

轻松学电工电子技术丛书

丛书主编 许顺隆

轻松学

电子元器件与电子电路



许顺隆 段朝辉 田庆元 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

轻松学电工电子技术丛书

主编 许顺隆

轻松学

电子元器件与电子电路

许顺隆 段朝辉 田庆元 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



为了帮助有志于学习电工电子技术的人员解决入门困难的问题,我们特组织编写了本书。本书从最基本的基础知识开始,编写的过程中力图将难于理解的知识化为相对简单的知识,力图使学习的过程成为相对轻松的过程,从而为读者进一步的实际应用打下坚实的基础。本书主要介绍电子元件与电子电路基本知识,共分为六章。第一章 半导体材料及常用电子元件,第二章 直流电源电路及可控整流电路,第三章 低频小信号放大电路,第四章 集成运算放大器,第五章 正弦波振荡电路,第六章 数字电路。本书各章后面都对主要知识点进行小结,还配有大量的思考题,这些思考题主要配合各章的要点而设置。这些思考题的答案都可在本书中查到对应的说明,因此可作为每章的复习要点。

本书的读者对象主要为电子技术初学者、爱好者,电工电子技术工人,以及各大中专院校、职业技术学校相关专业的师生等。

图书在版编目(CIP)数据

轻松学电子元件与电子电路 / 许顺隆, 段朝辉, 田庆元编
著. —北京: 中国电力出版社, 2008

ISBN 978 - 7 - 5083 - 6781 - 1

I. 轻… II. ①许…②段…③田… III. ①电子元件 - 基本知识
②电子器件 - 基本知识③电子电路 - 基本知识 IV. TN6 TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 024092 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 17.625 印张 294 千字

印数 0001—4000 册 定价 27.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

随着科学技术的发展,我们生活的时代已经步入高速发展的信息时代。在国民经济的各个领域,各种各样的电子产品、设备和系统不断涌现。从各行各业的自动控制系统,到家庭使用的各种电器,无不包含大量的电子线路。为了使用、管理和维护这些设备,社会急需大量掌握电子技术的人才。

然而电子技术相对其他技术而言,具有其特点:它相对较为抽象,要求具有一定基础理论作为学习的起点。因而,不论是大学本专科院校的学生,还是实际工程中有志于学习电子技术的人员,常常感觉到学习电子线路具有一定的困难。尤其是许多立志自学者,更是很难做到快速入门,往往是满怀希望开始学习电子元器件及电子线路,最终却因确实遇到困难而不得不望书兴叹。

本书从最基本的基础知识开始,结合编著者多年的教学经验,详细解释学习可能遇到的各个概念和新出现的名词,力图将难于理解的知识化为相对简单的知识,力图使学习电子技术的过程成为相对轻松的过程,至少不会成为枯燥艰难的过程。本书首先为读者解决入门困难的问题,从而为读者进一步学习更为复杂的电子技术知识打下一定的基础。因此,本书可以作为初学者自学电子技术的入门教材,也可以供从事电子行业的技术工人阅读,还可以作为本专科院校、技校学生学习电子技术的参考书。

本书主要内容直接切入电子技术,书中内容经过精选,都是电子技术最基本的内容。本书共分六章。第一章 半导体材料及常用电子元器件,主要介绍电子技术中常用的二极管、三极管、场效应管和晶闸管等四种元器件的工作原理和主要特性。第二章 直流电源电路及可控整流电路,主要介绍整流、滤波、稳压和调压电路的工作原理。第三章 低频小信号放

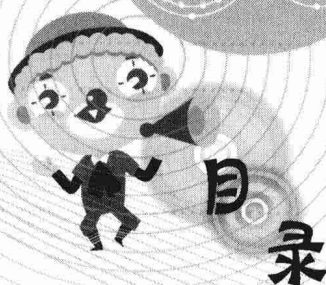
大电路，主要介绍放大电路的基本概念和三极管、场效应管组成的放大电路特点与工作原理。第四章 集成运算放大器，主要介绍集成运算放大器的基本知识和常见应用。第五章 正弦波振荡电路，主要介绍正弦波振荡电路的组成原理和基本特点。第六章 数字电路，主要介绍数字电路的特点与基本知识，三类数字电路常见线路用途、组成原理和简要分析方法。

本书各章后面都对主要知识点进行小结，还配有大量的思考题，这些思考题主要配合各章的要点而设置。思考题的形式主要为问答题，所提问的点都是相应各章的主要知识点，这些知识点都可在本书中查找到对应的说明，因此可作为每章的复习要点。

参加本书编著人员有厦门市厦门交通职业中等专业学校段朝辉老师、集美大学轮机工程学院许顺隆老师和田庆元老师。段朝辉老师负责编写第一章第二、三、四节，第二章第一至第四节；田庆元老师负责编写第四章；其余章节由许顺隆老师负责编写，许顺隆老师还负责全部书稿的修改工作。

由于编著者的水平有限，错误和不妥之处恳请读者和同行批评指正。

编著者



前言

第一章 半导体材料及常用电子元器件 1

第一节 电阻与半导体材料	1
第二节 二极管	8
第三节 三极管	16
第四节 场效应管	31
第五节 晶闸管	45
小结	51
思考题	54

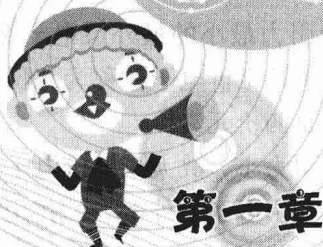
第二章 直流电源电路及可控整流电路 57

第一节 直流电源电路的基本组成	57
第二节 整流电路	58
第三节 滤波电路	73
第四节 稳压电路	80
第五节 可控整流电路	88
小结	107
思考题	109

第三章 低频小信号放大电路 112

第一节 放大电路的基本概念及主要参数	112
第二节 晶体管放大电路的组成与工作原理	117
第三节 场效应管放大电路的组成与工作原理	145

小结	152
思考题	154
第四章 集成运算放大器	160
第一节 集成电路的基本知识	160
第二节 集成运算放大器的基本电路	166
第三节 集成运算放大器的其他应用	172
小结	183
思考题	184
第五章 正弦波振荡电路	186
第一节 振荡电路概述	186
第二节 LC 振荡器	192
第三节 RC 振荡器	196
第四节 石英晶体振荡器	201
小结	204
思考题	205
第六章 数字电路	208
第一节 数字电路基础	209
第二节 普通逻辑电路	227
第三节 时序逻辑电路	240
第四节 脉冲数字电路	261
小结	268
思考题	272
参考文献	276



第一章

半导体材料及常用电子元器件



【内容提要】

物质按照其导电性能，可分为导体、半导体和绝缘体。其中半导体是所有电子元器件的制造材料，而电子元器件又是所有电子线路构成的基本元件，因此本章是学习电子线路的基础知识，可为后面的学习做准备。本章共分五节，第一节主要介绍半导体的分类及导电特点。第二节至第五节分别介绍基本的电子元件，包括二极管、三极管、场效应管和晶闸管以及它们的结构特点及工作原理。

第一节 电阻与半导体材料

一、物质按导电性能的分类

在自然界中，物质按其导电能力大小可分成导体、绝缘体和半导体三类。金、银、铜、铁、铝等容易导电的物质称为导体。导体的导电能力强，电阻率 $\rho = 0.01 \sim 1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。塑料、陶瓷、橡胶等导电能力很差的物质称为绝缘体，在电气工程中一般将电阻率 $\rho \geq 10^7 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 的材料称为绝缘体。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间，常用半导体有锗、硅和砷化镓等。

物质导电性能的差异主要由物质的内部结构决定。物质是由原子组成的，原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的。电子分几层围绕原子核作高速运动。内层的电子受到原子核的吸引力较大，外层的电子受到

原子核的吸引力较小。受到原子核吸引力最小的最外层电子称为价电子。物质的化合价由价电子的数目决定，有几个价电子就称为几价元素。用得最多的半导体材料是硅和锗，它们都是四价元素。

金属材料的价电子受原子核的吸引力小，故大量的价电子都能够挣脱原子核的束缚而成为自由电子。这些自由电子在外电场的作用下，作定向运动而形成电流，因此，金属的导电性能良好。在绝缘材料中，价电子受原子核的吸引力很大，不容易挣脱出来成为自由电子，所以绝缘体导电性能很差。

二

半导体材料的分类和其导电特点

1. 本征半导体

半导体材料的原子结构比较特殊，硅和锗的最外层都有4个价电子，其原子结构如图1-1所示。为了达到稳定结构，每个原子最外层的4个价电子分别和邻近的4个原子中的一个价电子组成电子对，如图1-2所示。电子对中的价电子，一方面围绕自身的原子核运动，另一方面也围绕另一个原子的原子核运动，化学家称这种电子对为共价键。每个原子以共价键的形式与相邻的四个原子结合成晶体结构，这种结构称为共价键结构。当这种晶体结构的半导体纯净而无杂质时，称为本征半导体。

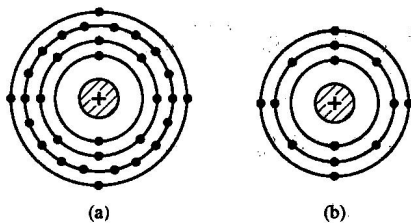


图1-1 锗和硅的原子结构

(a) 锗 Ge; (b) 硅 Si

半导体的导电能力在不同条件下有很大差别。在一般条件下，由于本征半导体相邻原子间存在着稳固的共价键，其外围的四个价电子受共价键的束缚不易脱离共价键形成自由电子，因此导电能力并不强。但在温度升高或受到光照等条件下，价电子获得能量，热运动的强度增大，就比较容

易脱离共价键的束缚,形成自由电子。电子脱离共价键后,在共价键中留下的空位称为空穴,于是就形成电子-空穴对(自由电子和空穴总是成对出现的,因此称为电子-空穴对),如图1-3所示。此时,若对半导体施加外电场,半导体中的电子和空穴受到电场的作用力,将出现两部分电流,一部分电流是自由电子作定向运动形成的电子电流,另一部分电流是仍被原子核束缚的价电子(不是自由电子)被丢失电子的原子核“掠夺”,递补空穴形成的空穴电流(失去价电子的原子带正电荷,它能吸引相邻共价键中的价电子来填补这个空穴,相邻的共价键由于失去价电子留下了新的空穴,这个新空穴又会被其他的共价键中价电子所填补,这样继续下去,形成了一种价电子递补空穴的运动,好像半导体中有一个自由的空穴)。也就是说,在半导体中存在自由电子和空穴两种载流子(载流子指物体内能够自由移动的带电粒子),这是半导体和金属在导电机理上的本质区别。

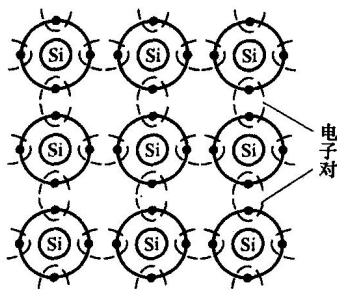


图1-2 本征半导体

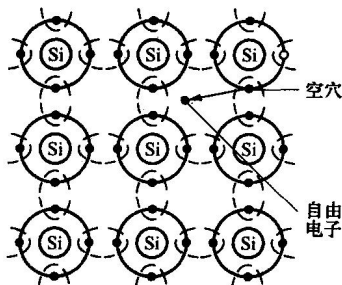


图1-3 电子-空穴对

因此,若半导体的温度升高,或受到光照时,由于其内部两种载流子数量的增加,半导体的导电能力会大大增强。利用这种特性,半导体可以用来制造热敏电阻、光敏电阻等器件。

2. 杂质半导体

相对而言,本征半导体中载流子数目极少,导电能力很低。但若在本征半导体中掺入微量杂质后,其内部的载流子数量将大大增加,导电能力将可增加到本征半导体导电能力的几十万乃至几百万倍,此时的半导体,称为掺杂半导体或杂质半导体,利用杂质半导体的这种特性,就可制造二极管、三极管等半导体器件。根据掺入杂质的不同,杂质半导体可以分为

N 型和 P 型两大类。

N 型半导体中掺入的杂质为磷或其他最外层有五个电子的五价元素，磷原子在取代原来本征半导体晶体结构中的原子，并将其最外层的四个电子用于构成共价键时，其第五个价电子成了“多余”的电子，很容易摆脱磷原子核的束缚而成为自由电子，而且，磷原子的周围都是硅或锗原子形成的稳定的共价键结构，丢失电子的磷原子还不容易从其他原子的价电子得到递补，于是半导体中的自由电子数目将大量增加，而“自由空穴”的数量却较少。因此，在掺入磷元素的半导体内部，自由电子成为多数载流子，空穴则成为少数载流子，如图 1-4 所示。

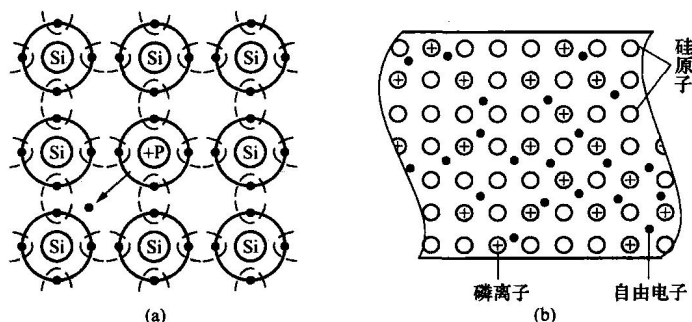


图 1-4 N 型半导体

(a) 单个磷离子周围；(b) 半导体内部情况

图 1-4 (a) 为单个磷离子释放的电子成为自由电子，图 1-4 (b) 则为半导体内部的总体情况，自由电子充斥半导体内，一旦其他共价键形成空穴-电子对，其空穴也很容易被其他自由电子所递补而消失，因此 N 型半导体内空穴是少数载流子（图中未画出空穴）。

P 型半导体中掺入的杂质为硼或其他三价元素，硼原子在取代原晶体结构中的原子并构成共价键时，将因缺少一个价电子而形成一个空穴，于是半导体中的空穴数目大量增加，空穴成为多数载流子，而自由电子则成为少数载流子，如图 1-5 所示。

由图 1-5 (a) 可见，一个硼原子从其他共价键空穴-电子对的硅原子中得到一个电子而形成硼离子，失去一个电子的硅原子成为一个空穴，将设法再从其他硅原子中获得电子，因此在 P 型半导体内部空穴看起来好

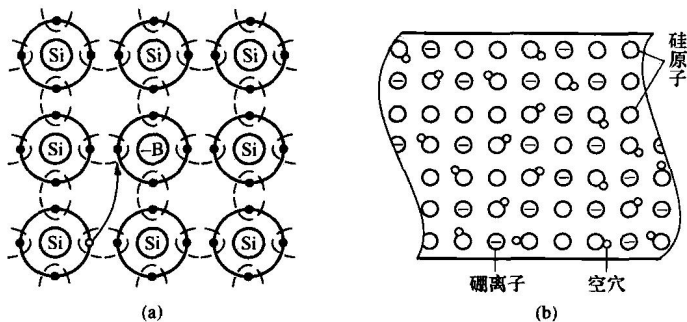


图 1-5 P 型半导体

(a) 单个硼离子周围；(b) 半导体内部情况

像能够“自由移动”，成为载流子。图 1-5 (b) 则为半导体内部的总体情况，空穴充斥半导体内，一旦其他共价键形成空穴-电子对，其自由电子也很容易填充到其他空穴中而消失，因此 P 型半导体内空穴是多数载流子，自由电子则是少数载流子（图中未画出自由电子）。

总之，在本征半导体内部掺入杂质后，载流子的情况发生变化。掺入五价的磷，形成 N 型半导体，其内部可以自由移动的电子多，可以“自由移动”的空穴少，因此，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。掺入三价的硼，形成 P 型半导体，其内部可以“自由移动”的空穴多，可以自由移动的电子少，因此，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

最后，应该说明的是，不管是 P 型半导体还是 N 型半导体，从外部看，都呈电中性（即不带电）。因为，其内部的载流子数量等于离子的数量，所带的正电荷数正好等于所带的负电荷数。只是，载流子可以“自由移动”，而离子（磷离子或硼离子）却不能自由移动而已。

3. PN 结的形成

若将一块 P 型半导体和一块 N 型半导体紧密地制作在一起，根据扩散原理，空穴要从浓度高的 P 区向 N 区扩散，自由电子要从浓度高的 N 区向 P 区扩散，并在交界面发生复合（耗尽），形成载流子极少的正负空间电荷区，如图 1-6 所示，也就是 PN 结，又叫耗尽层。

正负空间电荷在交界面两侧形成一个由 N 区指向 P 区的电场，称为内电场，它对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，所以空间电荷区又称为阻挡层。同时，内电场对少数载流子（P 区的自由电子和 N 区的空穴）则可推动它们越过空间电荷区，这种少数载流子在内电场作用下有规则的运动

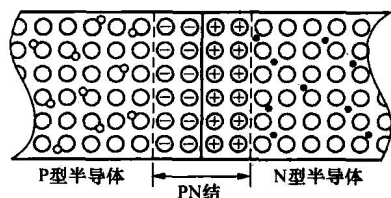


图 1-6 PN 结的形成

称为漂移运动。

扩散和漂移是相互联系，又是相互矛盾的。在一定条件下（例如温度一定），多数载流子的扩散运动逐渐减弱，而少数载流子的漂移运动则逐渐增强，最后两者达到动态平衡，空间电荷区的宽度基本上稳定下来，PN 结就处于相对稳定的状态。其内电场也相对稳定。

4. PN 结的特性

若在 PN 结两端加上一定数值的正向电压，即电源的正极接 P 区，电源的负极接 N 区，则由于外电场的方向与内电场的方向相反，削弱了内电场的作用，内电场变薄，如图 1-7 (a) 所示。使内电场阻碍多数载流子扩散运动的能力减弱，多数载流子的扩散运动增强。为了保持半导体的载流子浓度基本不变，外电源必须不断给半导体补充电荷（电源正极向 P 区补充正电荷、负极向 N 区补充负电荷），使多数载流子源源不断地流过 PN 结，形成较大的扩散电流。由于这个电流是在外加正向电压的情况下产生的，故称为正向电流。若外电场增强，则内电场进一步削弱，扩散电流随之增加。在正常的工作范围内，PN 结上的外加电压稍有增加就会引起正向电流的急剧增加，此时 PN 结相当于一个很小的正向电阻。

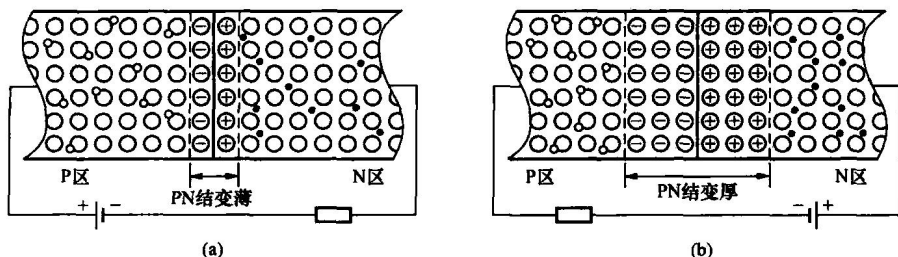


图 1-7 外部电场对 PN 结的影响

(a) 加正向电压；(b) 加反向电压

当外电场与内电场方向相同时, PN 结的内电场得到增强而变厚, 如图 1-7 (b) 所示。外电场增强了内电场对多数载流子扩散运动的阻碍作用, 使多数载流子的扩散运动难于进行。由于内电场的增强, 使少数载流子的漂移运动得到增强, 形成了反向电流。但是反向电流是由少数载流子的漂移运动形成的, 在温度不变的条件下, 少数载流子的数目基本不变。反向电压增加, 内电场进一步增强, 尽管全部数量的少数载流子参与导电, 其反向电流仍基本上保持不变。在反向电压不变时, 只有温度升高, 才能使少数载流子数目增加, 反向电流才会随之增加。

在上面分析时施加外部电压时, 我们称之为“正向电压”和“反向电压”, 并不是以外部电场与内部电场方向的不同和相反来确定的, 而是根据人们对电压和电流认识的习惯来确定的。通常, 在一般的电路中, 给元件两端施加的电压增加, 能使流过该元件的电流得到增大, 这个电流与电压同向, 习惯上称为正向电流, 相应电压方向就称为“正向电压”。根据这个认识习惯, 给 PN 结施加“正向电压”时, 外部电场正好与内部电场方向相反, 此时的电流称为“正向电流”; 当外部电场与内部电场方向相同时则称为“反向电压”, 此时的电流称为“反向电流”。

由上面分析可知, 给 PN 结的两端施加正向电压, 其内部电场削弱, PN 结变薄, 扩散电流随着外部电压的增大而增加, PN 结相当于一个很小的电阻; 给 PN 结的两端施加反向电压, 其内部电场增强, PN 结变厚, 扩散电流减小, 而漂移电流受少数载流子数量的限制又不可能有明显的增加, PN 结相当于一个很大的电阻。人们将正向电阻小, 反向电阻大的这种现象称为单向导电性现象。因此, 我们可以得出一个重要的结论: PN 结具有单向导电性。

5. PN 结的击穿

PN 结两端施加反向电压的数值是不能任意提高的, 因为所加的反向电压达到一定数值后, 由于内外电场的作用力, 将使半导体中的少数载流子猛增, 从而使反向电流急剧增大。PN 结反向电流急剧增大的现象称为反向击穿, 反向击穿可有两种类型: 雪崩击穿和齐纳击穿。

施加反向电压太高时, PN 结的两端形成的电场很强, 少数载流子将获得很大的能量, 这些能量很大的载流子在穿越 PN 结的漂移运动时, 会把共价键中的价电子碰撞出来, 形成新的自由电子-空穴对, 而这些新的载流子又在内电场的作用下, 再碰撞其他共价键中的价电子, 结果使半导

体中少数载流子的数量猛增,反向电流急剧增大,造成反向击穿,这种击穿称为PN结的雪崩击穿。当PN结上的电场进一步增加到某一数值,则强大的电场甚至可以直接把共价键中的价电子拉出来,形成较大的反向电流,此时的击穿称为PN结的齐纳击穿。

雪崩击穿和齐纳击穿都会在半导体和PN结中产生热量。如果散热条件好,PN结的温度上升幅度不大,外部电场撤销或所加电压减小后,发生击穿的PN结还可以恢复原来的状态(单向导电性),则称这种击穿为可逆击穿。如果散热条件不好,PN结的温度将越来越高,从而使PN结烧毁,这种击穿称为热击穿,热击穿是不可恢复的,即不可逆击穿。在没有采取专门措施的一般条件下,PN结由可逆击穿发展到不可逆击穿的时间相当短,因此除非在制造时已经采取了专门的措施,一般PN结出现的击穿往往是不可逆的击穿。

第二节 二极管

将构成PN结的半导体P区和N区,分别用引线引出形成两个电极,再将PN结用一定外壳封装起来,就得到一个晶体二极管,简称为二极管。晶体二极管中的“晶体”二字,是指制造二极管的半导体材料具有晶体结构(共价键结构),以示和电子二极管的区别。

一、二极管的外形、结构、分类及符号

1. 二极管概述

由于二极管是由PN结构成的,而PN结具有单向导电性,因此,晶体二极管也具有单向导电性。二极管的应用范围很广,利用其单向导电性,二极管可用于整流、检波、限幅、元件保护以及在数字电路中用作开关元件等。

二极管的符号如图1-8所示。图1-8(a)是国家标准GB/T 4728.5—2000中二极管的符号,在电路中,有时为了表示二极管的两个接线端子和极性,可以采用如图1-8(b)所示的符号。在图1-8(b)中,二极管旁边有一个字母“V”,是二极管在电路图中的文字符号(有的图也采用旧符号“D”作为二极管的文字符号)。图1-8(c)所示的为二极管的结构示意图,由PN结P区引出的电极为二极管的正极,由N区引出的

电极为负极。二极管的外形如图 1-9 所示。

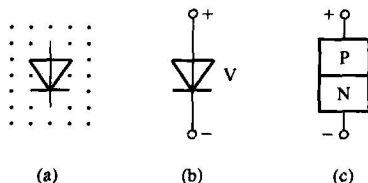


图 1-8 二极管符号

(a) 国家标准图形符号；(b) 电路中的符号；(c) 结构示意图

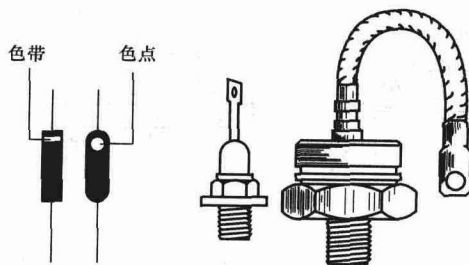


图 1-9 二极管的外形

2. 二极管按构造分类

如上所述，二极管是由一个 PN 结构成的，但采用不同的制造工艺和方法，制成的 PN 结的结构不一样，使用场合也不一样。尤其是 PN 结的面积大小不同，PN 结的等效结电容大小也不同，影响着二极管在不同频率的电路中的使用。下面首先介绍等效结电容的概念，然后再介绍二极管分类。

所谓等效结电容是指 PN 结上存在的类似电容充放电的效应。当加在 PN 结上的电压变化时，PN 结电荷区的厚度会发生变化。外加正向电压升高时，N 区的自由电子和 P 区的空穴进入电荷区，中和部分带正负电荷的粒子，使电荷区变薄，内电场减弱，这就好像一部分电子和空穴向 PN 结充电。当外加正向电压降低时，一部分自由电子和空穴离开电荷区，使电荷区变厚，这就好像 PN 结在放电。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过程相似,因此用结电容来描述电荷区的电容效应,称之为等效结电容。

二极管常用的分类方法有两种:按构造分类和按用途分类。按构造分,二极管主要有点接触型、面接触型和平面型三种,如图1-10所示。点接触型二极管是在锗或硅材料的单晶片上熔接一根很细的金属丝形成的,因此,形成PN结的面积很小,等效结电容也很小,适用于高频电路及小信号整流。与面结型相比较,点接触型二极管正向特性和反向特性都较差,因此,不能用于大电流的场合。点接触型二极管的构造简单、价格便宜,广泛应用于高频小信号的场合。

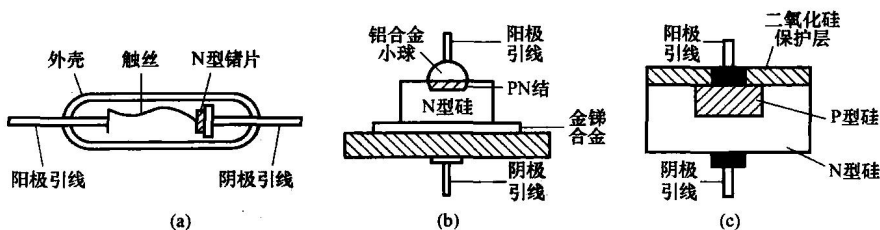


图1-10 二极管的不同结构

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 平面型

面接触型二极管PN结的面积大,允许通过的正向电流大,但等效结电容也大,常用做整流管,适合于在低频状态下工作。平面型二极管有两种,PN结的面积较小的二极管,其等效结电容小,适合于做脉冲数字电路中的开关管;PN结的面积较大的管子,可通过较大电流,适用于大功率整流。

实际的二极管结构种类很多,上面的三种结构还可再细分,一般还可分为:点接触型、键型、合金型、扩散型、台面型和平面型六种,有兴趣的读者可参考有关书籍进行专门研究。

二极管还可按其用途进行分类,按用途分类一般可分为:检波二极管、整流二极管、限幅二极管、调制二极管、混频二极管、开关二极管、稳压二极管和发光二极管八种。检波二极管、调制二极管和混频二极管主要用于高频电路,不是本书讨论的范畴。其他二极管则主要与具体的电路有关,若在本书后续章节的具体电路中出现,届时再结合具体的电路进行说明。