

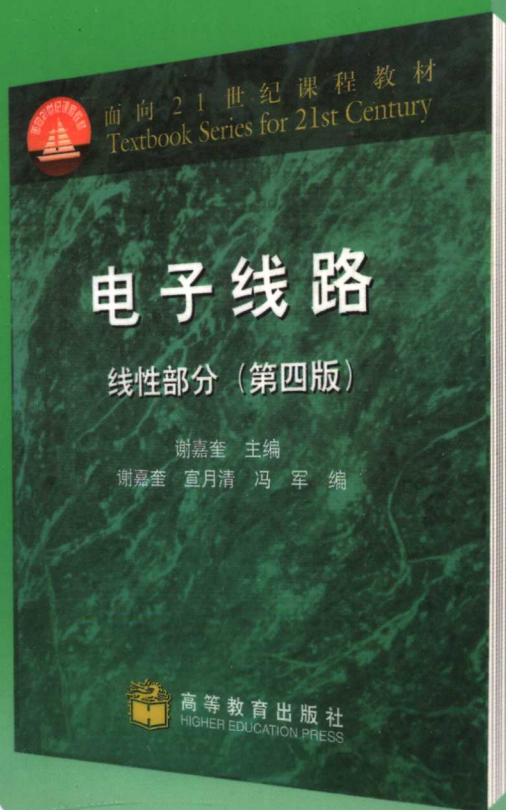


高等学校优秀教材辅导丛书

GAO DENG XUE XIAO YOU XIU JIAO CAI FU DAO CONG SHU

主编 李建军

电子线路 (线性部分) 知识要点与习题解析



哈尔滨工程大学出版社

高等学校优秀教材辅导丛书

电子线路 知识要点与习题解析

(线性部分)

(配谢嘉奎第四版教材·高教版)

主 编 李建军

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子线路知识要点与习题解析.线性部分/李建军主编.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005
ISBN 7-81073-716-3

I. 电… II. 李… III. 线性电路-高等学校-自
学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 061988 号

内 容 简 介

本书是为东南大学谢嘉奎教授主编的《电子线路 线性部分》(第四版)编写的配套教学指导书。

编者在长期进行“电子线路”教学的基础上,对该教材各章内容进行了概括和总结;对教材各章习题逐一作了较详尽解答;对电子线路教材其他侧重点习题进行补充。旨在帮助读者更好地理解 and 掌握教材内容。

本书可以作为高校电子信息工程、通信工程、自动化等相近专业“电子线路”课程的教学参考书,也可以作为工程技术人员参考书。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈尔滨工程大学11号楼
发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001
新华书店经销
肇东粮食印刷厂印刷

*

开本 787mm×960mm 1/16 印张 12.75 字数 233 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3 000 册

定价:16.50 元



P r e f a c e

前言

本书是为谢嘉奎教授主编的《电子线路 线性部分》(第四版)编写的配套学习辅导书。

《电子线路》(第四版)是面向 21 世纪课程教材,2002 年荣获全国优秀教材一等奖,被列为普通高等教育“九五”国家教委重点教材。由于本课程内容多、概念强,对问题分析又常采用近似方法,这给初学者带来很大困难。为帮助读者提高分析问题、解决问题的能力,我们编写了这本教学指导书。

为便于读者学习,本书在章节编排顺序上与教材完全相同。本书各章节内容主要包括以下三部分。

1. 知识要点。指出各章中哪些内容需要重点掌握、哪些内容只需要一般了解。帮助读者有的放矢地进行学习。根据编者多年教学实践工作中的经验和体会,对教材各章内容进行总结、提炼和归纳。通过基本内容学习,帮助读者理清思路、抓住重点,更好地掌握电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法。

2. 书后习题解析。为方便学生自学,教材各章后面的习题均有简要分析解答。

3. 同步训练题。选择典型的,与教材互补的同步训练题进行分析解答。通过这部分学习,能使學生掌握解题要领,巩固基本概念,做到举一反三,增强分析问题、解决问题的能力。

本书由李建军编写。哈尔滨工程大学出版社一直关心本书的出版工作,陈晓军主任及各位编辑给编者提供了许多具体指导,为本书出版创造了良好的条件。

在此,我对哈尔滨工程大学出版社同志表示衷心感谢。同时,对书中存在的错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2005 年 5 月

第1章 晶体二极管	1
知识要点	1
1.1 基本要求	1
1.2 知识点	1
1.3 内容提要	2
书后习题解析	7
同步训练题	16
同步训练题答案	18
第2章 晶体三极管	20
知识要点	20
2.1 基本要求	20
2.2 知识点	20
2.3 内容提要	21
书后习题解析	25
同步训练题	37
同步训练题答案	40
第3章 场效应管	45
知识要点	45
3.1 基本要求	45
3.2 知识点	45
3.3 内容提要	46
书后习题解析	50
同步训练题	59
同步训练题答案	61
第4章 放大器基础	63
知识要点	63
4.1 基本要求	63
4.2 知识点	63
4.3 内容提要	64

书后习题解析	71
同步训练题	127
同步训练题答案	132
第5章 放大器中的负反馈	138
知识要点	138
5.1 基本要求	138
5.2 知识点	138
5.3 内容提要	138
书后习题解析	141
同步训练题	160
同步训练题答案	162
第6章 集成运算放大器及其应用电路	166
知识要点	166
6.1 基本要求	166
6.2 知识点	166
6.3 内容提要	167
书后习题解析	170
同步训练题	192
同步训练题答案	194

第1章 晶体二极管



知识要点

1.1 基本要求

1. 了解 PN 结的基本特性及 PN 结的形成;
2. 掌握 PN 结的单向导电工作原理;
3. 熟悉晶体二极管的数学模型、曲线模型、简化电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合;
4. 熟悉二极管电路的分析方法:图解分析法、简化分析法、小信号分析法;能熟练利用简化分析法分析各种电路;
5. 了解二极管的各种应用电路;
6. 了解一些特殊二极管。

1.2 知识点

1. 基础知识

本征半导体

杂质半导体

PN 结的形成

单向导电性

2. PN 结

伏安特性

击穿特性

电容效应



- 3. 分析方法
 - 模型
 - 数学模型
 - 曲线模型
 - 简化电路模型
 - 小信号电路模型
 - 分析方法
 - 图解分析法
 - 简化分析法
 - 小信号分析法
- 4. 二极管应用电路
 - 整流电路
 - 稳压电路
 - 限幅电路
- 5. 特殊二极管
 - 肖特基二极管
 - 光电二极管
 - 发光二极管
 - 光敏二极管
 - 光电耦合器

1.3 内容提要

1.3.1 基础知识

1. 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

(1) 在热力学温度 $T = 0\text{ K}$ 和没有外界能量激发时, 由于价电子受共价键束缚, 因此晶体中不存在自由电子, 半导体是不能导电的。

(2) 当半导体温度升高或受到光照时, 某些共价键中的价电子获得了足够的能量, 从而挣脱共价键的束缚, 跃迁到导带, 成为自由电子, 同时, 在共价键中留下相同数量的空穴, 这种现象叫本征激发。空穴是半导体中特有的一种粒子, 带正电, 与电子的电荷量相同。

(3) 运载电荷的粒子称载流子, 半导体中有两种载流子, 即自由电子和空穴。

在本征半导体中, 自由电子与空穴数目相等。在外加电场作用下, 一方面自由电子定向移动, 形成电子电流; 另一方面, 价电子按一定方向依次填补空穴, 也就是空穴定向移动, 形成空穴电流。

(4) 热激发条件下, 由于只有少数价电子挣脱共价键的束缚进入导带, 形成电子空穴, 所以本征半导体导电能力很低。

2. 杂质半导体



通过扩散工艺,在本征半导体中掺入少量合适的杂质元素,便可得到杂质半导体。

(1) 杂质半导体有两种:N型半导体和P型半导体。在本征半导体中掺入少量的五价元素,就可以构成N型半导体;在本征半导体中掺入少量的三价元素,就可以构成P型半导体。

(2) 两种浓度不等的载流子。在N型半导体中,自由电子浓度远大于空穴浓度,故称自由电子为多数载流子,简称多子;称空穴为少数载流子,简称少子。同样,在P型半导体中,空穴为多子,自由电子为少子。

(3) 一般情况下,只要掺入极少量的杂质,所增加的多子浓度就会远大于室温条件下本征激发所产生的载流子浓度。所以,杂质半导体的导电率高。

(4) 杂质半导体呈电中性。

1.3.2 PN结

1. PN结的形成

半导体中载流子的运动方式有两种:漂移运动——载流子在外加电场作用下的定向移动;扩散运动——因浓度梯度引起载流子的定向运动。

(1) 当P型半导体和N型半导体结合在一起时,由于交界面处存在载流子浓度的差异,这样电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此,形成了一个很薄的空间电荷区。

(2) 绝大部分空间电荷区内自由电子和空穴的数目都非常少,在分析PN结特性时常忽略载流子的作用,只考虑离子区的电荷,这种方法称为“耗尽层近似”,故称空间电荷区为耗尽层,也称阻挡层、势垒区。

(3) P区一侧呈现负电荷,N区一侧呈现正电荷,因此空间电荷区出现方向由N区指向P区的电场。由于这个电场是载流子扩散运动形成的,而不是外加电压形成的,故称为内建电场。内建电场是由多子的扩散运动引起的,伴随着它的形成将带来两种影响:一是内建电场将阻碍多子的扩散;二是P区和N区的少子一旦靠近PN结,便在内建电场的作用下漂移对方,使空间电荷区变窄。

(4) 当扩散大于漂移时,空间电荷区宽度和内建电场必将增大,它阻止扩散、增强漂移,最终使两者之间达到动态平衡;反之,当漂移大于扩散时,空间电荷区宽度和内建电场必将减少,它增强扩散、减小漂移,最终使两者之间达到动态平衡,形成PN结。

(5) PN结处于动态平衡时,扩散电流与漂移电流相抵消,通过PN结的电流为零。此时,PN结内建电位差 V_B 与空间电荷区宽度 l_0 分别为

$$V_B \approx V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}, \quad l_0 = \left(\frac{2\epsilon V_B}{q} \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)^{\frac{1}{2}}$$



可见,掺杂浓度越大,内建电位差 V_B 就越大,而阻挡层宽度 l_0 却越小。

2. 单向导电性

(1) PN 结外加正向电压时处于导通状态

在外电场作用下,多子将向 PN 结移动,结果使空间电荷区变窄,内建电场被削弱,有利于多子的扩散而不利少子的漂移,扩散运动起主要作用。结果,P 区的多子——空穴将源源不断地流向 N 区,而 N 区的多子——自由电子亦不断流向 P 区。这两股载流子的流动就形成了 PN 结的正向电流,PN 结导通。

(2) PN 结外加反向电压时处于截止状态

在外电场作用下,多子将背离 PN 结移动,结果使空间电荷区变宽,内建电场被增强,有利于少子的漂移而不利多子的扩散,漂移运动起主要作用。漂移运动产生的漂移电流的方向与正向电流相反,称反向电流,也称为漂移电流。因少子浓度很低,即使所有的少子都参与漂移运动,反向电流也非常小。所以,在近似分析中常将它忽略不计,认为 PN 结外加反向电压时处于截止状态。

3. 伏安特性

由图 1-1 可见,PN 结外加正向电压,且 $V_D \gg V_T$ 时, I_D 随 V_D 按指数规律变化;当 PN 结外加反向电压,且反向电压超过一定数值 $V_{(BR)}$ 后,反向电流急剧增大,称之为反向击穿。

4. PN 结的击穿特性

当 PN 结反向电压增大到一定值时,反向电流将急剧增大,PN 结反向击穿。根据击穿形成的机理,反向击穿分雪崩击穿与齐纳击穿两种。

(1) 雪崩击穿

发生条件:PN 结掺杂浓度较低,外加反向电压较大。

形成原因:碰撞电离。较高的反向电压,使载流子获得的动能足以把空间电荷区内共价键的价电子撞出,由于阻挡层较宽,碰撞电离的机会增多,使载流子数目剧增、电流增大,造成雪崩击穿。雪崩击穿电压具有正的温度系数。

(2) 齐纳击穿

发生条件:PN 结掺杂浓度较高,外加反向电压较小。

形成原因:场致激发。由于空间电荷区较窄,即使不大的反向电压也会建立起很强的电场,该电场可直接将共价键中的价电子拉出,使载流子数目剧增、电流增

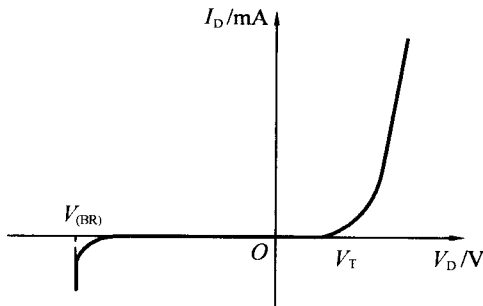


图 1-1

大,造成齐纳击穿。

5. PN 结的电容特性

PN 结的结电容 C_j 是势垒电容 C_T 与扩散电容 C_D 之和,即 $C_j = C_T + C_D$ 。

势垒电容 C_T 用来描述势垒区的空间电荷量随电压变化而产生的电容效应;扩散电容 C_D 反映了在外加电压作用下载流子在扩散过程中积累的情况。

PN 结正偏时, $C_D \gg C_T$, $C_j \approx C_D$ 。因此,正偏时以扩散电容 C_D 为主。

PN 结反偏时, $C_T \gg C_D$, $C_j \approx C_T$ 。因此,反偏时以势垒电容 C_T 为主。利用势垒电容可制成变容二极管。

1.3.3 晶体二极管电路的分析方法

1. 晶体二极管模型

(1) 数学模型

晶体二极管的理想指数模型为 $I = I_S(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$, 其中, $V_T = \frac{kT}{q}$, 称热电压, 室温下约 26 mV; I_S 为反向电流, 其值受温度影响很大, 室温附近, 温度每升高 10 °C, I_S 约增加一倍。

PN 结正偏, 且 $V > 3V_T$ 时, $I \approx I_S e^{\frac{V}{V_T}}$, 电流随外加电压的增大按指数规律增大; PN 结反偏时, $I \approx -I_S$, 反向电流与外加反向电压无关, 近似为常数。

(2) 曲线模型

晶体二极管的伏安特性曲线是晶体二极管的曲线模型, 一般都是通过实测得到的。

伏安特性曲线可划分为三个部分。

① 正向特性: 当正向电压超过某一数值后, 二极管才有明显的正向电流, 该电压值称为导通电压, 用 $V_{D(on)}$ 表示。

② 反向特性: 在反向电压小于反向击穿电压的范围内, 由少数载流子形成的反向电流很小, 而且与反向电压的大小基本无关。

③ 反向击穿特性: 当反向电压增大到某一值 $V_{(BR)}$ 时, 反向电流急剧增大, PN 结反向击穿。

(3) 简化电路模型

在主要利用晶体二极管单向导电性所构成的功能电路中, 晶体二极管的伏安特性曲线可以用两段折线近似表示, 如图 1-2(a) 所示。当认为二极管是理想的开关器件, 其伏安特性和电路符号如图 1-2(b) 所示。当 $V_{D(on)}$ 不能忽略时, 二极管伏安特性可表示为如图 1-2(c) 所示的开关状态。当 $V_{D(on)}$ 与 R_D 都不能忽略时, 二极

管可直接用其简化电路模型表示,如图 1-2(d) 所示。

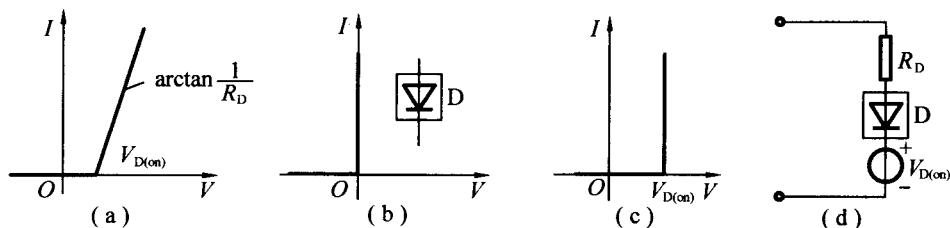


图 1-2

(4) 小信号电路模型

在分析电路动态时,需采用二极管小信号电路模型,如图 1-3 所示。该模型仅限于用来计算叠加在 Q 点上微小增量电压或电流的响应,即 $r_j = V_T/I_Q$ 。

在低频电路中,结电容 C_j 的影响可忽略;在高频电路中, C_j 的影响不能忽略,且 PN 结的单向导电性会因 C_j 的交流旁路作用而变差。

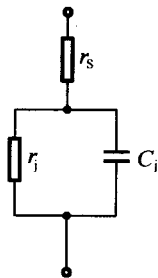


图 1-3

2. 晶体二极管电路的分析方法

(1) 图解分析法

利用二极管曲线模型与外电路所确定的负载线,用作图的方法进行求解。

(2) 简化分析法

将电路中的二极管用简化电路模型代替,利用简化电路直接分析、求解。

(3) 小信号分析法

将电路中的二极管用小信号电路模型代替,利用得到的小信号等效电路分析电压或电流的变化量。

1.3.4 晶体二极管的应用

1. 整流电路

利用二极管单向导电性,可将交流信号变为直流信号。这种方法被广泛用于直流稳压电源中。

2. 稳压电路

二极管反向击穿后的电流有很大变化时,其两端电压却变化很小,几乎是恒定的,利用这种特性可以构成所要求的稳压电路。

3. 限幅电路

利用二极管单向导电性和导通后两端电压基本不变的特点,可组成将信号限定在某一范围内变化的限幅电路。限幅电路有单向限幅和双向限幅电路之分。

1.3.5 特殊二极管

1. 肖特基表面势垒二极管

利用金属与半导体之间的接触势垒可制成肖特基二极管。因其正向导通电压小、结电容小而常用于微波混频、检测、集成化数字电路等场合。

2. 光电二极管

(1) 发光二极管是由电能转换为光能的一种半导体器件。包括可见光、不可见光、激光等不同类型,具有单向导电性。其只有当外加的正向电压使得正向电流足够大时才发光。发光二极管因其驱动电压低、功耗小、寿命长、可靠性高等优点而被广泛用于显示电路之中。

(2) 光敏二极管是光能转换为电能的一种半导体器件。在无光照时,与普通二极管一样,具有单向导电性。在光照射下,当二极管加反偏时,在外电路形成一反向电流,称为光流。其值不仅随入射光增强而增大,还与入射光的波长有关。



SHU HOU XI TI JIE XI

习题解析

1-1 一块本征锗半导体,掺入三价受主杂质硼,浓度为 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,试分别求出 $T = 300 \text{ K}$ (27°C)、 400 K (127°C) 时自由电子和空穴热平衡浓度值,并指出相应半导体类型。

解 当 $T = 300 \text{ K}$ 时, $n_i = 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \ll N_a$, 因此 $p_0 \approx N_a = 1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。由 $n_0 p_0 = n_i^2$ 得 $n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{(2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3})^2}{1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}} \approx 3.84 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。由于 $p_0 \gg n_0$, 故为 P 型半导体。

当 $T = 400 \text{ K}$ 时, $n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} = 1.76 \times 10^{16} \times 400^{\frac{3}{2}} \times e^{\frac{-0.785}{2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 400}} = 1.62 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。由于 $n_i > N_a$, 因此 $p_0 = N_a + n_0$ 及 $n_0 p_0 = n_i^2$, 解之得: $p_0 = 2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $n_0 = 1.03 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。由于 p_0 与 n_0 近似相等, 故为本征半导体。

1-2 一块本征硅半导体,掺入五价元素磷,浓度为 10^{14} cm^{-3} ,试分别求出 $T = 300 \text{ K}$ 、 500 K 时自由电子和空穴的热平衡浓度值,并指出相应半导体类型。



高等学校优秀教材辅导丛书
GAODENG XUEXIAO YOUXIUJIAOCAI FUDAOCONGSHU

解 当 $T = 300 \text{ K}$ 时, $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \ll N_d$, 则 $n_0 \approx N_d = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

由 $n_0 p_0 = n_i^2$ 得 $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{14} \text{ cm}^{-3}} \approx 2.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 。由于 $p_0 \ll n_0$,

故为 N 型半导体。

当 $T = 500 \text{ K}$ 时, $n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} = 3.88 \times 10^{16} \times 500^{\frac{3}{2}} \times e^{\frac{-1.21}{2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 500}} = 3.49 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 由于 n_i 与掺杂浓度 N_d 相近, 故为本征半导体。

1-3 在本征硅半导体中, 掺入浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的受主杂质, 试指出 $T = 300 \text{ K}$ 时所形成的杂质类型。若再掺入浓度为 10^{16} cm^{-3} 的施主杂质, 则将为何种类型半导体? 若将该半导体温度分别上升到 $T = 500 \text{ K}$ 、 600 K , 试分析为何种类型半导体?

解 (1) $p_0 \approx N_a = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \gg n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 故为 P 型半导体。

(2) 由于 $N_d > N_a$, 故为 N 型半导体。且多子 $n_0 = N_d - N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3} - 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

(3) 当 $T = 500 \text{ K}$ 时, $n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} = 3.88 \times 10^{16} \times 500^{\frac{3}{2}} \times e^{\frac{-1.21}{2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 500}} = 3.49 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} < n_0$, 所以为 N 型半导体。当 $T = 600 \text{ K}$ 时, $n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} = 3.88 \times 10^{16} \times 600^{\frac{3}{2}} \times e^{\frac{-1.21}{2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 600}} = 4.74 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \approx n_0$, 所以为本征半导体。

1-4 若在每 10^5 个硅原子中掺杂一个施主原子, 试计算在 $T = 300 \text{ K}$ 时自由电子和空穴热平衡浓度值, 掺杂前后半导体的电导率之比。

解 $T = 300 \text{ K}$ 时, $n_0 \approx N_d = (4.96 \times 10^{22} / 10^5) \text{ cm}^{-3} = 4.96 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \gg n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。由 $n_0 p_0 = n_i^2$ 得 $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{4.96 \times 10^{17}} \approx 4.5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ 。

本征半导体电导率为 $\sigma_{\text{本}} = (\mu_n + \mu_p) n_i q = (1.5 + 0.6) \times 10^3 \times 1.5 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} = 5.04 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$ 。

杂质半导体电导率为 $\sigma_{\text{杂}} \approx \mu_n n_0 q = 1.5 \times 10^3 \times 1.5 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} = 119 \text{ S/cm}$, 因此

$$\frac{\sigma_{\text{杂}}}{\sigma_{\text{本}}} = \frac{119 \text{ S/cm}}{5.04 \times 10^{-6} \text{ S/cm}} = 2.38 \times 10^7$$

1-5 有一 N 型硅棒, 棒长 l 为 1 mm , 其左端边界处不断注入空穴, 空穴浓度 $p(0)$ 为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 右端边界处的空穴浓度 $p(l)$ 为 $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 空穴的扩散系数 $D_p = 13 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。设空穴浓度以线性规律由左端向右端扩散, 试计算扩散电流密度 J_{pd} 。

解 由于 $\frac{dp(x)}{dx} = \frac{p(l) - p(0)}{l} = \frac{4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} - 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}}{0.1 \text{ cm}} = -16 \times 10^{16} \text{ cm}^{-4}$, 则

$$J_{pd} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 13 \text{ cm}^2/\text{s} \times (-16 \times 10^{16} \text{ cm}^{-4}) = 333 \text{ mA/cm}^2$$

1-6 已知硅 PN 结两侧的杂质浓度分别为 $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。试求温度在 27 °C 和 100 °C 时的内建电位差 V_B , 并进行比较。

解 $T = 27 \text{ °C}$ 时, $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 则 $V_B \approx V_T \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) = 26 \text{ mV} \times \ln\left[\frac{10^{16} \text{ cm}^{-3} \times 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}}{(1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}\right] = 0.76 \text{ V}$ 。

$T = 100 \text{ °C}$ 时, $n_i = 1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 则 $V_B \approx V_T \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) = \frac{373}{0.6 \times 10^{-19}} \ln\left(\frac{10^{16} \times 1.5 \times 10^{17}}{(1.5 \times 10^{10})^2}\right) = 0.64 \text{ V}$, V_B 随温度升高而减小。

1-7 已知锗 PN 结的反向饱和电流为 10^{-8} A 。当外加电压 V 为 0.2 V、0.36 V 及 0.4 V 时, 试求室温下流过 PN 结的电流 I ? 由计算结果说明伏安特性的特点。

解 将 $V = 0.2 \text{ V}$ 、0.36 V、0.4 V 代入 $I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$, 分别得 21.91 μA 、10.3 mA、48 mA。

由计算结果说明, 当外加电压 V 大于锗管导通电压(0.2 V)后, 电压 V 的微小增大, 就会引起电流的显著增大。

1-8 已知硅和锗 PN 结的反向饱和电流分别为 10^{-14} A 和 10^{-8} A 。若外加电压为 -0.1 V、0 V、0.25 V、0.45 V、0.65 V 时, 试求室温下各电流 I , 并指出电压增加 0.2 V 时, 电流增加的倍数。

解 计算硅管电流 I 时, 将反向饱和电流 10^{-14} A 代入 $I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$ 。当外加电压 $V = -0.1 \text{ V}$ 、0 V、0.25 V、0.45 V、0.65 V 时, 所求电流 I 分别为: $-9.79 \times 10^{-3} \text{ pA}$ 、0 A、 $1.5 \times 10^2 \text{ pA}$ 、0.33 μA 、0.72 mA。

计算锗管电流 I 时, 将反向饱和电流 10^{-8} A 代入 $I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$, 当外加电压 $V = -0.1 \text{ V}$ 、0 V、0.25 V、0.45 V、0.65 V 时, 所求电流 I 分别为: $-9.79 \times 10^{-3} \mu\text{A}$ 、0 A、 $1.5 \times 10^2 \mu\text{A}$ 、0.33 A、720 A。

当电压增加 0.2 V 时, 电流约增加 $e^{\frac{200}{26}} \approx 2191$ 倍。

1-9 在室温时锗二极管和硅二极管的反向饱和电流分别为 1 μA 和 0.5 pA, 若两个二极管均通过 1 mA 的正向电流, 试求它们的管压降分别为多少。



解 由公式 $I = I_S(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$ 得 $V \approx V_T \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right)$, 则

$$V_{\text{硅}} = V_T \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) = 26 \text{ mV} \times \ln\left(\frac{1 \text{ mA}}{0.5 \text{ pA}} + 1\right) = 0.55 \text{ V}$$

$$V_{\text{锗}} = V_T \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) = 26 \text{ mV} \times \ln\left(\frac{1 \text{ mA}}{1 \text{ }\mu\text{A}} + 1\right) = 0.18 \text{ V}$$

1-10 两个硅二极管在室温时反向饱和电流分别为 $2 \times 10^{-12} \text{ A}$ 和 $2 \times 10^{-15} \text{ A}$, 若定义二极管电流 $I = 0.1 \text{ mA}$ 时所需施加的电压为导通电压, 试求各 $V_{D(\text{on})}$ 。若 I 增加到 10 倍, 试问 $V_{D(\text{on})}$ 增加多少伏。

解 由 $I = I_S(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$ 得 $V = V_T \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right)$, 将 $I_S = 2 \times 10^{-12} \text{ A}$ 和 $I_S = 2 \times 10^{-15} \text{ A}$ 代入前式, 分别得 $V_{D(\text{on})} = 461 \text{ mV}$ 和 640 mV 。

$$V_{D(\text{on})2} - V_{D(\text{on})1} = 2.3 V_T \lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 2.3 \times 26 \text{ mV} = 60 \text{ mV}$$

1-11 已知 $I_S(27^\circ\text{C}) = 10^{-9} \text{ A}$, 试求温度为 -10°C 、 47°C 和 60°C 时的 I_S 值。

解 将 $T = -10^\circ\text{C}$ 、 47°C 、 60°C 分别代入 $I_S(t_2) = I_S(t_1) \times 2^{\frac{t_2 - t_1}{10}}$, 从而分别得到 I_S : 77 pA 、 4 nA 、 9.85 nA 。

1-12 一晶体二极管, 已知 $T = 300 \text{ K}$ 时, $I_S = 2 \times 10^{-16} \text{ A}$, $r_s = 10 \Omega$, $n \approx 1$, 试求: (1) $I_{D1} = 1 \text{ mA}$ 时的正向电压 V_{D1} ; (2) $I_{D2} = 0.1 \text{ mA}$ 时的正向电压 V_{D2} ; (3) 相应于 $\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = 10$ 时的 $\frac{V_{D1}}{V_{D2}}$ 值, 并进行分析。

解 利用公式 $V_D = I_D r_s + n V_T \ln\left(1 + \frac{I_D}{I_S}\right)$ 进行计算。

(1) 当 $I_{D1} = 1 \text{ mA}$ 时, $V_{D1} = I_{D1} r_s + n V_T \ln\left(1 + \frac{I_{D1}}{I_S}\right) = 1 \text{ mA} \times 10 \Omega + 26 \text{ mV} \ln\left(1 + \frac{1 \text{ mA}}{2 \times 10^{-16} \text{ A}}\right) = 770.25 \text{ mV}$;

(2) 当 $I_{D2} = 0.1 \text{ mA}$ 时, $V_{D2} = I_{D2} r_s + n V_T \ln\left(1 + \frac{I_{D2}}{I_S}\right) = 0.1 \text{ mA} \times 10 \Omega + 26 \text{ mV} \ln\left(1 + \frac{0.1 \text{ mA}}{2 \times 10^{-16} \text{ A}}\right) = 701.39 \text{ mV}$;

(3) 当 $\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = 10$ 时, $\frac{V_{D1}}{V_{D2}} = \frac{770.25 \text{ mV}}{701.39 \text{ mV}} \approx 1.1$ 。

1-13 设二极管为理想的, 试判断图 1-4 电路中, 各二极管是否导通, 并求

V_{AO} 值。

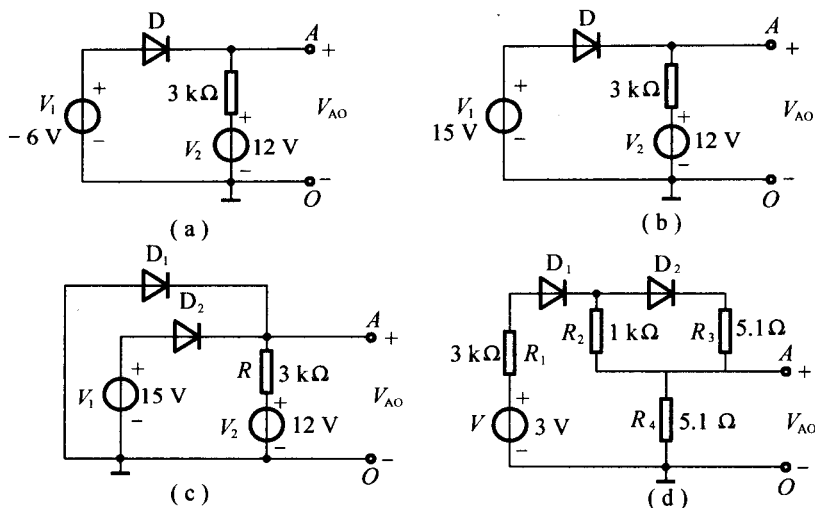


图 1-4

解 图 1-4(a) 中, 假设 D 开路, 则 D 两端电压为 $V_D = V_1 - V_2 = -6\text{ V} - 12\text{ V} = -18\text{ V} < 0$, 所以 D 截止。此时 $V_{AO} = 12\text{ V}$ 。

图 1-4(b) 中, 假设 D 开路, 则 D 两端电压为 $V_D = V_1 - V_2 = 15\text{ V} - 12\text{ V} = 3\text{ V} > 0$, 所以 D 导通。此时 $V_{AO} = 15\text{ V}$ 。

图 1-4(c) 中, 假设 D_1 、 D_2 全部开路, 则:

$$D_1 \text{ 两端电压 } V_{D1} = 0 - V_2 = 0 - (-12\text{ V}) = 12\text{ V} > 0$$

$$D_2 \text{ 两端电压 } V_{D2} = V_1 - V_2 = -15\text{ V} - (-12\text{ V}) = -3\text{ V} < 0$$

所以 D_1 导通, D_2 截止。此时 $V_{AO} = 0\text{ V}$ 。

图 1-4(d) 中, 显然 D_1 、 D_2 均导通, 故

$$V_{AO} = \frac{V \times R_4}{R_1 + R_2 \parallel R_3 + R_4} = \frac{3\text{ V} \times 5.1\ \Omega}{3\text{ k}\Omega + 1\text{ k}\Omega \parallel 5.1\ \Omega + 5.1\ \Omega} \approx 50\text{ mV}$$

1-14 晶体二极管的伏安特性用理想指数模型表示, 当 $V = V_Q + \Delta V$, 并用泰勒级数在 Q 点对 ΔV 展开。若认为 ΔV 的二次方项比一次方项小十分之一以上时, 二次方及其以上各项可忽略。试求 $|\Delta V|$ 的最大允许值。

解
$$I \approx I_S e^{\frac{V}{V_T}} = I_S e^{\frac{V_Q + \Delta V}{V_T}} = I_Q e^{\frac{\Delta V}{V_T}}$$