

21世纪普通高等教育电子信息类规划教材

模拟电子线路

林春景 主编



免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪普通高等教育电子信息类规划教材

模拟电子线路

主 编 林春景

副主编 周永海 张汉杰 马云飞

参 编 王燕萍 顾媛媛 袁俐萍 陈晓亮



机械工业出版社

本书是在我国高等教育发展从“精英教育”阶段向“大众化教育”阶段转型的形势下,为适应技术应用型本科院校的教学需要而编写的。在描述方面,本着因材施教的方针,力求做到深入浅出、形象具体、通俗易懂。本书重在强调学生的模拟电子技术应用和实践能力。内容符合电气信息类专业人才培养方案和“模拟电子线路”课程教学大纲的要求。主要内容包括半导体二极管、半导体三极管、基本放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、信号产生与变换电路、直流稳压电源、模拟电子系统的综合设计,并附有习题和实验指导书。

本书为电气信息类专业基础课程模拟电子线路的教材。本书可作为技术应用型本科院校电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化、自动化、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程及其他相近专业的教材,也可作为其他非电类专业和成人教育学生的自学教材,还可作为工程技术人员的参考书籍。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路/林春景主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 1

21世纪普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-26061-5

I. 模… II. 林… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材
IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第002997号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:谷玉春 版式设计:霍永明

责任校对:张媛 封面设计:张静

责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2009年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·463千字

标准书号:ISBN 978-7-111-26061-5

定价:31.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面防伪标均为盗版

前 言

本书是根据技术应用型本科培养目标的要求,本着有一定的理论,重在应用、注重实践的教学思想来编写的,可作为技术应用型本科院校电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化、自动化、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程及其他相近专业模拟电子线路课程教材。

本书的主编具有多年的实际工作经验,既是教授又是高级工程师。编写人员均来自于技术应用型本科教学的第一线,不仅有多年教授模拟电子线路课程的丰富经验,而且有丰富的实践经验。根据技术应用型本科学生基础理论的实际情况,本书在编写过程中,简化了繁杂的数学推导公式以及集成电路的内部结构分析,力求简明扼要、深入浅出、通俗易懂、重点突出,加强基本概念、基本原理、基本分析方法的训练和培养;在分析、计算时,突出主要矛盾和主要问题,注重实际应用及物理概念的讲解;贯彻理论联系实际、以应用为目的、理论适当的原则,突出技术应用型本科教学的特色。

本书的内容兼顾了模拟电子线路的新发展,注重介绍模拟电子线路的新理论、新技术、新器件。为了反映现代电子技术的新成果、新技术,本书介绍了一些常用的最新模拟集成电路,如集成运算放大器、三端集成稳压器、开关电源、电子镇流器等。

为便于教和学,本书每章后面都有小结,并且配有多种类型的例题、习题。例题是为巩固基本概念、基础知识、扩充基本内容所用;习题包括为加强理解基本内容的习题,也有为加深理解基本理论、基本概念,起到举一反三之功效的较难的习题,还有结合实际应用的习题,以便开拓视野,掌握实际应用知识。

本书主要内容包括半导体二极管、半导体三极管、基本放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、信号产生与变换电路、直流稳压电源、模拟电子系统综合设计,并附有实验内容。本书参考教学时数为80学时。

本书由林春景教授主编。马云飞教授编写第1章,王燕萍副教授编写第2章,周永海副教授编写第3章;陈晓亮讲师编写第4章;张汉杰教授编写第5章;林春景教授编写第6、7章;袁俐萍副教授与顾媛媛讲师共同编写第8、9章和附录部分。全书由林春景教授统稿。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者和使用本书的教师批评、指正,以便不断改进。

编 者

2008年8月

目 录

前言

第 1 章 半导体二极管 1

1.1 半导体基础知识 1

1.1.1 半导体及其特性 1

1.1.2 本征半导体 2

1.1.3 杂质半导体 3

1.1.4 PN 结 5

1.2 半导体二极管的特性及参数 8

1.2.1 二极管的外形、结构及符号 8

1.2.2 二极管的伏安特性 9

1.2.3 二极管的主要参数 10

1.2.4 二极管的型号及选择 11

1.3 二极管的模型 12

1.4 二极管的应用 14

1.4.1 整流电路 14

1.4.2 限幅电路 14

1.4.3 钳位电路 16

1.4.4 开关电路 16

1.5 特殊二极管介绍 17

1.5.1 稳压二极管 17

1.5.2 发光二极管 19

1.5.3 光敏二极管 19

1.5.4 变容二极管 20

1.5.5 激光二极管 20

本章小结 20

习题 21

第 2 章 半导体三极管 26

2.1 晶体管 26

2.1.1 晶体管的工作原理、电流和 电流放大系数 27

2.1.2 晶体管的特性曲线 29

2.1.3 晶体管的主要参数 30

2.1.4 温度对晶体管参数的影响 31

2.1.5 晶体管在电子技术中的应用 32

2.2 场效应晶体管 32

2.2.1 结型场效应晶体管 32

2.2.2 绝缘栅场效应晶体管 34

2.3 场效应晶体管与晶体管的比较 36

本章小结 37

习题 37

第 3 章 基本放大电路 40

3.1 放大电路的基本知识 40

3.1.1 放大电路的组成 40

3.1.2 放大电路的主要性能指标 41

3.1.3 放大电路的工作原理 44

3.2 3 种基本组态放大电路 52

3.2.1 共发射极放大电路 52

3.2.2 共集电极放大电路 57

3.2.3 共基极放大电路 59

3.2.4 3 种晶体管基本放大电路的比 较 61

3.2.5 场效应晶体管放大电路 61

3.3 多级放大电路 67

3.3.1 多级放大电路的组成与级间耦 合方式 67

3.3.2 多级放大电路的性能指标及估 算 68

3.3.3 多级放大电路的频率特性 71

3.4 互补对称功率放大电路 72

3.4.1 功率放大电路简介 72

3.4.2 乙类互补对称功率放大电路 73

3.4.3 甲乙类准互补功率放大电路 76

3.4.4 集成功率放大器及其应用 79

本章小结 81

习题 82

第 4 章 负反馈放大电路 91

4.1 概述 91

4.2 负反馈放大电路的组成及基本类型 91

4.2.1 负反馈放大电路的组成及基本

关系	91	问题	138
4.2.2 负反馈放大电路的基本类型	93	本章小结	141
4.2.3 负反馈放大电路的4种基本 组态	94	习题	141
4.2.4 负反馈类型判断	96	第6章 信号产生与变换电路	147
4.3 负反馈对放大电路的影响	98	6.1 正弦波振荡电路基础知识	147
4.3.1 提高增益的稳定性	98	6.1.1 自激振荡现象	147
4.3.2 减小放大电路的非线性失真和 噪声	99	6.1.2 产生正弦波振荡的条件	147
4.3.3 扩展放大电路通频带	100	6.1.3 正弦波振荡的形成过程	148
4.3.4 改变电路的输入、输出阻抗	101	6.1.4 振荡电路的组成	148
4.4 深度负反馈放大电路的分析和近似 计算	103	6.1.5 正弦波振荡电路的分析方法	149
4.4.1 深度负反馈放大电路的特性	103	6.1.6 正弦波振荡器的稳定性	149
4.4.2 深度负反馈条件下电压增益的 估算	104	6.1.7 正弦波振荡电路的分类	150
4.5 负反馈放大电路应用中的几个问题	107	6.2 RC正弦波振荡电路	150
4.5.1 放大电路引入负反馈的一般原 理	107	6.2.1 RC桥式振荡电路	150
4.5.2 负反馈放大电路的稳定性	107	6.2.2 RC移相式振荡电路	153
本章小结	110	6.3 LC振荡电路	154
习题	112	6.3.1 LC并联回路的选频特性	154
第5章 集成运算放大器	115	6.3.2 变压器反馈式LC振荡电路	155
5.1 概述	115	6.3.3 三点式LC正弦波振荡电路	156
5.2 差动放大电路	116	6.3.4 电感三点式LC振荡电路	156
5.2.1 零点漂移现象	116	6.3.5 电容三点式LC振荡电路	157
5.2.2 基本差动放大电路	116	6.3.6 改进型电容三点式LC振荡电 路	158
5.2.3 长尾式差动放大电路	117	6.3.7 判断三点式振荡电路相位平衡 条件的简便方法	160
5.2.4 恒流源差动放大电路	120	6.4 石英晶体振荡电路	161
5.2.5 差动放大电路的4种接法	121	6.4.1 石英晶体的结构	161
5.3 集成运算放大器的组成	124	6.4.2 石英晶体的压电效应	162
5.3.1 集成运算放大器的内部电路 介绍	124	6.4.3 石英晶体谐振电路的符号及其 性能	162
5.3.2 集成运算放大器的主要性能 指标	125	6.4.4 石英晶体振荡电路的类型	163
5.4 集成运算放大器的应用	127	6.5 非正弦信号发生器	164
5.4.1 基本运算电路	127	6.5.1 矩形波发生器	164
5.4.2 电压比较器	134	6.5.2 三角波发生器	165
5.5 集成运算放大器的分类、选型及 使用要点	137	6.5.3 锯齿波发生器	167
5.5.1 集成运算放大器的分类	137	6.5.4 波形变换电路	168
5.5.2 正确选择集成运算放大器	138	6.6 8038集成函数发生器简介	168
5.5.3 集成运算放大器使用的几个	138	6.6.1 8038的组成和工作原理	168
		6.6.2 8038的典型应用	169
		6.7 压控振荡器	169
		6.7.1 电路的组成和工作原理	170
		6.7.2 振荡频率与控制电压的关系	171
		本章小结	172

习题	173	8.2 总体方案	211
第7章 直流稳压电源	178	8.2.1 总体框图	212
7.1 概述	178	8.2.2 总体方案的论证	212
7.1.1 演示实验	178	8.3 单元电路的设计	212
7.1.2 操作过程	178	8.3.1 确定电路	212
7.2 整流滤波电路	179	8.3.2 电路元器件参数的估算	213
7.2.1 整流电路	179	8.3.3 性能指标的验证及元器件参数的确定	213
7.2.2 滤波电路	183	8.3.4 设计举例	213
7.3 直流稳压电源	186	本章小结	227
7.3.1 直流稳压电源的组成	186	习题	228
7.3.2 直流稳压电源的主要技术指标	187	第9章 模拟电子线路实验	231
7.4 并联稳压电路及其工作原理	188	9.1 实验1 晶体管共射极单管放大器	231
7.4.1 电路组成	188	9.2 实验2 负反馈放大器	237
7.4.2 工作原理	188	9.3 实验3 射极跟随器	240
7.4.3 元件选择	189	9.4 实验4 差动放大器	244
7.4.4 并联稳压电源的适用场合	190	9.5 实验5 集成运算放大器的基本应用(1) ——模拟运算电路	247
7.5 串联反馈型稳压电路	190	9.6 实验6 集成运算放大器的基本应用(2) ——有源滤波器	251
7.5.1 电路组成	190	9.7 实验7 集成运算放大器的基本应用(3) ——电压比较器	255
7.5.2 工作原理	190	9.8 实验8 集成运算放大器的基本应用(4) ——波形发生器	259
7.5.3 输出电压的计算	191	9.9 实验9 RC 正弦波振荡器	262
7.6 三端集成稳压器	192	9.10 实验10 函数信号发生器的组装与调试	265
7.6.1 三端固定式集成稳压器引脚	192	9.11 实验11 压控振荡器	267
7.6.2 三端固定式集成稳压器的型号组成及其意义	192	9.12 实验12 低频功率放大器——OTL 功率放大器	269
7.6.3 三端固定式集成稳压器的应用	193	9.13 实验13 直流稳压电源(1) ——串联型晶体管稳压电源	273
7.6.4 三端可调式集成稳压器	196	9.14 实验14 直流稳压电源(2) ——集成稳压器	277
7.7 开关稳压电源	197	9.15 实验15 应用实验——温度监测 及控制电路	281
7.7.1 开关稳压电源的结构框图	197	9.16 实验16 综合实验——用运算放 大器组成万用电表的设计与调试	285
7.7.2 开关型电路的工作原理	198	附录	289
7.7.3 实例分析	199	附录A 用万用表检测常用电子元器件	289
7.8 单相倍压整流电路	203	附录B 电阻器的标称值及精度色环标 志法	291
7.8.1 单相二倍压整流电路	203	参考文献	293
7.8.2 单相多倍压整流电路	203		
7.8.3 倍压整流电路在实际电路中的应用	204		
7.9 高频交流电子镇流器	205		
7.9.1 高频交流电子镇流器简介	205		
7.9.2 高频交流电子镇流器的基本工作原理	206		
本章小结	207		
习题	208		
第8章 模拟电子系统的综合设计	211		
8.1 设计流程	211		

第 1 章 半导体二极管

20 世纪的前半世纪, 电子元器件普遍使用真空电子管。真空电子管存在体积大、耗电多、价格高等缺点。1948 年世界上诞生了第一个半导体管。由于半导体管及其他半导体器件具有体积小、重量轻、耗电少、可靠性高、寿命长、价格低廉、易于集成化等一系列优点, 因此很快便在电子技术中取代了电子真空器件, 开始了电子技术发展的新纪元。半导体二极管也称晶体二极管, 是现代科技运用最广泛的电子器件之一。它的核心部分是 PN 结, 因此本章首先介绍半导体的基础知识和 PN 结的形成, 在此基础上再介绍半导体二极管的结构、特性、主要参数和主要用途等。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体及其特性

我们在中学学习过, 自然界中的物质, 按其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体三大类。金、银、铜、铝等金属材料是容易导电的物质, 是良导体, 其电阻率在 $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega \cdot m$ 之间; 云母、塑料、陶瓷、橡胶等材料导电能力很弱, 是绝缘体, 其电阻率在 $10^8 \Omega \cdot m$ 以上, 还有一些物质如硅、锗及有些化合物等, 它们的导电能力介于导体和绝缘体之间, 称为半导体, 其电阻率在 $10^{-5} \sim 10^7 \Omega \cdot m$ 之间。由于绝大多数半导体的原子排列呈晶体结构, 所以半导体也称晶体。常用的半导体材料有硅 (Si)、锗 (Ge) 和砷化镓 (GaAs) 等。20 世纪 40 年代, 科学家在实验中发现半导体材料具有一些特殊的性能, 并制造出性能优良的半导体器件, 从而引发了电子技术的革命。

半导体材料具有以下一些独特的导电特性:

1. 杂敏性

在纯净的半导体材料中掺入某种微量的元素 (如硼和磷等) 后, 其导电能力将猛增几万倍甚至百万倍。例如, 在纯硅中掺入百万分之一的硼, 即可使其电阻率从 $0.214 \times 10^6 \Omega \cdot m$ 下降到 $0.4 \Omega \cdot m$, 其导电能力增强 10^6 倍。这是半导体最显著、最突出的特性。掺入的微量元素, 我们称为“杂质”。利用掺“杂”的方法, 能制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件。

2. 光敏性

有的半导体材料在无光照时电阻率很高, 而一旦受到光照后电阻率即显著下降。例如, 硫化镉材料在一般灯光照射下, 它的电阻率是移去灯光后电阻率的几十分之一至几百分之一。利用这种特性可以制成光敏元器件, 如光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等, 从而实现路灯、航标灯的自动控制或制成火灾报警装置、光电控制开关等。

3. 热敏性

所谓热敏性是指半导体的电导率随温度升高 (如受热辐射) 而显著减小的特性, 即温

度升高，其导电能力大大加强。温度对半导体材料的导电性能影响很大。例如，对于纯锗，当温度从 20°C 升高到 30°C 时，其电阻率降低约一半，也就是其导电能力增强约一倍。硅在 200°C 时的导电能力要比室温时增强几百甚至几千倍。利用半导体对温度十分敏感的特性，可以制造出自动控制中常用的热敏电阻及其他热敏元件，用于检测温度的变化。当然，这种特性对半导体器件的其他工作性能也有许多不利的影响，在应用中必须加以克服。

1.1.2 本征半导体

所谓本征半导体，就是纯净的、不含“杂质”的，而且具有完整晶体结构的半导体。例如，纯净的硅（Si）和锗（Ge）就是本征半导体材料。本征半导体需要用复杂的工艺和技术才能制造出来，这也是半导体材料比导体和绝缘体材料应用得晚的原因。

1. 本征半导体的结构模型

硅和锗的原子结构示意图如图 1-1 所示。外层电子受原子核的束缚力最小，叫做“价电子”。硅和锗的外层电子都是 4 个，属于四价元素。物质的化学性质由价电子数决定，半导体的导电性质也与价电子有关。为了突出价电子的作用，原子结构可用简化模型表示，如图 1-1 中的右图所示。外层表示价电子，+4 叫“惯性核”，其电荷量 +4 是原子核和除价电子以外的内层电子电荷量的总和。

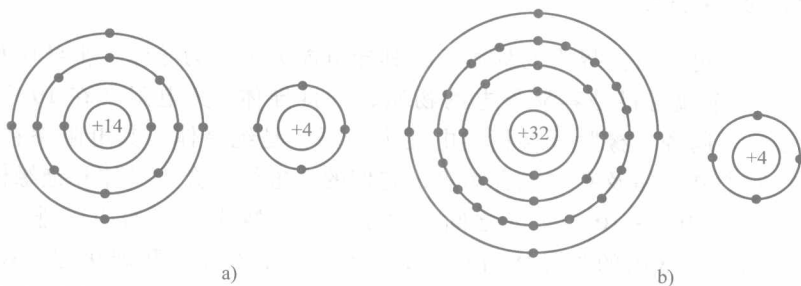


图 1-1 原子结构示意图

a) 硅 b) 锗

在本征硅（或锗）晶体中，原子按一定的规律整齐排列，组成空间点阵。由于原子相距很近，每一个价电子分别与相邻硅原子的一个价电子组成价电子对，这个价电子对为相邻两个原子所共有。价电子对中的每一个价电子，一方面围绕原来的原子核转动，同时又围绕相邻原子核转动，它们同时受到两个原子核的吸引作用。这种对共有价电子所形成的束缚作用叫做共价键。每个硅原子的 4 个价电子都通过共价键与周围的 4 个原子发生作用，相互结合，形成整齐有序的晶体结构。图 1-2 为其晶体结构的示意图。图中画的是二维结构，实际上其晶体结构是三维结构。

2. 本征半导体中的两种载流子——电子和空穴

在热力学温度 $T=0\text{K}$ 和没有外界能量激发时，本征半导体中的所有价电子被共价键所束缚，不会成为自由电子，称为束缚电子。此时本征半导体中没有可以自由运动的带电粒子，导电性能很差，相当于绝缘体。但是与绝缘体材料相比，半导体材料中的价电子受共价键的束缚力较小。在室温下，由于热激发，有些价电子会获得足够的能量，挣脱共价键的束缚而变成自由电子，并在原来的位置留下一个空位，称为空穴。这种由热激化产生自由电子

和空穴对的现象称为本征激发。

原子的正负电荷的数量是一样的，失去一个带负电荷的电子后，它将多一个正电荷，因此可以说空穴是带正电的。在本征半导体中，自由电子和空穴的数量是相等的，从宏观上看，它仍然是电中性的。由于共价键中出现了空穴，当外电场作用时，就会有其他相邻共价键的价电子被吸引来填补这个空位，而在其原有的位置上留下一个空位。图 1-2 中，2 处的电子受到本征激发跑到 1 处，变成自由电子，在 2 处留下空位。出于同样的原因，4 处的价电子受到本征激发跑到 3 处，变成自由电子，来填补 2 处的空位，而在 4 处形成新的空位……这样，无论从形式上看，还是从实际效果看，都好像是空穴在运动一样。实际上，空穴运动形成的电流，是束缚电子运动而形成的电流，这和金属导电的机制是不同的。

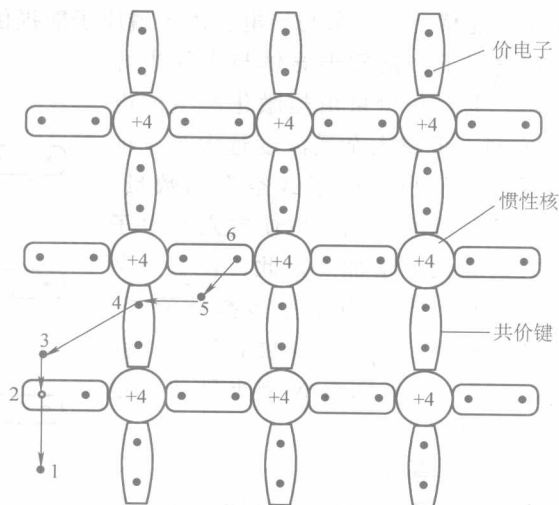


图 1-2 本征半导体的共价键结构

自由电子和空穴都是可以参与导电的带电粒子，称为载流子。但要注意的是，空穴只是概念上的带电粒子，其运动形成的电流仍然是电子运动形成的。本征半导体在外电场的作用下，其电流为电子流与空穴流之和。

自由电子和空穴都是可以参与导电的带电粒子，称为载流子。但要注意的是，空穴只是概念上的带电粒子，其运动形成的电流仍然是电子运动形成的。本征半导体在外电场的作用下，其电流为电子流与空穴流之和。

如果自由电子与空穴相遇，即电子填补空穴，使电子-空穴对消失，这种现象称为复合。电子-空穴对的产生与复合，是一对矛盾的运动，在一定温度下它们可以达到动态平衡，电子-空穴对的数目相对地保持不变。当温度升高或受到光照时，电子-空穴对的数量增加，本征半导体的导电能力随之增强。虽然本征半导体中有电子和空穴两种载流子，而金属导体中只有电子一种载流子，但由于前者的载流子浓度远远低于后者，所以本征半导体的导电能力还是不如金属导体。

1.1.3 杂质半导体

在室温下，本征半导体中的载流子浓度很低，导电能力很差，而且也不好控制，因而本征半导体材料不能直接用来制造半导体器件。但如果在本征半导体中掺入微量其他适当的“杂质”元素，既可以大大提高半导体的导电能力，又可以利用掺杂元素的多少来精确控制半导体的载流子浓度，这在实际中得到广泛的应用。掺入杂质元素后的半导体称为杂质半导体。按照掺入杂质元素的不同，可以分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

如果在纯净的硅（或锗）晶体中掺入微量五价元素，如磷（P），则晶体点阵中的某些位置上硅（或锗）原子被磷原子所代替。由于磷原子有 5 个价电子，其中的 4 个与周围的硅（或锗）原子中的价电子形成共价键外，还多余 1 个价电子，如图 1-3 所示。它不受共价键的束缚，只要得到很小的能量，就可以挣脱磷原子的吸引力而变成导电的自由电子，同时不产生空穴。在室温下，几乎所有杂质原子都失去一个价电子而成为正离子，这些正离子在

晶体中不能移动，不参与导电。由于磷原子能提供自由电子，故称磷为施主杂质。

在室温下，杂质半导体与本征半导体一样，也存在少量由热激发产生的电子-空穴对，但掺入杂质浓度远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的数量，并且电子数目的增加，也使空穴与电子复合的机会大为增加。因此，在这类杂质半导体中，自由电子是多数载流子，简称“多子”，空穴是少数载流子，简称“少子”，因而称为 N 型半导体或电子型半导体。

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，如硼（B）等，因硼原子只有 3 个价电子，它与周围硅（或锗）原子组成共价键时便产生一个空位，这个空位极易被相邻共价键上的价电子填补，使硼原子成为不能移动的负离子，而原共价键则因缺少一个电子形成了空穴，如图 1-4 所示。

由于硼原子在晶体中能接受电子，故称硼为受主杂质。常温下，每个硼原子都能增加一个空穴，且并不产生自由电子，从而使半导体中的空穴数量大大增加。虽然还存在本征激发产生的少量电子-空穴对，但是空穴数量远大于自由电子数量。所以，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。因为参与导电的载流子以空穴为主，又因为空穴带正电荷，所以这种杂质半导体称为 P 型半导体或空穴型半导体。

由以上分析可知，在 N 型半导体中，杂质电离成为带正电的施主正离子，同时释放一个带负电的电子；在 P 型半导体中，杂质电离成为带负电的受主负离子，同时形成一个带正电的空穴。而本征激发产生的自由电子和空穴的数目也是相等的，因此，杂质半导体中的正负电荷数量相等，保持电中性。

在半导体中，少数载流子的浓度与本征激发和复合有关，受温度的影响很大，所以它对半导体器件的温度特性产生很大的影响。在同一块半导体材料中，如果既掺入施主杂质又掺入受主杂质，它到底会成为哪种半导体材料呢？这要由施主杂质和受主杂质的密度决定。哪种密度高，就成为哪种半导体。由此可见，采用适当控制掺杂元素的密度，可以使 P 型和 N 型半导体相互转换。

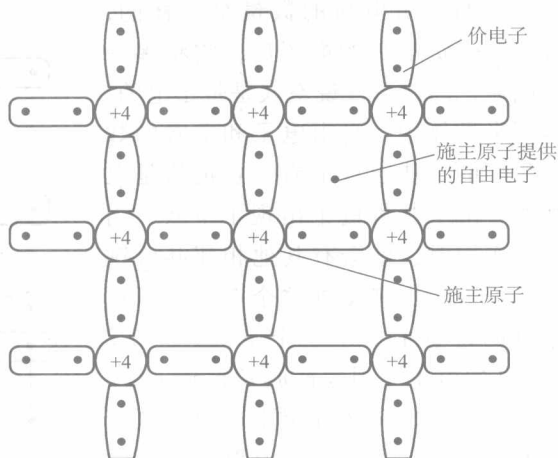


图 1-3 N 型半导体

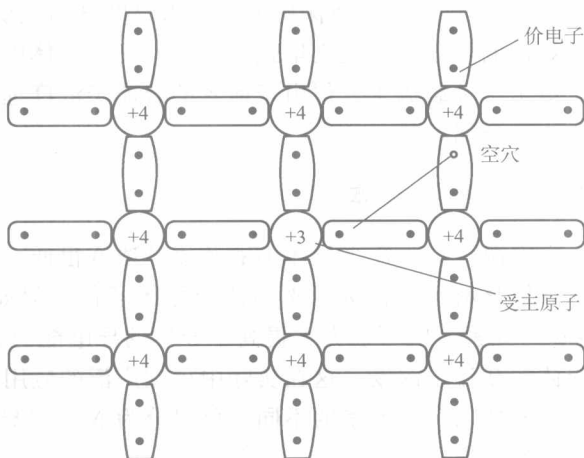


图 1-4 P 型半导体

1.1.4 PN 结

在一块本征半导体中掺入不同的杂质，使其一侧为 P 型半导体，另一侧为 N 型半导体，那么在它们的交界处形成具有特殊电学性能的过渡层——PN 结。它是构成众多半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

当 P 型半导体与 N 型半导体结合后，在它们的交界面的两侧存在着空穴和电子的浓度差别，P 区空穴多、电子少；N 区电子多、空穴少。于是，空穴和电子就会从浓度高的地方向浓度低的地方运动，如图 1-5 所示。这种由浓度差而产生的运动，称为扩散运动。扩散的结果破坏了 P 区和 N 区交界面附近的电中性条件，在 P 区一侧由于失去空穴，留下不能移动的负离子（受主离子）；在 N 区一侧由于失去自由电子，留下了不能移动的正离子（施主离子）。这些不能移动的正负离子所在的区域叫“空间电荷区”，如图 1-6 所示。在这个区域，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说耗尽了，因此空间电荷区有时也叫“耗尽层”。空间电荷区中的正负离子形成一个从 N 区指向 P 区的电场，这个电场是内部载流子的扩散运动形成的，而不是外加的，所以叫“内电场”。

内电场的出现对多数载流子的扩散产生阻碍作用，好像一个壁垒，因而又将空间电荷区称为阻挡层或势垒区。另一方面，半导体中还存在少数载流子，内电场将使少数载流子产生与扩散运动方向相反的漂移运动。即 P 区的少数自由电子向 N 区扩散，从而补充了 N 区交界面附近因扩散失去的自由电子，使正离子减少；而 N 区的少数空穴向 P 区漂移，从而补充了 P 区交界面附近因扩散失去的空穴，使负离子减少。因此，漂移运动的结果使空间电荷区变窄，其作用正好与扩散运动相反。

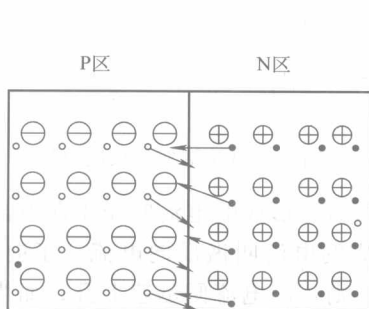


图 1-5 载流子的扩散

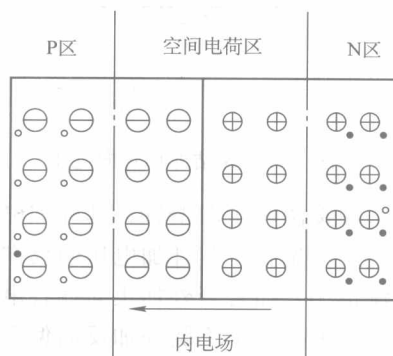


图 1-6 PN 结的形成

由此可见，在 PN 结形成过程中，多子的扩散运动和少子的漂移运动是相互联系又相互对立的。多子的扩散运动使空间电荷区变宽，内电场增强。内电场的建立和增强又阻止多子的扩散，促进了少子的漂移，其结果又使空间电荷区变窄，内电场减弱，从而又使多子的扩散增强。如此相互制约，相互促进。最后，多子的扩散运动与少子的漂移运动达到动态平衡。此时，扩散电流与漂移电流大小相等、方向相反，通过空间电荷区的净电流为零，空间电荷区具有一定的宽度，PN 结形成。PN 结内，正、负电荷的电量相等。因此，当 P 区与 N

区杂质浓度相等时，负离子区和正离子区的宽度也相等，称为对称结；而两边杂质浓度不同时，浓度高的一侧的离子区宽度低于浓度低的一侧，称为不对称结。两种 PN 结的外部特性是相同的。

2. PN 结的单向导电性

上面讨论了无外加电压时，PN 结保持平衡，流过 PN 结的总电流为零。如果在 PN 结的两端外加电压，将破坏原来的平衡状态。当外加电压的极性不同时，PN 结表现出一个重要的特性——单向导电性。

(1) 外加正向电压 当 P 区接电源正极，N 区接电源负极时，在 P 区和 N 区就会形成一个从 P 区指向 N 区的外电场。在这个电场作用下，P 区的空穴就顺着电场方向运动，N 区的电子就会逆着电场方向运动。在空穴和电子的运动过程中，两者会相互中和，使 PN 结的空间离子的数量越来越少，这样 PN 结越来越薄，外电流就能顺利流过，如图 1-7 所示。

(2) 外加反向电压 当 N 区接电源正极，P 区接电源负极时，在 P 区和 N 区就会形成一个从 N 区指向 P 区的外电场。在这个电场作用下，P 区的空穴就顺着电场方向运动，N 区的电子就会逆着电场方向运动，使 PN 结的空间离子的数量越来越多，这样 PN 结就越来越厚，外电流就难以流过，如图 1-8 所示。

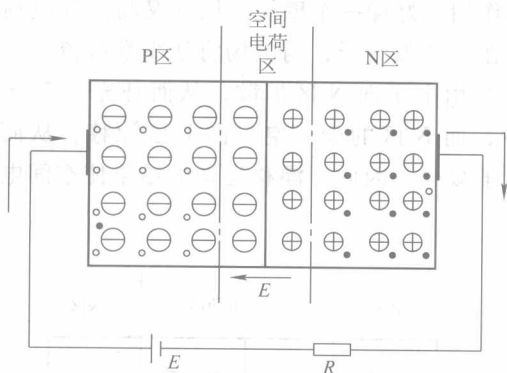


图 1-7 PN 结外加正向电压

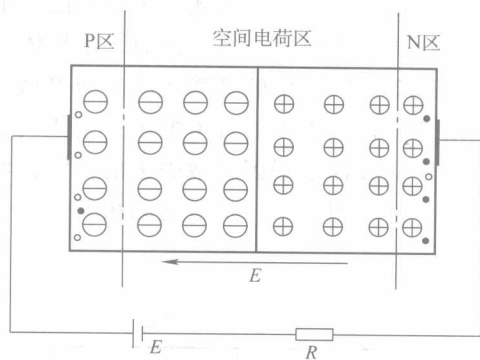


图 1-8 PN 结外加反向电压

第一种接法叫正向偏置，其外加电压叫正向偏置电压，形成的电流叫做正向电流；第二种接法叫反向偏置，其外加电压叫反向偏置电压，形成的电流叫做反向电流。正向电流大，反向电流很小。而且当外加正向偏置电压稍微增加时，则正向电流便迅速上升；而当温度一定时，反向电流几乎不随外加反向偏置电压的变化而变化，所以又称反向饱和电流。反向饱和电流受温度的影响很大。但由于反向电流的值很小，与正向电流相比，一般可以忽略，所以 PN 结反向偏置时，呈现的电阻很大，处于截止状态。因此，PN 结正向偏置时导通，反向偏置时截止，这就是 PN 结的单向导电性。

3. PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性是指 PN 结两端的外加电压与流过 PN 结的电流之间的关系曲线。根据理论分析，PN 结的电压电流关系式为

$$i_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式中， U_D 为 PN 结两端的外加电压，参考极性是 P 区为正、N 区为负； i_D 为流过 PN 结的电

流, 其参考方向为从 P 区经 PN 结到 N 区; I_s 在数值上等于反向饱和电流; U_T 叫做温度电压当量, $U_T = kT/q$, k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电荷量, 在室温 ($T = 300\text{K}$) 时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

(1) 正向特性 当外加正向电压时, U_D 为正值。如果 U_D 比 U_T 大几倍, 则 $e^{\frac{U_D}{U_T}} \gg 1$, 故式 (1-1) 简化为

$$i_D \approx I_s e^{\frac{U_D}{U_T}} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 说明流过 PN 结的正向电流随外加正向电压按指数规律变化。

(2) 反向特性 当外加反向电压时, U_D 为负值。如果 $|U_D|$ 比 U_T 大几倍, 则 $e^{\frac{U_D}{U_T}} \ll 1$, 故式 (1-1) 简化为

$$i_D \approx -I_s \quad (1-3)$$

式 (1-3) 说明流过 PN 结的反向电流几乎不随外加反向电压的大小变化。

4. PN 结的反向击穿

如上所述, PN 结的反向电流 I 与所加的反向电压无关。但当反向电压达到一定数值 U_{BR} 时, 反向电流将会突然大幅度增加, 这个现象被称为 PN 结的反向击穿。它分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。

(1) 雪崩击穿 当 PN 结两端加的反向电压足够大时, 内电场也随之增强, 电子和空穴通过空间电荷区时, 在内电场的作用下, 获得的动能显著增加, 运动速度大大加快。这些载流子在运动过程中, 会与半导体的晶体原子发生碰撞, 将一部分动能转移给共价键中的电子, 使价电子脱离共价键的束缚, 变成自由电子, 从而产生了电子-空穴对。新产生的电子-空穴对又会与原有的自由电子和空穴一样, 被内电场加速, 去撞击其他原子, 再产生新的电子-空穴对, 这就是载流子的倍增效应。这种现象与雪山发生的雪崩类似, 因此叫做雪崩击穿。

(2) 齐纳击穿 在一些杂质浓度较高的 PN 结中, 杂质密度大, 空间电荷区中的正负离子密度也大, 空间电荷区很薄。这样, 只要加上不大的反向电压, 就可以使内电场达到足够的电场强度。这个内电场将会直接把价电子从共价键中拉出来, 产生电子-空穴对, 从而形成较大的反向电流, 基于这种现象产生的反向击穿称为齐纳击穿。对于硅型 PN 结来说, 反向电压 7V 以上的击穿一般是雪崩击穿, 4V 以下的击穿一般是齐纳击穿。在 4V 和 7V 之间时, 两种击穿可能同时存在, 发生雪崩击穿时, PN 结的电压温度系数为正, 即温度升高时, 击穿电压也升高; 发生齐纳击穿时, PN 结的电压温度系数为负, 即温度升高时, 击穿电压降低。两种击穿同时存在时, 电压温度系数接近于零。

应该指出, 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 结损坏, 只要击穿后流过 PN 结的电流不超过某一限度, PN 结可保持完整无损且击穿现象可重复发生。PN 结击穿后, 反向电流急剧变化而其两端的电压却基本不变, 利用这一特性可以做稳压管, 这将在后面作详细介绍。

5. PN 结的电容效应

PN 结的电容效应直接影响半导体器件 (二极管、晶体管、场效应晶体管等) 的高频性能。下面介绍 PN 结的两种电容效应, 即势垒电容和扩散电容。

(1) 势垒电容 C_B PN 结的势垒电容 C_B 用来描述势垒区空间电荷区的空间电荷随外加电压的变化而产生的电容效应。势垒区中不能移动的正、负离子都具有一定的电量，当外加反向偏置电压增加时，结电场增强，势垒区变宽，空间电荷量增加，相当于电容充电；反之，当外加反向偏置电压减小时，结电场减小，势垒区变窄，空间电荷量减少，相当于电容放电。这种充放电的过程与普通电容的充放电的过程类似，但普通电容的电容量一般是常量，不随外加电压的变化而改变。势垒电容是非线性电容，其大小与结面积、耗尽层宽度、半导体介电常数以及外加电压有关。

(2) 扩散电容 C_D PN 结正向偏置时，N 区的多子——自由电子扩散到 P 区，并不断与 P 区的空穴复合。于是，电子在 P 区形成了一定的浓度分布：靠近结边缘处浓度高，远离结的地方浓度低。这样，在 P 区有电子的积累。同理，P 区的空穴向 N 区扩散，在 N 区内有空穴的积累。当正向电压增加时，扩散到 P 区的电子浓度和扩散到 N 区的空穴浓度均上升，积累的电荷量增加；当正向电压减小时，扩散到 P 区的电子浓度和扩散到 N 区的空穴浓度均下降，积累的电荷量减少。由外加电压的改变引起扩散区积累的电荷量的变化产生了电容效应，对应的电容称为扩散电容。其大小随外加电压变化，也是一种非线性电容。

PN 结的结电容 C_J 为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 之和，即

$$C_J = C_B + C_D \quad (1-4)$$

在正向偏置时，势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 同时存在，但以扩散电容 C_D 为主；在反向偏置时，结电容则基本上等于势垒电容 C_B ，结电容 C_J 一般在几皮法到几十皮法，对低频电路可以忽略，对高频电路则必须考虑它的存在。

1.2 半导体二极管的特性及参数

1.2.1 二极管的外形、结构及符号

半导体二极管是由 PN 结、电极引线 and 管壳构成的，为了方便起见，本书中把半导体二极管简称为二极管。按材料分，最常用的有锗二极管和硅二极管两种；按结构不同可分为点接触型二极管和面接触型二极管两种。

1. 点接触型二极管

将一根很细的金属丝（如铝）和一块半导体（如锗）接触，通入很大的电流，使金属和半导体熔接在一起，形成 PN 结，如图 1-9a 所示。它的特点是结面积小，因此结电容很小，但不允许通过大电流。这种二极管适用于高频检波、小电流整流及小功率开关电路。

2. 面接触型二极管

它的 PN 结是用合金法（面结型二极管）或扩散法（硅平面二极管）工艺制作而成，其结构如图 1-9b、c 所示。它的特点是：PN 结面积大，能承受较大的电流，且反向击穿电压高，但结电容也大，适用于低频整流和低速开关电路。

二极管的图形符号如图 1-9d 所示。图中，由 P 区引出的电极是正极（阳极）；由 N 区引出的电极是负极（阴极），三角箭头方向表示正向电流的方向。图 1-10 是几种常见二极管的外形。

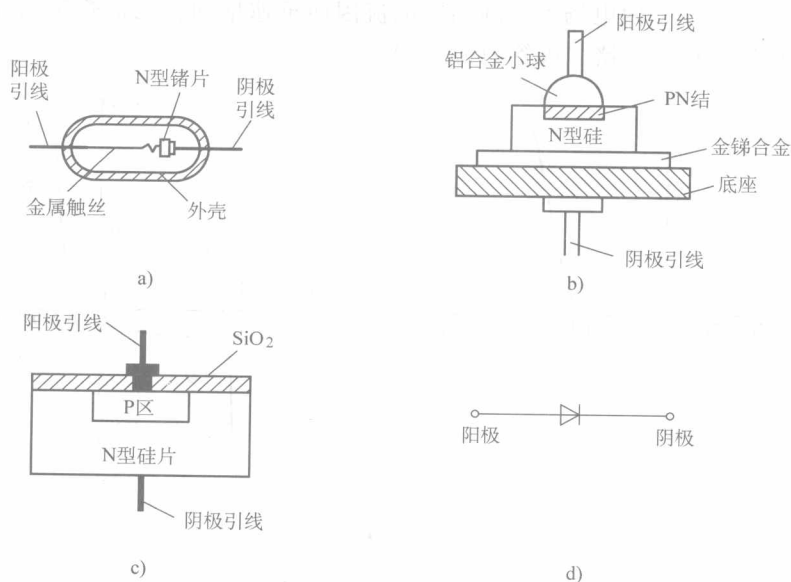


图 1-9 二极管的结构及图形符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型 d) 图形符号

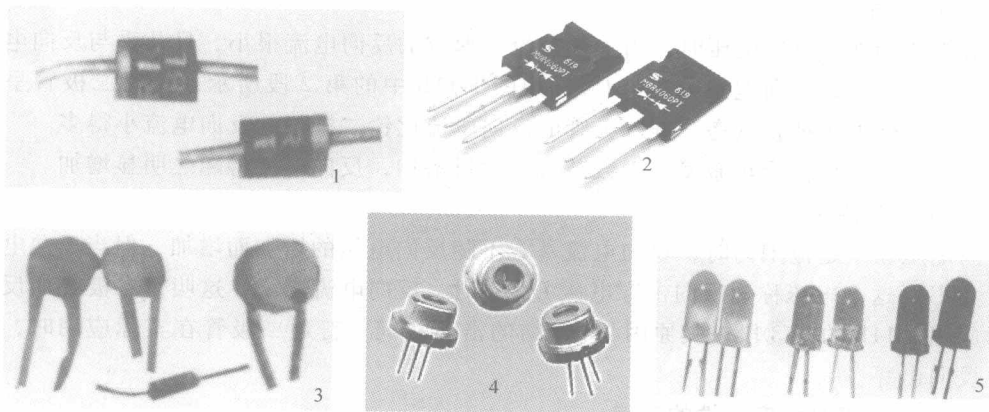


图 1-10 常见二极管外形

1—普通二极管 2—肖特基二极管 3—开关二极管 4—激光二极管 5—发光二极管

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性就是流过二极管的电流 i_D 与加在二极管两端的电压 u_D 之间的关系曲线。图 1-11 为硅二极管和锗二极管的伏安特性曲线。下面对其进行简要分析。

1. 正向特性

图 1-11b 中①段为二极管的正向特性。当外加正向电压较小时，外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，因而正向电流几乎为零，二极管呈现出一个大电阻，好像有一个门坎。使正向电流从零开始明显增长的外电压叫阈值电压（或开启电压、门坎电压），记作 U_{th} 。在室温下，硅二极管的 U_{th} 约为 0.5V；锗二极管的 U_{th} 约为 0.2V。当

外加正向电压大于 U_{th} 后, 内电场大为削弱, 电流因而迅速增加, 二极管正向导通。硅二极管正向导通电压约为 $0.7V$, 锗二极管约为 $0.3V$ 。

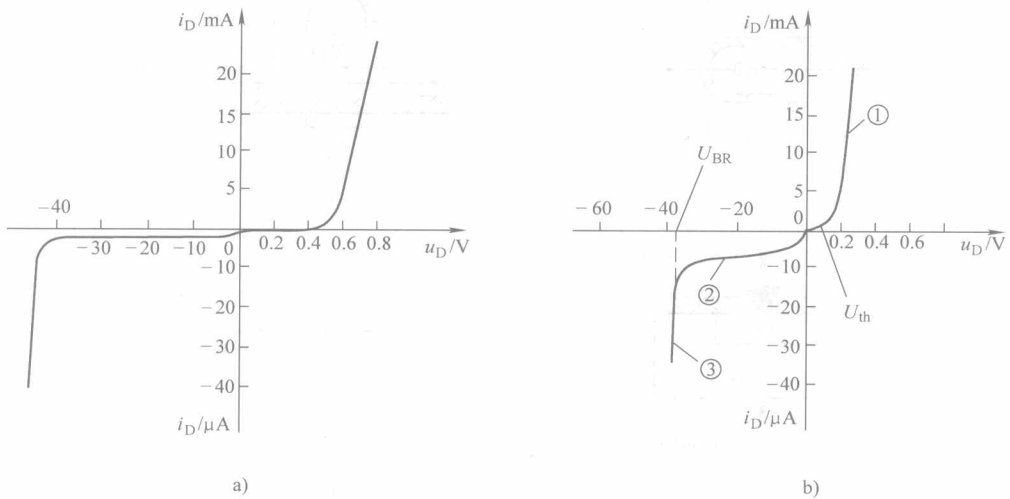


图 1-11 二极管的伏安特性曲线

a) 硅二极管 b) 锗二极管

2. 反向特性

二极管两端加上反向电压时, 由少数载流子形成的反向电流很小, 且几乎与反向电压的大小无关, 其值称为反向饱和电流 (I_s), 如图 1-11b 中的第②段所示。这时二极管呈现很高的电阻, 近似处于截止状态。硅二极管的反向电流比锗二极管的反向电流小得多。

温度升高, 半导体受热激发, 少数载流子数目增加, 反向电流将随之明显增加。

3. 反向击穿特性

反向电压在一定范围内时, 反向电流基本不随反向电压的增加而增加, 但当反向电压达到一定大小 (这个电压称为反向击穿电压 U_{BR}) 时, 反向电流剧增, 这叫做二极管的反向击穿, 对应图 1-11b 的第③段, 其原因与 PN 结的击穿相同。普通二极管在实际应用时, 应尽量避免反向击穿。

4. 温度对二极管伏安特性的影响

温度对二极管的伏安特性有显著的影响。当环境温度升高时, 二极管的正向特性左移, 反向特性下移, 如图 1-12 所示。变化规律是: 在保持正向电流不变的情况下, 温度每升高 $1^{\circ}C$, 正向电压减少 $2 \sim 2.5mV$; 温度每升高 $10^{\circ}C$, 反向电流增大大约 1 倍。

1.2.3 二极管的主要参数

器件的参数是对其特性和极限运用条件的定量描述, 是正确使用和合理选择器件的依据。二极管的主要参数有:

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是在规定散热条件下, 二极管长期使用时, 允许通过二极管的最大正向平均电流。它由 PN 结的面积和散热条件决定, 如果电流超过这个值, 很可能烧毁二极管。