其在工程和应用科学各个领域发展中的中心地位,而在这期间薄膜材料的研究已成为材料科学与工程领域发展中的主题之一.如本书所理解,薄膜材料指的是与相对较厚基底结合的薄膜、多层薄膜材料、基底上的图案薄膜和无支撑薄膜.为更加特殊的目的而合成和制备这些材料的方法和在更小的尺度范围表征材料的检测仪器的重大进展是现代工程进步的关键所在.

21 世纪伊始,美国国家工程院发布了一个项目成果报告,这个报告旨在确认上世纪最有意义的二十项工程成就.从所编纂的清单上可以明显看出,20 世纪下半叶的成就,例如,电子学、计算机、卫生技术、激光和纤维光学,都是建立在材料的创造和高效应用之上的.而薄膜材料是材料科技进展的一个主要组成部分.事实上,在美国工程院承认的成就中,材料对某些特殊应用中的进展的影响是如此之大,以致高性能材料自身的发展就是最有意义的成就之一.

本书的目的在于总结过去几十年里出现的薄膜材料领域的进展,重点放在内应力的产生及其影响方面.内应力可以导致一系列不良后果,包括过度变形、断裂、脱层、永久性变形和微观结构的改变.尽管存在这些可能的问题,薄膜材料已跻身于工程系统中以实现广泛范围的实际服役功能,如微电子器件及封装、微机电系统或 MEMS 以及旨在得到热的、机械的、摩擦的、环境的、光的、电的、磁的和生物的功能的表面涂层.在更大程度上,这种努力的成功得益于估计微小材料系统中应力的可靠方法的研究,以及评估系统完整性和功能性的框架的建立.即使在材料承载能力不是其主要的功能特征的情况下,应力导致材料失效的可能性仍然是限制技术发展的一个障碍.在某些情况下,比如在电子应用的带隙工程中,以及在存储弹性能驱动的小结构的自组装中,应力有着所期望的影响.我们希望,这本书所提供的信息可用来作为这个领域所取得进展的指示器,以及作为一些新兴方向进一步发展的指南.

第 1 章主要讨论薄膜材料中残余应力的起源和确定制备方法与应力产生之间的关系.在后续几章中讨论应力的影响,一般根据所涉及的主要物理现象的尺寸范围组织陈述.第 2 章和第 3 章考虑了薄膜-基底系统或者多层膜结构的整体变形,接着在第 4 章和第 5 章考察薄膜断裂、脱层及翘曲的一般失效模式.然后,重点转移到较小尺度,在第 6 章中讨论位错形成的条件,在第 7 章讨论薄膜的非弹性变形.最后,第 8 章和第 9 章介绍材料表面的稳定性和表面形貌或合金



成分的演化问题. 只要有可能, 将把薄膜中应力的影响与薄膜材料的结构联系起来.

我们认识到, 本书中所涉及的每一个主题本身都可以发展成为内容丰富的专题, 但是我们在这里的目的不是详细阐述任何一个有限范围的主题. 这个领域本质上是跨学科的, 我们的目的是提供一个关于薄膜材料中应力及其影响问题的全面介绍. 采取这样的方式意味着在阐述某一主题时, 深度上应有所取舍, 而且在不同主题的选择上有所权衡. 我们希望读者能认为我们所作的选择是合理的. 本书的主要目的是为描述薄膜中应力的起源和预测缺陷形成、表面演化和有关效应中应力的影响, 提供有关科学基础的清晰阐述. 书中引用的许多原始工作的文献可作为进入该领域档案文献的指南. 另外, 举例计算和有实际意义的案例的研究讨论使所发展的基本概念更加具体. 实验方法、结果和观察的描述是作为发展所考察的主题的概念结构的整体部分包含在本书中的. 每一章末尾有一套习题, 这将进一步扩充所讨论过的内容, 同时能够激励该领域的新人进一步应用概念. 在这样的结构下, 我们希望本书能成为在该领域前沿的研究人员的一本研究参考资料, 成为工程师的现成可用结果的有用汇编, 成为有志于在该领域发展的研究生或高年级本科生的一本教科书.

出版本书的想法源于一门关于薄膜的课程, 从 1992 年开始就为 Brown 大学固体力学和材料科学专业的学生讲授这门课, 同时, 该书的出版也是该领域研究日渐活跃的自然结果. 我们对很多学生、博士后研究人员和同事都心存感激, 他们积极参与这门课程, 他们的热情是撰写本书最初的动力.

我们也非常感谢许多以不同方式对本书准备工作做出贡献的同事. 我们尤其感谢 John Hutchinson, 他用这本书的部分原稿作为给哈佛大学和麻省理工学院研究生课程的教材, 并反馈了许多宝贵的信息. John Hutchinson 和 Bill Nix 都真诚地与我们分享了他们自己的薄膜材料课程的教材. 我们的同事 Ian Blech, Eric Chason, Ares Rosakis, Vivek Shenoy 和 Carl Thompson 阅读了本书原稿的不同章节, 并提供了大有裨益的建议. 一些研究生, 特别是 Yoonjoon Choi 和 Nuwong Chollacoop 参与了基于本书原稿的课程学习, 他们在澄清和改进陈述方面提供了若干建议. 最后, 我们还感谢许多同事, 他们提供了很多自己工作的图片和照片, 本书中引用这些材料时也表示了感谢. 剑桥大学出版社的 Tim Fishlock 对书中公式和文档排版提供了极大的便利, 在此表示感谢. 我们也感谢 Desiree Soucy, 他审查了复制版权保护材料必要的协议, 并校正了整篇手稿.

L.B. Freund 对国家自然科学基金出资的 Brown 大学材料研究科学与工程中心表示衷心感谢, 感谢它长期资助薄膜材料一般领域的研究和通过中心促进的合作. 他还感谢加州理工学院的工程与应用科学部为其公休假提供了方便, 他们盛情的接待和舒适的环境为该书提供了初期成型的契机. Subra Suresh 感谢由

海军研究处资助的麻省理工学院国防大学纳米技术创新计划，以及由新加坡-麻省理工学院联合资助的微-纳米体系先进材料计划，他们资助了本书涵盖的所有领域的研究。

如果没有我们家人的积极支持和热情鼓励，这样宏大的项目是不可能完成的。我们非常感激他们在过去几年里对我们长时间埋头于这件工作的持续宽容和理解。

# 目 录

第 1 章 引言和总论 .....	1
1.1 薄膜组态分类 .....	2
1.2 薄膜沉积方法 .....	4
1.2.1 物理气相沉积 .....	4
1.2.2 化学气相沉积 .....	7
1.2.3 热喷涂沉积 .....	8
1.2.4 实例: 热障涂层 .....	10
1.3 气相沉积薄膜的生长方式 .....	12
1.3.1 从气相到吸附原子 .....	12
1.3.2 从吸附原子到薄膜生长 .....	14
1.3.3 自由表面或界面的能量密度 .....	16
1.3.4 表面应力 .....	20
1.3.5 基于表面能的生长方式 .....	22
1.4 薄膜微观结构 .....	24
1.4.1 外延膜 .....	25
1.4.2 实例: 垂直孔洞表面发射激光 .....	31
1.4.3 多晶体膜 .....	33
1.4.4 实例: 磁存储介质薄膜 .....	36
1.5 微电子结构的制备 .....	39
1.5.1 光刻 .....	39
1.5.2 铜互联体的大马士革加工 .....	40
1.6 MEMS 结构的制备 .....	42
1.6.1 整体微加工 .....	42
1.6.2 表面微加工 .....	43
1.6.3 成型加工 .....	44
1.6.4 NEMS 结构 .....	45
1.6.5 实例: 振动梁细菌探测器 .....	47
1.7 薄膜应力源 .....	49
1.7.1 薄膜应力的分类 .....	49
1.7.2 外延薄膜中的应力 .....	50
1.8 多晶体薄膜中的生长应力 .....	51
1.8.1 岛合并前的压缩应力 .....	53
1.8.2 实例: 表面覆盖的影响 .....	55

1.8.3	岛接触引起的拉应力	56
1.8.4	连续生长过程中的压缩应力	58
1.8.5	最终应力与晶粒结构间的关系	59
1.8.6	应力演变的其他机制	60
1.9	薄膜应力的后果	67
1.10	习题	68
<b>第2章</b>	<b>薄膜应力和基底曲率</b>	<b>71</b>
2.1	Stoney 方程	71
2.1.1	实例: 外延应变引起的曲率	76
2.1.2	实例: 热应变引起的曲率	76
2.2	薄膜厚度对双层薄膜曲率的影响	80
2.2.1	任意薄膜厚度的基底曲率	80
2.2.2	实例: 双层薄膜最大热应力	85
2.2.3	温度调节双金属片的历史记录	86
2.3	曲率测量方法	88
2.3.1	扫描激光法	89
2.3.2	多束光学应力敏感技术	90
2.3.3	光栅反射法	91
2.3.4	相干梯度传感器方法	93
2.4	层状和成分梯度薄膜	96
2.4.1	非均匀错配应变和弹性性能	97
2.4.2	错配应变中的恒定梯度	100
2.4.3	实例: 成分梯度薄膜的应力	101
2.4.4	周期多层薄膜	104
2.4.5	实例: 多层薄膜整体热弹性响应	104
2.4.6	微小总厚度的多层薄膜	106
2.4.7	实例: 薄多层膜中的应力	107
2.5	几何非线性变形范围	108
2.5.1	线性范围的极限	108
2.5.2	非线性范围内的轴对称变形	110
2.6	平衡形状的分叉	113
2.6.1	均匀曲率的分叉分析	114
2.6.2	均匀曲率状态的可视化	120
2.6.3	一般曲率变化的分叉	123
2.6.4	基底曲率变形图	125
2.6.5	实例: Cu / Si 系统的曲率图	126
2.7	习题	127
<b>第3章</b>	<b>各向异性和图形薄膜中的应力</b>	<b>130</b>
3.1	弹性各向异性	130

3.2 立方晶体的弹性常数	132
3.2.1 有效模量的方向变化	134
3.2.2 特殊情况的各向同性	136
3.3 非立方晶体的弹性常数	136
3.4 层状外延生长材料的弹性应变	138
3.5 一般错配应变的薄膜应力	140
3.5.1 薄膜材料的任意取向	141
3.5.2 实例: (111)取向的立方薄膜	143
3.6 薄膜应力的 X 射线衍射测量	145
3.6.1 应力与 $d$ 间距之间的关系	146
3.6.2 实例: 由测量 $d$ 间距得到的应力	148
3.6.3 从非对称衍射测无应力 $d$ 间距	148
3.6.4 实例: 参考晶格间距的测定	152
3.7 各向异性薄膜引起的基底曲率	153
3.7.1 各向同性基底上的各向异性薄膜	153
3.7.2 排列一致的正交各向异性材料	155
3.8 压电薄膜	158
3.8.1 电场引起的错配应变	158
3.8.2 实例: 电场引起的基底弯曲	159
3.9 平行薄膜裂纹的周期排列	160
3.9.1 薄膜裂纹引起的平面应变曲率变化	161
3.9.2 薄膜裂纹引起的双轴弯曲	168
3.10 平行线或条纹的周期排列	171
3.10.1 线结构引起的双轴弯曲	171
3.10.2 基于曲率的体平均应力	176
3.10.3 镶嵌结构中的体平均应力	178
3.11 图形薄膜中应力的测量	181
3.11.1 基底曲率法	181
3.11.2 X 射线衍射方法	182
3.11.3 微观拉曼光谱法	182
3.12 习题	184
<b>第 4 章 脱层和断裂</b>	<b>187</b>
4.1 薄膜边缘附近的应力集中	188
4.1.1 薄膜	189
4.1.2 实例: 控制界面剪切应力的方程	191
4.1.3 边缘应力的更一般描述	193
4.2 断裂力学的概念	197
4.2.1 能量释放率和 Griffith 准则	198

4.2.2	实例: 层状复合材料的界面韧性	202
4.2.3	裂纹前缘应力场	204
4.2.4	局部应力状态的相角	206
4.2.5	界面脱层的驱动力	207
4.3	断裂功	209
4.3.1	界面分离行为的表征	209
4.3.2	制备和界面化学的影响	212
4.3.3	局部相角对断裂能的影响	216
4.3.4	实例: 贝壳的断裂阻力	217
4.4	残余应力引起的薄膜脱层	220
4.4.1	直脱层前沿	222
4.4.2	实例: 热应变引起的脱层	224
4.4.3	扩展的圆形脱层前沿	224
4.4.4	应力集中区的相角	228
4.4.5	靠近薄膜边缘的脱层	230
4.5	界面韧性测试方法	231
4.5.1	双悬臂梁试验组态	231
4.5.2	四点弯曲梁试验组态	232
4.5.3	压缩实验试样组态	235
4.5.4	叠层实验组态	237
4.6	残余应力引起的薄膜开裂	239
4.6.1	薄膜中的表面裂纹	239
4.6.2	埋藏层中的隧道裂纹	246
4.6.3	裂纹阵列	247
4.6.4	实例: 外延膜的开裂	251
4.7	界面处的裂纹偏折	252
4.7.1	偏离界面的裂纹偏折	253
4.7.2	裂纹偏折进入界面	256
4.8	习题	261
<b>第 5 章</b>	<b>薄膜的翘曲、鼓包和剥离</b>	<b>264</b>
5.1	均匀宽度条带的翘曲	264
5.1.1	后翘曲响应	265
5.1.2	脱层生长的驱动力	270
5.1.3	界面局部应力状态相位角	271
5.1.4	弹塑性材料的限制	274
5.2	圆片的翘曲	276
5.2.1	后翘曲响应	277
5.2.2	例题: 温度变化引发脱黏区翘曲	280
5.2.3	脱层驱动力	281

5.2.4 实例: 氧化膜翘曲	284
5.3 二次翘曲	286
5.4 实验观察	287
5.4.1 边缘脱层	287
5.4.2 初始圆形脱层	288
5.4.3 缺陷对翘曲脱层的影响	291
5.4.4 实例: 碳薄膜翘曲的不稳定性	293
5.5 无脱层的膜翘曲	295
5.5.1 软弹性基底	295
5.5.2 黏性基底	297
5.5.3 实例: 玻璃基底翘曲波长	299
5.6 均匀宽度加压鼓包	299
5.6.1 小挠度弯曲响应	300
5.6.2 大挠度响应	301
5.6.3 薄膜响应	304
5.6.4 脱层力学	306
5.7 圆形加压鼓包	309
5.7.1 小挠度弯曲响应	309
5.7.2 薄膜响应	310
5.7.3 大挠度响应	312
5.7.4 残余应力的影响	314
5.7.5 脱层力学	316
5.7.6 鼓包试验组态	318
5.8 实例: MEMS 电容传感器	319
5.9 薄膜剥离	322
5.9.1 脱层驱动力	322
5.9.2 脱层力学	324
5.10 习题	324
<b>第 6 章 外延系统中的位错形成</b>	<b>327</b>
6.1 位错力学的概念	327
6.1.1 位错的平衡和稳定性	328
6.1.2 自由表面附近的弹性场	330
6.2 应变外延薄膜的临界厚度	334
6.2.1 临界厚度准则	335
6.2.2 临界厚度与错配应变的关系	336
6.2.3 实例: (001)Si 基底上 SiGe 薄膜的临界厚度	339
6.2.4 临界厚度的实验结果	340
6.2.5 实例: 晶体取向对临界厚度 $h_{cr}$ 的影响	340
6.3 单根贯穿位错	342

6.3.1	贯穿位错的运动条件	343
6.3.2	临界厚度条件的局限性	346
6.3.3	非平衡条件下的贯穿位错	348
6.4	层状薄膜和梯度薄膜	351
6.4.1	未应变层覆盖的均匀应变层	352
6.4.2	应变层超晶格	355
6.4.3	成分梯度薄膜	356
6.5	基于螺型位错的模型系统	357
6.5.1	模型系统的临界厚度条件	357
6.5.2	薄膜-基底模量差的影响	359
6.5.3	实例: 模量差异和位错形成	361
6.6	非平面外延系统	362
6.6.1	埋入的应变量子线	364
6.6.2	自由表面对量子线稳定性的影响	368
6.7	基底柔度的影响	371
6.7.1	临界厚度的估计	372
6.7.2	实例: 柔性基底的临界厚度	374
6.7.3	黏性底层引起的错配应变弛豫	375
6.7.4	作用在层中位错上的力	377
6.8	位错形核	380
6.8.1	表面位错环的自发形成	381
6.8.2	完整晶体中的位错形核	383
6.8.3	应力集中对位错形核的影响	386
6.9	习题	388
<b>第7章</b>	<b>位错交互作用和应变弛豫</b>	<b>390</b>
7.1	平行错配位错的交互作用	390
7.1.1	基于平均应变的位错间距	391
7.1.2	位错同时形成的间距	392
7.1.3	基于最后位错插入的间距	394
7.2	相交错配位错的交互作用	395
7.2.1	贯穿位错的障碍	397
7.2.2	错配位错的交叉排列	401
7.3	位错形成引起的应变弛豫	403
7.3.1	弛豫模型的构造	403
7.3.2	实例: 半导体薄膜中的位错控制	406
7.4	理想塑性薄膜的连续力学分析	409
7.4.1	双层结构的塑性变形	410
7.4.2	温度循环作用下的薄膜	414
7.5	薄膜的应变-硬化响应	416



7.5.1	各向同性硬化	418
7.5.2	实例: 具有各向同性硬化的温度循环	420
7.5.3	随动硬化	421
7.5.4	比例应力历史	424
7.6	基于塑性速率方程的模型	426
7.6.1	跨越障碍的位错热激活滑移	427
7.6.2	晶界扩散的影响	429
7.7	热循环过程中的结构演变	431
7.7.1	晶粒结构演变的实验观测	431
7.7.2	贯穿位错的实验观测	433
7.7.3	温度循环过程中的应变弛豫机制	435
7.8	薄膜中塑性屈服的尺寸依赖性	440
7.8.1	塑性响应的观测	441
7.8.2	尺寸依赖的塑性流变模型	444
7.8.3	弱膜-基界面的影响	446
7.9	确定薄膜塑性响应的方法	447
7.9.1	薄膜的拉伸试验	447
7.9.2	微梁挠度法	449
7.9.3	实例: 薄膜的平面应变延展	451
7.9.4	基底曲率法	452
7.9.5	纳米压痕仪	453
7.10	习题	456
<b>第 8 章</b>	<b>表面的平衡和稳定性</b>	<b>459</b>
8.1	热力学框架	459
8.2	材料表面的化学势	461
8.2.1	演化着的自由表面	461
8.2.2	沿双材料界面的传质	464
8.2.3	材料界面迁移	467
8.2.4	裂纹表面的生长和愈合	470
8.3	受双轴应力的材料中的椭圆孔	472
8.3.1	化学势	473
8.3.2	形状稳定性	474
8.4	平表面的周期性扰动	477
8.4.1	小幅正弦起伏	477
8.4.2	实例: 应变外延膜的稳定性	481
8.4.3	基底刚度对表面稳定性的影响	483
8.4.4	二阶表面扰动	485
8.4.5	实例: 小坡度近似的有效性	489
8.5	平表面的一般扰动	490