

普通高等院校“十四五”精品教材

模拟电子技术基础

主 编 刘 璐 蕙 王 亚 亚
王 娟 娟 南 江 萍

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

模拟电子技术基础 / 刘珺蕙等主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2021.6

ISBN 978-7-5643-8039-7

模... 刘... 模拟电路 - 电子技术 - 高等学校 - 教材 . TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 095622 号

Moni Dianzi Jishu Jichu

模拟电子技术基础 主编 刘珺蕙 王亚亚 王娟娟 南江萍

责任编辑	赵永铭
封面设计	何东琳设计工作室
	西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	14.75 字 数 367 千
版 次	2021 年 6 月第 1 版 印 次 2021 年 6 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8039-7
定 价	42.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

· 前 言 ·

“模拟电子技术基础”课程是电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化以及计算机应用等专业的基础课，也是一门工程应用和实践性很强的课程。本书以“电子技术基础课程教学基本要求”为依据，在内容编排上力求突出基本概念、基本原理和基本分析方法，引导读者抓住重点、突破难点、掌握解题方法，强调理论联系实际，注重培养学生的创新意识、工程素养和解决实际问题的能力。

本书的主要内容包括二极管及其应用、双极型三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大电路、功率放大电路、信号发生电路、直流稳压电源等。内容按“先器件后电路，先小信号后大信号，先直流后交流，先基础后应用”的原则进行编排；按“提出问题，启发并理顺思路，突出主干，引导，总结规律，举一反三”的顺序沿主干方向由浅入深、由简到繁、承前启后、相互呼应、应用举例、激发兴趣，以便达到较好的教学效果。在每一节中，力图沿主干方向，重点解决一两个主要问题，使难点分散，利于学生把握重点，突破难点。

本书由西安交通工程学院模拟电子技术基础教研组老师共同编写完成，全书共 8 章。第 1 章和第 4 章由王亚亚编写；第 2 章由南江萍编写；第 3 章、第 5 章和第 6 章由刘珺蕙编写；第 7 章和第 8 章由王娟娟编写。

本书可作为普通高等学校电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化、计算机应用、电子信息科学类及其他相近专业本科生学习“模拟电子技术基础”“低频电子线路”等课程的教材和教学参考书，也可作为相关工程技术人员的参考书。

对本书选用的参考文献的著作者，我们致以真诚的感谢。限于编者水平，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请同行和读者批评指正。

编 者

2021 年 3 月

目 录

第 1 章 二极管及其应用

1.1 半导体基础知识	1
1.2 PN 结及其单向导电性	4
1.3 半导体二极管	8
1.4 半导体二极管的等效模型和应用	12
1.5 特殊半导体二极管	15
实验 1 二极管的识别与检测	18
本章小结	20
习 题	20

第 2 章 双极型三极管及其放大电路

2.1 半导体三极管	24
2.2 放大电路的概念及放大电路主要性能指标与分类	31
2.3 基本共射极放大电路	34
2.4 放大电路的分析方法	37
2.5 分压偏置共射放大电路	50
2.6 共集电极放大电路和共基极放大电路	54
2.7 多级放大电路	61
实验 2 数字万用表检测三极管	66
实验 3 射极跟随器	68
实验 4 晶体管共射极单管放大器	72
本章小结	79
习 题	80

第 3 章 场效应管及其放大电路

3.1 结型场效应管	84
3.2 绝缘栅型场效应管	88
3.3 场效应管放大电路	92
本章小结	96
习 题	96

第 4 章 负反馈放大电路

4.1 反馈的基本概念	99
4.2 负反馈放大器的四种基本组态	103
4.3 负反馈对放大器性能的影响	105
4.4 负反馈放大电路的计算	110
4.5 负反馈放大电路的自激振荡	113
实验 5 两级负反馈放大电路设计	116
本章小结	119
习 题	119

第 5 章 集成运算放大电路

5.1 集成运算放大电路概述	122
5.2 差分放大电路	123
5.3 集成运算放大器	130
5.4 理想集成运放的模型	136
5.5 基本运算放大电路	137
5.6 集成运放的应用	146
5.7 集成运放应用时应注意的问题	152
实验 6 差分放大电路	154
本章小结	156
习 题	157

第 6 章 功率放大电路

6.1 功率放大电路的基本概念	161
6.2 乙类互补对称功率放大电路	163
6.3 甲乙类互补对称功率放大电路	167
6.4 集成功率放大器	168
实验 7 功率放大电路	169
本章小结	172
习 题	172

第 7 章 信号发生电路

7.1 正弦波振荡电路的工作原理、组成和分类	175
7.2 RC 正弦波振荡电路	177
7.3 LC 正弦波振荡器	181
7.4 石英晶体振荡电路	186
7.5 非正弦波发生器	190
实验 8 RC 正弦波振荡器	196
本章小结	198

习 题	199
-----	-----

第 8 章 直流稳压电源

8.1 直流稳压电源的组成	203
8.2 整流电路	204
8.3 滤波电路	208
8.4 稳压电路	212
8.5 集成稳压器	216
8.6 开关型稳压电源	222
实验 9 直流稳压电路与调试	226
本章小结	228
习 题	228
参考文献	230

第 1 章 二极管及其应用

【学习目标】

- (1) 了解本征半导体和杂质半导体的导电特性。
- (2) 理解 PN 结的形成，掌握 PN 结的特性。
- (3) 了解二极管的结构、类型，掌握二极管的伏安特性。
- (4) 掌握二极管电路的分析方法。
- (5) 了解稳压管、光电二极管、发光二极管的工作原理。
- (6) 掌握用万用表检测二极管的方法。

1.1 半导体基础知识

在物理学中，物质的导电特性取决于其原子结构，根据材料的导电能力，可以将它们划分为导体、绝缘体和半导体。导体一般为低价元素（如金、银、铜、铁等金属），其最外层电子受原子核的束缚力很小，极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，因此，在外电场作用下，这些电子产生定向运动（称为漂移运动），形成电流，呈现出较好的导电特性。绝缘体为不容易导电或者完全不导电的物体，一般为高价元素（如惰性气体）和高分子物质（如橡胶、塑料、陶瓷、玻璃等），其最外层电子受原子核的束缚力很强，极不易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，所以其导电性极差。半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质，如硅（Si）、锗（Ge）、金属氧化物等，它们原子的最外层电子受原子核的束缚力介于导体与绝缘体之间。

1.1.1 本征半导体

具有晶体结构的纯净半导体被称为本征半导体。晶体通常具有规则的几何形状，在空间中按点阵（晶格）排列。最常用的半导体材料为硅（Si）和锗（Ge），都是 4 价元素，原子的最外层轨道上有 4 个价电子。图 1-1 为硅和锗的原子结构示意图，从图中可以看出它们每一个原子核外都有 4 个价电子。在硅或锗的本征半导体中，由于原子排列的整齐和紧密，原来属于某个原子的价电子，可以和相邻原子所共有，形成共价键结构。在绝对温度 $T=0\text{K}$ 时，所有的价电子都被共价键紧紧束缚在共价键中，不会成为自由电子，因此本征半导体的导电能力很弱，接近绝缘体。图 1-2 所示为共价键的结构（平面）示意图。当温度升高或受到光的照射时，共价键中的价电子由于热运动而获得能量，其中少数价电子能够摆脱共价键的束

缚而成为自由电子，这种现象称为热激发，同时必然在共价键中留下空位，称为空穴。空穴带正电，本征半导体产生热激发时，电子和空穴成对出现。

图 1-3 所示为自由电子和空穴的形成示意图。实际上半导体晶体结构是三维正四面体结构。

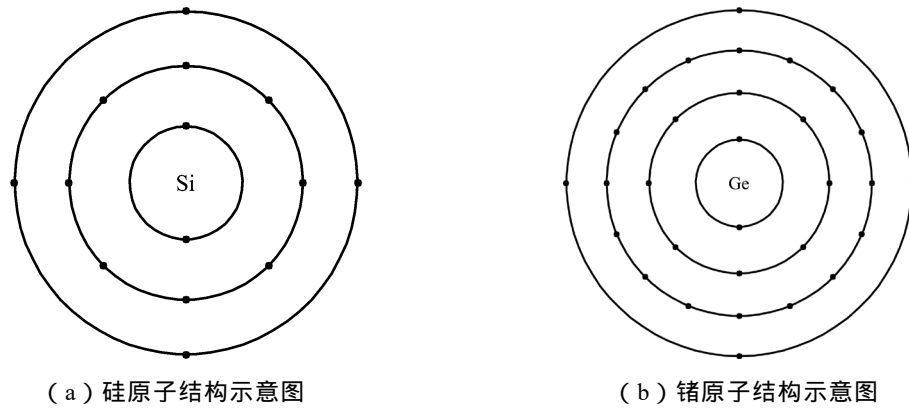


图 1-1 硅和锗的原子结构示意图

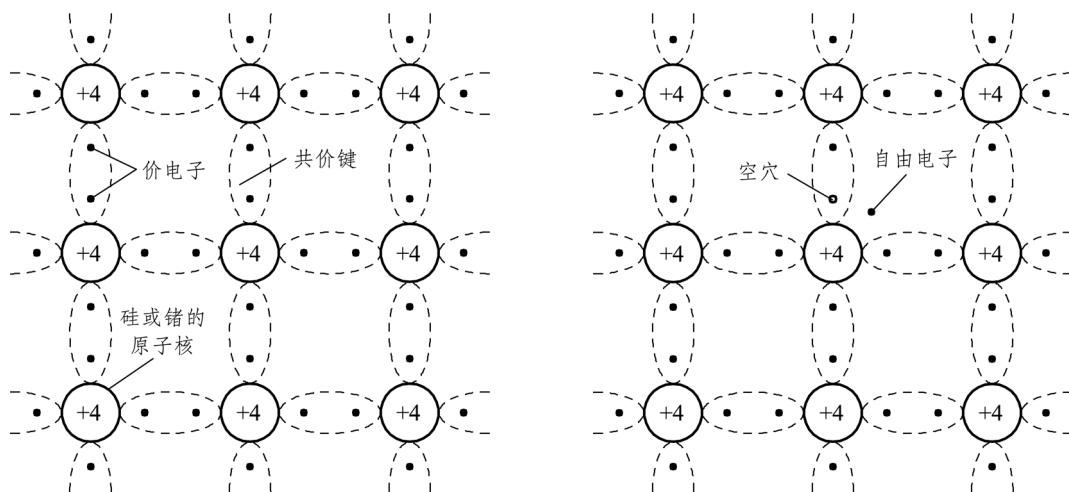


图 1-2 共价键结构示意图

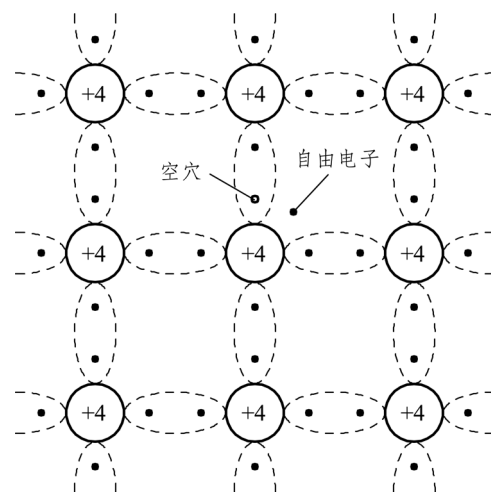


图 1-3 自由电子和空穴的形成

若有外加电场的作用，有空穴的原子将吸引相邻原子的价电子填补这个空穴，于是会出现新的空穴，如图 1-4 所示。空穴的移动形成空穴电流，空穴与自由电子的运动反向相反，但在同一外电场作用下形成的电流方向相同。

由此可见，半导体中存在两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。本征半导体中，自由电子和空穴是同时成对产生的，称为电子-空穴对，在一定温度下，两种载流子浓度相等。

价电子在热运动中获得能量产生了电子-空穴对。同时自由电子在运动过程中与空穴相遇失去能量，使电子-空穴对消失，这种现象被称为复合。在一定温度下，载流子的产生过程和复合过程达到动态平衡。温度升高，热运动加剧，载流子浓度增大，导电性增强。由此可见，温度对半导体组件导电性能是有很大影响的。

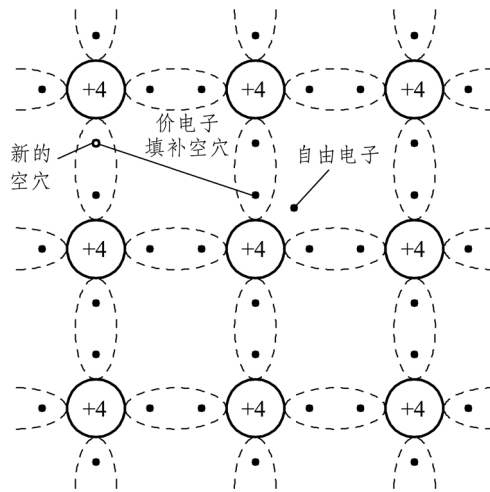


图 1-4 空穴和自由电子的运动

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子，但因本征半导体中载流子的浓度很低，所以其导电能力很差。当我们人为地、有控制地掺入少量的特定杂质时，其导电性能将产生质的变化。掺入杂质的半导体被称为杂质半导体。

1. N 型（或电子型）半导体

在本征半导体中，掺入少量的 5 价杂质元素，如（磷、砷、锑等），则原来晶格中的某些硅原子将被杂质原子代替，如图 1-5 所示。

由于杂质原子的最外层有 5 个价电子，因此它与周围四个硅（锗）原子组成共价键时多了一个电子，该价电子只受自身原子核吸引，在室温下可成为自由电子。失去自由电子的杂质原子固定在晶格上不能移动，不能参与导电，带有正电荷，称为正离子。由于掺杂所产生自由电子的浓度大大高于热激发所产生自由电子的浓度，所以在这种掺入磷（5 价）原子的本征半导体中，电子数目远远大于空穴数目，即自由电子为多数载流子（多子），空穴为少数载流子（少子），因此被称为 N 型（或电子型）半导体。其中磷原子被称为施主杂质。

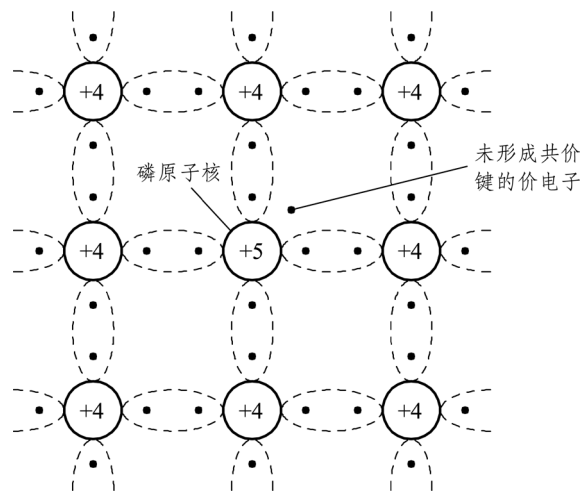


图 1-5 N 型半导体共价键结构

杂质半导体中多数载流子的浓度取决于掺杂浓度，少数载流子取决于温度。

2. P 型（或空穴型）半导体

如果在硅或锗的本征半导体中掺入微量的 3 价硼元素，则形成 P 型半导体，如图 1-6 所示。由于硼原子核外有 3 个价电子，故只能和相邻的硅或锗形成 3 个共价键，而第 4 个

共价键中由于缺少一个价电子，所以形成空穴，每掺入一个硼原子就会出现一个空穴，而热激发的电子数目和空穴数总是成对出现，这样在 P 型半导体中，空穴的数量远远大于自由电子数目，空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子，主要靠空穴导电，故称为 P 型（或空穴型）半导体。由于 3 价杂质原子可接受电子，相应地在邻近原子中形成空穴，故称为受主杂质。

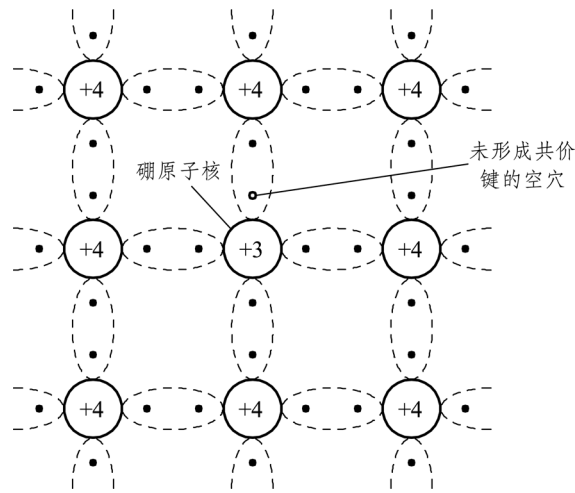


图 1-6 P 型半导体结构示意图

无论是 N 型半导体还是 P 型半导体，尽管其中有一种载流子占多数，但对于整体而言，并未失去电子也没有得到电子，所以对外仍然是电中性的。它们的导电特性主要由掺杂浓度决定。掺入不同性质、不同浓度的杂质，并使 P 型半导体和 N 型半导体以不同方式组合，可以制造出形形色色、用途各异的半导体器件。

1.2 PN 结及其单向导电性

1.2.1 PN 结的形成

在一块半导体单晶上一侧掺杂成为 P 型半导体，另一侧掺杂成为 N 型半导体，两个区域的交界处就形成了一个特殊的薄层，被称为 PN 结或空间电荷区。由于 PN 结的特殊性质，使得它成为制作各种半导体器件的基础。

PN 结形成的示意图如图 1-7 所示，图中“ \ominus ”是代表得到一个电子的负离子，“ \oplus ”是代表失去一个电子的正离子，这些离子不能自由移动。由于两边载流子浓度的差异，P 型半导体中的多子空穴向 N 型区运动，而 N 型半导体中的多子自由电子向 P 型区运动。这种由于浓度的差异形成的载流子运动被称为扩散运动，由此可见扩散运动是由多子形成的。在多子扩散到界面附近时，自由电子和空穴相复合，在界面附近只留下不能移动的带正负电的离子，形成一空间电荷区，如图 1-8 所示。正、负离子形成了空间电荷区的内部电场，显然内电场将阻碍扩散运动。随着扩散运动的进行，空间电荷区逐渐加宽，内电场逐渐加强，扩散运动逐渐减弱。

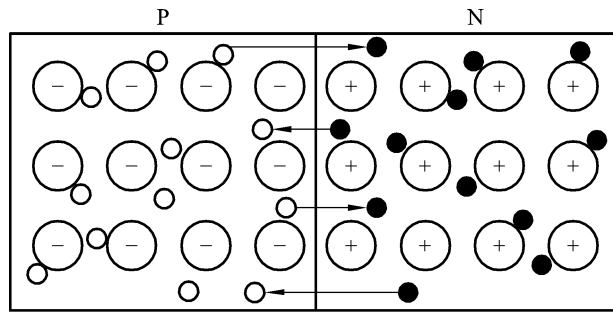


图 1-7 多数载流子的扩散运动

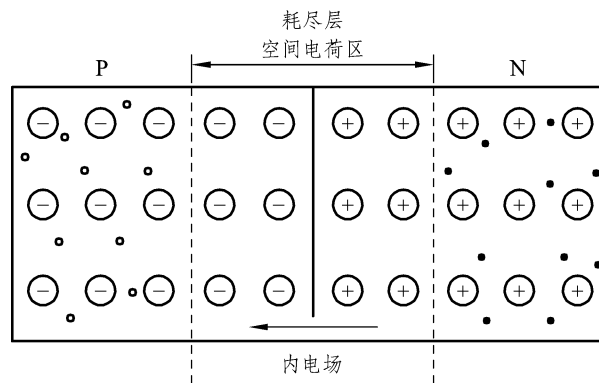


图 1-8 PN 结的形成

内电场的建立，使 P 区的少子电子在电场力的作用下向 N 区漂移，N 区的少子空穴向 P 区漂移，这种少数载流子在内电场作用下的运动被称为漂移运动。但少子的漂移运动较多数子扩散运动弱得多。随着扩散运动的增强，内电场逐渐加强，P 区和 N 区的少数载流子的漂移运动也随之加强，最终扩散运动和漂移运动达到动态平衡。显然扩散运动与漂移运动方向相反。

综上所述，随着扩散运动的进行，内部的空间电荷区形成了内电场。内电场的建立一方面阻碍扩散运动，同时使少数载流子做漂移运动。当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时，PN 结就形成了。

1.2.2 PN 结的单向导电性

在 PN 结两端外加不同方向的电压，就可以破坏原来的平衡，从而呈现出单向导电特性。

1. PN 结外加正向电压

若将电源的正极接 P 区，负极接 N 区，则称此为正向接法或正向偏置，如图 1-9 所示。由图中可以看出，内电场的方向和外电场的方向相反，外电场有利于多数子扩散，使扩散运动和漂移运动失去平衡。当外电场足够大时，它则驱使 P 区的多数子空穴进入空间电荷区；而 N 区的多数子自由电子也会漂移到空间电荷区，整个空间电荷区变窄，削弱了内电场，多数载流子的扩散运动增强，形成较大的扩散电流 I_F ，其方向是由 P 区流向 N 区（见图 1-9），将该电流称为正向电流。在一定范围内，随着外加电压的增大，正向电流也增大，称之为 PN 结的正向导通，此时 PN 结呈低电阻状态。正向电流包括两部分：空穴电流和自由电子电流。虽然

两种不同极性的电荷运动方向相反，但所形成的电流方向是一致的。同时电源不断地向 PN 结提供电荷，维持正向电流。

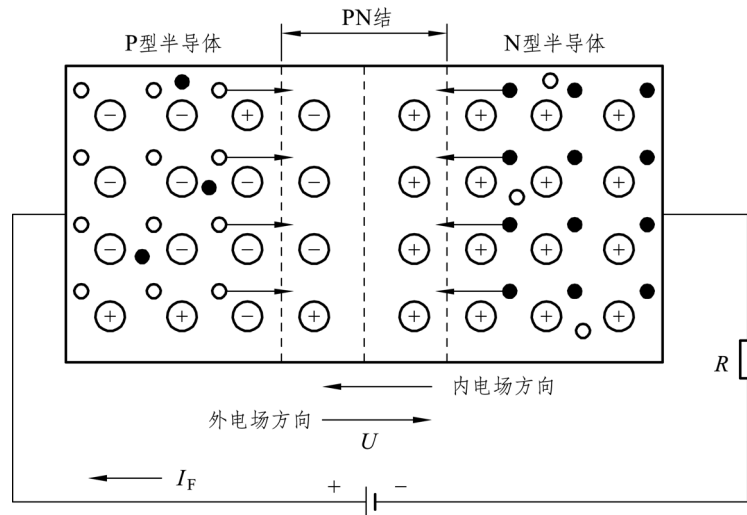


图 1-9 PN 结加正向电压

2. PN 结外加反向电压

PN 结外加反向电压，即 P 区接电源的负极、N 区接电源的正极，如图 1-10 所示。

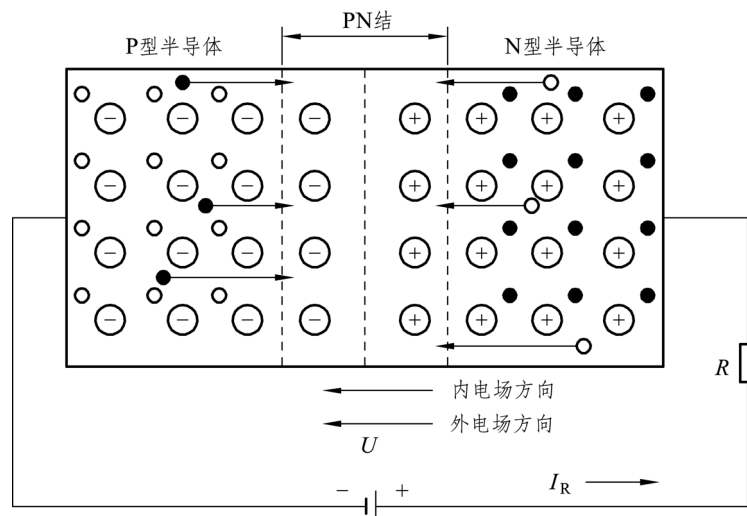


图 1-10 PN 结加反向电压

此时，外电场和内电场的方向一致，也打破了 PN 结平衡状态。外电场使得 P 区的空穴和 N 区的自由电子从空间电荷区边缘移开，使空间电荷区变宽，内电场增强，不利于多数载流子的扩散，而有利于少数载流子的漂移。在外电场的作用下，P 区的自由电子向 N 区运动，N 区的空穴向 P 区运动，形成反向电流 I_R ，其方向是由 N 区流向 P 区。由于少数载流子是由于价电子获得能量挣脱共价键的束缚而产生的，数量很少，故形成的电流也很小， $I_R \approx 0$ ，此时 PN 反向截止，呈现高阻状态。

半导体中的少数载流子的数值取决于环境温度，在一定电压范围内，几乎和外加电压无关。在一定温度下，电流基本不变，故反向电流也称为反向饱和电流，用 I_S 表示，此电流受温度影响很大。

总之，PN 结加正向电压时导通，呈低阻态，有较大的正向电流流过；PN 结加反向电压时截止，呈高阻态，只有很小的反向电流（纳安级）流过。PN 结的这种特性被称为单向导电性。

3. PN 结的伏安特性

所谓 PN 结的伏安特性是指 PN 结两端电压 u 与流过它的电流 i 的关系。将 PN 结的电流与电压的关系写成如下通式：

$$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

其中， I_S 为反向饱和电流； U_T 约为 26 mV，此方程称为伏安特性方程。

(1) 当 $u \gg U_T$ 时， $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$ ，称为正向特性。（ i 与 u 按指数规律变化）

(2) 当 $u \ll -U_T$ 时， $i \approx -I_S$ ，称为反向特性。

画出 i 与 u 的关系曲线，如图 1-11 所示。该曲线称为伏安特性曲线。

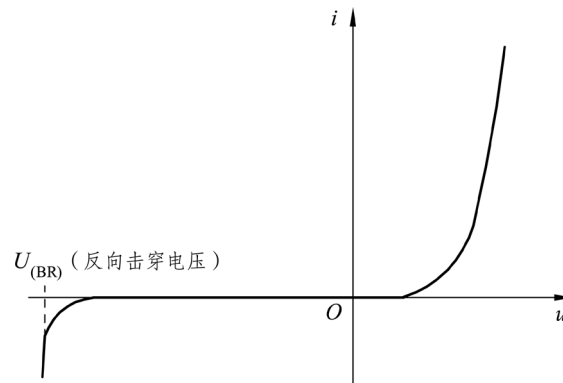


图 1-11 PN 结伏安特性

4. PN 结的电容效应

按电容的定义 $C = Q/U$ ，即电压的变化将引起电荷的变化，从而反映出电容效应。而 PN 结两端加上电压，PN 结内就有电荷的变化，说明 PN 结具有电容效应。PN 结具有两种电容：势垒电容和扩散电容。

(1) 势垒电容 C_T 。

PN 结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将发生变化，有电荷的积累和释放的过程，与电容的充放电相同，其等效电容为势垒电容 C_T 。

(2) 扩散电容 C_D 。

PN 结外加的正向电压变化时，在扩散路程中载流子的浓度及其梯度均有变化，也有电荷的积累和释放的过程，其等效电容为扩散电容 C_D 。

PN 结总的结电容 C_j 包括势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 两部分。

$$C_j = C_T + C_D \quad (1-2)$$

一般来说，当二极管正向偏置时，扩散电容起主要作用，即可以认为 $C_j \approx C_D$ ；当二极管反向偏置时，势垒电容起主要作用，可以认为 $C_j \approx C_T$ 。

1.3 半导体二极管

1.3.1 半导体二极管的结构及分类

半导体二极管又称晶体二极管。将 PN 结封装在塑料、玻璃或金属外壳里，再从 P 区和 N 区分别焊出两根引线作为阳极和阴极，就形成了半导体二极管，简称二极管。二极管的结构如图 1-12 (a) 所示，其电路中的表示符号如图 1-12 (b) 所示。

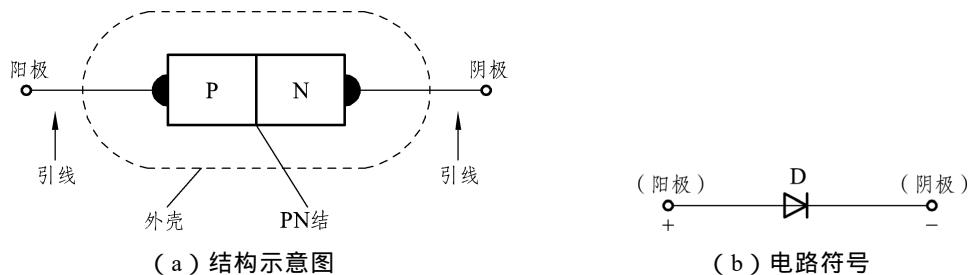


图 1-12 半导体二极管

半导体二极管的类型很多，按所用材料划分，可分为硅管和锗管；按制造工艺划分，可分为点接触型、面接触型和硅平面型三类。

(1) 点接触型二极管。其结构如图 1-13 (a) 所示，由于点接触型二极管金属丝很细，形成的结面积很小，故极间电容很小，适合于高频下工作，主要应用于小电流的整流、高频检波电路中，还可用作数字电路里的开关元件。

(2) 面接触型二极管。其结构如图 1-13 (b) 所示，它的结面积大，能承受较大的电流，但其结电容较大，故只能在较低的频率中工作，可用于较大电流、较低频率的整流电路中。

(3) 硅平面型二极管。其结构如图 1-13 (c) 所示，结面积大的可通过较大的电流，适用于大功率整流；结面积小的结电容小，适用于在数字电路中作为开关使用。

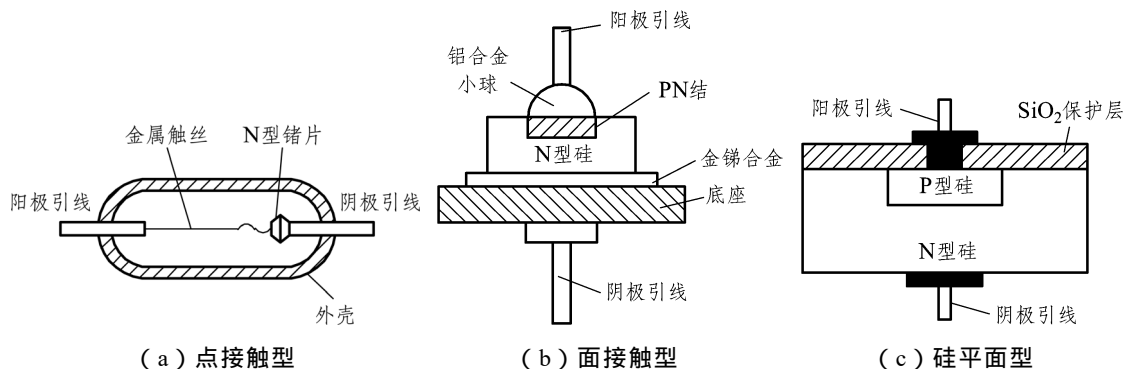


图 1-13 半导体二极管结构

