



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子科学与技术专业规划教材

微电子器件

(第3版)

陈星弼 张庆中 陈勇 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



欢迎登录 **免费** 获取本书教学资源
<http://www.hxedu.com.cn>

电子科学与技术专业规划教材

微电子器件

(第3版)

本教材为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

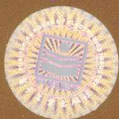
本教材原书名为《晶体管原理与设计》，为适应近年来微电子技术的新发展，以便更贴切地反映课程内容，这次的第3版将教材名称改为《微电子器件》。

与国内外同类教材相比，本教材特点如下：

- ◎ 强调基本概念，突出物理图像，避免繁杂数学公式的推导，力图使教材内容更精练。
- ◎ 半导体器件的基本方程，专设一章进行介绍，这对于学生梳理清楚后面出现的大量纷繁复杂的数学公式有很大的帮助。
- ◎ 保留了关于微电子器件的噪声特性的内容，可供学生将来工作时参考。
- ◎ 增加异质结器件内容，主要包括高电子迁移率晶体管（HEMT）和异质结双极晶体管（HBT）这两类异质结器件。



策划编辑：韩同平
责任编辑：韩同平
封面设计：张昱



本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 978-7-121-12809-7



9 787121 128097 >

定价：45.00 元

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子科学与技术专业规划教材

微电子器件

(第3版)

陈星弼 张庆中 陈勇 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书首先介绍半导体器件基本方程。在此基础上,全面系统地介绍PN结二极管、双极结型晶体管(BJT)和绝缘栅场效应晶体管(MOSFET)的基本结构、基本原理、工作特性和SPICE模型。本书还介绍了主要包括HEMT和HBT的异质结器件。书中提供大量习题,便于读者巩固及加深对所学知识的理解。

本书适合作为高等学校电子科学与技术、集成电路设计与集成系统、微电子学等专业相关课程的教材,也可供其他相关专业的本科生、研究生和工程技术人员阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

微电子器件/陈星弼,张庆中,陈勇编著. —3版. —北京:电子工业出版社,2011.2

电子科学与技术专业规划教材

ISBN 978-7-121-12809-7

I. ①微… II. ①陈… ②张… ③陈… III. ①微电子技术-电子器件-高等学校-教材 IV. ①TN4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第010299号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:560千字

印 次:2011年2月第1次印刷

印 数:4000册 定价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。也是四川省精品课程“微电子器件”的配套教材。

本教材原书名为《晶体管原理与设计》，第1版和第2版分别于1987年和2006年出版，已被国内多所院校采用作为基本教材或主要参考教材，教学效果良好。根据近年来微电子技术的新发展，为了更贴切地反映课程内容，同时也与目前国内高等学校相关课程的名称尽量一致，方便更多院校的师生选书和用书，这次的第3版适时地将教材名称改为《微电子器件》。

本教材第3版继承了前两版强调基本概念，突出物理图像，避免冗长而又无很大实用价值的数学公式等特点。为适应该课程学时数逐步减少的现实与晶体管的发展趋势，在总结作者多年教学实践的基础上，精简了部分内容，力图使教材内容更精练，并恰当地充实了一些新内容。

本教材将集中讨论三类微电子器件，即PN结二极管、双极结型晶体管(BJT)和绝缘栅型场效应晶体管(MOSFET)。这三类器件既是集成电路的核心，同时又是不断涌现的各种新型分立器件的基础。本教材的目的是使学生掌握这三类器件的基本结构、基本原理、工作特性和SPICE模型。

第3版的重要变化如下：

(1)删去了第4章“双极晶体管的设计”。原书的这部分内容主要介绍的是人工设计方法，而现在的微电子器件设计已经越来越依赖于计算机模拟，该内容更适合放在其他教材中介绍。

(2)为了反映近年来微电子技术的新发展，新增一章介绍异质结器件，主要包括高电子迁移率晶体管(HEMT)和异质结双极晶体管(HBT)这两类异质结器件。

本教材与国内外同类教材相比，还有两个重要特点。一是设立一章专门分析半导体器件的基本方程，并安排在第1章。学生经常反映本课程的数学公式太多，而理解掌握基本方程后，对于梳理清楚后面出现的大量纷繁复杂的数学公式的头绪有很大的帮助。二是保留了关于微电子器件的噪声特性的内容，这些内容并不一定要在课堂上讲授，而是为了使将来在工作中需要时，可以用做参考。

本书可作为高等学校电子科学与技术、集成电路设计与集成系统、微电子学等专业本科生主干专业课“微电子器件”的教材，也可供其他相关专业本科生、研究生和工程技术人员阅读参考。讲授本教材的参考学时数为48~80学时。本教材的基本内容包括：第1章；第2章的1,2,4~7节；第3章的1~5,8~10节和第4章的1~6,8节。这些内容的参考学时数为48学时，其余内容可视学时数的多少而选讲。

本教材配有大量习题。其中标有*的为基础性习题，建议作为必做题；未标*的为扩展性习题，建议作为选做题。

本书由陈星弼、张庆中、陈勇编著，第3版由张庆中、陈勇修编，任敏参与了部分校对工作。由于作者水平有限，书中难免有缺点和错误，欢迎广大读者批评指正。

编著者
于电子科技大学

主要符号表

A	面积	g_{ms}	饱和区跨导
a	杂质浓度梯度	g_{ds}	漏源电导
B, b	基极、基区	$(g_{ds})_{sat}$	饱和区漏源电导
BV_{EBO}	集电极开路时发射结击穿电压	$I_E(I_B, I_C)$	发射极(基极、集电极)直流电流
BV_{CBO}	发射极开路时集电极击穿电压	$I_c(I_b, I_c)$	发射极(基极、集电极)交流小信号电流的幅值
BV_{CEO}	基极开路时集电极-发射极击穿电压	I_{Cmax}	集电极最大工作电流
BV_{DC}	最高漏极使用电压	I_{CS}	临界饱和集电极电流
BV_{DS}	漏-源击穿电压	I_{CBO}	发射极开路时集电极反向电流
BV_{GS}	栅源击穿电压	I_{EBO}	集电极开路时发射极反向电流
C, c	集电极、集电区、集电结	I_{CEO}	基极开路时集电极-发射极反向电流
C_T	势垒电容	I_F	正向直流电流
C_D	扩散电容	I_R	倒向直流电流
C_{ob}	集电极输出电容	I_D	漏极电流
C_{gs}	栅-源单位面积电容	$I_{D sat}$	临界饱和时的漏极电流
C_{gd}	栅-漏单位面积电容	$I_{D sub}$	亚阈漏极电流
C_{OX}	栅氧化层单位面积电容	I_{sub}	衬底电流
D	电位移	I_{LC}	集电结复合电流
d	发射区与浓硼区的间距	I_{LE}	发射结复合电流
$D_n(D_p)$	电子(空穴)扩散系数	I_{SB}	二次击穿临界电流
d_M	金属条宽度	$i_c(i_b, i_c)$	发射极(基极、集电极)交流小信号电流
E	电场强度	i_d	漏极交流小信号电流
E_{max}	最大电场强度	i_g	栅极交流小信号电流
E_c	雪崩击穿临界电场强度	i_{nD}	沟道热噪声电流
E, e	发射极、发射区、发射结	i_{nG}	栅极诱发热噪声电流
E_C	导带底处电子能量	i_0	发射极单位周长的电流容量
E_F	费米能级	$J(j)$	直流(交流)电流密度
$E_{Fn}(E_{Fp})$	电子(空穴)的准费米能级	J_{Cmax}	集电极最大工作电流密度
E_G	禁带宽度	J_{CH}	基区扩展临界电流密度或强场下基区扩展临界电流密度
E_i	本征费米能级	J_{CL}	弱场下基区扩展临界电流密度
E_t	复合中心能级的能量	J_d	扩散电流密度
E_V	价带顶处的电子能量	$J_{dn}(J_{dp})$	电子(空穴)扩散电流密度
e_{nb}	基极噪声电压	$J_n(J_p)$	电子(空穴)电流密度
e_{ne}	发射极噪声电压	J_g	势垒区产生电流密度
e_{ng}	噪声信号源噪声电压	J_r	势垒区复合电流密度
F	噪声系数	J_{gr}	势垒区产生复合电流密度
f	频率	K_p	功率增益
f_α	α 的截止频率	k	玻耳兹曼常数
f_β	β 的截止频率	L	沟道长度
f_{β^*}	β^* 的截止频率	L_E	发射极总周长
f_T	特征频率	L_c	发射极串联电感
f_M	最高振荡频率	$L_n(L_p)$	电子(空穴)扩散长度
G, g	电导		
g_m	跨导		

l_0	平均自由程			电压摆幅
l_M	金属电极条的长度	s		表面复合速度
M	雪崩倍增因子、高频优值	s_b		基极条宽
N	杂质浓度	s_c		发射极条宽
$N_{A(ND)}$	受主(施主)杂质浓度	T		温度
$N_B(N_C, N_E)$	基区(集电区、发射区)杂质浓度	T_a		环境温度
N_F	用 dB 表示的噪声系数	T_j		结温
N_i	复合中心浓度	T_{OX}		氧化层厚度
n	电子浓度	t_d		延迟时间
n_i	本征载流子浓度	t_r		上升时间、反向恢复时间
n_{n0}	N 型半导体中的平衡电子浓度	t_s		储存时间
n_{p0}	P 型半导体中的平衡电子浓度	t_f		下降时间
P	功率	t_{on}		开启时间
P_C	集电结耗散功率	t_{off}		关断时间
P_{CM}	集电极最大耗散功率	V		电压
P_N	噪声功率	$V_E(V_B, V_C)$		发射极(基极、集电极)直流电压
P_{SB}	二次击穿临界功率	$V_e(V_b, V_c)$		发射极(基极、集电极)交流小信号电压的幅值或瞬时值
P_{Td}	稳态散出功率	V_A		厄尔利电压
p	空穴浓度	V_{bi}		内建电势
p_{n0}	N 型半导体中的平衡空穴浓度	V_{BES}		发射极正向压降
p_{p0}	P 型半导体中的平衡空穴浓度	V_{CES}		饱和压降
Q	单位面积电荷	V_F		正向直流电压(正向导电电压)
Q_B	基区少子电荷	V_{FB}		平带电压
Q_{B0}	基区平衡少子电荷	V_D		漏极电压
Q_{BB}	基区多子电荷	V_G		栅极电压
Q_{BBO}	基区平衡多子电荷	V_S		源极电压
Q_E	发射区少子电荷	V_{GS}		栅源电压
$Q_b'(Q_c')$	基区(集电区)超量储存电荷	V_{DS}		漏源电压
Q_M	栅极上单位面积电荷	V_{Dsat}		由于沟道夹断导致 I_D 饱和的漏极饱和电压
Q_n	反型层中单位面积电子电荷	V'_{Dsat}		由于速度饱和导致 I_D 饱和的漏极饱和电压
Q_s	半导体表面空间电荷区单位面积电荷	V_{pt}		穿通电压
$Q_A(Q_D)$	电离受主(施主)电荷面密度	V_{SB}		二次击穿临界电压
Q_{ch}	沟道电荷面密度	V_{sus}		维持电压
Q_{OX}	栅氧化层内有效正电荷面密度	V_T		阈电压
q	电子电荷	v		小信号交流电压、载流子速度
R	电阻	v_t		热运动速度
R_D	漏极电阻	v_{max}		载流子饱和和漂移速度
R_E	发射极镇流电阻	W_M		金属条厚度
R_s	噪声信号源内阻	W_B		基区宽度
R_L	负载电阻	W_E		发射区宽度
R_T	热阻	W_C		集电区宽度
R_{\square}	方块电阻	$W_{外}$		外延层厚度
r_c	发射结增量电阻	X		电抗
r'_{bb}	基极电阻			
r_{cs}	集电极串联电阻			
S	饱和深度、反馈因子、嫡、亚阈区栅源			

x_j	结深	κ	热导率
$x_{je}(x_{jc})$	发射结(集电结)结深	τ_{eb}	发射结势垒电容充放电时间常数
Y	导纳	τ_b	基区渡越时间
Z	阻抗	τ_c	集电结势垒电容经集电区充放电的时间常数
α	共基极直流短路电流放大系数	τ_d	集电结耗尽区延迟时间
α_R	倒向运用时的共基极直流短路电流放大系数	τ_e	发射区延迟时间
α_ω	共基极高频小信号短路电流放大系数	$\Delta\tau_b$	基区渡越时间的修正
$\alpha_{in}(\alpha_{ip})$	电子(空穴)电离率	τ_{bc}	集电结电容经基极的充放电时间常数
α_i	电离率	τ_i	沟道渡越时间
β	共发射极直流短路电流放大系数	τ_{ec}	信号延迟时间
β_R	倒向运用时的共发射极直流短路电流放大系数	τ	寿命
β_ω	共发射极高频小信号短路电流放大系数	$\tau_n(\tau_p)$	电子(空穴)寿命
β^*	直流基区输运系数	μ	迁移率
β_0^*	直流小信号基区输运系数	$\mu_n(\mu_p)$	电子(空穴)迁移率
β_ω^*	高频小信号基区输运系数	σ	电导率、俘获截面
γ	直流注入效率	$\sigma_n(\sigma_p)$	电子(空穴)电导率
γ_0	直流小信号注入效率	ω	角频率
γ_ω	高频小信号注入效率	ω_{gm}	跨导的截止角频率
δ	亏损因子	ω_α	α 的截止角频率
ϵ_{OX}	二氧化硅的介电系数	ω_β	β 的截止角频率
ϵ_s	硅的介电系数	ω_{β^*}	β^* 的截止角频率
η	内建场因子	ϕ	静电势
ρ	电阻率	$\phi_{Fn}(\phi_{Fp})$	电子(空穴)的费米势
$\rho_B(\rho_E, \rho_C)$	基区(发射区、集电区)电阻率	ϕ_s	表面势
		ϕ_{MS}	金属半导体功函数差

目 录

第1章 半导体器件基本方程	(1)
1.1 半导体器件基本方程的形式	(1)
1.2 基本方程的简化与应用举例	(3)
本章参考文献	(5)
第2章 PN结	(6)
2.1 PN结的平衡状态	(6)
2.1.1 空间电荷区的形成	(6)
2.1.2 内建电场、内建电势与耗尽区宽度	(7)
2.1.3 能带图	(10)
2.1.4 线性缓变结	(11)
2.1.5 耗尽近似和中性近似的适用性 ^[1]	(12)
2.2 PN结的直流电流电压方程	(15)
2.2.1 外加电压时载流子的运动情况	(15)
2.2.2 势垒区两旁载流子浓度的玻耳兹曼分布	(17)
2.2.3 扩散电流	(18)
2.2.4 势垒区产生复合电流 ^[2,3]	(21)
2.2.5 正向导通电压	(23)
2.2.6 薄基区二极管	(24)
2.3 准费米能级与大注入效应	(25)
2.3.1 自由能与费米能级	(25)
2.3.2 准费米能级	(27)
2.3.3 大注入效应	(28)
2.4 PN结的击穿	(32)
2.4.1 碰撞电离率和雪崩倍增因子	(32)
2.4.2 雪崩击穿	(35)
2.4.3 齐纳击穿	(40)
2.4.4 热击穿	(42)
2.5 PN结的势垒电容	(44)
2.5.1 势垒电容的定义	(44)
2.5.2 突变结的势垒电容	(45)
2.5.3 线性缓变结的势垒电容	(46)
2.5.4 实际扩散结的势垒电容	(46)
2.6 PN结的交流小信号特性与扩散电容	(48)
2.6.1 交流小信号下的扩散电流	(49)
2.6.2 交流导纳与扩散电容	(50)
2.6.3 二极管的交流小信号等效电路	(51)

2.7 PN 结的开关特性	(51)
2.7.1 PN 结的直流开关特性	(51)
2.7.2 PN 结的瞬态开关特性	(52)
2.7.3 反向恢复过程	(53)
2.7.4 存储时间与下降时间	(54)
2.8 SPICE 中的二极管模型	(56)
习题二	(58)
本章参考文献	(60)
第3章 双极结型晶体管	(62)
3.1 双极结型晶体管基础	(62)
3.1.1 双极结型晶体管的结构	(62)
3.1.2 偏压与工作状态	(63)
3.1.3 少子浓度分布与能带图	(63)
3.1.4 晶体管的放大作用	(65)
3.2 均匀基区晶体管的电流放大系数 ^[1~11]	(67)
3.2.1 基区输运系数	(67)
3.2.2 基区渡越时间	(69)
3.2.3 发射结注入效率	(69)
3.2.4 电流放大系数	(70)
3.3 缓变基区晶体管的电流放大系数	(71)
3.3.1 基区内建电场的形成	(71)
3.3.2 基区少子电流密度与基区少子浓度分布	(72)
3.3.3 基区渡越时间与输运系数	(73)
3.3.4 注入效率与电流放大系数	(74)
3.3.5 小电流时放大系数的下降	(75)
3.3.6 发射区重掺杂的影响	(76)
3.3.7 异质结双极型晶体管	(79)
3.4 双极结型晶体管的直流电流电压方程	(79)
3.4.1 集电结短路时的电流	(79)
3.4.2 发射结短路时的电流	(80)
3.4.3 晶体管的直流电流电压方程	(80)
3.4.4 晶体管的输出特性	(81)
3.4.5 基区宽度调变效应	(83)
3.5 双极结型晶体管的反向特性	(85)
3.5.1 反向截止电流	(85)
3.5.2 共基极接法中的雪崩击穿电压	(87)
3.5.3 共发射极接法中的雪崩击穿电压	(88)
3.5.4 发射极与基极间接有外电路时的反向电流与击穿电压	(89)
3.5.5 发射结击穿电压	(90)
3.5.6 基区穿通效应	(90)
3.6 基极电阻	(92)
3.6.1 方块电阻	(92)

3.6.2	基极接触电阻和接触孔边缘到工作基区边缘的电阻	(94)
3.6.3	工作基区的电阻和基极接触区下的电阻	(96)
3.7	双极结型晶体管的功率特性	(98)
3.7.1	大注入效应	(98)
3.7.2	基区扩展效应	(103)
3.7.3	发射结电流集边效应	(107)
3.7.4	晶体管的热学性质	(111)
3.7.5	二次击穿和安全工作区	(116)
3.8	电流放大系数与频率的关系	(121)
3.8.1	高频小信号电流在晶体管中的变化	(122)
3.8.2	基区输运系数与频率的关系	(123)
3.8.3	高频小信号电流放大系数	(129)
3.8.4	晶体管的特征频率	(137)
3.8.5	影响高频电流放大系数与特征频率的其他因素	(139)
3.9	高频小信号电流电压方程与等效电路	(142)
3.9.1	小信号的电荷控制模型	(143)
3.9.2	小信号的电荷电压关系	(144)
3.9.3	高频小信号电流电压方程	(145)
3.9.4	Y 参数	(147)
3.9.5	小信号等效电路	(148)
3.10	功率增益和最高振荡频率	(152)
3.10.1	高频功率增益与高频优值	(152)
3.10.2	最高振荡频率	(154)
3.10.3	高频晶体管的结构	(154)
3.11	双极结型晶体管的开关特性	(156)
3.11.1	晶体管的静态大信号特性	(156)
3.11.2	晶体管的直流开关特性	(161)
3.11.3	晶体管的瞬态开关特性	(163)
3.12	SPICE 中的双极晶体管模型	(169)
3.12.1	埃伯斯-莫尔(EM)模型	(169)
3.12.2	葛谋-潘(GP)模型 ^[46]	(174)
3.13	双极结型晶体管的噪声特性	(178)
3.13.1	噪声与噪声系数	(179)
3.13.2	晶体管的噪声源	(180)
3.13.3	晶体管的高频噪声等效电路	(183)
3.13.4	晶体管的高频噪声系数	(185)
3.13.5	晶体管高频噪声的基本特征	(188)
	习题三	(190)
	本章参考文献	(197)
第4章	绝缘栅型场效应晶体管	(199)
4.1	MOSFET 基础	(199)
4.2	MOSFET 的阈电压	(203)

4.2.1	MOS 结构的阈电压	(203)
4.2.2	MOSFET 的阈电压	(205)
4.3	MOSFET 的直流电流电压方程	(210)
4.3.1	非饱和区直流电流电压方程	(210)
4.3.2	饱和区的特性	(214)
4.4	MOSFET 的亚阈区导电	(216)
4.5	MOSFET 的直流参数与温度特性	(219)
4.5.1	MOSFET 的直流参数	(219)
4.5.2	MOSFET 的温度特性	(220)
4.5.3	MOSFET 的击穿电压	(221)
4.6	MOSFET 的小信号参数、高频等效电路及频率特性	(223)
4.6.1	MOSFET 的小信号交流参数	(223)
4.6.2	MOSFET 的小信号高频等效电路	(225)
4.6.3	最高工作频率和最高振荡频率	(231)
4.6.4	沟道渡越时间	(232)
4.7	MOSFET 的噪声特性 ^[8]	(232)
4.7.1	1/f 噪声	(232)
4.7.2	沟道热噪声	(233)
4.7.3	诱生栅极噪声	(233)
4.7.4	高频噪声等效电路和高频噪声系数	(235)
4.8	短沟道效应	(237)
4.8.1	小尺寸效应	(237)
4.8.2	迁移率调制效应	(239)
4.8.3	漏诱生势垒降低效应	(243)
4.8.4	强电场效应	(244)
4.9	MOSFET 的发展方向	(248)
4.9.1	按比例缩小的 MOSFET	(248)
4.9.2	双扩散 MOSFET	(251)
4.9.3	SOS-MOSFET	(251)
4.9.4	深亚微米 MOSFET	(252)
4.10	SPICE 中的 MOSFET 模型	(255)
4.10.1	MOS1 模型	(255)
4.10.2	MOS2 模型	(256)
4.10.3	MOS3 模型	(259)
4.10.4	电容模型	(260)
4.10.5	小信号模型	(262)
4.10.6	串联电阻的影响	(262)
	习题四	(262)
	本章参考文献	(263)
第 5 章 半导体异质结器件		(265)
5.1	半导体异质结	(265)
5.1.1	半导体异质结的能带突变	(266)



5.1.2	半导体异质结伏安特性	(268)
5.2	高电子迁移率晶体管(HEMT)	(270)
5.2.1	高电子迁移率晶体管的基本结构	(271)
5.2.2	HEMT 的工作原理	(271)
5.2.3	异质界面的二维电子气	(273)
5.2.4	高电子迁移率晶体管(HEMT)的直流特性	(274)
5.2.5	HEMT 的高频模型	(278)
5.2.6	HEMT 的高频小信号等效电路	(279)
5.2.7	高电子迁移率晶体管(HEMT)的频率特性	(280)
5.3	异质结双极晶体管(HBT)	(282)
5.3.1	HBT 的基础理论	(282)
5.3.2	能带结构与 HBT 性能的关系	(286)
5.3.3	异质结双极晶体管的特性	(289)
5.3.4	Si/Si _{1-x} Ge _x 异质结双极晶体管	(292)
	习题五	(296)
	本章参考文献	(297)
附录 A	晶体管设计中的一些常用图	(299)
A.1	扩散结势垒区宽度 x_d 与势垒电容 C_T 和外加电压 V 的关系曲线	(299)
A.2	室温下硅电阻率随施主或受主浓度的变化	(301)
A.3	扩散结的耗尽区在扩散层一侧所占厚度 x_{CB} 对耗尽区总厚度 x_C 之比 (x_{CB}/x_C)与外加电压 V 的关系曲线	(301)
A.4	硅中扩散层的电导率曲线	(302)
A.5	硅中载流子的迁移率与扩散系数曲线	(304)

第 1 章 半导体器件基本方程

半导体器件内的载流子在外电场作用下的运动规律可以用一套基本方程来加以描述,这套基本方程是分析一切半导体器件的基本数学工具。半导体器件基本方程由三组方程所组成,即:麦克斯韦方程组、输运方程组和连续性方程组。本书假定读者在学习电磁场理论、半导体物理等先修课程时已经掌握了这些内容,这里只是把它们归纳整理后再进行一个集中而简略的阐述,以便为读者在后面章节中会遇到的大量数学公式提供一个基本出发点,同时这些内容也是读者在今后自己面对半导体器件的分析时的基本出发点。

1.1 半导体器件基本方程的形式

1. 泊松方程^[1]

麦克斯韦方程组包括 6 个方程,是描述电磁现象的普遍规律的基本方程。由于本书不讨论磁场的作用,所以只涉及其中的泊松方程和电位移方程。

泊松方程的原始形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v(x, y, z) \quad (1-1a)$$

式(1-1a)中, \mathbf{D} 代表电位移矢量; $\rho_v(x, y, z)$ 代表自由电荷的体密度。

在半导体中, $\rho_v = q(p - n + N_D - N_A)$; 静态或低频下, $\mathbf{D} = \epsilon_s \mathbf{E}$, ϵ_s 代表半导体的电容率, \mathbf{E} 代表电场强度矢量,再考虑到 $\nabla \Psi = -\mathbf{E}$, 可得到泊松方程在分析半导体器件时更常用的形式,即

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\nabla^2 \Psi = \frac{q}{\epsilon_s} (p - n + N_D - N_A) \quad (1-1b)$$

式(1-1b)中, Ψ 代表静电势, q 代表一个电子所带电荷量的绝对值, p 、 n 、 N_D 、 N_A 分别代表空穴、电子、施主杂质和受主杂质的浓度。

泊松方程表明,空间任意点的电位移(或电场强度)矢量的散度正比于该点的电荷密度。其物理意义是,电感线总是出发于正电荷而终止于等量的负电荷。

2. 输运方程^[2]

输运方程又称为电流密度方程,是电子电流密度矢量 \mathbf{J}_n 和空穴电流密度矢量 \mathbf{J}_p 的表达式,即

$$\mathbf{J}_n = q\mu_n n \mathbf{E} + qD_n \nabla n \quad (1-2)$$

$$\mathbf{J}_p = q\mu_p p \mathbf{E} - qD_p \nabla p \quad (1-3)$$

式(1-2)和式(1-3)中, D_n 、 D_p 分别代表电子和空穴的扩散系数, μ_n 、 μ_p 分别代表电子和空穴的迁移率。

可以看出,电子电流密度和空穴电流密度各自都由漂移电流密度和扩散电流密度两个部分所构成。以空穴电流密度为例, qp 是空穴的电荷密度, $\mu_p \mathbf{E}$ 是空穴在电场中的漂移速度,两者的乘积就是空穴的漂移电流密度, ∇p 是空穴的浓度梯度, $D_p \nabla p$ 是空穴的扩散流密度,再乘以 q 就得到空穴的扩散电流密度。

应当注意的是,当载流子的迁移率和扩散系数确定以后,漂移电流取决于两个变量,即载流子浓度和电场强度,而扩散电流只取决于载流子浓度梯度一个变量。

3. 连续性方程^[2]

电子和空穴的连续性方程为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n - U_n \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p - U_p \quad (1-5)$$

式(1-4)和式(1-5)中, U_n 代表半导体单位体积内在单位时间中复合掉的电子数与新产生的电子数之差,即半导体内的电子净复合率; U_p 代表半导体内的空穴净复合率。当复合大于产生时,净复合率大于零,表示有净的复合;反之,当产生大于复合时,净复合率小于零,表示有净的产生。

所谓连续性是指载流子浓度在时空上的连续性,即造成某体积内载流子增加的原因,一定是载流子对该体积有净流入(流入减流出)和载流子在该体积内有净产生(产生减复合)。这从后面要介绍的连续性方程的积分形式中可以看得更清楚。

4. 方程的积分形式

以上给出的基本方程都是微分形式的。可以利用如下的积分变换公式,即

$$\oint_A \mathbf{f} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{f} dv$$

将式(1-1a)、式(1-1b)、式(1-4)和式(1-5)变换为积分形式,即

$$\oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \rho_v dv \quad (1-6a)$$

$$\oint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_s} \int_V (p - n + N_D - N_A) dv \quad (1-6b)$$

$$I_n = \oint_A \mathbf{J}_n \cdot d\mathbf{A} = q \int_V \left(\frac{\partial n}{\partial t} + U_n \right) dv \quad (1-7)$$

$$I_p = \oint_A \mathbf{J}_p \cdot d\mathbf{A} = q \int_V \left(-\frac{\partial p}{\partial t} - U_p \right) dv \quad (1-8)$$

式中, A 代表一个闭合的曲面, dA 代表这个表面上的面积元矢量, V 代表这个曲面所围的体积, dv 代表这个体积内的体积元。式(1-7)和式(1-8)是分别从式(1-4)和式(1-5)中解出 $\nabla \cdot \mathbf{J}_n$ 和 $\nabla \cdot \mathbf{J}_p$ 后再利用积分变换公式而得到的。

微分形式方程的特点是,可以求解出所求变量在空间上任意一点的值,也即所求变量的空间分布,但方程的求解比较复杂,方程本身的物理意义也不是很明显。积分形式的方程则正好相反,通过它们只能得到所求变量在某个体积内的总体效果,如某体积内的总电荷量、穿出某体积表面的总电力线、穿出某体积表面的总电流等,但方程本身的物理意义比较明显,方程的求解也比较简单。

泊松方程的积分形式式(1-6a)就是大家熟知的高斯定理,其物理意义十分明显,即流出一个闭合曲面的电通量等于这个闭合曲面所围成的体积内的净自由电荷量。方程(1-6b)也有类似的意义。

式(1-7)和式(1-8)的物理意义也很明显。以式(1-8)为例,它表示流出一个闭合曲面的空穴电流等于这个闭合曲面所围成的体积内在单位时间中减少的空穴电荷量和净产生的空穴电荷量之和。在本章的稍后将会看到,在一定的条件下该体积内在单位时间中净产生的空穴电荷数是正比于这个体积内的非平衡空穴电荷量的。也就是说,流出闭合曲面的空穴电流受体积内空穴电荷量的变化率和非平衡空穴电荷量的控制,所以式(1-8)也可以称为电荷控制方程。如果把式(1-8)写成下面的形式

$$q \int_V \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) dv = -I_p + q \int_V (-U_p) dv$$

那么它的物理意义就是:某体积内在单位时间中空穴电荷的增加量等于流入其表面的空穴电流和该体积内在单位时间中空穴电荷的净产生量之和。

对式(1-7)也可进行类似的分析。

1.2 基本方程的简化与应用举例

在用基本方程分析半导体器件时,有两条基本途径。一条是求基本方程的解析解,所得结果是解的解析表达式。解析模型有利于设计者了解器件中各个参数之间的相互作用及各个参数与器件性能之间的内在联系。但一般来说要从原始形式的基本方程出发来求解析解是极其困难的,通常需要先对方程在一定的具体条件下采用某些假设来加以简化,然后再来求其近似解。随着半导体器件的尺寸不断缩小,建立新解析模型的工作也越来越困难,一些假设受到了更大的限制并变得更为复杂。另一条途径是利用计算机求基本方程的数值解,这就是通常所说的半导体器件的数值模拟。在进行数值模拟时可以只做少数几个假设,因此精度比较高。在实际工作中,还可以利用数值模拟来验证解析模型的正确性和精度。但由于数值模拟的结果是具体的数字而不是解析公式,所以难以反映各个参数之间的相互作用及各参数与器件性能之间的内在联系。

本书只介绍晶体管的解析模型。这时需要先对基本方程进行各种简化,其中最重要也是最常用的简化是假设半导体器件中的各参数只在 x 方向上发生变化,从而可将空间上三维的微分方程简化为空间上一维的微分方程,得到如下的一维基本方程,即

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_s} (p - n + N_D - N_A) \quad (1-9)$$

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (1-10)$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (1-11)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - U_n \quad (1-12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} - U_p \quad (1-13)$$

在此基础上可再根据不同的具体情况进行各种不同的简化。简化的原则是既要使计算变得容易,又要能保证足够的精确度。如果把计算的容易度与精确度的乘积作为优值的话,那么从某种意义上来说,对半导体器件的分析问题,就是不断地寻找具有更高优值的简化方法。下面是几个常用的对基本方程进行简化的简单例子,这些例子在本书的后面都会被引用。

例 1.1 对于方程(1-9),如果要分析的区域是半导体 PN 结的耗尽区(关于 PN 结及其耗尽区的概念,请参看第 2 章 2.1.2 节),可假设 $p=0, n=0$ 。如果是在 N 区耗尽区中,则还可忽略 N_A ,从而得

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon_s} N_D \quad (1-14a)$$

同理可得在 P 区耗尽区中

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_s} N_A \quad (1-14b)$$

从式(1-14b)可以明显地看出,耗尽区中的电场斜率正比于掺杂浓度。掺杂浓度越高,则电场分布就越陡峭;掺杂浓度越低,电场分布就越平坦。

例 1.2 对于方程(1-10),在载流子浓度梯度很小而电场强度和载流子浓度较大的情况下,扩散电流密度远小于漂移电流密度。这时可以忽略扩散电流密度,于是式(1-10)简化为

$$J_n = q\mu_n nE \quad (1-15)$$

反之,当可以忽略漂移电流密度时,式(1-10)简化为

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (1-16)$$

可以对方程(1-11)做类似的简化。

例 1.3 讨论式(1-12)和式(1-13)中的净复合率 U 。在硅、锗等间接带隙半导体中,复合主要是通过带隙中的复合中心能级进行的,净复合率 U 可表示为^[3-5]

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_t N_t [np - n_i^2]}{\sigma_n \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \sigma_p \left[p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]}$$

式中, σ_p 、 σ_n 分别代表复合中心对空穴与电子的俘获截面, v_t 代表载流子的热运动速度, N_t 代表复合中心的浓度, n_i 代表本征载流子浓度, E_t 代表复合中心的能级, E_i 代表本征费米能级。

为简单起见,可假设如下:(1) 复合中心对电子与空穴有相同的俘获截面,即 $\sigma_p = \sigma_n = \sigma$;
(2) 复合中心的能级与本征费米能级相等,即 $E_t = E_i$,则 U 可表示为

$$U = \frac{\sigma v_t N_t (np - n_i^2)}{n + p + 2n_i} = \frac{np - n_i^2}{\tau(n + p + 2n_i)} \quad (1-17)$$

式(1-17)中, $\tau = 1/(\sigma v_t N_t)$, 代表少子寿命; $n = n_0 + \Delta n$, $p = p_0 + \Delta p$, n_0 、 p_0 代表平衡载流子浓度; Δn 、 Δp 代表非平衡载流子浓度。平衡载流子浓度之间满足质量作用定律 $n_0 p_0 = n_i^2$ 。可以看出,当载流子浓度大于平衡载流子浓度时, $np > n_i^2$, 净复合率 U 大于零,发生净的复合;反之,当载流子浓度小于平衡载流子浓度时, $np < n_i^2$, 净复合率 U 小于零,发生净的产生。载流子浓度总是自发地朝着恢复到平衡浓度的方向移动。

如果是在 P 型区中,且满足小注入条件(即注入 P 区的电子浓度远小于 P 区的平衡空穴浓度,相关内容可参看第 2 章 2.3.3 节),则 $p \approx p_0$, $n + p + 2n_i \approx p \approx p_0$, 于是可得 P 型区中的电子净复合率为

$$U_n \approx \frac{(n_0 + \Delta n)p_0 - n_i^2}{\tau_n p_0} = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (1-18)$$

式(1-18)中, $\tau_n = 1/(\sigma_n v_t N_t)$, 代表 P 型半导体内的电子寿命。

同理可得同样条件下的 N 型区中的空穴净复合率为

$$U_p \approx \Delta p / \tau_p \quad (1-19)$$

式(1-19)中, $\tau_p = 1/(\sigma_p v_t N_t)$ 代表 N 型半导体内的空穴寿命。在本例的假设下,电子寿命与空穴寿命相等。

例 1.4 将电子输运方程(式(1-10))代入电子连续性方程(式(1-12)),可得到 P 区中电子的所谓“连续性-输运”方程。假设 D_n 与 μ_n 为常数,再将式(1-18)代入,得

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (1-20)$$

在各种不同的情况下,式(1-20)的五项中有时可忽略掉其中的某一项或某几项。例如在定态情况下,则方程左边的 $(\partial n / \partial t)$ 可以忽略;当电场强度为常数时,式(1-20)右边的第三项可以忽略;当电场强度足够小时,式(1-20)右边的第二项可以忽略;而当处于平衡状态时,则可忽略