



高职高专规划教材

MONI DIANZI JISHU JI YINGYONG

模拟电子技术及应用

主 编 赵玉铃 周莉萍 李晓松



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

高职高专规划教材

模拟电子技术及应用

主 编 赵玉铃 周莉萍 李晓松
副主编 徐迅成 张米雅 王中顺

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用 / 赵玉铃, 周莉萍, 李晓松主编.
—杭州: 浙江大学出版社, 2007. 9
高职高专规划教材
ISBN 978-7-308-05421-8

I. 模... I. ①赵...②周...③李... III. 模拟电路—电子技术—高等学校: 技术学校—教材 N. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130176 号

模拟电子技术及应用

赵玉铃 周莉萍 李晓松 主编

责任编辑 阮海潮(ruanhc@163.com)
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310028)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
(电话: 0571-88925592, 88273666(传真))

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 富阳市育才印刷有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 15.25
字 数 316 千
版 次 2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
印 数 0001—3000
书 号 ISBN 978-7-308-05421-8
定 价 23.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88072522

前 言

《模拟电子技术及应用》是面向 21 世纪高职高专规划教材之一,按照高职高专模拟电子技术课程的教学大纲要求编写,体现高职高专的教学目标和教学要求。本教材结合编者多年课堂教学经验和实践教学经验,也听取了其他院校有关教师的诸多建议,在介绍基本知识、基本元器件的基础上,注重实际操作技能的训练,引入了大量的实用电路分析和模拟电子线路的测试技术,适合高职高专电类各专业学生教学使用。

在本书的编写过程中,得到了浙江水利水电专科学校、杭州职业技术学院、浙江交通职业技术学院等相关任课教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平和精力有限,加之时间仓促,书中一定存在着不少错误或不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 8 月

目 录

第 1 章 半导体二极管及其应用	1
§ 1-1 半导体基本知识	1
1-1-1 什么是半导体	1
1-1-2 半导体的共价键结构	1
1-1-3 杂质半导体	2
§ 1-2 PN 结	3
1-2-1 PN 结的形成	3
1-2-2 PN 结的伏安特性	4
§ 1-3 半导体二极管	7
1-3-1 二极管的结构及特性	7
1-3-2 二极管的主要参数	9
1-3-3 温度对二极管性能的影响	9
§ 1-4 特殊二极管及应用	10
1-4-1 硅稳压二极管	10
1-4-2 光电二极管(光敏二极管)	11
1-4-3 发光二极管	11
1-4-4 变容二极管	12
§ 1-5 二极管整流电路	12
1-5-1 单相半波整流电路	12
1-5-2 单相全波整流电路	14
1-5-3 单相桥式整流电路	15
1-5-4 倍压整流电路	15
1-5-5 滤波电路	16
§ 1-6 二极管应用基础	18
1-6-1 用万用表判断二极管极性及好坏(不适合高压二极管)	18
1-6-2 发光二极管应用举例	19

1-6-3 稳压二极管的选用及测试	19
本章小结	20
思考题与习题	21
第2章 基本放大电路	23
§ 2-1 双极型晶体三极管	23
2-1-1 双极型晶体三极管的结构及分类	23
2-1-2 三极管的伏安特性	25
2-1-3 三极管的主要参数	27
2-1-4 指针式万用表检测三极管的方法	28
§ 2-2 双极型晶体三极管基本放大电路	29
2-2-1 共射极放大电路	30
2-2-2 放大电路静态工作点的稳定	35
2-2-3 共集电极放大电路和共基极放大电路	37
§ 2-3 单极型晶体三极管(场效应管)	39
2-3-1 结型场效应管	40
2-3-2 绝缘栅场效应管	43
2-3-3 场效应管的主要参数	45
2-3-4 场效应管的特点及使用注意事项	46
2-3-5 指针式万用表测试场效应管的方法	47
§ 2-4 场效应管放大电路	47
2-4-1 场效应管放大电路的静态偏置方式	48
2-4-2 场效应管放大电路的微变等效电路分析法	49
§ 2-5 复合管及电流源	51
2-5-1 复合管	51
2-5-2 电流源	51
§ 2-6 多级放大电路	53
2-6-1 多级放大电路的耦合方式	53
2-6-2 多级阻容耦合放大电路的分析	54
§ 2-7 放大电路的频率响应	55
2-7-1 频率响应的基本概念	55
2-7-2 多级放大电路的频率响应	57
§ 2-8 单管放大电路的测试	57
本章小结	58

思考题与习题	59
第3章 运算放大电路及其应用	65
§ 3-1 直流放大电路的特殊问题	65
3-1-1 前后级的电路配合问题	65
3-1-2 零点漂移问题	65
3-1-3 零点漂移的抑制	66
§ 3-2 差动放大电路	67
3-2-1 基本差动放大电路	67
3-2-2 改进型差动放大电路	75
§ 3-3 集成运算放大器	77
3-3-1 集成运算放大器的外形和符号	77
3-3-2 集成运算放大器的性能参数	78
3-3-3 专用集成运放简介	81
3-3-4 通用型集成运放的组成及工作原理	82
§ 3-4 集成运放的非线性应用	84
3-4-1 集成运放的理想条件	85
3-4-2 集成运放工作在线性区和非线性区的特点	85
3-4-3 集成运放的非线性应用——比较器和波形发生器	86
3-4-4 非正弦信号发生器	91
§ 3-5 集成运放的线性应用	93
3-5-1 反相放大器和同相放大器	93
3-5-2 差动放大器和相加放大器	95
3-5-3 积分器与微分器	97
3-5-4 模拟乘法器	98
3-5-5 电流—电压变换器与电压—电流变换器	99
§ 3-6 信号滤波电路	101
3-6-1 滤波电路的基本知识	101
3-6-2 低通滤波器(LPF)	102
3-6-3 高通滤波器(HPF)	106
3-6-4 带通滤波器(BPF)	107
3-6-5 带阻滤波器(BEF)	109
§ 3-7 实用知识	111
3-7-1 运放应用中的一些实际问题	111

3-7-2 放大器在心电波检测中的应用	113
本章小结	114
思考题与习题	115
第4章 负反馈放大电路	119
§ 4-1 反馈的基本概念	119
4-1-1 反馈的基本概念	119
4-1-2 反馈的分类	119
§ 4-2 负反馈放大器的基本组态	125
4-2-1 电压串联负反馈	125
4-2-2 电压并联负反馈	126
4-2-3 电流串联负反馈	128
4-2-4 电流并联负反馈	129
§ 4-3 负反馈放大器的一般表达式	129
4-3-1 一般表达式的推导	129
4-3-2 反馈放大器的两个概念	130
§ 4-4 负反馈对放大器性能的影响	133
4-4-1 负反馈降低放大倍数、提高放大器的稳定性	133
4-4-2 负反馈能拓展通频带	134
4-4-3 负反馈能减小非线性失真	134
4-4-4 负反馈能抑制干扰和噪声	135
4-4-5 负反馈对输入电阻和输出电阻的影响	135
§ 4-5 反馈放大器的自激振荡	136
4-5-1 产生自激振荡的原因及条件	136
4-5-2 自激振荡的判断	137
4-5-3 消除自激的常用方法	139
4-5-4 电源去耦	140
本章小结	140
思考题与习题	141
第5章 信号发生电路	145
§ 5-1 自激振荡的工作原理	145
5-1-1 振荡的平衡条件	145
5-1-2 振荡的建立过程	146

§ 5-2 RC 正弦波振荡器	147
5-2-1 RC 桥式振荡的基本原理	148
5-2-2 起振条件	149
5-2-3 稳定措施	149
§ 5-3 LC 正弦波振荡器	150
5-3-1 变压器耦合 LC 振荡器	150
5-3-2 三点式 LC 振荡器	152
5-3-3 振荡器的频率稳定度	155
§ 5-4 石英晶体振荡器	156
5-4-1 石英晶体谐振器	156
5-4-2 石英晶体振荡电路	157
§ 5-5 集成多功能信号产生电路	159
5-5-1 5G8038 工作原理	159
5-5-2 5G8038 的引出端说明	160
5-5-3 5G8038 的应用举例	161
本章小结	161
思考题与习题	162
第 6 章 功率放大器	165
§ 6-1 功率放大器的特殊问题及任务	165
§ 6-2 乙类双电源互补对称功率放大电路(OCL)	167
6-2-1 电路结构	167
6-2-2 工作原理	167
6-2-3 分析计算	167
§ 6-3 甲乙类互补对称功率放大电路	170
6-3-1 消除交越失真的方法	170
6-3-2 单电源互补对称功率放大电路(OTL)	172
6-3-3 复合互补对称功率放大电路	175
§ 6-4* 集成功率放大器及其典型应用	176
6-4-1 双电源应用电路	176
6-4-2 单电源应用电路	177
6-4-3 BTL 电路及应用举例	179
§ 6-5 变压器耦合功率放大电路	183
6-5-1 最佳负载概念	183

6-5-2 电路工作原理	184
§ 6-6* 功放管的散热问题	186
6-6-1 热阻	186
6-6-2 散热的计算	187
本章小结	187
思考题与习题	188
第 7 章 直流电源	191
§ 7-1 可控硅及其伏安特性	191
7-1-1 可控硅的结构和符号	191
7-1-2 可控硅的工作原理	192
7-1-3 可控硅的主要参数	193
7-1-4 可控硅的型号及简易测试	194
§ 7-2 可控硅整流电路	195
7-2-1 单相半波可控整流电路	195
7-2-2 单相桥式可控整流电路	196
§ 7-3 可控硅的触发电路	196
7-3-1 可控整流对触发电路的要求	197
7-3-2 单晶体管触发电路	197
§ 7-4 可控硅的保护和防失控措施	200
7-4-1 可控硅的保护	200
7-4-2 带感性负载时的防失控措施	201
§ 7-5 可控硅的其他应用实例	202
7-5-1 防盗报警器(断线报警器)	202
7-5-2 多路抢答器	202
§ 7-6 双向晶闸管、双向二极管的结构和伏安特性	203
7-6-1 双向晶闸管的结构和伏安特性	203
7-6-2* 用指针式万用表检测双向晶闸管	205
7-6-3* 双向触发二极管的结构及伏安特性	205
7-6-4 应用举例——电灯节能开关	206
§ 7-7 直流稳压电源	207
7-7-1 直流稳压电源的基本原理	207
7-7-2 集成稳压电源及其应用	210
7-7-3 并联型稳压电路	214

§ 7-8* 开关型稳压电路.....	216
7-8-1 开关型稳压电路的特点和分类	216
7-8-2 开关型稳压电路的组成和工作原理	217
7-8-3 开关型稳压电源的应用	221
本章小结.....	222
思考题与习题.....	222
参考答案	227
参考文献	231

半导体二极管及其应用

本章主要介绍半导体的基本知识、PN 结的形成、二极管的伏安特性、特殊二极管、二极管整流电路及二极管的一些实用知识。

§ 1-1 半导体基本知识

1-1-1 什么是半导体

导电能力介于导体与绝缘体之间的物质叫半导体。常常作为半导体材料的有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)及一些硫化物和氧化物等。半导体材料除了在导电能力方面有别于导体与绝缘体之外,它还具有不同于其他物质的特点,如温度和光照变化时,某些半导体的导电性能将发生很大变化;而在纯净的半导体中掺入微量杂质又会使半导体的导电能力大大增加。半导体的这些特点说明其导电机制不同于其他物质。

1-1-2 半导体的共价键结构

在目前的电子技术领域中,锗和硅是常用的半导体材料,它们的外层价电子都是 4 个。纯净的半导体叫本征半导体。以硅晶体为例,其原子排列如图 1-1-1 所示。硅原子组成晶体后,原来分属于各个原子的价电子都受到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所共有,即相邻原子共有一对价电子,这样组合的化学键叫共价键。共价键中的价电子由于受两个原子核的制约,如果没有足够的能量将无法挣脱共价键的束缚而成为自由电子。因此,在绝对零

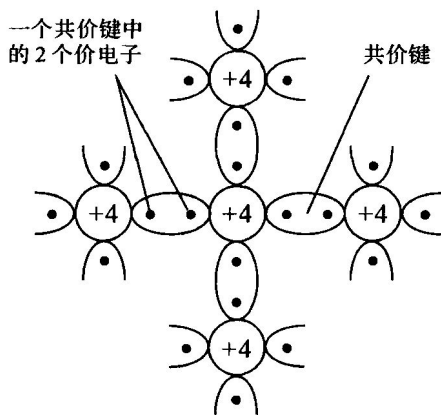


图 1-1-1 硅和锗晶体的共价键结构

度(约 -273.15°C)和无外界激发时,本征半导体内无自由电子存在,则半导体由于没有可以参与导电的带电载流子存在而不导电,而在常温下(如 25°C)或受光照射时,将有少数价电子可获得足够的能量(热能或光能)挣脱共价键的束缚而成为自由电子,这种现象称为本征激发或热激发。此时的半导体由于有了自由电子便可导电,即半导体的温度上升其导电能力增加,这就是半导体的热敏性。

共价键中的价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,在原来的位置上就留下了一个空位,该空位我们称之为空穴。由于自由电子为负电荷,故空穴带一个电子的正电荷。在外电场或外加能源作用下,附近的价电子就会填补到这个空位上,而在这个价电子原来的位置上就留下新的空位,然后其他价电子又会来填补这个新的空位,如此下去,形成价电子的运动,这种运动好像一个带正电荷的空位在移动,叫做空穴运动。可见,半导体的载流子除了自由电子外还有空穴。当半导体有电流流过时,其电流由两部分组成,即自由电子定向移动形成的电流和价电子填补空位(空穴的定向移动)所形成的电流。

在本征半导体中,由于热激发而产生自由电子,同时留下数量相同的空穴,即电子和空穴成对出现,称之为电子空穴对。自由电子在运动过程中填补空穴而使电子和空穴消失的过程叫复合。在温度一定的条件下,电子和空穴复合处于相对平衡状态,所以温度一定时,电子和空穴的数目基本一定,即本征载流子的浓度一定。在常温附近,当温度发生变化时,本征载流子的浓度也将发生变化。

1-1-3 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量杂质,成为杂质半导体,其导电性能会发生显著变化,这是半导体的掺杂性。由于杂质不同,杂质半导体又可分为P型半导体和N型半导体。

一、N型半导体

在本征半导体硅中掺入少量的五价元素,如磷(P)或砷(As)等,因磷原子外层有五个价电子,其中四个与相邻硅原子的价电子组成四对共价键后,还多余一个价电子。由于该价电子不受共价键的束缚,所以只要较少的能量就能挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子,如图1-1-2所示。由于磷原子给出了一个多余的电子,故称为施主杂质。磷原子在给出一个电子后,本身成为一个带正电的离子,但产生自由电子的同时并不产生新的空穴。除了磷原子给出的自由电子外,半导体本身也会由于本征激发而产生电子空穴对,但由

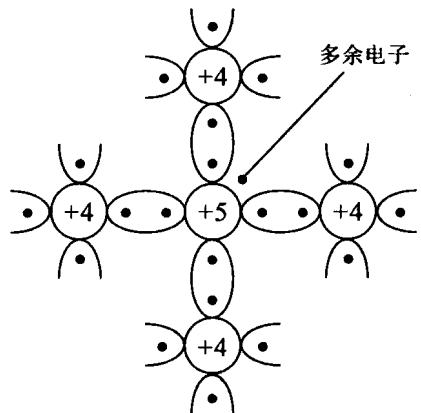


图 1-1-2 N型半导体的共价键结构

于增加了杂质原子给出的多余电子,使半导体中的自由电子数多于空穴数,这样该半导体将以自由电子导电为主,所以称为电子型半导体,也叫做N型半导体,自由电子为多数载流子(多子),空穴为少数载流子(少子)。

二、P型半导体

在本征半导体硅中掺入少量的三价元素,如硼(B)或铟(In)等,因硼原子外层只有三个价电子,它与相邻硅原子组成共价键时,因缺少一个电子而在晶体中产生一个空位。当相邻共价键上的价电子获得足够的能量时,就有可能来填补这个空位,使原来硅原子的共价键缺少电子形成空穴,如图1-1-3所示。由于硼原子在硅半导体中能接受电子,故称为受主杂质。硼原子在接受电子后,本身成为一个带负电的离子,但产生空穴的同时并不产生新的自由电子。除了硼原子产生的空穴外,半导体本身也会由于本征激发而产生电子空穴对,但由于增加了杂质原子产生的空穴,使半导体中的空穴数多于自由电子数。这样,该半导体将以空穴导电为主,所以称为空穴型半导体,也叫P型半导体,空穴为多子,自由电子为少子。

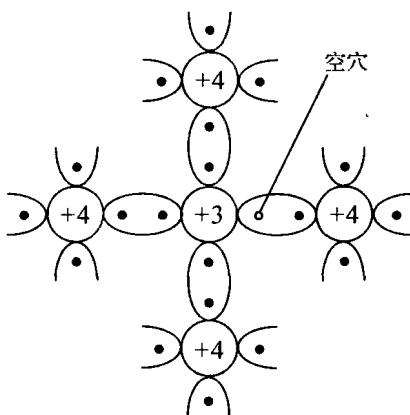


图 1-1-3 P型半导体的共价键结构

由此可见,在本征半导体中掺入杂质后,载流子的数目将有相当大的增加。若每个施主(受主)杂质原子都能产生一个电子(空穴),则我们只要控制掺入杂质的多少,便可控制多子的浓度。尽管掺入的杂质含量很低,但对半导体导电能力影响却很大。

综上所述,杂质半导体中多子的浓度主要取决于掺杂浓度,而少子浓度则主要取决于本征激发,即与温度的关系非常密切。但要注意:在杂质半导体中,正负电荷的数量相等,故仍保持电中性。

§ 1-2 PN 结

在一块本征半导体基础上,通过掺杂使半导体的一侧成为N型半导体,另一侧成为P型半导体,则在两种半导体的界面附近就会形成一个具有特殊性质的薄层,叫PN结。

1-2-1 PN 结的形成

当P型半导体和N型半导体刚结合在一起时,在界面附近存在着载流子的浓度差,即空穴和电子的浓度不均匀,这势必造成载流子从浓度高的一侧向浓度低的一侧扩

散,P区的空穴向N区扩散,N区的电子向P区扩散。扩散过程中,电子和空穴由于带电性质不同会复合,在交界面附近就出现了由不能导电的带电离子组成的空间电荷区,这就是PN结。由于多子都耗尽了,故又称耗尽层,如图1-2-1所示。PN结的电阻率很高,由于在P区侧裸露出带负电的离子,在N区侧裸露出带正电的离子,故形成了由N区指向P区的内电场。在电场作用下,电子将逆着电场方向移动,而空穴将顺着电场方向移动,所以,电子如要从N区到P区必须要有一定的能量才能越过空间电荷区,因此又把空间电荷区称为势垒区。由于内电场阻碍多子扩散,故又将空间电荷层叫阻挡层。但内电场却使P区的少子(电子)向N区移动,同时N区的少子(空穴)向P区移动。这种少子在电场作用下的定向移动叫漂移运动。可以发现,多子的扩散运动和少子的漂移运动方向正好相反。扩散越强,空间电荷区越宽,使内电场越强,则少子的漂移运动得到加强,空间电荷区又将变窄。当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时,空间电荷区的宽度不再改变,此时的PN结称为平衡PN结。

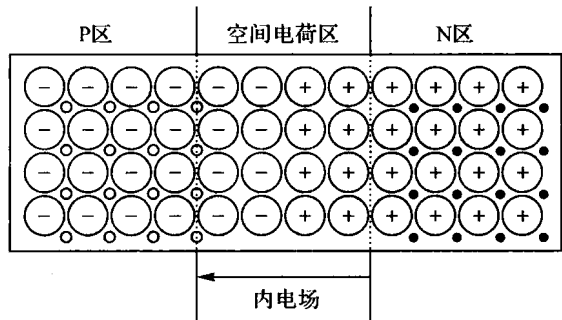


图 1-2-1 PN 结结构示意图

1-2-2 PN 结的伏安特性

当PN结两侧外加电场时,PN结具有典型的单向导电性。

一、正偏导通

当P区接电源正极,N区接电源负极时,PN结处于正向偏置状态,如图1-2-2所示。此时,外加电场方向与内电场方向相反,将削弱内电场的作用,即有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。多子的扩散经外电路形成正向电流。外加电压升高,则内电场被进一步削弱,扩散电流也进一步增加。很明显,PN结处于正向偏置时,其阻挡层变薄,呈现较小的电阻,我们称之为导通。在正常工作范围内,PN结的正偏电压

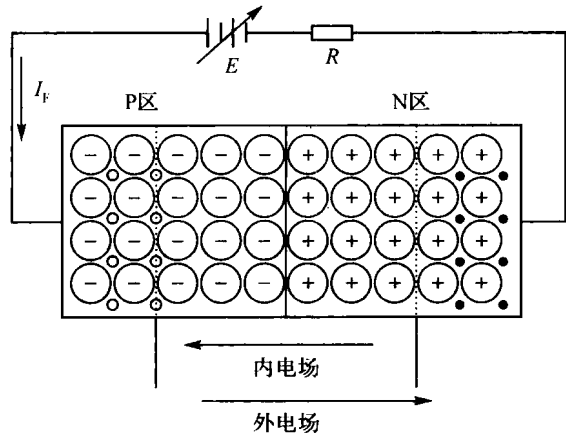


图 1-2-2 正偏时的 PN 结

只要稍有变化,便能引起正向电流 I_F 的显著变化。为避免电流过大烧毁 PN 结(热击穿),电路中串入的电阻 R 起限流作用。

二、反偏截止

当 PN 结的 P 区接电源负极, N 区接电源正极时, PN 结处于反向偏置状态,如图 1-2-3 所示。此时外加电场方向与内电场方向相同,因而加强内电场的作用,即进一步阻碍多子的扩散运动而加强少子的漂移运动。但由于少子的数量有限(在温度一定时,少子的浓度基本不变),故处于反偏状态的 PN 结上流过的反向电流 I_R 不仅很小,而且基本上不随外加电压的变化而变化,故反向电流又称反向饱和电流 I_S 。PN 结处于反向偏置时,其阻挡层变厚,呈很大的电阻,故我们称之为截止。但由于半导体的热敏性,所以受温度影响较大,在实际应用中必须予以考虑。

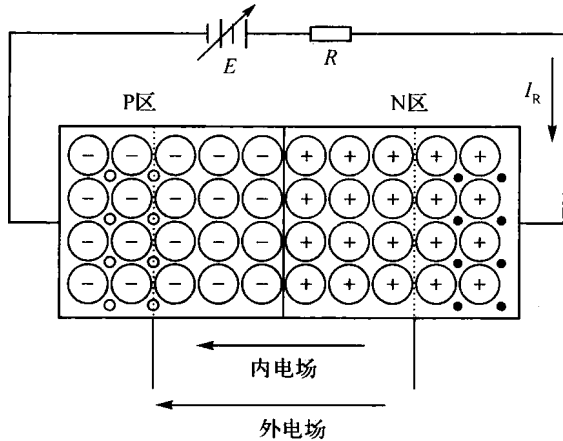


图 1-2-3 反偏时的 PN 结

综上所述,PN 结的正向电阻很小,而反向电阻很大,即 PN 结具有单向导电性。可以发现,PN 结具有单向导电性的关键是阻挡层的存在及阻挡层随外加电压变化的特性。

三、反向击穿

在测量 PN 结的伏安特性时,把所加的反向电压增大到一定值后,其反向电流会突然增加,这个现象称为 PN 结的反向击穿(电击穿),如图 1-2-4 所示,发生击穿所需的反向电压 U_{BR} 叫做反向击穿电压。PN 结反向击穿后电流很大,而此时加在 PN 结上的电压又很高,所以消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结的电击穿过渡到热击穿;因为功耗大,则温升大,使热激发产生的电子空穴增加,引起少子增加,使反向电流更大,则温度进一步升高,从而迅速使 PN 结烧毁。

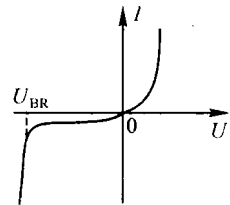


图 1-2-4 反向击穿

造成 PN 结反向击穿的原因是:很高的反向电压引起的场强很强,大大地增加了自由电子和空穴的数目,使反向电流急剧增加。这种现象的产生分两种类型,即雪崩击穿和齐纳击穿。

雪崩击穿发生在 PN 结阻挡层较厚的场合。当 PN 结反向电压增加时,空间电荷区

的电场强度随着增强,则经过空间电荷区的载流子在强场中被加速而获得的动能增大。具有足够大动能的载流子在晶体中运动会碰撞晶体原子,使共价键中的价电子有能力挣脱共价键的束缚而产生电子空穴对。新产生的电子空穴对与原来的载流子一样在强场中被加速,重新获得足够大的能量,又可通过碰撞产生新的电子空穴对。如此,运动的载流子数目就如积雪的山坡发生雪崩一样迅速增加,使反向电流急剧增加,PN结就发生了雪崩击穿。

齐纳击穿发生在PN结阻挡层较薄的场合:由于PN结阻挡层较薄,所以当外加很大的反向电压时,所产生的场强特别大,大到足以使共价键中的价电子直接分离出来形成电子空穴对,从而产生很大的反向电流。

PN结的反向击穿是可逆的,加在PN结上的反向电压降低后,又可恢复其单向导电性,但其前提是反向电流和反向电压的乘积要小于PN结的最大耗散功率,否则将由热量散发不及时而使PN结温度迅速升高,直至过热而烧毁。

四、PN结的结电容

1. 势垒电容 C_b

如前所述,当PN结两端电压发生变化时,会引起空间电荷区厚度的改变,即PN结的空间电荷量发生变化,从而显示出PN结的电容效应。势垒电容 C_b 用来描述势垒区的空间电荷随电压改变而产生的电容效应。

当外加正向电压升高时,P区的空穴和N区的电子进入阻挡层,中和一部分带电离子,使阻挡层内空间电荷减少;而当外加正向电压减少时,又有一部分电子和空穴离开阻挡层,同时裸露出新的带电离子,使空间电荷增加,这种电荷增加和减少的过程与普通电容在外加电压作用下充放电的过程相似。当外加电压保持不变时,阻挡层中的空间电荷数目保持不变。所以,势垒电容 C_b 只在外加电压改变时才起作用。若外加电压信号频率越高,则势垒电容的作用越显著。而且势垒电容 C_b 与结电阻呈并联关系,所以正偏时 C_b 的作用较小,而反偏时由于结电阻很大, C_b 的作用就不能忽视。

2. 扩散电容 C_d

PN结的正向电流是由P区和N区的多子相互扩散形成的。为了能使N区的多子——电子能穿过PN结到达P区形成扩散电流,进入P区的电子沿N区指向P区的方向上必须要有电子的浓度差,而且在PN结边缘的浓度大,离PN结远的地方浓度小,即在P区有电子积累,而在N区有空穴积累。当外加正向电压增加时,正向电流增加,则载流子积累增加;而当外加正向电压减少时,正向电流减少,载流子的积累就要相对减少,这样就有了载流子的“充入”和“放出”。积累在P区的电子和积累在N区的空穴随外加电压变化的这种电容效应,就构成了PN结的扩散电容 C_d ,它反映了PN结在外加电压作用下载流子的积累情况。

由于反偏时电流很小,所以载流子的积累所体现的扩散电容就很小,一般可以忽略。