 国外名校最新教材精选

 **CRC Press**
Taylor & Francis Group

铁电器件

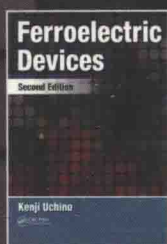
Ferroelectric Devices

第2版
Second Edition


[美] 内野研二 (Kenji Uchino) 著

董蜀湘 等 译

李美亚 等 校



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 国外名校最新教材精选

Ferroelectric Devices

(Second Edition)

铁 电 器 件

(第 2 版)

[美] 内野研二 著

Kenji Uchino

Professor of Electrical Engineering

The Pennsylvania State University

董蜀湘 等 译

李美亚 等 校



西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

Ferroelectric Devices, 2nd Edition / by Kenji Uchino / ISBN: 978-1-4398-0375-2 (Hardback)

Copyright © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC
CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an informa business

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved. 本书原版由泰勒与弗朗西斯出版集团旗下CRC出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。

Xi'an Jiaotong University Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版由泰勒与弗朗西斯出版集团授权西安交通大学出版社在中国大陆地区独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有泰勒与弗朗西斯出版集团防伪标签,无标签者不得销售。

陕西省版权局著作权合同登记号:图字 25-2011-213 号

图书在版编目(CIP)数据

铁电器件:第2版/(美)内野研二(Uchino, K.)著;董蜀湘等译.
—2版.—西安:西安交通大学出版社,2016.3
书名原文:Ferroelectric Devices, 2nd Edition
ISBN 978-7-5605-8233-7

I. ①铁… II. ①内… ②董… III. ①铁电材料-电子器件-教材
IV. ①TM22 ②TN103

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第012118号

书 名 铁电器件(第2版)
著 者 [美]内野研二(Kenji Uchino)
译 者 董蜀湘 等
校 者 李美亚 等
责任编辑 贺峰涛

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 虎彩印艺股份有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16 印张 21.5 字数 513 千字
版次印次 2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-8233-7
定 价 65.00 元



读者购书、书店添货或发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿咨询:(029)82665380

读者信箱: eibooks@163.com

版权所有 侵权必究

作者简介

内野研二(Kenji Uchino)先生是国际著名铁电器件专家,压电致动器的先驱者之一。他是美国宾夕法尼亚州立大学国际致动器换能器中心(ICAT)创始主任以及电子工程系教授,也是宾夕法尼亚州立大学微机电公司的创始人和高级副总裁兼首席技术专家。



1976年在日本东京工业大学获得博士学位以后,内野先生在该校物理电子系做研究助理/助理教授。随后他于1985年加入日本上智大学并成为物理学副教授。之后他于1991年到美国宾夕法尼亚州立大学任教。1986—1988年他在日本国家空间开发署(NASDA)的航天飞机利用委员会任职,1992—1994年间任美国NF电子仪器公司副总经理。1987—2014年,他任日本技术开发协会中的智能致动器/传感器委员会的创始主席,该协会隶属于日本原通商产业省。他还曾担任美国海军研究办公室副主任,于2010—2014年在环球东京办公室任IPA。从1997年起,内野先生长期担任在德国不莱梅国际展览中心举办的新致动器国际会议的主席。他同时还是《先进性能材料学报》(*Journal of Advanced Performance Materials*),《智能材料系统与结构学报》(*Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*)和《日本应用物理学报》(*Japanese Journal of Applied Physics*)的副主编。1998—2000年,他还担任美国电气与电子工程师协会超声、铁电与频率控制委员会(IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control)的管理委员会成员。2002—2003年,他担任美国陶瓷学会(The American Ceramic Society, ACerS)秘书长。

内野先生的研究兴趣主要在固体物理——特别是铁电和压电方向,包括理论、材料和器件制造工艺的基础研究,同时也还包括精准定位的固体致动器/传感器、微机器人、超声马达、智能结构、压电换能器和能量回收器件。他作为以下领域的发现者或创造者被人们所熟知:(1)PMN基电致伸缩材料;(2)共烧多层压电致动器(MLA);(3)高性能的压电单晶PZN-PT;(4)光致伸缩现象;(5)形状记忆陶瓷;(6)磁电复合传感器;(7)压电致动器的瞬态响应控制(脉冲驱动技术);(8)微型超声马达;(9)多层盘状压电换能器;(10)压电损耗表征方法。以上这些领域也是他正在研究的课题,近年来主要集中在最后三个领域。他已经在陶瓷致动器领域发表了510篇论文,出版了68本书,申请了31项专利。其中有37篇文章/书的引用超过了100次。他的平均H因子达到59,总引用次数20100,平均每年引用次数为437,这些数据在工程学院来说是相当高的。

内野先生1997年当选美国陶瓷学会会士(ACerS Fellow),2012年当选美国电气与电子工程师协会会士(IEEE Fellow)。截至2016年底,他获得了28个奖项,包括世界陶瓷科学院(World Academy of Ceramics)颁发的国际陶瓷学奖,IEEE UFFC颁发的铁电学成就奖(2013),弗吉尼亚理工学院能量回收材料和系统中心的发明人奖(2011),宾夕法尼亚州立大学

工程学校友会最高研究奖(2011),日本应用电磁学与力学学会杰出学术著作奖(2008),美国国防部高级研究计划局(DARPA) SPIE 智能产品贡献奖(2007),R&D 杂志 R&D 100 奖(2007),美国机械工程师协会(ASME)自适应结构奖(2005),宾州工程学会杰出研究奖(1996),尼桑汽车科学基金学术奖(1990),日本燃油/空气压力控制学会最佳论文奖(1987)等。

内野先生在 2008 年还获得圣弗朗西斯大学(St. Francis University)的工商管理硕士(MBA)学位,并为商学院教学编写了名为《工程师的企业家精神》的教材。1989 年,他作为几部有关铁电畴的动态观测和陶瓷致动器的教育影片的导演和制片人,获得了日本科学电影节最佳电影纪念奖。他也是世界大学网络的创始人之一,自 2001 年起该项目促使了英国和美国的许多大学的联系和交流。

中文版序

内野研二(Kenji Uchino)先生的《铁电器件》(*Ferroelectric Devices*)一书是铁电领域广为人知,在推动铁电器件的研究、开发和应用方面起着重要作用的一本专著。北京大学的董蜀湘教授等将其译成中文出版,相信对于推动我国铁电器件的广泛开发和应用必将起到重要的作用。

内野先生是一位优秀的教师,先后在日本上智大学和美国宾夕法尼亚州立大学从教,著述颇丰。本书采自他多年的研究、开发和教学积累,体现了他一贯的著述和教学风格,提纲挈领,重点突出,学术与实用并重,无论对于初学者还是有相当工作经验的研究人员和工程师,都能起到重要的引导和启发作用。他的课程说理透彻,形象鲜明,有很强的感染力,这些特点在本书中也有所体现,因而特别适合作为教材使用。早在上世纪80年代,他就把他的许多课件编辑制作成了一系列的视频专题,并在课堂上和一些相关的专业性会议和学术会议上放映,对推动铁电材料和器件的开发应用起到了独特的作用,以致在1989年的日本科学电影节上,他作为导演和制片人制作的几部以铁电畴的动态观测和陶瓷驱动器为主题的教育影片,获得了最佳电影奖。笔者至今仍保存有他的一些视频资料。

内野先生也是一位富有开拓精神的科学家。上世纪70年代末80年代初笔者和内野先生同在美国宾夕法尼亚州立大学材料研究所在L. E. Cross教授和R. E. Newnham教授领导的研究组中从事学习和研究工作。内野先生致力于电介质电致伸缩系数的测量,这是一个难度很高的研究工作,当时对一些介质电致伸缩系数的正负符号都难于确定,其精度要求达到了难以想象的高度,相当于要在地球上观测到月球上足球大小的物体。内野先生取得了一批较为可信的实测数据,为研究和发展电介质电致伸缩的理论提供了重要的基础。其后,在他从事压电致动器的研究开发工作中,他敏锐地抓住强场下压电参数的非线性,做了许多开拓性的工作,保证了高功率压电陶瓷与器件的发展。凡此种种,不一而足。

内野先生还可以说是一位很独特的“企业家”。他和日美两国许多与铁电器件制备和应用相关的企业有着广泛的联系,积极参与了若干有广泛影响的产业和行业组织的活动,在产业和学术与研究之间,也在美、日两国之间起到了独特的卓有成效的沟通和推动作用。从本书最后一章有关铁电器件未来的论述中读者可以感受到作者独特的视野和见解。可以这么说,内野先生后期活动的重点是放在了推动铁电业界的政、产、学、研的结合方面,在政策制定、行业发展、产业规划、标准制定等方面都发挥了重要的影响。这在铁电学界是很独特和罕见的。

笔者很高兴把内野先生的这本专著推荐给中国读者,希望本书中文版的出版也能推动我国铁电材料与器件行业的兴旺发展。

姚熹* 谨识
2014年10月

* 姚熹,西安交通大学教授,中国科学院院士,美国国家工程院外籍院士。

译者序

铁电器件与半导体器件、磁性器件一起构成了现代电子器件的基础。铁电器件主要包括压电器件、铁电电容器、铁电电阻器、铁电传感器(如热电、光电传感器)、铁电存储器等。在铁电器件领域里,压电器件因具备传感、力-电能量转换和驱动功能,已经设计和制备出多种功能电子器件,诸如力-电传感器、压电拾音器与扬声器、水声(声呐)换能器、医用超声换能器、压电滤波器、压电变压器、压电微位移驱动器、压电超声微马达等。铁电器件普遍应用于国防、电子与机械工业、移动通信、医学与生物等领域。

《铁电器件》中文版译自于美国宾夕法尼亚州立大学电子系教授内野研二(Kenji Uchino)的英文版 *Ferroelectric Devices* 第2版教材。该教材也是宾夕法尼亚州立大学电子系的研究生教材。内野研二教授是国际上多个学术委员会、学术刊物的主席、副主编;在国际刊物与学术会议上发表文章 550 篇、主编和合作编著学术专著 54 本、拥有 26 项专利,在铁电材料与器件领域里是一位具有较大影响力的专家。译者于 2000 年 1 月至 2001 年 12 月曾经在內野研二教授课题组作为 Research Associate 工作过两年,研制的毫米尺寸压电微马达获得过宾夕法尼亚州立大学材料研究所(MRL)2000 年材料科学进步一等奖。

《铁电器件》英文版教材自 2008 年以来一直用于北京大学工学院材料系和力学系研究生专业选修教材,学习过该课程的研究生普遍认为该书是一本学术性与实用性均很强的好教材。参与本书翻译和校对工作的有北京大学工学院上过这门课程的历届研究生,包括崔晓熙、石花朵、慈鹏弘、陈贵娥、陈佳祺、高贵云、张鲁辉、廖函斌、刘瑜、周宏伟、唐敬达、周浩、徐浩、林立志、刘振濮、张晓语、刘伟等。内野研二教授的研究生 Tao Yuan、Xiaoxiao Dong 和张宇轩(Zhang Yuxuan)等也帮助做了校正工作。几位活跃在铁电材料与器件研究领域的学者,董蜀湘、李美亚、郭栋、邢增平、国世上、高永康以及博士后陈建国等,对本书所有章节进行了校对和部分重译。董蜀湘根据内野研二的讲稿,提供了本书中大部分原始图,翻译了图注;同时重绘和翻译了所有英文表格。李美亚和董蜀湘终审了全部译文,并补译了部分遗漏内容。

鉴于译者水平有限以及时间仓促,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正和谅解。

译者

2014 年 6 月

前 言

铁电体是指一类具有自发极化特性的材料(译者加注)。铁电体可用于各种器件,诸如高介电电容、热释电传感器、压电器件、电光器件和正温度系数(PTC)热阻器件等。一些相关企业正在不断地大批量生产制造陶瓷电容、压电点火器、蜂鸣器和 PTC 热阻器等简单元器件。但是直到现在,铁电器件在许多其他功能应用方面,仍然还未实现商业化。例如:在光传感方面,半导体材料在光响应速度和灵敏度方面,要优于铁电材料;磁器件和半导体“快闪”存储器已经非常普及;而液晶已被普遍用于光学显示。在一些具有竞争力的材料面前,铁电体常常陷入困境。但是,近来新的铁电器件正在不断涌现和不断实现商业化,因此我对铁电器件的未来发展充满信心。我相信铁电器件早期遇到的困境是由于缺乏对铁电材料系统基础知识的积累,以及缺乏铁电器件开发的经验。

在过去 35 年关于铁电器件的教学经历中,除了一些多作者共同署名的论文集外,我感觉很难找到一本专注于铁电器件领域的教科书。因此,我决定整理我给历届研究生上课的讲稿,并收集了我在铁电器件发展方面的研究成果,撰写了这本综合性教科书。这本书系统介绍了铁电器件与铁电材料的理论背景、实用性的材料与器件设计、驱动与控制技术、典型应用,以及展望铁电器件的未来发展。虽然材料的铁电性很久以前就被发现了,但铁电器件发展相对较晚,而且涉及多学科,因此本书很难在有限的篇幅里介绍所有新的研究进展。本书将在第 1 版的基础上,引进铁电器件的最新研究成果,介绍铁电学的基本概念,学习和理解怎样设计和开发铁电器件。

本书章节构成如下:第 1 章做铁电性的一般性介绍;第 2 章进一步阐述其理论背景;第 3 章介绍铁电器件的实际设计和制造,包括最近开发的压电晶体和薄膜制备过程;第 4 章详细介绍电容应用;而第 5~6 章分别介绍薄膜和厚膜应用,即铁电存储和热释电器件,在第 6 章的最后部分还介绍了电卡(电热)器件;第 7 章介绍压电致动器、超声马达以及声换能器和压电传感器,也介绍了压电领域的新课题:压力发电机(俘能器);第 8 章介绍了铁电光学器件,诸如光阀(光开关)、光显示、波导、体光电器件;第 9~10 章介绍了 PTC 材料和复合材料的基本概念,以及它们的器件应用;最后一章讨论了铁电器件的未来发展,包括市场规模、器件中存在的可靠性和寿命问题、作者关于开发最具竞争力器件的策略等。

自《铁电器件》第 1 版出版至今已有 10 年了。这本书不仅在商业上有幸获得了成功,而且在铁电领域也获得认可而成为行业标准。新版本保留了铁电学中一些基本原理,如麦克斯韦方程、唯象理论、压电关系等,而应用方面则做了更新。

第 2 版反映了铁电领域里的最新研究成果,包括纳米和光技术、环境规则、替代能源等,以及铁电器件的发展趋势。新的版本增加了无铅压电材料、铁电的尺寸效应、电卡器件、微质量传感器、压电能量回收器、光阀和扫描仪和多铁器件,其中包括了磁电传感器。

即使对于传统的铁电器件,诸如电容、压电扬声器、时钟和变压器等,从着眼于未来考虑,旧的数据也被更新。

新的版本更加完整,各章增加了该章要点、例题和习题以及以下几点内容:

- 常见问题——通常是回答课堂提问。
- 实验演示——通过课堂实物演示而加深理解。
- 测验题——检查学生在学习中的理解情况。

这些提问、演示和测验题均是根据我多年教学讲义、学生的意见和反馈所积累获得的。这新增加的三点内容将帮助读者正确的理解本书的精髓。另外,根据年轻教师的强烈要求,本书所列出的测验题、习题已在另一本解答手册中给出了参考答案。我通常利用测验题作为课堂测验,例题作为课后作业,而各章习题作为期中和期末考试试题。我希望这样安排可为教师准备课后习题与考试试题提供方便。

新版本已全部修正了老版本中所发现的所有数学公式错误、英语错句或错字。

本书可供电子材料、光材料、通信、精密机械与机器人等领域的研究生、高年级本科生,以及相关工业界的工程师使用。虽然这本书设计为30个75分钟讲座,读者学习中可以自己再辅以例题与习题。

对于那些希望更深入学习智能压电致动器与传感器的读者,我建议学习《微机电学》(*Micromechatronics*)一书(K. Uchino, Jayne R. Giniewicz 著, CRC/Dekker 出版社, 2003)。另外,《基于 ATILA 软件的有限元方法与微机电学》(*FEM and Micromechatronics with ATILA Software*, CRC 出版社, 2008)是一个很好的实用性器件设计手册。

虽然我是本书的唯一作者,但本书包含了许多其他人员的贡献。我对 ICAT 中心的教师表示感谢,他们在我写作过程中提供了有益的建言和慷慨的帮助。特别要感谢的是宾夕法尼亚洛克海文大学(Lock Haven University)的 Uma Belegundu 教授,她提供了本书的所有习题解答。特别要致谢和悼念的是我以前的学生、宾夕法尼亚州印第安纳大学(Indiana University)教授 Jayne Giniewicz,他通读了整个书稿并做了语言润色,但他不幸英年早逝。最后要感谢我深深挚爱的妻子美智子(Michiko),感谢她一直以来持续的帮助。

对本书任何有意义的评论和改进都非常欢迎。请直接将您的反馈发到:Kenji Uchino at 134 Materials Research Laboratory, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802-4800; fax: 814-863-6734; E-mail: kenjiuchino@psu.edu.

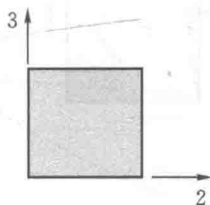
内野研二(Kenji Uchino)

预备知识测试

为了理解铁电器件,一些预备知识是应该具备的。尝试解答下面的问题。做完之前请不要看下一页的答案。

Q1 利用应力 X 和应变 x 之间的关系,描述弹性刚度系数 c 和柔顺系数 s 的定义。

Q2 指出下面正方形图中的剪应力 X_4 。



Q3 利用材料的质量密度 ρ 、弹性柔顺系数 s^E 给出声速 v 的表达式。

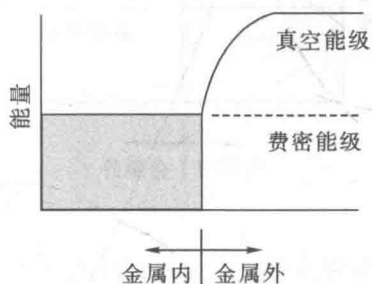
Q4 给出电容表达式。已知材料的介电常数为 ϵ , 电极面积 S , 电极间隙 t 。

Q5 计算材料的电极化强度 P 。已知材料的电偶极子密度为 $N(\text{m}^{-3})$ 、每个电偶极子的偶极矩为 $qu(\text{C} \cdot \text{m})$ 。

Q6 利用居里-外斯温度 T_0 和居里-外斯常数 C , 描述相对介电常数 ϵ 的居里-外斯定律。

Q7 利用材料的折射率 n 、真空中光速 c , 给出材料中的光速。

Q8 根据下图所示的一种金属的能带图, 指出它的功函数。



Q9 已知一个电压源的内阻为 Z_0 , 指出从该电压源获得最大功率的外阻抗(负载) Z_1 应该是多少?

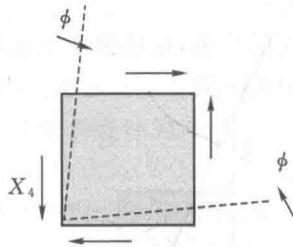
Q10 计算具有压电常数 d 的压电体在外应力 X 作用下所产生的极化强度 P 。

答案

(期望正确率高于 60%)

Q1 $X = cx, x = sX$

Q2 $X_4 = 2X_{23} = 2\phi(\text{rad})$



Q3 $v = 1/\sqrt{\rho s^E}$ (答 $v = 1/\rho s^E$, 给 0.5 分)

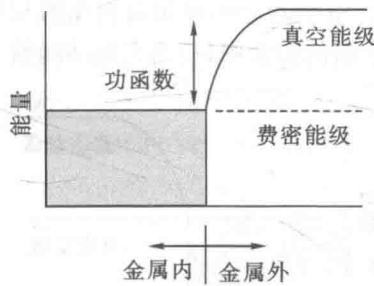
Q4 $C = \epsilon_0 \epsilon (S/t)$ (答 $C = \epsilon (S/t)$, 给 0.5 分)

Q5 $P = Nqu$

Q6 $\epsilon = C/(T - T_0)$ (答 $\epsilon = C/T$, 给 0.5 分)

Q7 $c' = c/n$

Q8 功函数如下图所示。

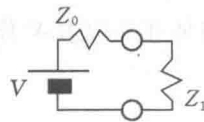


Q9 $Z_1 = Z_0$

在 Z_1 点, 电流和电压分别为 $V/(Z_0 + Z_1)$ 和 $[Z_1/(Z_0 + Z_1)]V$, 则功率为

$$\text{功率} = V^2 Z_1 / (Z_0 + Z_1)^2 = V^2 / (Z_0 / \sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_1})^2 \leq (1/4) V^2 / Z_0$$

当 $Z_0 / \sqrt{Z_1} = \sqrt{Z_1}$ 时, 功率取最大值, 此时 $Z_1 = Z_0$



Q10 $P = dX$ (参考 $x = dE$)

课时建议

(每学期 30 次,每次 75 分钟)

0. 课程解释与预备知识测试	1 次
1. 铁电材料概论	4 次
2. 铁电体的数学处理	4 次
3. 材料与器件的设计及制备工艺	2 次
4. 高介电材料	2 次
5. 铁电存储器件	1 次
6. 热释电器件	2 次
7. 压电器件	5 次
8. 电光器件	2 次
9. PTC 材料	1 次
10. 复合材料	2 次
11. 铁电器件的未来	1 次
实验演示	2 次
复习/答疑	1 次

符号列表

c	弹性刚度
C	居里-外斯常数
D	电位移
d, g	压电常数
E	电场强度
g	二次电光系数
G_1	吉布斯弹性能
k	机电耦合系数
M, Q	电致伸缩系数
n	折射率
p	热释电系数
P	介电极化强度
P_s	自发极化强度
r	一次电光系数
s	弹性柔顺系数
T_0	居里-外斯温度
T_C	居里温度(相变温度)
v	声速
x	应变
X	应力
x_s	自发应变
α	离子极化率
γ	洛伦兹系数
Γ	延迟相位
ϵ	相对介电常数
ϵ_0	真空介电常数
η	能量传递系数
μ	偶极矩

目 录

作者简介	I
中文版序(姚熹院士)	III
译者序	IV
前言	V
预备知识测试(附答案)	VII
课时建议	IX
符号列表	X
第 1 章 铁电材料概论	(1)
1.1 晶体结构和铁电性	(2)
1.2 自发极化的起源	(4)
1.3 场致应变的起源	(7)
1.4 电光效应	(10)
1.5 铁电体示例	(14)
1.5.1 钛酸钡	(15)
1.5.2 锆钛酸铅(PZT)	(17)
1.5.3 聚偏二氟乙烯(PVDF)	(17)
1.5.4 无铅压电陶瓷	(18)
1.6 铁电材料的应用	(18)
本章要点	(19)
本章测验题	(20)
本章习题	(20)
参考文献	(21)
第 2 章 铁电体的数学处理	(22)
2.1 物理性质的张量表示	(22)
2.1.1 张量基础	(22)
2.1.2 张量表示法	(23)
2.1.3 晶体对称性和张量形式	(23)
2.1.4 张量的约简(矩阵符号)	(28)
2.1.5 电致伸缩系数的矩阵符号	(29)
2.2 铁电体的唯象理论	(36)
2.2.1 唯象理论基础	(36)
2.2.2 朗道相变理论	(37)
2.2.3 电致伸缩的唯象理论	(40)
2.2.4 逆电致伸缩效应	(42)

2.2.5	电致伸缩的温度依赖性	(42)
2.3	反铁电性的唯象理论	(43)
2.3.1	反铁电体	(43)
2.3.2	反铁电体的唯象理论	(44)
2.4	铁电畴的贡献	(46)
2.4.1	铁电畴的转向	(46)
2.4.2	内田-池田(Uchida-Ikeda)模型	(49)
2.4.3	晶体结构与矫顽电场	(52)
2.4.4	滞后估算程序	(52)
2.4.5	电畴工程	(54)
	本章要点	(58)
	本章测验题	(59)
	本章习题	(60)
	参考文献	(62)
第3章	材料与器件的设计及制备工艺	(64)
3.1	材料设计	(64)
3.1.1	组分的选择	(64)
3.1.2	铁电性的掺杂效应	(68)
3.1.2.1	畴壁稳定性	(68)
3.1.2.2	结晶缺陷	(69)
3.1.3	大功率特性	(70)
3.2	陶瓷的制备工艺	(74)
3.2.1	陶瓷粉体的制备	(74)
3.2.1.1	固相反应法	(74)
3.2.1.2	共沉淀法	(74)
3.2.1.3	醇盐水解法	(75)
3.2.2	烧结工艺	(76)
3.2.3	单晶的生长	(78)
3.2.3.1	石英、铌酸锂和钽酸锂	(78)
3.2.3.2	PZN-PT, PMN-PT 和 PZT	(78)
3.2.4	模板晶粒生长	(79)
3.3	器件设计	(80)
3.3.1	单圆片	(80)
3.3.2	多层结构	(80)
3.3.3	压电单晶片/压电双晶片	(82)
3.3.4	弯张/柔性铰链杠杆放大机制	(86)
3.3.5	柔性复合材料	(87)
3.3.6	薄膜/厚膜	(88)
3.3.6.1	膜的制备技术	(88)

3.3.6.2	微机电系统的应用	(89)
3.3.6.3	薄膜/厚膜中的限制	(89)
3.4	铁电性尺寸效应	(90)
3.4.1	铁电性晶粒尺寸效应	(90)
3.4.2	铁电性三维晶粒尺寸效应	(92)
	本章要点	(95)
	本章测验题	(96)
	本章习题	(97)
	参考文献	(98)
第4章	高介电材料	(101)
4.1	陶瓷电容器	(101)
4.2	片状电容器	(102)
4.2.1	薄多层电容器	(102)
4.2.2	贱金属内电极	(103)
4.2.2.1	钛酸钡基电容片	(104)
4.2.2.2	钛酸铅基电容片	(104)
4.3	混合基底	(104)
4.4	弛豫铁电体	(105)
4.4.1	高介电常数	(107)
4.4.2	扩散相变	(107)
4.4.3	介电弛豫	(109)
	本章要点	(113)
	本章测验题	(114)
	本章习题	(114)
	参考文献	(115)
第5章	铁电存储器件	(116)
5.1	DRAM	(116)
5.1.1	DRAM的原理	(116)
5.1.2	铁电DRAM	(118)
5.2	非易失性铁电存储	(121)
5.2.1	FeRAM(反转电流型)	(121)
5.2.2	MFSFET	(123)
	本章要点	(125)
	本章测验题	(126)
	本章习题	(126)
	参考文献	(127)
第6章	热释电器件	(128)
6.1	热释电材料	(128)
6.1.1	热释电效应	(128)

6.1.2	响应率	(131)
6.1.3	品质因数	(132)
6.2	温度/红外辐射传感器	(133)
6.3	红外图像传感器	(134)
6.4	电卡器件	(137)
6.4.1	电卡效应	(137)
6.4.1.1	唯象方程	(137)
6.4.1.2	电卡材料	(138)
	本章要点	(139)
	本章测验题	(140)
	本章习题	(141)
	参考文献	(142)
第7章	压电器件	(143)
7.1	压电材料及其性质	(143)
7.1.1	压电的重要参数	(143)
7.1.2	压电材料	(148)
7.1.2.1	单晶	(148)
7.1.2.2	多晶材料	(148)
7.1.2.3	弛豫铁电体	(152)
7.1.2.4	聚合物	(152)
7.1.2.5	复合材料	(153)
7.1.2.6	薄膜	(153)
7.2	压力传感器/加速计/陀螺仪	(153)
7.3	压电振子/超声换能器	(156)
7.3.1	压电谐振	(156)
7.3.1.1	压电方程	(156)
7.3.1.2	机电耦合系数	(157)
7.3.1.3	纵向振动模式	(160)
7.3.2	压电振子的等效电路	(163)
7.3.3	压电振子	(164)
7.3.4	超声换能器	(164)
7.3.4.1	超声成像	(165)
7.3.4.2	声化学	(166)
7.3.5	谐振器/滤波器	(167)
7.4	表面声波器件	(169)
7.5	微质量传感器	(171)
7.5.1	生物传感器	(171)
7.5.2	黏度传感器	(172)
7.6	压电变压器	(172)