

本书是高等学校工科电工教材编审委员会拟定编号的教学参考书之一。全书分两册,即《电路和电机——电工学及电子学(I)》和《电子技术——电工学及电子学(II)》。

本书既可作为高等院校某些对电类课程要求较高的工科非电专业作为200~250学时电路、电机和电子技术课程的试用教材,又可作为一般非电专业的教学参考书,还可供电视大学师生及其他业余自学读者及工程技术人员参考。

本册分上、下两篇。

上篇为模拟电子技术基础,内容包括半导体二极管整流器、晶体管交流放大器、多级放大器与功率放大器、负反馈放大器、正弦波振荡器、场效应管放大器、直流放大器、集成运算放大器、可控硅及其应用。

下篇为数字电子技术基础,内容包括基础知识和逻辑门电路、逻辑代数基础、触发器、寄存器和计数器、译码器及显示电路、脉冲波形的产生和变换、MOS数字集成电路、数-模及模-数转换。

本书内容丰富、叙述详尽、例题和习题较多,便于自学。

本册书稿经华东化工学院自动化系张大恒教授、王春田副教授、张南副教授、余崇廉讲师审阅。

本书责任编辑 王缉惠

电 子 技 术 ——电工学及电子学(II)

刘学宏 刘蕴陶 合编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京第二新华印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 37.75 字数 866,000

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数 00,001—4,150

书号 15010·0775 定价 6.40元

目 录

上篇 模拟电子技术基础

第一章 半导体二极管整流器1	二、输出特性.....40
1-1 半导体.....1	2-4 晶体三极管的主要参数.....43
一、半导体的共价键结构和导电载流子.....1	一、电流放大系数.....43
二、N型半导体和P型半导体.....4	二、极间反向电流.....44
1-2 PN结.....6	三、极限参数.....45
一、PN结的形成.....6	2-5 基本交流放大电路.....47
二、PN结的单向导电性.....7	一、单管共射极交流放大电路的组成.....48
三、PN结的电容效应.....9	二、放大器的静态工作点.....49
1-3 半导体二极管.....10	2-6 放大器的图解分析法.....50
一、二极管的结构.....10	一、作直流负载线确定静态工作点.....50
二、二极管的伏安特性.....11	二、动态工作情况的图解.....51
三、二极管的参数.....12	三、交流负载线.....54
四、二极管的电路模型.....13	四、波形非线性失真与静态工作点的选择.....57
1-4 整流电路.....14	2-7 放大器的微变等效电路分析法.....60
一、单相半波整流电路.....14	一、三极管的 h 参数等效电路.....61
二、单相桥式整流电路.....17	二、利用微变等效电路分析计算放大
三、倍压整流电路.....19	电路的电压放大倍数、输入电阻和
1-5 滤波电路.....20	输出电阻.....64
一、电容滤波电路.....20	2-8 放大器的偏置与静态工作
二、CRC滤波电路.....24	的稳定.....70
三、电感滤波电路.....24	一、温度对静态工作点的影响.....70
1-6 稳压二极管稳压电路.....25	二、分压式电流负反馈偏置电路.....72
一、稳压管.....26	2-9 共集电极放大电路——射极
二、稳压管稳压电路.....27	输出器.....78
思考题和习题.....29	一、静态工作点.....78
第二章 晶体管交流放大器33	二、电压放大倍数.....79
2-1 晶体三极管的结构.....33	三、输入电阻.....80
2-2 晶体管的电流分配与放大作用.....35	四、输出电阻.....80
一、晶体管的电流分配.....35	五、射极输出器的特点.....81
二、晶体管的放大作用.....37	2-10 共基极放大电路.....82
2-3 晶体管的特性曲线.....38	一、静态工作点.....83
一、输入特性.....38	二、电压放大倍数.....84

三、输入电阻	84
四、输出电阻	85
思考题和习题	85
第三章 多级放大器与功率放大器	92
3-1 多级放大器的组成	92
3-2 阻容耦合多级放大器	93
一、电路组成	93
二、放大倍数	94
三、频率特性	100
3-3 变压器耦合功率放大器	105
一、功率放大器的任务和要求	105
二、变压器耦合单管功率放大器	108
三、变压器耦合推挽功率放大器	111
3-4 互补对称功率放大器	115
一、基本互补对称电路	115
二、单电源供电的互补对称电路	117
三、复合管互补对称功率放大电路	121
思考题和习题	123
第四章 负反馈放大器	127
4-1 反馈的基本概念	127
一、直流反馈	127
二、交流反馈	127
4-2 负反馈方式的类型	131
一、电流串联负反馈	131
二、电流并联负反馈	133
三、电压并联负反馈	135
四、电压串联负反馈	137
五、反馈类型的判定	138
4-3 反馈放大器的方框图与一般关 系式	139
4-4 负反馈对放大器性能的影响	141
一、提高放大倍数的稳定性	141
二、扩展通频带	143
三、减小非线性失真	145
四、抑制干扰和噪声	146
五、改变输入电阻和输出电阻	146
六、负反馈的应用实例	150
4-5 负反馈放大器的分析方法	151
一、确定基本放大电路的规则	151
二、分析计算步骤	152

三、计算举例	152
思考题和习题	154
第五章 正弦波振荡器	159
5-1 振荡器的自激振荡原理	159
一、自激振荡的条件	160
二、振荡的建立与稳定	160
5-2 RC 正弦波振荡器	162
一、 RC 桥式正弦波振荡器	162
二、 RC 移相式正弦波振荡器	166
5-3 LC 正弦波振荡器	168
一、概述	168
二、变压器反馈式 LC 振荡器	171
三、电感反馈式 LC 振荡器	173
四、电容反馈式 LC 振荡器	175
五、 LC 振荡器的应用举例	176
5-4 石英晶体振荡器	178
一、石英晶体振荡器的特性与等效电路	178
二、石英晶体振荡电路	181
思考题和习题	183
第六章 场效应管放大器	188
6-1 结型场效应管	188
一、结构和基本工作原理	188
二、特性曲线	191
6-2 绝缘栅场效应管	194
一、增强型绝缘栅场效应管	194
二、耗尽型绝缘栅场效应管	198
6-3 场效应管的主要参数、安全使 用和特点	200
一、场效应管的主要参数	200
二、场效应管的安全使用	201
三、场效应管的特点	202
6-4 场效应管放大器	203
一、偏置电路	203
二、静态工作点的确定	205
三、微变等效电路分析法	207
四、场效应管源极输出器	209
思考题和习题	210
第七章 直流放大器	213
7-1 直接耦合放大器的级间耦合	

与零点漂移	213	一、集成运算放大器的理想化	261
一、级间耦合	213	二、运算放大器的闭环特性	262
二、零点漂移	215	8-5 集成运算放大器的数学运算功能	267
7-2 差动放大器的基本原理和典型电路	216	一、加法运算	267
一、电路工作原理	216	二、加减运算	269
二、典型差动放大电路	219	三、积分运算	270
7-3 差动放大器性能的改进	226	四、微分运算	272
一、采用晶体管恒流源的差动放大器	226	五、对数运算	274
二、采用共模负反馈的差动放大器	230	六、反对数运算	275
三、集成化差动式直流放大器	231	七、乘法运算	276
7-4 差动放大器的输入和输出方式	232	八、除法运算	277
一、双端输入、双端输出	232	九、解微分方程	278
二、单端输入、双端输出	232	8-6 集成运算放大器的应用举例	279
三、单端输入、单端输出	233	一、稳压电源	279
四、双端输入、单端输出	236	二、方波发生器	280
7-5 直流放大器的应用举例——晶体管直流稳压电源	236	三、锯齿波发生器与三角波发生器	282
一、串联型稳压电路的基本电路和稳压原理	237	四、有源滤波器	284
二、提高稳压电源的输出电压稳定度	238	五、有源校正电路	286
三、稳压电源的过流保护电路	241	思考题和习题	289
7-6 调制型直流放大器	243	第九章 可控硅及其应用	295
一、调制型直流放大器的基本原理	243	9-1 可控硅的结构和工作原理	295
二、调制器	244	一、基本结构	295
三、解调器	247	二、工作原理	296
思考题和习题	249	9-2 可控硅的特性曲线及主要参数	297
第八章 集成运算放大器	254	一、特性曲线	297
8-1 概述	254	二、主要参数	299
一、什么是集成运算放大器	254	9-3 可控硅整流电路	301
二、集成运算放大器电路的特点	255	一、单相半波可控整流电路	301
8-2 集成运算放大器典型电路分析	255	二、单相桥式可控整流电路	307
一、输入级	255	9-4 可控硅的触发控制电路	310
二、中间级	256	一、单结晶体管触发电路	310
三、输出级	258	二、晶体管触发电路	316
8-3 集成运算放大器的主要技术指标	260	9-5 可控硅的保护	318
8-4 集成运算放大器的应用原理与基本电路	261	一、可控硅的过电流保护	318
		二、可控硅的过电压保护	319
		三、可控硅的串并联保护	320
		9-6 可控硅无触点开关	321
		一、直流无触点开关	321
		二、交流无触点开关	322

思考题和习题	323
--------	-----

下篇 数字电子技术基础

第十章 基础知识和逻辑门电路 326

10-1 数字电路的特点	326
一、数字电路与模拟电路	326
二、数字电路的研究重点	327
三、数字电路的学习方法	327
10-2 二进制计数制	328
一、十进制数的表示方法和特点	328
二、二进制数的表示方法	328
三、二进制的特点	330
四、二进制整数与十进制整数之间的转换	330
10-3 二极管的开关特性	331
一、二极管的开关作用及等效电路	332
二、二极管的开关特性	335
10-4 三极管的开关特性	337
一、三极管的三种工作状态	337
二、三极管用作开关时的等效电路	341
三、三极管的开关时间	341
10-5 逻辑门电路概述	344
一、逻辑状态的表示方法	344
二、高电平与低电平	344
10-6 二极管门电路	345
一、与门电路	345
二、或门电路	347
三、正逻辑和负逻辑	348
10-7 非门	349
一、逻辑非	349
二、非门原理	349
10-8 与非门、或非门及与或非门	355
一、与非门电路	356
二、或非门电路	356
三、与或非门	357
10-9 数字集成电路分类	357
10-10 TTL 集成门电路	358
一、DTL 与非门电路	358
二、TTL 与非门电路的工作原理	361
三、典型 TTL 与非门电路的分析	364

10-11 TTL与非门的电压传输特性	369
一、TTL 与非门的电压传输特性	369
二、TTL 与非门的开门电平、关门电平及抗干扰噪声容限	370
10-12 TTL 与非门的主要指标	372
10-13 TTL 扩展器及其它类型的 TTL 门电路	374
一、与扩展器及其应用	374
二、与或扩展器及与或非门	375
三、集电极开路的与非门(OC门)	376
四、异或门和三态输出与非门	378
10-14 TTL 与非门的改进类型	379
一、浅饱和结构型 TTL 与非门	379
二、抗饱和结构 TTL 与非门	380
10-15 高阈值逻辑门电路 (HTL 电路)	381
一、HTL 逻辑门电路的特点	381
二、HTL 与非门的改进形式——“有源”门电路	383
思考题和习题	384

第十一章 逻辑代数基础 390

11-1 逻辑代数的特点	390
11-2 逻辑代数的基本公式	392
一、只有一个逻辑变量的基本公式	392
二、交换律、结合律和分配律	393
三、逻辑代数的特殊规律	393
四、若干常用公式	394
五、逻辑代数的三个运算规则	396
11-3 逻辑函数式的变换与化简	397
一、逻辑图与逻辑函数式的相互转换	398
二、化简的意义及最简的概念	399
三、公式化简法	400
11-4 用卡诺图化简逻辑函数	403
一、逻辑函数的最小项标准式	403
二、逻辑函数的卡诺图表示法	405
三、用卡诺图化简逻辑函数	408
四、用卡诺图化简逻辑函数的举例	411
五、含“0”小方格的合并——求反函数的最简与-或表示式	414
六、具有约束项的逻辑函数的化简	415

11-5 最简的与非-与非表示式	418	一、 D 触发器转换为 JK 、 T 和 T'	
11-6 最简的与-或-非表示式	420	触发器	463
11-7 组合逻辑电路概述	421	二、 JK 触发器转换为 D 、 T 和 T'	
一、组合电路的分析	422	触发器	465
二、组合电路的设计	424	12-7 集成单元触发器的主要参数	466
11-8 加法器	426	思考题和习题	468
一、半加器	427	第十三章 寄存器和计数器	475
二、全加器	429	13-1 寄存器	475
思考题和习题	432	一、数码寄存器	475
第十二章 触发器	436	二、移位寄存器	477
12-1 基本 RS 触发器	436	三、集成寄存器举例	481
一、电路组成及两个稳定状态	436	13-2 二进制加法计数器	483
二、触发器的置 1 和置 0	437	一、异步二进制加法计数器	483
三、基本 RS 触发器特性表	438	二、同步二进制加法计数器	486
四、由或非门组成的基本 RS 触发器	439	13-3 二进制减法计数器	487
12-2 同步 RS 触发器	441	一、异步二进制减法计数器	487
一、概述	441	二、同步二进制减法计数器	489
二、同步 RS 触发器的逻辑功能	441	13-4 二进制可逆计数器	489
三、特性表	443	13-5 十进制计数器	490
四、空翻现象	443	一、十进制数的编码	490
12-3 按照逻辑功能分类的几种触		二、同步十进制加法计数器	491
发器	445	三、异步十进制加法计数器	495
一、 RS 触发器	445	13-6 任意进制计数器	497
二、 D 触发器	447	13-7 集成计数器举例	498
三、 JK 触发器	448	一、T210-2-5-10 进制计数器	498
四、 T 触发器	449	二、T214-2-16 进制可预置计数器	500
五、 T' 触发器	450	13-8 计数器应用举例	502
12-4 主从型触发器和主从型 JK		13-9 移位寄存器型计数器	504
触发器	450	一、环形计数器	505
一、主从型触发器	450	二、扭环形计数器	505
二、主从型 JK 触发器	451	13-10 同步计数器的设计	506
三、主从型 JK 触发器的脉冲工作特性	454	思考题和习题	509
四、集成主从型 JK 触发器典型产品介绍	455	第十四章 译码器及显示电路	515
五、 JK 触发器的应用举例	456	14-1 二进制译码器	515
12-5 维持-阻塞触发器及维持-阻		14-2 辉光数码管及其译码电路	516
塞型 D 触发器	458	一、辉光数码管	517
一、维持-阻塞触发器	458	二、辉光数码管的驱动电路	518
二、维持-阻塞型 D 触发器	459	三、使用辉光数码管的二-十进制译码器	519
三、应用举例	461	四、辉光数码管的简化译码显示电路	519
12-6 不同类型触发器之间的转换	463	五、二-十进制辉光数码管奇偶控制译码	

电路.....	521	一、NMOS反相器.....	562
14-3 荧光数码管及分段显示电路.....	523	二、PMOS反相器.....	566
一、荧光数码管.....	523	16-2 NMOS门电路及触发器.....	567
二、八段显示译码器.....	524	一、NMOS门电路.....	567
思考题和习题.....	527	二、NMOS触发器.....	568
第十五章 脉冲波形的产生和变换.....	530	16-3 PMOS门电路.....	570
15-1 分立元件双稳态触发器.....	530	16-4 CMOS集成电路的基本逻辑	
一、电路的两个稳定状态.....	530	单元.....	570
二、状态的转换与触发方式.....	532	一、CMOS反相器.....	571
15-2 单稳态触发器.....	536	二、CMOS传输门.....	572
一、单稳态触发器的基本形式.....	536	三、CMOS与非门和或非门.....	573
二、射极耦合的单稳电路.....	540	16-5 CMOS触发器.....	574
三、TTL与非门单稳电路.....	541	一、D触发器.....	574
15-3 多谐振荡器.....	546	二、CMOS JK触发器.....	576
一、分立元件组成的多谐振荡器.....	546	16-6 动态MOS逻辑电路简介.....	576
二、集成与非门组成的多谐振荡器.....	548	思考题和习题.....	579
15-4 施密特触发器.....	551	第十七章 数-模及模-数转换.....	581
一、分立元件组成的施密特触发器.....	551	17-1 数-模(D/A)转换器.....	581
二、集成与非门组成的施密特触发器.....	553	一、权电阻 D/A 转换器.....	582
15-5 集成定时器及应用举例.....	555	二、 T 型 D/A 转换器.....	583
一、5G555集成定时器.....	555	三、串行 D/A 转换器.....	585
二、应用举例.....	556	17-2 模拟-数字(A/D)转换器.....	587
思考题和习题.....	559	一、逐位比较型 V/D 转换器.....	587
第十六章 MOS数字集成电路.....	562	二、并行 V/D 转换器.....	590
16-1 MOS反相器.....	562	三、双积分 V/D 转换器.....	592

上篇 模拟电子技术基础

第一章 半导体二极管整流器

在各种电子设备中都需要有直流电源供电。有的采用化学电池作为直流电源,但大多数情况是采用整流器将交流电转变为直流电。交流变为直流称为整流。整流器是一种整流电源,它一般包括整流电路和滤波电路两部分。它首先利用单向导电元件(如二极管)构成整流电路,将交流电压变换为单向脉动的直流电压,然后利用电容或电感等元件构成滤波电路,将脉动直流电压中的交流成分滤去而变成平滑的直流电。由于交流电源电压的变动和负载的变化会引起直流电压大小的改变,因此,为了使直流电压稳定,可以在滤波电路后面再加上稳压电路,这样,就构成直流稳压电源。

实现整流的关键是必须要有单向导电元件,称之为整流元件。早期整流元件多用电子管(整流二极管)和离子管(如汞弧整流管),但现在广泛使用半导体二极管。因此,本章首先介绍半导体的导电特性和 PN 结的单向导电原理,这是我们了解半导体二极管、三极管及其它半导体器件的基础;然后介绍半导体二极管、整流电路、滤波电路、硅稳压管及其稳压电路。

1-1 半 导 体

半导体器件(如半导体二极管、三极管、场效应管、可控硅及集成电路等)是由半导体材料制成的。因此,首先要了解半导体的导电特性。

自然界的物质,按导电能力强弱分为导体、绝缘体和半导体。导体如银、铜、铝等金属,容易传导电流;绝缘体如橡胶、塑料、陶瓷、云母等,几乎不传导电流;半导体是一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,如硅、锗、硒、一些氧化物和硫化物等都是半导体。

半导体之所以获得广泛应用,不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而在于它具有一系列独特的性能。例如半导体的导电能力随温度升高而显著增加,可利用这种对温度敏感的性质(热敏性)制成热敏电阻。又如半导体受光照射时,其导电能力也明显地增强,可利用这种光敏特性制成光电元件。更为重要的是,如果在纯净的半导体中掺入微量的杂质(与半导体本身元素不同的元素),它的导电能力就会大大增加,利用这一特性可制成各种不同的半导体器件。

半导体的导电特性是由它的内部原子结构、原子与原子之间的结合方式所决定。下面我们以常用的半导体硅和锗来说明半导体的导电原理和特性。

一、半导体的共价键结构和导电载流子

1. 半导体的共价键结构

共价键是半导体内部原子与原子之间的一种特殊结合方式，我们先从纯净的半导体硅和锗开始说明。纯净的半导体叫做本征半导体。

硅和锗的原子结构如图 1-1-1 所示。硅原子中有 14 个电子，分三层围绕着原子核运动。锗原子中有 32 个电子，分四层围绕着原子核运动。硅和锗原子结构的共同特点是最外层的电子都是 4 个。最外层的电子称为价电子，所以硅和锗都是 4 价元素。

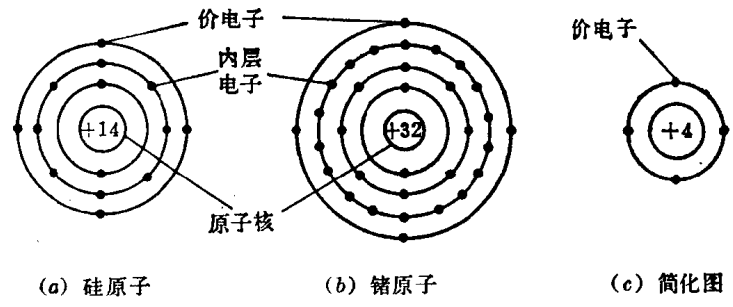


图 1-1-1 硅、锗原子结构

原子核带正电荷，电子带负电荷，原子内正负电荷量相等，所以整个原子是中性的。

由于异性电荷相互吸引，所以电子受到原子核的吸引束缚作用。内层电子离原子核较近，受原子核吸引力较强，它与原子核结成较稳定的整体。最外层的价电子离原子核最远，受原子核的束缚力最小。因此，原子结构可用图 1-1-1(c) 所示的简化图来表示，图中“+4”表示除外层价电子以外，所有内层电子和原子核结成的整体中的合成电荷量。

将硅或锗半导体材料提炼成单晶体时，原子排列得非常整齐而对称，彼此距离很近。晶体结构平面示意图如图 1-1-2 所示。这样，每个原子最外层的价电子，既受原来的原子核中正电荷的吸引作用，又受到相邻原子核中正电荷的吸引作用，可以由一个原子转移到相邻原子上去，成为共有的价电子。每两个相邻原子之间都共有一对价电子。这对共有价电子受到两个相邻原子核的吸引作用而将此两相邻原子束缚在一起。我们把这种对两个共有价电子所形成的束缚作用叫做共价键，并用套住两个相邻原子的共价电子的虚线环来表示共价键，如图 1-1-2 所示。每个原子通过共价键与邻近的 4 个原子结合在一起，组成排列整齐的晶体，因此半导体又称为晶体。

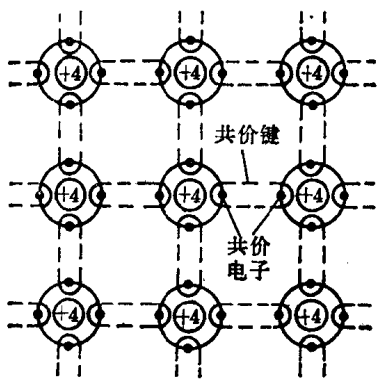


图 1-1-2 硅或锗晶体的共价键结构的平面示意图

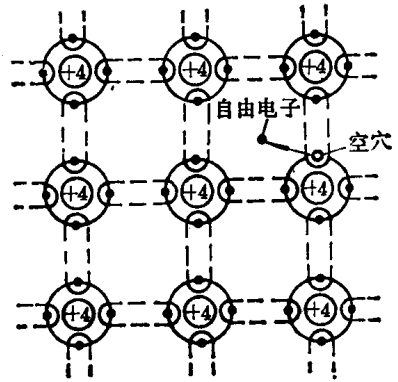


图 1-1-3 硅或锗晶体中的自由电子和空穴

2. 半导体的导电载流子

我们知道,在金属导体中有很多自由电子。这些电子在电场作用下可以定向运动而形成电流。电子是一种带电微粒子,在电子技术中把这种能定向运动形成电流的带电微粒子叫载流子。那么在半导体中导电载流子又是什么呢?由于半导体内部是共价键结构,因此可以产生两种导电载流子:自由电子和空穴,因而便有两种导电方式:电子导电和空穴导电。下面加以说明。

在半导体中,处于共价键中的价电子是不能自由移动的,因而不能导电。一个共价电子摆脱共价键所需要的能量,硅是 1.1eV ,锗是 0.7eV 。在室温(25°C ,又称常温)下,只有少数价电子由于热运动获得足够的能量,可以摆脱共价键的束缚而成为可移动的自由电子,如图 1-1-3 所示。一个价电子脱离共价键时,便留下一个空位,叫做空穴。空穴是由于原子失去了带负电的价电子而形成的,而原子失去电子后成为带正电的离子,所以可以认为空穴带正电。由于共价键破裂而形成的自由电子和空穴总是成对出现的,所以叫做电子-空穴对。

在有外电场作用时,自由电子和空穴均参与导电。自由电子逆着电场方向作定向移动而形成电流,这叫做电子导电。同时,由于空穴带正电,具有吸引电子的作用,则邻近共价键中的价电子在外电场作用下就可前来填补,使邻近共价键中出现另一个新的空穴。此新出现的空穴又可被邻近共价键中的价电子过来填补。这样就产生价电子定向连续填补运动。如图 1-1-4 所示,设空穴原来在 1 处,被 2 处的价电子过来填补,于是 2 处出现空穴,又将被 3 处的价电子过来填补,则 3 处又将出现空穴,依此类推。由此可见,价电子也是逆着电场方向作定向运动而形成电流。但这种导电方式不同于自由电子的导电,而是由空穴引起的,而且价电子始终在共价键中移动。因此为了区别起见,可把共价电子的填补运动看作是空穴沿着电子填补运动的反方向移动,即空穴顺着电场的方向定向移动而形成电流,这就叫空穴导电。

由上可知,半导体中具有自由电子和空穴两种导电机构,自由电子是带负电的粒子,空穴可看作是带正电的粒子。它们都能够定向移动而形成电流,所以把它们叫做载流子。在外电场作用下,自由电子的移动和空穴的移动,二者方向是相反的,但形成电流的方向是相同的。总电流应为空穴电流和电子电流之和。

半导体导电能力的大小决定于载流子的数目多少,而载流子的数目又与温度、光照程度和掺入杂质浓度等有关,因此半导体的导电能力受温度、光照和掺入杂质等的影响。在纯净的半导体(本征半导体)中,自由电子和空穴总是成对出现的。在温度接近于绝对零度(即 -273.15°C)时,共价键中的电子被束缚得很紧,不能产生电子-空穴对,半导体就成了绝缘体。在室温(25°C)下,只有极少量的共价电子摆脱共价键,产生的电子-空穴对数量很少,因此半导体的导电能力很低。

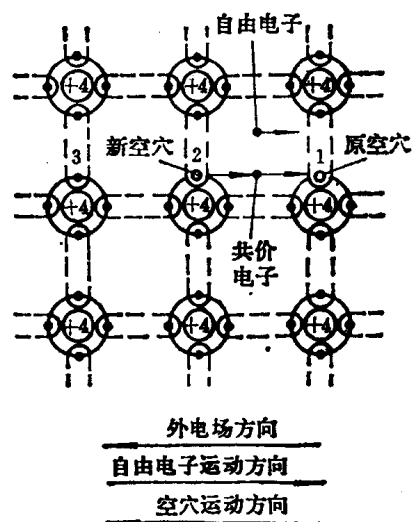


图 1-1-4 电子和空穴的导电

当温度升高或受光照时,有更多共价键中的电子挣脱束缚,产生电子-空穴对的数量就多,半导体的导电能力便显著增强。这就是半导体具有热敏特性和光敏特性的原因。下面重点讨论掺入杂质对半导体导电能力的影响。

二、N型半导体和P型半导体

本征半导体的导电能力太低,而且其中参与导电的自由电子和空穴的浓度总是相同的,因此不能直接采用本征半导体来制造二极管、三极管等半导体器件。为了改进半导体的导电性能,在纯净的硅或锗半导体中掺入少量的五价元素或三价元素(称为杂质),就可显著地增加电子载流子或空穴载流子的数量。分别掺入两类不同杂质,可得到两种导电类型的半导体: N型半导体和P型半导体。

1. N型半导体

在纯净的硅(或锗)晶体中,掺入少量的五价元素,例如磷P(或砷、锑),由于磷原子数量较少,因此整个晶体结构基本上保持不变。每个磷原子仅以它的四个价电子分别与相邻四个硅(或锗)原子的价电子构成共价键,如图 1-1-5(a)所示。多余的一个价电子不在共价键中,而磷原子核的正电荷对它的吸引束缚作用又较弱,因此在室温下,这个多余的电子由于热运动就可脱离

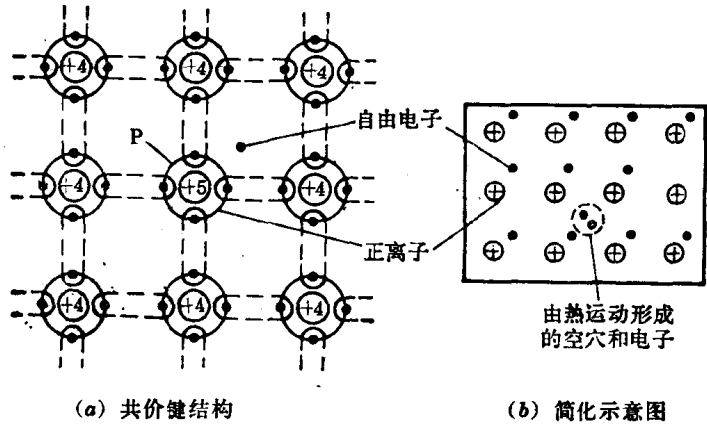


图 1-1-5 N型半导体

磷原子,而成为自由电子。磷原子失去一个价电子后便成为带正电荷的离子,此正离子固定而不能参与导电。这样,由于磷原子给出自由电子,所以称磷原子为施主原子或施主杂质。一个磷原子给出一个自由电子,那么掺入少量的磷元素就可以使半导体的自由电子数量剧增。除了磷原子给出自由电子外,还由于热运动使一些共价键破裂而产生电子-空穴对。因此,在这种半导体中仍然存在着两种载流子,但是自由电子占绝大多数,故称为多数载流子,而空穴则为少数载流子。这种半导体主要依靠带负电的电子导电,所以叫做电子型半导体,或 N型半导体。N型半导体的结构示意图如图 1-1-5(b)所示。

在 N型半导体中,虽然自由电子数目远远多于空穴数目,但多出的自由电子所带的负电荷,恰好由固定的杂质离子所带的正电荷所平衡,因此 N型半导体仍然是中性的。

2. P型半导体

在纯净的硅(或锗)晶体中,掺入少量的三价元素,例如硼 B(或铝、镓、铟)。因为硼原子只有

三个价电子，它与邻近的四个硅(或锗)原子构成共价键时，其中一个共价键中缺少一个电子而形成空穴。在室温下，邻近的硅(或锗)原子的共价键中的价电子，由于热运动很容易被吸去填补这个空位。这样就在硅(或锗)原子的共价键中产生一个空穴，而硼原子则因吸收一个电子而成为带负电荷的离子(称为负离子)，如图 1-1-6(a)所示。由于硼原子起着接受电子的作用，故称为受主原子或受主杂质。

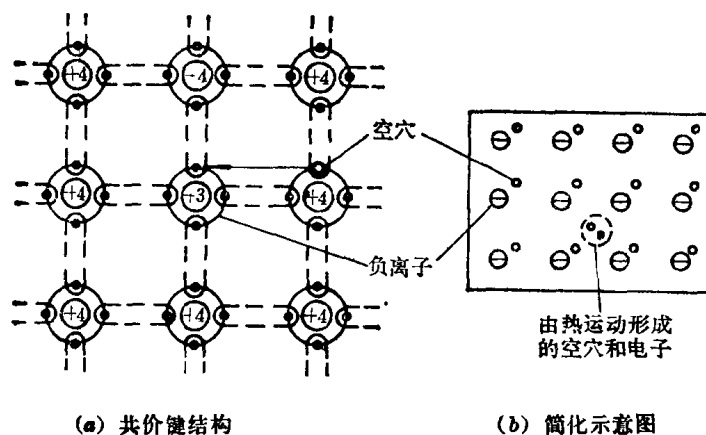


图 1-1-6 P型半导体

由上可见，掺入一个硼原子可以生成一个空穴和一个不可移动因而不导电的负离子。那么掺入少量硼元素就可以使半导体的空穴数量剧增。除了硼原子提供空穴之外，还由于热运动使一些共价键断裂而产生电子-空穴对。在这种半导体中，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。这种半导体主要依靠带正电荷的空穴导电，所以叫做空穴型半导体或P型半导体。P型半导体的结构示意图如图 1-1-6(b)所示。

在P型半导体中，空穴数目远远多于自由电子数目，但多出的空穴所带的正电荷，恰好由固定的杂质离子所带的负电荷所平衡，因此P型半导体也仍然是中性的。

综合以上所述，可以总结为以下四点：

(1) 半导体内部为共价键结构，因而可生成两种载流子：带正电荷的空穴和带负电荷的自由电子。半导体的导电能力就取决于这两种载流子的运动和数量。

(2) 半导体中载流子的产生方式有两种：

一种是在外界能量(热或光)激发下，共价键中的价电子逸出成为自由电子，同时共价键中出现空穴。自由电子和空穴成对出现。

一种是掺入某种合适的少量杂质元素，可使晶体中自由电子或空穴数目剧增。这样，既大大提高了半导体的导电能力，又可控制半导体中自由电子和空穴浓度的相对比例。

(3) 因掺入杂质不同，可得到两种导电类型的半导体：N型半导体和P型半导体。在N型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子，电子浓度远大于空穴浓度；在P型半导体中，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子，空穴浓度远大于电子浓度。

(4) N型半导体和P型半导体都是电中性的，即对外不显示电性质。

1-2 PN结

单一的 N 型或 P 型半导体只能起电阻作用。但若将此两种类型半导体以某种方式结合在一起,构成 PN 结,就可使半导体的导电性能受到控制,这样才能制成各种具有不同特性的半导体器件。

利用掺杂质的方法,可使一块半导体的一部分成为 P 型半导体,而另一部分成为 N 型半导体,则在 P 型半导体与 N 型半导体交界处形成一个具有特殊性质的区域,称之为 PN 结。 PN 结是大多数半导体器件的基本结构,如半导体二极管、三极管、可控硅等分别由一个、二个、三个 PN 结所构成。因此,了解 PN 结的形成和性质对掌握大多数半导体器件的工作原理是非常重要的。

一、 PN 结的形成

由前节讨论知道,图 1-2-1 中, P 区(P 型半导体)中的每个受主杂质原子生成一对空穴和负离子, N 区(N 型半导体)中每个施主杂质原子生成一对自由电子和正离子。此外, P 型和 N 型半导体中还有少数受热激发而产生的电子-空穴对。

当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时,由于 P 区的空穴浓度远大于 N 区的空穴浓度,因此 P 区的空穴要向 N 区扩散。同理, N 区的电子要向 P 区扩散。于是,在交界面附近形成电子和空穴的扩散运动。如图 1-2-1 中箭头所示。这样扩散的结果如图 1-2-2 所示:在 P 型和 N 型半导体交界面附近,左侧 P 区的空穴因扩散且与右侧 N 区扩散来的电子复合而消失,留下带负电的杂质离子(图中用 $\ominus$ 表示); N 区的电子因扩散且与 P 区扩散来的空穴复合而消失,留下带正电的杂质离子(图中用 $\oplus$ 表示)。这些不能移动的带电离子称为空间电荷,它们集中在 P 型和 N 型半导体的交界面的两侧,形成一个很薄的空间电荷区。这个空间电荷区就是 PN 结。在此区域内,空穴和电子全都复合了,或者说载流子都消耗尽了,因此空间电荷区又称为“耗尽层”。

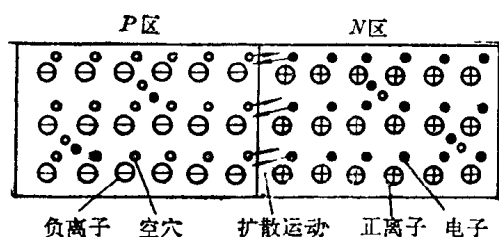


图 1-2-1 载流子的扩散运动

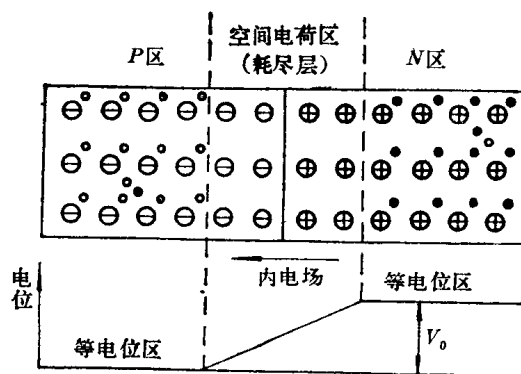


图 1-2-2 PN 结

在空间电荷区内,由正负空间电荷建立起一个电场,称为内电场,其电场强度正比于空间电荷数量,其方向由正电荷指向负电荷,即由 N 区指向 P 区。这个内电场有两方面作用:一方面,它阻挡多数载流子(P 区的空穴和 N 区的电子)扩散,因此空间电荷区又称为阻挡层;另一方面,这

个内电场使少数载流子运动,也就是使 P 区的少数载流子(电子)向 N 区移动,使 N 区的少数载流子(空穴)向 P 区移动。我们把载流子在电场作用下运动叫做漂移运动,以区别于因浓度差所形成的扩散运动。少数载流子的漂移使空间电荷减少,空间电荷区变窄,其作用恰与载流子的扩散作用相反。在 PN 结的形成过程中,刚开始时,空间电荷尚少,内电场作用不大,扩散作用占优势。随着多数载流子的不断扩散,空间电荷区愈来愈宽,内电场就愈来愈强,于是多数载流子的扩散逐渐减弱,而少数载流子的漂移逐渐增强。最后,多数载流子扩散过去的数量与少数载流子漂移回来的数量达到相等,即扩散运动与漂移运动处于动平衡状态,空间电荷不再增加,因而形成宽度稳定的空间电荷区。

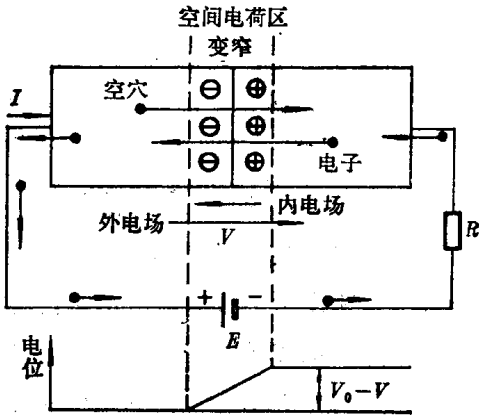
由上可见, P 区的空穴和 N 区的电子因浓度差而扩散,形成空间电荷区;反过来,空间电荷产生内电场来阻碍空穴和电子继续扩散。因此,空穴和电子要越过空间电荷区作扩散运动,就必须具有克服电场作用的足够动能,所需能量大小由内电场在 PN 结两端的电位差 V_0 来决定。 PN 结的电位分布如图1-2-2所示, N 区电位比 P 区电位高 V_0 ,而 PN 结以外的 P 区和 N 区仍保持电中性,所以是等电位的。空穴(带正电荷)从 P 区扩散到 N 区要克服内电场做功,因而其电位能增加 eV_0 (e 是一个空穴或电子的电荷量),而电子(带负电荷)从 N 区扩散到 P 区也要克服内电场做功,因而其电位能也要增加 eV_0 。因此,只有那些能量超过 eV_0 的空穴和电子才能克服内电场作用,越过空间电荷区,从电位低处达到电位高处。可见 PN 结两端的电位差 V_0 好象壁垒一样,阻挡着空穴和电子的扩散,所以称之为“位垒”或“势垒”。 V_0 的大小主要决定于半导体材料和掺杂浓度,硅的 V_0 约为0.7 V,锗的 V_0 约为0.2 V。因此空间电荷区又叫做势垒区。

二、 PN 结的单向导电性

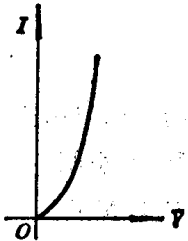
PN 结在没有外加电压时,其中载流子的扩散与漂移处于动平衡状态,即多数载流子的扩散电流与少数载流子的漂移电流大小相等而方向相反,所以通过 PN 结的电流为零,即 PN 结处于不导电状态。但是,如果在 PN 结两端加上电压,就可打破原来扩散与漂移的动态平衡,呈现单向导电的性能。单向导电性是 PN 结的基本特性。

1. 外加正向电压(正向偏置)

如图1-2-3所示,电源 E 通过电阻 R 在 PN 结两端外加电压 V ,左侧 P 区接正极性端,右侧



(a) 电源正向连接(正极接 P 区负极接 N 区)



(b) 正向伏安特性

图1-2-3 PN 结外加正向电压

N 区接负极性端,这种情况称为加正向电压,或正向偏置(简称正偏)。

此时,外加电场与内电场的方向相反。在外电场作用下, P 区的空穴进入空间电荷区,与部分负离子中和,使空间负电荷减少;同时, N 区的电子进入空间电荷区,与部分正离子中和,使空间正电荷减少。结果使空间电荷区变窄,因而内电场减弱,位垒便由 V_0 降低为 $(V_0 - V)$ 。于是,多数载流子的扩散运动增强, P 区的空穴和 N 区的电子能穿越 PN 结的数量大大增加,形成较大的扩散电流。与此同时,在外电场的作用下, P 区左边边沿的电子被拉出移向电源正极,而形成流入 P 区的电流,并在 P 区产生新的空穴以补偿扩散了的空穴;另一方面,又从电源负极向 N 区不断补充电子,而形成流出 N 区的电流。这样,电流连续不断流通。这个电流从电源正极流入 P 区,经过 PN 结从 N 区流回负极,称为正向电流。

因为 P 区和 N 区的多数载流子浓度差别很大,所以只需要小于 1 V 的正向电压,就能产生较大的扩散电流。而且当外加电压升高时, PN 结的内电场和位垒便进一步减弱,扩散电流随之急速增大,如图 1-2-3(b) 所示。这样,正向偏置的 PN 结表现为一个阻值较小的电阻,此电阻称为正向电阻。

2. 外加反向电压(反向偏置)

如图 1-2-4 所示,将电源极性反接,使 PN 结两端外加电压的极性与上述外加正向电压相反,即 P 区接负极性端, N 区接正极性端,这种情况称为加反向电压,或反向偏置(简称反偏)。

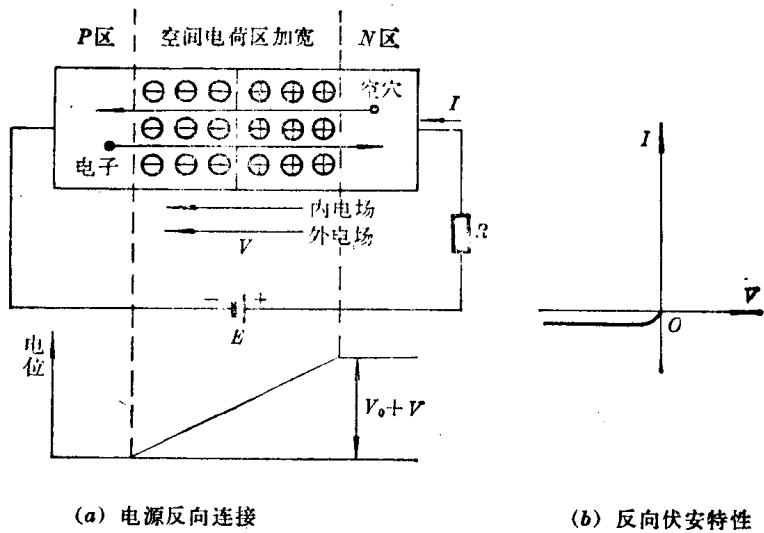


图 1-2-4 PN 结外加反向电压

此时,外加电场与内电场方向一致。在此外电场作用下, P 区的空穴左移,使空间负电荷增加; N 区的电子右移,使空间正电荷增加,这样,空间电荷区变宽,内电场增强,位垒由 V_0 升高为 $(V_0 + V)$ 。因此 P 区和 N 区的多数载流子就更难越过 PN 结。但是由于内电场的增强,使少数载流子更容易产生漂移运动。在外电场作用下, P 区的电子越过 PN 结进入 N 区,再移向电源的正极,同时 P 区漂移走了的电子由电源负极送来的电子补偿。同样, N 区的空穴越过 PN 结进入 P 区,再与电源负极送来的电子复合,同时 N 区被电源正极吸走电子而产生新的空穴,以补偿漂移

走了的空穴。这样便形成了反向电流。

由于少数载流子数量很少,所以反向电流很小,即 PN 结的反向电阻很高,可认为反向偏置的 PN 结基本上是不导电的。反向电流的数值决定于温度,而几乎与外加反向电压的大小无关。因为少数载流子是由于热运动使共价电子挣脱共价键的束缚而产生的,环境温度高,则少数载流子的数量就多。在一定温度下,少数载流子的数量是一定的,那么在一定的反向电压作用下,所有少数载流子全都漂移越过 PN 结而形成反向电流,因此即使电压再增高,也不能使载流子数目增加,反向电流趋于恒定,如图 1-2-4(b) 所示。所以反向电流常称为“反向饱和电流”。

由上面分析可见, PN 结具有单向导电性: PN 结正向偏置时导电(常称为导通),其正向电阻很低,正向电流很大;反向偏置时几乎不导电(常称为截止),其反向电阻很高,反向电流很小(一般可忽略)。

三、 PN 结的电容效应

PN 结除了具有单向导电性能外,还有一定的电容效应。 PN 结电容可分为势垒电容和扩散电容,下面分别加以说明。

1. 势垒电容

由前面讨论可以知道, PN 结中的空间电荷区称为势垒区或耗尽层。当 PN 结两端电压改变时,势垒区的空间电荷量随着改变,这种现象与电容的作用类似,因此 PN 结具有一个与此等效的电容,称之为势垒电容,以 C_b 表示。

下面进一步说明势垒电容的作用:设当外加正向电压 V 升高时, P 区的空穴和 N 区的电子便进入耗尽层,分别与一部分负离子和正离子中和,则空间电荷量减少,耗尽层变窄,如图 1-2-5(a) 所示。此时好象有一部分电子和空穴存入 PN 结,相当于电子和空穴分别向势垒电容充电。而当外加电压降低时,有一部分电子和空穴离开耗尽层,则空间电荷增加,耗尽层变宽,如图 1-2-5(b) 所示。此时好象将电子和空穴从 PN 结中取出,相当于电子和空穴分别从势垒电容放电。这种充放电效应与普通电容在外加电压作用下进行充放电的情况相似。

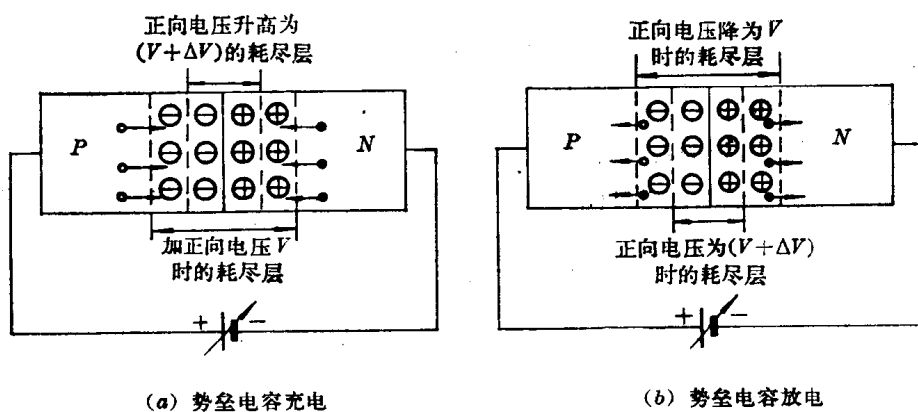


图 1-2-5 PN 结的势垒电容效应

势垒电容 C_b 与平行板电容相似,它的大小与 PN 结面积 S 成正比,与耗尽层的宽度 d 成反比。但耗尽层宽度 d 是随外加电压而变的。正向偏置时, d 减小,因而 C_b 增大;而反向偏置时,

d 增大,因而 C_B 减小。

2. 扩散电容

扩散电容是由于 P 区空穴和 N 区电子在扩散过程中的积累引起的。如图 1-2-6 所示,当 PN 结外加正向电压时, P 区空穴大量扩散到 N 区,分布在 PN 结附近的空穴浓度大,离 PN 结远处空穴浓度小,这样便在 N 区出现空穴的积累。这些空穴虽然不断地向电源负极扩散,形成正向电流,但同时又有新的空穴不断地从 P 区扩散过来补充,因此 N 区靠近 PN 结的地方总是积累着一定数量的空穴。同理, P 区靠近 PN 结的地方也会积累着一定数量的电子。

当 PN 结的正向电压增加时,空穴和电子的扩散增强,这样不仅正向电流加大,而且 PN 结附近地方所积累的扩散电荷(空穴和电子)也增多。而当正向电压减小时,空穴和电子的扩散减弱,正向电流减小, PN 结附近地方所积累的扩散电荷也相应减少。由此可见,由于扩散而积累在 P 区的电子和 N 区的空穴随着外加电压而变化,这相当于电容的作用,这个电容称为扩散电容,以 C_D 表示。

PN 结的电容量应为势垒电容和扩散电容之和,即

$$C = C_B + C_D$$

1-3 半导体二极管

半导体二极管实际上就是一个 PN 结。它用途广泛,例如用作整流高频检波和脉冲数字电路中的开关元件等。为了适用于各种用途,制成了各种类型的半导体二极管。但它们的工作原理基本上是相同的,都是基于 PN 结的单向导电性。本节主要介绍常用二极管的结构、特性和参数等。

一、二极管的结构

在一个 PN 结两端接上电极引线,外面用金属(或玻璃、塑料)的管壳封闭起来,便构成二极管。从 PN 结的 P 端引出的电极叫阳极,从 N 端引出的电极叫阴极。

按照内部结构的不同,可分为点接触型和面接触型两类:

点接触型二极管的结构如图 1-3-1(a)所示。它是由一根很细的金属丝和一块半导体(如 N

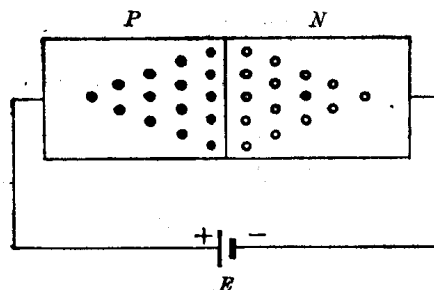


图 1-2-6 载流子扩散引起电荷积累

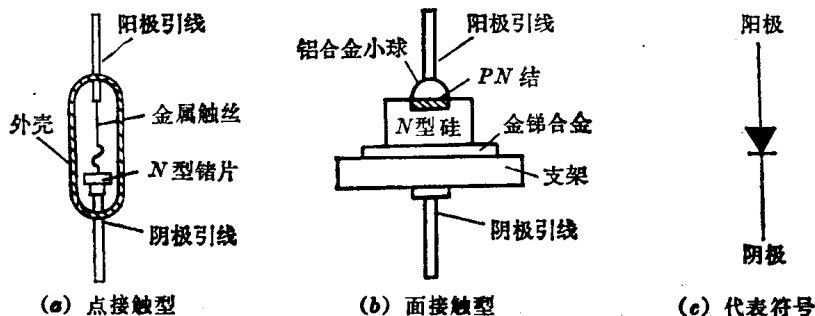


图 1-3-1 半导体二极管的结构和符号