

21 世纪高等学校电子信息类教材

模拟电子技术基础

● 卫行萼 李森生 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

2019 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

模拟电子技术基础

主 编 王 强 副主编 王 强

清华大学出版社

21 世纪高等学校电子信息类教材

模拟电子技术基础

卫行萼 李森生 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共 8 章, 主要内容包括: 半导体器件基础、基本放大电路及分析方法、放大电路中的负反馈、运算电路、信号处理电路、信号产生电路、直流稳压电源、晶闸管电路。

本书的语言精练, 适宜少学时教学, 但又保持内容的完整性, 同时适量地介绍新技术、新器件。书中有较多的实用性例题, 以拓宽知识面, 有利于培养学生的应用能力。

本书可作为高等院校电子信息类各专业的教材, 也可供其他相关专业选用和工程技术人员参考。

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

模拟电子技术基础/卫行尊, 李森生编著. —北京: 电子工业出版社, 2005.5

21 世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-01154-9

I. 模… II. ①卫…②李… 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(2005)第 040272 号

责任编辑: 凌 毅 特约编辑: 李俊莉

印 刷: 北京大中印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15 字数: 384 千字

印 次: 2005 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 20.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。
联系电话: (010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

“电子技术基础”课程是电子信息类专业、计算机专业及相关专业的技术基础课程。当前电子技术的发展日新月异,电子技术的发展促进了电子教学的发展,也促进着电子技术教材内容的不断更新,以培养出适应电子信息时代新形势需要的技术人才。

上海市高校电子技术研究会经多次讨论,决定编写一本适应当前新形势需要的电子技术教材,供高校电子技术基础课使用。通过多年的教学改革和实践,本书对以往教学内容进行了修改更新。为适应当前电子信息发展的新形势和培养电子技术人才的迫切需要,对常规教材内容做了精选,增加新技术、新器件及其应用,注重理论联系实际的应用实例,加强新概念、新方法的讲授与训练。内容由浅入深,减少分立元件内容,强化集成电路及应用。文字上力求做到深入浅出,简明通俗。

全书共分8章,由卫行蓁、李森生执笔,其中第1章由张申科老师编写。在本书中,逻辑符号采用国标符号。本书的参考教学学时为54学时,目录中注有“*”号的部分建议作为选讲的内容,在学时较少的情况下,可以删减这些内容。

在本书编写的过程中,参考了一些已经出版的教材和文献,在此表示衷心的感谢!

在书稿的定稿过程中,复旦大学王勇副教授、华东师范大学刘必虎教授、劳五一教授仔细阅读了初稿,并提出详细的修改意见,在此致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,虽然初稿作为教材已在一些高校的相关专业使用,并进行过适当的修改,但错误仍在所难免,热忱希望使用本书的师生和广大读者提出批评和改进意见。

编著者
2005年5月

目 录

第 1 章 半导体器件基础	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.2 PN 结	3
1.2.1 PN 结的形成	3
1.2.2 PN 结的单向导电性	4
1.3 晶体二极管	5
1.3.1 二极管的特性及参数	5
1.3.2 特殊二极管	7
1.3.3 二极管的应用电路	9
1.4 晶体三极管	12
1.4.1 三极管的放大原理	12
1.4.2 三极管的特性曲线与参数	14
1.4.3 三极管的使用常识	18
1.5 光耦合器件	19
1.5.1 光电晶体管	19
1.5.2 光耦合器	19
1.5.3 光显示	20
1.6 场效应管	20
1.6.1 结型场效应管	21
1.6.2 绝缘栅场效应管	22
1.6.3 场效应管的特点和使用常识	27
本章习题	27
第 2 章 基本放大电路及分析方法	29
2.1 共射放大电路	29
2.1.1 共射放大电路的组成及放大作用	29
2.1.2 放大电路图解分析法	31
2.1.3 微变等效电路法	36
2.1.4 射极偏置电路	41
2.2 共集电极电路与共基极电路	43
2.2.1 共集电极电路	44
2.2.2 共基极电路	45
2.3 场效应管放大电路	47
2.3.1 共源放大电路	47

2.3.2 共漏放大电路	50
2.4 多级放大电路	51
2.4.1 多级放大器电路的分析方法	51
2.4.2 阻容耦合放大电路	52
2.4.3 直接耦合放大电路	53
2.4.4 复合管	57
2.5 电流源电路和差动放大电路	58
2.5.1 电流源电路	58
2.5.2 差动放大电路	61
2.6 功率放大电路	71
2.6.1 功率放大电路概述	71
2.6.2 乙类互补对称放大电路	72
2.6.3 甲乙类互补对称功放电路	76
2.6.4 其他形式互补对称功放电路	78
2.6.5 集成功放电路	79
2.7 放大电路的频率响应	81
2.7.1 频率响应的基本概念和分析方法	81
2.7.2 单管放大电路的频率响应	86
2.7.3 多级放大电路的频率响应	95
2.8 集成运算放大器的基本特性	97
2.8.1 集成运算放大器的电路组成与性能参数	97
2.8.2 集成运放的简化模型	102
本章习题	103
第3章 放大电路中的负反馈	109
3.1 反馈放大电路的基本概念	109
3.1.1 反馈放大电路的组成和反馈的极性	109
3.1.2 负反馈放大器的4种组态及其判别	111
3.2 深度负反馈放大器的计算	115
3.2.1 负反馈放大器的一般表达式	115
3.2.2 深度负反馈放大器的计算	117
3.3 负反馈对放大电路性能的影响	122
3.3.1 对输入电阻的影响	122
3.3.2 对输出电阻的影响	124
3.3.3 对增益稳定性的影响	125
3.3.4 减小非线性失真	126
3.3.5 扩展放大器的通频带	127
3.4 负反馈放大器的稳定性	128
3.4.1 负反馈放大器的稳定工作条件	128
3.4.2 负反馈放大器的稳定性判别	128
3.4.3 负反馈放大器的消振方法	130

本章习题	131
第4章 运算电路	135
4.1 基本运算放大电路	135
4.1.1 比例运算电路	135
4.1.2 加减运算电路	138
4.1.3 积分运算和微分运算电路	141
4.1.4 对数和指数运算电路	145
4.1.5 模拟乘法器	150
4.2 集成运放电路的误差分析和精密放大电路	155
4.2.1 集成运放电路的误差分析	156
4.2.2 仪用测量放大器	159
本章习题	161
第5章 信号处理电路	165
5.1 有源滤波器	165
5.1.1 滤波器的基本概念	165
5.1.2 一阶有源滤波器	166
5.1.3 二阶有源滤波器	167
5.2 电压比较器	174
5.2.1 单门限比较器	174
5.2.2 迟滞比较器	176
5.2.3 窗口比较器	177
5.2.4 单片集成电压比较器	178
5.3 采样保持电路	179
5.3.1 采样保持电路的工作原理	179
5.3.2 采样保持电路	179
5.4 精密整流电路和绝对值电路	180
本章习题	181
第6章 信号产生电路	185
6.1 正弦波振荡器	185
6.1.1 正弦波振荡器的自激振荡条件和工作原理	185
6.1.2 RC正弦波振荡器	186
6.1.3 LC正弦波振荡器	187
6.1.4 石英晶体振荡器	190
6.2 方波三角波发生器	191
6.2.1 方波发生器	191
6.2.2 三角波发生器	193
6.3 集成函数发生器	194
本章习题	196
第7章 直流稳压电源	199
7.1 整流和滤波	199

7.1.1 整流电路	199
7.1.2 滤波电路	201
7.2 稳压电路	202
7.2.1 稳压电路的主要指标	202
7.2.2 线性串联型稳压电路	203
7.2.3 开关式稳压电源	207
本章习题	209
第8章 晶闸管电路	213
8.1 晶闸管	213
8.1.1 晶闸管的结构与工作原理	213
8.1.2 晶闸管的伏安特性	214
8.1.3 晶闸管的主要参数	214
8.2 可控整流电路	215
8.2.1 单相半控桥式整流电路	215
8.2.2 三相半控桥式整流电路	217
8.3 晶闸管的触发与保护	219
8.3.1 晶闸管的触发	219
8.3.2 晶闸管的保护	222
8.4 逆变、变频与交流调压	224
8.4.1 逆变和变频	224
8.4.2 晶闸管交流开关与交流调压	226
本章习题	228
参考文献	230

第 1 章 半导体器件基础

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。电子器件在几十年的发展历史中,经历了从分立器件(电子管、晶体管)到集成电路(小规模、中规模、大规模、超大规模电路)的过程。半导体器件是现代电子技术的重要组成部分,作为基础知识,本章先介绍半导体的基本特性,PN 结及其单向导电性,然后讨论半导体二极管、三极管和场效应管等分立器件的基本结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体基础知识

多数现代电子器件是由导电性能介于半导体与绝缘体之间的材料制成的。常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;以及掺杂或制成其他化合物半导体材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。半导体具有不同于其他物质的特点,如当半导体受到外界光和热的刺激时,其导电能力将发生显著的变化。又如在纯净的半导体中加入微量的杂质,其导电能力会显著增强。这些特点说明,半导体的导电机理必然不同于其他物质。

1.1.1 本征半导体

在半导体器件中,用得最多的是硅和锗,它们是 4 价元素,最外层原子轨道上有 4 个电子,称为价电子,如图 1-1-1 所示。将硅或锗材料提纯制成单晶体,这种纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体,也称为晶体。本征半导体的原子排列整齐而有规则,每个原子的 4 个价电子分别与相邻的 4 个原子的各一个价电子组成一个价电子对,形成共价键结构。如图 1-1-2 所示为硅单晶体中的共价键结构及电子-空穴对的产生。

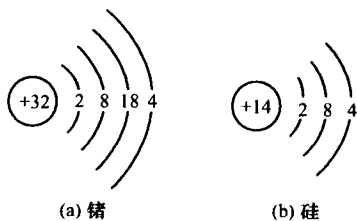


图 1-1-1 锗和硅的原子结构简图

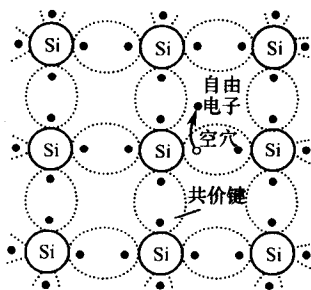


图 1-1-2 硅单晶体中的共价键结构及电子-空穴对的产生

单晶体中的价电子受到所属原子核和共价键的束缚,不能自由移动。在热力学温度零度(-273.15°C)时,本征半导体是个绝缘体。在一定的温度(室温)或光照下,少量价电子受热激发而获得足够的能量挣脱了束缚,成为可以在单晶体中自由移动的电子,称为自由电子;与此同时,原来的共价键中就留下一个空位,称为空穴,呈正电性。由热激发而产生的自由电

子与空穴总是数量相等,成对出现。空穴又很容易被附近从另一共价键挣脱出来的电子填充,于是电子与空穴又成对消失,称为复合。而另一共价键中又出现新的空穴,它又可由相邻共价键中的价电子来填充。这个过程继续进行,就形成了带正电的空穴运动和带负电的自由电子运动,两者方向相反。当有外加电场作用时,自由电子将逆着电场运动,形成电子电流;而空穴将顺着电场运动,形成空穴电流。半导体中的电流是电子电流和空穴电流的总和,自由电子和空穴是半导体的导电粒子,称为载流子。载流子的浓度越高,其电导率也越高。半导体内载流子浓度取决于许多因素:材料的基本性质、温度值及杂质等。空穴参与导电,这是半导体导电的特点。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中热激发产生的电子-空穴对数量很少,因此导电性能很差。如果在纯净半导体中掺入微量杂质元素,形成杂质半导体,就会使半导体的导电性能大大增强。杂质半导体可分为电子型(N)半导体和空穴型(P)半导体两类。

1.N型半导体

如果在本征半导体(如硅)中掺入5价元素磷(或砷、锑等),因一个磷原子的最外层有5个价电子,其中4个与周围4个硅原子的价电子组成共价键,多出来的一个价电子很容易挣脱原子核的束缚成为自由电子,而磷原子失去一个电子成为正离子,虽然是带电粒子,但因质量大而不能自由移动。只要掺入少量磷,就会产生大量自由电子,其数量远远超过由热激发产生的电子空穴对。在这种杂质半导体中,以自由电子导电为主,称为N型(电子型)半导体,N型半导体中自由电子为多数载流子,简称多子,而空穴为少数载流子,简称少子。如图1-1-3所示是在硅晶体中掺入磷元素后多出自由电子的示意图。

2.P型半导体

如果在硅晶体中掺入3价元素硼(或铟等),因每个硼原子的3个价电子与周围硅原子的价电子组成共价键时,缺少一个电子,在晶体中就产生一个空穴。当相邻共价键上的电子受到热激发获得能量时,就有可能填充这个空穴,使硼原子成为不能移动的负离子;而原来硅原子的共价键因缺少一个电子,形成了空穴。只要掺入少量硼,就会产生大量空穴,其数量远远超过由热激发产生的电子空穴对。在这种杂质半导体中,以空穴导电为主,称为P型(空穴型)半导体,P型半导体中空穴为多数载流子,而自由电子为少数载流子。如图1-1-4所示是在硅晶体中掺入硼元素后多出空穴的示意图。

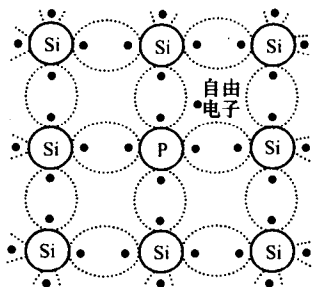


图 1-1-3 硅晶体中掺入磷元素

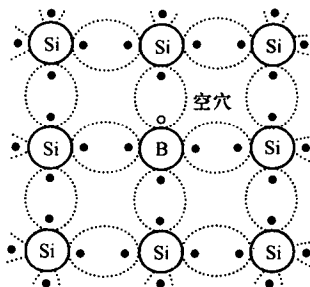


图 1-1-4 硅晶体中掺入硼元素

杂质半导体中多子的浓度取决于掺杂浓度,而少子是由热激发产生的,其数量随温度上升而增加。杂质原子电离成一个电子和一个正离子(N型)或一个空穴和一个负离子(P型),整个半导体对外呈中性。

1.2 PN 结

杂质半导体还不能直接用来制造半导体器件。在一块半导体晶体上,采用一定的掺杂工艺,使得一边形成P型区,另一边形成N型区,则在P区和N区的交界处会形成一个PN结。PN结具有单向导电性,是用来制造各种半导体器件的基础。

1.2.1 PN 结的形成

在图 1-2-1 中,一块硅晶体的一边形成了N区,另一边形成了P区。N区的自由电子浓度大大超过了P区的自由电子浓度,而P区的空穴浓度大大超过N区的空穴浓度。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,P区的多子(空穴)扩散到N区,与N区的自由电子复合;而N区的多子(电子)扩散到P区,与P区的空穴复合,这种扩散和复合在靠近界面的地方更容易进行,所以,P区靠近界面附近留下了一些失去空穴而带负电的杂质离子,N区靠近界面附近留下了一些失去电子而带正电的杂质离子。这些离子虽然也带电,但由于物质结构的关系,它们不能移动,因此并不参与导电。这些不能移动的正、负离子通常称为空间电荷,它们集中在P区和N区交界面附近,形成一个很薄的空间电荷区。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,因此,空间电荷区有时也称为耗尽区,如图 1-2-2 所示。

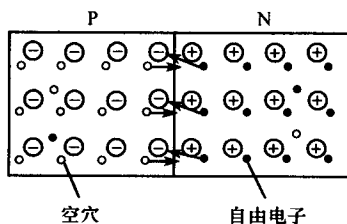


图 1-2-1 多数载流子的扩散

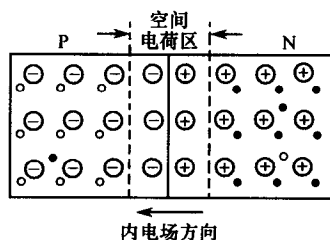


图 1-2-2 空间电荷区的形成

在出现空间电荷区以后,由于正负电荷之间的相互作用,在空间电荷区中就形成了一个电场,其方向是从带正电的N区指向带负电的P区,如图 1-2-2 所示。由于这个电场是由载流子扩散运动,即由内部形成的,而不是外加电压形成的,故称为内电场。显然,内电场的形成一方面阻挡了多子的继续扩散,另一方面引起P区的少子(电子)向N区运动,N区的少子(空穴)向P区运动,使空间电荷减少,阻止内电场的增强。这种少子在内电场作用下的有规则运动,称为漂移运动。

扩散运动使空间电荷区加宽,电场加强,对多子扩散的阻力增大,但使少子的漂移增强;而漂移运动使空间电荷区变窄,电场减弱,却使扩散容易进行。最后,P区扩散到N区的空穴数量等于N区漂移到P区的空穴数量。同样,N区扩散到P区的电子数量等于P区漂移到N区的电子数量,处于动态平衡状态,这时空间电荷区的宽度不再改变,这个空间电荷区就是PN结。PN结空间电荷区的内电场方向从N区指向P区,即N区的电位要比P区高,一般为零

点几伏。因此,在PN结空间电荷区内,电子要从N区到P区必须越过一个能量高坡,一般称为势垒,因而又把空间电荷区称为势垒区。

1.2.2 PN结的单向导电性

在没有外加电压的情况下,因动态平衡,PN结上流过的净电流为零。当PN结上加上正向电压时,动态平衡将被破坏。所谓PN结加上正向电压,是指外电源正极接P区,负极接N区。这种接法也称为PN结的正向偏置,简称正偏,如图1-2-3所示。

当PN结正偏时,外加电源在PN结产生的外电场方向与PN结内电场方向相反,在这个外加电场作用下,P区中的多子(空穴)和N区中的少子(电子)都要向PN结移动,当P区空穴进入PN结后,就要和原来的一部分负离子中和,使空间电荷量减少。同样,当N区电子进入PN结后,和原来的一部分正离子中和,也使空间电荷量减少。结果使PN结空间电荷区的宽度变窄,即耗尽层厚度变薄,内电场减弱,也就是势垒降低了。这样,P区和N区中能越过这个势垒的多子大大增加,形成多子的扩散运动,即多子的扩散运动超过少子的漂移运动,于是PN结上有较大的扩散电流,它主要由P区的空穴通过PN结扩散到N区并同N区的电子复合的电流,以及N区的电子通过PN结扩散到P区并同P区的空穴复合的电流两部分组成,复合掉的电荷由电源不断补充,以维持持续的电流。也可以说,PN结在正向偏置时呈现为低阻而导电。在这种情况下,由少子形成的漂移电流,其方向与扩散电流相反,其数值很小,可忽略不计。

如果PN结上加反向电压,即外电源正极接N区,负极接P区,称为PN结反向偏置,简称反偏,如图1-2-4所示。外电源在PN结上产生的外电场方向与内电场方向相同,在这个外电场作用下,P区中的多子(空穴)和N区中的少子(电子)都要离开PN结,使空间电荷区的宽度(耗尽层厚度)变宽,增强了内电场,也就是势垒增高了。这样P区和N区中的多子很难越过这个势垒,因此扩散运动受到抑制,扩散电流趋近于零。但对少子的漂移运动是有利的,而少子是由热激发产生的,在一定的温度下少子的数目很小,在一定的外加电压下已全部参与漂移运动,基本上不再随电压的增大而增加,因此,PN结上流过的只是很小的饱和电流,也可以说,PN结在反向偏置时呈现为高阻而不导电。

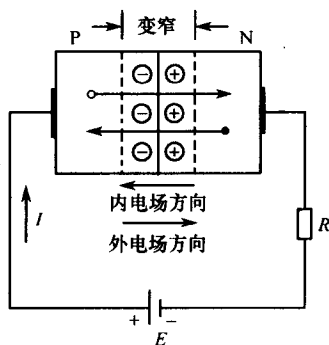


图 1-2-3 PN结正向偏置

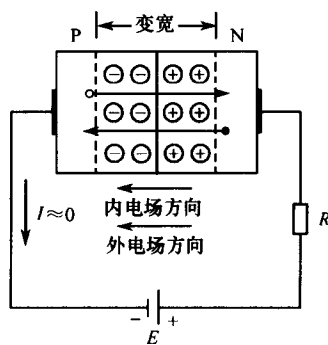


图 1-2-4 PN结反向偏置

综上所述,PN结具有单向导电性:当PN结在正向偏置时,呈现为低阻而导电(称为导通),PN结上流过较大的电流,方向是从P区到N区;当PN结在反向偏置时,呈现为高阻而不导电(称为截止),PN结上仅流过很小的反向饱和电流,方向从N区到P区。

1.3 晶体二极管

PN 结是构成半导体器件的基础。将一个 PN 结加以外壳封装,并引出电极引脚,就成为半导体二极管。从 P 区引出的引脚为正极(又称阳极),从 N 区引出的引脚为负极(又称阴极)。二极管的图形符号如图 1-3-1(a)所示。

二极管的基本结构有点接触型和面接触型两种,分别如图 1-3-1(b)和 1-3-1(c)所示。

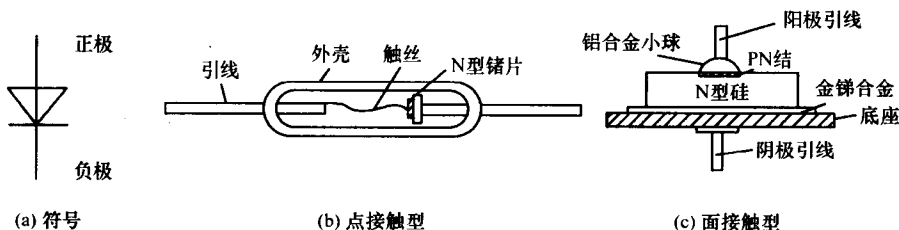


图 1-3-1 半导体二极管

点接触型二极管是由一根很细的金属触丝(如 3 价元素铝)和一块半导体(如锗)的表面接触,然后在正方向通过很大的瞬态电流,使触丝和半导体牢固地熔接在一起,并引出相应的电极引脚,外加管壳密封而成的。由于 PN 结面积很小,结电容(PN 结具有电容效应)也很小,只能流过小电流(几十毫安以下),而它的高频性能较好,一般作为高频检波管、数字电路开关管和小电流整流管使用,如 2AP1 是点接触型二极管,最大整流电流为 16mA,最高工作频率为 150MHz。

面接触型二极管(一般为硅管)的 PN 结是用合金法或扩散法做成的,由于 PN 结面积大,结电容大,可通过较大电流(可达上千安培),但其工作频率较低,因此适用于整流,不适宜用在高频电路中,如 2CP1 是面接触型二极管,最大整流电流为 400mA,最高工作频率为 3kHz。

1.3.1 二极管的特性及参数

二极管的特性一般指二极管的伏安特性,它是指流经二极管的电流 I 与二极管两端的电压 U 之间的关系,即 $I = f(U)$ 。二极管的核心部分是 PN 结,因此,二极管的伏安特性实际上是 PN 结单向导电性的体现。如图 1-3-2 所示描绘了 2CP10 硅二极管的伏安特性。

1. 正向特性

由图可知,当正向电压较小时,正向电流几乎为零,这是因为所加的正向电压尚不足以削弱 PN 结的内电场,扩散电流与漂移电流基本上仍处于动态平衡,所以 PN 结上流过的净电流几乎为零,二极管呈现为一个电阻。当外加正向电压超过一定值时,正向电流开始呈指数规律增长,二极管导通。这一定值的电压称为管子的死区电压,硅管约为 0.5V,

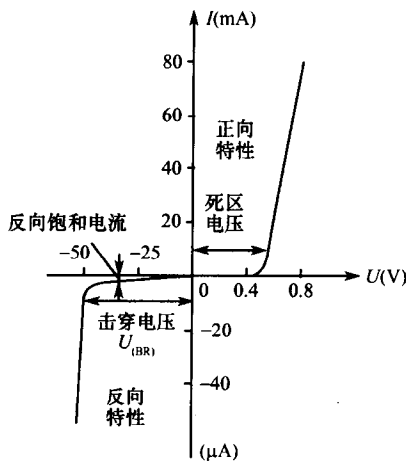


图 1-3-2 2CP10 硅二极管伏安特性曲线

锗管约为 0.1V。导通后二极管的电流呈指数规律增长,而正向压降却很小,硅管约为 0.6~0.7V,锗管约为 0.2~0.3V。

2. 反向特性

当反向电压小于某一值时,反向饱和电流很小,它不随反向电压的大小而变化,却随温度的上升而很快增大。这时二极管处于截止状态。

当反向电压增大到一定数值时,反向电流陡然增大,这种现象称为 PN 结的反向击穿,发生击穿所需的电压称为反向击穿电压。管子击穿后,只要电压有少量增加,反向电流就会增加很多,这时消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结发热超过它的耗散功率而过渡到热击穿。结温升高使反向电流更加增大,而电流增大又使结温进一步升高,就可能把 PN 结烧毁。

在强电场作用下,自由电子和空穴的数目大大增加,使反向电流急剧增加,这种现象称为 PN 结电击穿,主要分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。

雪崩击穿的物理过程是:当 PN 结反向电压增加时,内电场随着增强,通过空间电荷区的电子和空穴在电场作用下获得的能量增大,运动的电子和空穴将不断与晶体原子碰撞。当电子和空穴的能量足够大时,这样的碰撞会使共价键中的电子激发形成自由电子-空穴对,新产生的电子和空穴与原有的电子和空穴一样,在电场作用下,重新获得能量,又可通过碰撞,再产生电子-空穴对,这种效应称为载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后,载流子的倍增情况就如陡峭的积雪山坡上发生雪崩一样,载流子增加很多且速度很快,使反向电流急剧增大。

齐纳击穿的物理过程和雪崩击穿不同。在高浓度掺杂情况下,空间电荷区的宽度很小,在加有较高反向电压下,PN 结空间电荷区中就有强电场,它能够直接破坏共价键,把束缚的电子分离出来,产生电子-空穴对,形成较大的反向电流。

无论哪种击穿,根本的原因是共价键中的价电子在高的反向电压作用下获得足够的能量而从共价键中释放出来,或者是被其他高能量载流子撞击出来,或者是被强电场直接拉出来,产生大量电子-空穴对,形成很大的反向电流。

3. 主要参数

半导体器件的特性除了特性曲线外,还可以用一些参数来定量表征,通常是根据这些参数来合理地选择和使用半导体器件。

(1) 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长时间安全使用所允许通过的最大正向平均电流。它是由 PN 结的结面积和外界散热条件所决定的,二极管工作时的平均电流不能超过此允许值,否则将会使 PN 结过热而烧坏管子。例如,2AP1 的最大整流电流为 16mA。

(2) 反向工作峰值电压 U_{RWM}

它是为保证二极管不被反向击穿而规定的最大反向工作电压,一般为反向击穿电压的一半,以确保管子安全运行。例如,2AP1 的最高反向工作电压规定为 20V,而反向击穿电压实际上大于 40V。

(3) 反向电流 I_R

它是指二极管未被击穿的反向电流值。此值越小,说明二极管的单向导电性越好。一般硅管的 I_R 较小,锗管的 I_R 较大,是硅管的几十倍到几百倍。反向电流受温度的影响很大。

(4) 最高工作频率 f_M

此参数是由结电容大小来决定的。如果信号频率过高,就容易直接从结电容通过,破坏PN结的单向导电性。

(5) 极间电容

① 势垒电容 C_B

在讨论PN结时已知,空间电荷区又称势垒区。当PN结两端电压改变时,就会引起累积在势垒区的空间电荷的改变,类似于电容效应。势垒电容用来描述势垒区的空间电荷随电压变化而产生的电容效应。

② 扩散电容 C_D

多子在扩散过程中越过PN结成为另一方的少子,这种少子的积累也会形成电容效应。扩散电容用来描述外加电压改变时引起扩散区内累积的电荷量的变化。

1.3.2 特殊二极管

前面讨论的都是普通二极管,另外还有一些特殊二极管,如稳压管、变容二极管、光电子器件(包括光电二极管、发光二极管和激光二极管)等,现分别简单介绍如下。

1. 稳压管

稳压管是用特殊工艺制造的面结合型硅半导体二极管,其符号如图1-3-3(a)所示。稳压管的外形、内部结构及伏安特性(见图1-3-3(b))都与普通二极管类似,也是由正向导通、反向截止和反向击穿3部分组成;只是这种管子的杂质浓度比较大,空间电荷区的电荷密度也较大,宽度又小,容易形成强电场。因此,稳压管的击穿电压比普通二极管低很多,反向击穿的特性曲线比较陡。也就是说,当电流在很大范围内变化时,电压只有很小的变化,稳压管正是工作在反向击穿区,所以具有稳压作用。

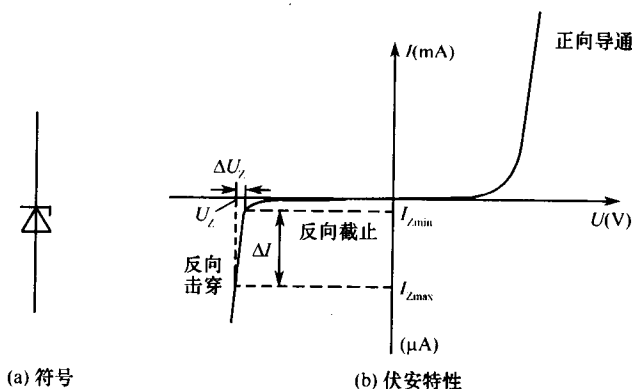


图 1-3-3 稳压管的符号和伏安特性曲线

稳压管有以下4个主要参数。

① 稳定电压 U_Z 。正常工作时管子两端的电压,也就是稳压管的反向击穿电压。由于制造的分散性,即使同一型号的稳压管,它们的稳定电压也有差异,但在一定的温度下,每个稳压管都有自己确定的稳定电压。

② 稳定电流 I_Z 和最大稳定电流 I_{ZM} 。稳定电流是在稳定范围内稳压性能较好的工作电流值,这是一个参考值。电流低于此值时稳压性能略差,高于此值时只要功耗不超过允许值,

稳压管也能正常工作,因此规定了最大稳定电流 I_{ZM} 。

③ 最大允许耗散功率 P_{ZM} 。管子不致发生热击穿的最大功率损耗,它受管子允许温升的限制。

$$P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$$

④ 动态电阻 r_Z 。稳压管端电压的变化量与相应的电流变化量之比。动态电阻越小,稳压管的反向击穿特性曲线越陡,稳压性能越好。

2. 变容二极管

由前面讨论可知,二极管的势垒电容的大小与外加电压的大小有关,当反向电压增大时,势垒电容减小,反向电压减小时,势垒电容增大。这种特性比普通二极管明显的特殊二极管称为变容二极管。如图 1-3-4(a)所示是它的符号,如图 1-3-4(b)所示是某变容二极管的特性曲线。型号不同的管子,其电容最大值为 5~300pF,最小电容与最大电容之比可达 1:5,变容二极管在高频技术中用于实现电压控制谐振频率的振荡回路。

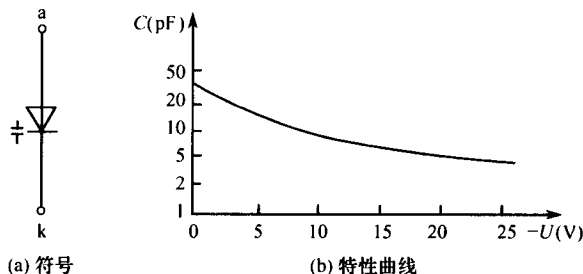


图 1-3-4 变容二极管的符号和特性曲线

3. 光电子器件

光电子器件用于光电子系统中。由于光电子系统有抗干扰能力较强、传输损耗小、工作可靠等优点,被看成是当前的一种新趋势。光信号和电信号的接口需要一些特殊的光电子器件。

(1) 光电二极管

光电二极管的结构与 PN 结二极管类似,但在它的 PN 结处,通过管壳上的一个玻璃窗口能接受外部的光照。光电二极管的反向电流随光照强度的增加而上升,灵敏度的典型值为 $0.01\mu\text{A}/\text{lx}$ (勒克斯,照度单位)数量级。它的符号、等效电路和特性曲线如图 1-3-5 所示。光电二极管可用来测量光的强度,大面积的光电二极管可用来作为能源,即光电池。

(2) 发光二极管

发光二极管通常用元素周期表中 III、V 族元素的化合物,如砷化镓、磷化镓等制成。这种二极管通过电流时将会发光,这是由于电子和空穴直接复合时放出能量的结果。如图 1-3-6 所示是发光二极管的符号。发光二极管常用来作为显示器件,除单个使用外,也常做成七段式或矩阵式器件。工作电流一般为几毫安至十几毫安。

(3) 激光二极管

激光二极管用来产生相干的单色光信号,它的结构是在发光二极管的结间安置一层具有光活性的半导体,其端面经过抛光后具有部分反射功能,因而形成一个光谐振腔。它的符号和结构分别如图 1-3-7(a),(b)所示。发光二极管在正向偏置时发射的光与光谐振腔相互作用,