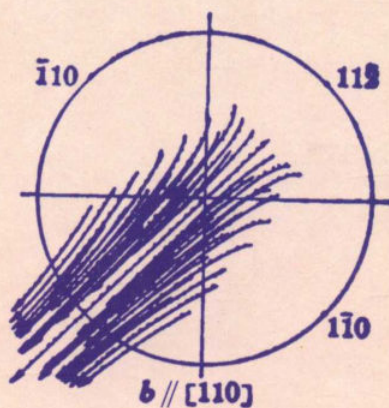
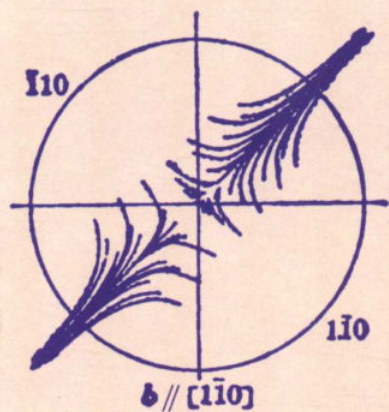
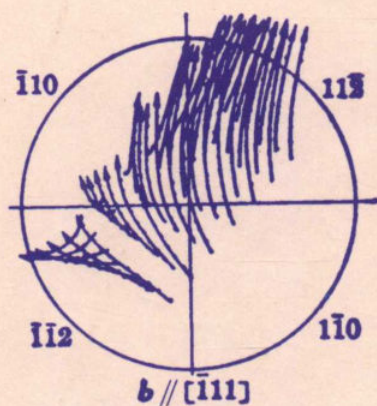
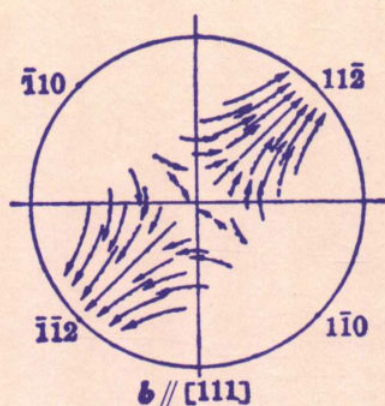


晶体生长的物理基础

闵乃本 著





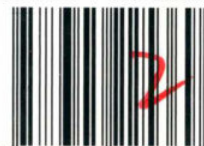
闵乃本

男，汉族，1935年8月生，江苏如皋人，南京大学教授，中国科学院院士，第三世界科学院院士，毕业于南京大学，日本东北大学理学博士。历任南京大学固体微结构国家重点实验室主任、学术委员会主任，江苏省自然科学基金委员会主任，教育部科学技术委员会副主任，教育部“材料科学与工程教学指导委员会”主任，中国晶体学会理事长，国家人工晶体研究与发展中心主任，江苏省自然科学基金委员会主任，国家“973计划”顾问专家。全国政协第九、十、十一届常委，江苏省政协第八、九届副主席，九三学社第十、十一届中央副主席，江苏省九三学社第四、五届主委。1964年其设计的“电子束浮区熔仪”获国家计委、国家经委与国家科委颁发的“工业新产品”二等奖，1983年其专著《晶体生长的物理基础》获全国优秀科技图书一等奖，同年，其关于“晶面热致粗糙化的研究”获犹他大学及黑格斯公司联合设立的“大力神奖”，1998年获“何梁何利科学与技术进步奖”，1999年获第三世界科学院基础科学奖——物理奖，2000年获美国科学信息研究所 (ISI) 经典引文奖，2006年获国家自然科学一等奖，1982年、2005年、2007年、2015年，四次获得国家自然科学二等奖。1995年获“全国优秀教师”称号及奖章，2001年获“全国模范教师”称号及奖章，2009年被评为“新中国成立以来江苏省十大杰出人物”，2010年获“全国优秀科技工作者”称号，2018年获“为江苏改革开放作出突出贡献的先进个人”称号。他曾参与国家中长期科学和技术发展规划纲要的制定，对促进我国科技发展作出了重要贡献，推动了量子调控等重大研究计划的设立和实施。

2013年，经国际小行星命名委员会批准，命名国际编号为199953号小行星为“闵乃本星”。

策划编辑/吴汀
责任编辑/王南雁
责任校对/杨博
审读编辑/沈洁
封面设计/清早

ISBN 978-7-305-22536-9

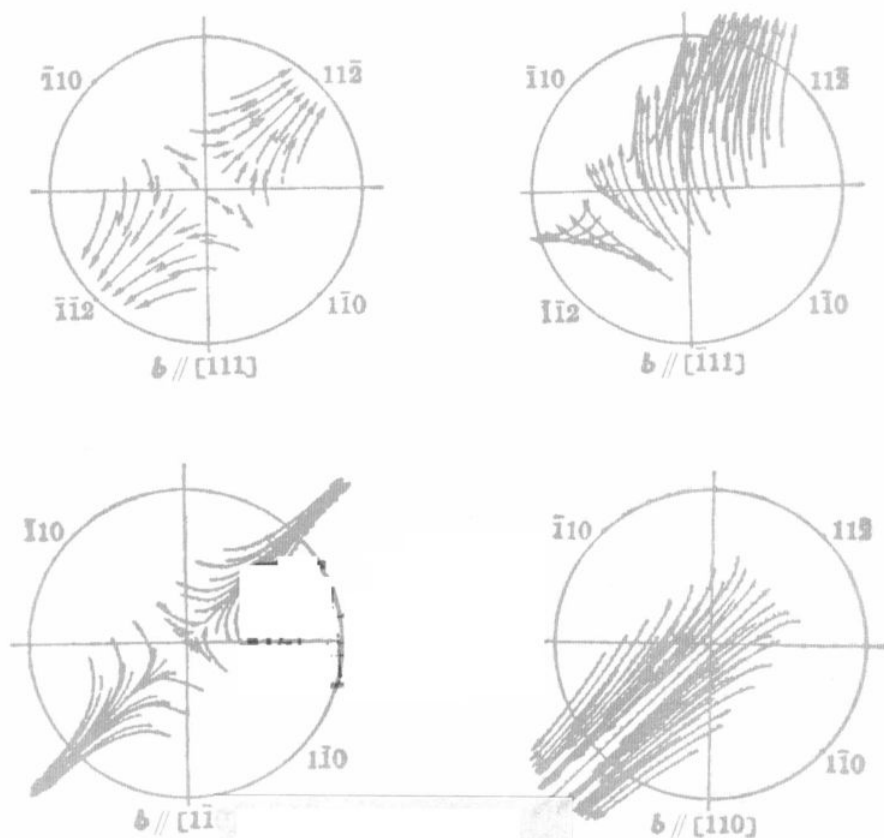


9 787305 225369 >

定价:98.00元

晶体生长的物理基础

闵乃本 著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

晶体生长的物理基础 / 闵乃本著. — 南京 : 南京大学出版社, 2019. 10

ISBN 978 - 7 - 305 - 22536 - 9

I. ①晶… II. ①闵… III. ①晶体生长 - 理论 IV. ①O781

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 152257 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号

邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

书 名 晶体生长的物理基础

著 者 闵乃本

责任编辑 王南雁

编辑热线 025 - 83595840

照 排 南京南琳图文制作有限公司

印 刷 南京爱德印刷有限公司

开 本 787 × 1092 1/16 印张 24.75 字数 556 千

版 次 2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 305 - 22536 - 9

定 价 98.00 元

网址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025) 83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购图书销售部门联系调换



闵乃本先生像

编者的话

通过开门办学，在工人师傅和工友技术人员的具体帮助下，可以以Alq为典型产品的生长工艺，着重从水热法和火熔法生长水晶和红宝石晶体；为进一步讨论生长工艺中有关晶体质量的问题，因此编入了“晶体生长的理论基础”。

遵照从典型到一般的原则，在第一章中首先讨论了直接法熔体中生长的“温场和热量传输”，在第二章中讨论溶液法和重量传输时介绍了熔体生长的其他方法。原来准备将有关熔体生长的物理和第五章编成上册，由于时间来不及，故第五章“小面生长和成核”安排在下册中。

准备在六、七、八章中综合“平衡态”、“成核理论”和“脱溶沉淀”的讨论，介绍其他各种生长方法。第九、十两章比较深入地讨论介面形貌和介面动力学理论；最后在第十一章中讨论晶体的应力。
也先遵照毛泽东思想，从实际出发，上中到理论，理论再回到实际中去。

至于每一章的编排，~~必会遵循~~ ^{遵循} ~~理论——实践——理论——实践~~ 的公式处理，但是由于编者自1972年才开始学习晶体生长，在工艺实践方面经验少并且接触面很狭，在生长理论方面理解得很肤浅，因而具体编排过程中产生很大困难，不容易抓住问题的本质，而且不可避免地将出现很多错误，望同志能指正。

闵乃本先生手稿

序

闵乃本先生的专著《晶体生长的物理基础》再次出版了。该书首次出版是在1982年,由上海科学技术出版社出版,并于次年获全国科技图书一等奖。这次重新出版保持了原版的体系和特色,并补充了先生生前百忙之中对原书亲自做的仔细校订与补充,使得读者在使用该书时更方便。这次再版既满足了晶体界与材料界对一本高水平晶体生长教科书和参考书的期待,也了却了先生生前为了呼应同行们的需求而将其修订出版的心愿。

闵先生一生追求科学,兴趣广泛,对诸多领域都有涉猎,但最成系统、最有影响的贡献涉及两个方面,一是以介电体超晶格为代表的微结构科学,二是有关晶体生长机制的理论。貌似相隔甚远的两个方向,先生以科研实践将其关联了起来。正是基于闵先生晶体生长理论与技术研制出的聚片多畴铌酸锂晶体,成为了两者之间的桥梁,这推动了二十世纪八十年代初,南京大学利用该晶体实现了激光倍频增强实验,明确验证了由诺贝尔奖获得者Bloembergen等人1962年提出的非线性光学中的准相位匹配理论。八十年代中期,闵先生在上述工作基础上提出了介电体超晶格的概念,并组建团队发展出了光学超晶格、声学超晶格和离子型声子晶体三类微结构材料体系。这些工作早于国际上提出光子晶体、声子晶体和超构材料等,为国际上微结构功能材料研究的快速崛起做出了贡献,也奠定了我国在这一领域的国际学术地位。这方面的系统工作曾获2006年度国家自然科学一等奖。

闵先生对晶体生长的研究其实比介电体超晶格更早。1959年闵先生大学毕业留校工作,在冯端先生带领下,他闯入了当时在国内尚是空白的晶体缺陷领域。他与同事一起设计了我国第一台电子束轰击仪,成功地制备了难熔金属单晶体,获得国家科技产品二等奖。到1965年,他在晶体缺陷领域的研究已经达到国际领先水平。二十世纪七十年代以后,半导体和激光技术的发展,使中国的科学家敏锐地觉察到人工晶体的重要性。闵先生转而开始了对激光与非线性光学晶体生长的研究。当时不仅国内没有晶体生长机理的系统理论,国际上也没有建立,这完全是一片尚未开发的处女地。先生萌生了将自己平时的讲义完善成一本包含晶体生长系统理论的教科书和参考书的想法,并随之将其付诸实践。正如闵先生自己在本书初版的序言中所述,当时“这门学科国内尚无专著,在国外也找不到一本较为系统的参考书”,所以难度可想而知。闵先生正是靠自己扎实的物理功底、超人的悟性以及多年的实践经验,系统地总结了不同条件下晶体生长规律,发展和完善了完整晶体、缺陷晶体

的生长理论,完成了该书的写作。其实这已不是一般意义上的教科书,而是他自己对晶体生长的理解和十多年研究成果的系统总结。1982年,41万字的专著《晶体生长的物理基础》问世,成为当时国际上第一本全面论述晶体生长的理论专著。尽管该书成书较早,但到目前为止,该书仍是阐述晶体生长物理和技术的几本有特色的专著之一,其他的有:F. Rosenberger 著的 *Fundamentals of Crystal Growth* (Springer, 1979); A. Pimpinelli 和 J. Villain 著的 *Physics of Crystal Growth* (Cambridge University Press, 1998); 以及 Ivan V. Markov 著的 *Crystal Growth for Beginners* (World Scientific, 1995)。其中犹他大学的 Rosenberger 教授(罗森伯格,美国晶体生长协会副主席)著的 *Fundamentals of Crystal Growth* 虽然出版于1979年,但由于历史的原因,闵先生是直到他专著完稿后才看到此书的(当时罗森伯格也只完成了三卷中的第一卷)。有趣的是在1982年到1984年期间,闵先生应罗森伯格教授的邀请去犹他大学做访问研究,罗森伯格在他的课堂上拿出先生的专著向学生介绍:“在晶体生长这一领域里,目前全世界可称为专著的只有两本,一本的作者是我是,另一本的作者是闵教授。现在我们同时出现在你们面前给你们讲课,你们是多么幸运啊!”这段插曲已成为中美晶体生长界交流历史上的一段佳话。《晶体生长的物理基础》在晶体研制大国日本也产生了很大影响,著名晶体学家、东北大学教授砂川一郎在《日本结晶成长学会志》(Vol. 10, No. 3-4, P. 21)的书评中指出:“……该书内容新颖而且系统,包含了非常高深的内容,而且以一个完整的思路全面阐述了晶体生长学。例如,我们知道的有关成核、晶体生长机制、界面结构和形貌学等方面的理论和计算机模拟的结果都收集在该书中。通览一下该书主要参考书目的内容,也能知道无论在深度还是广度上,作者对晶体生长的理解都是十分透彻的。”中国晶体学的奠基人之一钱临照先生专门为该书写了书评,称之为“国内第一本全面论述晶体生长的理论专著……在此领域国际上也不多见”(见《物理》14卷第7期)。作为一本广受欢迎的教材和参考书,这本书也的确担当了相应的历史责任,培养了好几代中国材料物理和晶体生长领域的工作者。

从二十世纪七十年代开始,闵先生花了近十年时间才完成了《晶体生长的物理基础》一书,其中遇到的困难不计其数,在那特殊的历史时期,这过程犹如凤凰涅槃。八十年代开始,情况好转,闵先生的研究受到国际同行越来越多的关注。1982年到1984年,先生应罗森伯格教授邀请以访问学者的身份到美国犹他大学做合作研究。在此期间,他成功地解释了晶面热致粗糙化的难题,修正了晶体生长的“杰克逊”理论,其研究被誉为“近十年来晶体生长领域最好的研究成果”,他也因此获得美国犹他大学和黑格斯公司联合设立的“大力神”奖。八十年代,闵先生在晶体生长研究方面最重要的贡献是提出与建立了系统的晶体生长的缺陷机制理论。早在1949年,晶体学家 Frank 就提出了晶体生长的螺位错机制,在七八十年代,人们陆续观察到不仅是螺位错,刃位错、层错、孪晶等缺陷在晶体生长过程中都有作为生长台阶源的迹象,然而一直没有进行深刻的理论解释。闵先生基于缺陷引起的点阵畸变以

及缺陷邻近原子组态的分析,将螺位错机制推广为包括刃位错、混合位错、层错、孪晶等在内的更为普遍的缺陷机制,给出了实际晶体生长的缺陷机制理论[J. *Crystal Growth* 128 (1993) 104-112; *ibid.*, 115 (1991) 199-202; *ibid.*, 87 (1988) 13-17; *ibid.*, 91 (1988) 11-15]。根据这些机制,任何可以在晶体生长表面提供台阶源的缺陷都能为晶体生长做出贡献,这些台阶源包括完全台阶和不完全台阶(亚台阶)等,这一机制的建立成为经典晶体生长理论近几十年来最重要的发展之一。在不同的应用场合,先生提出的生长理论分别被称为“闵氏孪晶片理论”“亚台阶机制/理论”等,并被应用到了片状银盐制备、蛋白质晶体生长、纳米材料制备、驰豫铁电体制备、金刚石生长和光电功能晶体生长等广泛体系中。

由于《晶体生长的物理基础》成书较早,上述介绍的先生自1982年以后在晶体生长方面的诸多贡献未来得及收录到这本书中。先生生前也曾着力筹划为本书增添几个章节,把最新的成果与进展收录进来,使得书中介绍的晶体生长机制体系更加完整。东风无力管苍天,非常遗憾先生的这一夙愿最终还是没能实现。现在将《晶体生长的物理基础》以先生亲自修订过的形式再版也是对先生的一种追思,先生开创的事业必将发扬光大、后继有人。

借此机会,我要感谢师母葛传珍老师,她对本次出版提出很多宝贵意见,并提供了珍贵的照片与资料,更重要的是她对我们给予了充分信任与支持。一辈子与先生的朝夕相处,患难与共,乃至曾经的参与,使得她对此书有特殊的理解与感情,对书中的公式也一一作了核对,找出印刷中的疏漏,这都感染了我们努力把事情做好!感谢朱永元和姚淑华两位老师,他们对书稿进行了详细的校验,提出了许多好建议。感谢先生的诸多学生和同仁对这件事的关注与鼓励,没有大家的理解和共同努力,这项任务是很难完成的。感谢编辑王南雁女士和吴汀先生,你们不辞辛苦一遍又一遍与我们沟通,提供建设性方案,体现了专业水平和敬业精神。

祝世宁

2019年8月于南京

序 言

本书是作者根据在南京大学物理系讲授“晶体生长的物理基础”的讲义改写而成。在改写过程中作者对内容作了较大的调整和补充,以使本书既可作为高等学校学生和研究生有关晶体生长课程的教材或教学参考书,又可作为从事晶体生长研制工作的科技人员的进修读物。

晶体生长是一种技艺,也是一门正在迅速发展的学科,在1972年到1976年间,作者撰写本书初稿时,无论在系统的拟定、内容的取舍以及处理的深度上,都是颇费心机的。这门学科国内尚无专著,在国外也找不到一本较为系统的参考书*,因而无从借鉴。为抓住主要矛盾,本书着重总结晶体生长的基本规律和解释生长过程中的基本现象。至于晶体生长工艺,在这里就不作系统的讨论。当然,熟悉晶体生长工艺和具有一定的实践经验,这是理解晶体生长理论的必要条件。但是要掌握晶体生长工艺的知识和技能,最好通过实验室中的专门训练或生产、科研单位的实地操作来达到。

单晶体既是广泛应用于电子器件、半导体器件、固体激光器件以及光学仪器 and 仪表工业的重要材料,同时又在实验固体物理学研究中起重要作用。在国内,工业性的晶体生长已经初具规模。无论在工业生产或实验室研制中,用直拉法生长晶体相当普遍,并已积累了丰富的资料;而作者近年来的研究工作也集中在氧化物晶体直拉法生长这一领域。因而本书就从总结直拉法这一特例出发,将由此得到的规律再推广到一般的生长过程。这样做比较切合国内晶体生长工作者当前的迫切要求,同时也不失为总结“发展中学科”的一条可行的途径。

本书前四章讨论了热量、质量和动量的传输理论,并结合炉内温场、溶质分凝、液流效应以及生长层的形成这些实际问题进行了分析和探讨。第五章对组分过冷和界面稳定性进行了系统的总结,这是近年来晶体生长领域中发展得比较成功的理论,迄今仍然十分活跃。晶体生长是一种能形成单晶体的特殊的相变过程,故在第六章和第七章中作者从热力学和统计物理学出发讨论了相平衡和相图以及界面的宏观性质与微观结构;这些内容不仅和晶体

* 本书完稿时,作者见到 F. Roseberger 所著 *Fundamentals of Crystal Growth*, Springer, 1979,这是国外第一本较为系统的教科书,但目前只出版第一卷(计划为三卷)。

生长工艺密切相关,而且也是理解晶体生长微观过程的物理基础。第八章和第九章系统地讨论了晶体生长的动力学过程——成核和生长过程;在引入“相变驱动力”的概念后,作者将气相生长、溶液生长和熔体生长置于统一的物理框架之中,这是一种大胆的尝试。第十章讨论了晶体生长过程中位错的产生、延伸和分布规律,这是作者根据在全国固体缺陷学术讨论会(1979年6月,南京)上的一篇评述性的论文写成的;不管是要获得高度完整的晶体,还是要获得设定缺陷组态的晶体,人们都希望了解这方面的知识。

阅读本书应具备一定的基础知识:如对热力学、物理化学、统计物理学、流体动力学、晶体学、晶体缺陷理论、数理方程等已有一些初步了解。为了便于非理科专业的读者自学,书中关于公式的推导是比较仔细的。本书的理论阐述,力求物理图像清晰、演绎严密。对具体问题,则首先描述现象的本身,然后在理论上予以解释;对于书中较难的章节(初学者不一定需要掌握的),作者标以星号“*”,以便读者自行取舍。由于作者学识浅陋、水平有限,书中难免有不少缺点和错误,希读者不吝指正。

作者写作本书的过程中,冯端教授不断地给予鼓励、支持和指导,并在百忙中抽空审阅了全部原稿。本书所依据的讲义,曾得到上海光机所侯印春同志、压电与声光研究所王鑫初工程师、国营999厂王致伟工程师的热情支持,山东大学张克从副教授提出了宝贵意见。本书定稿时蒙南京大学洪静芬同志仔细校阅。上海科学技术出版社的编辑为本书的编辑出版付出了辛勤的劳动,并提出了不少有益的建议。作者谨此致谢。

闵乃本

1980年6月于南京

目 录

绪 论	1
第一章 温场和热量传输	2
第一节 炉膛内温场的描述	2
一、温场	2
二、温场的实验描述	4
三、稳态温场	5
第二节 从能量守恒原理讨论晶体生长工艺	7
一、能量守恒方程	7
二、晶体直径的控制	8
三、晶体的极限生长速率	10
四、放肩阶段	10
五、晶体旋转对直径的影响	11
第三节 能量守恒的微分形式和一维稳态温场	12
一、温场的数学描述	12
二、能量守恒的微分形式	13
三、一维稳态温场	15
第四节 晶体中的温场	16
第五节 坩锅中液面位置及辐射屏对温场的影响	21
一、坩锅中液面位置对温场的影响	21
二、辐射屏对晶体中温场的影响	23
第六节 晶体生长过程中直径的惯性和直径响应方程	25
一、直径的惯性	25
二、温度边界层	25
三、直径响应方程	26
*第七节 非稳温场和温度波	27
第二章 溶质分凝和质量传输	32
第一节 固溶体和溶液	32
第二节 溶液的凝固和平衡分凝系数	33

第三节	溶质浓度场和溶质守恒·····	36
第四节	溶质保守系统中的浓度场·····	37
一、	属于溶质保守系统的生长方法·····	37
二、	在准静态生长过程中的溶质分布·····	38
三、	溶质的扩散效应·····	40
四、	对流对溶质分凝的影响及有效分凝系数·····	44
五、	直拉法生长中晶体旋转对溶质分凝的影响·····	47
第五节	溶质非保守系统中的浓度场·····	48
一、	属于溶质非保守系统的生长方法·····	48
二、	溶质非保守系统的分凝理论——区熔理论·····	49
三、	扩散占优势的溶质边界层与熔区的相似性·····	52
四、	多次区熔的极限分布·····	52
五、	温度梯度区域熔化——TGZM·····	53
第六节	直拉法生长过程中的溶质均化·····	54
一、	计划速率法·····	54
二、	溶液稀释法·····	56
三、	溶液补充法·····	57
四、	层熔法·····	57
第三章	热量、质量的混合传输·····	59
第一节	混合传输·····	59
第二节	实验模拟和数字模拟·····	60
一、	实验模拟·····	60
二、	数字模拟·····	61
第三节	相似流动·····	64
一、	相似流动——雷诺数和弗鲁得数·····	65
二、	模拟实验的设计·····	67
第四节	坩埚中的自然对流·····	69
一、	非等温系统和非等浓度系统中的浮力·····	69
二、	水平温差和浓度差引起的自然对流——格拉斯霍夫数·····	70
三、	铅直温差和浓度差引起的自然对流——瑞利数·····	72
第五节	混合传输的相似性原理·····	74
第六节	生长过程中液流的转变与界面翻转·····	76
一、	自然对流向强迫对流的转变·····	76
二、	界面翻转·····	77

第七节 旋转流体中的液流·····	79
*一、旋转流体的描述·····	79
*二、泰勒-普劳德曼定理·····	80
三、直拉法生长系统中的泰勒柱·····	81
第八节 直拉法生长系统中熔体的区域近似·····	84
第九节 旋转晶体下的混合传输·····	85
一、旋转圆盘下流体的速度场·····	85
二、旋转圆盘下的温场和浓度场·····	88
三、旋转晶体下的边界层和边界层近似·····	90
第十节 同轴旋转柱面间的混合传输·····	92
一、同轴旋转柱面间的速度场·····	92
*二、同轴旋转柱面间的温度场·····	93
三、同轴旋转柱面间液体的非旋转对称流动·····	94
附录一 不同坐标系中的连续性方程·····	96
附录二 不同坐标系中动量传输方程·····	96
附录三 不同坐标系中的热传输方程·····	97
第四章 生长速率起伏和生长层·····	99
第一节 生长层(条纹)概述·····	99
一、晶体性能与溶质浓度的起伏·····	99
二、溶质浓度起伏的原因·····	100
三、生长层的形态·····	101
第二节 生长界面的标记技术·····	102
一、机械振动方法引入的生长层·····	103
二、加热功率起伏引起的生长层·····	104
三、利用珀耳帖效应引入生长层·····	105
四、生长界面标记技术的应用·····	106
第三节 旋转性生长层·····	107
一、旋转性生长层的形成及其特征·····	107
二、旋转性表面条纹·····	109
三、螺螄形晶体和螺螄式分凝·····	110
四、利用旋转性生长层制备铁电畴超晶格·····	112
第四节 生长层形成的理论分析·····	116
一、生长速率关于界面温度起伏的响应·····	116
二、生长速率关于熔体中温度起伏的响应·····	117

* 三、溶质浓度关于生长速率阶跃的响应·····	120
四、溶质浓度关于生长速率周期性起伏的响应·····	123
五、生长速率起伏对有效分凝系数的影响·····	124
六、浓度响应的“截止频率”·····	126
第五节 坩锅中液流引起的温度起伏·····	126
一、液流状态与温度起伏·····	127
二、浮力对流体动力学稳定性的影响·····	128
三、离心力对流体动力学稳定性的影响·····	133
四、表面张力对流体动力学稳定性的影响·····	136
第六节 液流引起温度起伏的抑制·····	137
一、洛伦兹力场的应用·····	137
二、科里奥利力场的应用·····	139
附录一 生长速率阶跃的条件下扩散方程的解·····	141
第五章 界面稳定性和组分过冷·····	145
第一节 界面稳定性的定性描述·····	146
一、温度梯度对界面稳定性的影响·····	146
二、浓度梯度对界面稳定性的影响·····	147
三、界面能对界面稳定性的影响·····	149
第二节 组分过冷形态学·····	149
一、胞状界面·····	149
二、胞状组织·····	151
* 三、各向异性对形态的影响·····	152
四、间歇式胞状组织·····	153
五、溶质尾迹·····	153
六、研究组分过冷形态学的实验方法·····	154
第三节 产生组分过冷的临界条件·····	154
一、工艺参量与物性参量的影响·····	154
二、对流传输的影响·····	157
第四节 组分过热(熔化界面的稳定性)·····	158
* 第五节 界面稳定性的动力学理论·····	160
一、干扰·····	161
二、干扰方程(perturbation equations)及其解·····	162
三、边值条件和 $\frac{\delta}{\delta}$ 的表达式·····	164

四、干扰的波长对界面稳定性的影响	166
五、不同因素对界面稳定性的影响	167
六、界面稳定性的动力学理论和组分过冷	168
七、生长的各向异性和界面过冷对稳定性的影响	169
八、理论和实验对比	170
第六节 枝晶生长	174
一、概述	174
*二、球面的不稳定性与枝晶生长	176
三、主干的轴向生长速率	178
四、分枝的产生	178
第六章 相平衡和相图	180
第一节 单元系的复相平衡	181
一、单元系统中的相平衡条件	181
二、理想气体的化学势	182
三、相平衡曲线	183
四、金刚石相图	183
五、相变潜热	185
六、克拉珀龙-克劳修斯方程	186
七、临界点	187
第二节 多元系的复相平衡	187
一、不同成分相的化学势	187
二、多元系的复相平衡	189
三、相律	191
四、稀溶液中各组元的化学势	192
五、平衡分凝系数的热力学意义	193
六、溶液凝固点与溶质浓度的关系	194
第三节 二元相图	196
一、平衡曲线和特征点	196
二、同形系统	199
三、共晶系统	202
四、包晶系统	205
五、偏晶系统	208
六、复杂的二元相图	209
*第四节 三元相图	211

第七章 界面的宏观性质与微观结构	215
第一节 界面能和界面张力	215
一、界面能和界面张力	215
二、固体的界面张力	217
第二节 界面交接	218
一、接触角	218
二、界面交接处的力学平衡	220
第三节 弯曲界面的相平衡	221
一、弯曲界面的力学平衡——界面压强	221
二、弯曲界面的相平衡	224
第四节 弯月面与直拉法生长	225
一、直拉法生长中的弯月面	225
二、弯月面提升的液重	227
三、标志等径生长的弯月面倾角	228
第五节 界面曲率对平衡参量的影响	230
一、界面曲率对凝固点的影响	230
二、界面曲率对饱和气压的影响	232
三、界面曲率对饱和浓度的影响	233
第六节 晶体的平衡形状	234
一、界面能极图与晶体的平衡形状	234
二、乌耳夫定理的适用范围	235
三、奇异面、非奇异面和邻位面	237
第七节 邻位面与台阶的平衡结构	237
一、邻位面的台阶化	237
二、邻位面台阶化的论证	239
三、台阶的热力学性质	240
四、台阶的平衡结构	241
第八节 界面相变熵和界面的平衡结构	243
一、光滑界面与粗糙界面——杰克逊界面理论	243
二、熔化熵	248
三、界面相变熵与环境相	249
四、温度对界面平衡结构的影响	251
五、弥散界面——特姆金多层界面模型	254
第八章 成核	257
第一节 相变驱动力	258