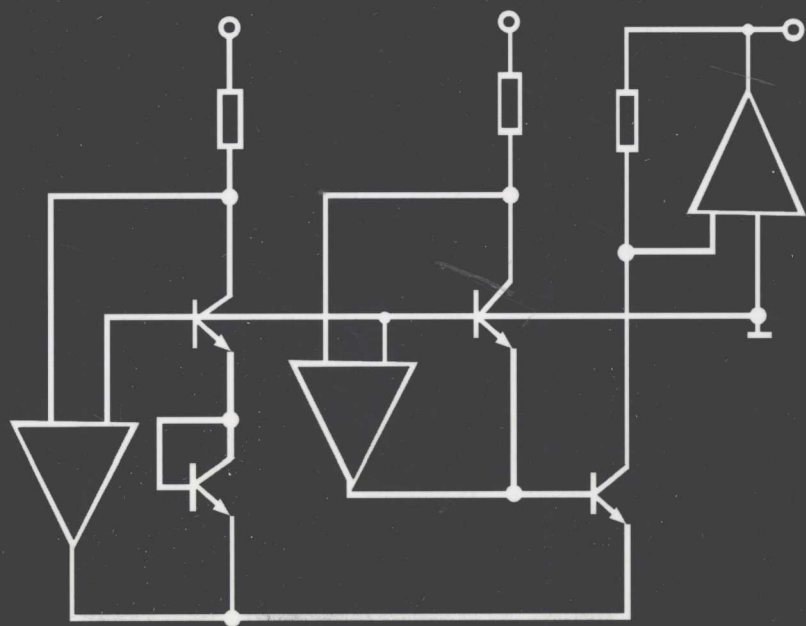


线性电子线路

杜怀昌 黄玲玲 贺 涛
编 著

X I A N X I N G D I A N Z I X I A N L U



兰州大学出版社

附录(III) 目录页码对照

学大限兰：限兰一 著王新贾，李学黄，吕科林，胡晓平，由彭英

线性电子线路

杜怀昌 黄玲玲 贺涛 编著

(7) 董诗白主编《模拟电子技术基础》第二版，高等教育出版社，1994年。

(8) 谢沅清编著《模拟集成电路应用》，人民邮电出版社，1984年。

(9) [日] 御子柴宜夫等编《常用电子材料》，电子工业出版社，1994年。

(10) 任以文、黄玲玲编《线性电子线路》，北京广播学院出版社，1983年。

(11) 高文娟、汪基编著《模拟电路的计算机分析与设计——PSPICE程序应用》，出版社，1999年。

(12) 贾济章、郝跃、武岳山编著《电子线路CAD技术》，西安电子科技大学出版社，1994年。

(13) 赵海兴主编《电子线路PSpice分析》，天津大学出版社，1995年。

兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

线性电子线路/杜怀昌,黄玲玲,贺涛编著. —兰州:兰州大学出版社,2003

ISBN 7-311-02129-4

I. 线… II. ①杜…②黄…③贺… III. 线性电路
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 011271 号

线性电子线路

杜怀昌 黄玲玲 贺涛 编著

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水南路 222 号 电话:8617156 邮编:730000

E-mail:press@onbook.com.cn

http://www.onbook.com.cn

兰州大学出版社激光照排中心照排

兰州德辉印刷有限责任公司印刷

开本:787×1092 1/16

印张:20.75

2003 年 2 月第 1 版

2006 年 7 月第 2 次印刷

字数:507 千字

印数:2001~3000 册

ISBN7-311-02129-4/T.99

定价:32.00 元

内容简介

本教材是根据目前电子电路技术的发展和教学的需要而编写的。

本书主要包括:半导体元器件、放大器基础、放大器的反馈和频率特性、场效应管及其放大电路、集成运算放大器及其应用、小信号谐振放大器等内容。各章后有习题及计算机辅助设计软件 PSpice 应用说明,书后附有软件 PSpice 简明手册及习题参考答案。

本书可作为高等学校电子类、通讯类和自动化类专业技术基础教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

前 言

本教材是北京广播学院出版社 1999 年 1 月出版的《线性电子线路》教材的修订本。原书经多年教学使用,效果良好。但随着当今电子技术的不断发展,有必要对原书进行修订。原书第一、三章由贺涛编写,第二、四、五章由杜怀昌编写,第六、七、八章由黄玲玲编写。此次修订由杜怀昌、黄玲玲完成,其中全书新增加了计算机辅助软件 PSpice 应用的相关内容,该部分由黄玲玲编写,杜怀昌负责全书的定稿。

科学技术的日新月异,使得电子电路的内容也在不断增加,但在有限的时间内如何使学生掌握该门课程的基础,编者作了广泛的调查研究,修订中保留了原教材中的基本内容,增加了部分新知识。同时为便于自学,书后增加了大量习题并附上了习题参考答案。该书提供的程序都是由黄玲玲老师运行通过的。

修改后,本书具备了如下特点:

(1)内容的编排由浅入深、循序渐进,符合学生的认知规律,有利于掌握该门课程的知识点及内在联系。

(2)论述概念明确、重点突出、层次分明。并通过典型例题阐明基本分析计算方法。

(3)增加了计算机技术在该门课程中的应用,每章后都有使用计算机进行辅助分析的例题及习题,使学生可以尽快地把计算机应用到实践中。

(4)对场效应管电路的分析方法、负反馈电路的分析计算方法等方面作了更多的补充,使本书的知识结构更加完整。

(5)增加了习题答案,便于自学。

由于编著者水平有限,出版时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,敬请使用本教材的师生不吝指正。

编 者

2003 年元月

符号说明

一、基本符号

I, i	电流
V, v	电压
P, p	功率
R, r	电阻
G, g	电导
X, x	电抗
B, b	电纳
Z, z	阻抗
Y, y	导纳
L	电感
C	电容
M	互感
T, t	时间

二、电压和电流

有以下规定(以基极电流为例)

I_B	大写字母、大写下标,表示直流量(或平均值);
I_b	大写字母、小写下标,表示交流有效值;
i_b	小写字母、小写下标,表示交流瞬时值;
i_B	小写字母、大写下标,表示交流瞬时值。
V_Q	静态工作点电压
$\dot{V} = V(j\omega) = V(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$	正弦电压复数值
$V(\omega), \varphi(\omega)$	电压的模和相角
V_m	正弦电压振幅值
$V(s)$	电压的拉普拉斯变换
V_{CC}	集电极直流电源电压

三、阻抗

R_s	信号源内阻
R_L	负载电阻
R_i	输入电阻
R_o	输出电阻
$\dot{Z} = Z(j\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi_z(\omega)}$	阻抗复数值

$Z(\omega), \varphi_z(\omega)$ 阻抗的模和相角

四、增益

A 表示增益,其下标不同,含义不同

$A(s)$ 增益的拉普拉斯变换

$\dot{A} = A(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi_A(\omega)}$ 增益的复数值

$A(\omega), \varphi_A(\omega)$ 增益的幅值和相角

A_v, A_{vs} 电压增益和源电压增益

A_i, A_{is} 电流增益和源电流增益

A_r, A_{rs} 互阻增益和源互阻增益

A_g, A_{gs} 互导增益和源互导增益

A_{vd}, A_{vc} 差模电压增益和共模电压增益

G_p 功率增益

G_{pA} 额定功率增益

五、功率

P_i, P_o 输入信号功率和输出信号功率

P_C 集电极耗散功率

P_D 直流电源供给功率

P_L 负载获得功率

P_A 额定功率

六、频率

F, f 频率

Ω, ω 角频率

$s = \sigma + j\omega$ 复频率

f_L, f_H 下限频率和上限频率

$BW_{0.7}$ 通频带

f_o 回路固有振荡频率

七、器件说明

1. 晶体二极管

V_B 内建电位差

$V_{D(on)}$ 导通电压

$V_{(BR)}$ PN 结击穿电压

I_s 反向饱和电流

C_T 势垒电容

C_D 扩散电容

C_j 结电容

V_Z 稳压管的稳定电压

V_T 热电压

2. 晶体三极管

r_e 发射结电阻

$r_{bb'}$ 基区体电阻

$V_{BE(on)}$ BE 结导通电压

α 共基极短路电流传输系数

β 共发射极短路电流放大系数

V_A 厄尔利电压

I_{CBO} 发射极开路时集电结反向饱和电流

I_{CEO} 基极开路时 c - e 间穿透电流

I_{CBS} 发射极短路时集电结反向饱和电流

I_{CM} 集电极最大允许电流

$V_{(BR)CBO}$ 发射极开路时集电结反向击穿电压

$V_{(BR)CEO}$ 基极开路时 c - e 间反向击穿电压

$V_{(BR)CER}$ b - e 间接入电阻时 c - e 间反向击穿电压

$V_{(BR)CES}$ b - e 间短路时 c - e 间反向击穿电压

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

g_m 跨导

f_α α 的截止频率

f_β β 的截止频率

f_T 特征频率

3. 场效应管

g_m 跨导

I_{DSS} 当 $V_{GS} = 0$ 时饱和漏极电流

$V_{GS(off)}$ 夹断电压

$V_{GS(th)}$ 开启电压

V_{US} 衬底和源极间的电压

八、其它符号

Q 静态工作点

τ 时间常数

K_{CMR} 共模抑制比

$G \cdot BW$ 增益带宽积

k_f 反馈系数

F 反馈深度

T 环路增益

第一章 晶体二极管的基本特性	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 半导体物理基础知识	(1)
1.2.1 本征半导体	(1)
1.2.2 杂质半导体	(3)
1.2.3 载流子在电场作用下的 漂移运动	(4)
1.2.4 载流子在浓度梯度下的 扩散运动	(5)
1.3 PN 结	(6)
1.3.1 动态平衡下的 PN 结	(6)
1.3.2 PN 结的伏安特性	(7)
1.3.3 PN 结的反向击穿	(10)
1.3.4 PN 结的电容特性	(11)
1.4 晶体二极管	(12)
1.5 稳压管	(15)
思考题与习题	(16)
附录一 二极管的 PSpice 模型和 分析	(18)
PSpice 练习题	(21)
第二章 双极型晶体管(BJT)	(22)
2.1 概述	(22)
2.2 双极型晶体管的工作原理	(23)
2.2.1 BJT 具有放大作用的条件	(23)
2.2.2 BJT 内部载流子的传输 过程	(23)
2.2.3 BJT 中的电流分配关系	(25)
2.2.4 BJT 中各级电流与结电 压的关系	(26)
2.3 BJT 伏安特性曲线	(27)
2.4 BJT 主要特性参数	(29)
思考题与习题	(30)
附录二 双极型晶体管的 PSpice 模型 和分析	(32)
PSpice 练习题	(36)
第三章 场效应管的基本特性	(37)
3.1 结型场效应管	(37)

3.1.1 结型场效应管的工作原理	(37)
3.1.2 N 沟道结型场效应管的 伏安特性曲线	(39)
3.2 绝缘栅场效应管	(40)
3.2.1 N 沟道 E 型 MOS 场效应管	(41)
3.2.2 其它类型的 MOS 管	(44)
3.3 场效应管的特点	(46)
3.3.1 场效应管和晶体三极管 的比较	(46)
3.3.2 FET 使用注意点	(47)
思考题与习题	(47)
附录三 场效应管的 PSpice 模型和 分析	(49)
PSpice 练习题	(56)
第四章 放大器基础	(57)
4.1 放大器的基本概念	(57)
4.2 小信号放大器的图解分析 方法	(59)
4.3 小信号放大器的微变等效 电路分析方法	(66)
4.3.1 基本概念	(66)
4.3.2 共发射极放大电路	(68)
4.3.3 共集电极放大电路	(74)
4.3.4 共基极放大电路	(77)
4.3.5 组合电路与达林顿组态	(79)
4.4 场效应管(FET)放大电路	(80)
4.4.1 FET 放大器的偏置电路及 静态工作点	(80)
4.4.2 FET 放大器的性能分析	(82)
4.5 多级小信号放大器	(85)
4.5.1 级间耦合方式	(86)
4.5.2 多级小信号放大器的增益	(86)
4.6 放大器的噪声	(89)
4.6.1 内部噪声的来源及其性质	(90)
4.6.2 放大器的噪声系数与噪声 温度	(91)
思考题与习题	(93)

附录四 放大电路的 PSpice 分析 ... (99)	
PSpice 练习题 (103)	
第五章 放大电路中的负反馈 (105)	
5.1 反馈放大器的基本概念 (105)	
5.1.1 负反馈放大器中的基本关系式 (105)	
5.1.2 四种类型的反馈放大电路 (106)	
5.1.3 反馈极性与类型的判断 ... (107)	
5.2 负反馈对放大器性能的影响 (109)	
5.2.1 负反馈对放大器增益稳定性的影响 (109)	
5.2.2 负反馈对输入电阻的影响 ... (110)	
5.2.3 负反馈对输出电阻的影响 ... (111)	
5.2.4 负反馈对失真及噪声的影响 (112)	
5.3 负反馈放大器的分析与计算 (114)	
5.3.1 负反馈放大器的拆环分析方法 (115)	
5.3.2 用拆环法分析负反馈放大器的步骤及举例 (117)	
5.3.3 深度负反馈条件下的近似算法 (120)	
思考题与习题 (122)	
附录五 负反馈放大器的 PSpice 分析 (128)	
PSpice 练习题 (130)	
第六章 集成运算放大器及其应用 (132)	
6.1 概述 (132)	
6.1.1 半导体集成电路的制造工艺 (133)	
6.1.2 集成电路元器件的特点 ... (138)	
6.2 模拟集成电器的基础——差动放大器 (138)	
6.2.1 为什么要引入差动放大器 ... (138)	
6.2.2 差动放大电路的基本原理 ... (139)	
6.2.3 差动放大器在任意信号输入时的情况 (142)	
6.2.4 差动放大器的几种接法 ... (143)	
6.2.5 差动放大器性能的改进 ... (144)	
6.2.6 差动放大器的传输特性 ... (145)	
6.2.7 实际的差动放大器 (146)	
6.2.8 差动放大器的噪声 (151)	
6.3 模拟集成电路中的基本单元电路 (152)	
6.3.1 输入级电路 (152)	
6.3.2 偏置电路 (154)	
6.3.3 有源负载 (156)	
6.3.4 单端化电路 (157)	
6.3.5 电平移位电路 (158)	
6.3.6 中间增益级 (159)	
6.3.7 输出级和保护电路 (159)	
6.4 MOS 模拟集成电路基本单元电路 (163)	
6.4.1 MOS 恒流源电路 (163)	
6.4.2 MOS 单级放大器 (164)	
6.4.3 MOS 差动放大器 (167)	
6.4.4 MOS 输出级电路 (168)	
6.4.5 MOS 集成运放实例 (169)	
6.5 电流模电路基础 (170)	
6.5.1 跨导线性电路 (170)	
6.5.2 由 TL 回路构成的电流模电路 (171)	
6.6 集成运放的线性应用 (174)	
6.6.1 集成运放的理想化 (175)	
6.6.2 三种基本放大器电路 (176)	
6.6.3 线性电压、电流变换器 (179)	
6.6.4 线性数学运算器 (181)	
6.6.5 非线性数学运算器 (185)	
6.7 集成运放的主要特性参数和运算误差 (193)	
6.7.1 集成运放的主要特性参数 (193)	
6.7.2 集成运放的运算误差 (194)	
6.7.3 集成运放的调零和偏流补偿技术 (197)	
思考题与习题 (200)	
附录六 差放和运放的 PSpice 分析 (208)	

PSpice 练习题	(210)	第八章 小信号谐振放大器	(268)
第七章 放大电路的频率响应	(212)	8.1 概述	(268)
7.1 概述	(212)	8.2 Y 参数及其等效电路	(269)
7.1.1 频率特性的基本概念	(212)	8.3 小信号谐振放大器	(271)
7.1.2 放大器的阶跃响应	(215)	8.3.1 单级单调谐回路谐振 放大器	(271)
7.2 复频域分析法	(215)	8.3.2 多级单调谐回路谐振 放大器	(274)
7.2.1 传递函数和极零点	(215)	8.3.3 双调谐回路谐振放大器 ...	(276)
7.2.2 稳定的有源性系统的传递 函数和极零点的特点	(216)	8.4 小信号谐振放大器的稳 定性	(280)
7.2.3 传递函数与频率响应、阶跃响 应的关系	(216)	8.4.1 稳定性分析	(280)
7.2.4 系统的波特图	(217)	8.4.2 稳定性措施	(282)
7.2.5 上、下限频率	(220)	8.5 集中选频的小信号谐振 放大器	(284)
7.3 单级放大电路的频率特性 ...	(223)	8.5.1 集中滤波器	(284)
7.3.1 共发射极电路的频率 特性	(224)	8.5.2 集中选频谐振放大器实例 ...	(289)
7.3.2 共集电极电路的频率 特性	(234)	8.6 场效应管小信号谐振放 大器	(291)
7.3.3 共基极电路的频率特性 ...	(237)	8.6.1 场效应管谐振放大器的 特点	(291)
7.4 多级和集成宽频带放大器 的频率特性	(239)	8.6.2 场效应管谐振放大器	(291)
7.4.1 组合电路宽频带放大器 ...	(239)	思考题与习题	(292)
7.4.2 负反馈宽频带放大器	(242)	附录八 小信号谐振放大器的 PSpice 分析	(295)
7.5 负反馈放大器的稳定性	(253)	PSpice 练习题	(296)
7.5.1 稳定性的判断	(253)	附录 PSpice 简明手册	(297)
7.5.2 负反馈放大器的相位补偿 ...	(257)	习题参考答案	(313)
思考题与习题	(260)	参考文献	(317)
附录七 放大器频响的 PSpice 分析	(264)		
PSpice 练习题	(266)		

第一章 晶体二极管的基本特性

1.1 概 述

晶体二极管是一种非线性器件,具有单向导电性。它是一种由 PN 结构成的电子器件,广泛应用于各种电子设备中,可完成整流、检波、混频等作用。图 1.1.1 为其基本结构示意图及相应的电路符号,图中的 PN 结是由 P 型半导体和 N 型半导体有机结合形成的。N 型半导体和 P 型半导体都是杂质半导体,是在本征半导体中掺入杂质形成的。为了进一步理解 PN 结的特性,先对半导体物理基础知识作个简单介绍。

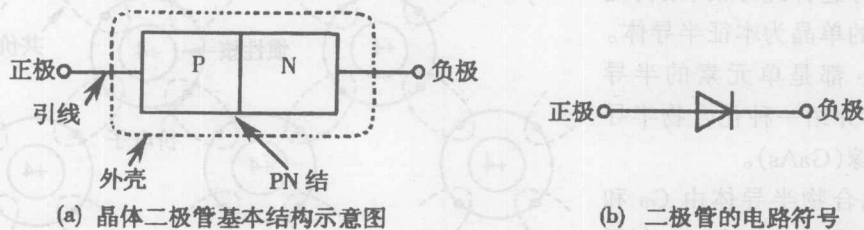


图 1.1.1 晶体二极管基本结构示意图与相应的电路符号

1.2 半导体物理基础知识

我们日常生活中接触到的铜、铝等金属材料的电阻率约在 $10^{-6}\Omega\cdot\text{cm} \sim 10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 之间,属于导体;而云母、陶瓷和石英等材料的电阻率约在 $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,属于绝缘体,导电能力很弱;还有一种物质,其导电能力介于导体和绝缘体之间,电阻率大约为 $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm} \sim 10^9\Omega\cdot\text{cm}$,我们称它为半导体。在自然界中属于半导体的物质很多,而用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。半导体除了在导电方面有别于导体和绝缘体外,还有其它重要特性,例如,当半导体受到外界光或热的刺激时,或者当纯净的半导体中加入微量杂质之后,其导电能力会发生很大变化。利用这些特点,我们可以制造出多种实用的器件,如光电器件及热敏传感器等。

1.2.1 本征半导体

在实际中常用的半导体有硅和锗,我们先看一看它们的原子结构。如图 1.2.1(a)、(b)所示。因为化学元素的许多物理和化学性质都与价电子有关,半导体的导电性质也与价电子有关。为简单起见,把内层电子和原子核看作一个整体,称为惯性核,惯性核周围是价电子,如图 1.2.1(c)所示。硅和锗的价电子都是四个,因此它们都是四价元素。

根据物质中原子排列形式,将其分为晶体和非晶体两类。硅和锗都是晶体,可经过加工提炼成单晶体。在单晶体中内部晶格排列完全一致。它们的原子有规则地排列着,并通过共价键把相邻的原子紧密地联系在一起。共价键是相邻两个原子各出一个价电子作为共用电子对而形成的相互使用力,如图 1.2.2 所示。



图 1.2.1 硅和锗的原子结构模型

硅和锗中的每个原子和相邻的四个原子之间形成四个共价键，共价键内的两个价电子称为束缚电子。我们称这种纯净的、结构完整的硅和锗的单晶为本征半导体。

Si 和 Ge 都是单元素的半导体，下面简单介绍一种化合物半导体材料砷化镓(GaAs)。

GaAs 化合物半导体由 Ga 和 As 两种元素构成，Ga 和 As 在元素周期表中一个在 Ge 之前，一个在 Ge 之后，其原子半径几乎相等。由于两种元素的电性有差异，在键合中加入了离子性成分，使这种状态下的键合得到加强；所以，GaAs 的熔点比 Ge 高，禁带宽度也较大。Si 的禁带宽度为 1.1eV，工作温度可达 150℃，GaAs 的禁带宽度为 1.43eV，工作温度在 250℃ 以上；这也说明，GaAs 半导体材料的温度特性比 Si 好。

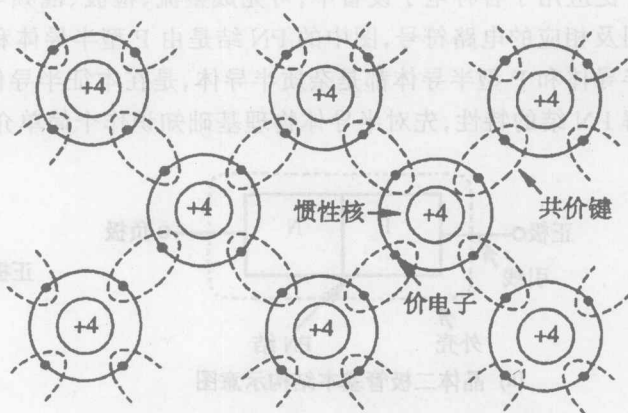


图 1.2.2 单晶硅、锗共价键平面结构示意图

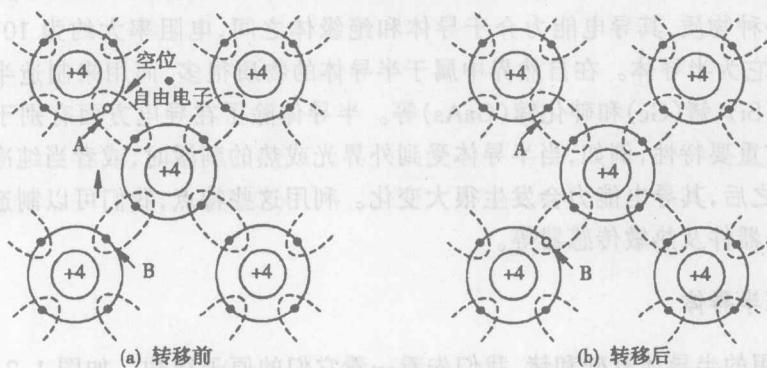


图 1.2.3 空位在晶体中的转移

本征半导体在绝对零度即 $T = -273^\circ\text{C}$ 时，由于共价键中的价电子被束缚着，不存在自由运动的带电粒子——载流子，故这时半导体不能导电。但当温度升高或受到光照等外界因素影响时，会出现本征激发。本征激发就是少量共价键中的价电子获得足够的能量摆脱共价键的束缚成为自由电子；同时在共价键中留下相同数量空位的现象。由于共价键中留下了空位，在外电场或其它能量的作用下，相邻共价键中的价电子就很容易获得能量后跳过

来填补这个空位,于是,空位便转移到相邻的共价键中去了,如图 1.2.3 所示。这种过程持续进行下去,就相当于一个空位在晶格中移动。由于带负电荷的价电子依次填补空位的作用与带正电荷的粒子作反方向运动的效果相同,故可把空位看作带正电荷的粒子,并称之为空穴。也就是说,空穴是带正电荷的载流子。由此可见,半导体中存在自由电子与空穴两种参与导电的载流子。在本征激发过程中产生一个自由电子的同时,就必然随之出现一个空穴,即两者成对出现。

实际上,在本征半导体中还存在着与本征激发相反的另一过程——复合。复合是指自由电子失去能量,在原子核吸引下重新与空穴结合,使自由电子——空穴对消失的现象。当温度一定时,本征激发与复合的同时存在使得单位体积内的载流子数即载流子浓度将在某一热平衡值上达到动态平衡。可以证明,这个热平衡时的载流子浓度值为

$$n = p = n_i = AT^{3/2} \exp(-E_{g0}/2kT) (\text{cm}^{-3}) \quad (1.2.1)$$

式中, n_i 表示本征载流子浓度, n 表示本征半导体中自由电子浓度, p 表示本征半导体中空穴浓度, A 是与半导体材料有关的常数(硅材料为 $3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$, 锗材料为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$), T 是绝对温度, k 是波尔兹曼常数($k = 8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$, eV 为电子伏特), E_{g0} 是 $T = 0\text{K}$ 时的禁带宽度(硅 $E_{g0} = 1.21\text{eV}$, 锗 $E_{g0} = 0.785\text{eV}$)。

由式(1.2.1)可见, n_i 与 E_{g0} 、 A 和 T 有关,当材料一定时, E_{g0} 和 A 是确定的, n_i 将由温度 T 决定。在室温时($T = 300\text{K}$), 硅的 n_i 约为 $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 锗的 n_i 约为 $2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。需要指出的是, n_i 的数值虽然很大,但与原子浓度相比还是极其微小的,已知硅原子浓度为 $4.96 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$, 锗原子浓度为 $4.42 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$, 所以,本征半导体的导电能力很弱。

利用温度升高时本征半导体 n_i 值增高、导电能力增强的特性,可以制造热敏元件;利用光照增强时 n_i 值增高、导电能力增强的特性,可以制造光敏元件。

1.2.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入一定量的杂质元素就形成杂质半导体。在热平衡时,杂质半导体中载流子的浓度与本征半导体中的有很大不同。杂质半导体分为 N 型(电子型)半导体和 P 型(空穴型)半导体两类。

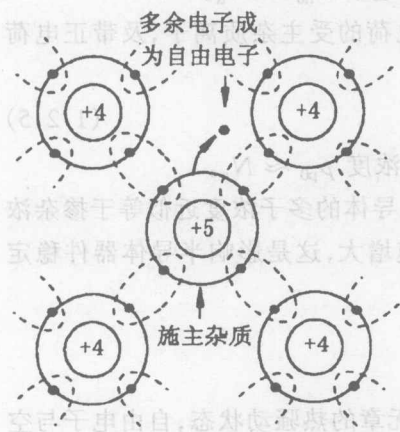


图 1.2.4 N 型半导体结构示意图

N 型半导体是在本征半导体中掺入少量的五价元素杂质(如磷、锑等)形成的,如图 1.2.4 所示。五价元素有五个价电子,当它与相邻的四价硅或锗原子结合时,五个价电子中的四个与硅或锗原子形成共价键,余下的一个价电子只需获得很少的能量便可挣脱五价元素原子核的吸引成为自由电子,从而使自由电子浓度大量增加。对于五价元素原子,尽管释放出一个自由电子后变成带一个电子电荷量的正离子,但由于正离子仍束缚在晶格中,不能象载流子那样自由移动,起不了导电作用。与本征半导体相比, N 型半导体中自由电子浓度增大了;同时空穴与自由电子相遇而复合的机会也增大,使空穴浓度减少了。因此,在 N 型半导体中自由电子浓度大,被称为多数载流子,简称多子;空穴浓度小,称为少数载流子,简称少子。因五

价元素施舍出一个自由电子,称其为施主杂质。

P型半导体是在本征半导体中掺入少量三价元素杂质(如硼、铝等)形成的半导体。加入杂质后可以使空穴浓度大量增加。三价元素原子有三个价电子,当它顶替四价硅或锗原子时,每个三价元素原子与周围的四价硅或锗原子形成共价键时,必然缺少一个价电子,形成空位。常温下,邻近原子的价电子很容易填补这个空位,这就在邻近原子中形成一个新的空位,如图 1.2.5 所示。P型半导体中空穴占多数,为多数载流子;自由电子是少数,为少数载流子。三价元素因接受一个自由电子被称为受主杂质。

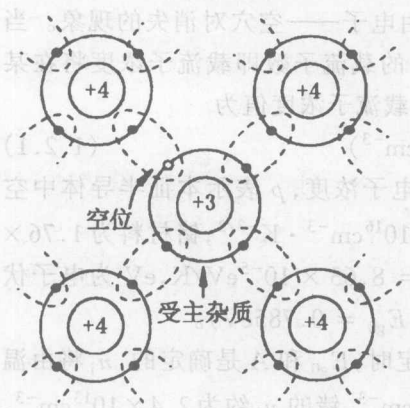


图 1.2.5 P型半导体结构示意图

在半导体中,多子和少子浓度之间既满足热平衡条件,又满足电中性条件。

温度一定时,两种载流子的产生与复合达到动态平衡,两种载流子浓度的乘积恒等于本征载流子浓度的平方,此关系称为热平衡条件。在N型半导体中,自由电子浓度用 n_{n0} 表示(下标 n 表示 N 型半导体,0 表示热平衡值),空穴浓度用 p_{n0} 表示,则有

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = n_i^2 \quad (1.2.2)$$

在P型半导体中,自由电子浓度用 n_{p0} 表示,空穴浓度用 p_{p0} 表示,则有

$$n_{p0} \cdot p_{p0} = n_i^2 \quad (1.2.3)$$

掺入杂质后,整块杂质半导体中正、负电荷的数量相等,保持电中性,此即电中性条件。

在N型半导体中,有带负电荷的多子自由电子和带正电荷的施主杂质离子及少子空穴。在室温时,杂质原子全部电离,于是电中性条件为

$$n_{n0} = N_d + p_{n0} \quad (1.2.4)$$

式中, N_d 是施主杂质浓度,通常 $N_d \gg p_{n0}$, 因此,多子自由电子 $n_{n0} \approx N_d$ 。

在P型半导体中,有带负电荷的少子自由电子,带负电荷的受主杂质离子,及带正电荷的多子空穴。因此,电中性条件为

$$p_{p0} = N_a + n_{p0} \quad (1.2.5)$$

式中, N_a 是受主杂质浓度,通常 $N_a \gg n_{p0}$, 因此,多子空穴浓度 $p_{p0} \approx N_a$ 。

从上面的分析可以看出,杂质原子全部电离后,杂质半导体的多子浓度近似等于掺杂浓度,与温度无关;而少子浓度与 n_i^2 成正比,随温度升高迅速增大,这是影响半导体器件稳定性的原因之一。

1.2.3 载流子在电场作用下的漂移运动

当温度高于绝对零度时,半导体中的载流子处于杂乱无章的热骚动状态,自由电子与空穴浓度将处于动态平衡状态。这时,载流子运动方向是杂乱的,因此,在宏观上不会产生电流。

在外加电场的作用下,空穴将做与外电场方向相同的运动,自由电子做与外电场方向相反的运动。这种在外加电场的作用下,载流子的定向运动称为漂移运动,它产生的电流叫漂移电流。两种载流子运动方向相反,但产生的电流方向与外电场方向相同,如图 1.2.6 所示。

设 J_{pt} 和 J_{nt} 分别代表空穴及自由电子漂移电流密度(即通过单位截面积的电流),则它们分别可表示为

$$J_{pt} = q\mu_p E \quad (1.2.6)$$

$$J_{nt} = -(-q)n\mu_n E = qn\mu_n E \quad (1.2.7)$$

总的漂移电流密度为

$$J_t = J_{nt} + J_{pt} = q(p\mu_p + n\mu_n)E \quad (1.2.8)$$

式中, p 和 n 分别表示空穴浓度和自由电子浓度, q 是电子电荷量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ (库仑), E 为外加电场强度,单位是 V/cm , μ_p 和 μ_n 分别为空穴和自由电子迁移率。迁移率表示单位场强下载流子的平均漂移速度,单位为 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。迁移率是半导体材料的一个重要的特性参数。迁移率与半导体材料及掺杂浓度、载流子性质、温度等有关,其大小影响半导体器件的工作频率。

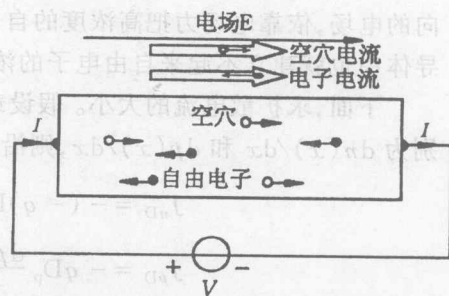


图 1.2.6 电场作用下载流子的漂移运动

为使半导体器件高速工作,希望半导体中自由电子及空穴的迁移率大。一般使用的半导体材料 Si 的电子迁移率是 $1600 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 空穴的迁移率是 $500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 而 GaAs 的电子迁移率是 $9000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 空穴迁移率是 $450 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。可以看出, GaAs 的电子迁移率比 Si 高出许多, 因此, 用 GaAs 制作的超高频二极管和晶体管, 广泛应用于高频通信等领域。

现在计算一下半导体材料的电阻。设半导体材料长为 l 横截面积为 S , 加在半导体材料两端的电压为 $V = E \cdot l$, 通过其间的漂移电流 $I_t = J_t \cdot S$, 则该半导体呈现的电阻为

$$R = V/I_t = El/J_t S = \rho l/S \quad (\Omega) \quad (1.2.9)$$

式中, ρ 为电阻率

$$\rho = 1/q(p\mu_p + n\mu_n) \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1.2.10)$$

上面两个式子适用于本征半导体和杂质半导体。在本征半导体中, $n = p = n_i$, 因为 $\mu_n > \mu_p$, 所以电子漂移电流大于空穴漂移电流; 在杂质半导体中, 多子浓度远大于少子浓度, 所以总的漂移电流近似等于多子漂移电流, 而且电阻率近似与掺杂浓度成反比。

1.2.4 载流子在浓度梯度下的扩散运动

当半导体材料的某一端面上受光线照射或有载流子注入时, 其热平衡状态便遭到破坏, 出现非平衡的载流子(自由电子和空穴), 于是, $p \cdot n \neq n_i^2$ 。在半导体中存在自由电子和空穴两种载流子, 当其间出现非平衡载流子而建立浓度差时, 仍满足电中性条件, 即非平衡自由电子 $[n(x) - n_0]$ 应等于非平衡空穴 $[p(x) - p_0]$, 如图 1.2.7 所示。靠近端面处, 非平衡载流子浓度最大, 离端面越远, 非平衡载流子浓度越小, 最后趋于零, 即载流子浓度恢复到热平衡值 (n_0 和 p_0)。因浓度差将引起非平衡载流子由高浓度向低浓度运动, 称之为扩散运动, 相应产生的电流

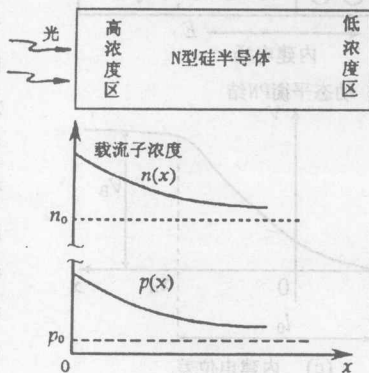


图 1.2.7 热平衡状态打破时载流子浓度分布示意图

称为扩散电流,这是一种区别于导体中电流的特有电流。

在导体中只有一种载流子(自由电子),如果存在浓度差,必将产生自低浓度向高浓度方向的电场,依靠电场力把高浓度的自由电子拉向低浓度处,使处处满足电中性原则,因而在导体中也就建立不起来自由电子的浓度差。

下面,求扩散电流的大小。假设载流子分布是一维函数 $n(x)$ 和 $p(x)$,其浓度梯度分别为 $dn(x)/dx$ 和 $dp(x)/dx$,则沿着 x 方向自由电子和空穴的扩散电流密度分别为:

$$J_{nD} = -(-q)D_n \frac{dn(x)}{dx} = qD_n \frac{dp(x)}{dx} \quad (1.2.11)$$

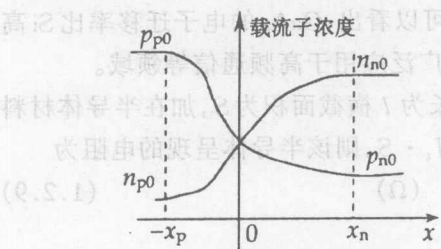
$$J_{pD} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (1.2.12)$$

式中, D_n 和 D_p 为比例常数,分别称为自由电子扩散系数和空穴扩散系数,单位是 cm^2/s 。当 $n(x)$ 和 $p(x)$ 沿 x 方向减小时, $dn(x)/dx$ 和 $dp(x)/dx$ 均为负值,表明自由电子扩散电流方向与浓度减小方向相反,而空穴扩散电流方向与浓度减小方向一致。

1.3 PN 结

PN 结是半导体器件的核心。PN 结是在一块 P 型(或 N 型)半导体中利用平面扩散法

将其一部分加入杂质,通过杂质补偿使这一部分材料转换成 N 型(或 P 型),这样就形成了晶格结构连续的 PN 结。实际 PN 结两侧的 P 区和 N 区掺杂浓度是不同的, P 区掺杂浓度大于 N 区的称为 P^+N 结, N 区掺杂浓度大于 P 区的称为 PN^+ 结,它们均为不对称结。



(a) 载流子浓度分布

1.3.1 动态平衡下的 PN 结

PN 结的两边分别是 P 型和 N 型半导体,由于两边的载流子浓度不同,将会产生扩散运动。P 区内的多子空穴的浓度远大于 N 区的少子空穴的浓度,因此, P 区的空穴要向 N 区扩散。同时, N 区中的自由电子将向 P 区扩散。P 区空穴与 N 区中的自由电子相遇而复合,而 N 区中自由电子与 P 区中的空穴相遇而复合,使接触面附近的 P 区留下带负电荷的受主杂质离子, N 区中留下了带正电荷的施主杂质离子。因而在紧靠接触面两边形成了电荷量相等但带电性质相反的空间电荷区。此空间电荷区因其不同特点有各种不同的称呼,例如耗尽区、阻挡层、势垒区等。在形成的空间电荷区内,空穴浓度将由 P 区中的热平衡值 p_{p0} 逐渐减少到 N 区的热平衡值 p_{n0} ;自由电子浓度将由 N 区的热平衡值 n_{n0} 逐渐减小到 P 区的热平衡值 n_{p0} ,如图 1.3.1(a) 所示。

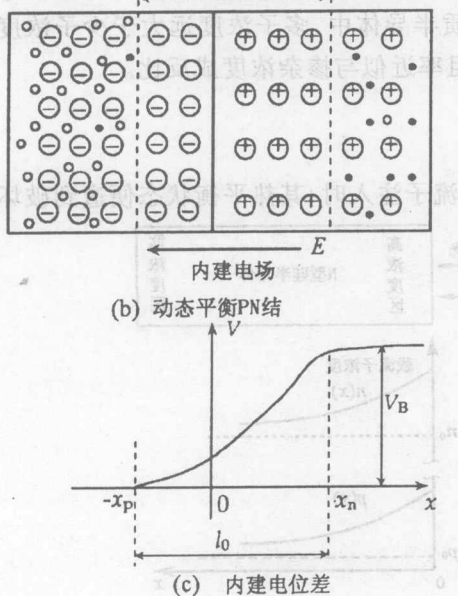


图 1.3.1 动态平衡时的 P^+N 结及内建电位差