

国内贸易部部编中等专业学校教材

电子线路

(修订本)

● 苗 溪 主编



中国商业出版社

国内贸易部部编中等专业学校教材

电 子 线 路

(修订本)

苗 滨 主 编

中国商业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电子线路/苗滨主编. — 2 版 (修订本). — 北京:
中国商业出版社, 1999.4

ISBN 7-5044-3156-7

I. 电… II. 苗… III. 电子电路 - 专业学校 - 教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 09935 号

责任编辑: 陈学勤

中国商业出版社出版发行
(100053 北京广安门内报国寺1号)
新华书店北京发行所经销
北京星月印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开 9 印张 227 千字
1999 年 4 月第 2 版 2000 年 3 月第 3 次印刷

定价: 11.50 元

* * * *

(如有印装质量问题可更换)

编审说明

为适应建立社会主义市场经济新体制的要求，我部于1994年颁发了财经管理类5个专业和理工类7个专业教学计划。1996年初印发了以上12个专业的教学大纲。《电子线路》一书是根据新编《计算机及其应用》专业教学计划和教学大纲的要求，结合我国科技进步和财税、金融等体制改革的情况重新编写的。经审定，现予出版。本书是国内贸易部系统中等专业学校必用教材，也可供职业中专、职工中专、电视中专等选用，还可以作为业务岗位培训和广大企业职工自学读物。

参加本书编写工作的有：山东省商业学校苗滨任主编，并编写了第三、四、六章。安徽省安庆商校吴道明任副主编，并编写了第一、二章。山东省商业学校李亚平编写了第五章。

本教材由山东师范大学教授袁祖华担任主审。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者不吝赐教，以便于修订，使之日臻完善。

国内贸易部教育司

1996年8月

修 订 说 明

原国内贸易部教育司组织编写的计算机及应用专业教材，遵循本专业教学计划和教学大纲的要求，反映了本学科教学的先进水平，自出版发行以来，深受广大师生及社会读者的好评。

但是，由于计算机更新换代的加快、软件不断升级，原有教材中有些内容已不适当当前教学需要，为此，我们特请原有主编、参编人员，对本专业教材进行了系统的修订。

本次修订，仍以原部颁教学计划和教学大纲为基础，同时根据计算机更新换代后的教学实际，对原教材中一些不适宜的内容进行了删改，增加了较多的新内容，并对一些不当之处作了更正，从而使这套教材的体系更科学、结构更严谨、内容更新颖、文字更流畅。经审定，现予出版。

由于本学科的特点，加之时间较紧，书中难免有疏漏和不足之处，敬请广大读者继续赐教，以便于我们再次修订。

计算机及应用专业教材编委会

1998 年 12 月

目 录

第一章 半导体器件及其特性	(1)
第一节 半导体基本知识.....	(1)
第二节 半导体二极管.....	(7)
第三节 半导体三极管	(12)
第四节 场效应管	(26)
第五节 可控硅(SCR)	(32)
本章小节	(39)
习 题	(41)
实验一 二极管、三极管简易测试.....	(45)
附 录	(47)
第二章 低频电压放大器	(51)
第一节 基本放大电路	(51)
第二节 放大电路的基本分析方法	(57)
第三节 放大器静态工作点的稳定	(70)
第四节 多级放大器	(74)
第五节 放大器的频率特性	(82)
本章小节	(87)
习 题	(90)
实验二 低频放大器静态工作点调整	(95)
第三章 负反馈放大器	(99)
第一节 反馈的基本概念	(99)
第二节 负反馈对放大器性能的影响	(106)
第三节 负反馈放大器的基本电路.....	(116)
本章小节	(123)

习 题	(124)
实验三 负反馈放大器特性研究	(127)
第四章 正弦波振荡器	(132)
第一节 正弦波振荡的基本原理	(132)
第二节 LC 振荡器	(139)
第三节 晶体振荡器	(147)
本章小节	(153)
习 题	(154)
实验四 石英晶体振荡器的检测与调试	(157)
第五章 直流放大器与集成运算放大器	(161)
第一节 直流放大器	(161)
第二节 差动放大电路	(166)
第三节 集成运算放大器	(183)
本章小节	(199)
习 题	(199)
实验五 差动式放大器	(203)
实验六 集成运算放大器的应用	(208)
第六章 直流稳压电源	(214)
第一节 整流电路	(214)
第二节 滤波电路	(224)
第三节 串联型稳压电路	(231)
第四节 集成稳压器	(237)
第五节 开关型稳压电路	(242)
第六节 变换器电路	(247)
第七节 微型计算机电源	(249)
本章小节	(263)
习 题	(264)
实验七 单相整流和滤波电路	(267)
实验八 直流稳压电源的焊接与调试	(269)

第一章 半导体器件及其特性

本章主要是介绍半导体二极管、三极管、场效应管及可控硅等工作原理、特性曲线和主要参数,为进一步学习单元电子线路打下基础。

第一节 半导体基本知识

物质按导电性能可分为导体、绝缘体和半导体三类。常用的半导体有硅、锗等材料,其导电能力虽然比导体差,比绝缘体好,但它具有热敏性、光敏性和掺杂特性,因此获得了广泛的应用。

一、半导体结构及导电特性

半导体内部结构,决定了它独特的导电性能。我们就以制造晶体管常见材料硅和锗为例,分析其结构。

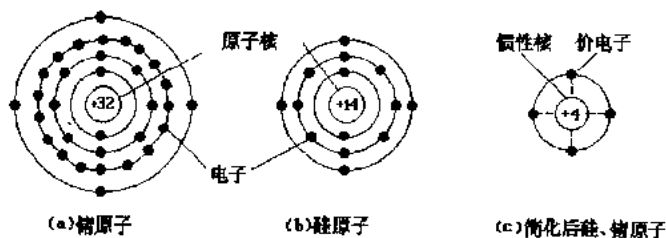


图 1—1 硅、锗原子结构平面示意图

图 1—1 是硅和锗原子结构平面示意图。硅和锗原子序数分别为 14 和 32,由图可知,各原子核外的电子是按一定规律分布在各层电子轨道上,它们最外层电子数都是四个,受到原子核的束缚力较小,通常称为价电子,所以它们都是 4 价元素。除最外层电子外,

其他各层电子受原子核的束缚力较大,很难脱离原子核,它们和原子核组成一个惯性核,净电量是 $+4$ 个电子电量,因此硅和锗原子结构简化图如图 1—1(C)所示。

硅、锗半导体经过加工,提炼成纯净的单晶半导体,称为本征半导体,其原子间排列已从杂乱无章的状态,变成了排列非常整齐的状态,它是制造晶体管的重要材料。图 1—2(a)是硅或锗单晶半导体结构平面示意图。

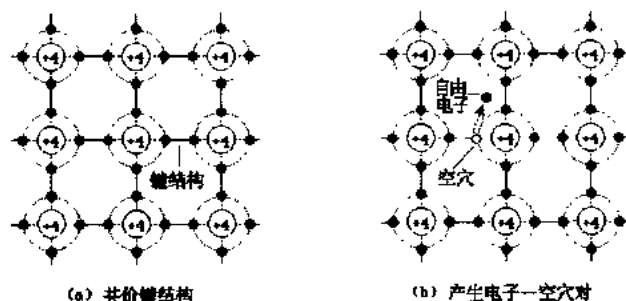


图 1—2 硅(锗)单晶结构及其载流子热运动

由图可见,各原子之间是等距离排列的,每个原子最外层有四个价电子,各原子为达到稳定状态,都要争夺邻近原子的价电子,这样一来,每相邻两个原子都共有一对价电子,电子对中任何一个电子,一方面围绕自己原子核运动,另一方面也时常出现在相邻的原子所属的轨道上,这样的电子对把两个原子连接在一起,这种原子组合形式,称为共价键结构。

共价键内价电子,所受到的束缚力并不那么紧,在温度或光照作用下,由热能或光能转化为电子的动能,部分电子挣脱束缚成为自由电子,在原来位置上就留下了一个空位,如图 1—2(b)所示,附近的共有电子(即束缚电子)容易来进行填补,当然过来的电子,又会在其原址上,留下新的空位,如此不断地进行下去,必然形成这种束缚的电子运动,然而空位是原子失去电子的结果,故显正电极性,因此可认为空位是带正电的,我们把这种空位,叫做空穴。

上述运动,相当于一个带正电的空穴,在半导体中作反方向移动,可见空穴是一种带正电的载流子。

综上所述,在一定温度下,半导体内存在着一定数量带负电的自由电子和带正电的空穴,在外加电压作用下,它们将作反方向定向运动,所以,通过它的电流是由自由电子流和空穴流两部分组成,如图 1—3 所示。这两种载流子是半导体导电的一个重要特征。

在常温下,本征半导体中自由电子和空穴的数量是非常少的,因此电路中电流很小,导电能力较差。当温度升高或光照时,价电子获得了能量而形成自由电子,同时出现等量的空穴,这种现象

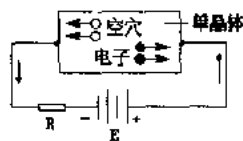


图 1—3 半导体载流子的移动

称为“热激发”,“电子—空穴”对明显增多,导电能力明显增强。可见它具有热敏性和光敏性,这是半导体导电又一重要特征。

另一方面,自由电子在运动中,与空穴相遇重新结合而消失,这种过程称为“复合”,当“电子—空穴”对增多时,“复合”的机会也随之增多,所以在一定的温度下,“电子—空穴”对数量是一定的。

二、P 型半导体和 N 型半导体

在单晶半导体中掺少量有用杂质,将会大大的改善半导体导电性能,这是半导体又一重要的特征。

(一) P 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的三价元素,例如硼(B),硼原子也会与硅原子组成共价键结构,如图 1—4(a)所示。硼是三价元素,只有三个价电子,当它与邻近的四个硅原子组成共价键时,还缺少一个价电子,在一个共价键上出现了一个空位,附近的电子很容易填补它,从而形成空穴。硼原子接受了一个电子之后也形成了带负电的离子,在晶体中不能移动。可见,掺了三价元素的半导体,具有大量的空穴,所以称它为空穴型半导体,简称为 P 型半导体。

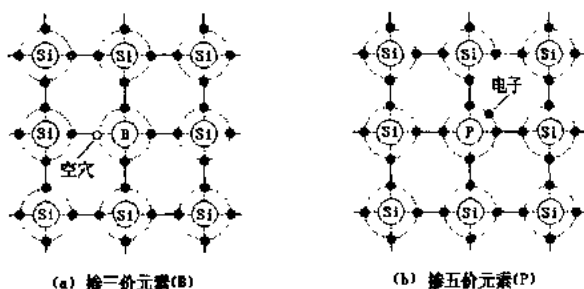


图 1—4 单晶硅中掺杂示意图

在这种半导体中,除了因掺杂产生大量空穴外,还有“热激发”所产生少量的“电子—空穴”对,因此,它还有少数的自由电子。

(二) N 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的五价元素,例如磷(P),磷原子也会与硅原子组成共价键结构,如图 1—4(b)所示。磷原子是五价元素,有五个价电子,当它与邻近的四个硅原子组成共价时,还多余一个价电子,由于它没有被束缚在共键内,只受磷原子核的吸引,所以受到的束缚力小得多,很容易形成自由电子。磷原子失去了电子后,形成不能移动的正离子。可见,这种半导体中具有大量的电子,所以称它为电子型半导体,简称为 N 型半导体。同样,其中也含有因“热激发”而形成的少数的空穴载流子。

综合以上讨论,可总结如下:

P 型半导体中带电粒子有:

空穴—多数载流子

电子—少数载流子

负离子—杂质原子接受电子后形成

N 型半导体中带电粒子有:

电子—多数载流子

空穴—少数载流子

正离子—杂质原子失去电子后形成

应当指出,两种类型半导体内部杂质原子和硅原子都是中性的,在掺杂过程中既不失去电荷,也没有从外界得到电荷,所以整个半导体内部,正负电荷是平衡的,对外不显电性。

三、PN 结及其单向导电性

(一) PN 结形成

一块单晶半导体由于两部分掺杂不同,一边是 P 型半导体,另一边是 N 型半导体, P 型区中有大量的空穴,而 N 型区中有大量的电子,交界面两边载流子浓度不等,差别很大,各自必然要向对方进行扩散,从而产生多数载流子的扩散运动。在扩散过程中,分别与对方载流子发生复合现象,载流子复合后,使交界面两边暴露出带有相反电荷不能移动的杂质离子,形成一个空间电荷区,如图 1—5(a)所示。

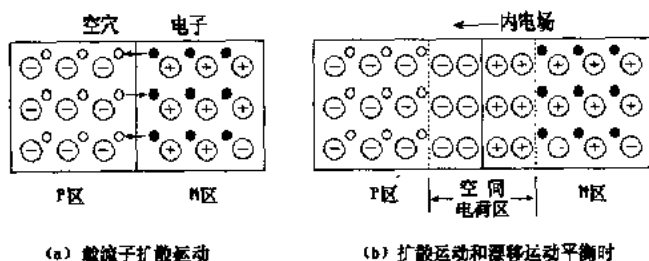


图 1—5 PN 结形成过程

靠近 P 区一边带负电, N 区一边带正电, 由此产生的内电场, 其方向是 N 区指向 P 区, 它与电子、空穴扩散方向相反, 在内电场作用下, 部分载流子作反方向运动, 我们把这种运动, 称为漂移运动。在扩散开始时, 扩散运动占优势, 随着扩散的进行, 暴露出来带电粒子增多, 内电场逐渐增强, 漂移运动不断加强, 最终, 二运动将会达到动态平衡, 从而使交界面处保持一定宽度空间电荷区, 称为 PN 结。由于它阻碍着多数载流子的扩散运动, 所以有时也称它为阻挡层, 如图 1—5(b)所示。空间电荷区电位差的大小, 一般硅制

成的 P—N 结约为 0.6~0.8 伏,锗约为 0.2~0.3 伏。

(二) PN 结单向导电特性

给 PN 结加上正向电压(外电源正极接 P 区,负极接 N 区),P 区电位高于 N 区,称为正向偏置(简称正偏),这时外加电场方向与内电场方向相反,因而削弱了内电场,使空间电荷区变窄,大大有利于扩散运动进行,多数载流子就能顺利地通过 PN 结,形成了较大的正向电流,此时表明 PN 结正向电阻很小,如图 1—6(a)所示。

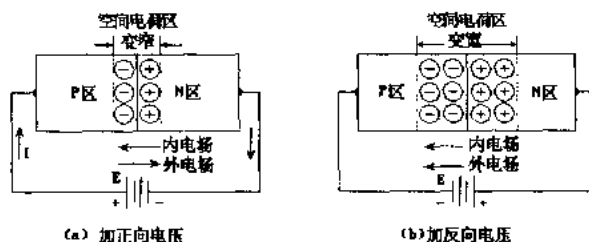


图 1—6 PN 结单向导电性

相反,给 PN 结加上反向电压(外电源正极接 N 区,负极接 P 区),N 区电位高于 P 区,称为反向偏置(简称反偏),这时外加电场方向与内电场方向相同,因而加强了内电场,使空间电荷区变宽,这不利于扩散运动的进行,漂移大于扩散,直至多数载流子扩散运动无法进行下去,在反电场作用下,只有少数载流子形成微小的电流,这种电流几乎为 0,表明 PN 结反向导电电阻变得很大,如图 1—6(b)所示。

可见,PN 结具有单向导电特性,它是半导体器件工作原理的重要基础。

综上所述,半导体具有以下导电特性:

第一,半导体内存在着电子和空穴两种载流子,在外电场作用下,电路中电流等于电子流和空穴流之和。

第二,半导体具有热敏性和光敏性。当温度升高或光照辐射,

则其电阻下降,导电能力增强。

第三,半导体中掺入微量有用杂质,将会使其导电能力显著增强。

第四,在半导体内形成 PN 结时,具有单向导电特性。

第二节 半导体二极管

一、半导体二极管的结构及种类

半导体二极管是由一个 PN 结,加上两条引线和封装管壳制成的。通常用图 1—7(a)所示符号表示。图中箭头方向代表正向电流的方向。

半导体二极管按不同的分类方法,有以下类型:

1. 按 PN 结使用材料分,有锗二极管和硅二极管,前者,工作温度较低,可制成小功率二极管,如 2AP 系列二极管;后者,工作温度较高,可制成中、大功率二极管,如 2CZ 系列二极管。

2. 按 PN 结结构分,有点接触和面接触两种二极管,前者,由于接触面小,因此允许通过的电流较小、结电容也小,所以一般用于小电流高频电路,如检波等;后者,因接触面大,允许通过较大电流,但结电容较大,一般用于低频电路,如整流等。

3. 按用途分,有检波二极管、整流二极管、变容二极管、稳压二极管、开关二极管等名目繁多,但它们伏安特性基本相似。

二、半导体二极管伏安特性

二极管伏安特性是反映加在二极管两端的电压 U 与通过二极管的电流 I 之间的关系

$$I = f(U)$$

图 1—7(b)是典型的硅和锗二极管伏安特性。现按其特性作以下说明:

1. 当二极管两端电压 U 为零时,通过其电流 I 也为零。这是因为 PN 结内电场所产生的漂移运动和多数载流子扩散运动达到

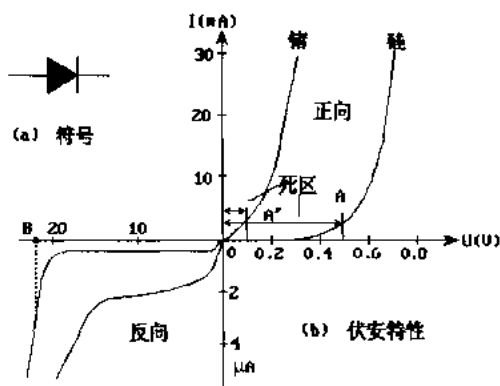


图 1—7 二极管符号及伏安特性曲线

动态平衡,漂移电流与扩散电流大小相等,方向相反,所以通过 PN 结电流为零。

2. 正向特性

当二极管加上正向电压,通过二极管的电流随着电压增加而增大。但起始一段外加电压很小时,不足以克服内电场对扩散电流所产生的阻力,所以电流增长很慢,几乎为零,表现出电阻较大;当电压增加到能抵消 PN 结内电场的作用后,电流开始迅速增长,所以曲线上出现拐点(图中的 A 点),此时对应电压称为死区电压或称阈值电压,硅管约为 0.5 伏,锗管约为 0.1 伏,拐点以前称为死区。如果正向电压足够大,将引起过大的电流,会使二极管烧坏。

二极管在正常使用条件下,正向电阻很小,电流较大,并且电流在较大的范围内变化时,其两端电压变化甚微,近为恒压特性,所以,硅二极管管压降为 0.6~0.7 伏,锗二极管为 0.2~0.3 伏,这是硅和锗二极管的明显区别之一。

3. 反向特性

当二极管加上反向电压时,二极管只有微小电流流过,近似截

止。因为少数载流子在反向电场作用下,产生漂移运动结果,由于少数载流子数量有限,所以反向电流几乎不随反向电压增加而增大,故称它为反向饱和电流。由于少数载流子随温度升高而增加,所以二极管反向饱和电流大小与环境温度有关。在常温下,硅二极管的反向饱和电流远小于锗二极管,这是它们又一明显的差别。

当反向电压增加到一定数值(图中的 B 点),二极管反向电流突然上升,这种现象称为击穿。它是由于强大的外电场,把被束缚的价电子,从共价键上强行拉出来(称齐纳击穿),或者是由于通过 PN 结少数载流子被外电场急剧加速,获得了足够的动能而把共价键内的价电子撞击出来,并引起连锁反应(称雪崩击穿),从而产生了大量的电子和空穴,于是通过 PN 结的反向电流突然增大。这时很容易造成管子损坏,一般不允许出现这种现象。只有当二极管在制造上,采取特殊工艺和在电路中采用限流措施条件下,才有可能工作在击穿区,如稳压二极管。

综上所述,可得出以下结论:

(1)二极管的伏安特性是非线性的。在二极管两端加上电压与通过二极管电流的比值,不是定值,随着电压极性和数值的不同有着不同的比值。

(2)二极管具有单向导电特性,粗略地说,加正向电压时,电阻很小,使电路导通;加反向电压时,电阻很大,使电路截止。

(3)硅二极管和锗二极管特性有两个重要区别:第一,正常导通时,硅二极管的管压降约为 0.6 ~ 0.7 伏;锗二极管则为 0.2 ~ 0.3 伏。第二,硅二极管反向饱和电流远小于锗二极管,二者相差几十倍,所以,硅二极管工作时热稳定性较好。

三、半导体二极管电阻

由于二极管伏安特性为非线性,它的电阻不是一个定值,而且在直流和交流两种工作状态下所表现电阻值也不一样。

(一)直流电阻(静态电阻) R_D

加在二极管两端的电压 U 与通过二极管的电流 I 之比,称为

二极管的直流电阻。

$$R_D = \frac{U}{I}$$

如图 1—8 所示,例如,二极管工作在 Q 点时, $U_{DQ} = 0.7V$, $I_{DQ} = 15mA$ 则

$$R_{DQ} = \frac{U_{DQ}}{I_{DQ}} = \frac{0.7V}{15mA} = 47\Omega$$

二极管的直流电阻,在曲线上也可用坐标原点到 Q 点直线的斜率的倒数来表示,即

$$R_{DQ} = \frac{1}{\tan \alpha}$$

图 1—8 二极管电阻

(二)交流电阻(动态电阻) r_D

在工作点附近,二极管两端电压变化量与其对应的电流变化量的比值,称为二极管的交流电阻。

$$r_D = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

例如,图 1—8 中 Q 点处交流电阻

$$r_{DQ} = \frac{\Delta U_Q}{\Delta I_Q} = \frac{0.1V}{12mA} \approx 8\Omega$$

二极管的交流电阻也等于工作点处切线斜率的倒数。

$$r_Q = \frac{1}{\tan \beta}$$

二极管在不同工作点上,直流电阻和交流电阻都不相同。正向工作时,一般在同一工作点处,交流电阻比直流电阻小,反向工作时,交、直流电阻都很大。

四、二极管主要参数

为了正确选择和使用二极管,必须了解二极管性能参数,它主

