

电子线路基础

西南师范学院

四川师范学院

南充师范学院

重庆师范学院

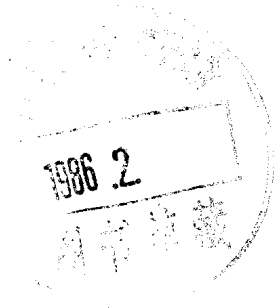
合编

四川科学技术出版社

72.76
127

电 子 线 路 基 础

西南师范学院 四川师范学院 合编
南充师范学院 重庆师范学院



四川科学技术出版社

一九八五年六月·成都

8610060

责任编辑: 王蜀瑶 王 晓

封面设计: 文小牛

版面设计: 李荣慧

电子线路基础

四川科学技术出版社出版 重庆印制一厂印刷
新华书店重庆发行所发行

开本787×1092 1/16 印张25.5 插页 6 字数656千
1986年7月第一版 1986年7月第一次印刷
印数: 1—16,550 册

书号: 15298·94

定价: 5.05 元

前 言

目前,全国出版的有关“电子线路基础”的书籍并不鲜见,但尚无适用于高等师范院校的教材。为此,1981年6月召开的“四川省高等师范院校电子线路基础座谈会”特委托全川四所师范学院编写此书。

本书的编写原则是,根据教育部颁发的高师理科专业“电子线路基础大纲”要求的精神,考虑到电子技术的发展,同时特别注意高等师范院校教学的特点。在内容安排上着重于对基本概念的阐述和基本电路的分析,进而述及数字电路、收音机、电视机的基本原理及实际线路,以及中学常用电子仪器的有关知识等等。

本书初稿曾根据1983年1月召开的四川省高等师范院校电子线路基础教材讨论会上省内外兄弟院校的意见作了认真的修改。近一年多来,修改稿又在二十多所院校广泛试用。1984年4月由二十四所师范院校在四川师范学院对书稿进行了审定,并作了再一次的修改。

本书可作高师理科各专业的本科、专科,教育学院的“电子线路基础”课教材,也可作为电子技术培训班教材,并可供从事电子专业的工程技术人员及自学者参考。

本书由谭道鸿、高呈敏同志主编,各章编写分工是:第一、三章(四川师院高呈敏同志),第二、五章(四川师院田光烈同志),第四章(四川师院雷远振同志),第六、十章(西南师院朱传秀同志),第七、八、九章(西南师院谭道鸿同志),第十一章(重庆师院付晓棣同志),第十二章(南充师院唐昌凡同志),附录(重庆师院李复生同志)。全书最后由高呈敏、谭道鸿同志修改、定稿。

西南民族学院、渝州大学、涪陵师专、万县师专、内江师专、宜宾师专、江津师专、达县师专、绵阳师专、西昌师专、温江师专、乐山师专、重庆教育学院、成都教育学院、渡口教育学院、南充教育学院、绵阳教育学院、永川教育学院、以及宁夏大学、西北师院、贵阳师院、云南师大、贵州安顺师专、贵州安顺教育学院等兄弟院校的同志参加了本书纲目的制定和书稿的讨论、审定及修改工作,提出了不少宝贵意见,对此表示衷心的感谢!由于编者水平所限,本书错误及不妥之处在所难免,恳请使用本书的师生与读者批评指正。

编 者

1984年10月

目 录

第一章 半导体器件的原理与特性	1
第一节 半导体的导电性能	1
第二节 PN 结的特性	5
第三节 晶体二极管	11
第四节 晶体三极管	15
第五节 场效应管	24
思考题与习题	33
第二章 低频电压放大器	36
第一节 单管低频电压放大器	36
第二节 放大器的分析法	41
第三节 偏置电路与静态工作点的稳定	46
第四节 微变等效电路法	54
第五节 放大器的频率特性	61
第六节 多节阻容耦合放大器	70
第七节 场效应管放大器	76
思考题与习题	82
第三章 反馈放大器	87
第一节 反馈放大器的基本概念	87
第二节 反馈放大器的电路形式	90
第三节 负反馈对放大器性能的影响	94
第四节 反馈放大器放大倍数估算	102
第五节 射极输出器与源极输出器	104
思考题与习题	112
第四章 差动放大器与集成运算放大器	115
第一节 简单直接耦合放大器存在的问题	115
第二节 差动放大器	116
第三节 运算放大器	127
第四节 运算放大器的应用	135
第五节 集成运算放大器内部电路介绍	139
思考题与习题	143
第五章 低频功率放大器	147
第一节 功率放大器的特点和分类	145
第二节 单管甲类功率放大器	149
第三节 互补对称功率放大器	150
第四节 其它形式的推挽功率放大电路	159
思考题与习题	161

第六章 直流稳压电源	163
第一节 整流电路	163
第二节 滤波电路	166
第三节 稳压管稳压电路	170
第四节 串联型晶体管稳压电路	173
第五节 集成稳压电路	180
思考题与习题	181
第七章 调谐放大器	184
第一节 调谐放大器的特点	184
第二节 晶体管的高频等效电路	185
第三节 单调谐放大器	187
第四节 调谐放大器的稳定性	192
第五节 单调谐中频放大器实例	194
第六节 双调谐放大器	196
思考题与习题	201
第八章 正弦波振荡器	203
第一节 自激振荡器原理	203
第二节 变压器耦合振荡器	206
第三节 三点式LC振荡器	209
第四节 RC桥式振荡器	216
第五节 石英晶体振荡器	219
思考题与习题	224
第九章 非线性变换	227
第一节 调幅与检波	227
第二节 调频与鉴频	237
第三节 变频器	249
第四节 超外差晶体管接收机	252
思考题与习题	261
第十章 脉冲电路	262
第一节 脉冲的基本概念	262
第二节 RC 电路	263
第三节 RC 电路的应用	266
第四节 晶体二极管开关及限幅、钳位电路	269
第五节 晶体三极管的开关特性	273
第六节 集基耦合双稳态触发器	277
第七节 射集耦合触发器	282
第八节 单稳态触发器	284
第九节 多谐振荡器	288
第十节 间歇振荡器	290
第十一节 变形间歇振荡电路	293
思考题与习题	295
第十一章 数字电路	299

第一节 概述	299
第二节 二进制	300
第三节 组合逻辑基础	301
第四节 集成门电路	309
第五节 集成触发器	312
第六节 计数器	318
第七节 译码与数字显示	324
思考题与习题	328
第十二章 黑白电视接收机	332
第一节 电视广播的基本知识	332
第二节 显象管与黑白电视接收机方框图	338
第三节 黑白电视接收机电路分析	341
第四节 集成电路黑白电视接收机简介	377
思考题与习题	380
附录 中学常用电子仪器	382
参考书目	402

第一章 半导体器件的原理与特性

用半导体材料制成的晶体二极管、晶体三极管、场效应管等半导体器件,具有体积小、重量轻、工作可靠、使用寿命长、耗电少等优点,因而在电子线路中得到广泛的使用。

本章将研究半导体的性质、半导体器件的基础—PN结、晶体二极管、晶体三极管及场效应管的结构、工作原理和特性。它是学习,研究电子线路的重要基础。

第一节 半导体的导电性能

一、什么是半导体

各种半导体器件都是由半导体材料制成的,所以有必要首先介绍半导体的导电性能。

自然界的物质种类繁多,性质各异。就物质的导电性能来看,有的物质容易导电,称为导体,如银、铜、铝等。有的物质几乎不导电,称为绝缘体,如塑料、云母、陶瓷等。还有一类物质,其导电性能介于导体和绝缘体之间,称为半导体,如锗、硅、硒、砷化镓等。

物质的导电能力常用电阻率 ρ 的大小来衡量,电阻率愈小,物质的导电能力愈好。一般金属的电阻率约为 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$,绝缘体的电阻率约为 $10^{10} \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$,半导体的电阻率在 $10^{-3} \sim 10^0 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。

半导体之所以得到广泛的使用,并不是因为它具有一定的导电能力,而是由于它具有下列的特性:

(1) 半导体的电阻率随温度的升高而减小,这与金属的电阻率随温度的升高而增大刚好相反。另外,由于温度引起电阻率的变化,半导体比金属显著得多。例如,铜的电阻率,温度每升高 1°C ,增加 0.4% ,而纯锗从 20°C 升高到 32°C ,电阻率下降近一半。

(2) 半导体的电阻率随掺入微量杂质而发生显著变化。在金属中掺入少量杂质,其电阻率变化不大。半导体却不同,在纯净的半导体中只要掺入极微量的杂质,将使电阻率显著下降。例如,在纯锗中加入百万分之一的硼,锗的电阻率将从 $47 \Omega \cdot \text{cm}$ 减小到 $1 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右。

(3) 半导体的电阻率随光照而变化。

利用半导体独特的导电性能,可以制成各种功能的半导体器件。

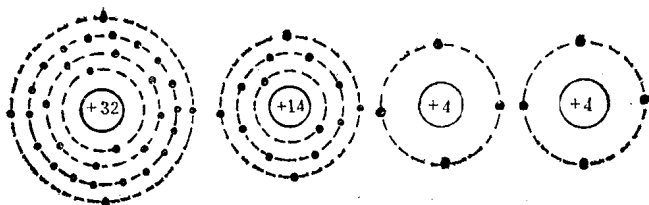
为什么物质的导电性能各不相同呢?根本原因在于物质内部的结构。

二、本征半导体

非常纯净、结构完整的半导体称为本征半导体。下面介绍常用的半导体材料锗和硅的晶体结构和导电机构。

1. 本征半导体的晶体结构: 图1-1(a)是硅和锗的单个原子结构。硅和锗的最外层电子都是四个;所以都是四价元素。最外层电子受原子核的束缚力最小,称为价电子。半导体的导电性能与价电子有关。画图时,一般只画图1-1(b)的简化结构。

用来制造半导体器件的半导体材料硅或锗,都是经过加工提纯的单晶体。在单晶硅或锗



锗(Ge)原子 硅(Si)原子 锗(Ge)原子 硅(Si)原子
(a) 原子结构图 (b) 简化结构图

图1-1 硅和锗的原子结构平面示意图

中，其原子排列已由杂乱无章变成非常整齐的状态。图1-2是硅和锗原子的晶体结构。图中每个小球代表一个原子，每个原子与邻近的四个原子相结合。在用虚线标出的立方体中，表明原子与四个最邻近原子的位置。该原子处于立方体中心，四个最邻近的原子则位于这一立方体的四个顶角。

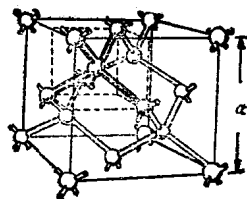


图1-2 硅和锗的晶体结构图

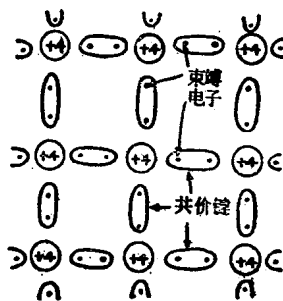


图1-3 硅和锗晶体结构平面示意图

图1-3是硅和锗晶体结构的平面示意图。由图可见硅或锗原子组成晶体后，原子之间距离相等。由于每个原子最外层只有四个价电子，而原子的最外层电子要有八个才是稳定状态，因此，原子与原子组成晶体时，每一个原子都要争夺周围相邻原子的四个电子组成稳定状态，这样，每相邻的两个原子都共用一对电子、叫“共有电子对”。共有电子对中任何一个电子，既围绕自己核运动，而且也出现在相邻原子所属的轨道上。它既受本身原子核的吸引，也受相邻原子核的吸引，从而牢固地把两个原子束缚在一起，两个共有的价电子形成的束缚作用叫做“共价键”。硅和锗的原子最外层有四个价电子，正好和相邻的原子组成四个共用电子对，即四个共价键。

共价键内的两个电子属于两个原子所共有，它们被束缚在两个原子附近，受两个原子核引力的约束，处于相对稳定的状态，因此，晶体硅和锗中的共价键内的电子被称为“束缚电子”。

2. 本征激发：在硅或锗共价键中，电子受原子核的束缚力比绝缘体中价电子所受的束缚力小得多。绝缘体的价电子挣脱原子核的束缚成为自由电子，必须额外获得10个电子伏特(eV)的能量，在半导体中，只需很少的能量就可以使束缚电子变成自由电子，例如在室温时硅为 $1.1eV$ ，锗为 $0.72eV$ 。价电子挣脱束缚变成自由电子所需获得的最小额外能量称为电子的“激发能”。

在绝对零度时($T = -273^{\circ}C$)，本征半导体中的价电子由于共价键的束缚，只能在原子核附近旋转，而不能在晶体中自由运动，这时本征半导体相当于绝缘体，其整个晶体保持电中性，而且对于每个原子来说都呈电中性。

在一定温度下，晶体中的原子不断地在自己平衡位置附近作热运动，温度愈高，热运动就愈剧烈。这种热运动可以使束缚电子获得额外能量，当束缚电子额外获得的能量等于或超过激发能时，束缚电子可以挣脱束缚而成为自由电子，如图1-4。本征半导体中的束缚电子挣脱束缚成为自由电子的过程，叫做本征激发或热激发。本征激发所需的激发能，还可以由光照，辐射等得到。

在本征激发过程中，硅或锗晶体中某个共价键上的束缚电子激发成为自由电子后，共价键中留下一个空位，这个空位叫“空穴”。空穴在半导体器件中有很重要的作用，所以有必要研究一下它的特性。

(1) 空穴带正电荷 在本征半导体中，每个原子的原子核所带正电荷数与核外电子所带负电荷数相等，整个原子呈电中性。由于本征激发使某个原子的束缚电子变成自由电子，电子带负电荷 $(-q)$ 。中性的原子因失去一个电子而成为一个带正电荷的离子，故空穴带正电荷，且在数量上等于一个电子电荷 $(+q)$ 。

(2) 空穴也能运动 当晶体的某个共价键出现一个空穴后，相邻共价键中的价电子在这个空穴所带正电荷的吸引下，很容易转移到这个空穴上来，使这个空穴消失，同时在这个价电子原来所处的共价键中留下新的空穴，这个新的空穴还会被另外的共价键中的价电子所填补，如图1-5。这种价电子接连不断地填补空穴的运动，相当于一个空穴从一处移到另一处，这种空穴的迁移运动和自由电子在键外自由运动相似。但应注意，空穴运动实质上是共价键内束缚电子由一个键到另一个键的移动，通常不说是电子的移动，而直接说是空穴运动。

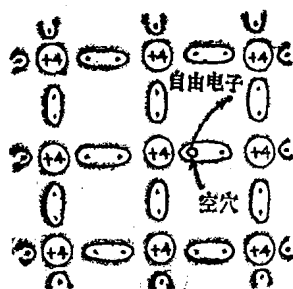


图1-4 本征激发

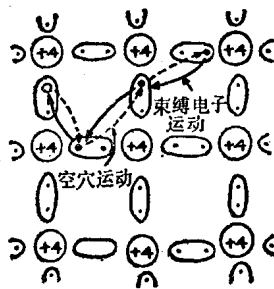


图1-5 空穴运动

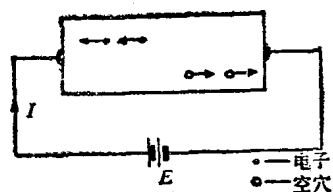


图1-6 本征半导体中载流子运动

由空穴特性得知，空穴也是半导体中的一种载流子，因此，在本征半导体中，由于本征激发同时存在自由电子和空穴两种载流子，在外电场的作用下，半导体中将同时产生两种载流子的导电现象，如图1-6。其中自由电子向正极移动形成电子电流 I_n ，空穴向负极移动形成空穴电流 I_p ，因此流过外电路的电流等于电子电流和空穴电流的代数和，即 $I=I_n+I_p$ 。在半导体中，电子和空穴两种载流子都参加导电，这是半导体的一个重要特性，与金属中只有电子载流子导电的情况，有很大的不同。

在一定温度下，由于本征激发不断地产生自由电子，同时出现数量相等的空穴。这种电子和空穴成对出现，常称为“电子—空穴”对。这种因本征的激发而产生的电子—空穴对，在数量上并不是无限增加的。因为自由电子和空穴在运动过程中可能重新结合，而使电子—空穴对消失。我们称这种激发的反过程为“复合”。因此在本征半导体中，电子—空穴对产生与复合是同时存在的。在一定温度下，当电子—空穴对产生和复合达到一定的动态平衡时，本征半导体中的载流子数目维持一定，这种状态称为“热平衡”。通常把每立方厘米(cm^3)体积中的载流子数目叫做载流子浓度，单位为：个/ cm^3 或 cm^{-3} 。在本征半导体中，热平衡时电子浓度 $\bar{n}$ 应等于空穴浓度 $\bar{p}$ ，即 $\bar{n}=\bar{p}=n_i$ ，式中 n_i 为本征半导体浓度。

n_i 可用下式表示：

$$n_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_{G0}}{2KT}} \quad (1-1)$$

式中: A_0 ——与半导体材料有关的常数;

E_{g0} —— 0°K 时的激发能。硅的 $E_{g0}=1.12\text{eV}$, 锗的 $E_{g0}=0.785\text{eV}$;

T ——绝对温度;

K ——波耳兹曼常数。

在室温时($T=300^\circ\text{K}$), 硅和锗的本征浓度为:

$$\text{硅: } n_i=1.5\times 10^{10}\text{cm}^{-3}; \text{ 锗: } n_i=2.5\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$$

已知硅的原子密度为 $5.0\times 10^{22}\text{cm}^{-3}$, 锗的原子密度为 $4.4\times 10^{22}\text{cm}^{-3}$ 。所以在室温时, 每 10^{12} 硅原子或 10^9 个锗原子中, 约有一个原子产生一个自由电子和一个空穴。可见, 不论本征硅或本征锗, 载流子浓度都很小。所以, 电阻率较大, 导电能力较差。

由(1-1)式知, 本征浓度 n_i 与温度有密切关系, n_i 随温度的升高, 按指数规律增大, 因此, 本征半导体的电阻率随温度的升高急剧减小。利用此种特性, 可制成热敏器件。

对于晶体管等半导体器件, 由于本征浓度 n_i 随温度变化, 会使器件工作性能不稳定, 从而限制了半导体器件的应用范围。

三、P型半导体和N型半导体

上面所介绍的本征半导体, 由于电阻率较大, 用处不多。但只要有控制地掺入很少量的“杂质”, 就可以大大地改变半导体的导电能力及其类型。利用掺杂的方法可以制成N型半导体和P型半导体, 它们是半导体器件的基本材料。下面分别介绍它们的形成和导电特性。

1. N型半导体: 在本征硅或本征锗

中, 掺入少量的五价元素, 例如磷(P), 磷原子就会与硅原子组成共价键, 结构如图1-7(a)。

由于掺入的磷原子数量比硅原子少得多, 整个晶体的结构不变, 只是某些位置上的硅原子被磷原子代替。因为磷是五价元素, 所以一个磷原子的四个价电子与周围的四个硅原子的价电子构成共价键时, 多出一个价电子。这个价电子没有被束缚

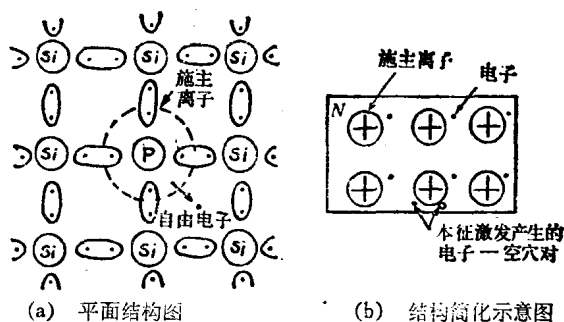


图1-7 N型半导体

在共价键内, 只受磷原子核的束缚, 由于所受束缚力很小, 只要很小的激发能(如硅掺磷为 0.044eV)就可以挣脱磷原子的束缚而成为自由电子。在室温下, 几乎所有磷原子多出的电子都能成为自由电子。这时, 磷原子由于失去一个电子而成为带正电的离子。正离子被限制在晶格中不能移动, 不能参加导电。每掺入一个磷原子就能施放出一个自由电子。故把磷原子称为“施主原子”, 磷称为“施主杂质”。显然, 掺入的施主杂质愈多, 施放出的自由电子也愈多, 电阻率也愈低。

本征激发时, 电子、空穴成对出现。在掺杂半导体中, 杂质电离只能产生一种载流子, 对于施主杂质, 只能产生电子载流子而不能产生空穴, 由于施主杂质的掺入, 使半导体的电子载流子大大增加。电子浓度大大超过空穴浓度, 即 $n \gg p$ 。这种具有大量电子载流子的半导体, 称为电子型半导体或N型半导体。

在N型半导体中, 除了掺杂产生的大量电子载流子外, 还有由于本征激发所产生的少量

空穴载流子。由于掺杂浓度远大于本征载流子浓度，因而空穴相对于电子是极少数，所以在N型半导体中，称空穴为少数载流子(简称“少子”)，而把电子称为多数载流子(简称“多子”)。图1-7(b)是N型半导体简化示意图。

应指出，在N型半导体中，虽然自由电子的数量远大于空穴的数目，但整个半导体仍然是电中性的。

2. **P型半导体**：如果在本征硅或本征锗中，掺入少量三价元素，如硼(B)，硼原子就会与硅原子组成共价键结构，如图1-8(a)所示。

因为硼原子只有三个价电子。当它同相邻的四个硅原子组成共价键时，还缺少一个电子。因而在一个共价键上就出现了一个空位置，这个空位很容易接受一个外来电子的填补，组成完整的共价键。在室温时，邻近的硅原子共价键中的束缚电子只需要很小的激发能(硅掺硼为 0.045eV)就能很容易地转移到这个空位置上来，硼原子接受一个电子后成为负离子，同时硅

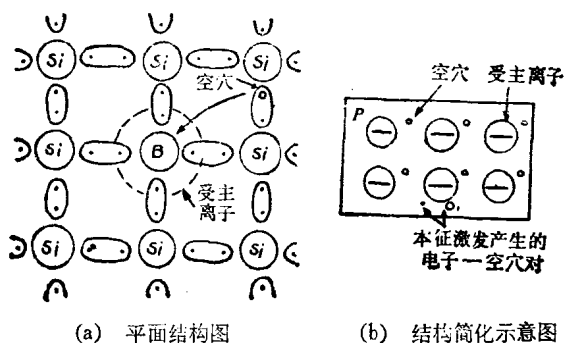


图1-8 P型半导体

原子的共价键上就出现了一个空穴。这样在每个硼原子接受一个价电子的同时，在附近就产生一个空穴。由于硼原子容易接受一个电子，故称硼原子为“受主原子”，硼为“受主杂质”。在常温下，几乎全部硼原子都成为负离子，并产生相同数量的空穴。从而使半导体的空穴载流子数量大大增加，空穴浓度比电子浓度大得多，即 $P \gg n$ 。这类半导体称为空穴型半导体或P型半导体。在P型半导体中，空穴是多数载流子，而电子是少数载流子。图1-8(b)是P型半导体的简化示意图。

最后说明一下杂质补偿问题。如果在N型半导体中加入浓度较高的受主杂质，使空穴抵消一部份电子后，空穴仍占多数，半导体就由N型转化成了P型。如果再掺入浓度较高的施主杂质，则电子又会成为多数，半导体由P型转变成N型，这种现象称为杂质的补偿作用。制造平面型晶体管和集成电路采用的多次扩散(掺杂)工艺，就是杂质补偿的应用。

第二节 PN结的特性

一、PN结的形成

在本征半导体中掺入不同的杂质，使它的两边分别形成P型半导体和N型半导体，如图1-9(a)。由于P型半导体中的空穴浓度比N型半导体中的空穴浓度大得多，而N型半导体中电子的浓度比P型半导体中的电子浓度大得多。这样，在P型半导体和N型半导体之间便产生空穴浓度梯度和电子浓度梯度，载流子就要由浓度高的区域向浓度低的区域扩散。如图1-9(b)。多数载流子的扩散，首先在P型半导体和N型半导体的交界面附近进行，在交界面附近的P型区中的空穴向N型区扩散、并和N区里的电子复合，从而使交界面P型区一侧的空穴减少，出现一层带负电荷不能移动的杂质离子。同样，在交界面附近的N型区里的电子要向P型区扩散，并和P型区里的空穴复合。从而使交界面N型区一侧的电子减少，出现一层带正

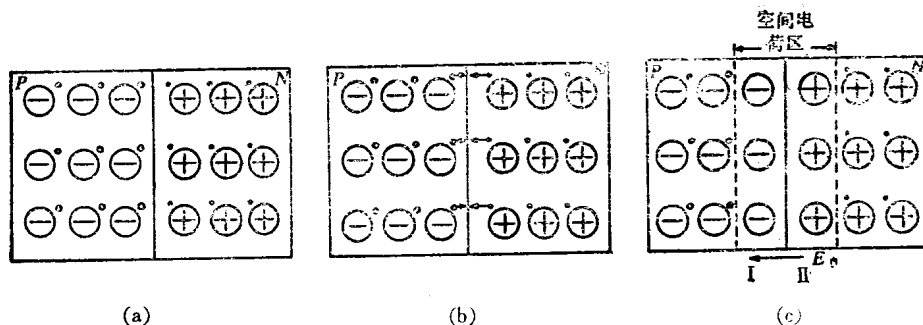


图1-9 PN结的形成

电荷不能移动的杂质离子，如图1-9(c)中的薄层 I 和薄层 II，称为空间电荷区。随着扩散的进行，空间电荷区逐渐变宽，所带的电荷量也逐渐增加。

随着带负电荷的 I 层和带正电荷的 II 层的形成，在空间电荷区内形成一个电场。由于电场在空间电荷区内部，因此称为内电场。内电场的方向由薄层 II 指向薄层 I。在空间电荷以外的P型区和N型区仍为电中性，不存在电场。

图1-10表示了内电场对载流子运动的影响。当N型区的多数载流子电子向P型区扩散，通过空间电荷区时，由于电子受力方向与电场方向相反，所以电子的扩散将受到内电场的阻碍。一部分速度较低的电子在内电场的作用下返回N型区，只有能量足够大的电子才能越过空间电荷区，扩散到P型区，成为P型区的少数载流子。同样，P型区的空穴向N型区扩散通过空间电荷区时，也会受到内电场的阻碍。此外，在内电场的作用下，N型区中的少数载流子很易运动到P型区，P型区中的少数载流子也易运动到N型区。这种少数载流子在内电场作用下形成的运动叫漂移运动。显然，内电场愈强愈有利于漂移运动。

PN结内多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动，是互相依存、互相矛盾的。

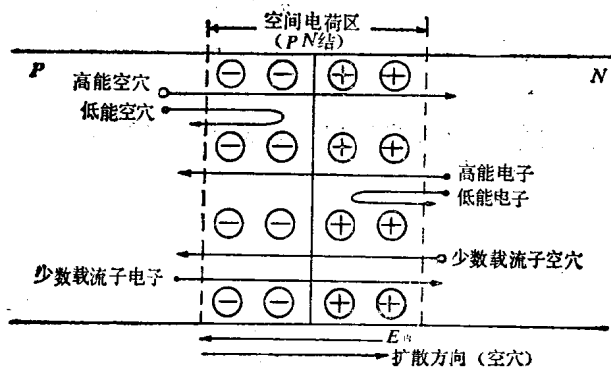


图1-10 PN结中内电场的作用

开始时，扩散运动占优势。随着扩散运动不断地进行，空间电荷区内正负离子逐渐增加，空间电荷区逐渐变宽，内电场逐渐增强，从而增强了漂移运动，削弱了扩散运动。当空间电荷区增加到一定宽度后，扩散运动和漂移运动将达到动态平衡。此时，由P型区向N型区扩散的空穴数等于由N型区漂移到P型区的空穴数，电子的运动也是如此。如果环境条件不改变，这种平衡状态将保持下去，空间

电荷区的宽度也就稳定不变，其宽度约几微米至几十微米。

所谓PN结，就是指由薄层 I 与薄层 II 构成的空间电荷区。因为它能阻止载流子的扩散，所以又称为“阻挡层”。在空间电荷区内，几乎不存在载流子，故也称为“耗尽层”。

在空间电荷区内存在着内电场，也就是说在空间电荷区两侧存在着一个电势差。这个电势差称为PN结的“接触电势差”、或称为“势垒”。接触电势差的大小除与材料有关外，还与杂质浓度、温度有关。一般用硅材料制成的PN结的接触电势差约为0.6~0.7V。锗材料制

成的PN结的接触电势差约为0.2~0.3V。

二、PN结的单向导电性

1. PN结加正向电压(正向偏置): 当PN结未加电压时,如图1-11(a),PN结处于平衡状态,这时PN结中的扩散运动与漂移运动相等。通过PN结的多数载流子形成的扩散电流,与少数载流子形成的漂移电流,从宏观上看,两者相互抵消,这时通过PN结的总电流为零。

当PN结加正向电压时,就是把电源的正极接到P型区,电源的负极接到N型区,如图1-11(b)所示。由于PN结是一个高阻区,所以电源电压的绝大部分加在PN结上。于是在PN结上建立起一个外电场 $E_{\text{外}}$ 。外电场的方向与内电场的方向相反,致使PN结中的内电场减小。内电场的减小又意味着维持内电场所需的正负离子减少,结果使空间电荷区正、负电荷减少,故空间电荷区变窄。此外,内电场减小,大大削弱了漂移运动,而利于扩散运动。这时,P型区和N型区能通过PN结的多数载流子大大增加,N型区内的电子不断地扩散到P型区,P型区的空穴也不断地扩散到N型区,形成较大的扩散电流,通过PN结的电流主要由扩散电流决定。这时,外部电源不断地向P型区补充空穴,向N型区补充电子,在外电路形成流入P型区的正向电流 I_F 。当外加电压 V_F 升高,PN结的内电场进一步减小,扩散电流也随之增大。在一定范围内, I_F 将随 V_F 急剧变化。这样,PN结加正向电压,表现为一个极小的电阻。

在加正向电压的情况下(少数载流子在电场作用下),经过PN结形成的漂移电流,其方向与扩散电流方向相反。但它远小于扩散电流,故可忽略不计。

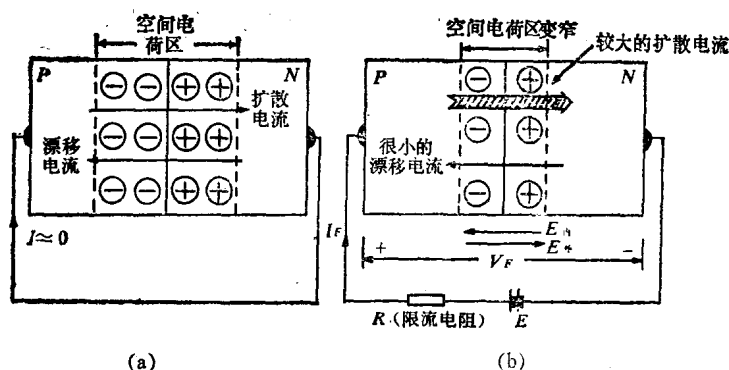


图1-11 PN结加正向电压

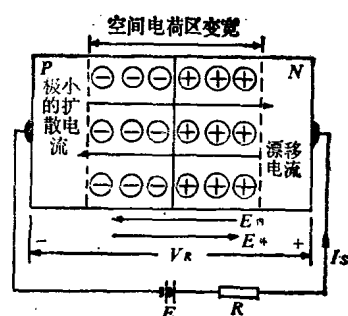


图1-12 PN结加反向电压

2. PN结加上反向电压(反向偏置): 给PN结加上反向电压,就是把电源正极接到N型区,负极接到P型区,如图1-12。这时,外电场的方向与内电场的方向相同,使PN结的内电场增加,空间电荷区变宽。由于内电场的增强,使少数载流子的漂移运动占优势;多数载流子的扩散运动很难进行。P型区的少数载流子电子在电场的作用下漂移到N型区,同样,N型区的少数载流子空穴漂移到P型区,这就形成了漂移电流。因为这个电流是由外加反向电压产生的,所以叫做反向电流。由于少数载流子的浓度很小,即使全部参加漂移运动,所形成的反向电流也是很小的。所以,PN结反向偏置时,可以认为基本不导电,表现为一个很大的电阻。

少数载流子是由本征激发产生的,其数量取决于环境温度而与外加反向电压 V_R 无关。

在一定温度下，少数载流子的浓度是不变的。因此，反向电流在一定范围将不随外加反向电压而变化，故称为反向饱和电流。反向饱和电流虽然很小，但它随温度而变化。理论和实践都表明，当锗材料的温度每升高 10°C 左右，或硅材料的温度每升高 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ 时，反向饱和电流几乎增加一倍。

由以上分析得知，PN结具有单向导电性。当正向偏置时，它的电阻很小，正向电流很大。当反向偏置时，它的电阻很大，反向电流很小。这与单独的P型或N型半导体的导电性能有根本的不同。

三、PN结的伏安特性

PN结的单向导电性可以定量地用它的伏安特性表示。所谓伏安特性就是加到PN结上的电压与流过PN结的电流之间的关系曲线，如图1-13。曲线OA代表PN结正向偏置时的伏安特性。曲线OB代表PN结反向偏置时的伏安特性。

根据理论分析，PN结的伏安特性可近似地表示为：

$$i_D = I_s \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{qv_D}{K_T}} - 1 \right) \quad (1-2)$$

式中： v_D ——外加电压；

i_D ——流过PN结的电流；

I_s ——反向饱和电流；

$$V_T = \frac{KT}{q} = \frac{T}{11600}$$

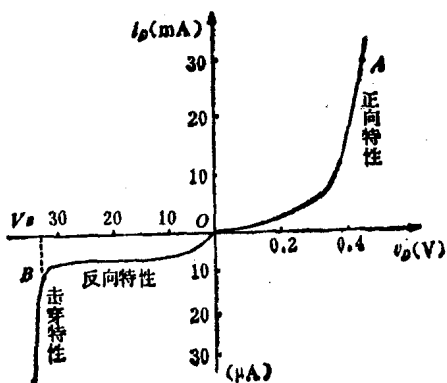


图1-13 PN结的伏安特性曲线

当 $T=300\text{K}(27^{\circ}\text{C})$ 时， $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

PN结正向偏置时，电压 v_D 为正值，当 v_D 较 V_T 大得多时，即 $v_D \gg 26\text{mV}$ ，(1-2)式中的

$e^{\frac{v_D}{V_T}} \gg 1$ 。则(1-2)式可简化为：

$$i_s \approx I_s e^{\frac{qv_D}{K_T}} \quad (1-3)$$

此时，流过PN结的电流 i_D ，随外加正向电压按指数规律变化，如图1-13中的OA段。

PN结反向偏置时，电压 v_D 为负值，当 $|v_D|$ 比 V_T 大得多时，即 $|v_D| \gg 26\text{mV}$ 。此时， $e^{\frac{qv_D}{K_T}} \approx 0$ ，由式(1-2)，有 $i_D \approx -I_s$ 。反向饱和电流 I_s 在一定温度下是个常数，不随外加电压而变化，如图1-13中的OB段。当反向电压 v_D 等于 V_B 时，反向电流随电压 $|v_D|$ 的增加而迅速增加，PN结被击穿。PN结被击穿后，不再服从式(1-2)。

四、PN结的击穿特性

由图1-13得知，当加在PN结的反向电压不太大时，反向电流很小，而且保持恒定。但当反向电压增加到某一电压值时，反向电流突然迅速增大，这种现象称为PN结的击穿，此时的反向电压值 $-V_B$ 称为反向击穿电压。PN结击穿后，电流很大，若不加限制，PN结将因发热而损坏。击穿有两种，一是“雪崩击穿”，一是“齐纳击穿”。

1. 雪崩击穿：当加到PN结上的反向电压增大时，空间电荷区中的电场随之加强，宽

度增加。通过空间电荷区的电子和空穴在内电场的作用下，获得很大能量，使动能增加。它们在运动途中和晶体原子碰撞时，可以把晶体原子中的价电子碰撞出来而发生碰撞电离，产生新的电子—空穴对。新的载流子在强电场的作用下，又获得足够的动能作定向运动。在运动过程中，又碰撞晶体原子再次发生碰撞电离而产生新的电子—空穴对。这样的连锁反应，将使载流子迅速增多，反向电流迅速增大，这种击穿称为雪崩击穿。

2. 齐纳击穿：齐纳击穿的物理过程与雪崩击穿完全不一样。当PN结加有较高的反向电压时，空间电荷区中将有一个很强的电场。这个强电场能把PN结内被束缚的价电子从共价键中拉出来，产生新的电子—空穴对。使空间电荷区产生大量的载流子。这些载流子在电场作用下迅速移动，使反向电流突然增大。这种击穿称为齐纳击穿。

如果PN结的掺杂浓度较高，空间电荷区较窄。一个很小的反向电压(例如5V以下)，就能在空间电荷区建立一个很强的电场，这时的击穿主要是齐纳击穿。一般整流二极管因掺杂浓度不太高，击穿多属雪崩击穿。只有掺杂浓度较高的特殊二极管(如稳压二极管)才会出现齐纳击穿。

最后，还需指出：PN结击穿后，只要通过的反向电流不超过某一规定的数值，当反向电压降低后PN结仍然恢复正常，而不被损坏。利用PN结的击穿特性，可以制成稳压二极管。

五、PN结的电容效应

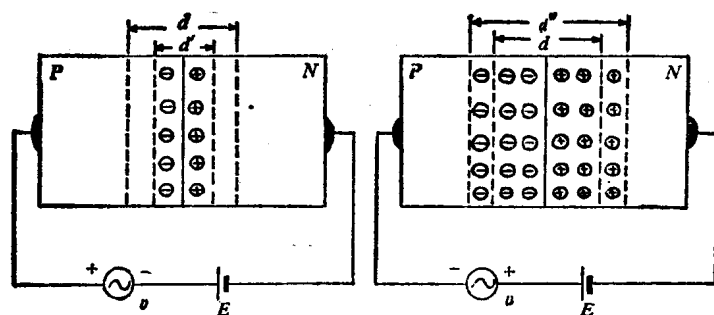
PN结除了具有单向导电性外，还具有电容效应，它使PN结在高频工作时单向导电性变得很差。PN结的电容由两部份组成，即势垒电容和扩散电容。

1. 势垒电容：所谓电容，通俗地说，就是能够“存”和“放”电荷的容器。PN结也具有“存”和“放”电荷的效应，故有电容效应。

由前已知，PN结就是空间电荷区。这个区的宽窄是随外加电压而变化的，空间电荷区宽度的变化直接反映了空间电荷区的电荷量随外加电压的变化。这种空间电荷量变化所形成的电容效应称势垒电容。

在图1-14(a)中，PN结加有正向电压 E ，空间电荷区宽度为 d ，当外加交变电压 v 为正半周时，加到PN结上的电压增加，这时内电场进一步削弱，空间电荷区变窄，由 d 变成 d' 。这相当于把一部分电子和空穴“存入”空间电荷区。在图1-14(b)中，当外加交变电压 v 为负半周时，使加到PN结上的电压减小，内电场较图(a)时增强，空间电荷区变宽，由 d 变成 d'' 。这相当于把一部分电子和空穴从空间电荷区“取出”。由此可见，外加电压的变化会引起载流子在空间电荷区充(存入)和放(取出)的作用。这同电容器的充放电作用是相似的。

理论和实践证明，势垒电容 C_T 和外加电压 v_D 之间有以下关系：



(a) 充电效应

(b) 放电效应

图1-14 势垒电容的充放电效应

$$C_T = \frac{M}{(V_\phi - v_D)^n} \quad (1-4)$$

式中, M 是与PN结材料有关的常数; V_ϕ 是PN结的接触电势; v_D 是外加电压(正向偏置为正值, 反向偏置为负值); n 是由1/3~4的常数。

由式(1-4)可以看出, 当加反向电压时, C_T 随 $|v_D|$ 的增大而减小。利用 C_T 随外加电压 v_D 而改变的特性, 可以制成变容二极管。

2. 扩散电容: PN结在正向偏置时, 突出地表现出另一种电容效应, 即扩散电容 C_D 。它是由于载流子在扩散过程中的积累引起的。

首先介绍多数载流子的扩散运动。以P型区的空穴向N型区的扩散为例, 说明载流子的扩散运动。当PN结加上正向电压时, PN结的内电场被削弱, 扩散运动得到加强。P型区中的空穴大量扩散到N型区, 使N型区内少数载流子空穴增多。这些非平衡少数载流子, 称为非平衡少数载流子。由P型区扩散到N型区的非平衡少数载流子空穴, 在N型区内不断地扩散中逐渐与N型区中的多数载流子电子复合, 所以非平衡少数载流子空穴在扩散区中的分布是不均匀的。靠近PN结边界附近的浓度最大, 随着离开PN结的距离增加, 浓度逐渐减小, 形成空穴浓度梯度。正是由于这个浓度梯度的存在, 才能保证非平衡少数载流子空穴在扩散区的扩散运动, 形成扩散电流。这样, 在扩散区内就堆积了一定数量的非平衡少数载流子空穴。这种堆积称为非平衡载流子的贮存。

由于扩散区贮存了一定数量的带正电的空穴, 破坏了N型区的电中性。为了保持N型区的电中性, N型区中的电子浓度分布也发生相应地变化。非平衡少数载流子空穴浓度高的区域, 电子浓度也高。非平衡少数载流子空穴浓度低的区域, 电子浓度也低。这些非平衡少数载流子空穴是由电源的负极向N区输送的。所以在扩散区同时贮存了一定数量的非平衡少数载流子空穴和非平衡多数载流子电子, 如图1-15。

在扩散区中贮存的两种载流子的数量与外加正向电压有关。当外加正向电压增加时, P型区向N型区注入的非平衡载流子的空穴增多, 使扩散区非平衡载流子的浓度梯度增大, 两种电荷的贮存量同时增大; 反之, 外加正向电压减小时, 扩散区中贮存的两种非平衡载流子数量减小。由此可知, 外加电压的变化, 会引起相对应的一定数量的正、负电荷在扩散区中的堆集和释放。这也是一种电容效应。这种电容效应因为是由载流子的扩散引起的, 所以叫做扩散电容, 用符号 C_D 表示。

理论和实践证明, PN结的扩散电容与流过PN结的正向电流有如下关系:

$$C_D = K_i I_F$$

式中, K_i 是与PN结材料有关的常数; I_F 是正向电流。

综上所述, PN结存在二种电容, 即势垒电容和扩散电容。在正向偏置时, 扩散电容远大于势垒电容, 势垒电容可以忽略不计。在反向偏置时, 扩散运动几乎不存在, 扩散电容极小, 只考虑势垒电容的影响。

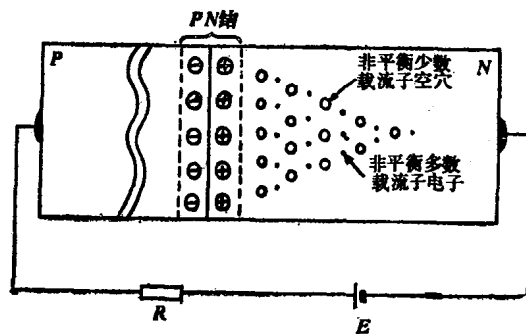


图1-15 非平衡载流子在扩散区的浓度分布