

信息科学技术学术著作丛书

微电子器件物理

刘艳红 冯秋菊 编著



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

微电子器件物理

刘艳红 冯秋菊 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细介绍微电子器件的基本结构、工作原理和主要特性等。全书共7章,介绍半导体物理基础知识、PN结及二极管、双极型晶体管、金属-氧化物-半导体(MOS)电容、金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)、纳米CMOS器件、金属-半导体接触和结型场效应晶体管。同时,介绍微电子器件发展的最新成就。

本书可作为高等学校电子科学与技术、微电子学与固体电子学等相关专业的本科生、研究生的教材,也可供相关科研和工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

微电子器件物理/刘艳红,冯秋菊编著. —北京:科学出版社,2019.5
(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-061173-4

I. ①微… II. ①刘…②冯… III. ①微电子技术-电子器件-物理学-研究
IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 086925 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年5月第一次印刷 印张:22

字数:442 000

定价:130.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的推动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力? 这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术、数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业、低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性,体现出科学出版社“高层次、高水平、高质量”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



前 言

进入 21 世纪,人类正加速迈进信息社会。人们已经深切感受到信息社会发生的巨大变化,这一切都源于信息产业的兴起及信息社会的构建。信息产业技术含量高、渗透性强、增值快、资源配置优、生产成本低、劳动生产率高。它的发展改变了传统的经济增长模式,在国民经济中的主导地位越来越突出。在半导体技术之上发展起来的集成电路作为信息产业的基础和核心,是关系国民经济和社会发展全局的基础性、先导性和战略性产业。

集成电路产业的基础是半导体技术,核心是半导体器件。相对于集成电路,半导体器件又称为分立器件,是利用半导体材料的光电特性,实现具有一定电路功能的固体元件。经过半个多世纪的发展,半导体器件的种类不可尽述。以最简单的 PN 结二极管来说,可以实现整流、检波、变频、变容、开关、稳压、振荡、发光、光伏、光敏和热敏等多项功能。晶体管包括三极管(三端器件)和场效应管(四端器件),主要用于信号的转换、放大和存储。其中的场效应晶体管是数字电路的基本单元,近年来在信息存储中发挥了重要的作用。还有一些特殊器件,如可控硅作为大功率器件用于各种大电流的开关控制,电荷耦合器件作为成像单元在便携式电子产品中得到广泛应用。微波半导体器件因其具有性能优异、体积小、重量轻和功耗低等特性,随着微波通信技术的发展而快速发展,在防空反导等系统中得到广泛的应用。以上列举的都是半导体电子器件。另一类重要的半导体器件是半导体光子器件,包括发光二极管、光电探测器、激光器,以及作为绿色能源主要代表的半导体光伏器件等。

针对微电子学专业或电子科学与技术专业本科生开设的半导体器件物理课的教学都是从二极管和晶体管开始并将其作为主要内容来讲授的。特种半导体器件、大功率半导体器件、半导体光电器件等多是作为选修课内容,近年有些教材也增加了光电器件的部分内容,但受到篇幅和课时的限制,并不能讲解得很深入。本书内容仍然限定在二极管、三极管及场效应管,是作者近三十年学习和教学的心得总结。尤其是将作者在初学过程中感到疑惑并在后来的研修中理解了的问题直接在书中体现出来,希望能帮助初学者尽快理解半导体器件物理的精髓,从而准确把握半导体器件物理的研究方法和规律,深入掌握半导体器件物理的特性,为进一步深入学习其他半导体相关器件打下坚实的基础。

公式是半导体器件物理表达思想的特殊语言。读公式是理解半导体器件物理的重要环节和手段,为此我们尽可能详细地给出相关方程公式的推导过程,以方便

读者阅读和理解。尽管如此,仍然鼓励读者自己动手推导公式,这样才能真正掌握半导体器件物理的思想方法,并尽快达到书越读越薄的目的。

大连理工大学物理学院刘艳红副教授负责全书内容的统稿,并完成第 1、2、4、5、6 章的编写,辽宁师范大学物理与电子技术学院冯秋菊副教授完成第 3、7 章的编写。大连理工大学物理学院硕士研究生李腊参与了本书部分例题和习题的编写。本书是在大连理工大学物理学院刘爱民教授的鼓励下开始编写并最终完成的。大连理工大学微电子学院梁红伟教授对本书的完成提供了大量的建议与帮助,物理学院本科生刘意参与了公式的校对工作。在此对他们表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,望读者批评指正。

作 者

2019 年 1 月

主要符号表

a : 晶格常数

BV_{CBO} : 共基极接法反向击穿电压

BV_{CEO} : 共发射极接法反向击穿电压

C_J : 耗尽层电容, 也称为 PN 结的势垒电容

C_D : PN 结扩散电容

C_{dE} : 发射结扩散电容

C_{JE} : 发射结势垒电容

C_M : 米勒(Miller)电容

C_{OX} : 氧化层电容

C_S : 半导体表面电容

C_{FB} : 平带电容

C_{min} : 金属-氧化物-半导体(metal-oxide-semiconductor, MOS)二极管最小电容

C_{GS} : 栅-源电容

C_{GD} : 栅-漏电容

C_{GSP} : 栅-源寄生电容

C_{GDP} : 栅-漏寄生电容

EOT: 等效氧化层厚度

D : 扩散系数; MOS 场效应晶体管(MOS field effect transistor, MOSFET)的漏

E_c : 电场

E_{em} : 空间电荷区最大电场

E : 能量

E_0 : 真空能级

E_G : 禁带宽度

E_C : 导带能级

E_V : 价带能级

E_F : 费米能级

E_{Fn} : 电子的准费米能级

E_{Fp} : 空穴的准费米能级

E_i : 本征能级

E_T : 复合中心能级

$f(E)$: 费米函数

f_α : α 截止频率

f_β : β 截止频率

f_T : 特征频率

f_M : 最高工作频率

G : 产生率; 栅

g_D : PN 结的扩散电导; MOSFET 的漏导

g_M : 跨导

g_{BE} : 三极管的输入电导

I_E : 发射极电流

I_{En} : 发射极电子电流

I_{Ep} : 发射极电子空穴电流

I_{ER} : 发射结空间电荷区复合电流

I_D : 漏电流

I_G : 栅电流

$I_D(\text{sat})$: 漏饱和电流

I_B : 基极电流

I_C : 集电极电流

I_{CBO} : 发射极开路时的集电结反向饱和电流

I_{CEO} : 基极开路 ($I_B=0$) 时集电极-发射极的漏电流

I_{CBS} : 集电结的反向饱和电流

J_n : 电子电流密度

J_p : 空穴电流密度

J_s : PN 结反向饱和电流密度

J_{FN} : Forlow-Nordheim 隧穿电流

L_D : 德拜长度

L : 沟道长度

L_n : 电子扩散长度

L_p : 空穴扩散长度

L_{Ep} : 发射区空穴的扩散长度

L_{Cp} : 集电区空穴的扩散长度

m_0 : 自由空间电子质量

m_n^* : 电子的有效质量

m_p^* : 空穴的有效质量

m_{dn} : 导带底电子状态密度有效质量

m_{dp} : 价带顶空穴状态密度有效质量

m_{μ} : 轻空穴的有效质量

$m_{\mu h}$: 重空穴的有效质量

M : 雪崩倍增因子

n : 电子浓度

n_i : 本征载流子浓度

n_0 : 平衡时电子的浓度

n_p : P 型半导体中电子浓度

n_{p0} : P 型半导体中平衡时电子浓度

n_B : 基区电子浓度

n_{B0} : 基区平衡时电子浓度

n_t : 复合中心上的电子数

N_C : 导带的有效态密度

N_V : 价带的有效态密度

N_D : 施主掺杂浓度

N_A : 受主掺杂浓度

N_T : 复合中心密度

NM: 噪声容限

p : 空穴浓度

p_0 : 平衡时空穴的浓度

p_n : N 型半导体中空穴的浓度

p_{n0} : N 型半导体平衡时空穴的浓度

p_E : 准中性发射区空穴的浓度

p_{E0} : 准中性发射区空穴的平衡浓度

p_C : 准中性集电区少子空穴的浓度

p_{C0} : 准中性集电区少子空穴的平衡浓度

Q_G : 根梅尔(Gummel)数

Q_s : 半导体表面电荷面密度

$q\phi_s$: 半导体的功函数

$q\phi_M$: 金属功函数

Q_n : 反型层中电子电荷面密度

Q_i : 界面电荷

R : 复合率

r_s : PN 结串联电阻; MOSFET 源串联电阻

S : 三极管的饱和深度; MOSFET 的亚阈摆幅; MOSFET 的源; 微缩因子

t_{on} : 导通时间
 t_d : 延迟时间
 t_r : 上升时间分别用
 t_{off} : 关断时间
 t_s : 存储时间
 t_f : 下降时间分别用
 t_{ox} : 氧化层的厚度
 U : 净复合率
 v_{th} : 平均热运动速度
 v_d : 漂移速度
 v_s : 饱和速度
 v_c : 热发射速度
 V_A : 厄利电压
 V_B : 击穿电压
 V_{FB} : 平带电压
 V_G : 栅极电压
 V_{bi} : PN 结内建电势
 V_F : PN 结正向偏压
 V_R : PN 结反向偏压
 V_{BE} : 发射结压降
 V_{BC} : 集电结压降
 V_{EC} : 发射极与集电极间的压降
 V_{PT} : 穿通电压
 V_S : 半导体表面势
 V_T : 阈值电压
 V_{GS} : 栅源电压
 V_{DS} : 漏源电压
 V_{BS} : 体源电压
 $V_D(\text{sat})$: 饱和漏电压
 W : 空间电荷区宽度/MOSFET 晶体管的宽度
 x_n/x_p : 耗尽层在 N 型/P 型半导体侧的边界
 x_j : 结深
 $x_{d\text{max}}$: 最大耗尽层宽度
 α : 电离率;
 α_0 : 共基极直流电流增益

α_T : 基区传输因子

β_0 : 共发射极直流电流增益

$\Delta n / \Delta p$: 少子浓度

ΔE_D : 施主杂质的电离能

ΔE_A : 受主杂质的电离能

ΔE_C : 导带的带阶差

ΔE_V : 价带的带阶差

χ : 电子亲合势

ϕ_{MS} : 金属-半导体功函数差

ϕ_{FN} : N 型掺杂半导体的费米势

ϕ_{FP} : P 型掺杂半导体的费米势

τ : 少子寿命

τ_E : 发射结电容充电时间

τ_B : 基区渡越时间

τ_D : 集电结耗尽区的渡越时间

τ_C : 集电结充电时间

μ : 迁移率

γ : 发射效率

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

主要符号表

第 1 章 半导体物理基础知识介绍	1
1.1 半导体材料及晶体结构的基本知识	1
1.1.1 半导体材料	1
1.1.2 晶体结构	3
1.1.3 Si 的晶体结构	8
1.2 能带及能带理论	14
1.2.1 原子模型和薛定谔方程	14
1.2.2 自由空间、氢原子及有限空间中薛定谔方程的解	15
1.2.3 能带和布洛赫波	19
1.2.4 k 空间与第一布里渊区	22
1.3 固体的电传导机理	24
1.3.1 导体、半导体和绝缘体的能带	24
1.3.2 有效质量	26
1.3.3 能带结构	28
1.3.4 掺杂	30
1.4 载流子的统计分布	33
1.4.1 状态密度	33
1.4.2 费米分布、费米能级及玻尔兹曼分布	35
1.4.3 半导体中的电子浓度和空穴浓度	37
1.4.4 热平衡条件下半导体中的载流子浓度、费米能级位置	39
1.5 非平衡载流子	43
1.5.1 准费米能级	44
1.5.2 多子与少子	45
1.5.3 复合理论	46
1.6 载流子输运理论	53
1.6.1 漂移	54
1.6.2 扩散	60

1.6.3 强场效应	63
1.7 半导体工作方程——电流密度方程与电流连续性方程	66
1.7.1 泊松方程	67
1.7.2 电流密度方程	67
1.7.3 电流连续性方程	67
1.7.4 半导体方程的应用举例	69
习题	71
第2章 PN结及二极管	73
2.1 概述	73
2.2 平衡PN结	74
2.2.1 平衡PN结、能带图与内建电势	75
2.2.2 空间电荷区的分析与耗尽层近似理论	78
2.2.3 开路时正、反向偏置PN结	81
2.2.4 结电容	83
2.2.5 线性缓变结及其性质	84
2.3 PN结的直流特性	85
2.3.1 理想PN结的直流 I - V 特性——Shockley方程	85
2.3.2 实际PN结的直流特性	93
2.4 小信号特性——扩散电导与扩散电容	99
2.4.1 小信号电流的连续性方程	100
2.4.2 小信号电流与电压关系	101
2.4.3 扩散电导和扩散电容	102
2.4.4 小信号等效电路	103
2.5 电荷存储效应及开关特性	103
2.5.1 正向偏置时准中性区的存储电荷	104
2.5.2 开关的瞬态过程	104
2.5.3 电荷控制方程	106
2.5.4 开关时间	106
2.6 PN结的击穿特性	109
2.6.1 击穿及击穿的分类	109
2.6.2 雪崩击穿的条件	110
2.6.3 实际PN结的击穿	114
2.6.4 穿通击穿	115
2.7 温敏特性	116
2.7.1 反向偏置时的温敏特性	116

2.7.2 正向偏置时的温敏特性	117
2.8 异质 PN 结	118
2.8.1 异质结的分类	119
2.8.2 平衡异质结能带图及内建电势	120
2.8.3 平衡异质结空间电荷区相关的计算公式	121
习题	122
参考文献	123
第 3 章 双极型晶体管	124
3.1 基本结构及工作原理简述	124
3.1.1 基本结构	124
3.1.2 正向有源放大模式的工作条件	125
3.1.3 正向有源放大模式下的端电流分析	126
3.1.4 直流电流增益	127
3.2 理想晶体管的直流电流-电压关系	129
3.2.1 正向有源放大模式下少子分布	129
3.2.2 理想晶体管的电流	133
3.2.3 正向有源放大模式下电流增益	134
3.3 非理想特性分析	136
3.3.1 缓变基区晶体管	137
3.3.2 基区扩展电阻和发射极电流集边效应	139
3.3.3 发射区重掺杂效应	140
3.3.4 基区宽度调制效应	142
3.3.5 萨哈效应和韦氏效应	144
3.3.6 基区展宽效应	146
3.4 工作曲线及击穿特性	149
3.4.1 共基极接法	149
3.4.2 共发射极接法	150
3.4.3 反向饱和电流	151
3.4.4 击穿电压	152
3.4.5 穿通击穿	153
3.5 器件模型	155
3.5.1 E-M 模型	155
3.5.2 G-P 模型	156
3.6 小信号响应——频率特性	159
3.6.1 小信号等效电路	159

3.6.2	频率特性分析	161
3.6.3	特征频率及渡越时间	164
3.6.4	增益带宽乘积	166
3.6.5	最高工作频率	166
3.7	开关特性	167
3.7.1	开关电路、开态与关态	167
3.7.2	开关过程	169
3.7.3	开关模式及饱和深度	171
3.7.4	提高开关速度的途径及钳位二极管	172
3.8	新型晶体管	172
3.8.1	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 宽带隙发射极晶体管	173
3.8.2	锗硅基区晶体管	175
	习题	176
第4章	MOS 电容	178
4.1	理想 MOS 结构及性质	178
4.1.1	理想 MOS 结构的定义	178
4.1.2	半导体表面状态	179
4.1.3	理想 MOS 结构的阈值电压及强反型以后的最大耗尽层宽度	183
4.1.4	半导体表面电荷与表面势	185
4.2	实际 MOS 电容的平带电压及阈值电压	187
4.2.1	金属-半导体功函数差	188
4.2.2	氧化物电荷及其影响	190
4.3	MOS 结构的电容-电压特性	193
4.3.1	理想 MOS 电容的 C-V 特性	193
4.3.2	实际 MOS 电容的 C-V 曲线	198
	习题	200
第5章	MOSFET	202
5.1	理想 MOSFET 基本原理及特性	203
5.1.1	基本结构及参数	203
5.1.2	MOSFET 原理及特性的一般描述	203
5.1.3	MOSFET I-V 特性的理论推导	206
5.1.4	跨导和漏导	209
5.2	MOSFET 的非理想效应	210
5.2.1	沟道长度调制效应	210
5.2.2	有效迁移率	212

5.2.3 亚阈电流及亚阈摆幅	213
5.3 阈值电压的调整	217
5.3.1 多晶硅栅	218
5.3.2 衬底掺杂浓度	218
5.3.3 氧化层厚度	218
5.3.4 衬底偏压——体效应	220
5.4 频率特性	223
5.4.1 小信号等效电路	223
5.4.2 实际的漏导和跨导	223
5.4.3 频率特性的限制因素及米勒电容	225
5.4.4 特征频率	226
5.5 短沟道效应	227
5.5.1 阈值电压的短沟、窄沟效应	227
5.5.2 漏感应势垒降低效应	231
5.5.3 穿通效应	232
5.5.4 速度饱和及其漏电流饱和电压	233
5.5.5 高场效应	236
5.6 CMOS 技术简介	239
5.6.1 基本结构及特点	239
5.6.2 门锁效应	239
习题	240
第 6 章 纳米 CMOS 器件	242
6.1 微缩律	243
6.2 纳米 CMOS 器件中的物理问题	244
6.2.1 与薄氧化层相关的物理问题	244
6.2.2 反型层量子效应	250
6.2.3 迁移率退化及速度饱和	252
6.2.4 杂质随机分布	254
6.2.5 阈值电压降低的限制条件	257
6.2.6 源漏电阻	260
6.3 纳米 CMOS 中的新技术	264
6.3.1 栅工程	264
6.3.2 沟道工程	268
6.4 新型结构纳米 CMOS 器件	274
6.4.1 SOI	274

6.4.2	UTB-SOI、双栅和 FinFET	278
6.4.3	应变硅技术	285
6.4.4	高 K 介质与金属栅	294
参考文献		295
第 7 章 金属-半导体接触及结型场效应晶体管		298
7.1	金属-半导体接触	298
7.1.1	肖特基结	299
7.1.2	肖特基二极管	308
7.1.3	肖特基二极管和 PN 结二极管的比较	309
7.1.4	肖特基二极管的频率特性	311
7.1.5	箝位晶体管	312
7.1.6	欧姆接触	313
7.2	金属-半导体场效应晶体管	314
7.2.1	器件结构	314
7.2.2	工作原理	315
7.2.3	夹断电压、阈值电压和漏饱和电压	316
7.2.4	电流-电压关系的理论推导	317
7.2.5	静态特性	319
7.2.6	小信号等效电路和特征频率	320
7.2.7	MESFET 的分类及 JFET	322
7.3	异质结 MESFET 和 HEMT	324
7.3.1	二维电子气的形成及其性质	324
7.3.2	二维电子气的性质	325
7.3.3	HEMT 的工作原理	327
习题		329
附表		331
附表 1 常用物理常数表		331
附表 2 Si 和 GaAs 在 300K 时的重要性质		332
附表 3 重要半导体材料的特性		333