



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



微电子与集成电路设计系列规划教材

微电子器件

(第4版)

© 陈星弼 陈勇 刘继芝 任敏 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
微电子与集成电路设计系列规划教材

微电子器件

(第4版)

陈星弼 陈 勇 刘继芝 任 敏 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”、“十二五”国家级规划教材。

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 / 陈星弼等编著. — 4 版. — 北京:电子工业出版社,2018.7

ISBN 978-7-121-34267-7

I. ①微… II. ①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(2018)第 109349 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:邹凤麒 王 博 段丹辉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:21.75 字数:696 千字

版 次:2006 年 2 月第 2 版

2018 年 7 月第 4 版

印 次:2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价:59.90 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)88254888,88258888。

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

服务热线:(010)88254525, hantp@phei.com.cn。

前 言

本书为普通高等教育“十一五”、“十二五”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。

本教材第3版于2011年出版,具有起点高、立意新、强调基本概念、突出物理图像等鲜明特点,同时又保持了其科学性和严谨性的精髓,因此深受学生的欢迎,已被国内多所院校选做基本教材或主要参考教材,教学效果良好。

本教材集中讨论了三类微电子器件,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,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。

本教材第3版出版已有7年,尽管在基本概念和基本工作原理的论述上很经典,但未能完全反映微电子技术的飞速发展。在第4版编写过程中,编著者参阅了大量文献,并在总结多年教学实践的基础上进一步调整、充实了内容,以反映微电子器件领域当前的新成果和发展趋势。第4版除了补充深亚微米MOS器件的多晶硅耗尽、应变硅MOSFET、高K栅介质MOSFET等现代体硅器件的内容,还增加了对几类重要器件的分析论述,包括功率垂直型双扩散场效应晶体管、SOI MOSFET、多栅MOSFET与FINFET、无结MOS晶体管等。这些内容是当前微电子器件研究的前沿热点。

鉴于微电子器件的噪声特性内容陈旧、应用面窄,第4版教材删除了第3版中的相关章节。此外,第3版中第1章关于半导体基本方程的介绍理论较深,起点较高,前后衔接不够紧密,显得较为突兀。在第4版中简明地增加了部分半导体物理的基础内容,使得知识连贯性更好,更容易被学生所接受。

本教材第4版与国内外同类教材相比,具有两个重要特点。一是针对超大规模集成电路的基础器件MOSFET飞速发展,增加了SOI MOSFET、FINFET及无结晶体管等前沿热点内容,这些知识一方面可以作为选讲内容,更重要的是可以激发学生的兴趣,以便深入自主学习;二是结合本教材主编陈星弼院士的科研成果,简明地介绍了功率垂直型双扩散场效应晶体管,这些内容不一定要在课堂上讲授,而是为了使学生在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章的第1,2,4~7节;第3章的第1~5,8~10节和第4章的第1~8,10~12节。这些内容的参考学时数为60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。

本书由陈星弼等编著,第4版由陈勇、刘继芝、任敏修编,黄海猛、吕信江参与了部分内容的编写工作。修编本书希望能够覆盖微电子器件的基础知识并跟踪新技术的发展。但由于作者水平有限,书中难免有缺点和错误,欢迎广大读者批评指正(yongchen@uestc.edu.cn)。

编著者
于电子科技大学



主要符号表

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

| | | | |
|-----------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| L | 沟道长度 | R_T | 热阻 |
| L_E | 发射极总周长 | R_{\square} | 方块电阻 |
| L_e | 发射极串联电感 | r_e | 发射结增量电阻 |
| $L_n(L_p)$ | 电子(空穴)扩散长度 | r'_{bb} | 基极电阻 |
| l_0 | 平均自由程 | r_{cs} | 集电极串联电阻 |
| l_M | 金属电极条的长度 | S | 饱和深度、反馈因子、熵、亚阈区栅源电压摆幅 |
| M | 雪崩倍增因子、高频优值 | s | 表面复合速度 |
| N | 杂质浓度 | s_b | 基极条宽 |
| $N_{A(ND)}$ | 受主(施主)杂质浓度 | s_e | 发射极条宽 |
| $N_B(N_C, N_E)$ | 基区(集电区、发射区)杂质浓度 | T | 温度 |
| N_F | 用 dB 表示的噪声系数 | T_a | 环境温度 |
| N_t | 复合中心浓度 | T_j | 结温 |
| n | 电子浓度 | T_{OX} | 氧化层厚度 |
| n_i | 本征载流子浓度 | t_d | 延迟时间 |
| n_{n0} | N 型半导体中的平衡电子浓度 | t_r | 上升时间、反向恢复时间 |
| n_{p0} | P 型半导体中的平衡电子浓度 | t_s | 储存时间 |
| P | 功率 | t_f | 下降时间 |
| P_C | 集电结耗散功率 | t_{on} | 开启时间 |
| P_{CM} | 集电极最大耗散功率 | t_{off} | 关断时间 |
| P_N | 噪声功率 | V | 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)直流电压 |
| P_{Td} | 稳态散出功率 | $V_e(V_b, V_c)$ | 发射极(基极、集电极)交流小信号电压的幅值或瞬时值 |
| p | 空穴浓度 | V_A | 厄尔利电压 |
| p_{n0} | N 型半导体中的平衡空穴浓度 | V_{bi} | 内建电势 |
| p_{p0} | P 型半导体中的平衡空穴浓度 | V_{BES} | 发射极正向压降 |
| Q | 单位面积电荷 | V_{CES} | 饱和压降 |
| Q_B | 基区少子电荷 | V_F | 正向直流电压(正向导通电压) |
| Q_{B0} | 基区平衡少子电荷 | V_{FB} | 平带电压 |
| Q_{BB} | 基区多子电荷 | V_D | 漏极电压 |
| Q_{BB0} | 基区平衡多子电荷 | V_G | 栅极电压 |
| Q_E | 发射区少子电荷 | V_S | 源极电压 |
| $Q_b'(Q_c')$ | 基区(集电区)超量储存电荷 | V_{GS} | 栅源电压 |
| Q_M | 栅极上单位面积电荷 | V_{DS} | 漏源电压 |
| Q_n | 反型层中单位面积电子电荷 | V_{Dsat} | 由于沟道夹断导致 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'_{Dsat} | 由于速度饱和导致 I_D 饱和的漏极饱和电压 |
| $Q_A(Q_D)$ | 电离受主(施主)电荷面密度 | V_{pt} | 穿通电压 |
| Q_{ch} | 沟道电荷面密度 | V_{SB} | 二次击穿临界电压 |
| Q_{OX} | 栅氧化层内有效正电荷面密度 | V_{sus} | 维持电压 |
| q | 电子电荷 | V_T | 阈电压 |
| R | 电阻 | v | 小信号交流电压、载流子速度 |
| R_D | 漏极电阻 | | |
| R_E | 发射极镇流电阻 | | |
| R_g | 噪声信号源内阻 | | |
| R_L | 负载电阻 | | |

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

目 录

| | |
|-----------------------------|------|
| 第 1 章 半导体物理基础及基本方程 | (1) |
| 1.1 半导体晶格 | (1) |
| 1.1.1 基本的晶体结构 | (1) |
| 1.1.2 晶向和晶面 | (3) |
| 1.1.3 原子价键 | (3) |
| 1.2 半导体中的电子状态 | (3) |
| 1.2.1 原子的能级和晶体的能带 | (3) |
| 1.2.2 半导体中电子的状态和能带 | (4) |
| 1.2.3 半导体中电子的运动和有效质量 | (6) |
| 1.2.4 导体、半导体和绝缘体 | (8) |
| 1.3 平衡状态下载流子浓度 | (8) |
| 1.3.1 费米能级和载流子的统计分布 | (9) |
| 1.3.2 本征载流子浓度 | (11) |
| 1.3.3 杂质半导体的载流子浓度 | (11) |
| 1.3.4 简并半导体的载流子浓度 | (13) |
| 1.4 非平衡载流子 | (13) |
| 1.4.1 非平衡载流子的注入与复合过程 | (13) |
| 1.4.2 非平衡载流子的寿命 | (14) |
| 1.4.3 复合理论 | (14) |
| 1.5 载流子的输运现象 | (16) |
| 1.5.1 载流子的漂移运动及迁移率 | (16) |
| 1.5.2 载流子的扩散运动 | (18) |
| 1.5.3 爱因斯坦关系 | (18) |
| 1.6 半导体器件基本方程 | (19) |
| 1.6.1 泊松方程 | (19) |
| 1.6.2 输运方程 | (19) |
| 1.6.3 连续性方程 | (20) |
| 1.6.4 方程的积分形式 | (20) |
| 1.6.5 基本方程的简化与应用举例 | (21) |
| 本章参考文献 | (23) |
| 第 2 章 PN 结 | (24) |
| 2.1 PN 结的平衡状态 | (24) |
| 2.1.1 空间电荷区的形成 | (24) |
| 2.1.2 内建电场、内建电势与耗尽区宽度 | (25) |
| 2.1.3 能带图 | (28) |

| | | |
|--------------|-------------------------|-------------|
| 2.1.4 | 线性缓变结 | (29) |
| 2.1.5 | 耗尽近似和中性近似的适用性 | (30) |
| 2.2 | PN 结的直流电流电压方程 | (33) |
| 2.2.1 | 外加电压时载流子的运动情况 | (33) |
| 2.2.2 | 势垒区两旁载流子浓度的玻耳兹曼分布 | (35) |
| 2.2.3 | 扩散电流 | (36) |
| 2.2.4 | 势垒区产生复合电流 | (39) |
| 2.2.5 | 正向导通电压 | (41) |
| 2.2.6 | 薄基区二极管 | (42) |
| 2.3 | 准费米能级与大注入效应 | (43) |
| 2.3.1 | 自由能与费米能级 | (43) |
| 2.3.2 | 准费米能级 | (45) |
| 2.3.3 | 大注入效应 | (46) |
| 2.4 | PN 结的击穿 | (50) |
| 2.4.1 | 碰撞电离率和雪崩倍增因子 | (50) |
| 2.4.2 | 雪崩击穿 | (53) |
| 2.4.3 | 齐纳击穿 | (58) |
| 2.4.4 | 热击穿 | (60) |
| 2.5 | PN 结的势垒电容 | (62) |
| 2.5.1 | 势垒电容的定义 | (62) |
| 2.5.2 | 突变结的势垒电容 | (63) |
| 2.5.3 | 线性缓变结的势垒电容 | (64) |
| 2.5.4 | 实际扩散结的势垒电容 | (64) |
| 2.6 | PN 结的交流小信号特性与扩散电容 | (66) |
| 2.6.1 | 交流小信号下的扩散电流 | (67) |
| 2.6.2 | 交流导纳与扩散电容 | (68) |
| 2.6.3 | 二极管的交流小信号等效电路 | (69) |
| 2.7 | PN 结的开关特性 | (69) |
| 2.7.1 | PN 结的直流开关特性 | (69) |
| 2.7.2 | PN 结的瞬态开关特性 | (70) |
| 2.7.3 | 反向恢复过程 | (71) |
| 2.7.4 | 存储时间与下降时间 | (72) |
| 2.8 | SPICE 中的二极管模型 | (74) |
| | 习题二 | (76) |
| | 本章参考文献 | (79) |
| 第 3 章 | 双极结型晶体管 | (80) |
| 3.1 | 双极结型晶体管基础 | (80) |
| 3.1.1 | 双极结型晶体管的结构 | (80) |
| 3.1.2 | 偏压与工作状态 | (81) |
| 3.1.3 | 少数浓度分布与能带图 | (81) |

| | | |
|-------|-------------------------|-------|
| 3.1.4 | 晶体管的放大作用 | (83) |
| 3.2 | 均匀基区晶体管的电流放大系数 | (85) |
| 3.2.1 | 基区输运系数 | (85) |
| 3.2.2 | 基区渡越时间 | (87) |
| 3.2.3 | 发射结注入效率 | (87) |
| 3.2.4 | 电流放大系数 | (88) |
| 3.3 | 缓变基区晶体管的电流放大系数 | (89) |
| 3.3.1 | 基区内建电场的形成 | (89) |
| 3.3.2 | 基区少子电流密度与基区少子浓度分布 | (90) |
| 3.3.3 | 基区渡越时间与输运系数 | (91) |
| 3.3.4 | 注入效率与电流放大系数 | (92) |
| 3.3.5 | 小电流时放大系数的下降 | (93) |
| 3.3.6 | 发射区重掺杂的影响 | (94) |
| 3.3.7 | 异质结双极型晶体管 | (97) |
| 3.4 | 双极结型晶体管的直流电流电压方程 | (97) |
| 3.4.1 | 集电结短路时的电流 | (97) |
| 3.4.2 | 发射结短路时的电流 | (98) |
| 3.4.3 | 晶体管的直流电流电压方程 | (98) |
| 3.4.4 | 晶体管的输出特性 | (99) |
| 3.4.5 | 基区宽度调变效应 | (101) |
| 3.5 | 双极结型晶体管的反向特性 | (103) |
| 3.5.1 | 反向截止电流 | (103) |
| 3.5.2 | 共基极接法中的雪崩击穿电压 | (105) |
| 3.5.3 | 共发射极接法中的雪崩击穿电压 | (106) |
| 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 | (107) |
| 3.5.5 | 发射结击穿电压 | (108) |
| 3.5.6 | 基区穿通效应 | (108) |
| 3.6 | 基极电阻 | (110) |
| 3.6.1 | 方块电阻 | (110) |
| 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 | (112) |
| 3.6.3 | 工作基区的电阻和基极接触区下的电阻 | (114) |
| 3.7 | 双极结型晶体管的功率特性 | (116) |
| 3.7.1 | 大注入效应 | (116) |
| 3.7.2 | 基区扩展效应 | (121) |
| 3.7.3 | 发射结电流集边效应 | (125) |
| 3.7.4 | 晶体管的热学性质 | (129) |
| 3.7.5 | 二次击穿和安全工作区 | (134) |
| 3.8 | 电流放大系数与频率的关系 | (139) |
| 3.8.1 | 高频小信号电流在晶体管中的变化 | (140) |
| 3.8.2 | 基区输运系数与频率的关系 | (141) |

| | | |
|------------|---------------------------|--------------|
| 3.8.3 | 高频小信号电流放大系数 | (146) |
| 3.8.4 | 晶体管的特征频率 | (154) |
| 3.8.5 | 影响高频电流放大系数与特征频率的其他因素 | (156) |
| 3.9 | 高频小信号电流电压方程与等效电路 | (159) |
| 3.9.1 | 小信号的电荷控制模型 | (160) |
| 3.9.2 | 小信号的电荷电压关系 | (161) |
| 3.9.3 | 高频小信号电流电压方程 | (163) |
| 3.9.4 | 小信号等效电路 | (165) |
| 3.10 | 功率增益和最高振荡频率 | (168) |
| 3.10.1 | 高频功率增益与高频优值 | (169) |
| 3.10.2 | 最高振荡频率 | (170) |
| 3.10.3 | 高频晶体管的结构 | (171) |
| 3.11 | 双极结型晶体管的开关特性 | (172) |
| 3.11.1 | 晶体管的静态大信号特性 | (172) |
| 3.11.2 | 晶体管的直流开关特性 | (177) |
| 3.11.3 | 晶体管的瞬态开关特性 | (179) |
| 3.12 | SPICE 中的双极晶体管模型 | (185) |
| 3.12.1 | 埃伯斯-莫尔(EM)模型 | (185) |
| 3.12.2 | 葛谋-潘(GP)模型 | (190) |
| | 习题三 | (195) |
| | 本章参考文献 | (200) |
| 第4章 | 绝缘栅型场效应晶体管 | (202) |
| 4.1 | MOSFET 基础 | (202) |
| 4.2 | MOSFET 的阈电压 | (206) |
| 4.2.1 | MOS 结构的阈电压 | (206) |
| 4.2.2 | MOSFET 的阈电压 | (208) |
| 4.3 | MOSFET 的直流电流电压方程 | (213) |
| 4.3.1 | 非饱和区直流电流电压方程 | (213) |
| 4.3.2 | 饱和区的特性 | (217) |
| 4.4 | MOSFET 的亚阈区导电 | (219) |
| 4.5 | MOSFET 的直流参数与温度特性 | (222) |
| 4.5.1 | MOSFET 的直流参数 | (222) |
| 4.5.2 | MOSFET 的温度特性 | (223) |
| 4.5.3 | MOSFET 的击穿电压 | (224) |
| 4.6 | MOSFET 的小信号参数、高频等效电路及频率特性 | (226) |
| 4.6.1 | MOSFET 的小信号交流参数 | (226) |
| 4.6.2 | MOSFET 的小信号高频等效电路 | (228) |
| 4.6.3 | 最高工作频率和最高振荡频率 | (234) |
| 4.6.4 | 沟道渡越时间 | (235) |
| 4.7 | 短沟道效应 | (235) |

| | | |
|--------|---------------------------------|-------|
| 4.7.1 | 小尺寸效应 | (236) |
| 4.7.2 | 迁移率调制效应 | (238) |
| 4.7.3 | 漏诱生势垒降低效应 | (242) |
| 4.7.4 | 强电场效应 | (243) |
| 4.7.5 | 表面势和阈值电压准二维分析 | (247) |
| 4.8 | 体硅 MOSFET 的发展方向 | (249) |
| 4.8.1 | 按比例缩小的 MOSFET | (249) |
| 4.8.2 | 双扩散 MOSFET | (252) |
| 4.8.3 | 深亚微米 MOSFET | (252) |
| 4.8.4 | 应变硅 MOSFET | (256) |
| 4.8.5 | 高 K 栅介质及金属栅电极 MOSFET | (258) |
| 4.9 | 功率垂直型双扩散场效应晶体管 | (260) |
| 4.9.1 | VDMOS 器件 | (260) |
| 4.9.2 | 超结 VDMOS 器件 | (261) |
| 4.9.3 | 常规 VDMOS 与超结 VDMOS 器件的电流电压关系的比较 | (262) |
| 4.10 | SOI MOSFET | (263) |
| 4.10.1 | SOI MOSFET 结构特点 | (263) |
| 4.10.2 | SOI MOSFET 一维阈值电压模型 | (264) |
| 4.10.3 | SOI MOSFET 的电流特性 | (266) |
| 4.10.4 | SOI MOSFET 的亚阈值斜率 | (268) |
| 4.10.5 | 短沟道 SOI MOSFET 的准二维分析 | (269) |
| 4.11 | 多栅结构 MOSFET 与 FINFET | (270) |
| 4.11.1 | 多栅 MOSFET 结构 | (271) |
| 4.11.2 | 多栅结构 MOSFET 的特征长度 | (272) |
| 4.11.3 | 双栅 FINFET 的亚阈值斜率 | (274) |
| 4.11.4 | 双栅 FINFET 的按比例缩小 | (275) |
| 4.11.5 | 多栅 FINFET 的结构设计 | (275) |
| 4.12 | 无结晶体管 | (278) |
| 4.12.1 | 无结晶体管的工作原理 | (278) |
| 4.12.2 | 无结晶体管的阈值电压 | (279) |
| 4.12.3 | 无结晶体管的直流电流电压关系 | (280) |
| 4.12.4 | 无结晶体管的温度特性 | (281) |
| 4.13 | SPICE 中的 MOSFET 模型 | (283) |
| 4.13.1 | MOS1 模型 | (283) |
| 4.13.2 | MOS2 模型 | (284) |
| 4.13.3 | MOS3 模型 | (287) |
| 4.13.4 | 电容模型 | (288) |
| 4.13.5 | 小信号模型 | (290) |
| 4.13.6 | 串联电阻的影响 | (290) |
| | 习题四 | (290) |

| | |
|--|-------|
| 本章参考文献 | (292) |
| 第5章 半导体异质结器件 | (294) |
| 5.1 半导体异质结 | (294) |
| 5.1.1 半导体异质结的能带突变 | (295) |
| 5.1.2 半导体异质结伏安特性 | (297) |
| 5.2 高电子迁移率晶体管(HEMT) | (299) |
| 5.2.1 高电子迁移率晶体管的基本结构 | (300) |
| 5.2.2 HEMT的工作原理 | (300) |
| 5.2.3 异质界面的二维电子气 | (302) |
| 5.2.4 高电子迁移率晶体管(HEMT)的直流特性 | (303) |
| 5.2.5 HEMT的高频模型 | (307) |
| 5.2.6 HEMT的高频小信号等效电路 | (308) |
| 5.2.7 高电子迁移率晶体管(HEMT)的频率特性 | (309) |
| 5.3 异质结双极晶体管(HBT) | (311) |
| 5.3.1 HBT的基础理论 | (311) |
| 5.3.2 能带结构与HBT性能的关系 | (315) |
| 5.3.3 异质结双极晶体管的特性 | (318) |
| 5.3.4 Si/Si _{1-x} Ge _x 异质结双极晶体管 | (321) |
| 习题五 | (325) |
| 本章参考文献 | (326) |
| 附录A 晶体管设计中的一些常用图 | (328) |
| 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 | (328) |
| A.2 室温下硅电阻率随施主或受主浓度的变化 | (330) |
| 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 | (330) |
| A.4 硅中扩散层的电导率曲线 | (331) |
| A.5 硅中载流子的迁移率与扩散系数曲线 | (333) |

第 1 章 半导体物理基础及基本方程

自从肖克莱等人发明的晶体管获得诺贝尔物理学奖以来,半个多世纪已经过去。在这几十年间,微电子技术飞速发展。一方面,功能强大的微电子器件不断涌现;另一方面,将各种元器件制作在半导体衬底上的集成电路成为了社会信息化的基础。

微电子器件及集成电路都是利用半导体中的各种物理机理来工作的,这些物理机理又是由半导体内部的电子运动产生的。因此要学习微电子器件的工作原理,就必须掌握构成微电子器件的半导体中载流子的运动规律。为此,本章以固体物理为基础简明地介绍了半导体中的电子状态、载流子的分布及输运等内容,并给出了分析半导体器件工作机理和特性的基本方程及应用示例。

1.1 半导体晶格

固体具有无定型、多晶和单晶三种基本类型。图 1-1 是无定型、多晶和单晶材料的二维示意图。从图中可以看,每种类型的晶体的特征与材料中原子或者分子有规则或周期性几何排列的空间大小有关。无定型材料只在几个原子或分子的尺度内有序。多晶材料则在许多个原子或者分子的尺度上有序,这些有序化区域称为单晶区域,彼此有不同的大小和方向。单晶区域称为晶粒,它们由晶界将彼此分离。单晶材料则在整体范围内都有很高的几何周期性。单晶材料的优点在于其电学特性通常比非单晶材料好,这是因为晶界会导致电学特性的衰退。

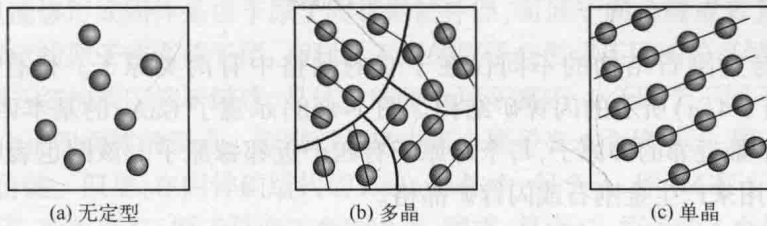


图 1-1 三种类型的晶体的二维示意图

目前,广泛使用的半导体材料主要是单晶材料。常用的半导体材料锗、硅、砷化镓等都是单晶材料。硅和锗称为元素半导体,砷化镓称为化合物半导体。非晶和多晶材料在半导体领域中也有一定的应用。例如,非晶硅薄膜晶体管被用来制造驱动大面积液晶显示的电路,多晶硅被用来制作绝缘栅型场效应晶体管的栅电极。

1.1.1 基本的晶体结构

由于半导体器件大部分都是采用半导体单晶材料,因此,首先介绍一下基本的晶体结构。

一个典型单元或原子团在三维的每一个方向上按某种间隔规则重复排列就形成了单晶。晶体中这种原子的周期性排列称为晶格。图 1-2 给出了三种基本的三维晶体结构,即简立方、体心立方和面心立方结构。简立方结构的每个顶角有一个原子;体心立方结构除顶角外在立方体中心还有一个原子;面心立方结构在每个面都有一个额外的原子。

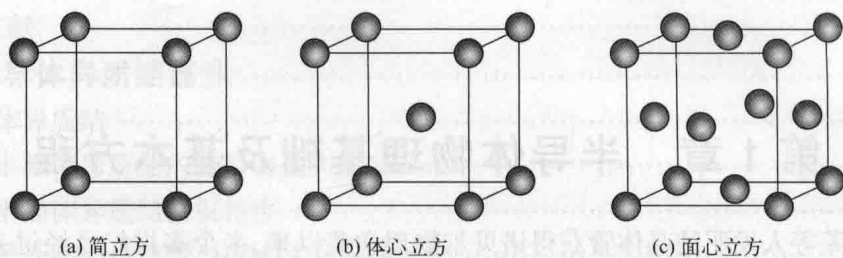


图 1-2 三种基本的三维晶体结构

元素半导体硅和锗具有金刚石晶体结构,如图 1-3(a)所示。其中,参数 a 代表的是晶格常数。金刚石晶体结构是由缺了四个顶角原子的体心立方结构作为最基本的结构单元所构成的,其最基本的结构单元如图 1-3(b)所示,该四面体中的每个原子都有四个与它最近邻的原子。在金刚石单晶中,原子在晶胞中排列的情况是,有八个原子位于立方体的八个角顶上,有六个原子位于六个面中心上,晶胞内部有四个原子。

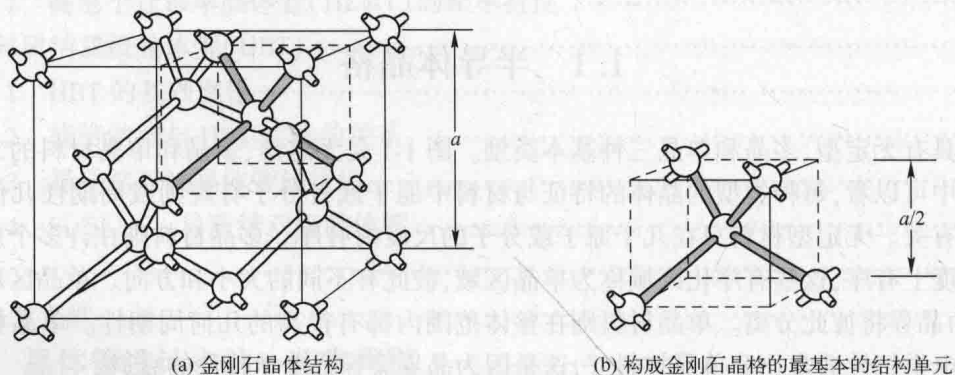


图 1-3 金刚石晶体

闪锌矿结构与金刚石结构的不同仅在于它的晶格中有两类原子。化合物半导体,比如 GaAs,就具有如图 1-4(a)所示的闪锌矿结构。图 1-4(b)示意了 GaAs 的基本四面体结构,其中每个镓原子有四个最近邻的砷原子,每个砷原子有四个近邻镓原子。该图也表明了两种子晶格的相互交织,它们用来产生金刚石或闪锌矿晶格。

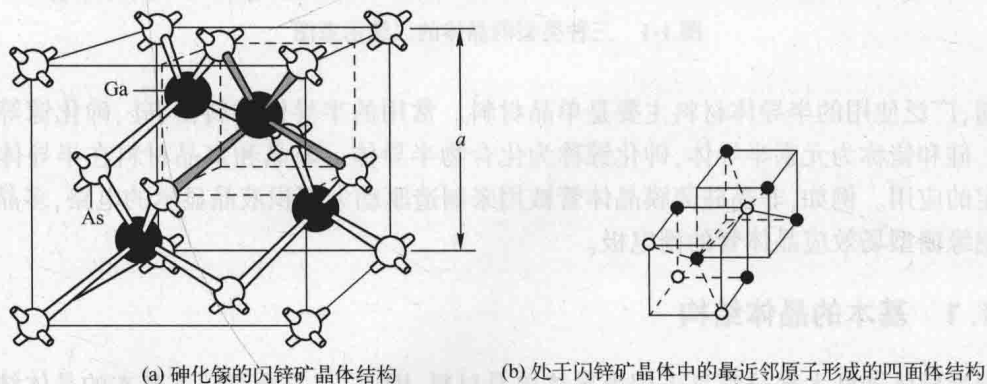


图 1-4 闪锌矿晶体结构

实验测得硅和锗的晶格常数 a 分别为 0.357 nm 和 0.357 nm ,从而求得硅原子和锗原子的密度分别为 $5.00 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 和 $4.42 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$,两原子间最短距离分别为 0.235 nm 和 0.245 nm 。

1.1.2 晶向和晶面

半导体器件一般制作在半导体表面或近表面处。因此,半导体表面的晶面指向和特征就非常重要。晶体中通常采用密勒指数来确定不同的晶面。密勒指数的确定方法如下:首先求出该晶面在三个主轴上的截距,并以晶格常数(或原胞)的倍数表示截距值,然后对这三个数值各取倒数,乘以它们的最小公分母,简化为三个最小整数,把结果括在圆括弧内就得到了密勒指数(hkl),用它来表示一个晶面。

除了描述晶格平面之外,还需要描述特定的晶向。晶向可以用三个整数表示,它们是该方向某个矢量的分量。例如,简立方晶格的对角线的矢量分量为 $1,1,1$ 。体对角线描述为 $[111]$ 方向。方括号用来描述方向,以便与描述晶面的圆括号相区别。简立方的三个基本方向和相关晶面如图 1-5 所示。由图中可见, $[hkl]$ 晶向和 (hkl) 晶面垂直。

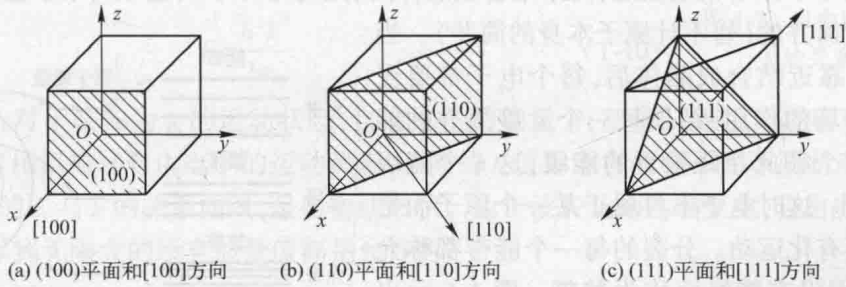


图 1-5 三种晶向和晶面

1.1.3 原子价键

原子之所以能够形成固体是由于原子间有强键存在,而原子间价键或者其他作用力的类型取决于晶体中特定的原子或者原子团。因此,不同的原子会形成不同的单晶结构。

无论是金刚石结构或闪锌矿结构,晶体中的每个原子都有 4 个属于不同子晶格的最近邻原子,它们位于一个正四面体的顶点。金刚石晶格中每个原子有 4 个价电子,同 4 个最近邻原子共有,形成 4 个共价键。但是,在闪锌矿结构的 GaAs 晶体中,每个 As 原子(有 5 个价电子)的最近邻是 4 个 Ga 原子,而每个 Ga 原子只有 3 个价电子;同样,每个 Ga 原子的 4 个最近邻是 As 原子。这些 Ga-As 原子对互相结合成键,本质上主要是共价性的,但也有部分是离子性的(Ga⁻离子和 As⁺离子之间的静电吸引)。

1.2 半导体中的电子状态

制造半导体器件所用的材料大多是单晶体。单晶体是由靠得很紧密的原子周期性重复排列而成的,相邻原子间距只有零点几纳米的数量级。因此,半导体中的电子状态和原子中的不同,特别是外层电子会有显著的变化。但是,晶体由分立的原子凝聚而成,两者的电子状态又必定存在着某种联系。

1.2.1 原子的能级和晶体的能带

原子中的电子在原子核的势场和其他电子的作用下,它们分别列在不同的能级上,形成电子壳层。每一支壳层对应于确定的能量。当原子相互接近形成晶体时,不同原子的内外各电子壳

层之间就有了一定程度的交叠,相邻原子最外壳层交叠很多,内壳层交叠较少。原子组成晶体后,由于电子壳层的交叠,电子不再完全局限在某一个原子上,可以由一个原子转移到相邻的原子上去。因此,电子将可以在整个晶体中运动。这种运动称为电子的共有化运动。但是,因为各原子中相似壳层上的电子才有相同的能量,电子只能在相似壳层间转移。因此,共有化运动的产生是由于不同原子的相似壳层间的交叠。

当两个原子相距很远时,如同两个孤立的原子,每个能级都有两个态与之相应,是二度简并的(暂不计原子本身的简并)。当两个原子互相靠近时,每个原子中的电子除受到本身原子的势场作用之外,还要受到另一个原子的势场作用,其结果是每一个二度简并的能级都分裂为两个彼此相距很近的能级;两个原子靠得越近,分裂得越厉害。两个原子互相靠近时,原来在某一能级上的电子就分别处在分裂的两个能级上,这时电子不再属于某一个原子,而为两个原子所共有。

对于由 n 个原子组成的晶体,晶体每立方厘米体积内约有 $10^{22} \sim 10^{23}$ 个原子,所以 n 是个很大的数值。当 n 个原子相距很远,尚未结合成晶体时,则每个原子的能级都和孤立原子的一样,它们都是 n 度简并的(暂不计原子本身的简并)。当 n 个原子互相靠近结合成晶体后,每个电子都要受到周围原子势场的作用,结果每一个 n 度简并的能级都分裂成 n 个彼此相距很近的能级,这 n 个能级组成一个能带。这时电子不再属于某一个原子而是在晶体中做共有化运动。分裂的每一个能带都称允带,允带之间因没有能级而称为禁带。图 1-6 示出了原子能级分裂为能带的情况。

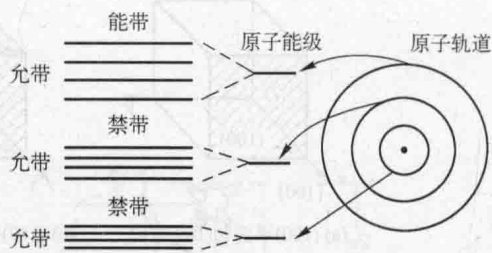


图 1-6 原子能级分裂为能带示意图

1.2.2 半导体中电子的状态和能带

晶体中的电子与孤立原子中的电子不同,也和自由运动的电子不同。孤立原子中的电子是在该原子的核和其他电子的势场中运动的,自由电子是在一恒定为零的势场中运动的,而晶体中的电子是在严格周期性重复排列的原子间运动的。单电子近似认为,晶体中的某一个电子是在周期性排列且固定不动的原子核的势场以及其他大量电子的平均势场中运动的。这个势场也是周期性变化的,而且它的周期与晶格周期相同。研究发现,电子在周期性势场中运动的基本特点和自由电子的运动十分相似。下面先简单介绍一个自由电子的运动。

1. 自由电子的 $E(k) - k$

微观粒子具有波粒二象性,表征波动性的量与表征粒子性的量之间有一定的联系。一个质量为 m_0 ,以速度 v 自由运动的电子,其动量 p 与能量 E 分别为

$$p = m_0 v \quad (1-1)$$

$$E = \frac{1}{2} \frac{|p|^2}{m_0} \quad (1-2)$$

德布罗意指出,自由粒子可以用频率为 ν 、波长为 λ 的平面波表示

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = A e^{i2\pi(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \nu t)} \quad (1-3)$$

式中, A 为一常数, \mathbf{r} 为空间某点的矢径, k 为平面波的波数,等于波长 λ 的倒数。为能同时描写平面波的传播方向,通常规定 \mathbf{k} 为矢量,称为波数矢量,简称波矢,记为 \mathbf{k} ,其大小为

$$|\mathbf{k}| = 1/\lambda \quad (1-4)$$

其方向与波面法线平行,为波的传播方向。

自由电子能量和动量与平面波频率和波矢之间的关系分别为

