

21 世纪 高等学校本科系列教材

模拟电子技术

(14)

傅晓琳 主 编

吴培明 副主编



重庆大学出版社

模拟电子技术

傅晓林 主 编

吴培明 副主编

重庆大学出版社

内 容 提 要

全书共分8章,主要介绍半导体二极管和三极管、放大电路基础、场效应管及其放大电路、功率放大电路、集成运算放大器及其应用、反馈放大电路、正弦波振荡电路、直流稳压电源等,书中习题丰富,每章末有小结。附录中对 Electronics Workbench 5.0 版(EWB)的基本操作、仪器使用、常用分析方法等做了介绍,给出了许多的模拟电子电路仿真实例。

本书可作为高等学校电气工程、电子信息工程、计算机科学与技术、机电一体化、机械设计制造及自动化等专业“模拟电子技术”课程的教材或教学参考书,也可作为成人教育、自学考试同类专业自学用书,还可供有关工程技术人员和广大计算机爱好者学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/傅晓林主编. —重庆:重庆大学出版社,2002. 10

电气工程及其自动化专业本科系列教材

ISBN 7-5624-2448-9

I. 模... II. 傅... III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 056691 号

模拟电子技术

傅晓林 主 编

吴培明 副主编

责任编辑:曾显跃 版式设计:曾显跃

责任校对:何建云 责任印制:张永洋

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400044

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:20.75 字数:518 千

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2448-9/TN·53

定价:25.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

目前,电子技术和计算机应用技术的发展非常迅速,教学改革浪潮汹涌澎湃,而教材改革是教学改革的重要内容,如何编写一本符合教学改革精神,具有反映电子技术的新进展而又与计算机应用技术有机结合的特色教材,无疑是一项艰巨的任务。本书就是作者根据这一思路,并总结多年教学实践经验编写的。

本书在保证基本概念、基本电路和基本分析方法的前提下,精选内容,着重具体应用,避免繁琐的公式推导,并适当介绍新器件和新电路,力求做到科学性、先进性与通俗性的有机结合。本书选用了 Interactive Image Technologies 公司优秀的 EDA 软件 Electronics Workbench 5.0 版(EWB)作为电路仿真工具,给出了大量电路仿真例题,在附录中对 EWB 的基本操作、仪器使用、常用分析方法等做了基本介绍。应用先进的多媒体教学手段,可将电子技术理论与实验教学有机融合,使读者在理论知识、计算机应用及实际动手能力诸方面均得到较好的训练。

编者希望本书具有“通俗易懂、好教好学、内容精炼、有所创新”的特色,估计会得到读者的肯定和喜爱。为了使读者更好地掌握基本理论和基本分析方法,培养分析问题和解决问题的能力,每章最后编写了本章小结,以帮助学生归纳整理所学知识的重点和难点,每章还选取了适量的习题,并在书末附有部分习题参考答案,以便学生自我检测学习情况。

本书第 1 章、第 2 章、第 3 章由傅晓林编写并担任主编,第 4 章、第 6 章及附录部分由吴培明编写并担任副主编,第 5 章由陈明杰编写,第 7 章、第 8 章由肖东编写。

重庆大学唐治德教授审阅了全部书稿并提出了宝贵的修改意见,在此,表示衷心感谢。

由于编者受时间和水平所限,错漏难免,恳请读者和同仁指正。

编 者

2002 年 7 月

目 录

第 1 章 半导体二极管和三极管	1
1.1 半导体基础知识	1
1.2 半导体二极管	7
1.3 特殊二极管简介	9
1.4 半导体双极型三极管	13
小结	21
习题	22
第 2 章 放大电路基础	25
2.1 放大电路的基本概念和性能指标	25
2.2 共射基本放大电路	28
2.3 放大电路的分析方法	30
2.4 共集电极放大电路和共基极放大电路	43
2.5 多级放大电路	50
2.6 放大电路的频率响应	55
小结	62
习题	63
第 3 章 场效应管及其基本放大电路	70
3.1 结型场效应管	70
3.2 绝缘栅型场效应管	74
3.3 场效应管的主要参数及特点	79
3.4 场效应管基本放大电路	81
小结	88
习题	88
第 4 章 功率放大电路	91
4.1 功率放大电路的特点	91
4.2 互补对称功率放大电路	93
4.3 集成功率放大电路简介	106
小结	110
习题	111
第 5 章 集成运算放大器及其应用	116
5.1 概述	116
5.2 集成运算放大器的电流源	117
5.3 差动放大电路	120

5.4	集成运算放大器	132
5.5	理想运算放大器的条件和分析方法	137
5.6	运算电路	139
5.7	电压放大电路	145
5.8	有源滤波电路	148
5.9	电压比较电路	159
5.10	非正弦信号产生电路	163
	小结	167
	习题	168
第 6 章	反馈放大电路	178
6.1	反馈的基本概念与分类	178
6.2	负反馈放大电路的组态和方框图表示法	183
6.3	负反馈放大电路性能的改善	190
6.4	深度负反馈放大电路的计算	199
6.5	负反馈放大电路的稳定性	207
	小结	212
	习题	214
第 7 章	正弦波振荡电路	221
7.1	正弦波振荡器概述	221
7.2	RC 正弦波振荡器	224
7.3	LC 正弦波振荡器	229
7.4	石英晶体振荡器	234
	小结	238
	习题	238
第 8 章	直流稳压电源	242
8.1	直流稳压电源的基本组成	242
8.2	整流电路	243
8.3	滤波电路	246
8.4	直流稳压电路	250
8.5	开关型稳压电源	258
	小结	263
	习题	265
附录	EWB5.0C 的基本应用	269
附录 A	EWB5.0C 简介	269
附录 B	EWB5.0C 的下载和安装	270
附录 C	EWB5.0C 的工作界面	270
附录 D	虚拟仪器和电表	278
附录 E	菜单命令	292
附录 F	电路的建立和仿真	307
	部分习题参考答案	321
	参考文献	326

第 1 章

半导体二极管和三极管

半导体二极管和半导体三极管是最常用的半导体器件。本章首先介绍半导体基础知识和半导体的导电机理,然后讨论 PN 结的原理、特性,最后介绍半导体二极管、半导体三极管的工作原理、特性曲线和主要参数。对于半导体基础知识方面,应着重理解其基本概念。对于半导体器件,则要了解它们的结构和工作原理,重点掌握它们的外特性和参数,以便能正确使用和合理选择这些器件,为以后学习电子技术和分析电子电路打下基础。

1.1 半导体基础知识

在日常生活和生产实践中,有些物质(如银、铜、铝、铁等)很容易导电,这些物质叫做导体。另一些物质(如塑料、有机玻璃、橡胶等)很不容易导电,这类物质叫做绝缘体。而半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质,常见的半导体有锗、硅、硒等元素及其合成物,各种金属的氧化物及硫化物等都是半导体。

很多半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。例如有些半导体(如钴、锰、镍等的氧化物)对温度的反应特别灵敏,当环境温度升高时,它们的导电能力增强。利用这种特性就可做成各种热敏电阻。又如有些半导体(如镉、铅等的硫化物与硒化物)受到光照时,它们的导电能力变得很强;当无光照时,又变得像绝缘体那样不导电。利用这种特性就可做成各种光敏电阻。更重要的是,如果在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后,它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。例如,在纯硅中掺入百万分之一的硼后,硅的电阻率就从 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右。利用这种特性就可做成各种不同用途的半导体器件,如半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管等。不仅如此,选择掺入不同的杂质,还可制成不同类型的半导体。

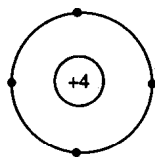


图 1.1 硅和锗的简化原子结构模型

1.1.1 本征半导体

本征半导体就是非常纯净的、不含杂质的、晶体结构完整的半导体。

硅和锗都是 4 价元素,它们原子的最外层电子都是 4 个,称为价电子,它们受原子核的束

缚力最小。如将内层电子与原子核看成一个稳定的整体,称为惯性核,则惯性核带有4个正电荷,可用图1.1来表示硅或锗的简化原子结构模型。

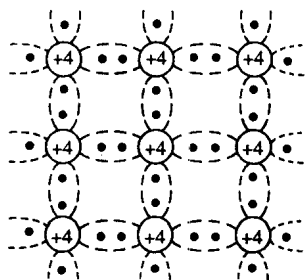


图1.2 硅或锗的共价键结构示意图

硅或锗制成单晶体后,晶体中原子的价电子不仅受到原来所属原子核的作用,而且还受到相邻原子核的吸引,即1个价电子为相邻的两个原子核所共有,形成所谓“共价键”结构。共价键指的是两个相邻原子各拿出1个价电子作为共有价电子所形成的束缚作用。因此,每个硅或锗的原子都以对称的形式和其邻近的4个原子通过共价键紧密地联系起来,如图1.2所示。图中两条虚线表示原子间的共价键。

原子间的共价键具有很强的结合力,在绝对温度为零度($T=0\text{K}$,相当于 -273°C)且无外界激发的条件下,价电子不能挣脱共价键的束缚,也就不能自由移动。本征半导体中虽有大量的价电子,但没有自由电子,此时半导体是不导电的。当温度升高或受光照射时,价电子不断从外界获得一定的能量,少数价电子因获得的能量较大而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时在原来的共价键的相应位置留下一个空位,这个空位称为“空穴”,如图1.3所示。图中 a 处为空穴。显然,自由电子和空穴是成对出现的,所以称它们为电子空穴对。在热或光的作用下,本征半导体中产生电子空穴对的现象,称为本征激发。

当共价键中失去一个价电子出现一个空穴时(如图1.3中 a 处),与其相邻处于热运动状态的价电子很容易填补到这个空穴中(其运动如图1.3箭头所示),使该价电子原来所在的共价键中出现一个空穴(如图1.3中 b 处),这样空穴实际上便从 a 处移至 b 处(与图1.3箭头所示运动相反);同样,邻近的价电子(图中 c 处)又可填补 b 处的空穴,空穴又从 b 处移到 c 处。因此,空穴可以在半导体中自由移动,其实是价电子填补空穴的运动(二者运动方向相反)。在电场作用下,大量的价电子依次填补空穴的定向运动也形成电流。为了区别于自由电子的运动,将这种价电子的填补运动称为空穴运动,并将空穴看成是一种带正电的载流子,它所带电量与电子相等,符号相反。

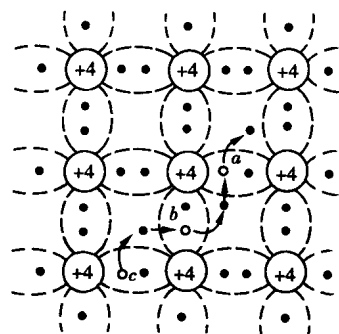


图1.3 本征激发产生自由电子和空穴及空穴的移动

由此可见,在本征半导体中存在两种载流子,即带负电的电子载流子和带正电的空穴载流子,而金属导体中只有一种载流子,即电子载流子。

在本征激发产生电子空穴对的同时,自由电子在运动中有可能和空穴相遇,重新被共价键束缚起来,电子空穴对消失,这种现象称为“复合”。显然,激发和复合是矛盾着的双方。在一定的温度下,激发和复合虽然都在不停地进行,但最终将达到动态平衡状态,此时半导体中的载流子浓度维持在一定数目。由于本征激发产生的电子空穴对的数目很少,载流子浓度很低,其导电能力很弱。

本征半导体中载流子的浓度除与半导体材料本身的性质有关以外,它还与温度密切相关,随着温度的升高,载流子的浓度基本上按指数规律增加。例如,对于硅材料,温度每升高大约 8°C ,载流子的浓度增加一倍;对于锗材料,温度每升高大约 12°C ,载流子浓度增加一倍。

1.1.2 杂质半导体的导电特性

本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力很低。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),形成杂质半导体后,其导电性能会大大增强。

由于掺入的杂质不同,杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

(1) N 型半导体

N 型半导体是在本征半导体硅(或锗)晶体内掺入微量的 5 价元素磷(或砷)构成的。由于所掺入的磷原子数量极少,并不改变硅单晶的共价键结构,只是使某些晶格结点上的硅原子被磷原子所取代,如图 1.4 所示。磷原子有 5 个价电子,除了 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子组成共价键外,剩下的 1 个价电子不参加共价键,只受自身原子核的微弱吸引。在室温下这个价电子因受热或其他激发获得能量后,它可以摆脱原子核的束缚而成为一个自由电子。几乎每一个磷原子都能提供一个这样的自由电子,失去价电子的磷原子本身成为一个带正电的不能移动的正离子,不参与导电。磷原子仅提供了一种电子载流子,称磷为施主杂质。被掺入杂质的半导体中,自由电子的数目远大于空穴的数目,所以,这类杂质的半导体称为电子型半导体,或称 N 型半导体。

在 N 型半导体中,同样存在着本征激发的现象,有电子空穴对的产生,但比起掺杂而产生的电子来说其数量少得多,传递电流的主要载流子是电子,故电子称为多数载流子(简称“多子”),空穴相应地称为少数载流子(简称“少子”)。而且由于电子的增多,空穴遇到电子而被复合的概率增大,N 型半导体中空穴的浓度远小于同温度下本征半导体中空穴的浓度。

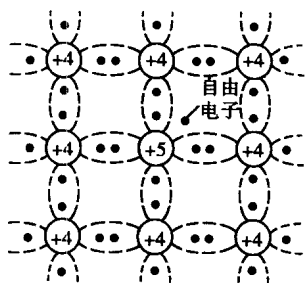


图 1.4 N 型半导体结构

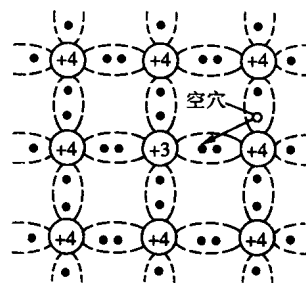


图 1.5 P 型半导体结构

(2) P 型半导体

如果在硅(或锗)晶体中掺入微量的 3 价元素如硼(或铝)后,由于硼的价电子只有 3 个,当它和周围的硅原子结合形成共价键时,因缺少一个电子而出现了空位,在受到热激发而获得能量时,硼原子很容易从相邻硅原子的共价键中夺取一个价电子而形成稳定结构,硼原子接受一个电子变成带负电的不能移动的负离子,不参与导电,同时硅原子的共价键中失去一个价电子便出现了新的空位,这就是空穴,如图 1.5 所示。在常温下绝大多数硼原子均可接受硅晶体中的一个价电子而产生一个空穴,从而提供了与硼原子数相等的空穴,硼原子接受电子称为受主杂质。受主杂质仅产生空穴一种载流子。这种掺入 3 价元素的杂质半导体中,空穴是多数载流子,所以称为空穴型半导体,或称 P 型半导体。

在 P 型半导体中,也同样存在着本征激发的现象,有电子空穴对的产生,但比起掺杂产生的空穴来说数量少得多,传递电流的主要载流子是空穴,故空穴称为多数载流子,电子相应地

称为少数载流子。而且由于空穴的增多,电子遇到空穴而被复合的概率增大,P型半导体中电子浓度远小于同温度下本征半导体中电子的浓度。

应当注意,杂质半导体中多子浓度主要取决于掺入的杂质浓度,因此多子浓度受温度的影响很小。而少子浓度主要与本征激发有关,因此,少子浓度与温度、光照等外界因素有密切关系,这些对半导体器件的性能将产生影响。在杂质半导体中,由于多子所带的电荷总量与少子及离子所带的相反极性的电荷总量相等,因此,从整体上看,杂质半导体仍保持电中性。

1.1.3 PN 结

(1) PN 结的形成

单纯的P型或N型半导体并不能做成半导体器件。若在一块本征半导体上,两边掺入不同的杂质,并分别成为P型和N型半导体,则在两种半导体的交界面附近形成一层很薄的特殊导电层——PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础。

图1.6所示的是一块晶片,两边分别形成P型和N型半导体。由于P区空穴浓度大,而N区的空穴浓度小,因此,空穴要从浓度大的P区向浓度小的N区扩散,如图1.6(a)所示。扩散到N区的空穴与N区的多子电子复合而消失。在交界面附近的P区留下杂质负离子,形成负空间电荷区。同样,N区的自由电子要向P区扩散,扩散到P区的电子与P区的多子空穴复合而消失,在交界面附近的N区留下杂质正离子,形成正空间电荷区,如图1.6(b)所示。这样,在P型半导体和N型半导体交界面的两侧就形成了一个空间电荷区,这个空间电荷区就是PN结。

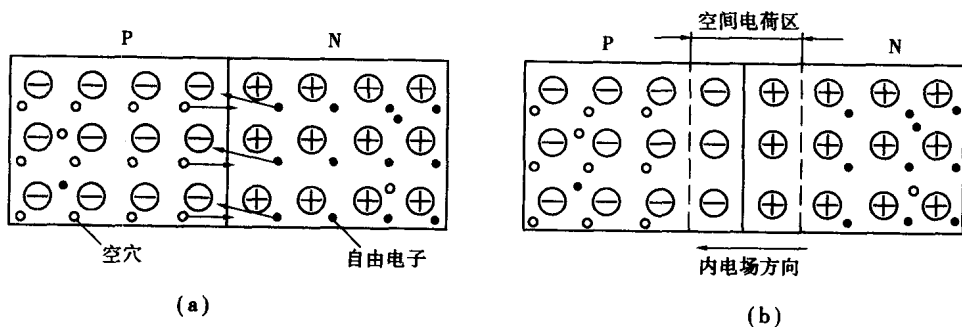


图 1.6 PN 结的形成

(a)多数载流子的扩散运动 (b)形成了一个空间电荷区

形成空间电荷区的正负离子虽然带电,但是它们不能移动,不参与导电。另外,这区域内多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,所以空间电荷区又称为耗尽层,它的电阻率很高。

空间电荷区产生后,在交界面两侧形成了一个电场,其方向从带正电的N区指向带负电的P区,称为内电场,如图1.6(b)所示。由P区向N区扩散的空穴在空间电荷区将受到内电场的阻力,而由N区向P区扩散的自由电子也将受到内电场的阻力,即内电场对多数载流子(P区的空穴和N区的自由电子)的扩散运动起阻挡作用,所以空间电荷区又称为阻挡层。对少数载流子(P区的自由电子和N区的空穴)来说,内电场则可推动它们越过空间电荷区,进

入对方区域。少数载流子在内电场作用下的这种有规则的运动称为漂移运动。扩散运动和漂移运动是互相联系的,在开始形成空间电荷区时,多数载流子的扩散运动占优势。但在扩散运动进行过程中,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐步加强。于是在一定条件下(例如温度一定),多数载流子的扩散运动逐渐被减弱,而少数载流子的漂移运动则逐渐得到增强。最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡,PN 结就处于相对稳定的状态,空间电荷区的宽度不再变化。

(2) PN 结的单向导电性

若在 PN 结两端接上外加电源,则称该 PN 结被偏置。外加电源有两种接法:一种是电源正极接 P 区,电源负极接 N 区,称为加正向电压或正向偏置,简称正偏;另一种是电源负极接 P 区,电源正极接 N 区,称加反向电压或反向偏置,简称反偏,它们分别如图 1.7(a)、(b)所示。

正偏时,外电场与内电场方向相反,因此内电场被削弱,PN 结的原有平衡状态被打破。在外电场作用下,多子(P 区的空穴、N 区的电子)被推向耗尽层,分别与耗尽层中一部分负、正离子中和,使空间电荷减少,耗尽层变窄,如图 1.7(a)所示,这一结果就有利于多子的扩散而不利少子的漂移。因此,多子可源源不断越过 PN 结形成较大的电流,少子的漂移电流则很小,PN 结中的电流主要是扩散电流,其方向是从 P 区到 N 区(外电路上则是流入 P 区)。正偏时 PN 结流过的电流 I 称为正向电流。由于正向电流较大,则 PN 结对外电路呈较小的电阻,称为正向电阻,这种状态称为 PN 结处于导通状态。

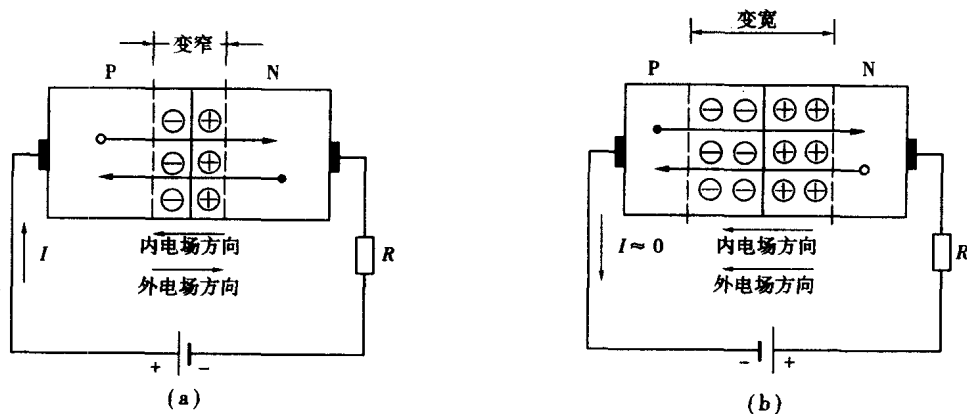


图 1.7 外加电压时的 PN 结

(a) 正偏 (b) 反偏

反偏时,外电场与内电场方向一致,因此使内电场得到加强,PN 结的原有平衡状态也被打破。在外电场的作用下,多子向远离耗尽层的方向运动,使空间电荷增多,耗尽层变宽,如图 1.7(b)所示,这对多子的扩散不利,却有利于少子的漂移。由于扩散很难进行,因此,PN 结中的电流主要是少子形成的漂移电流,但由于少子的浓度很低,故漂移电流很小,其方向是从 N 区到 P 区(外电路上则是流入 N 区),人们把反偏时 PN 结流过的电流称为反向电流(图中仍用 I 表示)。由于反向电流很小,则 PN 结对外电路呈现为一个很大的电阻,称为反向电阻。此时 PN 结基本上是不导电的,这种状态称为 PN 结处于截止状态。由于少子浓度很低,只要外加不高的反向电压,绝大多数的少子都参与导电,所以,随着反向电压的升高,在一定的温度下,反向电流几乎保持不变,故称为反向饱和电流,用 I_s 表示。反向饱和电流虽然很小,但受温

度影响很大。

总之,正偏时 PN 结导通,电流较大,电阻较小;反偏时 PN 结截止,反向电流很小,电阻很大,这就是 PN 结的单向导电性。

(3) PN 结的反向击穿

当加到 PN 结上的反向电压增高到一定数值时,反向电流会突然激增,这种现象称为 PN

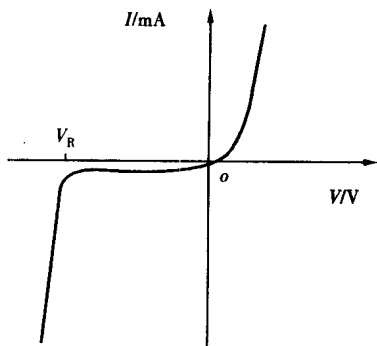


图 1.8 PN 结反向击穿

结反向击穿,如图 1.8 所示。发生击穿所需的反向电压称为反向击穿电压,用 V_R 表示。反向击穿的特点是:随着反向电流急剧增加,PN 结的反向电压值增加很少。

PN 结的击穿从机理上可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种类型。对硅材料的 PN 结来说,当反向电压超过 8V 时,PN 结内电场很强,这可使漂移过 PN 结的少数载流子获得足够大的动能,它们能把共价键中的价电子撞出来,生成为新的电子、空穴对。新的载流子又被电场加速,再去碰撞别的原子,形成连锁反应造成载流子激增,反向电流雪崩式的迅速增大,故这种击穿称为雪崩击穿。对一些掺杂浓度很

高的 PN 结,空间电荷区非常薄,加上不高的反向电压(如小于 5V)所形成的电场就足以把电子从共价键中拉出来,形成大量的电子、空穴对,使反向电流剧增,这种击穿称为齐纳击穿。当外加反向电压在 5~8V 时,两种击穿可能同时存在。

上述两种击穿现象都是电击穿。PN 结击穿后,只要电击穿区不因电流过大而烧坏,当反向电压降到击穿电压的绝对值以下后,PN 结的性能仍可恢复到击穿前的状态,电击穿过程是可逆的。

此外,当反向电流过大时,消耗在 PN 结上的功率较大,引起 PN 结温度上升,直到过热而造成 PN 结永久性损坏的击穿,称为热击穿。这种“烧管”的热击穿是不可逆的,应尽量避免。

(4) PN 结的电容效应

PN 结除了具有单向导电性以外,当加在 PN 结上的电压发生变化时,由于 PN 结中储存的电荷量也随之发生变化,因此,它还具有一定的电容效应。PN 结的电容效应分为两部分:即势垒电容(耗尽层电容)和扩散电容。

1) 势垒电容 C_b

在空间电荷区内,靠 P 区的一边聚集着带负电的离子,靠 N 区一边聚集着带正电的离子,这种结构非常类似于充电后的平行板电容器。这个电容称为势垒电容,用 C_b 表示。空间电荷区的宽度和空间电荷量随 PN 结两端的外加电压变化而改变。PN 结两端反向电压增高,耗尽层变宽,空间电荷量增加,相当于电容“充电”;PN 结反向电压减低,耗尽层宽度变窄,空间电荷量减少,相当于电容“放电”。

2) 扩散电容 C_d

PN 结正向偏压时,多数载流子的扩散运动使多数载流子越过 PN 结扩散到对方区域内,在 PN 结外侧形成电荷的堆积,外加电压改变时,将引起这些电荷量的变化,由此而形成的电容效应称为扩散电容,用符号 C_d 表示。正向电压变化时,相应地有电荷的“流入”和“放出”,

等效于电容的充放电过程。

一般情况下,耗尽层的势垒电容和扩散电容的值都很小,通常为几皮法至几十皮法,有些结面积大的可达几百皮法。这些电容效应,对低频电路的影响不大,但对高频电路的影响却不可忽略。耗尽层的势垒电容和扩散电容都是非线性电容。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构和类型

半导体二极管是由一个 PN 结及它所在的半导体再加上电极引线和管壳构成的。二极管的种类很多,按材料来分类,最常用的有硅管和锗管两种;按结构来分类,有点接触型和面接触型两种;按用途来分类,有普通二极管、整流二极管、开关二极管、稳压二极管和发光二极管等多种类型。

从二极管的工艺结构来看,点接触型二极管的特点是结面积小,因此结电容小,允许通过的电流也小,适用于高频电路或小功率电路的工作,也可用作数字电路中的开关元件。面接触型二极管的特点是结面积大,结电容大,允许通过较大的电流。

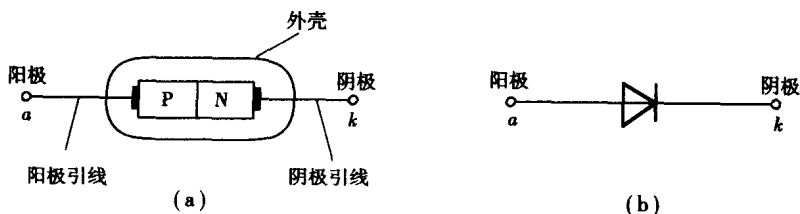


图 1.9 二极管的组成和符号

二极管的组成和符号如图 1.9 所示,P 区引出线为阳极(正极),N 区引出线为阴极(负极),箭头表示正向电流方向。一般在二极管的管外壳上标有符号或色点、色圈来表示二极管的极性。

1.2.2 伏安特性

二极管的核心部分既然是由一个 PN 结构成,它当然就具有单向导电特性。图 1.10 为二极管的伏安特性曲线。由图可见,当外加正向电压且电压很低时,由于外电场还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力,故正向电流很小,几乎为零。当正向电压超过一定数值后,内电场被大大削弱,电流增长很快。这个一定数值的正向电压称为死区电压或导通电压,其大小与材料及环境温度有关。在室温下,硅管的死区电压约为 0.5V,锗管死区电压约为 0.1V。只有当外加电压高于死区电压时二极管才真正处于导通状态。当正向电流稍大时,正向特性几乎与横轴垂直,说明这时电流在较大范围变化时,二极管两端电压(称为管压降)变化很小。通常,硅管的管压降为 0.6~0.8V,锗管的管压降为 0.1~0.3V。

在二极管上加反向电压时,由于少数载流子的漂移运动,形成很小的反向电流。反向电流有两个特点:一是它随温度的上升增大很快,即具有热敏特性;二是在反向电压不超过某一范

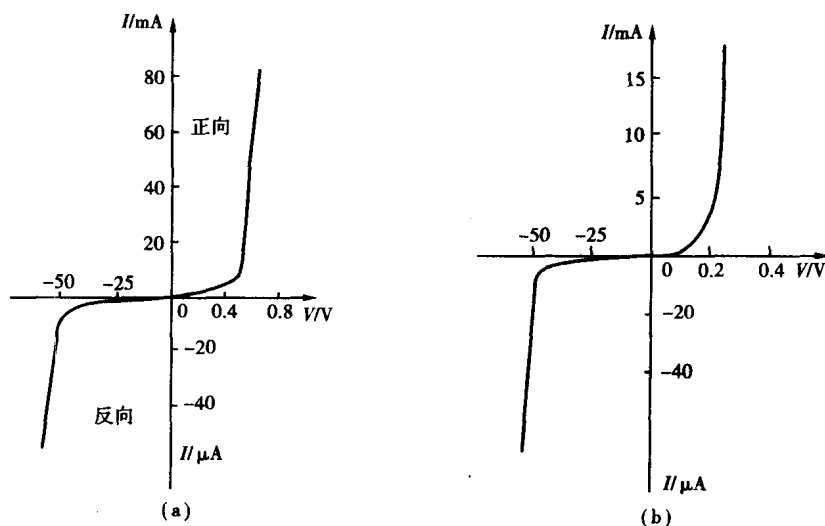


图 1.10 二极管的伏安特性曲线
(a) 2CP10 硅二极管 (b) 2AP2 锗二极管

围时,反向电流的大小基本不随反向电压的增高而变化,数值基本恒定,故通常称它为反向饱和电流。而当外加反向电压过高而达到反向击穿电压时,反向电流将突然增大,二极管失去单向导电性,这种现象称为反向击穿。二极管被反向击穿后,一般不能恢复原来的性能,便失效了。二极管的反向击穿电压因型号而定,一般在几十伏以上(高反压二极管可达几千伏),但只要采取适当的限流措施,也能保证二极管的电击穿不会因为变成热击穿而损坏。

1.2.3 二极管的主要参数及其选择

(1) 二极管的主要参数

二极管(也包括其他电子器件)的特性除了用伏安特性曲线表示外,还可以用它的参数来表示。参数用于定量描述管子的性能,因此,它是正确使用和合理选择管子的依据。参数可以直接测量,也可从半导体器件手册中查得。

二极管的主要参数有:

1) 最大整流电流 I_F

I_F 指长期运行时允许通过的最大正向平均电流。 I_F 由二极管允许的温升所限定,若通过二极管的平均电流超过这个数值,将引起 PN 结过热而使二极管损坏。

2) 最大反向工作电压 V_R

V_R 是管子使用时允许加的最大反向电压。反向电压超过这个数值,二极管就有发生反向击穿的危险。通常将这个参数规定为反向击穿电压的一半。如 2CP10 硅二极管的最大反向工作峰值电压为 25V,而反向击穿电压约为 50V。点接触型二极管的反向工作峰值电压一般是几十伏,面接触型二极管可达几百伏以上。

3) 反向电流 I_R

I_R 是指二极管未发生击穿时的反向电流值,也称反向漏电流。 I_R 小说明二极管的单向导电性能好。通常手册上给出的是最大反向工作电压下的反向电流值。这个参数受温度的影响

很大。

4) 最高工作频率 f_M

二极管在外加高频交流电压下工作时,由于PN结的电容效应,单向导电作用退化。 f_M 就是指二极管单向导电作用开始明显退化时交流信号的频率。

应当指出,由于制造工艺的限制,即使是同一型号的管子,参数的分散性也很大,手册上给出的往往是参数的范围。另外,手册上的参数是在一定的测试条件下测得的,使用时要注意这些条件,若条件改变,则相应的参数值也会发生变化。

(2) 二极管的选择

无论是设计电路还是修理电子设备,都会面临一个如何选择二极管的问题。选择时必须注意以下几点:

1) 设计电路时,根据电路对二极管的要求查阅半导体器件手册,从而确定选用的二极管型号。确定选用管子型号时,选用的二极管极限参数 I_F , V_R , f_M 应分别大于电路对二极管相应参数的要求。一般应注意:要求导通电压低时选锗管,要求反向电流小时选硅管,要求反向击穿电压高时选硅管,要求工作频率高时选点接触型管,要求工作环境温度高时选硅管。

2) 在修理电子设备时,如果发现二极管损坏,则用同型号的管子来替换。如果找不到同型号的管子而改用其他型号二极管来替代时,则替代管子的极限参数 I_F , V_R , f_M 应不低于原管,且替代管子的材料类型(硅管或锗管)一般应和原管相同。

3) 选用二极管的一般依据是:

$$I < I_F$$

$$V < V_R$$

式中: I 为二极管实际工作电流, V 为二极管实际反向工作电压。

1.3 特殊二极管简介

除上述的普通二极管外,在某些电路中还应用到若干种特殊的二极管。常用的特殊二极管有稳压二极管、变容二极管、光电二极管、发光二极管等,下面分别作简要介绍。

1.3.1 稳压二极管

稳压二极管简称稳压管。伏安特性曲线和符号如图 1.11 所示。它实际上是工作在反向击穿状态的面接触型硅二极管,与普通二极管的区别是它具有陡峭的反向击穿特性。加在稳压管两端的反向电压从零开始增高时,通过稳压管的电流起初很小,几乎不导电。当反向电压增高到反向击穿电压时,即使电压增量极微,电流也会迅猛增大。此时,稳压管进入击穿状态。只要PN结的温度不超过允许的数值,这种击穿是电击穿,属于非破坏性的,可长期维持,也可恢复到击穿前的状态或多

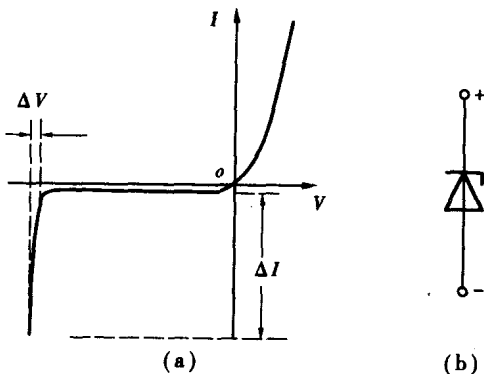


图 1.11 稳压管的伏安特性及符号

(a) 伏安特性 (b) 符号

次重复使用。在击穿区,反向电流随电压的微小变化增加很快,而电压几乎保持不变,这便是稳压管的基本特性。由于硅管的热稳定性能好,一般稳压管都是用硅二极管制成。

稳压管的击穿电压高低主要取决于稳压管的电阻率即本征半导体中掺杂的浓度。在制造稳压管时,适当控制稳压管的电阻率,就可制成稳定电压在一伏至几百伏范围内的各种规格的稳压管。

稳压管的主要参数如下:

(1) 稳定电压 V_Z

稳定电压 V_Z 是稳压管工作在反向击穿区时的稳定工作电压。 V_Z 是根据要求挑选稳压管的主要依据之一。由于稳定电压随着工作电流的不同而略有变化,所以测试 V_Z 时应使稳压管的电流为规定值。不同型号的稳压管,其稳定电压的值不同。对于同一型号的稳压管,由于制造工艺的分散性,各个不同管子的 V_Z 值也有些差别。例如,2CW14 的 V_Z 为 6 ~ 7.5V。表示型号同为 2CW14 的不同的稳压管,其稳定电压有的可能为 6V,有的可能为 7.5V 等,但并不意味着同一个管子的稳定电压会有如此之大的变化范围。每一只管子对应于某一工作电流, V_Z 有相应的确定值。

(2) 额定功耗 P_Z

额定功耗 P_Z 指稳压管不产生热击穿的最大功率损耗,它是由管子温升所决定的参数,
$$P_Z = V_Z I_{Z\max}$$

(3) 稳定电流 I_Z

稳定电流 I_Z 是稳压二极管正常工作时的参考电流。工作电流小于此值时,稳压效果差,大于此值时,稳压效果好。稳定电流的最大值 $I_{Z\max}$ 应有限制,即 $I_{Z\max} = P_Z / V_Z$ 。工作电流不允许超过此值,否则会烧坏管子。另外,工作电流也有最小值 $I_{Z\min}$ 的限制,小于此值时,稳压二极管将失去稳压作用。

(4) 动态电阻 r_Z

稳压管工作时,稳压管两端电压的变化量 ΔV 和相应的电流变化量 ΔI 的比值称为动态电阻 r_Z 。 r_Z 越小,稳压效果越好。一般情况下,动态电阻 r_Z 随工作电流的增加而减小。

(5) 温度系数 α

α 是反映稳定电压值受温度影响的参数,用单位温度变化引起稳压值的相对变化量表示。通常,当 $V_Z < 5V$ 时,具有负温度系数(因齐纳击穿具有负温系数);当 $V_Z > 7V$ 时,具有正温度系数(因雪崩击穿具有正温系数);而当 V_Z 在 5 ~ 7V 时,温度系数可达最小。

常用的稳压管电路如图 1.12 所示。使用稳压管组成稳压电路时,首先,应使外加电源的正极接管子的 N 区,电源的负极接 P 区,以保证稳压管工作在反向击穿区;其次,稳压管应与负载电阻 R_L 并联,由于稳压管两端电压的变化量很小,因而使输出电压比较稳定;第三,必须限制流过稳压管的电流 I_Z ,使其不超过规定值, R 为限流电阻,起保护稳压管和调整电流的作用,保证输出 V_o 不变。

例 1.1 在图 1.13 中,已知稳压二极管的 $V_Z = 6.3V$,当 $V_i = \pm 20V$, $R = 1k\Omega$,求 V_o ? 已知稳压二极管的正向压降 $V_D = 0.7V$ 。

解 当 $V_i = +20V$, V_{D1} 反向击穿稳定电压 $V_{Z1} = 6.3V$, V_{D2} 正向导通电压 $V_{D2} = 0.7V$, 则 $V_o = (6.3 + 0.7)V = 7V$;同理 $V_i = -20V$, $V_o = -7V$ 。

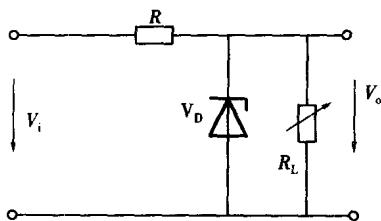


图 1.12 稳压管电路

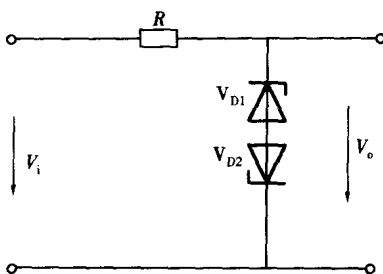


图 1.13

1.3.2 变容二极管

对于二极管反偏时,PN 结的电容(主要是势垒电容)效应明显,故可看成一个比较理想的电容器件,其大小与反向电压高低有关。变容二极管就是利用 PN 结的电容效应,并采用特殊工艺使结电容随反向电压明显变化的一种特殊二极管,其电路符号如图 1.14 (a)所示。

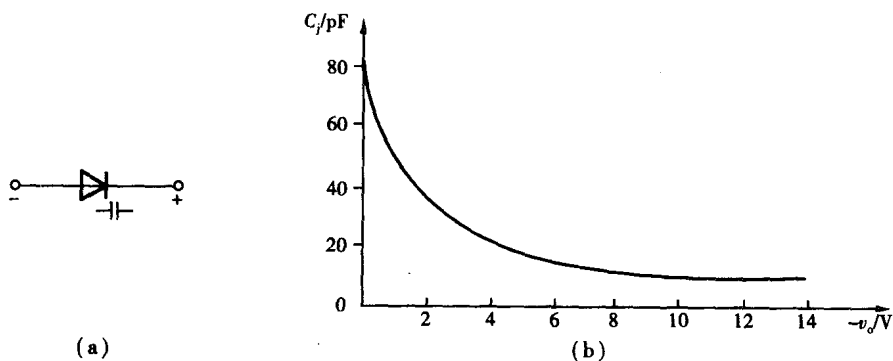


图 1.14 变容二极管

(a) 电路符号 (b) 结电容与反偏电压的关系

变容二极管的结电容 C_j 与反偏电压 v_o 的关系曲线如图 1.14 (b) 所示,改变电压即可改变电容的大小。它的最大电容为 5 ~ 300pF,最大电容与最小电容之比(称为电容比)约为 5 : 1。变容二极管常用于调频电路、电调谐电路和自动频率控制电路等。

1.3.3 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管,是利用半导体的光敏特性制造的光接收器件。当光照强度(在光学上用照度 E 来表示,其单位为勒[克斯],英文符号为 lx)增加时,PN 结两侧的 P 区和 N 区因本征激发产生的少子浓度也增高,如果二极管加反偏电压,则反向电流增大。因此,光电二极管的反向电流随照度的增加而增大。为了便于接收光照,光电二极管的管壳上有一个透明窗口,让光线透过窗口照射到 PN 结的光敏区。光电二极管的电路符号如图 1.15 (a) 所示,显然它在反向偏压下工作。

光电二极管的伏安特性曲线如图 1.15 (b) 所示,它是以照度为参变量。由图可见,光电二极管的反向电流与照度成正比。没有光线照射时,流过光电二极管的反向电流很小,称为暗电流;有光线照射时,流过管子的反向电流较大,称为光电流。光电流不仅随入射光照度的增加