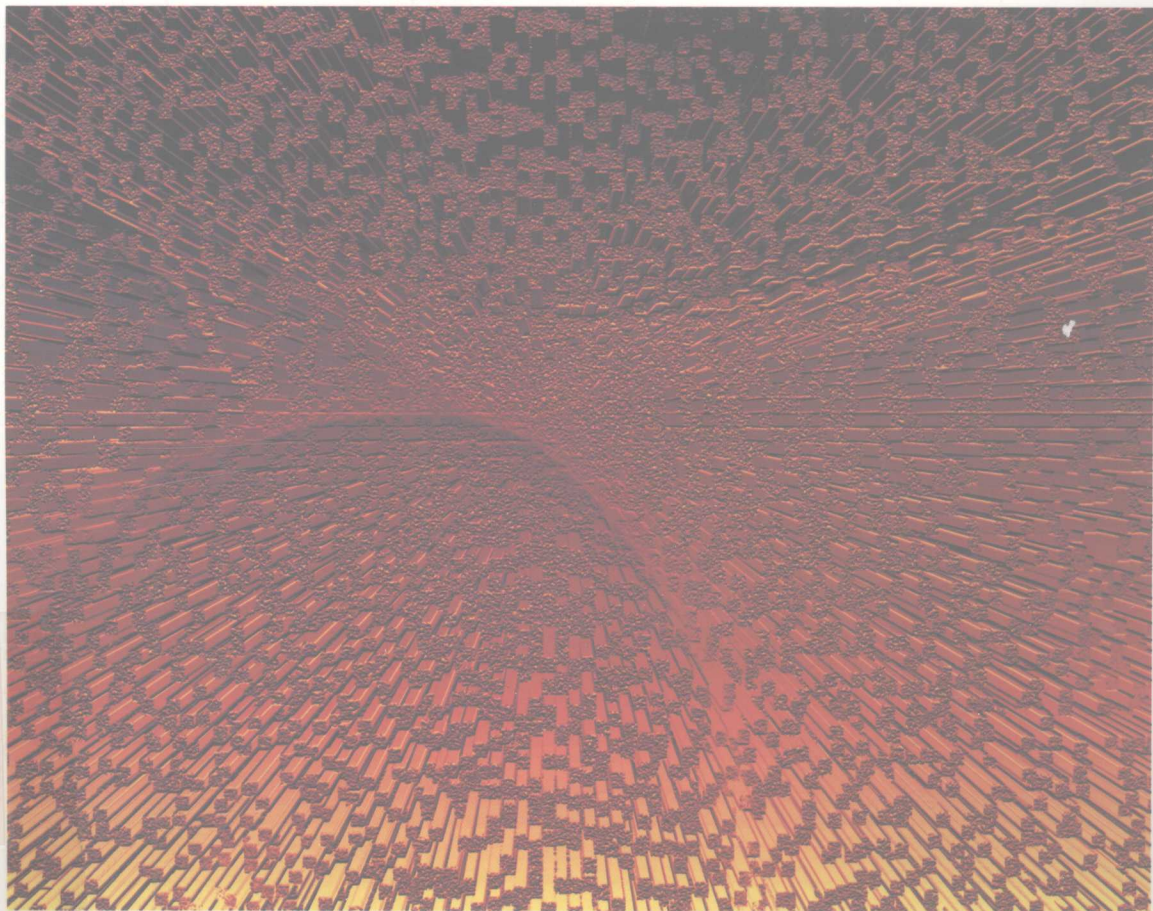


SEMICONDUCTOR MATERIAL AND  
DEVICE CHARACTERIZATION

# 半导体材料与 器件表征技术

(美) DIETER K. SCHRODER 著  
大连理工大学半导体研究室 译



WILEY



大连理工大学出版社

SEMICONDUCTOR MATERIAL AND  
DEVICE CHARACTERIZATION

# 半导体材料与 器件表征技术

(美) DIETER K. SCHRODER 著  
大连理工大学半导体研究室 译

主审 王德君  
译者 刘爱民 张贺秋 刘艳红  
赵宇 梁红伟

SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION, Second Edition by Dieter K. Schroder

Copyright © 1998 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved

Authorized translation from the English Language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

ISBN 0-471-24139-3

© 大连理工大学出版社 2008

著作权合同登记 06-2004 年第 191 号

版权所有 · 侵权必究

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体材料与器件表征技术/(美)施罗德(Schroder, D. K.)著;大连理工大学半导体研究室译. —大连:大连理工大学出版社,2008.6

书名原文:Semiconductor Material and Device Characterization

ISBN 978-7-5611-4138-0

I. 半… II. ①施…②大… III. 半导体材料—研究  
IV. TN304

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 074679 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn

大连印刷三厂印刷 大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸:170mm×240mm 印张:35.25 字数:691千字  
2008年6月第1版 2008年6月第1次印刷

---

责任编辑:梁 锋 王 伟 责任校对:知 轩  
封面设计:季 强

---

ISBN 978-7-5611-4138-0

定价:99.80元

# 译者前言

以半导体材料与器件为核心的半导体产业经过了近五十年的发展,到今天已极大地改变了人类的生产与生活方式,并成为人类文明发展水平的集中体现,但全面论述半导体材料与器件表征技术的专著却少之又少。人们更多地是从某篇文献中,或者从某本书的一两个章节中局部地理解、认识某一特定的表征技术。本书作者 D. K. Schroder 教授认识到这一问题后,以他自己多年的科学研究和教学经历、渊博的知识以及对本领域深刻的理解和不懈的努力,为我们呈上了这本《Semiconductor Material and Device Characterization》。本书在国外被广泛选用为研究生专业课教材及工程技术人员的参考书,并在文献中被大量引用。

我们有幸获得 D. K. Schroder 教授的授权翻译本书,翻译过程中我们非常谨慎,希望通过我们的努力,尽快把这本优秀的全面介绍半导体材料与器件表征技术的书籍介绍给国内的读者,也希望谨此为我国半导体科技的发展尽我们的微薄之力。

全书共分十章,其中第一、二章由赵宇翻译,第三、四、六章由张贺秋翻译,第五章由刘爱民翻译,第七章由梁红伟和刘爱民翻译,第九章由梁红伟翻译,第八、十章由刘艳红翻译。王德君同志对本书第二、三、五、六、九章进行了细致的审校,在此表示衷心感谢。其余章节由译者相互审校。刘爱民在全书的翻译过程中,进行了组织和协

调工作。本书在出版过程中得到了大连理工大学出版社科技教育出版中心的大力支持,并得到了大连理工大学研究生院的资助,在此表示衷心感谢。

限于译者水平有限,本书难免有错误和不妥之处,希望专家和读者指正。

言明者新

译者

大连理工大学

2008年6月

## 第2版序

第1版发行以后,新技术不断发展,原有技术不断提高,因此半导体表征技术进步显著。很多以前几乎不用的方法现在已有商业仪器出现。例如,9年前编写第1版的时候,扫描探针技术刚刚发明,专业性强,设备易损;全反射X-射线荧光技术也很少用到,而现在都已成为常规技术。硅金属杂质沾污的测量很大程度上属于深能级瞬态谱的研究领域,其设备庞大,集成电路工业中很少使用。随着载流子复合/产生寿命和少数载流子扩散长度测量工具的商业化,检测半导体中像铁这样的金属杂质已经成为常规的表征技术。虽然多年前就知道利用微波反射技术可以无接触式测量电阻率,但这一技术直到近几年才成为常规的测试手段。

在第2版中增加了与新技术有关的内容和对原有技术的改进。在这里,简要地按章节把增加的内容列出来:

- 第1章 外加电流的断面成像技术,共焦谐振器
- 第2章 带阶,卢瑟福背散射,断面成像
- 第3章 电迁移
- 第4章 MOSFET 沟道长/宽技术,热载流子
- 第5章 正电子湮灭技术
- 第6章 栅氧化层完整性,表面电荷分析
- 第7章 扩散长度,电晕电荷技术
- 第8章 有效迁移率
- 第9章 共焦光学显微镜,近场光学显微镜,内反射谱,散射谱仪,调制谱,干涉显微镜,发射显微镜
- 第10章 电压对比,扫描隧道显微镜,原子力显微镜

第2版中加强了每一章后面的习题及贯穿全书的例题,使其成为更有吸引力的教科书。新增加的几百条参考文献使本书尽可能地

包含最新的研究成果。修改了一些术语符号,如将氧化物厚度由  $W_{ox}$  改成  $t_{ox}$ ,栅极宽度由  $Z$  改成  $W$ ,以与惯用法尽可能一致。

图例中标明了实验数据的出处。来自亚利桑那州立大学的 M. J. Rack 和德克萨斯州仪器所的 T. J. Shaffner 阅读了本书并进行了深入的讨论。正如第 1 版里提到的,由于束流技术和 X-射线技术专业性强,所以第 10 章的内容相当凝炼。最近, W. R. Runyan 和 T. J. Shaffner 合作撰写了《Semiconductor Measurements and Instrumentation》(McGraw-Hill),这是一本非常优秀的书。本书忽略的一些物理/化学表征技术细节在其中都有介绍。感谢 John Wiley & Sons 出版公司的执行编辑 G. Telecki 和责任编辑 A. Prince 对本书出版发行的帮助。

DIETER K. SCHRODER

亚利桑那州立大学  
电子计算机工程系



# 第 1 版序

几年前准备讲授半导体材料和器件表征这门课时,发现没有一本合适的教材。早期表征方面的书不介绍表征技术,而且已经绝版了。只好用论文、评论、某些书的部分章节和仅在图书馆里才有的绝版书整理后,形成了自己的讲义。我也上了三天时间的研讨课,讨论讲义内容。有时开设工业课程,也同样遇到没有合适教材的问题,只能依靠翻印和手稿。讲授这些课程,以及与业界、学术界的接触,使我非常清楚地认识到有必要有一本全面介绍现代半导体表征技术的教材。这本书出自我的讲义,与学生及同事的讨论也有助于澄清某些观点。

本书意在填补文献中半导体材料和器件表征方面的空白。有很多半导体材料与器件物理、半导体工艺方面的书,还有关于半导体器件和电路设计的书,甚至有那么几本关于半导体器件和工艺模拟的书,但是没有关于半导体表征的书,以前由 W. R. Runyan 写的《半导体测量和仪器》及 P. F. Kane 和 G. B. Larrabee 写的《半导体材料表征》已经绝版了。

所有的半导体器件和材料都要被或简单、或复杂地表征。利用某种结构的测试来表征工艺水平。在表征领域有论文、评论、书的部分章节和专业书籍,但没有一本書能综合所有这些问题。我努力将半导体工业中电子、光学、化学、物理的主要表征技术都收录在这本书里。

这本书主要想针对两类读者。一类是熟悉半导体器件物理,了解基本的半导体器件并且想学习半导体测量的一、二年级研究生。另一类是业内的研究人员,他们理解器件,也熟悉一些表征方法,想要熟悉更多的表征技术,或者想在更广范围内学习现代半导体工业中用到的测量方法。本书也可以被看成特殊的表征技术手册,对细节感兴趣的读者希望读到参考文献。本书引用或参考了 1300 多条



文献,都是在准备初稿时认为最有用的。参看过很多文献,但并没有全部引用,不是有意排斥某些文献,只是选择了那些我们认为最有帮助的。

本书是从半导体器件工作者的角度来完成的,要相当熟悉主要半导体器件的物理和工作模式,比如,pn结、双极晶体管、金属氧化物半导体电容和晶体管,太阳能电池、肖特基二极管。我尽可能地叙述概念,有时为了理解特定的表征方法,也会解释一些材料和器件的背景知识。但是限于篇幅,不能推导所有的器件概念。如果读者对其中的概念不甚了然,可以适当参考一些半导体器件物理的教科书。本书内容在过去的七年里一直在作为研究生课程讲授,在三天的短期课程中用的是缩写版。一个学期的授课时间不能讲到细节,本书所有内容适当扩展需要两个学期时间。

仔细研究正在使用的大量半导体表征技术,与活跃于这一领域的科技工作者充分讨论,最终确定了本书的选题,我也用过其中的一些方法并对它们比较熟悉。电学表征技术已经非常普及,因此我在这方面用了比较多的篇幅。光学方法本身专业性强,不常用,但是它凭借无接触、高灵敏度的优势,不久会被广泛地使用。化学和物理表征技术也很专业,但高空间分辨率、可进行元素检测的特点使它们非常适用于某些场合。熟悉这些方法,理解它们的适用性和局限性是非常有用的。

很多人为此书的出版作出了贡献,美国学生联合会和参加研讨课的学生帮助本书阐明了很多概念。初稿完成以后,亚利桑那州立大学的 K. J. Joardar, D. A. Johnson, S. H. Park, K. T. Shiralagi, S. Visitserngtrakul 和德克萨斯州仪器所的 T. J. Shaffner 阅读了不同章节,作了有价值的修改并且提出了宝贵意见,为此我深表感谢。亚利桑那州立大学的 B. Hussian, Z. Mahdavi, I. G. Hwang, P. S. Ku 和我的妻子 Beverley 校对参考资料。在过去的七年中,亚利桑那州立大学的 Ron Roedel 多次旁听半导体表征技术课,和德克萨斯州仪器所的 Tom Shaffner, Graydon Larrabee 一起讨论,帮助我明确光学、化学、物理表征方面的许多概念。一些学生帮助整理实验数据及图注,我的儿子 Mark 帮助画图, Derek 帮忙打字。最后感谢亚利桑那州立大学工程学院的电子计算机工程系为我提供氛围和时间以从事本书的创作。

**DIETER K. SCHRODER**

亚利桑那州立大学

电子计算机工程系

# 引言

本书专门介绍半导体材料和器件表征技术,主要分为三个部分:电学表征、光学表征及化学和物理表征。由于电学表征方法得到广泛的应用,所以我们花了比较大的篇幅来介绍这些方法。本书分为如下章节:

第1章为电阻率。本章主要介绍半导体材料的基本参数——电阻率。介绍了常用的四探针方法、霍尔效应和其他的无接触测量方法,同时也介绍了测量薄膜电阻区域分布的方法。

第2章为载流子浓度和掺杂浓度。对最常用的电容电压法做了较详细的描述,同时介绍了电流电压法、二次离子质谱和卢瑟福背散射,也讨论了霍尔效应和其他新的光学、光热技术,还涉及到能带阶跃问题。

第3章为接触电阻、肖特基势垒和电迁移。所有半导体器件都有接触,所有接触都有接触电阻。本章介绍半导体器件中接触电阻的概念和它的各种测量技术。接触电阻源于金属-半导体接触,所以本章也介绍了金属-半导体接触势垒高度的测量方法,同时介绍了金属电迁移的概念和表征方法。

第4章为串联电阻、沟道长度/宽度、阈值电压、热载流子。材料电阻率会在很多方面影响器件性能,但它是材料的不可避免的固有属性。本章介绍了pn结、肖特基二极管、太阳能电池、双极晶体管以及MOSFET的电阻测量方法。MOSFET中串联电阻与沟道长度和宽度有关联,本章介绍了确定它们的技术方法。阈值电压的确定需要对一系列测量数据进行分析,本章给出了详细的介绍。本章还介

绍了热载流子的行为,对热载流子的表征也做了简要描述。

第5章为缺陷。掺杂往往不可避免,它影响器件的性能,也是我们不希望的。本章的重点是介绍杂质的探测和表征技术,以及载流子产生和复合的概念。对于深能级杂质而言电学测量是很好的方法,瞬态电容或电流谱是常用技术,比如深能级瞬态谱技术。选择瞬态电容测量还是瞬态电流测量,依据样品形状和电阻率,我们通常采用瞬态电容测量。一些特定的缺陷,比如空位,可以用正电子湮灭技术分析,本章也对此作了介绍。

第6章为氧化物和界面俘获电荷、氧化物完整性。前五章主要介绍了适用于多种半导体材料和器件的表征技术。本章主要针对硅材料 MOS 结构进行介绍。氧化物电荷和界面俘获电荷为本章的主要内容。为容易理解 MOS 电容的高低频 C-V 曲线,我们先介绍了一些背景知识,对功函数的概念和测量做了描述。栅极氧化物完整性是影响硅 MOS 器件可靠性的一个重要因素,本章对此也作了介绍。

第7章为载流子寿命。有一种半导体器件,杂质对其特性的影响,是由于载流子在杂质上的产生与复合造成的。本章介绍载流子在半导体体内复合寿命和表面复合寿命的概念以及各种载流子复合寿命的测量技术。测量方法不同往往得到不同的载流子寿命,而测量的方法也有很多,本章只讨论常用的方法,并给出这些方法的局限性。寿命是一种非常好的、灵敏性非常高的参数,它是表征材料纯净度和器件的常规测量方法。除了常规方法外,本章最后介绍了更先进的半导体表征技术——电晕电荷技术。

第8章为迁移率。本章主要介绍材料和器件的另一个重要的参数——迁移率。迁移率依赖其测量方法,所以掌握测量原理和测量技术,并了解其局限性显得非常重要。本章详细介绍了霍尔效应和 MOSFET 迁移率的测量方法。

第9章为光学表征。光学表征技术主要分两大类:一类是常用的(比如椭偏仪、光学显微镜),一类是比较专业的(比如拉曼光谱)。本章主要介绍常用的光学技术,为方便理解,作了必要的技术和理论方面的基本知识介绍。光学技术广泛应用于测量半导体特性和参数,比如,光学显微镜给出表面影像;椭偏仪得到绝缘体厚度;光透射谱可以测定硅中的杂质,如氧、碳;光致发光技术可以检测出浓度在  $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  的浅能级杂质的存在。拉曼光谱可以检测小面积的有机物污染、应力等,而红外线反射常用于外延层厚度测量。本章最后简单介绍了共焦光学、近

场光学、内反射、散射、调制光谱、干涉显微分析、发射谱分析等理论和技术。

第10章为化学、物理表征。最后一章总结了电子束、离子束、X-射线、 $\gamma$ -射线、电子探针技术。上述技术都属于典型的专业技术,设备相当复杂,分析实验结果往往是非常困难的工作,一般都由专家完成。材料的某些特性,通过电学表征和光学表征无法奏效,而以上这些技术则可以有效地分析,如杂质的空间分布、同一性、浓度和化合物的成分。化学和物理分析方法没有电子、光学技术灵敏性高,但是空间分辨率很高,比如高分辨透射电子显微镜能达到原子量级。本章的方法对于不断提高器件灵敏度、分辨率和降低器件尺寸非常重要。这一章同时讨论了扫描隧道显微镜和原子力显微镜技术。

一些章节后面的附录是关于半导体特性参数的数学推导,比如电阻率、迁移率、吸收系数等。大多数半导体工业界的人们习惯用混合单位制,而不是严格的MKS制,在本书中我们沿用了这个习惯做法。

# 目 录

第 1 章	电阻率	1
1.1	简介	1
1.2	两探针与四探针	1
练习 1.1		2
1.2.1	修正因子	5
练习 1.2		7
练习 1.3		7
练习 1.4		8
1.2.2	任意形状样品的电阻率	10
1.2.3	测量电路	13
1.2.4	测量偏差和注意事项	13
1.3	晶片映像	15
1.3.1	二次注入	16
1.3.2	调制光反射	17
1.3.3	载流子发射(CI)	18
1.3.4	光密度测定法	19
1.4	电阻率分布	19
1.4.1	微分霍尔效应(DHE)	20
练习 1.5		21
1.4.2	扩展电阻剖面分布(SRP)	22
1.5	非接触方法	26
1.5.1	涡流	26
1.6	电导率类型	29

1.7 优点和缺点 .....	31
附录 1.1 以掺杂浓度为函数的电阻率 .....	32
附录 1.2 本征载流子浓度 .....	34
习 题 .....	34
参考文献 .....	41
<b>第 2 章 载流子和掺杂浓度</b> .....	<b>48</b>
2.1 简介 .....	48
2.2 电容-电压测量 .....	48
2.2.1 微分电容 .....	48
2.2.2 带 差 .....	54
2.2.3 最大-最小 MOS-C 电容 .....	55
练习 2.1 .....	57
2.2.4 积分电容 .....	58
2.2.5 汞探针接触 .....	58
2.2.6 电化学 C-V 剖面分析 .....	59
2.3 电流-电压测量 .....	61
2.3.1 MOSFET 衬底电压-栅电压 .....	61
2.3.2 MOSFET 阈值电压 .....	62
2.3.3 扩展电阻 .....	63
2.4 测量误差和注意事项 .....	63
2.4.1 德拜长度和击穿电压 .....	64
2.4.2 串联电阻 .....	65
练习 2.2 .....	67
2.4.3 少数载流子和界面陷阱 .....	68
2.4.4 二极管边缘电容和寄生电容 .....	69
2.4.5 过量漏电流 .....	70
2.4.6 深能级杂质/陷阱 .....	70
2.4.7 半绝缘衬底 .....	72
2.4.8 仪器限制 .....	72
2.5 霍耳效应 .....	72

2.6 光学技术 .....	75
2.6.1 等离子体共振 .....	75
2.6.2 自由载流子吸收 .....	76
2.6.3 红外光谱 .....	77
2.6.4 光致发光 .....	79
2.7 二次离子质谱 .....	79
2.8 卢瑟福背散射 .....	80
2.9 侧向分布 .....	81
2.10 优点和缺点 .....	82
附录 2.1 并联还是串联 .....	84
习 题 .....	84
参考文献 .....	90
<b>第 3 章 接触电阻、肖特基势垒及电迁移 .....</b>	<b>98</b>
3.1 简 介 .....	98
3.2 金属-半导体接触 .....	98
3.3 接触电阻 .....	101
3.4 测量技术 .....	104
3.4.1 两终端接触电阻方法 .....	105
练习 3.1 .....	107
3.4.2 多接触电阻方法 .....	108
3.4.3 四终端接触电阻方法 .....	116
3.4.4 六终端接触电阻方法 .....	120
3.5 肖特基势垒高度 .....	122
3.5.1 电流-电压 .....	123
3.5.2 电流-温度 .....	124
3.5.3 电容-电压 .....	125
3.5.4 光电流 .....	125
3.5.5 方法比较 .....	126
3.6 电迁移 .....	127
3.7 优点和缺点 .....	131



附录 3.1 用于半导体接触的合金 .....	132
习 题 .....	133
参考文献 .....	139
<b>第 4 章 串联电阻、沟道长度与宽度、阈值电压及热载流子</b> .....	<b>147</b>
4.1 简 介 .....	147
4.2 pn 结二极管 .....	147
4.2.1 电流-电压 .....	147
4.2.2 开路电压延迟 .....	149
4.2.3 电容-电压 .....	150
4.3 肖特基势垒二极管 .....	150
4.3.1 串联电阻 .....	150
4.4 太阳能电池 .....	153
4.4.1 多光强度法 .....	154
4.4.2 常光强法 .....	155
4.4.3 并联电阻 .....	156
4.5 双极结型晶体管 .....	157
4.5.1 发射极电阻 .....	159
4.5.2 集电极电阻 .....	160
4.5.3 基极电阻 .....	160
4.6 MOSFET .....	163
4.6.1 串联电阻和沟道长度— $I-V$ .....	163
4.6.2 沟道长度-电容-电压法 .....	172
4.6.3 沟道宽度 .....	173
4.7 MESFET 和 MODFET .....	175
4.8 阈值电压 .....	177
练习 4.1 .....	178
4.9 热载流子 .....	181
4.10 优、缺点 .....	183
附录 4.1 肖特基二极管电流-电压方程 .....	183
习 题 .....	184

目 录	15
参考文献	190
<b>第 5 章 缺陷</b>	197
5.1 简介	197
5.2 产生-复合理论	198
5.2.1 理论轮廓	198
5.2.2 数学描述	200
5.3 电容的测量	203
5.3.1 稳态测量法	203
5.3.2 瞬态测量法	204
练习 5.1	207
5.4 电流的测量	211
5.5 电荷测量法	213
5.6 深能级瞬态谱(DLTS)	214
5.6.1 传统的 DLTS	214
练习 5.2	216
5.6.2 界面陷阱电荷的 DLTS 测量方法	221
5.6.3 光学 DLTS 和扫描 DLTS	223
5.6.4 注意事项	225
5.7 热激发电容和电流的测量	228
5.8 正电子湮灭光谱学	229
5.9 优缺点比较	232
附录 5.1 激活能以及俘获截面	232
附录 5.2 时间恒定下的解	234
附录 5.3 Si 和 GaAs 的性质	235
习 题	239
参考文献	243
<b>第 6 章 氧化物、界面陷阱电荷及氧化物完整性</b>	251
6.1 简介	251
6.2 固定氧化物陷阱和可动电荷	252
6.2.1 电容-电压曲线	252