

MECHATRONIC RELIABILITY

杨 卫 著

力电失效学



清华大学出版社



Springer-Verlag

杨 卫 著

MECHATRONIC RELIABILITY

力电失效学



清华大学出版社



Springer-Verlag

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书为力电失效学方面的学术专著,读者对象为从事固体力学、材料科学、微电子、固体物理、机械等领域研究的高年级学生、研究生和专业技术人员。书中按照电致失效学、力电耦合学、力电畴变学和质流失效学的顺序来阐述力电失效学这一新学科分支的主要内容。第一篇电致失效学讨论电致断裂、电致疲劳和电致质流失稳的基本现象。第二篇力电耦合学讨论压电体、弛豫铁电体和畴变铁电体的本构关系,以及由于宏观场方程的耦合所造成的缺陷场特征。第三篇力电畴变学探讨与畴变有关的失效行为的机理,内容包括畴变理论与实验、断裂韧性与极化、交替畴变与疲劳裂纹扩展。第四篇质流失效学探讨与质流失稳有关的失效行为的机理,包括力电耦合下的质流、质流的演化与失稳、质流引致失效。

书中所探讨的研究命题着重于力学与电子学相耦合的交叉领域。通过确定材料在电场载荷或者在力电耦合载荷作用下的典型失效模式,分析失效机理,来建立新的理论分析方法,并提出一套可靠性评价方法。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

力电失效学/杨卫著. —北京:清华大学出版社,2001

ISBN 7-302-04106-7

I. 力... II. 杨... III. 失效分析 IV. TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76778 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:国防工业出版社印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:290 千字

版 次:2001 年 2 月第 1 版 2001 年 2 月第 1 次印刷

书 号:ISBN-7-302-04106-7/TB·30

印 数:0001~3000

定 价:35.00 元

Brief Introduction

This book is a monograph about Mechatronic Reliability, an emerging branch of modern technology. The readers of the book may include professionals, graduate students and even senior undergraduates who are engaged in researches of solid mechanics, material sciences, microelectronics, solid state physics and mechanical engineering. The contents of mechatronic reliability unfold according to the sequence of Electric Failures, Mechanical-Electrical Coupling, Domain Switching and Mass Flow Instability. Part I of the book discusses the phenomenological theory about electric fracture, electric fatigue and current induced mass flow instability. Part II presents the constitutive formulation of linear piezoelectrics, relaxor ferroelectrics and ferroelectrics with domain switching, with attention focused on the characterization of defect fields manifested by the coupling in macroscopic field equations. Part III explores mechanisms of mechatronic failures associated with domain switching. The contents cover theory and experiments of domain switch, fracture toughness and polarization, alternating switch and fatigue crack growth. The final part elucidates the mechanisms related to mass flow instability, such as mass flow under mechanical & electric fields, microstructural evolution and failure by mass flow instability.

Various subjects endeavored in the book are positioned in the interdisciplinary area between mechanics and electronics. Typical failure modes for materials under electrical and/or mechanical loading are identified. Analyses devoted to those failure modes reveal their mechanisms, and lead to the establishment of new theories that serve to assess their reliability.

本书由清华大学学术专著基金资助出版。

著者简介

《力电失效学》一书作者杨卫于 1954 年 2 月 16 日生于北京, 现年 46 岁。1976 年毕业于西北工业大学材料与热加工系, 1981 年获清华大学工程力学系工学硕士, 1984 年底获美国 Brown 大学工学院博士学位。1987—1988 年受聘为英国皇家学会邀请学者; 1988 年和 1990 年分别在法国 Grenoble 大学和美国 Brown 大学担任短期客座教授; 1993 年、1995 年两度在美国加州大学担任短期客座研究员; 1996. 10—1997. 2 在台湾大学担任特案研究员; 1998 年在美国普林斯顿大学担任短期客座研究员; 2000. 10—2001. 3 任日本东京工业大学客籍讲座教授。杨卫主要从事固体力学领域的研究, 研究方向包括: 宏微观破坏力学、固体本构理论、微力电系统失效学、结构完整性评价、材料的增强与增韧理论。近年来开展了航天领域的研究。现任清华大学教授, 工程力学系主任。兼任中国科学技术协会常委, 中国力学学会副理事长, 并任亚太断裂学会副主席, 是国际学术刊物 *Int. J. Fracture* 的亚太区编辑, *Fatigue & Fracture Eng. Mater. & Structs.*, *Int. J. Damage Mechanics* 的编委, *Material Sci. Res. Int.* 的国际顾问。在国内还担任《力学学报》副主编, 全国第三届青年学术年会(1998 年)学术委员会主任。出版中英文学术著作 4 种, 发表学术论文 220 篇。学术专著《宏微观断裂力学》1996 年获得中国人民解放军优秀图书奖。1993 年获得全国优秀教师奖章, 被评选为北京市十佳教师之一。1994 年获得中国青年科学家奖。研究项目《固体材料的宏细观本构理论与断裂》于 1995 年获得国家自然科学基金三等奖(第一获奖人)。

序

循古至今,力学参与到推动一门新技术之日,即其兴盛繁荣之时。于是,力学的语言拓展繁衍,力学的工具揭示出新的奥秘。然而,一门特定技术中蕴含的基本力学问题毕竟有限。这些问题现出其庐山真面目后,仍会有一些力学工作者继续在该技术领域孜孜耕耘,但另一些人则移往新的技术领域。过去的两个世纪中,力学对主要技术领域(如建筑、交通和能源)均产生重大影响。其辉煌成就使我们时时感到一种知识上的归宿。但这决不应使我们固步自封,对新的机遇视而不见。只有当投身于新的挑战时,才会感觉到今天的科学仍是多么地不成熟。

在即将来临的数十年间,挑战的一个主要来源在微电子和通信体系。集成电路中的特征尺寸现已缩到十分之一微米。光子网络中正在发展纳米结构。这两门技术均涉及到种类繁多的材料。其装置的每个功能部件都承受着高强度的力——热学的、力学的、电学的、化学的——汇聚作用于一个很小的尺度之中。沿不同路径的原子运动缘此而生,造成该部件的演化。当器件尺寸不断缩小时,如何维护结构的稳定性便成为一再出现的挑战。为满足可靠性的需求,各主要工业实验室正忙于测试问题的各个方面。在世界一流大学中也出现了若干个研究组。探讨纳米结构行为之时,来源颇不熟悉的各种力得以浮现。它们组装着“自装配”结构。

杨卫教授是这一令人振奋领域的一名带头人。过去若干年中,他及其合作者作出了诸多播种式的贡献。通过他学生的学位论文和若干篇综述论文,杨教授一直在塑造这一年轻的领域。在本部书中,他专注于两个现象:铁电行为和电迁移。两个现象均反映了力电作用之耦合。书中描绘了技术背景、物理基础、实验发现和理论进展。将读者从基本概念一直带到最前沿的文献。它是这一新领域的第一部著作。它不仅集两个所选现象诸多研究成果之大成,同时还提供了接近其他现象的透视方法。关于演化中微小结构的研究将使固体力学学科定位于当代主要技术前沿之上。这一领域宽广无垠。

Z. Suo

普林斯顿,新泽西,2000年6月

FORWARD to “Mechatronic Reliability” by Wei Yang

Historically, mechanics thrives whenever it participates in advancing a new technology. The language finds new variants, the tools unravel new mysteries. There are, however, only a finite number of basic mechanics problems in a given technology. When these problems are solved, some of us stay and evolve with the technology, and others move on to newer technologies. In the past two centuries, mechanics has impacted all major technologies—construction, transportation, and energy. The dazzling success makes us feel, at times, intellectually settled. But never should it blind us from new opportunities. Only in confronting new challenges do we realize how immature our science is.

In the coming decades one major source of challenges will be microelectronics and communication systems. The feature size in integrated circuits is now about a tenth of a micron-meter. Nanostructures are being developed for photonic networks. Both technologies involve diverse materials. Each functional part in a device is subject to intense thermodynamic forces—thermal, mechanical, electrical and chemical—all acting within a small dimension. In response, the part evolves by atomic movements along various paths. Maintaining structural stability is a recurring challenge in electronics industry as the size continues to shrink. To meet reliability requirements, all major industrial laboratories are doing testing on various aspects of the problem. A few research groups have appeared in leading universities worldwide. As we explore behaviors of nanostructures, forces of less familiar origins manifest themselves. They assemble the “self-assembled” structures.

Professor Wei Yang is a leader of this exciting field. In the last few years, he and his collaborators have made seminal contributions. Through thesis of his students and several review articles, Professor Yang has been shaping this young field. In this book, he focuses on two phenomena: ferroelectricity and electromigration. Both phenomena couple mechanical and electrical actions. This book describes technological background, basic physics, experimental findings, and theoretical developments. The reader is brought

from basic concepts to up-to-date literature. This book is the first in the emerging field. Not only does it synthesize the studies of the two chosen phenomena, it also provides a perspective on how other phenomena might be approached. The study of evolving small structures will position the solid mechanics discipline at the frontier of major technologies of our time. The field is wide open.

Z. Sou

Princeton, New Jersey

June 2000

目 录

绪论	1
0.1 信息结构的力电耦合失效	1
0.2 力电耦合的三个层面	2
0.3 信息结构可靠性的瓶颈	3
0.4 力电失效学	5
0.5 本书内容概述	8

第一篇 电致失效学

第1章 电致断裂	9
1.1 电致断裂行为	9
1.2 断裂韧性的各向异性	12
1.3 电场对断裂韧性的非对称影响	14
1.4 断裂韧性的晶粒尺度效应	17
第2章 电致疲劳	20
2.1 超矫顽电场下疲劳裂纹扩展	20
2.2 亚矫顽电场下疲劳裂纹扩展	26
2.3 各种电致疲劳模型评述	32
第3章 电致质流失稳	35
3.1 电迁移	35
3.2 多晶导线的质流失稳	41
3.3 竹节导线的质流失稳	48

第二篇 力电耦合学

第4章 线性压电体	51
4.1 压电行为	51
4.2 线性压电体定解方程	54
4.3 缺陷与边界条件	56
4.4 二维裂纹解	59
4.5 裂纹偏折	62
第5章 弛豫铁电体	70

5.1	弛豫铁电体的物理描述	70
5.2	弛豫铁电体的本构方程	72
5.3	电极和绝缘裂纹处的电场集中	76
5.4	电致应力集中	80
5.5	裂纹萌生与应力强度因子	83
第6章	畴变铁电体	87
6.1	铁电体的原子模型	87
6.2	180°与90°畴变	93
6.3	电畴表征	95
6.4	畴变型本构关系	101

第三篇 力电畴变学

第7章	畴变理论与实验	107
7.1	畴变准则	107
7.2	畴片几何	109
7.3	裂尖畴变的实验观察	120
7.4	单晶压痕畴变实验	126
第8章	断裂韧性与极化	129
8.1	小范围畴变理论	129
8.2	面内极化	133
8.3	电场透越率的影响	142
8.4	离面极化	147
8.5	极化方向对断裂韧性的影响	152
8.6	极化铁电体的维氏压痕力学	154
第9章	交替畴变与疲劳裂纹扩展	156
9.1	正负电场下的裂尖畴变区	156
9.2	正负电场下的裂尖应力强度因子	158
9.3	交替畴变驱动的疲劳裂纹扩展	160
9.4	稳态疲劳断裂模型	165

第四篇 质流失效学

第10章	力电耦合下的质流	169
10.1	质流公式	169
10.2	化学势与驱动质流的广义能量力	170
10.3	约束质流的分布位错表达	172

第 11 章 质流的演化与失稳	176
11.1 位错环屈曲	176
11.2 孔洞演化与失稳	180
11.3 内导线侧壁波动	186
11.4 晶粒凸起与凹陷	190
第 12 章 质流引致失效	198
12.1 质流塞积引致的钝化层开裂	198
12.2 内导线的孔洞形核	199
12.3 单晶和竹节内导线的开路失效	203
12.4 多晶内导线的短路和开路失效	208
结束语	215
致谢	216
参考文献	217
主题索引	234

Contents

Introduction	1
0.1 Mechatronic failure of information devices	1
0.2 Three aspects of mechanical/electrical coupling	2
0.3 Bottlenecks for the reliability of information devices	3
0.4 Mechatronic reliability	5
0.5 Outline of the book	8

Part I Electric Failures

Chapter 1 Electric Fracture	9
1.1 Cracking under electric field	9
1.2 Fracture toughness anisotropy	12
1.3 Effect of field asymmetry on fracture toughness	14
1.4 Size effect of fracture toughness	17
Chapter 2 Electric Fatigue	20
2.1 Fatigue crack growth above coercive field	20
2.2 Fatigue crack growth below coercive field	26
2.3 Survey for the electric fatigue models	32
Chapter 3 Current induced mass flow instability	35
3.1 electromigration	35
3.2 Mass flow instability of polycrystal lines	41
3.3 Mass flow instability of bamboo lines	48

Part II Mechanical-Electrical Coupling

Chapter 4 Piezoelectrics	51
4.1 Piezoelectric behavior	51
4.2 Governing equations for linear piezoelectrics	54
4.3 Defects and boundary conditions	56
4.4 Two dimensional crack solution	59
4.5 Crack kinking	62

Chapter 5 Relaxor ferroelectrics	70
5.1 Physics of relaxor ferroelectrics	70
5.2 Constitutive relations of relaxor ferroelectrics	72
5.3 Field concentration near defects and electrodes	76
5.4 Stress concentration	80
5.5 Cracking and stress intensity factors	83
Chapter 6 Ferroelectrics	87
6.1 Atomic model of ferroelectrics	87
6.2 180° and 90° domain switching	93
6.3 Domain characterization	95
6.4 Constitutive laws of ferroelectrics	101

Part III Mechatronic Study of Domain Switching

Chapter 7 Theory and experiments of domain switch	107
7.1 Switching criteria	107
7.2 Domain assemblies	109
7.3 Experiment for crack tip domain switching	120
7.4 Micro-indentation of ferroelectric single crystals	126
Chapter 8 Fracture toughness and polarization	129
8.1 Small scale switching	129
8.2 In-plane poling	133
8.3 Effect of permeability	142
8.4 Out-of-plane poling	147
8.5 Fracture toughness influenced by polarization	152
8.6 Vickers indents for poled ferroelectrics	154
Chapter 9 Alternating switch and fatigue crack growth	156
9.1 Crack tip switching zones under positive and negative fields	156
9.2 Stress intensity factors under positive and negative fields ...	158
9.3 Fatigue cracking driven by alternating switch	160
9.4 Steady state model	165

Part IV Mass Flow Induced by Electric Field

Chapter 10 Mass flow under mechanical & electric fields	169
10.1 Mass flow formula	169

10.2	Chemical potential and energetic forces for mass flow	170
10.3	Distributed dislocations for constrained mass flow	172
Chapter 11	Microstructural evolution	176
11.1	Buckling of dislocation loops	176
11.2	Evolution and instability of voids	180
11.3	Waviness of interconnects	186
11.4	Hillocks and sinks	190
Chapter 12	Failure by mass flow instability	198
12.1	Passivation cracking by mass flow blocking	198
12.2	Voiding within interconnects	199
12.3	Open circuit failure for single crystalline and bamboo lines	203
12.4	Open and close circuit failures for polycrystalline lines	208
Concluding Remarks		215
Acknowledgements		216
References		217
Subject indices		234

绪 论

乘力之威，挟电之掣。

摧材之坚，摄流之魄。

0.1 信息结构的力电耦合失效

力与电，是500年科技进步的推动力。古今明哲对其不乏溢美之词。马克思说：力学是“大工业的真正科学的基础”（马克思恩格斯全集第26卷II，第116页）。恩格斯说：“在自然科学的历史发展中最先发展起来的是关于简单的位置移动的理论，即天体和地上物体的力学”（恩格斯著，《自然辩证法》，人民出版社，1971年，第53页）；“认识机械运动，是科学的第一个任务”（同上，第230页）。列宁说：“苏维埃加电气化就是共产主义”。钱学森说：“不可能设想，不要现代力学就能实现现代化”（力学与实践，1979，1：4—9）。

在千年之交，信息科学成为科技进步的主要动力。力与电交织在一起，在微机电、微电子元件与封装、智能结构和空间技术中，展现出一片科学技术发展的崭新天地。

例如，在超大规模集成电路的发展所提供的深亚微米加工技术下，电子元件的微型化(miniaturization)正在以 Moore 定律预测的速度前进(简睿杰，1999)。微电子元件的几何构型从基底上的单层薄膜发展为百余层摩天大楼式的叠合膜。深亚微米立体加工技术使制造毫米乃至微米级的微机械(micromachine)或微系统(microsystem)成为可能。几克重的直升飞机、3 mm大小的可运动的汽车、毫米级尺寸的微泵、定子外径为1.5 mm的平面电磁电机、转子直径为0.08 mm的电磁电机等微机械在国际上相继问世。由具有感知功能的微传感器，具有电脑功能的微电子元器件及具有致动功能的微执行器可组成一个集感官、思维和动作于一身的微机电系统(MEMS)，并形成了一个称为“力电学(mechatronics)”的新学科(Bradley等，1991)。

对信息结构而言，力与电之结合是一柄双刃剑。一方面，力电结合造成对压电、铁电、存储、致动、传感、能带调移等多方位功能的激发(Gandhi与Thompson，1992；王晓明等，1995；陶宝祺，1997)；另一方面，力电结合又是造成种种力电失效行为的源泉(杨卫，1996)。本书无意去探讨力电结合而产生的功能，而旨在讨论由力电结合衍生而至的失效行为。

力电失效行为具有三点特征:(1) 小尺度,(2) 应力场(stress field)与电场(electric field)的耦合,(3) 温度场和传质过程的影响。下面以微机电系统和微电子器件为例窥其一斑。

微机电系统的典型构形为薄膜/基体和多层膜(multi-layers)结构。其主要特征是:尺度小、层状异质、多场耦合。小尺度特征推动了细观力学的发展,推动了力学与材料科学、物理学和制造工艺在微结构演化这一共同点上的结合(Suo,2000)。膜基结构和多层膜结构中常存在着高达弹性模量千分之一乃至百分之一量级的应力;薄膜的形状演化所需的时间尺度远低于块体材料;膜基结构的损伤有着层出不穷的形式;膜基结构的可靠性(reliability)往往是制约高新技术结构发展的瓶颈。因此,研究薄膜结构的应力、形状演化、损伤和可靠性便成为具有重要意义的工作。

亚微米集成电路失效的一个重要原因在于力学、热学和电学的耦合效应。电流引起的导体中的质量输运称为电迁移(electromigration)。半导体器件中内导线(interconnect)星罗棋布,数量巨大。一条内导线的开路失效(open circuit failure)或两相邻导线的短路失效(short circuit failure)足以致使整个器件的失效;而一个器件的失效可能导致整个系统的错误或瘫痪。传质过程的不均匀还可能引起附加应力分布,从而引发其他破坏行为。在我国现用微米级集成电路的制造工艺下,内导线的材料微结构为亚微米柱状晶(sub-micron tubular grains),可能造成严重的电迁移问题(Zhao 和 Yang,1997)。

信息技术发展到今天,已从发明的时代逐渐步入规范化制造的时代。在层出不穷的信息材料和信息结构中,真正得以浮现出 IT 竞争之林的是具有高可靠性的规范化产品。提高器件及封装(packaging)的可靠性成为具有竞争性的新一代信息产品的关键技术。当前国产多层微电子元件与封装的可靠性、微机械的可靠性远低于国际先进水平。在中国微电子和微机械产业的跨世纪发展中,将实现从进口组装到仿制,再到自行研制的技术进步。在即将来临的这一时代,力电耦合(mechatronic coupling)失效研究的重要性将逐渐为国人所认识。

0.2 力电耦合的三个层面

力可以生电,电可以激力。力电耦合可以从微观、细观和宏观的三个层面上来加以诠释。

从微观层面来说,力之产生源于电子云的交互作用,而电之体现源于电子的定向流动。电子云交互的强弱制约着电子的整体定向流动;电子的定向流动也影响着电子云交互。因此,力电耦合是微观上电子云行为这一共同动因