

静电感应器件作用理论

李思渊 编著

兰州大学出版社

内 容 简 介

本书全面地论述了静电感应器件的基本作用理论。全书共分六章：第一章论述器件分析的物理基础；第二章论述电力器件的特殊物理问题；第三章论述结栅场效应晶体管(JFET)；第四章至第六章分别论述静电感应晶体管(SIT)、双极模式静电感应晶体管(BSIT)以及静电感应晶闸管(SITH)作用理论。

本书叙述力求理论联系实际，并力求反映国内外的最新发展。本书主要供从事静电感应器件开发研究、生产和应用人员阅读，同时可作为半导体器件专业的教师、研究生以及高年级本科生的教学参考书或教材。

静电感应器件作用理论

李思渊 编著

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水路 216 号 电话:8617156 邮编:730000

甘肃静宁印刷厂印刷

开本: 850×1168 毫米 1/32

印张:17

1996 年 5 月第 1 版

1996 年 5 月第 1 次印刷

字数:426 千字

印数:1—2000 册

ISBN7-311-00937-5/O·118 定价:16.80 元

前 言

电力电子技术是在非常广泛的领域内支持多项高新技术发展的基础技术之一，是信息产业和传统产业之间的重要接口，电力电子技术的最新发展为大幅度节能、节材、提高生产效能提供了重要的新手段，为机电融合的一体化开辟了新的道路。电力电子技术与微电子技术相结合，一方面使电力电子器件发展到“功率集成”的层次，同时使微电子技术和计算机应用更有效、更广泛的渗入到传统产业，实现传统设备的更新换代和对传统产业的技术改造。

电力电子器件是发展电力电子技术的基础。一代新的器件可带来一代新的装置。器件领域也是最活跃，发展最快的领域。在品类繁多的电力半导体器件领域，静电感应器件是新发展起来的独具特色的一大类电力半导体器件，其主要品种有各类静电感应晶体管(SIT)，静电感应晶闸管(SITH)，双极模式静电感应晶体管(BSIT)以及静电感应集成电路(SIT-IC)等。静电感应器件集高压、大电流、高频于一身并具有一系列优异的性能，而具有广阔的应用前景和发展前途，因此受到人们的广泛关注。

目前，我国的静电感应器件正处于全面开发研究，逐步形成生产能力以及开拓应用的阶段。在这些方面，国内虽然已有一定的工作基础，但总的说来还是薄弱的。在器件的基础理论研究、关键制造技术以及应用研究领域都有大量的工作要做。多年来在静电感应器件的开发研究中，我们深感到基础理论的重要性和迫切性，同时也受限于当前理论落后于实践的现状。除文献外，至今还没有一本全面而系统的论述静电感应器件作用理论的书籍可供

参考。制管工艺实践得不到理论的有效指导而带有相当的经验性。理论的落后也直接或间接的带来了许多技术困难。有鉴于此，作者在总结多年工作的基础上，充分吸收了国内外的理论研究结果，在百忙之中用了五年多时间写成此书。书中系统地阐述了静电感应器件作用的物理机制、理论模型以及实验规律，力求说明器件电学性能与结构、材料和制造参数间的关系，以使给器件的研制者和生产者在进行器件的结构设计、工艺设计、电参数的调节与控制以及电性能的研究和应用时提供必要的理论基础。有效地促进国内静电感应器件的迅速发展是写本书的基本目的。本书以静电感应器件作用理论为主要内容，与之相配合的后续书《静电感应器件设计与制造》随后将出版。

本书编写过程中，电子科技大学谢孟贤教授、西安电子科技大学孙青教授，兰州大学场感应器件研究所刘瑞喜、何山虎、刘肃、桑保生、杨建红等同志给予了大力的支持和帮助，书稿的整理工作由李君亚先生完成，作者谨向他们致以真诚的感谢。作者还感谢田文淑同志长期所给予的支持和关心。

由于作者水平所限，加之工作十分繁忙，书中错误和不妥之处恳请广大读者批评指教。

作者于兰州大学
一九九五年四月

主要符号表

a	冶金沟道半厚度
a_{eff}	有效沟道半厚度
a_0	零栅压栅—沟 p — n 结耗尽层厚度
A	面积
A_j	结面积
$b(x)$	中性沟道半厚度
C_{GS}	栅—源电容
C_{GA}	栅—阳极电容
D_a	双极扩散系数
D_n	电子扩散系数
D_p	空穴扩散系数
d_c	沟道厚度
E	电场强度；能量
E_c	导带底能级；临界电场强度
E_F	费米能级
E_g	禁带宽度
E_s	饱和电场
E_t	陷阱能级
E_v	价带顶能级
f	频率
f_M	截止频率
F_n	电子流

F_p	空穴流
G_0	零压时的沟道电导
g_m	跨导
g_{mi}	饱和区的跨导
g_d	微分漏电导
G^*	本征阻断增益
$h(x)$	栅—沟结耗尽层厚度
h_{FE}	共发射极电流增益
h_{FS}	BSIT 共源电流增益
I	电流
I_D	漏电流
I_A	阳极电流
I_G	栅电流
I_K	阴极电流
I_{Dsat}	饱和漏电流
I_F	正向电流
I_L	泄漏电流
I_R	反向漏电流
j	电流密度
j_n	电子电流密度
j_p	空穴电流密度
k	玻尔兹曼常数
K_p	功率增益
L	长度; 扩散长度
L_a	双极扩散长度
L_c	沟道长度
L_D	德拜长度

L_{GA}	本征栅点到阳极的耗尽层距离
L_{GK}	本征栅点到阴极的耗尽层距离
L_n	电子扩散长度
L_p	空穴扩散长度
m_n^*	电子有效质量
M	倍增因子
n	电子浓度
n^+	高掺杂 n 区
$\bar{n}$	平均电子浓度
n'	过剩电子浓度
n_t	陷阱态上的电子浓度
n_i	本征电子浓度
N_A	受主掺杂浓度
N	净掺杂浓度
N_D	施主掺杂浓度
N_D^-	轻掺杂 n 区的施主浓度
N_t	陷阱态浓度
p	空穴浓度
p^+	高掺杂 p 区
q	电子电荷
Q	电荷量
Q_L	左侧电荷量
Q_R	右侧电荷量
r_j	结半径
r_d	微分漏电阻
r_s	源串联电阻
R	电阻

R_{on}	通导电阻
$R_{\square}$	薄层电阻
S	表面复合速度; 类三级管特性的斜率
t	时间
t_{on}	开启时间
t_{off}	关闭时间
t_{OL}	左侧起始空间电荷区的时间
t_{OR}	右侧起始空间电荷区的时间
T	温度; 周期
U	净复合速率
V_{th}	载流子热运动速率
v_s	饱和漂移速度
V_c	临界漂移速度
V	电压
V_D	漏压
V_G	栅压
V_A	阳极电压
V_B	击穿电压
V_j	结电压
V_{Dsat}	饱和漏电压
V_{on}	通导电压
V_{FB}	平带电压
V_M	跨越中间区域的电压降
V_P	沟道夹断电压
V_R	反向电压
V_T	热电压
v_{sl}	散射极限速度

W	总沟道宽度
W_i	单条沟道宽度
W_s	源厚度
W_G	栅厚度
W_n	高阻区长度
x	坐标
X_m	耗尽层宽度
x_j	结深
y	坐标
z	坐标
α	共基极电流增益
β	沟道夹断因子
β_r	注射效率
ϵ_0	自由空间介电常数
ϵ	硅的介电常数
θ	倾斜角
$\theta_{\text{效}}$	有效造形角
σ	电导率
σ_n	电子俘获截面
σ_p	空穴俘获截面
μ	电压放大系数
μ^*	本征电压放大系数
μ_n	电子迁移率
μ_p	空穴迁移率
μ_a	双极迁移率
μ_L	晶格散射迁移率
μ_0	低电场迁移率

ρ	电阻率；电荷密度
ρ_m	可动电荷密度
ρ_f	固定电荷密度
τ	时间常数；寿命
τ_n	电子寿命
τ_p	空穴寿命
τ_a	双极寿命
τ_{sc}	空间电荷区产生寿命
τ_A	俄歇寿命
Φ	电势；费米电势
Φ_B	自建电荷
Φ_C	沟道电势
Φ_P	沟道夹断电势
Φ_{min}	沟道势垒高度；鞍点势

目 录

第一章 器件分析的物理基础	1
§ 1 电子与空穴浓度的表示	1
§ 1.1 电子和空穴浓度	1
§ 1.2 np 积	2
§ 1.3 电中性方程	4
§ 1.4 重掺杂区的禁带收缩(变窄)效应	7
§ 2 载流子输运过程的描述	10
§ 2.1 电场、电势及能带的电势表示	10
§ 2.2 漂移运动和迁移率	13
§ 2.3 扩散运动	19
§ 2.4 电流密度方程	20
§ 3 非平衡条件下的载流子	21
§ 3.1 注入(或抽出)	22
§ 3.2 载流子空间电荷中和	24
§ 3.3 平衡的恢复过程	25
§ 3.4 连续性方程和电流的转换	34
§ 4 复合过程的动力学	35
§ 4.1 俘复合速率	35
§ 4.2 低注入下少子的寿命	38
§ 4.3 表面复合速度	39
§ 5 复合产生中心	41
§ 6 分析 $p-n$ 结时的基本假设	45
§ 7 $p-n$ 结电流机构和特征	49
§ 7.1 $p-n$ 结电流的物理本质	49

§ 7.2	结边界处的载流子浓度	53
§ 7.3	势垒区的复合电流	57
§ 7.4	p-n 结的正向 I-V 特征	58
§ 7.5	p-n 结的反向电流	60
§ 8	内建电场	63
§ 9	空间电荷限制效应及电子三极管的不饱和特性	68
§ 10	n^+-n 高低结的反射特性和复合速度	72
§ 10.1	非平衡少子浓度分布	73
§ 10.2	α 的物理意义	79
§ 10.3	α 与器件结构、材料及制造参数的关系	83
第二章	电力半导体器件的物理问题	88
§ 1	高电平注入条件下的电流传输	88
§ 2	高电平注入条件下的载流子寿命	92
§ 2.1	俄歇复合寿命	92
§ 2.2	一阶复合寿命随注入电平的变化	95
§ 3	单一载流子的注入问题	99
§ 4	空间电荷效应限制的载流子双注入问题	104
§ 5	体复合限制的双注入问题	108
§ 6	寿命不等时的双注入情况	114
§ 7	晶闸管通态压降的理论分析	121
§ 7.1	模型与假设	121
§ 7.2	p-n 结两侧边界载流子浓度间的关系	123
§ 7.3	不同注入电平下的边界载流子浓度比 ψ	126
§ 7.4	高低结 p^+-p 对应的边界载流子浓度和浓度比 ψ_0	129
§ 7.5	正向状态下结构的载流子浓度分布	130
§ 7.6	不同注入电平对应的电流密度	134
§ 7.7	通态压降 V_F 的求算	135
§ 8	$p^+-s_n-n^+$ 结构的正向特性	146
§ 8.1	载流子分布	146
§ 8.2	正向特性和通态压降	150

§ 8.3	影响正向特性的诸因素	156
§ 9	$p-i(s_n)-n$ 结构的反向恢复特性	159
§ 9.1	基本的物理描述	160
§ 9.2	反向恢复过程的定量分析	166
§ 9.3	中间区轻掺杂的影响以及扩散结的情况	178
§ 10	电力器件的耐压容量	179
§ 10.1	平行平面结的雪崩击穿电压	180
§ 10.2	$p-i-n$ 结的击穿电压	182
§ 10.3	穿通结的击穿电压	182
§ 10.4	基极开路晶体管的击穿电压	184
§ 10.5	晶闸管的阻断电压	186
§ 11	电力器件的边缘造形	188
§ 11.1	耗尽层弯曲	189
§ 11.2	边缘造形	190
§ 12	平面扩散结耐压的改善	199
§ 12.1	平面扩散结的击穿	199
§ 12.2	平面扩散结击穿电压的改善	203
第三章 结栅场效应晶体管(JFET)理论		211
§ 1	引 言	211
§ 2	基本的器件物理	215
§ 2.1	偏置条件下导电沟道的情况	215
§ 2.2	电流传导的特点	217
§ 3	长沟道 JFET 作用理论—缓变沟道近似(GCA)理论	220
§ 3.1	基本假设	221
§ 3.2	基本电流方程	224
§ 3.3	器件的两个重要参数	229
§ 4	短沟道 JFET 理论—载流子速度饱和理论	232
§ 4.1	基本的器件物理	232
§ 4.2	物理过程的特点	238
§ 4.3	电流—电压($I-V$)特性	239

§ 4.4	跨导	248
§ 4.5	微分漏电导 g_d	252
§ 5	JFET 电流饱和机制的各种理论模型讨论	255
§ 5.1	概论—理论发展过程的回顾	255
§ 5.2	基本控制方程和缓变沟道近似(GCA)	258
§ 5.3	饱和模型	261
§ 5.4	数值计算结果	265
§ 6	JFET 沟道电势、电场和载流子分布的实验测量	274
第四章 静电感应晶体管(SIT)作用理论		283
§ 1	概论	284
§ 1.1	结构和制造特点	284
§ 1.2	SIT 的 $I-V$ 特性	285
§ 1.3	几何模型	287
§ 2	基本的器件物理	288
§ 2.1	纵向结构($n^+ - \bar{n} - n^+$)	288
§ 2.2	横向结构	291
§ 2.3	沟道内的电场	292
§ 2.4	沟道势垒	297
§ 2.5	载流子越过势垒	302
§ 3	SIT 作用理论(I)—阻断态和小电流分析	303
§ 3.1	分析模型	303
§ 3.2	势函数 $\Phi(x, y)$	306
§ 3.3	势垒高度	311
§ 3.4	参数 η^* 和 μ^*	316
§ 3.5	本征正向阻断增益 G^*	318
§ 3.6	结构的电场	320
§ 3.7	解析解和数值解的比较	322
§ 3.8	非本征区的影响	323
§ 3.9	电流方程	326
§ 4	SIT 作用理论(I)—中、大电流分析; 类三极管运用	327

§ 4.1	基本的器件物理	327
§ 4.2	类三极管范围的极限电流	330
§ 4.3	中、大电流的理论分析	331
§ 4.4	源串联电阻的影响	337
§ 5	场控器件 $I-V$ 特性的转变问题	340
§ 6	$I-V$ 特性的空间电荷限制电流机制	354
§ 6.1	问题的提出	354
§ 6.2	类三极管 $I-V$ 特性	355
§ 6.3	空间电荷限制电流出现的条件	356
§ 6.4	基本的器件物理	358
§ 6.5	控制方程	359
§ 6.6	各种半导体结构的 SCLC	361
第五章 双极模式静电感应晶体管(BSIT)作用理论		374
§ 1	BSIT 的单极作用机制	376
§ 1.1	$I-V$ 特性	376
§ 1.2	单极模式的势函数	378
§ 1.3	单极模式的电流分析	383
§ 2	BSIT 单极作用机制向双极模式的转变	388
§ 2.1	机制的转变	388
§ 2.2	双极作用机制	391
§ 3	双极模式的区域近似理论	394
§ 3.1	结构模型和方法要点	394
§ 3.2	源—漏结构的分析(纵向)	396
§ 3.3	源—栅结构的分析(横向)	404
§ 4	双极模式下的输出特性和基本参数	408
§ 4.1	各区的电压	408
§ 4.2	$I-V$ 特性不同点对应的少子分布和电场分布的特点 ..	409
§ 4.3	饱和区的输出特性和饱和压降	409
§ 4.4	有源区的输出特性	413
§ 4.5	电流增益 h_{FS}	415
§ 5	关于一级近似理论的进一步分析	418

§ 5.1	基本的器件物理	418
§ 5.2	输出特性曲线及其影响因素	424
§ 6	关于 BSIT 的若干实验结果及影响电性能的诸因素分析	431
§ 6.1	阻断电压 $V_{\text{阻}}$	431
§ 6.2	直流电流增益 h_{FS}	432
§ 6.3	影响其他电性能的诸因素	436
§ 7	BSIT 的数值分析结果	441
§ 7.1	结果	441
§ 7.2	对数值分析结果的讨论	445
第六章	静电感应晶闸管(SITH)作用原理	449
§ 1	$I-V$ 特性和作用的物理机制	449
§ 1.1	结构和 $I-V$ 特性	450
§ 1.2	作用的物理机制	452
§ 2	沟道电势的分析	455
§ 2.1	沟道电势	455
§ 2.2	数值分析	464
§ 3	正向压降 V_F	474
§ 4	正向阻断电压	480
§ 5	正向阻断增益	484
§ 5.1	阻断增益与器件结构尺寸和制造参数的关系	485
§ 5.2	阻断增益与偏压及电流的关系	490
§ 6	动态特性	494
§ 6.1	关断特性和关断时间 t_{off}	494
§ 6.2	SITH 的 $\frac{di}{dt}$ 容量	498
§ 6.3	SITH 的 $\frac{dv}{dt}$ 容量	501
§ 7	温度性能	506
参考文献		517