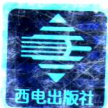


21世纪

高等学校电子信息类系列教材

电子线路基础

■ 主编 傅丰林
参编 陈健 原志强 陈梅



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

★ 21 世纪高等学校电子信息类系列教材

电子线路基础

主编 傅丰林

参编 陈健 原志强 陈梅

西安电子科技大学出版社

2001

内 容 简 介

本书内容包括晶体二极管及电路、晶体三极管及放大器基础、场效应管放大器、负反馈放大器、低频功率放大器、模拟集成电路原理及其应用、直流稳压电源和模拟电子系统设计等8章。本书突出模拟集成电路,删减了分立元件电路的内容,引入了PSPICE分析程序进行电路模拟。书中附有适量的思考题和习题。

本书可作为高等学校电子信息类或相近专业技术基础课教材或教学参考书,也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路基础/傅丰林主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2001.3

21世纪高等学校电子信息类系列教材

ISBN 7-5606-1004-8

I. 电… II. 傅… III. 电子电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 08819 号

责任编辑 徐德源

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西画报社印刷厂

版 次 2001年3月第1版 2001年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18

字 数 422千字

印 数 1~4 000册

定 价 19.00元

ISBN 7-5606-1004-8/TN·0174

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

本书是西安电子科技大学国家工科基础课程电工电子教学基地规划教材之一，是在西安电子科技大学通信工程等专业使用的教材的基础上编写的。

全书是按72学时编写的，共分8章。第1章半导体器件，介绍半导体物理的基础知识，PN结的构成，二极管特性、参数和电路；三极管的基本工作原理、特性和主要参数；结型和绝缘栅场效应晶体管的基本工作原理、特性和主要参数。第2章放大器基础，介绍了晶体三极管放大器和场效应管放大器，着重介绍集成电路中最常用的基本单元电路，包括电流源偏置电路，有源负载放大器等，阐明了放大器的基本分析方法：图解法和等效电路法。本章还分析了基本单元电路的主要性能指标，充实了MOS集成单元电路内容，并分析了衬调效应的影响。第3章放大器的频率响应，对放大器的频率特性分频区进行分析，对工程计算只要求用单个时间常数估计单级放大器的频率响应，避免了繁琐的计算。第4章负反馈放大器，介绍4种类型负反馈放大器及其判别方法，提出了工程上估算的方法，用波特图对反馈放大器进行稳定性分析。第5章低频功率放大器，着重介绍互补推挽功率放大器的工作原理及其分析计算。第6章模拟集成电路原理及应用，介绍组成集成运算放大器的差动放大器等单元电路、集成运算放大器的基本组态和基本应用，增加了MOS集成运算放大器、模拟乘法器等内容。第7章直流稳压电源，主要介绍三端稳压器和开关电源。第8章模拟电子系统的设计，介绍了模拟电子系统设计的一般方法，主要介绍了应用PSPICE程序进行电路模拟，实现计算机辅助设计。

总之，本书主要研究晶体管与模拟集成电路所构成的电子线路原理、分析和计算的方法，并着重讨论在集成电路与分立元件电路都要用到的基本概念、基本原理、基本单元电路、基本分析方法以及模拟集成电路的基本应用。作者充分注意到电子线路这一课程国内外发展的状况，删繁就简，更新内容，加强基本概念，注重工程计算，力求使全书内容的深度和广度能满足工科电子信息类或相近专业的教学需要，并希望能对广大电子工程技术人员也有裨益。使用本书时，读者应具备物理、电路理论等基础知识，实施中可根据教学要求加以取舍。

本书由傅丰林主编。傅丰林编写了第1章、第2章，并对全书进行统稿；陈健编写了第3章、第4章、第7章以及第6章的部分内容；陈梅编写了第5章及第6章部分内容；原志强编写了第8章。

裴昌幸教授认真、仔细地审阅了全稿，提出了很多宝贵的修改意见，责任编辑徐德源也为本书提出了许多宝贵意见，在此编者表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编 者
2001年1月
于西安

目 录

第 1 章 半导体器件

1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 载流子的运动方式及形成的电流	4
1.2 PN 结与晶体二极管	4
1.2.1 PN 结的基本原理	4
1.2.2 晶体二极管	8
1.2.3 晶体二极管应用电路举例	13
1.3 特殊二极管	15
1.3.1 稳压管	15
1.3.2 光电二极管	16
1.3.3 发光二极管	17
1.3.4 变容二极管	18
1.4 晶体三极管	19
1.4.1 晶体三极管的结构与符号	19
1.4.2 晶体管的放大原理	19
1.4.3 晶体三极管特性曲线	21
1.4.4 晶体管的运用状态	24
1.4.5 晶体管的主要参数	25
1.4.6 晶体三极管模型	26
1.5 场效应晶体管	31
1.5.1 结型场效应晶体管(JFET)	31
1.5.2 绝缘栅场效应管(IGFET)	35
1.5.3 场效应管的参数及特点	40
思考题与习题	42

第 2 章 放大器基础

2.1 放大器概述	46
2.1.1 放大器的用途与分类	46
2.1.2 放大器的基本组成	46

2.1.3	放大器主要性能指标	48
2.1.4	放大器的传输特性	51
2.2	放大器基本分析方法	51
2.2.1	静态分析	51
2.2.2	动态分析	53
2.3	晶体管偏置电路	60
2.3.1	固定偏流偏置电路	60
2.3.2	分压式偏置电路	61
2.3.3	电流源偏置电路	61
2.4	三极管放大器的三种基本组态	65
2.4.1	共射(CE)放大电路	65
2.4.2	共基(CB)放大电路	66
2.4.3	共集(CC)放大电路	67
2.4.4	3种放大电路性能比较	68
2.4.5	射极带有电阻的共射放大器	69
2.5	场效应管放大器	70
2.5.1	直流偏置电路与静态分析	71
2.5.2	动态分析	73
2.6	有源负载放大器	77
2.6.1	有源负载晶体三极管放大器	77
2.6.2	集成MOS单级放大器	79
2.7	多级放大器	81
2.7.1	耦合方式	81
2.7.2	多级放大器性能指标的计算	82
2.8	放大器的表示法	85
	思考题与习题	86

第3章 放大器的频率特性

3.1	线性失真及其分析方法	93
3.1.1	线性失真	93
3.1.2	分析方法	95
3.2	单级放大器的频率响应	98
3.2.1	晶体管高频混合 π 型等效电路	98
3.2.2	频率响应分析	101
3.2.3	晶体管的高频参数	104
3.2.4	场效应管放大器频率响应	106
3.3	多级放大器的频率响应	108
3.3.1	幅频特性和相频特性	108
3.3.2	多级放大器的通频带	109

3.4 放大器的阶跃响应	110
3.4.1 阶跃响应的指标	111
3.4.2 单级放大器的阶跃响应	111
3.4.3 多级放大器的阶跃响应	113
思考题与习题	114

第 4 章 负反馈放大器

4.1 负反馈的基本概念	117
4.1.1 什么是负反馈	117
4.1.2 负反馈放大器的基本类型与判断	118
4.1.3 反馈类型判别举例	120
4.2 负反馈对放大器性能的影响	121
4.2.1 提高放大倍数的稳定性	121
4.2.2 展宽了通频带	124
4.2.3 减小非线性失真	124
4.2.4 抑制内部噪声和干扰	126
4.2.5 对输入电阻的影响	126
4.2.6 对输出电阻的影响	127
4.3 负反馈放大器的分析方法	129
4.3.1 近似分析方法	129
4.3.2 计算机辅助分析法	132
4.4 反馈放大器的稳定性	133
4.4.1 反馈放大器的稳定判据	133
4.4.2 反馈放大器的稳定裕度	134
4.4.3 相位补偿技术	136
思考题与习题	140

第 5 章 低频功率放大器

5.1 概述	146
5.1.1 功率放大器的主要指标	146
5.1.2 功率放大器的分类	147
5.2 互补推挽功率放大器	147
5.2.1 乙类推挽功率放大器的工作原理	147
5.2.2 乙类推挽功率放大器的分析计算	148
5.2.3 乙类推挽功率放大器的非线性失真	151
5.3 功率放大器的保护电路	153
5.3.1 功放管的管耗与散热	153
5.3.2 保护电路	154
5.4 其它形式的功放电路	154

5.4.1	单电源供电的互补推挽电路	154
5.4.2	准互补推挽功率放大器	155
5.4.3	桥式平衡功率放大器	156
5.4.4	场效应管功率放大器	157
5.4.5	具有输出自举作用的功放电路	158
5.4.6	集成功放电路	159
	思考题与习题	162

第 6 章 模拟集成电路原理及其应用

6.1	概述	165
6.2	直流信号的放大	166
6.3	差动放大器	167
6.3.1	差动放大器的基本形式	168
6.3.2	改进电路	169
6.3.3	差动放大器输入任意信号时的分析	173
6.3.4	差动放大器的几种接法	174
6.3.5	差动放大器的传输特性	176
6.3.6	差动放大器的失调和温漂	179
6.4	集成运算放大器的组成	180
6.4.1	双极集成运放的组成	180
6.4.2	MOS 集成运算放大器的组成	182
6.5	集成运算放大器的性能参数和模型	184
6.5.1	性能参数	184
6.5.2	模型	188
6.6	理想运放及其基本组态	188
6.6.1	理想集成运算放大器	188
6.6.2	集成运放的基本组态	189
6.7	集成运算放大器的应用	191
6.7.1	信号放大及检测电路	191
6.7.2	信号运算电路	195
6.7.3	信号处理电路	198
6.8	实际集成运放电路的误差分析	209
6.9	模拟乘法器	212
6.9.1	双平衡模拟乘法器	212
6.9.2	线性化可变跨导型模拟乘法器	214
6.9.3	单片集成通用型乘法器	216
6.9.4	乘法器的应用举例	216
6.10	在系统可编程模拟器件 ispPAC	218
6.10.1	概述	218

6.10.2 在系统可编程模拟器件 ispPAC10 的电路结构	219
6.10.3 在系统可编程模拟器件 ispPAC10 的设计应用	220
思考题与习题	224

第 7 章 直流稳压电源

7.1 整流与滤波	232
7.1.1 半波整流电路	232
7.1.2 全波整流电路	234
7.1.3 桥式整流电路	235
7.1.4 倍压整流电路	235
7.1.5 平滑滤波器	237
7.1.6 整流电路设计举例	237
7.1.7 稳压电源的主要性能指标	239
7.2 单向可控整流电路	239
7.2.1 晶闸管的基本工作原理	239
7.2.2 单相半波可控整流电路	240
7.2.3 单相桥式可控整流电路	242
7.2.4 单结管触发电路	243
7.3 线性集成稳压器	247
7.3.1 三端固定电压式集成稳压器	247
7.3.2 三端可调式集成稳压器	252
7.3.3 正、负跟踪可调集成稳压器	254
7.4 开关型稳压电源	255
7.4.1 开关稳压电源的基本原理	256
7.4.2 集成开关稳压器	258
思考题与习题	263

第 8 章 模拟电子系统的设计

8.1 设计流程	265
8.2 总体方案	266
8.3 单元电路的设计	267
参考文献	277

第 1 章 半导体器件

本章首先简要介绍了半导体的基础知识，然后介绍了晶体二极管、晶体三极管、场效应管等器件，它们是组成各种电子线路的核心元件，掌握好它们的基本工作原理、特性曲线和主要参数是学好本课程及有关后续课程的重要基础。

1.1 半导体的基础知识

物质按其导电能力可分为导体、绝缘体和半导体 3 种。通常人们把容易导电的物质称为导体，如金、银、铜等；把在正常情况下很难导电的物质称为绝缘体，如陶瓷、云母、塑料、橡胶等；把导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体，如硅和锗。导体、半导体和绝缘体的划分，严格地说是以物质的电阻率 ρ 的大小来确定的。电阻率小于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 的称为导体；电阻率大于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 的称为绝缘体；电阻率在导体和绝缘体电阻率之间的称为半导体。

半导体之所以受到人们的高度重视，并获得广泛的应用，是由于它具有其他物体所没有的独特性质，具体表现在以下 3 个方面：

(1) 掺杂性：半导体的电阻率受掺入的“杂质”影响极大，在半导体中即使掺入的杂质十分微量，也能使其电阻率大大地下降，利用这种独特的性质可以制成各种各样的晶体管器件。

(2) 热敏性：一些半导体对温度的反应很灵敏，其电阻率随着温度的上升而明显地下降，利用这种特性很容易制成各种热敏元件，如热敏电阻、温度传感器等。

(3) 光敏性：有些半导体的电阻率随着光照的增强而明显地下降，利用这种特性可以做成各种光敏元件，如光敏电阻和光电管等。

要说明半导体为什么会具有上述特性，就必须研究半导体的内部结构。半导体理论是一专门的学科，本节只能介绍一些与制作器件有关的最基本的知识。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是指纯净的、不含杂质的半导体。在近代电子学中，用得最多的半导体是硅和锗，它们都是四价元素，原子最外层有 4 个价电子。硅和锗的原子结构示意图如图 1-1 所示。价电子受原子核的束缚力最小，所以物质的导电性与价电子数有很大关系。

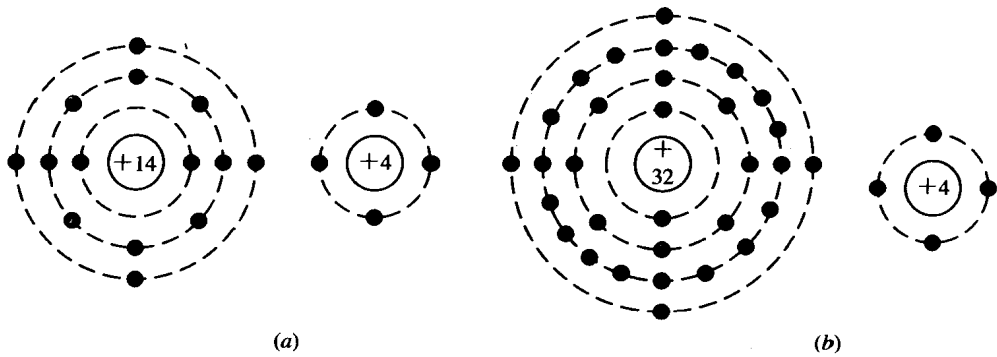


图 1-1 原子结构示意图

(a) 硅; (b) 锗

在金属物质的导体中, 原子的外层电子离原子核较远, 受原子核的吸引力就很小, 因此常温下就有大量的电子能挣脱原子核的束缚而成为自由电子, 这就是为什么导体具有良好导电能力的原因。

在绝缘体中, 其外层电子离原子核较近, 受原子核的束缚力很大, 几乎没有自由电子存在, 因此它不导电, 在正常情况下是绝缘的。在特定条件下, 例如在绝缘体两端加上特别高的电压, 把外层电子硬“拉”出来, 这时绝缘体就变成了导体, 这种现象称为击穿。

在硅和锗等半导体材料中, 内部原子排列是有规律的, 即为晶体结构。晶体硅(或锗)的原子排列示意图如图 1-2(a)所示。每个硅原子受邻近 4 个原子的束缚, 组成 4 个共价键。共价键像纽带一样将排列整齐的原子联结起来, 如图(b)所示。

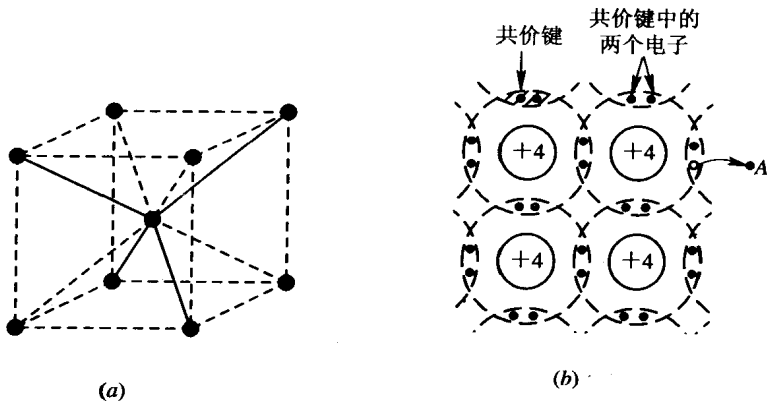


图 1-2 硅晶体结构和共价键结构示意图

(a) 晶体结构; (b) 共价键结构

在热力学温度零度($0\text{ K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, 价电子无法挣脱共价键的束缚, 因此本征半导体中没有自由电子, 此时半导体相当于绝缘体。但在常温下, 少量价电子获得足够的能量, 挣脱了共价键的束缚而成为自由电子, 形成热激发, 如图 1-2(b)中价电子 A。同时, 在原来共价键的位置上留下一个空位, 称为空穴。于是邻近价电子就可填补到这个空位上, 而在这个电子原来的位置上又留下新的空位, 以后其他电子又可转移到新空位上, 因此空穴能参与导电。空穴是由于失去一个电子而形成的, 所以空穴是一种带正电的载流子。可见,

在热激发下，本征半导体中存在两种能参与导电的载流子：成对的电子和空穴。但是常温下由热激发产生的电子—空穴对的数量是很少的，这就是为什么本征半导体导电能力很差的原因。

需要指出，由热激发产生的自由电子，也会释放能量返回到附近的空穴，这种现象称为复合。

除了上面讨论的热激发以外，也可利用光照进行激发。热激发和光激发统称为本征激发。

在本征半导体中，随着温度的升高或光照的增强，电子—空穴对的数量将大大增加，导电能力将大大提高，这就是半导体具有热敏性和光敏性的基本原理。

1.1.2 杂质半导体

杂质半导体是指在本征半导体中掺入了微量其他元素(称为杂质)的半导体。杂质的掺入可以使半导体的导电性能发生显著的变化。根据掺入的杂质不同，杂质半导体可分为N型(电子)半导体和P型(空穴)半导体两大类。

1. N型半导体

在本征半导体中掺入少量五价元素磷(或砷、锑等)，由于掺入的磷原子数目比硅原子要少得多，因此整个晶体结构基本不变，只是某些位置上的硅原子将被磷原子所代替。磷原子有5个价电子，其中4个价电子与邻近的硅原子的价电子形成共价键，剩下的一个价电子虽然还受到磷原子的束缚，但是这种束缚作用终究要比共价键的束缚作用微弱得多。只要给这个价电子较小的能量，它就能挣脱磷原子的束缚而成为自由电子。磷原子释放出多余的价电子后，因失去电子而成为正离子，如图1-3所示。我们把这类能释放电子的杂质称为施主杂质，这一释放过程称为施主杂质电离。可见，每个施主杂质原子电离后就产生一个电子和一个正离子，它们是成对产生的。电子是能自由运动的，而正离子是不能运动的。此外，杂质半导体中同样存在热激发，产生少量的电子—空穴对。因此，自由电子数远大于空穴数，这种电子浓度大大增加的杂质半导体称为N型半导体。我们称自由电子为多数载流子(简称多子)，而称空穴为少数载流子(简称少子)。

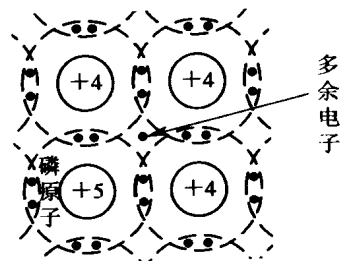


图 1-3 N型半导体的共价键结构

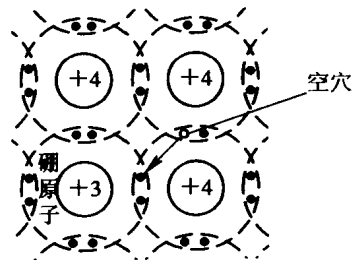


图 1-4 P型半导体的共价键结构

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素硼(或铝、镓等)，由于掺入的硼原子数量比硅原子要少得多，因此整个晶体结构基本不变，只是某些位置上的硅原子被硼原子所代替。硼原子只有3个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位，周围共价键中的电子很容易跃迁到这里来，于是形成一个空穴，而硼原子由于多了一个电子而成为不能运动的负离子，如图1-4所示。我们把这类能接受电子的杂质称为受主杂质。

质, 这个接受过程称为受主杂质电离。可见, 每个受主杂质原子电离后就产生一个空穴和一个负离子, 它们是成对产生的。此外, 杂质半导体中同样存在热激发, 产生少量的电子一空穴对。因此, 空穴数远大于自由电子数, 空穴浓度大大增加, 故称为 P 型半导体。显然, 在 P 型半导体中, 空穴是多数载流子, 而自由电子是少数载流子。

综上所述, 本征半导体中掺入微量杂质元素构成杂质半导体后, 在常温下杂质原子均已电离, 载流子浓度大大增加, 使半导体的导电能力显著提高。因此, 掺杂是提高半导体导电能力的最有效方法。还需指出, 无论是 N 型半导体还是 P 型半导体, 其正负电荷量是相等的, 呈电中性。

1.1.3 载流子的运动方式及形成的电流

通过上面分析可知, 半导体中有两种载流子: 电子和空穴。当 $T > 0 \text{ K}$ 时, 载流子作热运动, 各向运动机会均等, 不形成电流。但在一定的条件下会存在有规则的定向运动。

1. 扩散运动和扩散电流

当载流子浓度分布不均匀时, 就会产生一种扩散力, 这种扩散力将使载流子浓度分布朝着趋向均匀的方向去改变。载流子受扩散力的作用所作的运动称为扩散运动。载流子扩散运动所形成的电流称为扩散电流。显然, 载流子浓度分布越不均匀, 扩散力就越强, 形成的扩散电流就越大, 即扩散电流与载流子浓度梯度成正比。

2. 漂移运动和漂移电流

载流子在电场力作用下所作的运动称为漂移运动, 载流子漂移运动所形成的电流称为漂移电流。显然, 电场越强, 漂移电流越大, 即漂移电流与电场强度成正比。

1.2 PN 结与晶体二极管

1.2.1 PN 结的基本原理

1. PN 结的形成

在一块本征半导体中的两边掺以不同的杂质, 使其一边形成 P 型半导体, 另一边形成 N 型半导体, 则在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差, 电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散, 即 P 区的一些空穴要向 N 区扩散, N 区的一些电子要向 P 区扩散, 如图 1-5(a) 所示。

由于载流子的扩散运动, 破坏了 P 区和 N 区交界面原有的电中性。P 区一边失去空穴, 留下了带负电的受主离子[图 1-5(b) 中用 \ominus 表示], N 区一边失去电子, 留下了带正电的施主离子[图 1-5(b) 中用 \oplus 表示]。通常称这些不能运动的正、负离子为空间电荷, 它们集中在 P 区和 N 区交界面两侧, 形成了一个空间电荷区。

由于空间电荷区中存在正、负离子, 则空间电荷区中存在电场, 称为内建电场。电场方向是由 N 区指向 P 区, N 区的电位要比 P 区高, 高出的数值用 U_0 表示, 称为接触电位

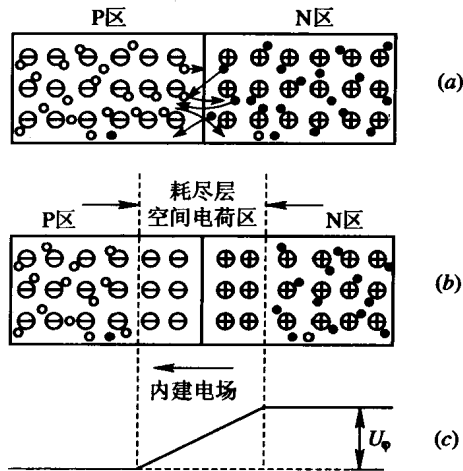


图 1-5 平衡状态下的 PN 结

(a) 初始状态；(b) 平衡状态；(c) 电位分布

差，如图 1-5(c)所示。 U_ϕ 的数值一般小于 1 V。需要指出的是内建电场将阻止 P 区的多数载流子空穴向 N 区继续扩散和 N 区的多数载流子电子向 P 区继续扩散。同时，内建电场将使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移。

可见载流子存在两种运动方式——扩散运动和漂移运动，它们是互相联系又互相矛盾的。当扩散运动和漂移运动相等时，便处于动态平衡，形成稳定的空间电荷区，即 PN 结。这时多数载流子扩散运动所形成的扩散电流和少数载流子漂移运动所形成的漂移电流，两者大小相等、方向相反。因此，在无外加电场或其他激发因素作用时，PN 结没有电流通过。

顺便指出空间电荷区又称耗尽层，这是因为在空间电荷区可以运动的载流子已经耗尽。空间电荷区也称势垒区，这是因为 PN 结存在接触电位差 U_ϕ ， U_ϕ 称为势垒高度。

2. PN 结的特性

PN 结在不同的运用状态下表现的特性不同，了解这些特性是理解和使用晶体二极管、三极管的重要依据。

1) PN 结的单向导电性

P 区接外加电源的正极，N 区接电源的负极时称为 PN 结加正向电压(也称正向偏置)，如图 1-6(a)所示。由于外加电压与 PN 结的内建电场方向相反，从而使内建电场削弱，这样就打破了原有的平衡状态，使 P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向空间电荷区扩散。当 P 区的空穴和 N 区的电子进入空间电荷区后，就会分别中和一部分负离子和正离子，使空间电荷量减少，空间电荷区宽度变窄，势垒的高度也由原来 U_ϕ 下降为 $U_\phi - E$ ，如图(b)所示。这就使得 P 区和 N 区能越过这个势垒的多数载流子数量大大增加，形成较大的扩散电流。当然，这时也存在由少数载流子形成的漂移电流，但由热激发产生的少数数量是十分有限的，少数载流子漂移电流对总电流的影响可以忽略不计。当管子制

成后，漂移电流大小取决于温度，几乎与外加电压无关。所以当PN结加正向电压时，通过PN结的电流主要是扩散电流，它随着外加电压 E 的增加而迅速上升，表明PN结此时呈现一个很小的电阻。这种状态称为PN结处于导通状态。

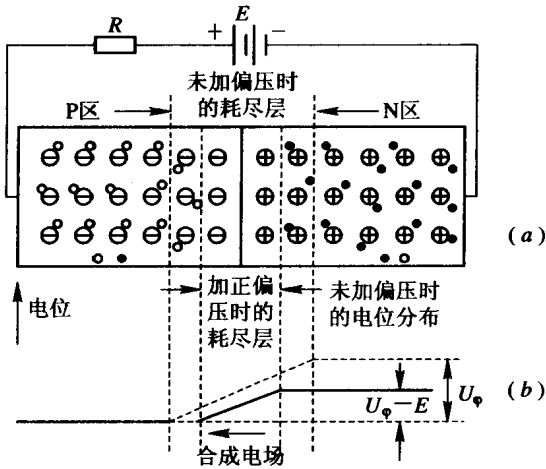


图 1-6 PN 正向运用

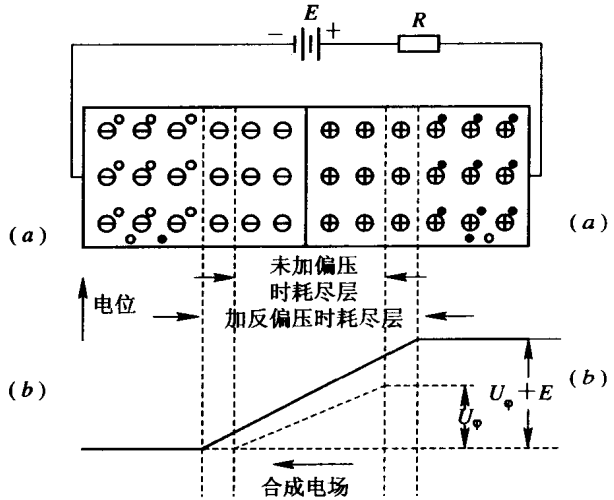


图 1-7 PN 反向运用

P区接外加电源的负极，N区接电源的正极时称为PN结加反向电压(也称反向偏置)，如图1-7(a)所示。外加电压所产生的电场与PN结的内建电场方向相同，增强了内建电场，使PN结靠近P区的空穴向左运动，靠近PN结的N区电子向右运动，从而使空间电荷区加宽，势垒的高度也由原来的 U_ϕ 上升到 $U_\phi + E$ ，如图(b)所示。于是多数载流子的扩散运动就很难进行，扩散电流趋于零。但是由于内建电场的增强，使P区和N区中的少数载流子更容易产生漂移运动，这时通过PN结的电流就是漂移电流，称为反向电流。它基本上不随外加电压变化，故又称为反向饱和电流，用 I_s 表示。其数值是很小的，表明PN结呈现一个很大的电阻，或者说PN结加反向电压时，可以认为基本上是不导电的，这种状态称为PN结处于截止状态。

综上所述，当PN结加正向电压时，势垒高度降低，扩散电流远大于漂移电流，正向电流较大；当PN结加反向电压时，势垒高度增加，仅有很小的反向饱和电流，这种正向导通、反向截止(忽略 I_s)的现象即为PN结的单向导电特性。

2) PN 结的击穿特性

由上所述，PN结反向应用时，反向电流基本不随电压变化而变化。但当PN结上加的反向电压超过一定限度时，反向电流将急剧增加，这种现象叫做PN结的击穿，分雪崩击穿和齐纳击穿两种。

(1) 雪崩击穿。当反向电压足够高时，空间电荷区的电场较强，通过空间电荷区的电子和空穴在强电场的作用下加速获得很大的动能，于是有可能和晶体结构中的外层电子碰撞而使其脱离原子的束缚。被撞出来的载流子在获得一部分能量之后，又可以去碰撞其他的外层电子，这种连锁反应就造成了载流子数目突然剧增的现象，犹如雪山发生雪崩那样，所以这种击穿称为雪崩击穿或碰撞击穿。

(2) 齐纳击穿(隧道击穿)。当反向电压足够高,空间电荷区中的电场强度达到 10^5 V/cm以上时,可把共价键中的电子拉出来,产生电子—空穴对,使载流子数目突然增多,产生击穿现象,称为齐纳击穿。

一般在掺入杂质浓度小的PN结中,空间电荷区比较宽,雪崩击穿是主要的,击穿时所加的外电压(也叫击穿电压,用 U_z 表示)一般在 6 V 以上。在掺杂很重的PN结中,空间电荷区较窄,齐纳击穿是主要的,其击穿电压一般在 6 V 以下。击穿电压在 6 V 左右的PN结常兼有两种击穿现象。

应当指出,PN结的击穿破坏了PN结的单向导电性,一般应用时应当避免。但击穿并不意味着PN结的损坏,只要击穿后流过PN结的电流不超过某一限度(在PN结外电路上加接限流电阻可以限制流过PN结的电流),PN结可保持完整无损且击穿现象可以重复发生。PN结击穿后结电流急剧变化而PN结两端的电压却基本保持不变。利用这一特性可以做成稳压管, U_z 就是稳压管的稳定电压,即稳压值。

3) PN结的电容效应

由前面分析可知,PN结两端加电压,PN结内就存在电荷的变化,这说明PN结存在电容效应。PN结具有两种电容:势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D ,这将限制器件的工作频率,是一个十分重要的问题。

(1) 势垒电容 C_T 。它是由耗尽层内电荷存储作用引起的。我们知道,耗尽层内有不能移动的正负离子,它缺少载流子,导电率很低,相当于介质,而它两边的P区和N区导电率相对很高,相当于金属。当外加电压改变时,耗尽层的电荷量也要改变,引起电容效应,耗尽层有势垒,因此称为势垒电容,用 C_T 表示。

势垒电容 C_T 与普通电容不同,它的容量随外加电压的改变而改变,并且不成线性关系。而普通金属板电容器,其容量为一常数。分析表明

$$C_T = \frac{K}{(U_\phi - U)^\gamma} \quad (1-1)$$

式中, K 为一常数, U_ϕ 为PN结的接触电位差, U 为PN结上的外加电压(正向电压时 $U > 0$; 反向电压时 $U < 0$), γ 取值范围为 1/3 到 4, 其值取决于结的结构。

由式(1-1)可知,虽然 C_T 在反向电压作用时数值小,而此时结电阻很大,尽管势垒电容很小,由于势垒电容与结电阻是并联的,所以它在高频时的影响不可忽略。在正向电压作用时,尽管势垒电容较大,此时结电阻很小,势垒电容的作用相对来说反而较小。

(2) 扩散电容。PN结正向运用时,除了存在势垒电容以外,还有一种特殊的电容,叫做扩散电容,用 C_D 表示。

PN结加正向电压时P区的空穴注入到N区,N区的电子注入到P区。从P区注入到N区的带正电的空穴,将吸引N区里带负电的电子到其附近,它们不会立即复合,而有一定的寿命。同样,从N区注入到P区的带负电的电子,将吸引P区里带正电的空穴到其附近。这样就形成了在势垒区以外的P区和N区正负电荷混合贮存在半导体同一空间的现象。我们知道,只要能贮存电荷,就呈现电容效应,扩散电容就是这样一种特殊电容。分析表明

$$C_D = \frac{\tau_P + \tau_N}{\eta U_T} I \quad (1-2)$$

式中, I 是 PN 结的正向电流, 系数 η 取值范围为 $1 \sim 2$, τ_p 和 τ_n 分别为空穴和电子的寿命。

扩散电容 C_D 与普通电容不同。除了上面已经指出的它不像普通电容器那样, 正负电荷分别贮存在电容器的两个极板上以外, 它是非线性电容, 其容量与通过 PN 结的正向电流成正比。

综上所述, 二极管存在势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 。正向运用时, 势垒电容 C_T 与扩散电容 C_D 同时存在, 扩散电容 C_D 要大些, 起主要作用; 反向运用时, 只有势垒电容 C_T 。

1.2.2 晶体二极管

1. 晶体二极管的结构

二极管是由 PN 结、电极引线和管壳构成的。按其结构特点可分为点接触型、面结合型和平面型 3 大类, 如图 1-8 所示。

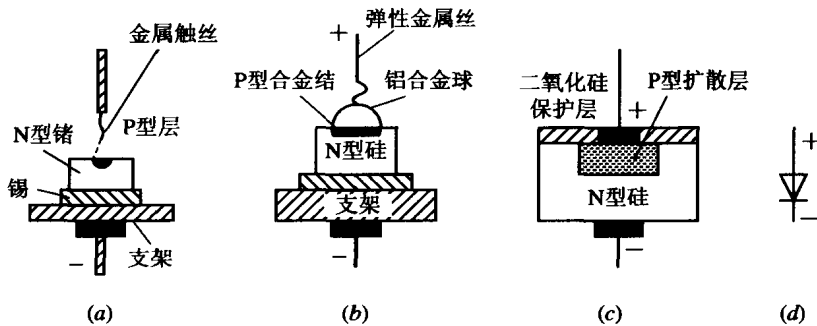


图 1-8 二极管结构与符号

(1) 点接触型二极管如图 1-8(a) 所示。它把一根很细的金属触须压在一块锗或硅晶片上, 利用电形成工艺来获得 PN 结。结面积很小, 所以结电容小, 但不允许通过大电流。适用于高频检波、小电流整流及小功率开关电路。

(2) 面结合型二极管如图 1-8(b) 所示。它的 PN 结是用合金法做成的。由于结面积大, 可以承受较大的电流, 但结电容也大, 适用于低频整流和低速开关电路。

(3) 平面型二极管如图 1-8(c) 所示。二氧化硅是保护层, 保护 PN 结不受污染, PN 结两端之间漏电流极小, 性能一致性好。结面积大的适用于大功率整流, 结面积小的适用于高频及高速开关电路。

二极管的符号如图 1-8(d) 所示。

2. 晶体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是二极管的电流与外加电压的关系曲线, 图 1-9 画出了实测的二极管伏安特性。下面介绍伏安特性。

(1) 正向特性 正向运用时, 仅当外加电压超过某一数值时, 电流才有明显增长, 这个电压值叫门限电压或开启电压或死区电压, 用 U_r 表示。通常可根据实际特性曲线上部(很接近直线的部分)作延长线, 将延长线与横轴交点的电压值定为 U_r 。锗管的 U_r 约为 0.2 V , 硅管的 U_r 约为 0.6 V 。