

双极型
和场效应晶体管



GH

高等学校
工科电子类
规划教材

双极型 和场效应晶体管

武世香 编



电子工业出版社

73

子

高等学校工科电子类规划教材

双极型和场效应晶体管

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 简 介

本书重点介绍双极型晶体管和场效应晶体管的基本工作原理、直流特性、频率特性、功率特性、开关特性,以及描述这些特性的有关参数;结合特性分析,还介绍了一些典型器件及新型器件的结构和特点。为适应计算机模拟和计算机辅助设计,书中还介绍了常用的器件模型,以及一些在工程上有实用价值的经验公式和经验数据。

本书适于作微电子技术专业本科生教材、相关专业研究生和本科与专科生参考书,还可供从事微电子技术相关工作的科研及工程技术人员阅读。

双极型和场效应晶体管

武世香 编

责任编辑:詹善琼

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京科技印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:23.25 字数:578 千字

1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月北京第一次印刷

印数:600 册 定价:13.50 元

ISBN7-5053-2736-4/G·215

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断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

前 言

本教材系按中国电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,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》编审小组征稿并推荐出版。责任编辑为北京理工大学李卫教授。

“双极型和场效应晶体管”是微电子技术专业的主要专业课之一。根据 1991 年 12 月全国《半导体物理与器件》教材编审小组扩大会议精神,将原《晶体管原理》一书改为现在的名称,以期更直接表达本教材的内容。本教材由哈尔滨工业大学武世香编写,电子科技大学谢孟贤担任主审。

本教材的参考学时为 100 学时。包括双极型晶体管和场效应晶体管两部分内容。重点阐述这些器件的基本工作原理,在不同工作条件下表现出来的特性、以及描述各类特性的主要参数,并介绍一些典型器件及新型器件的结构及其特点。为适应日益发展的计算机模拟和计算机辅助设计的需要,书中还介绍了常用的器件模型。

本课程的先修课为“半导体物理”。关于 p-n 结理论尽管在该课中已有讲解,但考虑到教材的相对独立性以及使用对象的不同需要,本教材关于 p-n 结的论述,既是后续章节的基础,又是 p-n 结二极管的基本理论。

从“微电子技术”专业的培养目标出发,为加强学生自学能力,改进课堂教学,在学生自学的基础上开展更多的课堂讨论,本教材本着“少而精”的原则,除了一些基本的及说明问题所必需的数学推导外,避免了那些在一系列忽略和近似假设之后的精确数学推导,而着重于基本物理概念。另外考虑到由于某些公式推导的中间过程夹杂着近似及忽略,为使学生不致于在阅读中因对公式的出处及结论感到恍惚而浪费时间,教材中给出了一些公式推导过程的关键步骤。此外,考虑到工程上的实用性,还给出了一部分经验公式和经验数据。每章后附有与其内容相配合的练习题,参考资料放在全书之后。

异质结晶体管是当今晶体管家族中的一个重要分支,既有单极型器件,又有双极型器件。单极型异质结器件自然归入第六章。双极型异质结器件的特性分析涉及到第二~五章的内容,不便于归入其中的某一章节,故将该部分内容安排在第九章(新型器件)中。在使用教材时可安排在第四章学习之后。

随着分子束外延(MBE)和金属有机化合物气相淀积(MOCVD)技术的发展,出现了工作机理与传统的基于“掺杂工程”的微电子器件截然不同的“能带工程”器件。此类器件随着薄膜制备技术的提高而得到了迅速的发展,特别在高频高速领域有向“掺杂工程”器件挑战的趋势。做为基础教材及篇幅所限,本教材讨论的着眼点主要仍基于“掺杂工程器件”,对于“能带工程器件”,仅结合工作原理进行了介绍。

教材编写过程中参阅了许多兄弟院校的相关教材。各教材的编写者从不同角度阐述、分析问题,给作者以极大的启迪。本教材从中汲取了有益的部分,恕不在此一一列举。在修改书稿的过程中,电子科技大学谢孟贤教授提供的他所编写的《半导体器件物理》讲义进一步

丰富了教材的内容。在教材编写和定稿过程中,得到了哈尔滨工业大学刘振茂教授、电子科技大学谢孟贤教授、西安交通大学朱秉升教授、北京理工大学李卫教授以及《半导体物理与器件》教材编审小组全体委员的悉心指教和支持,在此表示由衷的感谢。

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 1994.5

本书参数符号表

A 面积	E_C 导带底电子能量
A_c 集电结面积	E_F 费米能级处电子能量
A_e 发射结面积	E_F^+ 空穴准费米能级处电子能量
A_{eff} 有效面积	E_F^- 电子准费米能级处电子能量
a JFET 沟道半厚度、沟道厚度	E_g 禁带宽度
$p-n$ 结杂质浓度梯度	E_{g0} 0K 时的禁带宽度
	E_i 本征费米能级处电子能量
B, b 基区、基极	E_{SB} 二次击穿触发能量、二次击穿耐量
BV_{ebo} 集电极开路时发射极 - 基极间击穿电压	E_V 价带顶电子能量
BV_{cbo} 发射极开路时集电极 - 基极间击穿电压	E 电场强度
BV_{ceo} 基极开路时发射极 - 集电极间所能承受的最高反向电压	E_b 基区自建电场强度
BV_{DS} 漏 - 源击穿电压	E_c 载流子速度饱和临界场强
BV_{DS0} 栅压为零时的漏 - 源击穿电压	E_{co} 发生基区扩展时的临界场强
BV_{GS} 栅 - 源击穿电压	E_c 发射区自建电场强度
	E_1 E_{ox} 栅绝缘层中最大场强
C, c 集电区、集电极; 电容	E_M 最大电场强度
C_C 集电极输出电容	E_{MB} 击穿时临界场强
C_D 扩散电容	
C_{dc} 速度饱和区静电偶极层电容	F 噪声系数
C_{ds} 漏 - 源耦合电容	F_{min}° 最小噪声系数
C_G JFET 栅绝缘层总电容	f 频率
C_g JFET 总栅电容	f_a α 截止频率
C_{gb} 栅 - 体寄生电容	f_β β 截止频率
C_{gd} 栅 - 漏电容	f_H 高频区噪声转角频率
C_{gd}^* IGFET 栅 - 漏重叠电容	f_L 低频区噪声转角频率
C_{Gs} JFET 单位面积栅结耗尽层电容	f_M 最高振荡频率
C_{gs} 栅 - 源电容	f_o 载流子渡越时间截止频率
C_{gs}^* IGFET 栅 - 源重叠电容	f_T 特征频率 截止频率
C_L 附加电容	
C_{ot} 总栅极电容	G, g 电导 净产生率
C_{ox} 栅氧化层单位面积电容	G_{MA} 最大可利用功率增益
C_T 势垒电容	G_o JFET 冶金沟道电导
	g_d 漏极电导 沟道电导
D 漏区 漏电极	g_{dl} 线性区漏极电导
D_n 电子扩散系数	g_{ds} 小信号漏端电导
D_p 空穴扩散系数	g_m 跨导
	g_{mb} 小信号衬底跨导
E, e 发射区、发射极	g_{ms} 饱和区跨导
E_a 激活能	g_{mv} 速度饱和时的跨导
	g_{mz} 零温度系数下跨导

$h_{ib}, h_{rb}, h_{fb}, h_{ob}$ 共基极 h 参数
 $h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$ 共发射极 h 参数

i_{sh} 散粒噪声电流
 i_{th} 热噪声电流

I 电流

I_B, I_b 基极电流
 I_{BX} 基极过驱动电流
 I_C 集电极电流
 I_{cbo} 发射极开路集电结反向漏电流
 I_{ceo} 穿透电流
 I_{CM} 最大集电极工作电流
 I_{CS} 集电极饱和电流
 I_D 漏极电流
 I_{DS} 漏-源电流
 I_{Dsat} 饱和漏极电流
 I_{DSS} 零栅压下饱和漏极电流, 或最大饱和漏极电流
 I_{DZ} 零温度系数下漏极电流
 I_E, I_e 发射极电流
 I_{ebo} 集电极开路发射结反向漏电流
 I_F, I_f 正向直流电流 I_F 最大输出电流
 I_G 产生电流 栅极电流
 I_{GSS} 栅极截止电流
 I_{nc} 穿过集电结的电子电流分量
 I_{ne} 穿过发射结的电子电流分量
 I_o p-n 结反向饱和电流
 I_{pe} 穿过发射结的空穴电流分量
 I_R, I_r 直流反向电流
 I_r 基区复合电流
 I_{re} 发射结势垒复合电流
 I_{SB} 二次击穿触发电流
 I_{ES} 集电极短路时发射极饱和电流
 I_{CS} 发射极短路时集电极饱和电流
 i_b 基极交流电流
 i_c 集电极交流电流
 i_d 漏极交流电流
 i_e 发射极交流电流
 i_g 栅极交流电流
 i_n 电子电流交流分量
 i_{nd} 沟道热噪声电流
 i_{nf} $1/f$ 噪声电流
 i_{ng} 感应栅噪声电流
 i_p 空穴电流交流分量

J 直流电流密度

J_{CM} 集电极最大电流密度
 J_{CMI} 集电极最大线电流密度
 J_{cr} 均匀基区扩展临界电流密度
 J'_{cr} 缓变基区扩展临界电流密度
 J_D 扩散电流密度
 J_{EM} 最大发射极电流密度
 J_G 势垒产生电流密度
 J_n 电子电流密度
 J_p 空穴电流密度
 J_{RD} 反向扩散电流密度
 J_{RG} 势垒复合电流密度

K 绝对温度单位 — 开尔文

k 玻尔兹曼常数
 K_P 功率增益
 K_{Pm} 最大功率增益

L 沟道长度 电感

L_d 沟道夹断区长度
 L_E 发射区总周长
 L_{eff} 发射区有效条长
 L_n 电子扩散长度
 L_p 空穴扩散长度

M 雪崩倍增因子

m 超相移因子

N 杂质浓度

N_A 受主杂质浓度
 N_B, N_b 基区掺杂浓度
 N_{BC} 衬底杂质浓度
 N_C 集电区掺杂浓度
 N_D 施主杂质浓度
 N_E 发射区掺杂浓度
 N_F 噪声系数(dB)
 N_o 突变结低掺杂侧杂质浓度
 N_S 表面杂质浓度
 n 电子浓度

n^0 平衡电子浓度
 n_1 电子浓度交流分量幅值
 $n_E(n_e)$ 发射结电子浓度直流(交流)分量
 $n_C(n_c)$ 集电结电子浓度直流(交流)分量
 n_i 本征电子浓度
 n_0 电子密度直流分量
 n_s 表面电子浓度

P 功率

P_c 耗散功率
 P_{CM} 集电极最大耗散功率
 P_D 电源供给功率
 P_i 输入功率
 P_N 噪声功率
 P_o 输出功率
 P_{OM} 最大输出功率
 P_S 信号功率
 P_{SB} 二次击穿触发功率
 p 空穴浓度
 p^0 平衡空穴浓度
 $p_E(p_e)$ 发射结空穴浓度直流(交流)分量
 p_0 空穴浓度直流分量
 p_1 空穴浓度交流分量幅值

Q 电荷

Q_B, Q_{BS} 基区电荷
 Q_B 表面耗尽层空间电荷面密度
 Q_{Bmax} 表面耗尽层最大面电荷密度
 Q_{bs} 基区超量存储电荷
 Q_{ch} 沟道电荷
 Q_{cs} 集电区超量存储电荷
 Q_G 栅极电荷面密度
 Q_t 栅感应电荷
 Q_N 沟道区总载流子电荷
 Q_n 反型层导电电子电荷面密度
 Q_{ox} 栅绝缘层中面电荷密度
 Q_S 半导体表面电荷密度
 Q_X 超量存储电荷
 q 电子电荷

R 电阻 净复合率

R_b 衬底电阻

R_c 金-半欧姆接触系数
 R_{con} 接触电阻
 R_D 漏极串联电阻
 R_E 发射极串联电阻
 R_G, R_g 栅极串联电阻
 $R_{GS}(R_{in})$ 栅源电阻 FET 直流输入阻抗
 R_L 负载电阻
 R_n 等效噪声电阻
 R_o 冶金沟道电阻
 R_{on} 导通电阻
 R_S 源极串联电阻
 R_T 热阻
 R_{\square} 薄层电阻
 r_b 基极电阻
 r_c 集电结电阻
 r_{cs} 集电极串联电阻
 r_{ds} 沟道电阻
 r_e 发射结电阻
 r_{es} 发射极串联电阻
 r_j 球面结、柱面结曲率半径

S 表面复合速度 过驱动因子

S_c 发射极条宽
 S_{eff} 发射极条有效半宽度

T 温度

T_A 环境温度
 T_{jm} 最高结温
 t 时间
 t_d 延迟时间
 t_f 下降时间
 t_{off} 关闭时间
 t_{on} 开启时间
 t_{ox} 栅氧化层厚度
 t_r 上升时间 二极管反向恢复时间
 t_s 贮存时间

V 电压、电位、电势

V_A 外加电压
 V_B 击穿电压
 V_{BC}, V_C 集电极直流偏压
 V_{BE}, V_E 发射极直流偏压

V_{bea} 发射结正向压降
 V_{BS} 衬-源电压
 V_{CC}, V_{DD} 电源电压
 V_D 接触电势差
 V_{DS} 漏-源电压
 V_{DS}^b *JFET* 沟道夹断时漏-源间最大电压
 V_{Dsat} 饱和漏-源电压
 V_{EA} 厄尔利电压
 V_F 外加正向电压
 V_f p-n 结正向阈值电压(门坎电压)
 V_{FB} 平带电压
 V_G 栅极电压
 V_{GB} 栅-衬电压
 V_{GS} 栅-源电压
 V_g 计入自由载流子后对于 C_T 的修正电压
 V_{JO} 正向导通电压
 V_{KF} 膝点电压
 V_{ms} 金-半接触功函数差(V)
 V_p 夹断电压
 V_{p0} 本征夹断电压
 V_{PT} 穿通电压
 V_R 外加反向电压
 V_S 表面势
 V_{SB} 二次击穿触发电压 源-衬偏置电压
 V_T 阈值电压
 u_c 集电极交流电压幅值
 u_e 发射极交流电压幅值
 u_g 栅极交流电压
 u_{gd} 栅-漏交流电压
 u_{gs} 栅-源交流电压
 u_o 输出交流电压
 u_s 交流信号电压
 u_{sh} 散粒噪声电压
 v_{sl} 饱和漂移速度
 u_{th} 热噪声电压

W 沟道宽度
 W_b 基区宽度
 W_c 集电区厚度
 W_{cib} 感应基区宽度
 W_e 发射区宽度
 W_n n 区厚度

W_o 外延层厚度
 W_p p 区厚度

X 电抗
 x_d 表面耗尽层宽度
 x_j p-n 结深
 x_m p-n 结空间电荷区总宽度
 x_{mb} 击穿电压下空间电荷区宽度
 x_{mD} 漏结耗尽层宽度
 x_{ms} 源结耗尽层宽度
 x_n n 区侧耗尽层宽度
 x_p p 区侧耗尽层宽度

Y 导纳

Z 阻抗

α 共基极短路电流放大系数
 α_F 共基极短路正向电流放大系数
 α_R 共基极短路反向电流放大系数
 α_o 直流、低频共基极短路电流放大系数
 α^* 集电区倍增因子
 α_{eff} 有效电离率
 α_n 电子电离率
 α_p 空穴电离率

β 共发射极短路电流放大系数
 β_o 直流、低频共发射极短路电流放大系数
 β_{DC} 直流共发射极短路电流放大系数
 β_{OM} 最大共发射极短路电流放大系数
 β^* 基区输运系数

γ 发射效率 体效应系数
 γ_o 直流、低频发射效率

ϵ 介电系数
 ϵ_o 真空介电系数
 ϵ_{ox} SiO_2 介电系数

η 电场因子 功率转换效率

μ 电压放大系数 迁移率

μ_{BULK} 体内载流子迁移率
 μ_{eff} 有效迁移率
 μ_n 电子迁移率
 μ_p 空穴迁移率

 ρ 电阻率 电荷密度

 σ 电导率

 τ 载流子寿命 延迟时间
 沟道渡越时间
 τ_B 基极时间常数
 τ_b 基区渡越时间
 τ_C 集电极时间常数
 τ_c 集电极延迟时间
 τ_d 集电结势垒渡越时间
 τ_E 发射极时间常数
 τ_e 发射结延迟时间
 τ_n 电子寿命
 τ_p 空穴寿命
 τ_X 过饱和时间常数

Φ 功函数
 Φ_{MS} 金-半功函数差
 Φ_m 金属功函数
 Φ'_m 金属修正功函数
 Φ'_s 半导体修正功函数

χ 电子亲和势
 χ' 修正电子亲和势

ψ 静电势
 ψ_F 费米势
 ψ_n n区静电势
 ψ_p p区静电势

ω 角频率
 ω_b 基区输运系数截止角频率
 ω_c 集电极截止角频率
 ω_d 集电结势垒渡越截止角频率
 ω_e 发射极截止角频率
 ω_{gm} 跨导截止角频率

目 录

上篇 双极型晶体管	(1)
第一章 p-n 结	(1)
1.1 p-n 结的形成及平衡状态	(1)
1.2 p-n 结的直流特性	(9)
1.3 p-n 结空间电荷区和势垒电容	(28)
1.4 p-n 结的交流小讯号特性	(50)
1.5 p-n 结击穿	(53)
练习题	(65)
第二章 双极型晶体管的直流特性	(68)
2.1 晶体管的基本结构和杂质分布	(68)
2.2 晶体管的放大机理	(70)
2.3 晶体管的直流 $I-V$ 特性及电流增益	(74)
2.4 晶体管的反向电流及击穿电压	(97)
2.5 晶体管的直流特性曲线介绍	(103)
2.6 基极电阻	(109)
2.7 埃伯尔斯-莫尔(Ebers-Moll)模型	(111)
练习题	(113)
第三章 双极型晶体管的频率特性	(115)
3.1 晶体管交流电流放大系数与频率参数	(115)
3.2 晶体管的交流特性分析	(116)
3.3 晶体管的高频参数及等效电路	(121)
3.4 高频下晶体管中载流子的输运及中间参数	(130)
3.5 晶体管电流放大系数的频率关系	(138)
3.6 晶体管的高频功率增益	(143)
3.7 工作条件对晶体管 f_T 、 K_{Pm} 的影响	(146)
练习题	(147)
第四章 双极型晶体管的功率特性	(149)
4.1 集电极最大允许工作电流 I_{CM}	(149)
4.2 基区大注入效应对电流放大系数的影响	(149)
4.3 有效基区扩展效应	(154)
4.4 发射极电流集边效应	(159)
4.5 发射极单位周长电流容量——线电流密度	(163)
4.6 晶体管最大耗散功率 P_{CM}	(165)
4.7 二次击穿和安全工作区	(167)
练习题	(176)

第五章 二极管和双极型晶体管的开关特性	(178)
5.1 p-n 结二极管的开关特性	(178)
5.2 晶体管的开关作用	(184)
5.3 晶体管的开关过程和开关时间	(186)
5.4 开关晶体管的正向压降和饱和压降	(203)
练习题	(206)
下篇 场效应晶体管	(207)
第六章 结型场效应晶体管	(208)
6.1 结型场效应晶体管的基本工作原理	(208)
6.2 结型场效应晶体管的直流特性与低频小信号参数	(213)
6.3 结型场效应晶体管的交流特性	(232)
6.4 结型场效应晶体管的功率特性	(237)
6.5 结型场效应晶体管结构举例	(239)
练习题	(251)
第七章 MOS 场效应晶体管	(252)
7.1 MOSFET 的基本工作原理和分类	(252)
7.2 MOSFET 的阈值电压	(254)
7.3 MOSFET 的电流-电压特性和直流特性曲线	(269)
7.4 MOSFET 的击穿特性	(277)
7.5 MOSFET 的频率特性	(281)
7.6 MOSFET 的功率特性和功率 MOSFET 的结构	(293)
7.7 MOSFET 的开关特性	(297)
7.8 MOSFET 的温度特性	(301)
7.9 MOSFET 的短沟道和窄沟道效应	(304)
练习题	(314)
第八章 晶体管的噪声特性	(315)
8.1 晶体管的噪声和噪声系数	(315)
8.2 晶体管的噪声源	(316)
8.3 双极型晶体管的噪声	(318)
8.4 JFET 和 MESFET 的噪声特性	(321)
8.5 MOSFET 的噪声特性	(327)
练习题	(329)
第九章 新型晶体管介绍	(331)
9.1 异质结双极晶体管	(331)
9.2 静电感应晶体管	(335)
9.3 穿通型晶体管	(339)
9.4 绝缘栅双极晶体管	(341)
9.5 双极反型沟道场效应晶体管(BICFET)	(343)
附录	(345)
参考资料	(354)

上篇 双极型晶体管

第一章 p-n 结

p-n 结是同一块半导体中 p 型区与 n 型区的交界面及其两侧很薄的过渡区。p-n 结是许多半导体器件的核心部分。例如,晶体二极管实质上就是一个 p-n 结;双极型晶体三极管是由两个靠得很近的、背靠背的 p-n 结组成的;结型场效应晶体管也是利用 p-n 结的特性工作的。即使在表面场效应晶体管中,p-n 结也是不可缺少的组成部分。在半导体集成电路中,除了用 p-n 结构成电路中的二极管、三极管外,还利用 p-n 结的有关特性制成电路中的电阻、电容及实现电路元器件间的隔离,从而使大规模集成电路的制作成为可能。由此可见,半导体器件无论怎样变化,都离不开 p-n 结,p-n 结可以称得上是“半导体器件的心脏”。所以,要了解晶体二极管、三极管以致半导体集成电路以及某些特种半导体器件的工作原理及特性,首先要弄清 p-n 结具有哪些特性?为什么会具有这些特性?

本章着重讨论 p-n 结的杂质分布、能带图、空间电荷区的电场及电位分布,以及在外加电压作用下 p-n 结空间电荷区的变化及载流子的分布、运动及复合的规律,从而解释 p-n 结的整流特性、电容效应及击穿现象。

1.1 p-n 结的形成及平衡状态

一、p-n 结的形成与空间电荷区

1. p-n 结的形成与杂质分布

在一块含有 p-n 结的半导体材料中,在 p 型区中受主杂质(如 Si 中的 B、Al、Ga 等)为主,多子是空穴;在 n 型区中施主杂质(如 Si 中的 P、As、Sb 等)为主,多子是电子。在 p-n 结交界面(称冶金结)处受主杂质与施主杂质浓度相等,或称净杂质浓度为零。

制作 p-n 结的方法很多,目前最主要的有合金法、扩散法、离子注入法及外延法。前者用于锗器件制作中,后二者用于硅器件的制作。Ⅲ-V 族化合物半导体 p-n 结,则是由外延方法获得。

由于获得 p-n 结的手段不同,其内部杂质分布也各不相同。用合金法制得的 p-n 结,在 p 型区和 n 型区内部的杂质分布均匀,而在交界面处杂质类型突变,如图 1-1(a)所示,故合金结又可称为突变结。若其中一侧的杂质浓度比另一侧杂质浓度高两个数量级以上,又称之为单边突变结,记作 $n^+ - p$ 结或 $p^+ - n$ 结。右上角标“+”表示高浓度侧。用扩散法制得的 p-n 结,扩散杂质浓度由表面向内部沿扩散方向逐渐减小,如图 1-1(b)所示。在 $x = x_j$ 处 $N_A(x_j) = N_D$,此即冶金结的位置。由于在 x_j 附近杂质浓度是渐变的,故称其为缓变结。在工

程上,为简便起见,在允许的情况下常做一些近似处理。如果是表面杂质浓度较高而结深又很浅的 p-n 结,结附近杂质浓度梯度很大,可作突变结近似处理;而对于表面杂质浓度较低而结深又较深的 p-n 结,可认为结附近杂质浓度作线性变化[如图 1-1(b)中虚线表示],其杂质浓度梯度 $a = \frac{dN}{dx} \Big|_{x_1}$ 是常数,这时可做线性缓变结近似处理。

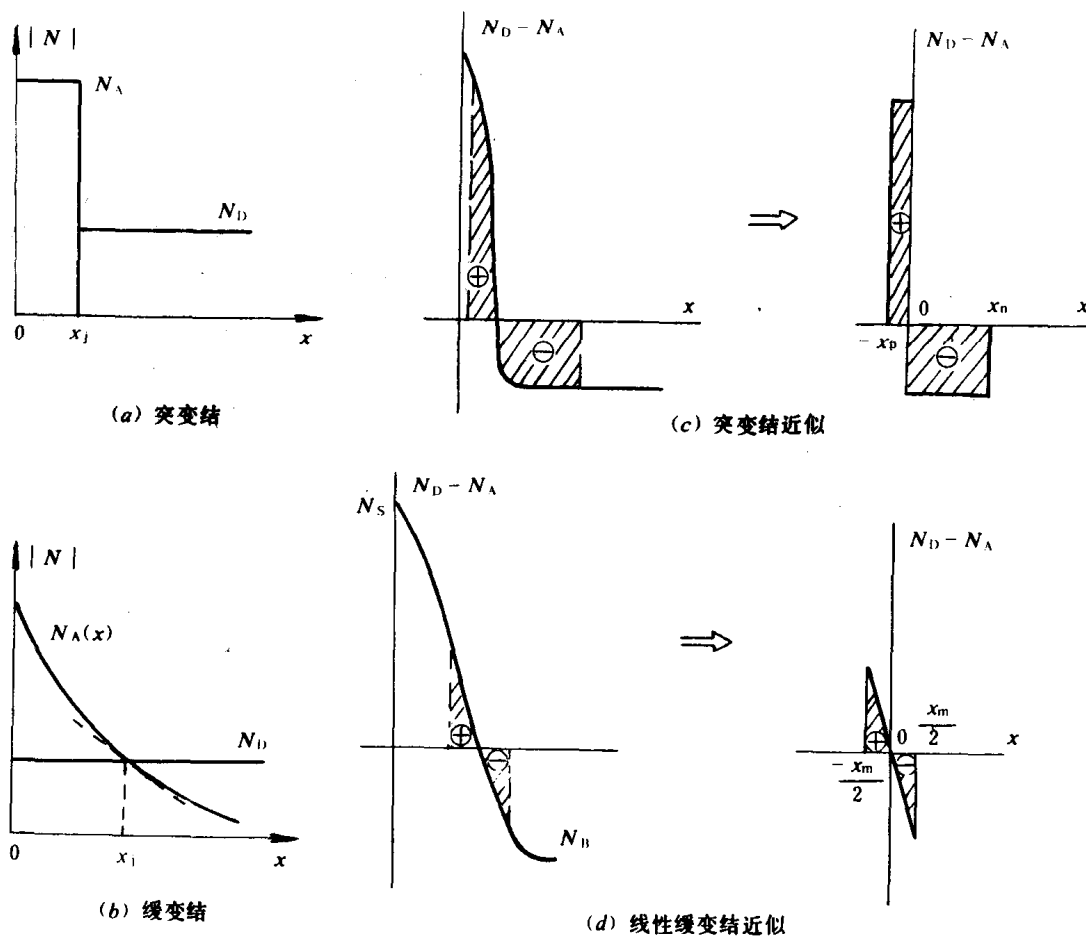


图 1-1 p-n 结的杂质分布及其近似处理

离子注入结也属于缓变结,但由于结很浅,且在结附近杂质浓度变化很大,故按突变结处理。外延法获得的 p-n 也是突变结。

无论用哪一种方法获得的 p-n 结,也无论其内部杂质分布如何,它们都具有单向导电性,有相似的伏-安特性,因而也就允许用统一的符号来表征,如图 1-2 所示。图(b)多用于讨论 p-n 结特性,在电路中则采用图(c)。典型的 p-n 结二极管封装结构示于图 1-3 中。

2. p-n 结空间电荷区

p-n 结空间电荷区的存在与变化是 p-n 结具有单向导电性的内在因素。由于 p-n 结两侧所掺杂质的导电类型不同,电离后所产生的载流子类型与浓度也不同,因而在交界面处存在着相同类型载流子的浓度差。在此浓度差的作用下,交界面附近的多数载流子通过交界面向对方做扩散运动。由于载流子是荷电粒子,不同电性载流子的相向运动破坏了原来的电中性

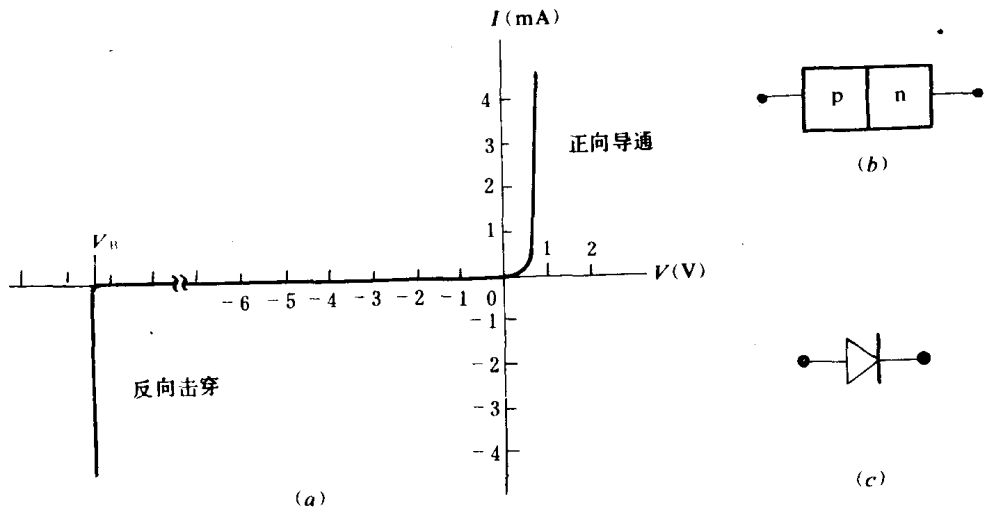


图 1-2 p-n 结的伏安特性(a)和符号(b)(c)

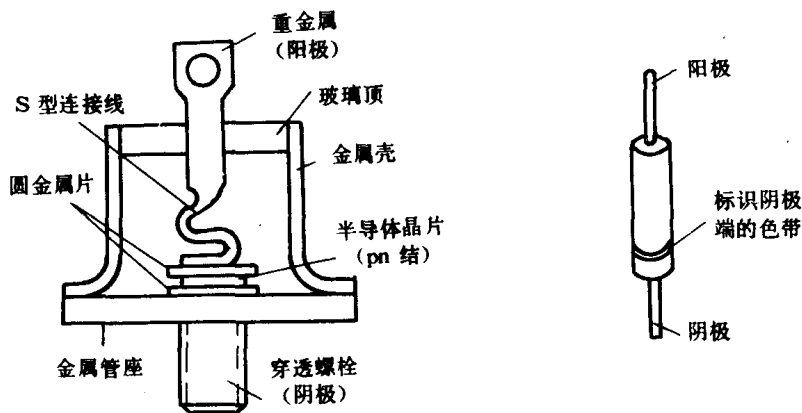


图 1-3 典型的 p-n 结二极管封装结构

条件。在界面附近,原 p 型区侧因失去了带正电荷的空穴、剩余了带负电荷的电离受主和接受了来自 n 区侧的电子而带了负电;原 n 型区侧则因失去电子、剩余带正电荷的电离施主和接受空穴而带了正电。由于正、负电荷之间的相互吸引,使这些过剩电荷分布在界面两侧一定的区域内。电离施主与电离受主都是固定在晶格结点上,因此这个区域称为空间电荷区。在此区域内靠近 n 区侧带正电荷,靠近 p 区侧带负电荷,因而存在着一个自 n 区侧指向 p 区侧的电场。由于这个电场是载流子扩散运动的结果,并不是外加的,所以称其为空间电荷区自建电场。在空间电荷区以外的 p 型区与 n 型区,仍然保持着电中性,不存在电场。

由 n 区侧指向 p 区侧的空间电荷区自建电场将使空穴流向 p 区而电子流向 n 区,即引起由 n 向 p 区的漂移电流,这与由于浓度梯度的作用所形成的由 p 向 n 的扩散电流方向相反。

空间电荷区自建电场的大小及其对载流子漂移作用的强弱与其中所包含的正、负电荷量的多少有关。如果载流子的浓度远远小于杂质电离所形成的空间电荷浓度,则可以仅仅考

考虑电离杂质空间电荷的作用。

随着载流子扩散运动的继续,空间电荷的数目也会越来越大,所建立起来的不断增强的自建电场对载流子的漂移作用也在逐渐增大。当漂移作用和扩散作用相当的时候,载流子的运动达到了动态平衡。此后空间电荷区内空间电荷的数目不再变化,自建电场也不会再继续增大,空间电荷区的宽度 x_m 也不再变化。这时的 p-n 结称为平衡 p-n 结。

应当指出,上述 p-n 结空间电荷区的形成过程是与向晶体中掺入受主杂质或施主杂质同时进行的。

经扩散进入 n 区的空穴与该区的电子相复合,而扩散进入 p 区的电子与该区的空穴相复合。在交界面两侧总长度为 x_m 的区域内,由于两种因素——一是多数载流子离开交界面附近的区域向对方内部扩散,二是它们与另一种极性载流子复合——的作用,使该区域中多数载流子浓度大大下降。根据 $n \cdot p = n_i^2$ 关系可知,当多子浓度下降时少子浓度就要上升,故在交界面附近 x_m 区域内 p 区侧电子浓度逐渐上升而 n 区侧空穴浓度逐渐下降。图 1-4(a) (b) 分别给出了 p-n 结中电荷及载流子的分布示意图。

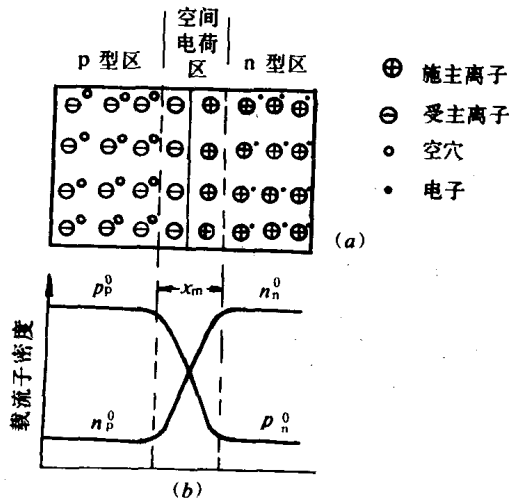


图 1-4 p-n 结的电荷及载流子分布

由上述可见,当平衡 p-n 结中载流子的扩散运动与漂移运动达到动态平衡时,通过 p-n 结的净电流为零。以空穴电流为例,此时应满足:

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} + q\mu_p p E(x) = 0 \quad (1-1)$$

式中,第一项为扩散电流密度分量,第二项为漂移电流密度分量。由式(1-1)可得平衡 p-n 结空间电荷区自建电场强度为:

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (1-2)$$

式中利用了爱因斯坦关系式 $D = \mu \cdot \frac{kT}{q}$ 。式(1-2)也可以写为:

$$E(x) = -\frac{d\psi}{dx} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (1-3)$$