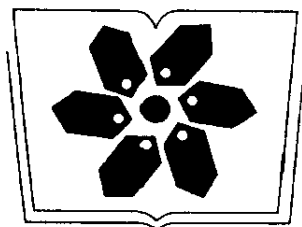


T11278
826



中国科学院科学出版基金资助出版



国家自然科学基金委员会资助出版

应用物理学丛书

驻极体

夏钟福 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书为《应用物理学丛书》之一. 书中系统地介绍了驻极体的基本原理、实验方法、主要应用及最新进展. 全书以储电介质的驻极态及其电荷动态特性为线索, 总结了作者多年来的研究和教学成果, 同时汇集了近 15 年来国内外驻极体研究的主要进展和学术思想. 全书共十一章, 前四章介绍了驻极体的基本原理, 充电和极化及实验方法, 第五章论述了电荷的建立, 储存, 脱阱及输运的电荷动力学特征, 第六章至第八章分别介绍了非极性驻极体、压电、铁电和热释电驻极体, 以及复合材料驻极体, 第九、十章介绍了驻极体的非线性光学效应和生物驻极体, 最后一章介绍驻极体的应用.

本书可以作为凝聚态物理, 尤其是电介质物理、功能材料、工程电介质及传感器等专业的教学用书或参考书, 也可供相关领域的科研人员和工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

驻极体/夏钟福著. -北京: 科学出版社, 2001

(应用物理学丛书/吴自勤, 杨国桢主编)

ISBN 7-03-009511-1

I. 驻… II. 夏… III. 驻极体 IV. TM 278

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 032790 号

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 11 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

2001 年 11 月第一次印刷 印张: 19 3/4

印数: 1—1 500 字数: 509 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

《应用物理学丛书》

编委会

主编：吴自勤 杨国桢

编委：(以姓氏笔画为序)

王之江	王业宁	王 琛	叶朝辉
华中一	肖定全	张泰永	冼鼎昌
姜承烈	莫 党	阎守胜	章 综

《应用物理学丛书》出版说明

1978年夏在庐山召开的中国物理学会年会(“十年动乱”结束后的全国物理学界第一次大型学术会议)上,部分与会专家与学者经过充分酝酿和热烈讨论后一致认为,为了迎接科学春天的到来和追赶世界先进科学技术水平,有必要编辑出版一套《实验物理学丛书》,并组成以钱临照院士为主编,王淦昌等5位院士为副主编,王之江、王业宁等26位院士或专家为编委的《实验物理学丛书》编委会.

20年来,这套丛书在钱临照院士的主持下,通过编委们的积极工作(有的编委还亲自撰稿),先后出版了《实验的数据处理》、《X射线衍射照相学》、《粒子与固体相互作用物理学》、《压电与铁电材料的测量》、《电介质的测量》、《物理技术在考古学中的应用》及《材料科学中的介电谱技术》等20部实验物理学著作.这些著作都是实验、科研和教学的系统总结,出版后受到读者的欢迎和好评,有不少被评为国家级、部级和院校级的优秀科技图书,如《实验的数据处理》一书获第一届全国优秀科技图书一等奖.这套丛书的陆续出版,在社会上引起较大影响,在科研、教学、经济建设和国防建设中发挥了积极的作用.

改革开放以来,我国在各个方面发生了翻天覆地的变化,经济体制由计划经济逐步转向社会主义市场经济,科学技术和教育也得到了空前的发展.为了适应社会主义市场经济的需要和满足社会的需求,我们决定对原丛书的出版宗旨、选题方向做相应的调整,重新组建编委会,并将原丛书更名为《应用物理学丛书》,使新丛书能在“科教兴国”和将科学技术转化为生产力的伟大实践中发挥更大的作用.

《应用物理学丛书》的出版宗旨和选题方向如下:

1. 密切联系当前科研、教学和生产的实际需要,介绍应用物理学各领域的基本原理、实验方法、仪器设备及其在相关领域中的应用,并兼顾有关交叉学科.

2. 反映国内外最新的实验研究与技术水平和发展方向,并注重实用性.

3. 以大专院校师生以及科研单位、国防部门、工矿企业的科研人员为对象,理论与实践紧密联系.

这套丛书将按照“精而准,系统化”的原则,力求保持并发展原《实验物理学丛书》已形成的风格和特色,多出书、出好书.

需要强调的是,《应用物理学丛书》将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作.

我们坚信,在编委们的共同努力下,在广大科研和教学人员的积极参与和大力支持下,《应用物理学丛书》的出版将对我国科学技术和教育事业的持续发展发挥积极的作用!

《应用物理学丛书》编委会

序

驻极体是凝聚态物理学的一个分支.它是电介质物理、电子材料和传感器工程等的交叉学科.近年来在国内外已取得了瞩目的发展.驻极体的研究内容涉及到许多高科技领域,它的研究和应用对我国国防科学的现代化和国民经济建设将具有重要意义.

本书是首部中文版的驻极体专著.全书以储电介质的驻极态及电荷动态特性为线索,论述了驻极体的基本原理,实验方法,材料性质和各种功能效应及其应用,使本书具有明显的系统性;本书是在国际上已出版的两部专著基础上调研了大量文献,力求反应近 15 年来国内外在该领域研究工作的新进展,尤其是近四五年来驻极体研究的新增长点,使本书具有新颖性;本书还在编写内容上为适应多层次读者的要求,兼顾到了知识的系统性、学术性、信息性和可应用性.

夏钟福教授长期致力于驻极体和相关功能电介质的研究和教学工作,在驻极体基础研究、新材料的制备和改性,及驻极体功能元器件的研制等方面均已取得了许多成果.在国内外发表有关驻极体研究学术论文百余篇.迄今已有 79 篇次被 SCI 和 EI 等收录,40 余次被 Phys. Rev., IEEE Trans. 等引用.本书的编写是以他为研究生讲课的教材为基础扩展撰写而成,并融入了他多年来的许多研究成果.

我相信该书的出版对促进驻极体的学术研究,加强该领域的信息交流,推动驻极体与相关学科的交流与合作,加速驻极体在高科技产品领域中的开发和应用等方面都将起到积极的推动作用.



2001 年元月

前 言

驻极体是一类用途广泛的储电功能电介质,在电子工程、环境净化、能源和非线性光学及生物医药工程等,尤其是在传感器工程方面有重要的应用,并已成为凝聚态物理学的一个独立的分支学科.它的研究与发展对电介质物理与材料的基础研究,以及对国民经济与科学及国防技术现代化的发展都具有不可忽视的重要意义.

本书是国内首部中文版的驻极体专著,著者从1998年初开始经过约四年的努力完成此书.本书以G. M. Sessler主编的《驻极体》(Electrets, New York, 1987)和B. Hilczer及J. Malecki所著的《驻极体》(Electrets, Warszawa, 1986)两本专著为基础,在对其内容及学术思想进行消化吸收的同时,按照驻极体的基本原理,形成工艺,实验方法,驻极体材料及其性质和驻极体的应用等分章论述,并汇集了1987年以来国内外驻极体研究的新进展、新成果,力图兼顾知识的系统性、学术性、信息性及应用性.

本人在从事驻极体物理、驻极体材料及其应用研究的同时,自1987年以来,先后为硕士和博士研究生讲授《驻极体物理学》、《驻极体材料物理与化学》及《驻极体和相关功能电介质的现状和发展》学位课及选修课,这些课程讲义的大部分内容已融入本书的各章节之中.

本书的写作承蒙殷之文院士、王业宁院士的关怀、支持和鼓励;雷清泉教授对本书提出了许多建设性的建议;在本书写作过程中还得到了张冶文教授、江键副教授、陈钢进、张晓青博士和邱勋林、李晓波、宋茂海同学,及同济大学研究生院的许多帮助.书中部分研究成果是本学科组分别在国家自然科学基金委员会、德国大众汽车厂基金会、德国国家科学技术部、及中国国家专家局等资助

的国家自然科学基金项目、中德合作科研项目及中-独(联体)合作科研项目中取得的.本书的出版得到了中国科学院科学出版基金和国家自然科学基金委优秀成果专著出版基金的联合资助.科学出版社的李义发编审对本书的出版倾注了大量的心血,作者仅借此机会向他们致以诚挚的感谢.

最后我还要感谢我的妻子黄昌金,没有她的理解和支持,尤其是作为英语副教授,在本书的写作中,对涉及的数百篇英文文献的收录及内容的综述中,她作了大量的文字工作.从这层意义上说,这本专著是我们的合作成果.

由于水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正.

著者

20001年6月

于同济大学

主要符号一览表

A	偶极子活化能, 面积
a	吸收系数, 晶胞边长
B	温度因数
b	晶胞边长, 复合系数
C	电容, 气体浓度
C_0	静态电容
C_m	捕获截面
c	比热, 真空中光速, 晶胞边长
c	弹性刚度
c_p	定压比热
c_v	定容比热
D	电位移
D	剂量, 扩散系数
D_f	自由载流子扩散系数
$\dot{D}$	剂量率
d	压电应变常数, 二阶非线性光学系数
d	间距, 密度
E	电场
E_c	矫顽电场
E_e	局域电场
E_i	内电场
E_T	阈值电场(临界电场)
E_e	电子束能量
e	电子电荷
e	压电应力常数
f	频率
$f(\alpha)$	自然频率分布函数
f_0	谐振频率
G	电导率, 吉布斯(Gibbs)自由能, 载流子对产额能量
G^*	辐射感应电导率

g	压电电压常数,二次偏振光系数
$g(A)$	偶极电荷活化能分布函数
$g(U)$	空间电荷活化能分布函数
H	焓,高度
h	压电刚度常数
h	加热率倒数
$h(t)$	复合中心的空穴数
$\hbar$	Planck 常数
I	电流,光强度
I_c	传导电流
I_p	光强
i	电流密度,序数
i_c	传导电流密度
i_d	位移电流密度
i_i	注入电流密度
j	序数
k	Boltzmann 常数,序数
l	长度,序数
l^E	局域电场系数
M	力矩,电致伸缩系数
M	可利用的陷阱密度
m	质量,序数,捕获电子密度
N	自由电子能级密度,导带能级空位数
N_o	偶极电荷密度
N_t	陷阱密度
N_{to}	满阱密度
n	自由电子密度,折射率
n_{to}	满阱电荷密度
P	极化强度
P_s	极化平衡值
P_r	永久极化,剩余极化
P_∞	瞬时极化

$[P]$	摩尔极化
p_a	载流子产额
p	热释电系数,压力,声压
p_a	大气压
p_e	热释电系数实验值
Q	电量
Q_e	电学品质因数
q	点电荷
R	电阻,摩尔,折射率,单能电子束外延区,复合系数
r	线性电光系数
r	粒子区,半径
$\bar{r}$	平均电荷重心
r_g	晶粒尺寸
S	熵
s	弹性顺度
s	厚度
T	温度,周期
T_o	最佳充电温度
T_c	居里(Curie)温度
T_g	玻璃相变温度
T_m	熔点
T_p	极化温度
T_r	室温(RT)
t	时间
t_p	极化时间
t_λ	载流子渡越时间
U	空间电荷活化能,内能,陷阱深度
U_c	电导活化能
U_E	静电能
V	电压,电位,体积
V_T	阈值电压
v	速度

v_a	声速
W	功, 耦合能
w	宽度
X	应力
x	应变
x	空间坐标
y	空间坐标
Z	阻抗
Z_a	声阻抗
z	空间坐标
α	热胀系数, 微观电极化率
α_0	自然弛豫频率
α_d	偶极子弛豫频率, 畴电极化率
α_{de}	形变极化率
α_e	电子极化率
α_i	离子极化率
α_r	空间电荷极化率
β	加热率, 肖特基(Schottky)系数, 体积压缩率, 极化度(≤ 1), 二阶非线性分子超极化率
γ	三阶非线性分子超极化率, 表面张力
δ	阻尼系数
ε	电容率(介电常数)
ε_0	真空电容率
ε_r	相对电容率
$\varepsilon(0)$	低频(静态)电容率
$\varepsilon(\infty)$	光频电容率
η	黏滞系数, 热释电品质因数
Θ	接触角
θ	角度
λ	波长
μ	载流子迁移率, 电偶极矩
μ^*	辐照区的载流子迁移率

μ_0	自由载流子迁移率
ξ	摩擦因数
ν	尝试逃逸频率,扫描电压的速率
ρ	电荷密度
ρ_f	自由电荷密度
ρ_m	声-电传感器灵敏度
ρ_t	捕获电荷密度
ρ_p	极化电荷密度
ρ_s	面电阻率
ρ_v	体电阻率
σ	面电荷密度,泊松(Poisson)比
δ	等效面电荷密度
σ_i	感应电荷密度
σ_T	热导率
τ	时间常数,弛豫时间,载流子寿命
τ_t	捕获电荷寿命
τ_f	自由电子寿命
Φ	功函数
χ	电极化率
χ_{ij}	线性极化率分量
χ_{ijk}	二阶非线性极化率分量
χ_{ijkl}	三阶非线性极化率分量
ψ	体积系数
ψ^f	陶瓷相体积系数
ψ^p	聚合物相体积系数
ω	角频率
ω_r	谐振角频率
ω_m	损耗极值频率

目 录

《应用物理学丛书》出版说明	i
序	殷之文 iii
前言	v
主要符号一览表	vii
第一章 绪论	1
§ 1.1 历史的回顾	2
§ 1.2 驻极体基本性质的概述	6
参考文献	8
第二章 电介质材料的极化及驻极体的物理原理	11
§ 2.1 电介质极化的宏观特性	11
2.1.1 在稳态电场中的电介质	11
2.1.2 在交变电场中的电介质	14
§ 2.2 电介质极化的微观描述	28
2.2.1 静态极化的分子机制	28
2.2.2 介电弛豫的微观描述	34
2.2.3 极化弛豫的普适关系和多体模型	41
2.2.4 聚合物的线性和非线性介电函数	45
§ 2.3 驻极体的电场、电场力和电流	51
2.3.1 层状电荷分布的驻极体电场	52
2.3.2 体电荷分布的驻极体电场	54
2.3.3 电场力	55
2.3.4 电流	57
§ 2.4 驻极体内的零电场平面及其迁移	58
参考文献	64
第三章 驻极体的形成方法(充电和极化)	66
§ 3.1 热极化方法和热驻极体	68

3.1.1 热驻极体的形成方法	69
3.1.2 热驻极体的一般性质	72
§ 3.2 电荷注入法和空间电荷驻极体	74
3.2.1 电晕充电法	74
3.2.2 电击穿充电法	78
3.2.3 非穿透性单能电子束辐照充电	83
3.2.4 液体接触法充电	89
3.2.5 穿透辐照充电	93
§ 3.3 光致极化和光驻极体	95
3.3.1 光驻极体的形成	95
3.3.2 光驻极体的一般性质	96
§ 3.4 力驻极体和磁驻极体的形成及其性质	100
3.4.1 力驻极体	100
3.4.2 磁驻极体	101
§ 3.5 充电结果的评述	103
参考文献	105
第四章 驻极体的实验方法	108
§ 4.1 测量电荷密度的方法	108
4.1.1 可分解式电容器法	109
4.1.2 电容探针法	110
4.1.3 动态电容器法	111
4.1.4 补偿法	111
4.1.5 热脉冲方法	112
4.1.6 极化和退极化电流法	112
§ 4.2 测量电荷分布的方法	113
4.2.1 切片(或刨削)测量法	114
4.2.2 组合感应退极化法	115
4.2.3 可分离式 Faraday 杯法	116
4.2.4 热脉冲方法	120
4.2.5 电容-电压分析法	128
4.2.6 虚电极法	132
4.2.7 压力脉冲法	135

4.2.8	脉冲电声法	147
4.2.9	激光强度调制法	148
4.2.10	测量空间和极化电荷分布的其他方法	149
4.2.11	对电荷分布测量方法的短评	150
§ 4.3	TSD(热刺激放电)法	153
4.3.1	TSD 的概述	154
4.3.2	TSD 的相关机理	158
4.3.3	TSD 的实验技术	162
4.3.4	TSD 的应用	166
4.3.5	TSD 方法和介电测量	169
4.3.6	电荷脱阱分析的其他方法	173
§ 4.4	偶极电荷和空间电荷的鉴别方法	177
	参考文献	182
第五章	驻极体的电荷储存及其电荷动态特性	187
§ 5.1	偶极电荷的极化和真实电荷的储存	187
5.1.1	驻极体的电导	187
5.1.2	偶极电荷的储存和弛豫	194
5.1.3	真实电荷的储存和衰减	198
5.1.4	真实电荷的等温衰减分析	206
5.1.5	驻极体电荷寿命的确定	211
§ 5.2	热处理对驻极体电荷稳定性的影响	215
5.2.1	高温充电(驻极态建立过程中的热处理)	215
5.2.2	常温充电后的热处理	217
5.2.3	充电前的淬火	219
5.2.4	无机驻极体材料的热处理改性	223
§ 5.3	极性驻极体的热退极化理论	225
5.3.1	极性驻极体的热刺激退极化(TSD)	225
5.3.2	具有弛豫时间分布的偶极子热退极化	229
5.3.3	区分活化能分布和自然频率分布的方法	234
§ 5.4	空间电荷驻极体的热刺激放电理论	235
5.4.1	空间电荷自运动的热刺激放电理论	235
5.4.2	偶极电荷热退极化的分子参数的估算	241

5.4.3 空间电荷脱阱的热刺激放电电流	247
§ 5.5 非均匀系统驻极体的热退极化分析	251
5.5.1 由 Maxwell-Wagner 效应产生的热刺激放电电流·····	251
5.5.2 由欧姆电导和偶极子消取向产生的气隙热刺激 放电	253
5.5.3 电荷 TSD 的理论和实验	257
§ 5.6 过剩电荷输运的相关特性	267
5.6.1 电极效应	268
5.6.2 载流子的迁移率	269
5.6.3 极限电荷	273
5.6.4 扩散	274
§ 5.7 脱阱电荷输运中的快、慢再捕获效应模型	275
5.7.1 慢再捕获效应	277
5.7.2 快再捕获效应	278
参考文献	283
第六章 驻极体材料及其相关性质	290
§ 6.1 经典驻极体材料	290
6.1.1 有机经典驻极体材料	291
6.1.2 无机经典驻极体材料	293
§ 6.2 聚合物薄膜驻极体材料	294
6.2.1 高绝缘性氟聚合物驻极体材料	294
6.2.2 非氟碳聚合物驻极体材料	317
§ 6.3 无机驻极体材料	332
6.3.1 硅基非晶态 SiO_2 薄膜	333
6.3.2 非晶态 Si_3N_4 薄膜和 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 双层膜	340
6.3.3 白云母	345
6.3.4 Al_2O_3 和其他无机驻极体材料	346
参考文献	347
第七章 压电、铁电和热释电聚合物驻极体	352
§ 7.1 压电、铁电和热释电性概述	352
7.1.1 压电和热释电性的定义	353
7.1.2 非极性聚合物驻极体的压电性	355