

高等学校教材

晶体管原理

张屏英 周佑漠 编

上海科学技术出版社

高等学校教材

晶体管原理

张屏英 周佑谟 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21.25 字数 506,000

1985年11月第1版 1985年11月第1次印刷

印数 1—6,000

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二～一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

主要参数符号表

A	面积	E_I	栅绝缘层中的电场强度
A_e	发射结面积	e_n	噪声电压源
A_c	集电结面积	e_b	基极噪声电压源
A_{eff}	有效面积	e_e	发射极噪声电压源
a	沟道厚度	e_g	信号源噪声电压源
B, b	基极	F	噪声系数
BV_{EBO}	集电极开路时发射结击穿电压	f	频率
BV_{CBO}	发射极开路时集电结击穿电压	f_α	α 截止频率
BV_{CEO}	基极开路时集-射极击穿电压	f_β	β 截止频率
BV_{CES}	基-射极短路时集-射极击穿电压	f_T	特征频率
BV_{CEH}	基-射极间接电阻时集-射极击穿电压	f_m	最高振荡频率
BV_{CEX}	基-射极间接电阻和反向偏置时集-射极击穿电压	G, g	电导
BV_{DS}	漏-源击穿电压	G_o	JFET的冶金沟道电导
C, c	集电极(结)	g_d	漏电导
C_T	势垒电容	g_m	跨导
C_D	扩散电容	g_{ms}	饱和区跨导
C_C	集电极输出电容	g_{mu}	极限跨导
C_{dc}	栅-沟道耦合电容	G_P	功率增益
C_G	栅电容	G_{Pm}	最佳功率增益
C_{gs}	栅-源单位面积电容	G_u	单向功率增益
C'_{gs}	栅-源交迭单位面积电容	I	电流
C_{gd}	栅-漏单位面积电容	i	交流电流
C'_{gd}	栅-漏交迭单位面积电容	I_B	基极电流
C_I	输入电容	i_b	交流基极电流
C_{ox}	栅氧化层单位面积电容	I_c	集电极电流
C_{cat}	栅氧化层总电容	I_{ca}	交流集电极电流幅值
D	漏极	i_c	交流集电极电流
D_n	电子扩散系数	I_E	发射极电流
D_p	空穴扩散系数	I_{Ea}	交流发射极电流幅值
E, e	发射极(结)	i_e	交流发射极电流
E_a	激活能	I_{CBO}	发射极开路时集电结反向电流
E_c	导带底电子能量	I_{EBO}	集电极开路时发射结反向电流
E_F	费米能级处的电子能量	I_{CEO}	基极开路集电极——发射极反向电流
E_g	禁带宽度	I_{cm}	集电极最大电流
E_i	本征费米能级处电子能量	I_o	线电流密度
E_v	价带顶电子能量	I_D	漏极电流
E	电场强度	I_F	正向直流电流
E_m	最大电场强度	I_G	产生电流
E_{mB}	击穿时临界电场强度	i_g	栅极交流电流
		I_R	反向直流电流

i_n	噪声电流	p	空穴浓度
i_{n3}	散粒噪声电流	p_n	n型半导体中空穴浓度
i_{nf}	1/f 噪声电流	p_p	p型半导体中空穴浓度
i_{ncp}	配分噪声电流	Q	电荷
i_{nD}	沟道噪声电流	Q_B	基区电荷
i_{nQ}	诱生栅极噪声电流	Q_{Bmax}	表面耗尽区最大电荷面密度
J	直流电流密度	Q_{oh}	沟道电荷
$J_{nE} J_{nEd}$	直流发射极电子电流密度	Q_G	栅极电荷
J_{nE2}	交流发射极电子电流密度幅值	Q_n	反型层电子电荷
$J_{n2} J_{nc2}$	直流集电极电子电流密度	Q_s	超量贮存电荷
J_{nc2}	交流集电极电子电流密度幅值	q	电子电荷
J_{cm}	集电极最大电流密度	R	电阻
J_{cm1}	集电极最大线电流密度	R_D	漏极串联电阻
J_{cr}	临界电流密度	R_S	发射极镇流电阻
J_{Em}	由基区电导调制效应限制的发射极最大电流密度	R_G	栅极串联电阻
k	玻尔兹曼常数	R_L	负载电阻
L	沟道长度	R_s	源极串联电阻
L_B	发射极总周长	R_T	热阻
L_{eff}	有效沟道长度	$R_{\square}$	薄层电阻
L'	n-漂移区长度	r_b	基极电阻
l	发射极条长	r_e	发射结电阻
l_{eff}	发射极有效条长	r_c	集电结电阻
L_n	电子扩散长度	r_{es}	发射极串联电阻
L_p	空穴扩散长度	r_{cs}	集电极串联电阻
M	雪崩倍增因子	R_{gs}	栅-源电阻
m	超移相因子	R_{on}	导通电阻
N	杂质浓度	s	饱和深度
N_A	受主杂质浓度	s	表面复合速度
N_D	施主杂质浓度	s_s	发射极条宽
N_{BC}	衬底杂质浓度	s_{eff}	发射极有效半条宽
N_s	表面杂质浓度	T	温度
N_F	噪声系数(分贝)	T_{jm}	最高结温
n	电子浓度	T_a	环境温度
n_i	本征电子浓度	t	时间
n_n	n型半导体中电子浓度	t_d	延迟时间
n_p	p型半导体中电子浓度	t_r	上升时间
n_s	半导体表面电子浓度	t_s	贮存时间
P	功率	t_f	下降时间
P_c	耗散功率	t_{on}	开启时间
P_{cm}	集电极最大耗散功率	t_{off}	关断时间
P_D	电源供给功率	V	电压
P_i	输入功率	v	速度 交流电压
P_o	输出功率	V_o, V_{Bc}, V_{Bod}	集电极直流电压
P_{sB}	二次击穿功率	v_o	集电极交流电压
		V_{Bod}	集电极交流电压幅值

V_E, V_{BE}, V_{BBd}	发射极直流电压	α_R	共基极短路反向电流放大系数
V_{EEa}	发射极交流电压幅值	β	共发射极短路电流放大系数
V_e	发射极交流电压	β_o, β_{Do}	低频、直流共射电流放大系数
V_D	接触电势差	β^*	基区输运系数
V_{LS}	漏-源电压	γ	发射效率
V_{EEs}	发射极正向压降	γ_o	低频、直流发射效率
V_{cEs}	饱和压降	η	电场因子
V_{FB}	平带电压	ρ	电阻率
V_G	栅极电压	ϵ_o	自由空间电容率
V_{GS}	栅-源电压	ϵ	介电系数
V_{Dsat}	饱和漏源电压	ϵ_s	半导体介电系数
V_p	夹断电压	ϵ_{Si}	二氧化硅介电系数
V_{FT}	穿通电压	τ	渡越时间
V_T	阈值电压	τ_e	发射极延迟时间常数
V_{sB}	二次击穿电压	τ_b	基区渡越时间
v_{sl}	散射极限速度	τ_d	集电结势垒区渡越时间
v_p	信号电压	τ_c	集电极延迟时间
$W(w)$	沟道宽度	τ_B	基极时间常数
$W_l(w_b)$	基区宽度	τ_o	集电极时间常数
$W_s(w_s)$	发射区宽度	τ_B	发射极时间常数
$W_c(w_c)$	集电区厚度	τ_x	过饱和时间常数
$W_{epi}(w_{epi})$	外延层厚度	τ_{cs}	集电区过饱和时间常数
X	电抗	τ_n	电子寿命
x_j	结深	τ_p	空穴寿命
x_{jc}	集电结结深	μ_n	电子迁移率
x_{je}	发射结结深	μ_p	空穴迁移率
x_d	耗尽层宽度	μ	迁移率
$p_{dm, \max}$	半导体表面最大耗尽层宽度	μ_{FK}	场迁移率
Γ	导纳	μ_{eff}	有效迁移率
Z	阻抗	σ	电导率
α	共基极短路电流放大系数	ω	角频率
α_{eff}	有效电离率	ψ	静电势
α_i	电离率	ψ_n	n 区静电势
α_F	共基极短路正向电流放大系数	ψ_p	p 区静电势

前 言

本教材系由《电子材料与固体器件》教材编审委员会《半导体物理与器件》编审小组评选审定,并推荐出版。

该教材由西安交通大学张屏英担任主编,天津大学潘姬担任主审。编审者均依据《半导体物理与器件》编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本教材的参考教学时数为 120 学时(其中包括双极型晶体管设计 15 学时,场效应晶体管设计 5 学时)。本书第 1~7 章首先系统地分析 pn 结的基本特性,然后以双极型晶体管的特性为主线,讨论晶体管的直流特性、频率特性、功率特性、开关特性和噪声特性,最后介绍双极晶体管的设计。第 8~9 章主要讨论 JFET 和 MESFET、MOS 场效应晶体管的基本工作原理,以及它们的直流特性、交流特性、频率特性、功率特性和噪声特性,并对短沟道效应进行了系统的分析,介绍了提高器件性能的措施和一些典型的器件结构,最后还简单讨论了场效应晶体管的设计。本书按循序渐进的原则,对其内容进行了合理的编排,对书中的基本内容都在着重讲清物理概念的基础上,进行了较精确的数学分析,而对某些较繁的数学处理过程则作了必要的简化,用较简单的模型得到较适用且物理概念清楚的结论。每章后面均有与教学内容相结合的适量习题,并提供一定的参考资料。

本教材由周佑谟编写第一、二章,张屏英编写第三、四、五、六、七、八、九章,刘润民参加了部分章节的审阅和习题验算工作,全书最后由张屏英进行修改和统编。编写过程中我们参考了浙江大学宋南辛、徐义刚编写的《晶体管原理》,吸取了此书中双极型晶体管部分的优点。在修改书稿的过程中,南京工学院李宏扬等编写的《晶体管原理》讲义对我们也有不少帮助。此外,参加本教材评阅工作的还有华中工学院刘启瑞同志,清华大学曹培栋同志,其他兄弟院校有关同志也对本书提出许多宝贵意见,这里一并表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者 1984. 10.

目 录

出版说明

前言

绪论 1

第1章 pn 结 3

§ 1.1 pn 结的形成和杂质分布 3

§ 1.2 平衡 pn 结的空间电荷区和能带图 5

§ 1.3 非平衡 pn 结 9

§ 1.4 pn 结的直流特性 13

§ 1.5 pn 结空间电荷区的电场和电位分布 24

§ 1.6 pn 结的势垒电容 29

§ 1.7 pn 结小信号交流特性 34

§ 1.8 pn 结的开关特性 38

§ 1.9 pn 结的击穿特性 40

第1章习题 50

参考资料 51

第2章 晶体管的直流特性 52

§ 2.1 晶体管的基本结构及杂质分布 52

§ 2.2 晶体管的放大机理 54

§ 2.3 晶体管直流电流-电压方程 60

§ 2.4 晶体管的电流放大系数 68

§ 2.5 晶体管的反向电流 77

§ 2.6 晶体管的击穿电压 79

§ 2.7 晶体管的基极电阻 83

第2章习题 87

参考资料 88

第3章 晶体管的频率特性 89

§ 3.1 概述 89

§ 3.2 晶体管交流特性的理论分析 90

§ 3.3 晶体管的高频参数及其等效电路 95

§ 3.4 共基极电流放大系数及其截止频率 103

§ 3.5 共发射极短路电流放大系数及其截止频率 112

§ 3.6 晶体管的高频功率增益和最高振荡频率 117

§ 3.7 高频晶体管的散射参数——S 参数 121

第3章习题 122

参考资料 123

第4章 晶体管的功率特性 124

§ 4.1 大注入效应 124

§ 4.2 基区扩展效应 132

§ 4.3 发射极电流集边效应 133

§ 4.4 晶体管的最大耗散功率 141

§ 4.5 二次击穿和安全工作区 144

第4章习题 149

参考资料 150

第5章 晶体管的开关特性 151

§ 5.1 开关晶体管的静态特性 151

§ 5.2 Ebers-Moll 模型及其等效电路 153

§ 5.3 电荷控制模型及其等效电路 159

§ 5.4 开关晶体管的过渡过程及开关参数 163

§ 5.5 晶体管的开关时间 164

第5章习题 174

参考资料 175

第6章 晶体管的噪声特性 176

§ 6.1 概述 176

§ 6.2 晶体管的噪声源 177

§ 6.3 晶体管的噪声等效电路 181

§ 6.4 晶体管的噪声系数 182

第6章习题 187

参考资料 188

第7章 晶体管设计 189

§ 7.1 概述 189

§ 7.2 晶体管的纵向结构设计 191

§ 7.3 晶体管的横向结构设计 196

§ 7.4 晶体管的热学设计 206

§ 7.5 晶体管设计举例 208

参考资料 216

第8章 结型栅场效应晶体管	217	§ 9.7 MOSFET的击穿特性	281
§ 8.1 基本工作原理	217	§ 9.8 MOSFET的功率特性和功率 MOS	
§ 8.2 JFET的伏安特性	220	器件结构	288
§ 8.3 JFET的直流和交流参数	223	§ 9.9 MOSFET的温度特性	294
§ 8.4 高场迁移率对器件特性的影响	226	§ 9.10 短沟道效应	297
§ 8.5 JFET的频率特性	231	§ 9.11 场效应晶体管的设计	306
§ 8.6 器件的噪声特性	235	第9章习题	311
§ 8.7 JFET和MESFET的结构举例	238	参考资料	312
第8章习题	242	附录	314
参考资料	243	I 常用物理常数表	314
第9章 MOS场效应晶体管	244	II 锗、硅、砷化镓、二氧化硅的重要	
§ 9.1 MOSFET的结构和类型	244	性质	314
§ 9.2 MOSFET的阈值电压	248	III 硅与几种金属的欧姆接触系数	315
§ 9.3 MOSFET的伏安特性	254	IV 余误差函数	315
§ 9.4 MOSFET的交流小信号参数	263	V 锗硅电阻率与杂质浓度的关系	317
§ 9.5 MOSFET的交流小信号等效电路和		VI 迁移率与杂质浓度的关系	317
频率特性	272	VII 硅扩散层表面杂质浓度与扩散层平	
§ 9.6 MOSFET的噪声特性	278	均电导率的关系曲线	318

绪 论

在结型晶体管中,电子和空穴“两种极性”的载流子都参与电流的传输,因此,将结型晶体管称作双极型晶体管。与此相对应,在场效应晶体管中,传输电流的是电子或者空穴中一种单一极性的载流子,因而场效应晶体管又称为单极型晶体管。本教材第1~7章介绍双极型晶体管,第8~9章介绍单极型晶体管。

双极型晶体管在半导体器件中占着相当重要的地位。随着工艺制作技术的发展,双极型晶体管经过了合金型、台面型到平面型的发展过程。

在 Shockly 于 1949 年发表的结型晶体管理论基础上,为了说明实际晶体管的各种特性,晶体管理论有很大的发展。由于合金型晶体管的发射区、集电区,尤其基区,其杂质分布都具有近似均匀分布的特点,因此,在合金管盛行的时期,首先确立了均匀基区晶体管理论。为了提高晶体管的频率特性,相应地出现了基区杂质存在分布梯度的晶体管,并在 1953 年由 Kyoemer 发表了缓变基区漂移型晶体管理论。现代的平面晶体管,基区用扩散法制作,自然属于漂移型晶体管之列。其后在 1956 年,由 Moll 和 Ross 发表了基区杂质任意分布的晶体管理论。

晶体管工作电流的大小、注入水平的高低,也是晶体管理论中的一个重要问题。早期的晶体管理论,是在注入载流子浓度小于多数载流子浓度、注入载流子对多数载流子的影响可以忽略的小注入状态下建立的。实际上,当晶体管的工作电流较大时,注入载流子浓度就可达到、甚至超过多数载流子的浓度,使晶体管进入大注入状态。在大注入状态下出现的各种现象是小注入理论无法说明的。为了解释大注入现象,1954 年 Webster 着眼于注入对中性基区的影响,用比较简单的理论解释了电流放大系数 h_{FE} 随注入电流变化现象。1957 年 Fletcher 发表了大注入状态下,空间电荷区内载流子浓度与电压的关系,分析了由此而引起载流子传输方程边界条件的变化,研究了大注入下 pn 结的规律。在上述理论基础上,1962 年 Kirk 针对用扩散法制作的、集电区杂质浓度低于基区杂质浓度的晶体管,提出了基区扩展效应,用有效基区宽度随注入电流增大而扩展的理论,解释了在大电流下特征频率 f_T 随注入电流的增大而快速下降的实验事实。

上述理论的变化和发展,是从基区杂质分布、注入水平的高低等内部现象方面进行分析的。与此同时,从描述晶体管端点特性的模型理论方面也有很大发展。1954 年,首先由 Ebers 和 Moll 发表了说明晶体管大信号理论的 Ebers-Moll 模型。这个模型直用至今,并在集成电路中发挥了很大的作用。其后,在 1957 年由 Beaufoy 和 Sparks 将晶体管作为电荷控制元件,发表了电荷控制模型。这个模型在分析晶体管的特性时,也得到广泛的运用,而且上述两个模型相互是等价的。

图 0-1 表示了晶体管理论的发展概况。

场效应理论的研究可以追溯到 1930 年以前,众所周知,表面电荷对半导体薄膜电导的调制理论早在 1948 年已由 Shockly 和 Pearson 提出。但由于受工艺水平限制,直到 1953 年才作出结型场效应晶体管,而在平面工艺出现后的 1960 年才制成了 MOSFET。今天场

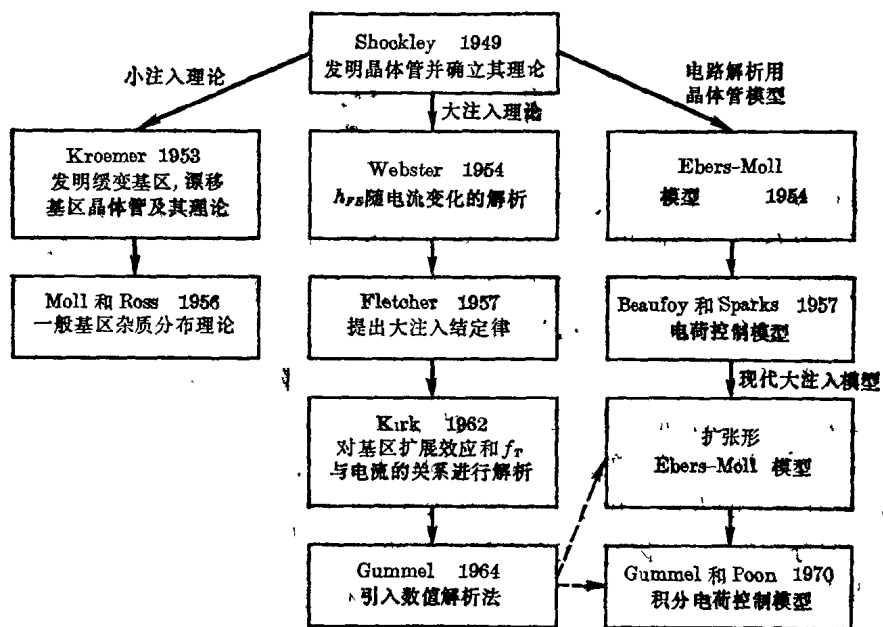


图 0-1 晶体管理论的发展概况

效应器件已成为大规模和超大规模集成电路中最重要的器件, 在微波器件和功率器件中也占据相当重要的地位。

场效应晶体管主要可分为结型栅场效应晶体管(JFET), 肖特基栅场效应晶体管(MESFET)和金属-绝缘体-半导体场效应晶体管(MISFET)三大类。而后者以氧化物作绝缘层的 MOSFET 最为普遍和典型。图 0-2 是场效应晶体管的分类, 其中 JFET 和 MESFET 具有完全相同的工作原理, 所不同的只是在 MESFET 中, 用金属-半导体肖特基势垒结代替了 JFET 中的 pn 结。因此, 本教材中, 将场效应晶体管分为 JFET 和 MESFET 与 MOSFET 两大类进行讨论。

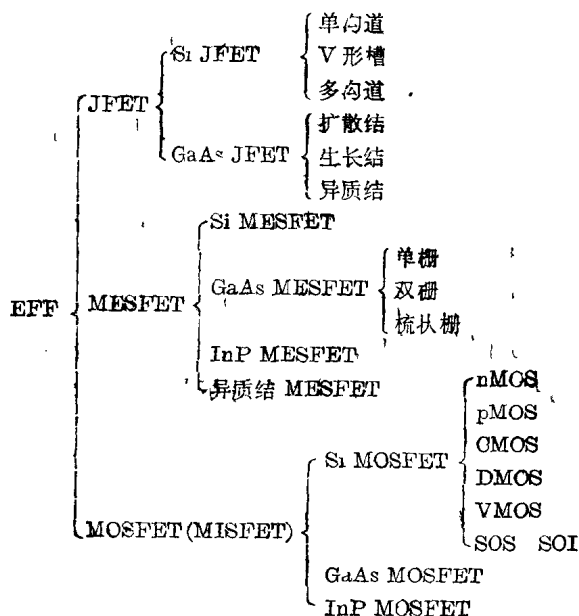


图 0-2 场效应晶体管的分类

第 1 章

pn 结

pn 结不仅是晶体管以及其他半导体器件的最基本单元, 而且也是半导体器件的理论基础. 因此, 深入地了解 and 掌握 pn 结理论尤为重要.

本章先分析 pn 结的杂质分布、空间电荷区和能带图. 在此基础上, 讨论 pn 结的直流特性、交流特性和击穿特性等.

§ 1.1 pn 结的形成和杂质分布

在一块 n 型(或 p 型)半导体单晶衬底上, 用合金法、扩散法、外延法或离子注入法等掺入 p 型(或 n 型)杂质. 这时, 单晶片内既存在 n 型区也存在 p 型区. 在 p 型与 n 型的界面处便形成 pn 结.

下面对制造 pn 结的典型工艺方法及 pn 结中的杂质分布情况作简单介绍.

1. 合金法 图 1-1 表示用合金法制造 pn 结的基本过程. 先在 n 型锗单晶片上, 放置一颗铟(In)球, 然后逐步升温, 使锗逐渐溶入到熔化的铟中. 并加热到 $500 \sim 600^\circ\text{C}$, 形成铟锗共熔体, 再逐渐降温. 在降温过程中, 锗便从共熔体中析出, 沿着锗片的晶向再结晶. 在再结晶的锗区中, 将含有大量的 p 型杂质铟, 使该区变成 p 型, 从而形成了 pn 结.

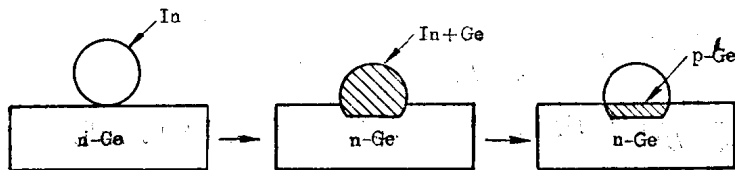


图 1-1 合金结的形成过程

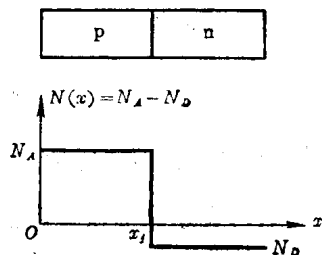


图 1-2 合金结的杂质分布

合金结的杂质分布如图 1-2 所示. 其特点是, 衬底 n 区中的施主杂质浓度 N_D 是均匀分布的. 再结晶形成的 p 区中, 虽然既含有受主杂质, 也含有施主杂质, 但一般受主杂质浓度 N_A 远大于施主杂质浓度 N_D . 所以, p 区净杂质浓度近似为 N_A , 也近似为均匀分布. 在界面处, 杂质浓度由 N_A 突变为 N_D . 具有这种杂质浓度分布的 pn 结称为突变结. 设 pn 结的位置在 $x = x_j$ 处, 则突变结的杂质浓度分布可表示为

$$N(x) = N_A \quad x < x_j \quad (1-1a)$$

$$N(x) = N_D \quad x > x_j \quad (1-1b)$$

实际 pn 结中两边的杂质浓度往往相差很大, 一边杂质浓度远高于另一边的 pn 结称为单边突变结. 若 $N_A \ll N_D$, 记作 pn^+ 结; $N_A \gg N_D$, 记作 p^+n 结.

2. 扩散法 图 1-3 表示用扩散法制造 pn 结的基本过程. 它是在 n 型(或 p 型)单晶

衬底上,先通过氧化工艺,在硅片表面形成一层能起掩蔽杂质扩散作用的二氧化硅薄膜.利用光刻技术在二氧化硅层上刻蚀出供选择扩散的窗口,然后在高温下进行 p 型(或 n 型)杂质扩散而形成 pn 结.

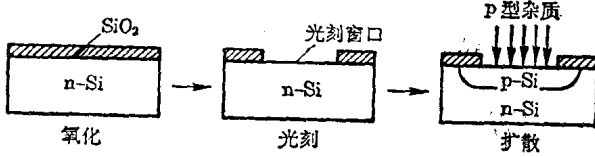


图 1-3 扩散结的形成过程

扩散结的杂质分布有两种形式^[1]:

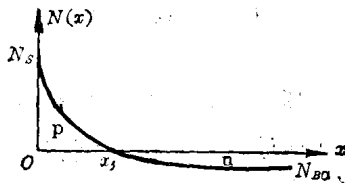
(1) 恒定源扩散(即通源扩散) 其

杂质分布为余误差分布.当扩散时间 t 一定时,其分布函数表示为:

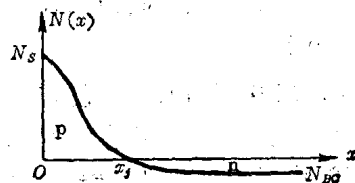
$$N(x) = N_s \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\lambda^2} d\lambda \right] - N_{BC} = N_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - N_{BC} \quad (1-2)$$

式中, N_s 为扩散层表面杂质浓度; N_{BC} 为衬底杂质浓度; D 为杂质扩散系数; t 为扩散时间.图 1-4(a) 表示杂质浓度按余误差函数分布的情况.在结深 x_j 处,因为 $N(x_j) = 0$, 故由式(1-2)得到按余误差分布时, pn 结结深为

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_{BC}}{N_s} \right) \quad (1-3)$$



(a) 余误差分布



(b) 高斯分布

图 1-4 扩散结的杂质分布

(2) 限定源扩散(即再扩散) 其杂质浓度分布为高斯分布.当扩散时间 t 一定时,其分布函数表示为

$$N(x) = N_s e^{-\frac{x^2}{4Dt}} - N_{BC} = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} - N_{BC} \quad (1-4)$$

式中,扩散层表面杂质浓度 $N_s = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}$; Q 为通源扩散时扩进硅片单位面积的杂质总量.

图 1-4(b) 表示杂质浓度按高斯函数分布的情况.同样,在 x_j 处, $N(x_j) = 0$, 故由式(1-4)得到按高斯分布时的结深为

$$x_j = \left[4Dt \ln \frac{N_s}{N_{BC}} \right]^{1/2} \quad (1-5)$$

从图 1-4 中可以看出,用扩散法形成的 pn 结,其杂质浓度分布在结深处,不是象突变结那样突然变化,而是缓慢变化的,这种结常称为缓变结.缓变结在 x_j 处的杂质浓度梯度用 α_j 表示(α_j 的单位是 cm^{-4}).

对于余误差分布

$$\alpha_j = \left. \frac{dN(x)}{dx} \right|_{x=x_j} = - \frac{N_s}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x_j^2}{4Dt}} \quad (1-6)$$

对于高斯分布

$$\alpha_j = \left. \frac{dN(x)}{dx} \right|_{x=x_j} = - \frac{2N_{BC}}{x_j} \ln \frac{N_s}{N_{BC}} \quad (1-7)$$

在缓变结中,若表面杂质浓度 N_s 较低,结深 x_j 较深,在 x_j 处的杂质浓度梯度较小时,

结附近的杂质浓度可用线性分布近似, 即

$$N(x) = \alpha_j(x - x_j) \quad (1-8)$$

若 N_s 较高, x_j 又较浅, 在 x_j 处的杂质浓度梯度很大, 则缓变结可用突变结近似。

3. 离子注入法 离子注入法是近几年发展起来的新掺杂技术。其方法是把杂质元素(如硼、磷、砷)的原子, 经过离化变成带电的杂质离子。然后用强电场加速, 获得高能量(约几万到几十万 eV)的离子直接轰击到半导体基片内, 经过退火激活, 在体内形成一定杂质浓度分布而成的 pn 结。

离子注入结的杂质浓度分布, 在掩蔽膜窗口附近的横向分布为余误差分布; 纵向是以平均投影射程 R_p 为中心的近似高斯分布, 如图 1-5 所示。

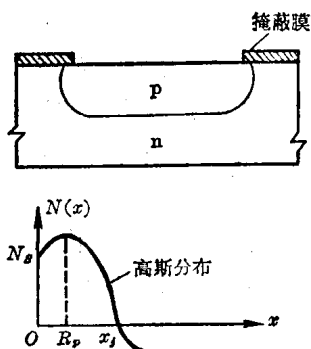


图 1-5 离子注入法形成的 pn 结及其杂质分布

§ 1.2 平衡 pn 结的空间电荷区和能带图

1. 平衡 pn 结空间电荷区的形成 所谓平衡 pn 结是指没有外加电压情况下的 pn 结。我们用图 1-6 来说明 pn 结空间电荷区的形成过程。当 p 型和 n 型半导体单独存在时, 在 p 型一边, 空穴是多数载流子(以下简称多子), 电子是少数载流子(简称少子); 在 n 型一边, 电子是多子, 空穴是少子。但是, 无论是 p 型还是 n 型, 都是电中性的。

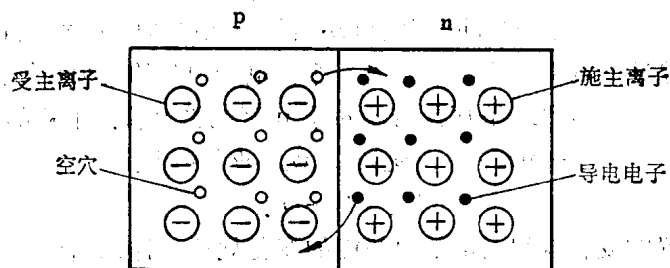


图 1-6 pn 结空间电荷区及自建电场

当 p 型和 n 型半导体两者紧密接触时, 在 p 型和 n 型交界面处, 由于存在载流子浓度差而导致载流子的扩散运动。空穴从 p 区向 n 区扩散; 电子从 n 区向 p 区扩散。对于 p 区, 空穴离开后留下不可移动的带负电荷的电离受主; 对于 n 区, 电子离开后, 留下不可移动的带正电荷的电离施主。这样, 在 pn 结交界面附近就出现一个 p 侧为负, n 侧为正的空间电荷区。电荷区内的正负电荷将形成由 n 区指向 p 区的电场。由于空间电荷区电场是由结界面两边的载流子扩散而建立的, 不是外加的, 因而称为 pn 结自建电场或称内建电场。显然, 在自建电场的作用下, 电子从 p 区向 n 区漂移, 空穴从 n 区向 p 区漂移。也就是说, 在空间电荷区内, 自建电场使电子和空穴产生的漂移运动, 其方向正好与它们各自的扩散运动方向相反。随着扩散的不断进行, 空间电荷区不断扩大, 空间电荷数量不断增加, 电场不断增强。因此, 载流子的漂移作用也越来越强。当载流子的漂移运动增加到与扩散运动相抵消(即大小相等, 方向相反)时, 界面附近达到动态平衡。此后, 空间电荷区不再扩大, 电场也不再增强。

从上面的分析可见, pn 结空间电荷区内, 既有载流子的扩散运动, 又有漂移运动. 若以 J_{pD} 和 $J_{p\mu}$ 分别表示空穴的扩散运动和漂移运动所形成的电流密度; 以 J_{nD} 和 $J_{n\mu}$ 分别表示电子的扩散运动和漂移运动所形成的电流密度, 则在动态平衡时, 扩散电流密度与漂移电流密度大小相等, 方向相反, 即

$$J_{pD} + J_{p\mu} = 0 \quad J_{nD} + J_{n\mu} = 0 \quad (1-9)$$

在空间电荷区内, 设 p 区一侧的负电荷量为 Q^- , 宽度为 x_p , n 区一侧的正电荷量为 Q^+ , 宽度为 x_n , 若结面积为 A , 电中性要求 $|Q^-| = Q^+$, 即 $qN_A A x_p = qN_D A x_n$, 可得

$$x_n = \frac{N_A}{N_D} x_p \quad (1-10)$$

若 p 区杂质浓度 $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, n 区杂质浓度 $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 则 $x_n = 100x_p$. 这说明, 空间电荷区主要在低掺杂的一侧.

2. 平衡 pn 结的能带图及接触电势差

(1) 能带图 平衡 pn 结的情况可以用能带图来分析. p 型和 n 型半导体的能带图如图 1-7 所示. 在 p 区中, 费米能级 E_{Fp} 在本征费米能级 E_i 之下. 在 n 区中, E_{Fn} 在 E_i 之上. 当 p 型与 n 型半导体紧密结合形成 pn 结之后, 其能带图如图 1-8 所示. 从图中可见, 平衡 pn 结能带图的特点是, p 区能带相对于 n 区能带上移; 费米能级 E_F 在同一水平线上, 即 pn 结具有统一的费米能级.

p 区能带相对于 n 区能带上移的原因, 是由于 pn 结空间电荷区内存在自建电场, 其方向由 n 区指向 p 区. 因此, n 区电势 ψ_n 比 p 区电势 ψ_p 高. 但是, 对于电子的电势能来说, 则是 p 区的势能比 n 区的高. 或者说, 由于 pn 结的空间电荷区内存在自建电场, 这就使 p 区的电子能量在原来能级的基础上, 迭加上一个由电场引起的附加势能. 因为能带图是按照电子的能量高低来画的, 所以, p 区能带相对于 n 区能带上移. 上移的高度为

$$-q\psi_p - (-q\psi_n) = q(\psi_n - \psi_p) = qV_D$$

其中

$$V_D = \psi_n - \psi_p.$$

由于能带随位置的变化规律与电子电势能的变化规律一样, 故有

$$\frac{dE_i}{dx} = -q \frac{d\psi(x)}{dx} = qE \quad (1-11)$$

式中, $\psi(x)$ 是 pn 结的电位分布函数. 式(1-11)说明, 在半导体中有电场存在的地方, 能带会发生弯曲, 朝电场所指的方向上移, 电场强度越强, 能带弯曲越利害, 电场为零或很弱的地方, 能带是直的.

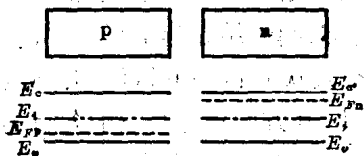


图 1-7 p 型和 n 型半导体能带图

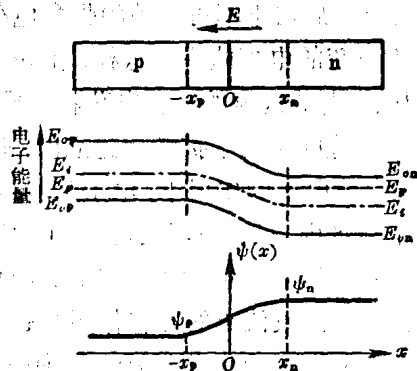


图 1-8 pn 结能带图和电位分布

方,能带保持平直。

下面我们来证明平衡pn结具有统一的费米能级 E_F 。从前面分析知道,空间电荷区内,载流子既有扩散运动,也有漂移运动。因此,电流密度为二者之和。对于空穴

$$J_p = J_{p\mu} + J_{pD},$$

而空穴的漂移电流密度 $J_{p\mu} = q\mu_p pE$, 扩散电流密度

$$J_{pD} = -qD_p \frac{dp}{dx},$$

所以,空穴的净电流密度为

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} = q\mu_p p \left[E - \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \right] \quad (1-12)$$

将式(1-11)代入式(1-12), 并利用 $p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$, $(D_p/\mu_p) = kT/q$ 的关系, 可得空穴电流密度

$$J_p = q\mu_p p \left[\frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} - \frac{1}{q} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) \right] = \mu_p p \frac{dE_F}{dx} \quad (1-13)$$

同样,对于电子电流密度 J_n , 也可以得到类似的结果。平衡时pn结的净电流密度

$$J_n = J_p = 0,$$

所以 $\frac{dE_F}{dx} = 0$ 。这说明费米能级 E_F 与位置无关, 即 E_F 处处相等。或者说, 平衡pn结具有统一的费米能级。

从式(1-13)看出, 电流密度一定时, 载流子浓度高的地方, E_F 的变化小。反之, 载流子浓度低的地方, E_F 随 x 的变化也就大。这一点对于以后分析外加偏压下, pn结能带图中费米能级的变化规律有指导意义。

pn结空间电荷区内能带发生弯曲, 直接反映了空间电荷区内电子电势能的变化。因此, 电子要从n区进入p区(或者空穴要从p区进入n区)必须越过一个能量“高坡”。这个能量高坡常称为“势垒”。所以又把空间电荷区称为势垒区。

(2) 接触电势差 由于平衡pn结空间电荷区存在自建电场, 使n区与p区之间存在电势差。这个电势差称为pn结的接触电势差, 并用 V_D 表示。

根据平衡状态下结电流等于零的条件, 由式(1-12)可得pn结自建电场

$$E(x) = -\frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = -\frac{kT}{q} \frac{d}{dx} (\ln p)$$

将上式从 $-x_p$ 到 x_n 进行积分, 并利用 $p(-x_p) = p_p$, $p(x_n) = p_n$, $n_n p_n = n_i^2$ 的关系, 得到

$$V_D = -\int_{-x_p}^{x_n} E(x) dx = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p n_n}{n_i^2}$$

在杂质全部电离的情况下, $n_n = N_D$, $p_p = N_A$, 故

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1-14)$$

这就是突变结的接触电势差的表达式。该式表明, V_D 与pn结的掺杂浓度、温度以及材料的禁带宽度有关。在一定温度下, 掺杂浓度越高, V_D 越大; 禁带宽度越宽, n_i 越小, 则 V_D 越大。所以, 硅pn结的接触电势差比锗pn结的大。若 $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 在室温时可算得硅pn结的 $V_D = 0.75 \text{ V}$, 锗pn结的 $V_D = 0.37 \text{ V}$ 。由式(1-14)看出, pn结的温度升高, 本征载流子浓度 n_i 增大, 所以 V_D 随温度升高而降低。

对于线性缓变结,如图 1-9(a)所示,若空间电荷区宽度为 x_m , 结处杂质浓度梯度为 α_j , 则结边界的杂质浓度

$$|N_A| = |N_D| = \frac{x_m}{2} \alpha_j$$

由此可得线性缓变结的接触电势差

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{\alpha_j^2 \left(\frac{x_m}{2}\right)^2}{n_i^2} = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{\alpha_j x_m}{2n_i} \quad (1-15)$$

图 1-9(b)表示 V_D 随浓度梯度 α_j 的变化关系^[2].

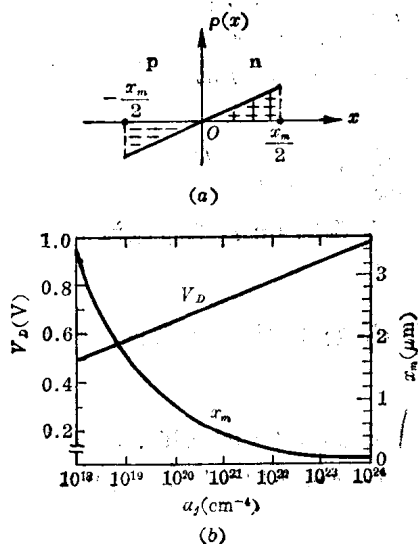


图 1-9 线性缓变结的空间电荷分布
及 V_D 和 x_m 随 α_j 的变化

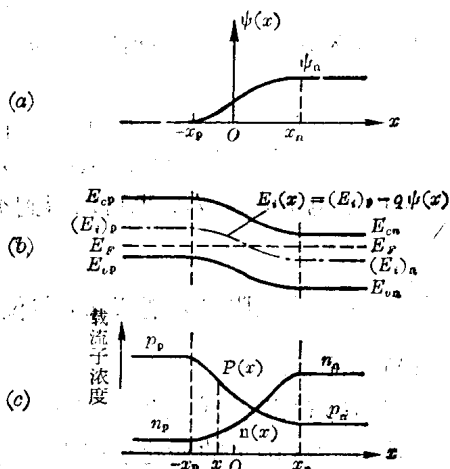


图 1-10 平衡 pn 结载流子浓度分布

(3) 平衡 pn 结的载流子浓度 由于 pn 结的能带发生弯曲, 因此, 本征费米能级是位置 x 的函数, 可写成 $E_i(x)$. 如令 p 区为电势参考点, 则空间电荷区内的电势 $\psi(x)$ 为正值. 显然, 空间电荷区内 x 处的本征费米能级 $E_i(x)$ 便是 p 区本征费米能级 $(E_i)_p$ 与 x 处电子电势能之差, 即

$$E_i(x) = (E_i)_p - q\psi(x) \quad (1-16)$$

空间电荷区内 x 处的电子浓度和空穴浓度分别为

$$n(x) = n_i e^{[E_F - E_i(x)]/kT} \quad (1-17)$$

$$p(x) = n_i e^{[E_i(x) - E_F]/kT} \quad (1-18)$$

把式(1-16)分别代入式(1-17)和式(1-18)便得

$$n(x) = n_i e^{[E_F - (E_i)_p]/kT} \cdot e^{q\psi(x)/kT} = n_p e^{q\psi(x)/kT} \quad (1-19)$$

$$p(x) = n_i e^{[(E_i)_p - E_F]/kT} \cdot e^{-q\psi(x)/kT} = p_p e^{-q\psi(x)/kT} \quad (1-20)$$

式(1-19)和(1-20)分别为平衡 pn 结电子浓度和空穴浓度的表达式. 又因为

$$n(x) \cdot p(x) = n_p e^{q\psi(x)/kT} \cdot p_p e^{-q\psi(x)/kT} = n_p \cdot p_p = n_i^2$$

所以, 平衡 pn 结空间电荷区内 x 处的电子浓度与空穴浓度的乘积仍然等于本征载流子浓度的平方.

在空间电荷区边界 $(-x_p)$ 处, 由于电势为零, 即 $\psi(-x_p) = 0$, 所以, 由式(1-19)得