

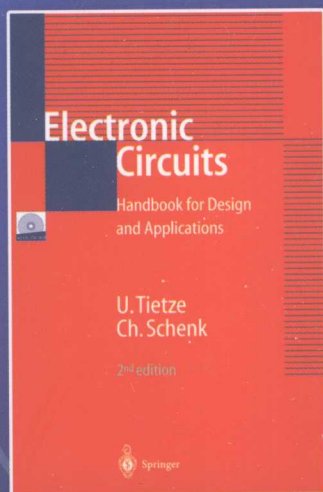
国外电子与通信教材系列

 Springer

电子电路设计 原理与应用(第二版)

(卷I 器件模型和基本电路)

**Electronic Circuits Handbook
for Design and Applications, Second Edition**



Ulrich Tietze
[德] Christoph Schenk 著
Eberhard Gamm

张林 邓天平 译
张浩 瞿安连



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

014009632

TN710
381

国外电子与通信教材系列

内容简介

电子电路设计原理与应用

(第二版)

(卷 I 器件模型和基本电路)

Electronic Circuits Handbook for Design and Applications, Second Edition

[德] Ulrich Tietze Christoph Schenk Eberhard Gamm 著

张林 邓天平 张浩 瞿安连 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry



北航

C1696261

TN710
381

内 容 简 介

原德文畅销书 *Halbleiter-Schaltungstechnik* (《半导体电路技术》) 是为学生、工程师和科学工作者而写作的, 内容包含了电子电路设计的所有主要方面, 其宗旨是帮助读者通晓实际应用的电路, 并进而有能力自己设计电路。该书德文版自 1969 年以来已发行了 14 版, 其中的第 12 版内容已全部译为英文, 为德文版完整英文译本的第 2 版, 并以 *Electronic Circuits: Handbook for Design and Applications* 为书名出版。本中文译本译自上述英文译本第 2 版。为适应不同读者的需求, 中文译本分为 3 卷出版。其中, 卷 I 为器件模型和基本电路, 卷 II 为应用电路, 卷 III 为通信电路。

本书既可作为高等学校电子科学技术、电子信息工程、自动化及仪器仪表等专业本科生和研究生有关电子电路方面的教科书或参考资料, 也可以作为上述领域工程技术人员的参考书。

Translation from the English language edition *Electronic Circuits: Handbook for Design and Applications*, Second Edition by U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm.

Copyright © 2008 Springer -Verlag Berlin Heidelberg. Springer London is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

Authorized Simplified Chinese language edition by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2013.

本书中文简体字翻译版由 Springer -Verlag Berlin Heidelberg 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2012-3040

图书在版编目(CIP)数据

电子电路设计原理与应用. 卷 I, 器件模型和基本电路/(德)蒂泽(Tietze, U.), (德)申克(Schenk, C.), (德)伽姆(Gamm, E.)著; 张林等译. —2 版.

北京: 电子工业出版社, 2013. 10

书名原文: *Electronic circuits handbook for design and applications*, Second Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-21580-3

I. ①电… II. ①蒂… ②申… ③伽… ④张… III. ①电子电路—高等学校—教材②电子元件—高等学校—教材 IV. ①TN710②TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 231774 号

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26.75 字数: 685 千字

印 次: 2013 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

本书原作者的中文版前言

Preface

The purpose of this book is to help the reader to understand off the shelf circuits and to design his or her own circuitry. The book is written for students, practicing engineers, and scientists. It covers the fundamentals of digital and optoelectronic circuits. The book is a translation of parts of the 12th edition of the German bestseller Halbleiter-Schaltungstechnik.

The chapters dealing with digital circuit design begin with a description of *latching circuits* for pulse shaping and simple pulse generation. A discussion of *combinatorial circuits* follows, with an introduction to computational algebra for the formal description and the methods for simplifying Boolean equations. The internal circuitry of commercially available gates is then explained and the most common combinational circuits are presented.

Sequential circuits begin with the internal construction and the behavior of flip-flops and the systematic design of state diagrams. The most common sequential logic circuits are presented together with their implementation using PLDs and FPGAs. The designs of digital circuits are rounded off with a chapter on *semiconductor memories*. Here the most common variants are described and compared regarding their function and internal structure.

A chapter on *optoelectronic components* and circuits complemented the Chinese edition. Here particularly the methods for numerical and alphanumeric display are explained.

We hope that our chapter on amplifiers and communication circuits will soon be included in the Chinese translation, where we see the special strength of our book. Our homepage www.tietze-schenk.com offers updates, supplements and design examples. We encourage you to use our email-address mail@tietze-schenk.com for feedback and comments.

Erlangen, May 2013

Ulrich Tietze, Christoph Schenk, Eberhard Gamm

中文版前言译文

Preface

本书面向学生、从业工程师和科学工作者,旨在帮助他们了解现有电路,并进而设计自己的电路。原书中还包括数字电路和光电子电路的基础知识。本书译自德文畅销书 *Halbleiter-Schaltungstechnik* 第 12 版中的部分内容。

关于数字电路设计的章节,首先讨论了用于脉冲整形和简单脉冲产生的锁存电路。接着引入逻辑描述的代数运算,通过化简布尔方程的方法,来进行组合逻辑电路的讨论。然后,对一些市场流行的逻辑门内部电路进行了说明,并介绍了一些最通用的组合逻辑电路。

时序电路首先从触发器的内部结构和性能,以及状态图的系统化设计入手,然后介绍最常用的时序逻辑电路,以及如何利用 PLD 和 FPGA 实现这些时序逻辑电路。数字电路设计以半导体存储器一章作为结束,其中介绍了最常用的几种存储电路形式,并比较了它们的功能和内部结构。

若收入光电子元件与电路一章将会使中文译本更为完整,这一章特别介绍了数字和字母的显示方法。

我们期盼有关放大器和通信电路部分的中文译本尽快出版,从中我们将看到这本书的非凡影响力。我们的主页 www.tietze-schenk.com 提供着不断更新的资料、补遗以及设计示例。我们的 E-mail 地址是 mail@tietze-schenk.com,欢迎大家通过 E-mail 反馈信息和意见。

乌利希·蒂泽,克里斯多夫·申克,艾伯哈特·伽姆

2013 年 5 月

于 埃朗根(德国)

译者前言

《电子电路设计原理与应用》的德文原版 *Halbleiter-Schaltungstechnik* (《半导体电路技术》) 自 1969 年第一版问世以来, 到 2013 年已发行了 14 版, 作者为乌利希·蒂泽 (Ulrich Tietze)、克里斯多夫·申克 (Christoph Schenk) 和艾伯哈特·伽姆 (Eberhard Gamm)。该书历经 40 多年的不断修订, 紧跟了电子技术的进步, 在欧美一直畅销不衰。纵观全书有如下特点。

1. 重视基础

本书虽然没有对最基础的半导体物理进行讨论, 但涉及基本电路分析时都用了较大篇幅, 并在讨论中不回避数学推导。例如, 对晶体管和基本放大电路均以大信号传输、小信号模型、频率响应和带宽、噪声, 以及信号失真等五方面进行基本原理的分析, 且视角和方法独特, 考虑问题周到细致。对这些基本问题的掌握, 将有助于正确应用集成电路构成性能优良的电子系统, 做出创新性工作。此外, 由于集成电路制造工艺的发展, 以及设计方法学和设计工具的进步, 越来越多的电路和系统设计工程师可能也会涉及集成电路本身的设计, 所以深入了解集成电路内部结构原理和分析方法是有前瞻意义的。

2. 强调工程应用

为使读者尽快掌握电子技术应用, 在第一部分的基础篇, 对每一种基本电路都先从原理出发, 并在量化分析的基础上推导模型的简化和工程近似的方法, 然后用非常接近实际的典型数据 (非真实数据) 作为计算示例。在介绍典型集成电路时, 特别注重于输入、输出特性的分析, 这也是为了便于在工程设计中解决不同集成电路设计以及集成芯片之间的互连匹配问题。本书第二部分, 用了多达 13 章的篇幅专门讨论电子电路在各方面的工程应用, 其中包含大量特定功能模块的分析、设计实例。这些经实践考验过的电路, 也许只要稍做修改就能应用到读者自己的电子设计中去。本书第三部分为通信电路, 涉及基本理论、发射机与接收机、无源元件、高频放大器和混频器等内容, 紧密结合通信电子电路应用的新进展进行了讨论。

3. 内容丰富

本书所讨论的内容涉及有关电子电路的几乎所有问题。书中给出了数百个电路计算示例和设计实例, 包含 1771 幅图示说明和大量芯片参数的列表比较。全书内容全面, 确如英文第二版的副标题 *Handbook for Design and Applications* 所示, 可以作为电子电路设计和应用的手册。

历史上该书曾有俄文译本两版 (1982 和 2007), 波兰文译本三版 (1976、1987 和 1996), 匈牙利文译本三版 (1974、1981 和 1990), 西班牙文译本一版 (1983)。英文译本共有三版: 1978、1991 和 2008。其中, 1978 年版以 *Advanced Electronic Circuits* 为书名出版, 只包含了该书的第二部分; 2008 年英文版书名为 *Electronic Circuits Handbook for Design and Applications*, 译自德文第 12 版, 为德文版完整英译的第 2 版。

Halbleiter-Schaltungstechnik 第 5 版曾于 1984 年在未经版权授权的情况下翻译为中文, 以《高级电子电路》为书名出版。时光已历近 30 年, 我们认为有必要将该书更新的版本介绍给我国的读者。

遗憾的是译者不通德文, 本中文译本的翻译不得不以 2008 年英译第二版为基础, 并参照 2010 年的德文 13 版做了部分订正。由于原书厚达 1543 页, 为适应不同读者的需求, 中文译本分为 3 卷出版。其中卷 I 摘取了原书第一部分的核心: 第 1~5 章, 主要是特色明显的器件特性、结构、模型和基本电路的论述。原书第 6~10 章为数字电路, 因为我国现行数字电路教材一般都讨论

得更为详细,并且这几章内容与本书其他各章相关性不大,故决定舍去不译。中文译本卷 II 的内容与原书第二部分对应,主要介绍电子电路的应用,但删除了其中特色不甚突出的有关光电子元件的第 23 章。卷 III 的内容对应原书第三部分,为通信电路,内容较新,全部译出。此外,为节省篇幅,本书还略去了附录和索引。全部章节号均按中文译本的取舍分卷重新排列。

本书可作为高等学校电子科学技术、电子信息工程、自动化及仪器仪表等专业本科生和研究生有关电子电路方面的教科书或参考资料,也可以作为上述领域工程技术人员的参考书。

参加本书翻译工作的有张林(卷 I 的第 1、3、5 章)、邓天平(卷 I 的第 2 章和卷 II 全部)、张浩(卷 I 的第 4 章)和李离(卷 III 全部),瞿安连审译并统一整理了全部书稿。

感谢电子工业出版社高教分社的领导和编辑们对本书翻译动议的支持到购买版权、编辑和发行所做的努力,感谢谭海平社长的关心和陈晓莉等编辑细致入微的工作,感谢绘图员重绘了全部图表。没有大家的努力,本中文译本今天能够付梓是难以想象的。

由于译者学术水平和英语水平有限,译文肯定存在未发现的失误或不当之处,敬请读者给予批评指正。

瞿安连

2013 年 6 月于华中科技大学

本书所介绍的各章内容均与电子电路设计密切相关,且为设计者提供了实用的设计方法和技巧。本书共分三卷,卷 I 为基本电路,卷 II 为应用电路,卷 III 为通信电路。本书在编写过程中,参考了国内外许多优秀的教材和文献,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校电子类专业及相关专业的教材,也可供从事电子电路设计的工程技术人员参考。

本书共分三卷,卷 I 为基本电路,卷 II 为应用电路,卷 III 为通信电路。本书在编写过程中,参考了国内外许多优秀的教材和文献,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校电子类专业及相关专业的教材,也可供从事电子电路设计的工程技术人员参考。

全书总目录

卷 I 器件模型和基本电路

- 第 1 章 二极管
- 第 2 章 双极型晶体管
- 第 3 章 场效应晶体管
- 第 4 章 放大器
- 第 5 章 运算放大器

卷 II 应用电路

- 第 1 章 运算放大器的应用
- 第 2 章 受控源和阻抗变换器
- 第 3 章 有源滤波器
- 第 4 章 信号产生器
- 第 5 章 功率放大器
- 第 6 章 电源电路
- 第 7 章 模拟开关和采样—保持电路
- 第 8 章 数模和模数转换器
- 第 9 章 数字滤波器
- 第 10 章 测量电路
- 第 11 章 传感器和测量系统
- 第 12 章 电子控制系统

卷 III 通信电路

- 第 1 章 基础知识
- 第 2 章 发射机和接收机
- 第 3 章 无源元件
- 第 4 章 高频放大器
- 第 5 章 混频器

卷 I 器件模型和基本电路目录

第 1 章 二极管	1
1.1 二极管特性	1
1.1.1 特性曲线	1
1.1.2 方程描述	2
1.1.3 开关特性	4
1.1.4 小信号响应	5
1.1.5 极限值和反向电流	6
1.1.6 热性能	6
1.1.7 二极管参数的温度敏感性	7
1.2 二极管结构	7
1.2.1 分立二极管	7
1.2.2 集成二极管	8
1.3 二极管模型	9
1.3.1 静态特性	9
1.3.2 动态特性	11
1.3.3 小信号模型	13
1.4 特殊二极管及其应用	15
1.4.1 齐纳二极管	15
1.4.2 pin 二极管	17
1.4.3 变容二极管	18
1.4.4 桥式整流器	20
1.4.5 混频器	20
第 2 章 双极型晶体管	22
2.1 双极型晶体管的特性	22
2.1.1 特性曲线	23
2.1.2 用公式法描述	23
2.1.3 电流增益特性	24
2.1.4 工作点和小信号响应	26
2.1.5 极限参数和反向电流	30
2.1.6 热性能	32
2.1.7 晶体管参数的温度敏感性	34
2.2 双极型晶体管的设计	36
2.2.1 分立晶体管	36
2.2.2 集成晶体管	37
2.3 双极型晶体管的模型	38
2.3.1 静态特性	38
2.3.2 动态特性	44

2.3.3	小信号模型	49
2.3.4	噪声	55
2.4	基本电路	63
2.4.1	共发射极电路	64
2.4.2	共集电极电路	88
2.4.3	共基极电路	99
2.4.4	达林顿电路	107
第3章	场效应晶体管	112
3.1	场效应管特性	114
3.1.1	特性曲线	114
3.1.2	用方程描述	116
3.1.3	场效应管作为可调电阻	118
3.1.4	工作点和小信号特性	119
3.1.5	最大额定值和漏电流	123
3.1.6	热性能	125
3.1.7	FET 参数的温度敏感性	125
3.2	场效应管结构	127
3.2.1	集成 MOSFET	127
3.2.2	分立 MOSFET	129
3.2.3	结型 FET	130
3.2.4	封装	131
3.3	场效应管模型	131
3.3.1	静态特性	131
3.3.2	动态特性	137
3.3.3	小信号模型	143
3.3.4	噪声	148
3.4	基本电路	152
3.4.1	共源极电路	153
3.4.2	共漏极电路	168
3.4.3	共栅极电路	175
第4章	放大器	180
4.1	电路	181
4.1.1	电流源和镜像电流源	186
4.1.2	cascode 电路	214
4.1.3	差分放大器	226
4.1.4	阻抗变换器	269
4.1.5	工作点设置电路	276
4.2	性能和参数	286
4.2.1	特性曲线	286
4.2.2	小信号特性	288
4.2.3	非线性参数	298
4.2.4	噪声	310

第 5 章 运算放大器	338
5.1 概述	338
5.1.1 运算放大器的类型	339
5.1.2 负反馈原理	341
5.2 标准运算放大器(VV-OPA)	344
5.2.1 原理	345
5.2.2 多用途放大器	346
5.2.3 工作电压	348
5.2.4 单电源放大器	349
5.2.5 轨到轨放大器	351
5.2.6 宽带运算放大器	353
5.2.7 频率矫正	357
5.2.8 运算放大器的参数	367
5.3 互导放大器(VC-OPA)	380
5.3.1 内部结构	381
5.3.2 典型应用	383
5.4 互阻放大器(CV-OPA)	384
5.4.1 内部设计	384
5.4.2 频率响应	386
5.4.3 典型应用	389
5.5 电流放大器(CC-OPA)	390
5.5.1 内部设计	390
5.5.2 典型应用	391
5.6 比较	398
5.6.1 实际安装使用	402
5.6.2 不同类型的运算放大器	404
本书的主要符号	413
参考文献	415

第1章 二极管

二极管是一种具有两个电极的半导体元件,这两个电极分别称为阳极(A)和阴极(K)。分立二极管与集成二极管是有区别的,前者用于安装在印制电路板上并保持独立状态,而集成二极管则与其他半导体元件制作在同一半导体基片上,且有第三个来自于公共基片上的电极,称为衬底(S)。衬底对于电功能来说不是很重要。

结构:二极管由pn结或金属-n结组成,它们分别称为pn结型二极管或肖特基二极管。图1.1为二极管的图形符号和结构示意图。在pn结二极管中,p区和n区通常由硅材料组成。由于锗材料二极管有较低的正向电压,所以某些类型的分立二极管仍采用锗材料,但现已被视为淘汰产品。在肖特基二极管中,p区被金属区域取代。由于肖特基二极管也有较低的正向电压,所以可用来替代锗pn结型二极管。

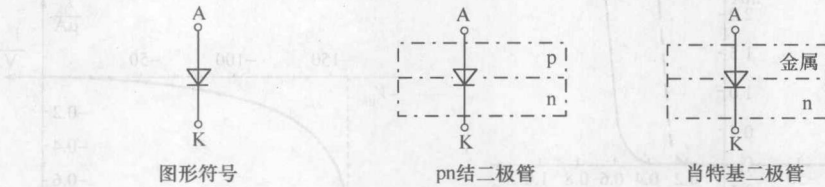


图 1.1 图形符号和二极管结构示意图

实际工作中,二极管一词通常指硅pn结型二极管,所有其他类型的二极管由补充说明加以区别。因为所有类型的二极管(除了某些特殊二极管外)使用相同的图形符号,所以只能借助于印制在元件上的型号或数据手册中的说明来识别不同类型的分立二极管。

工作模式:二极管可以工作在正向模式、反向模式或击穿模式。接下来一节将按照模式详细讨论其工作范围。

主要用于交流电压整流的二极管称为整流二极管,它们交替工作于正向区和反向区。为工作在击穿区而设计的二极管称为齐纳二极管,主要用来稳定电压。变容二极管是另一种重要类型的二极管。由于它们工作在反向区,其结电容对电压变化有特别强烈的响应,所以常用于谐振电路中调谐频率。此外还有不少特殊二极管,不再一一详述。

1.1 二极管特性

可以用特性曲线十分清晰地描述二极管的特性。在二极管所有参数处于静态,即非时变或变化非常缓慢的情况下,特性曲线反映了流过二极管的电流与二极管两端电压间的关系。另外,十分精确地描述二极管特性的方程可用于数学计算,多数情况下也可以使用简化的方程。此外,当二极管由正弦或脉冲信号驱动时,还有可正确反映其动态特性的模型。该模型将在1.3节中介绍,然而这部分内容对学习基础知识来说并非十分重要。本节接下来的内容将主要介绍硅pn结二极管。

1.1.1 特性曲线

当硅pn结二极管连接到电压 $V_D = V_{AK}$ 时,测量二极管中由A流向K的电流 I_D ,所得特性曲线如图1.2所示。需要注意,为了更清晰明确地表达,图中正电压区域是被显著放大显示的。当电压 $V_D > 0V$ 时,二极管工作在正向模式,即处于导通状态。在这一区域内,电流随电压的增加呈指

数规律上升, $V_D > 0.4V$ 时已有较大的电流。如果电压满足 $-V_{BR} < V_D < 0V$, 则二极管处于反向偏置状态, 只有非常小的反向电流, 可忽略不计。这个区域称为反向区。击穿电压 V_{BR} 取决于不同的二极管, 对于整流二极管, $V_{BR} = 50 \sim 1000V$ 。如果 $V_D < -V_{BR}$, 二极管被击穿, 电流再次增大(反向)。只有齐纳二极管是固定工作在击穿区的, 对其他所有二极管而言, 在施加反向电压时都不希望有电流流过。在正向区, 只要 $V_D > 0.2V$, 锗和肖特基二极管便出现相当大的电流, 而它们的击穿电压 V_{BR} 的范围是 $10 \sim 200V$ 。

在正向区, 由于特性曲线快速上升, 电流在一定范围内变化而电压几乎保持不变。该电压称为正向电压 V_F 。对于锗和肖特基两种二极管有 $V_{F,Ge} \approx V_{F,Schottky} \approx 0.3 \sim 0.4V$; 对于硅 pn 结二极管, $V_{F,Si} \approx 0.6 \sim 0.7V$ 。在功率二极管中, 随着电流达到安培量级, 电压可能会显著升高, 这是因为除了内部正向电压外, 相当大的电压会降落在二极管的分布电阻和连接电阻上: $V_F = V_{F,i} + I_D R_B$ 。在 $I_D \rightarrow \infty$ 的临界条件下, 二极管的作用就像一个阻值极低的电阻, 即 $R_B \approx 0.01 \sim 10\Omega$ 。

图 1.3 所示为放大了纵向电流轴后的反向区。当反向电压 $V_R = -V_D$ 较低时, 反向电流 $I_R = -I_D$ 非常小; 当电压接近击穿电压时, 反向电流缓慢增加; 然而当开始击穿时, 电流突然急速增大。

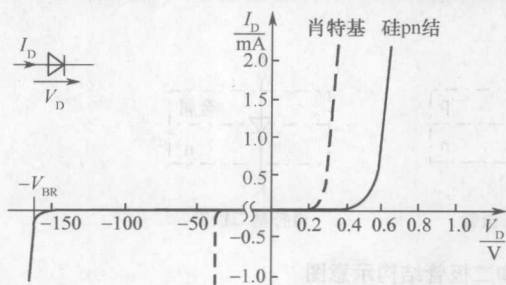


图 1.2 小信号二极管电流—电压特性曲线

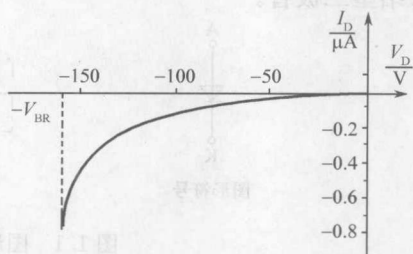


图 1.3 反向区小信号二极管特性曲线

1.1.2 方程描述

在 $V_D > 0$ 的区域以半对数坐标形式绘出的特性曲线近似于一条直线(见图 1.4), 这意味着在 $I_D \sim V_D$ 的关系中, I_D 与 V_D 之间具有指数关系。由半导体物理基础可导出

$$I_D(V_D) = I_S(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \quad \text{当 } V_D \geq 0 \text{ 时}$$

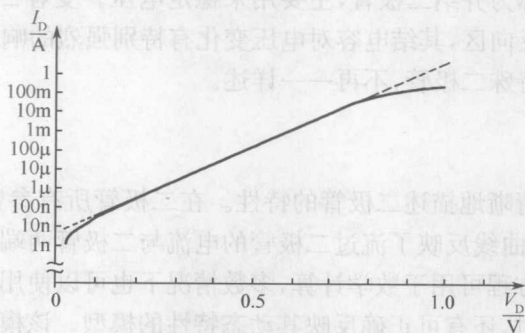


图 1.4 $V_D > 0$ 时特性曲线的半对数坐标表示

为了正确描述一个实际的二极管, 需要一个校正因子, 它使得以半对数坐标表示的直线斜率符合实际二极管特性^[1.1]:

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1) \quad (1.1)$$

式中, $I_S \approx 10^{-12} \sim 10^{-6} \text{ A}$ 为反向饱和电流; $n \approx 1 \sim 2$ 为发射系数; $V_T = kT/q \approx 26 \text{ mV}$ 是室温下的温度电压。

尽管式(1.1)实际上仅用于 $V_D \geq 0$ 的情况,但有时也用于 $V_D < 0$ 时。对于 $V_D \ll -nV_T$, 式(1.1)的结果为恒定电流 $I_D = -I_S$,它通常远小于实际的电流。因此,仅在反向区流过小的负电流的定性描述时它是正确的。只有借助另外的方程(见 1.3 节)才能描述图 1.3 所示曲线的形状。

在正向区,当 $V_D \gg nV_T \approx 26 \sim 52 \text{ mV}$ 时,可使用近似的表达式:

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad (1.2)$$

则电压为

$$V_D = nV_T \ln \frac{I_D}{I_S} = nV_T \ln 10 \times \lg \frac{I_D}{I_S} \approx 60 \sim 120 \text{ mV} \times \lg \frac{I_D}{I_S}$$

即当电流增加到 10 倍时,电压增加 $60 \sim 120 \text{ mV}$ 。随着电流的增大,必须考虑分布电阻 R_B 上的压降 $I_D R_B$ 。除了 pn 结上的压降外,该电阻将产生附加电压:

$$V_D = nV_T \ln \frac{I_D}{I_S} + I_D R_B$$

这种情况下,不能用公式 $I_D = I_D(V_D)$ 来描述它们的关系。

为了简化计算,二极管可视为一个开关,在反向区是断开的,在正向区则是闭合的。假设在正向区电压近似为常数,在反向区没有电流流过,则二极管可用一个理想的压控开关和具有正向电压 V_F 的电压源代替[见图 1.5(a)]。图 1.5(b)是这个等效电路的特性曲线,它由两条直线组成:

$I_D = 0$ 当 $V_D < V_F$ 时 → 开关断开(在图中的 a 位)

$V_D = V_F$ 当 $I_D > 0$ 时 → 开关闭合(在图中的 b 位)

当考虑附加的分布电阻 R_B 时,有

$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{当 } V_D < V_F \text{ 时} \\ \frac{V_D - V_F}{R_B} & \text{当 } V_D \geq V_F \text{ 时} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \text{开关断开(在图中的 a 位)} \\ \text{开关闭合(在图中的 b 位)} \end{cases}$$

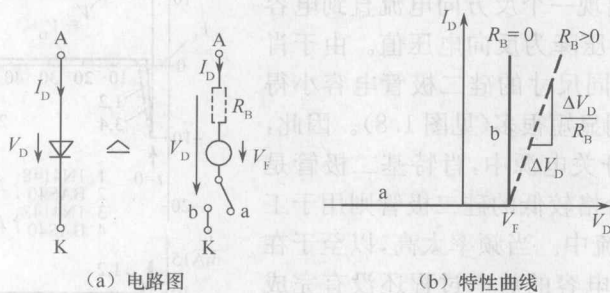


图 1.5 二极管简单等效电路图(虚线表示考虑分布电阻)

对于硅 pn 结二极管, $V_F \approx 0.6 \text{ V}$; 对于肖特基二极管, $V_F \approx 0.3 \text{ V}$ 。考虑分布电阻后所对应的电路图和特性曲线如图 1.5 中虚线所示。必须通过开关断开和闭合的计算来区分两种变化的不同情况,以确定不出现相互矛盾的现象。等效为开关的优点是任何一种情况都是线性方程,便于求解。相反,当根据式(1.1)使用 e 函数时,需要面对一个隐含的非线性方程,只能数值求解。

例:一个二极管接于电桥中的电路如图 1.6 所示。为了计算电压 V_1 和 V_2 ,以及二极管电压 $V_D = V_1 - V_2$,首先假设二极管处于反向状态,即 $V_D < V_F = 0.6 \text{ V}$,等效电路中的开关断开。此时, V_1 和 V_2 可由电压分压公式求得:

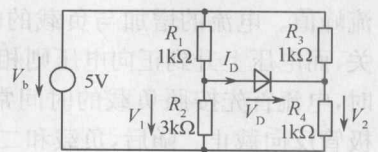


图 1.6 使用图 1.5 等效电路的范例

$$V_1 = V_b R_2 / (R_1 + R_2) = 3.75V$$

$$V_2 = V_b R_4 / (R_3 + R_4) = 2.5V$$

结果 $V_D = 1.25V$, 这与假设不符。因此, 二极管是导通的, 等效电路中的开关闭合, 此时有 $V_D = V_F = 0.6V$, 且 $I_D > 0$ 。根据结点方程

$$\frac{V_1}{R_2} + I_D = \frac{V_b - V_1}{R_1}, \quad \frac{V_2}{R_4} = I_D + \frac{V_b - V_2}{R_3}$$

通过两方程叠加, 并代入 $V_1 = V_2 + V_F$, 可以消去未知量 I_D 和 V_1 , 得

$$V_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = V_b \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) - V_F \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

代入结点方程可解得

$$V_2 = 2.76V, \quad V_1 = V_2 + V_F = 3.36V, \quad I_D = 0.52mA$$

满足导通条件 $I_D > 0$, 没有矛盾, 结果即为所求。

1.1.3 开关特性

在许多应用中(例如交流整流时), 二极管交替工作于正向模式和反向模式。因为二极管寄生电容在正向状态存储电荷, 在反向状态释放电荷, 所以二极管状态转换过程不遵循静态特性曲线。图 1.7 所示为确定开关特性的电路, 分别为仅带电阻负载 ($L=0$) 或电阻—电感负载共存 ($L>0$) 情况。输入方波时产生的跳变如图 1.8 所示。

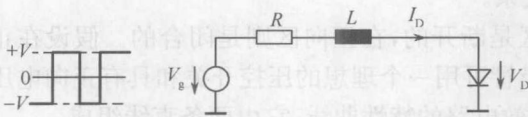


图 1.7 确定开关特性的电路

电阻负载时的开关特性: 仅带电阻(欧姆)负载 ($L=0$) 的电路工作时, 会出现由二极管电容充电引起的峰值电流。在峰值电流期间, 电压从之前的反向电压上升为正向电压 V_F , 从而结束开关接通过程。在 pin 二极管^①中, 由于开关导通初始有较大的分布电阻 R_B , 较大的电流会引起电压过冲[见图 1.9(b)], 随后, 电压随 R_B 的减小下降为静态值。当开关断开时, 会出现一个反方向电流直到电容放电结束, 电流回零, 电压降为反向电压值。由于肖特基二极管的电容比相同尺寸的硅二极管电容小得多, 所以它的关断时间明显短很多(见图 1.8)。因此, 在高速率 ($f > 20kHz$) 开关电源中, 肖特基二极管是首选的整流二极管, 而价格较低的硅二极管则用于工频 ($f = 50Hz$) 电压的整流中。当频率太高, 以至于在下一个导通状态开始前电容的放电过程还没有完成时, 不再起整流作用。

电阻—电感负载时的开关特性: 带电阻—电感负载 ($L > 0$) 时, 由于电流的增加受到电感的限制, 二极管转换到导通状态需要更长的时间, 而且不会出现电流峰值。电流的增加与负载的时间常数 $T = L/R$ 有关, 而电压上升到正向电压则相对较快。在开关关断时, 电流首先按照负载的时间常数规律减小, 直到二极管反向截止。随后, 负载和二极管电容形成一个串

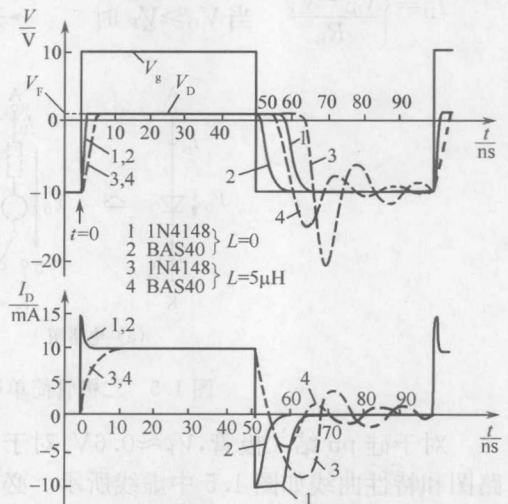


图 1.8 图 1.7 所示测试电路中硅二极管 1N4148 和肖特基二极管 BAS40 的开关特性 (测试条件: $V = 10V$, $f = 10MHz$, $R = 1k\Omega$, $L = 0$ 或 $L = 5\mu H$)

① pin 二极管在 p 型和 n 型层之间有一层本征或低掺杂浓度半导体, 以便达到更高的击穿电压。

联谐振电路,电流和电压出现阻尼振荡,如图 1.8 所示。此时可能会出现比静态反向电压高得多的反向电压,因此要求二极管有较高的击穿电压。

图 1.9 显示了二极管反向恢复(RR)和正向恢复(FR)的典型参数。反向恢复时间 t_{RR} 是从电流过零时刻到反向电流降为其最大值 I_R 的 10%^① 时所需的时间。其典型值从 $t_{RR} < 100\text{ps}$ (快速肖特基二极管) 到 $t_{RR} = 1 \sim 20\text{ns}$ (小信号硅二极管) 或 $t_{RR} > 1\mu\text{s}$ (整流二极管)。反向恢复电荷 Q_{RR} 是电容放电期间传输的电荷,对应于 x 轴下方的面积[见图 1.9(a)]。两个参数取决于先前流过的正向电流 I_F 和截止的速度,因此,数据手册要么给出测试条件信息,要么给出测试电路。参考文献 [1.2] 提供了 $Q_{RR} \sim I_F$ 和 $Q_{RR} \sim |I_R| t_{RR}$ 的近似关系,意味着反向恢复时间与正向电流和反向电流之比成比例: $t_{RR} \sim I_F / |I_R|$ 。然而这个近似只能用于 $|I_R| < 3 \sim 5 \times I_F$ 的情况,换句话说, t_{RR} 不能无限制地减少。在具有高击穿电压特性的 pin 二极管中,如果在载流子移出低掺杂浓度的 i 层之前,二极管反向电压急剧增加,那么较高的关断速度甚至会导致在远低于静态击穿电压 V_{BR} 时发生击穿现象。当二极管转换到正向状态时,也会出现正向恢复电压 V_{FR} ,这也取决于实际的开关条件^[1.3]。数据手册提供了 V_{FR} 的最大值,通常 $V_{FR} = 1 \sim 2.5\text{V}$ 。

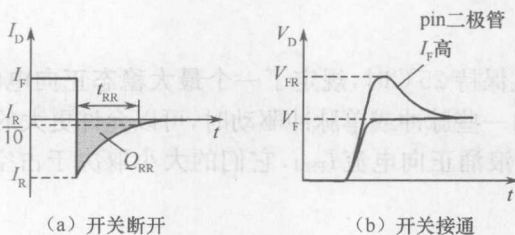


图 1.9 开关特性说明

1.1.4 小信号响应

用 $V_{D,A}$ 和 $I_{D,A}$ 表示工作点,在其附近变化的小信号控制二极管的特性,称为小信号响应。在这种情况下,式(1.1)给出的非线性特性可以用过工作点的切线代替,小信号参数为

$$i_D = I_D - I_{D,A}, \quad v_D = V_D - V_{D,A}$$

它们有如下关系:

$$i_D = \left. \frac{dI_D}{dV_D} \right|_A v_D = \frac{1}{r_D} v_D$$

由此,求得二极管的微变电阻 r_D 为

$$r_D = \left. \frac{dV_D}{dI_D} \right|_A = \frac{nV_T}{I_{D,A} + I_S} \stackrel{I_{D,A} \gg I_S}{\approx} \frac{nV_T}{I_{D,A}} \quad (1.3)$$

于是,二极管小信号等效电路由一个阻值为 r_D 的电阻构成。大电流情况下 r_D 变得非常小,必须引入一个额外的分布电阻(见图 1.10)。

图 1.10 中所示的等效电路仅适用于计算低频($0 \sim 10\text{kHz}$)小信号响应,所以称为直流小信号等效电路。对于更高的频率,必须使用 1.3.3 小节给出的交流小信号等效电路。

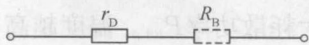


图 1.10 二极管小信号等效电路

① 整流二极管的测量有时是在 25% 处。

1.1.5 极限值和反向电流

二极管数据手册会给出一些绝对不能超出的极限值,包括极限电压、极限电流,以及最大耗散功率。极限数据一般以正值表示,相应地,反偏工作时的电流和电压参考箭头方向均需反转,相关值加下角标 R(reverse)表示,而正向偏置时则加下角标 F(forward)表示。

极限电压

反向电压达到击穿电压 $V_{(BR)}$ 或 V_{BR} 时,会使二极管击穿,反向电流急剧上升。由于接近击穿电压时电流已经显著增加(如图 1.3 所示),因此规定一个最大反向电压 $V_{R,max}$,定义为使反向电流仍然低于 μA 范围内的一个限定值。当由序列脉冲或单脉冲驱动二极管时,可以允许更高的反向电压,它们分别称为重复峰值反向电压 V_{RRM} 和峰值浪涌反向电压 V_{RSM} ,这些值是在二极管尚未损坏的情况下选取的。若二极管用于工频电压整流,脉冲频率则为 $f=50Hz$ 。因为参考箭头方向都是反转的,所以,所有电压都是正值并有以下关系:

$$V_{R,max} < V_{RRM} < V_{RSM} < V_{(BR)}$$

极限电流

二极管处于正向偏置且保持 $25^{\circ}C$ 时,规定了一个最大稳态正向电流 $I_{F,max}$ 。温度越高,允许的稳态电流越小。当二极管由一些脉冲或单脉冲驱动时,可以允许更大的正向电流,它们分别称为重复峰值正向电流 I_{FRM} 和峰值浪涌正向电流 I_{FSM} ,它们的大小取决于占空比或脉冲持续时间。这些电流的关系是

$$I_{F,max} < I_{FRM} < I_{FSM}$$

对于持续时间非常短的单脉冲, $I_{FSM} \approx 4 \sim 20 \times I_{F,max}$ 。因为整流二极管工作时电流是脉动的周期电流,所以电流 I_{FRM} 对整流二极管来说特别重要。 I_{FRM} 必须大于平均整流电流。

对击穿区定义了一个最大电流—时间面积 I^2t ,超过该值可能发生脉冲引起的击穿:

$$I^2t = \int I_R^2 dt$$

尽管其单位是 A^2s ,但经常称为最大脉冲能量。

反向电流

反向电流 I_R 是在反向电压低于击穿电压时测量的。它在很大程度上取决于二极管的反向电压和温度。在室温下,小信号硅二极管的反向电流 $I_R=0.01 \sim 1\mu A$;小信号肖特基二极管和安培量级的硅整流二极管的反向电流均为 $I_R=1 \sim 10\mu A$;肖特基整流二极管的反向电流 $I_R > 10\mu A$ 。当温度为 $T=150^{\circ}C$ 时,这些值将增加到 $20 \sim 200$ 倍。

最大耗散功率

二极管的功耗是转换为热能的功率:

$$P_V = V_D I_D$$

在大电流下,该功率消耗在结或分布电阻 R_B 上。二极管的温度上升到某一值时,由于温度梯度的原因,来自结上的热量可通过外壳消散到环境中。在 2.1.6 小节详细描述了双极型三极管的耗散功率,将二极管的耗散功率替代所述的 P_V ,同样的结论也可以用于二极管。数据手册规定了二极管外壳温度保持在 $T=25^{\circ}C$ 时的最大耗散功率 P_{tot} 。温度越高, P_{tot} 越小。

1.1.6 热性能

元件的热性能将在 2.1.6 小节双极型三极管的热性能中描述。当 P_V 用二极管的耗散功率代替时,所描述的参数和条件也适用于二极管。