



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

模拟电子技术基础 学习指导

耿苏燕 主编



高等教育出版社

TN710
150

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

模拟电子技术基础 学习指导

耿苏燕 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是与胡宴如、耿苏燕主编的《模拟电子技术基础》配套的学习指导书,但它自成完整的体系,因此可独立使用。它适合普通高等教育电气信息、电子信息和仪器仪表类专业学生学习辅导用,也可作为教师教学参考。

本书依据教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的高等学校“模拟电子技术基础课程教学基本要求”,针对应用型本科教学的规律和特点编写而成。采用了与教学进程同步辅导的新颖结构体系,从基本要求与学习指导、内容提要、讨论题分析、典型题分析、参考试卷与评分标准等角度进行辅导。旨在帮助读者能较容易、更好地把握并掌握《模拟电子技术基础》的重点内容;快速掌握该课程的学习方法与规律;辩正容易出错、容易误解的问题;熟悉常见题型,提高解题能力和知识应用能力,并把握考点。

图书在版编目 (CIP) 数据

《模拟电子技术基础》学习指导 / 耿苏燕主编. —北京:
高等教育出版社, 2006. 7

ISBN 7 - 04 - 019176 - 8

I. 模... II. 耿... III. 模拟电路 - 电子技术 - 高等
学校 - 教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 060457 号

策划编辑 韩 颖 责任编辑 许怀谔 封面设计 于文燕
责任绘图 朱 静 版式设计 张 岚 责任校对 王效珍
责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 天津新华二印刷有限公司

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 20.25
字 数 380 000

版 次 2006 年 7 月第 1 版
印 次 2006 年 7 月第 1 次印刷
定 价 25.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19176 - 00

前 言

本书是“模拟电子技术基础”课程的辅导教材，它与高等教育出版社出版的胡宴如、耿苏燕主编的《模拟电子技术基础》教材配套，但其内容自成完整的体系，可不依赖于教材，因此可以独立使用。本书依据教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的高等学校“模拟电子技术基础课程教学基本要求”，在研究应用型本科人才认知规律、特点的基础上编写而成，因此尤其适合应用型本科院校电气信息、电子信息和仪器仪表类等专业的学生学习辅导和复习应考之用，也可作为教师的教学参考。

本书编写目的是帮助读者较容易、更好地把握并掌握《模拟电子技术基础》的重点内容；快速掌握该课程的学习方法与规律；辩正容易出错、容易误解的问题；熟悉常见题型，提高解题能力和知识应用能力，并把握考点。主要编写思路和特点如下：

(1) 采用便于实现与教学进程同步辅导的新颖结构体系。为使初学者在课后能方便地找到相关内容进行复习和练习，本书采用以节为一个辅导单元的结构，且全书章节的名称、顺序均与教材中相对应；各节均从基本要求与学习指导、内容提要、讨论题分析、典型题分析等四个方面给予辅导。最后在附录中提供了四套面向应用型本科生的参考试卷(答卷时间约为 120 分钟)，并给出答案和评分标准，可帮助读者一方面检测自己对该课程的掌握程度，另一方面把握考点和答题技巧，提高应试能力。

(2) 根据多年的“模拟电子技术基础”一线教学体会，提供较全面的学习辅导方案。在“基本要求与学习指导”中，简要说明对本节内容的要求及掌握程度，指出重点和难点，对知识背景、学习方法、注意事项、知识应用能力的要求等给出提示或建议。在“内容提要”中，力求用精练的语言对最基本、最重要的内容进行归纳、总结或综合，其内容并不是该节知识的简单浓缩，而是站在已学过该节内容的层面上，从揭示基本内容的主线、突出重点、突出知识的应用、突出注意事项、强调知识的融会贯通等角度进行复习，并经常采用列表等方式对相关知识点进行比较或强调。在“讨论题分析”中，对重点、难点、易错点、易误解点展开讨论，并适量补充扩展性知识。所补充的知识通常是教材中基于精练、满足基本要求的编写原则而未选入的，但对学习要求较高的读者，例如考研研究生的读者等来说，是比较重要的内容。在“典型题分析”中，力求覆盖常见题型与考点，其中有基本题，也有较难题和综

合题，必要时对解题的方法、注意事项，以及对结论的理解与应用等给予提示。打“*”标志的，表示加深加宽的内容。

本书由耿苏燕主编，负责全书的规划与统稿。第7、8章和附录A、B由周正编写，第1、9章由宋宇飞编写，其余由耿苏燕编写。黄锡康、倪晓筠为绘图、收集资料等做了大量工作。

本书承蒙南京工程学院胡宴如副教授仔细审阅，提出了许多宝贵意见。编写过程中，也得到了南京工程学院许多老师、学生的建议与支持。在此一并致以衷心的感谢！

由于作者能力和水平所限，书中定有疏漏、欠妥之处，敬请批评指正，作者不胜感谢！

编者

2006年3月

目 录

第1章 半导体二极管及其电路分析	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 基本要求与学习指导	1
1.1.2 内容提要	1
1.1.3 讨论题分析	2
1.1.4 典型题分析	3
1.2 半导体二极管及其特性	4
1.2.1 基本要求与学习指导	4
1.2.2 内容提要	5
1.2.3 讨论题分析	6
1.2.4 典型题分析	7
1.3 二极管基本应用电路及其分析方法	9
1.3.1 基本要求与学习指导	9
1.3.2 内容提要	10
1.3.3 讨论题分析	11
1.3.4 典型题分析	12
1.4 特殊二极管	19
1.4.1 基本要求与学习指导	19
1.4.2 内容提要	20
1.4.3 讨论题分析	21
1.4.4 典型题分析	21
第2章 半导体三极管及其电路分析	26
2.1 双极型半导体三极管	26
2.1.1 基本要求与学习指导	26
2.1.2 内容提要	26
2.1.3 讨论题分析	28
2.1.4 典型题分析	32
2.2 三极管基本应用电路及其分析方法	35
2.2.1 基本要求与学习指导	35
2.2.2 内容提要	35

2.2.3 讨论题分析	36
2.2.4 典型题分析	40
2.3 单极型半导体三极管及其电路分析	48
2.3.1 基本要求与学习指导	48
2.3.2 内容提要	49
2.3.3 讨论题分析	51
2.3.4 典型题分析	54
第3章 放大电路基础	62
3.1 放大电路的基础知识	62
3.1.1 基本要求与学习指导	62
3.1.2 内容提要	62
3.1.3 讨论题分析	64
3.1.4 典型题分析	66
3.2 三种基本组态放大电路	68
3.2.1 基本要求与学习指导	68
3.2.2 内容提要	68
3.2.3 讨论题分析	70
3.2.4 典型题分析	75
3.3 差分放大电路	87
3.3.1 基本要求与学习指导	87
3.3.2 内容提要	88
3.3.3 讨论题分析	93
3.3.4 典型题分析	96
3.4 互补对称功率放大电路	105
3.4.1 基本要求与学习指导	105
3.4.2 内容提要	105
3.4.3 讨论题分析	108
3.4.4 典型题分析	110
3.5 多级放大电路	118
3.5.1 基本要求与学习指导	118
3.5.2 内容提要	119
3.5.3 讨论题分析	123
3.5.4 典型题分析	125
第4章 负反馈放大电路	135
4.1 负反馈放大电路的组成及基本类型	135

4.1.1	基本要求与学习指导	135
4.1.2	内容提要	135
4.1.3	讨论题分析	137
4.1.4	典型题分析	139
4.2	负反馈对放大电路性能的影响	145
4.2.1	基本要求与学习指导	145
4.2.2	内容提要	146
4.2.3	讨论题分析	146
4.2.4	典型题分析	147
4.3	负反馈放大电路应用中的几个问题	149
4.3.1	基本要求与学习指导	149
4.3.2	内容提要	150
4.3.3	讨论题分析	151
4.3.4	典型题分析	152
第5章	放大电路的频率响应	158
5.1	简单RC低通和高通电路的频率响应	158
5.1.1	基本要求与学习指导	158
5.1.2	内容提要	158
5.1.3	讨论题分析	160
5.1.4	典型题分析	161
5.2	三极管放大电路的频率响应	165
5.2.1	基本要求与学习指导	165
5.2.2	内容提要	166
5.2.3	讨论题分析	170
5.2.4	典型题分析	171
5.3	负反馈放大电路的自激与频率补偿	180
5.3.1	基本要求与学习指导	180
5.3.2	内容提要	180
5.3.3	讨论题分析	182
5.3.4	典型题分析	183
第6章	模拟集成放大器的线性应用	186
6.1	基本运算电路	186
6.1.1	基本要求与学习指导	186
6.1.2	内容提要	186
6.1.3	讨论题分析	188

6.1.4 典型题分析	191
6.2 集成运算放大器构成的交流放大电路	197
6.2.1 基本要求与学习指导	197
6.2.2 内容提要	198
6.2.3 讨论题分析	198
6.2.4 典型题分析	200
6.3 有源滤波电路	203
6.3.1 基本要求与学习指导	203
6.3.2 内容提要	203
6.3.3 讨论题分析	204
6.3.4 典型题分析	207
*6.4 电子系统预处理放大电路	211
6.4.1 基本要求与学习指导	211
6.4.2 内容提要	211
6.4.3 讨论题分析	212
6.4.4 典型题分析	212
*6.5 集成高速宽带放大器	218
6.5.1 基本要求与学习指导	218
6.5.2 内容提要	218
6.5.3 讨论题分析	219
6.5.4 典型题分析	220
6.6 集成功率放大器及其应用	221
6.6.1 基本要求与学习指导	221
6.6.2 内容提要	221
6.6.3 讨论题分析	222
6.6.4 典型题分析	222
第7章 集成模拟乘法器及其应用	226
7.1 集成模拟乘法器	226
7.1.1 基本要求与学习指导	226
7.1.2 内容提要	226
7.1.3 讨论题分析	228
7.1.4 典型题分析	229
*7.2 模拟乘法器调幅与解调电路	231
7.2.1 基本要求与学习指导	231
7.2.2 内容提要	231

7.2.3 讨论题分析	232
7.2.4 典型题分析	235
*7.3 模拟乘法器鉴相与鉴频电路	238
7.3.1 基本要求与学习指导	238
7.3.2 内容提要	238
7.3.3 讨论题分析	238
7.3.4 典型题分析	239
第8章 信号发生电路	240
8.1 正弦波振荡电路	240
8.1.1 基本要求与学习指导	240
8.1.2 内容提要	240
8.1.3 讨论题分析	244
8.1.4 典型题分析	245
8.2 电压比较器	253
8.2.1 基本要求与学习指导	253
8.2.2 内容提要	254
8.2.3 讨论题分析	256
8.2.4 典型题分析	256
8.3 非正弦波发生电路	260
8.3.1 基本要求与学习指导	260
8.3.2 内容提要	261
8.3.3 讨论题分析	261
8.3.4 典型题分析	265
*8.4 锁相频率合成电路	267
8.4.1 基本要求与学习指导	267
8.4.2 内容提要	267
8.4.3 讨论题分析	267
8.4.4 典型题分析	269
第9章 直流稳压电源	270
9.1 单相整流滤波电路	270
9.1.1 基本要求与学习指导	270
9.1.2 内容提要	270
9.1.3 讨论题分析	272
9.1.4 典型题分析	273
9.2 线性集成稳压器	277

9.2.1 基本要求与学习指导	277
9.2.2 内容提要	277
9.2.3 讨论题分析	279
9.2.4 典型题分析	281
9.3 开关集成稳压电源	285
9.3.1 基本要求与学习指导	285
9.3.2 内容提要	285
9.3.3 讨论题分析	286
9.3.4 典型题分析	286
附录 A 参考试卷	287
参考试卷 1	287
参考试卷 2	290
参考试卷 3	295
参考试卷 4	298
附录 B 试卷的参考答案与评分标准	304
参考文献	313

第1章 半导体二极管及其电路分析

本章内容： 半导体的基础知识；二极管的结构、伏安特性及主要参数；二极管基本应用电路及其分析方法；特殊二极管。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 基本要求与学习指导

一、基本要求

1. 了解本征半导体和杂质半导体的导电机理，理解半导体器件的性能受温度影响的原因。

2. 了解 PN 结的形成，掌握 PN 结的单向导电特性。

二、学习指导

重点：自由电子与空穴、N 型半导体与 P 型半导体、多子与少子、扩散运动与漂移运动、PN 结、PN 结的正偏与反偏、PN 结的单向导电性等概念。

提示：学习本节内容，是为后续学习半导体器件的工作原理和伏安特性打基础，因此应重视理解重要的名词术语和概念，而对半导体内部工作机理，不必过于探究。

1.1.2 内容提要

一、半导体的导电性能

能运载电荷的粒子称为载流子。在半导体中，有自由电子和空穴两种载流子参与导电，其中自由电子带负电，空穴带正电。

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体，其载流子由本征激发产生。当温度一定时，载流子浓度一定；若温度升高或受到光照，载流子的浓度将增加。常温下本征半导体中载流子浓度很低，因此导电性能很差。

掺入杂质后的半导体称为杂质半导体。按掺入杂质的不同，有 N 型半导体和 P 型半导体两种。**本征半导体掺入微量的五价元素，则形成 N 型半导体**，其中自由电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）；**本征半导体中掺入微量的三价元素，则形成 P 型半导体**，其中空穴为多子，自由

电子为少子。

杂质半导体主要靠多子导电，由于多子主要由掺杂产生，其浓度较大且基本不受温度影响，因此杂质半导体导电性能较好，是用来制造半导体器件的主要材料。少子对杂质半导体的导电性能也有影响。由于少子由本征激发产生，其数量随温度的变化而变化，因此半导体器件的性能对温度敏感。实际应用中应注意温度对半导体器件性能的影响。

二、PN 结及其单向导电性

采用一定的制造工艺，在同一块半导体基片的两边分别形成 P 型和 N 型半导体，则这两种半导体的交界面附近会形成一个很薄的空间电荷区，称之为 PN 结。这是因为在这两种半导体的交界面处存在两种载流子运动，因浓度差而产生的运动称为扩散运动，因电场作用而产生的运动称为漂移运动，这两种运动的方向正好相反，当未外加电压时，扩散运动与漂移运动最终会达到动态平衡，从而形成 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的核心。

当 PN 结未外加电压时，称 PN 结零偏，这时流过 PN 结的总电流为零。当 PN 结外加电压时，若 P 区电位高于 N 区电位，则称 PN 结正偏。反之，称 PN 结反偏。

PN 结正偏时，正向电流主要由多子的扩散运动形成，其值较大且随正偏电压的增加而迅速增大；PN 结反偏时，反向电流主要由少子的漂移运动形成，其值很小，且基本不随反偏电压而变化（因而称之为反向饱和电流）。所以 PN 结在正偏时导通，反偏时截止，称之为 PN 结的单向导电性。

PN 结的单向导电特性可用数学式表示为

$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1.1.1)$$

式中， I_s 为 PN 结的反向饱和电流； U_T 为温度电压当量，在常温 ($T = 300 \text{ K}$) 下， $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

1.1.3 讨论题分析

[1.1.1] 试比较本征半导体和杂质半导体的导电性能及应用。

解：本征半导体的载流子由本征激发产生，常温下浓度很低，因此本征半导体的导电能力很弱，且对温度、光照等非常敏感。所以本征半导体几乎没有实用价值。

杂质半导体的导电性能主要由多子决定，由于多子浓度值较大且基本不受温度影响，因此杂质半导体导电性能较好，是用来制造半导体器件的主要材料。但由于杂质半导体中的少子由本征激发产生，所以温度对杂质半导体的导电性能也有一定的影响，在实用中要加以注意。

[1.1.2] 为使 PN 结导通工作, 应如何连接电路?

解: 可将直流电压源、限流电阻、PN 结串联接成回路, 如图 1.1.1 所示。图中 P 区接电位高端, N 区接电位低端, 因此 PN 结可正偏导通; 限流电阻用于限制 PN 结电流, 以防止烧毁 PN 结。

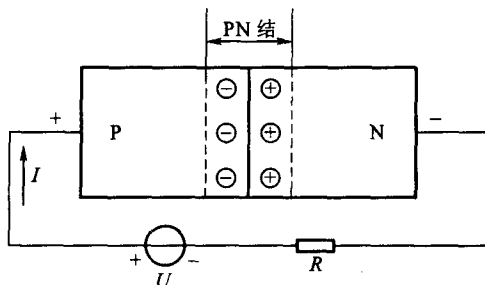


图 1.1.1 PN 结正偏

1.1.4 典型题分析

例 1.1.1 填空题

- (1) 本征半导体掺入微量的五价元素, 则形成_____型半导体, 其多数载流子为_____。
- (2) PN 结反偏是指 P 区电位_____N 区电位。
- (3) PN 结在_____时导通, _____时截止, 这种特性称为_____向导电性。

答案: (1) N 自由电子 (2) 低于 (3) 正偏 反偏 单

例 1.1.2 单选题

- (1) 半导体中参与导电的两种载流子是()和()。
- A. 价电子 B. 自由电子 C. 空穴 D. 杂质离子
- (2) 空间电荷区由()构成。
- A. 价电子 B. 自由电子 C. 空穴 D. 杂质离子

答案: (1) B C (2) D

例 1.1.3 是非题(对打√;不对打×)

- (1) 空穴是价电子挣脱共价键的束缚后留下的空位, 因此不能运动。 ()
- (2) P 型半导体中空穴为多数载流子, 自由电子为少数载流子, 故 P 型半导体带正电。 ()
- (3) 半导体器件的性能受温度影响。 ()

(4) 采用半导体工艺在 P 型半导体中掺入足够多的五价元素, 可将其改型为 N 型半导体。 ()

(5) PN 结在无光照、无外加电压时, 结电流为零。 ()

答案: (1) × (2) × (3) √ (4) √ (5) √

提示: (1) 空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补, 使空位发生转移, 这种价电子填补空位的运动可以看成空穴在运动, 但其运动方向与价电子运动方向相反, 因此, 空穴是能运动的带电粒子, 是载流子。

(2) 杂质半导体中的带电粒子, 除了空穴和自由电子以外, 还有杂质粒子, 它们的总电荷为零, 因此杂质半导体整体上呈电中性。

(3) 半导体器件主要利用杂质半导体制成, 而温度会影响杂质半导体的导电性能, 所以也会影响半导体器件的性能。

(4) 在 P 型半导体中掺入足够多的五价元素时, 可以使杂质半导体中的多子为自由电子, 少子为空穴, 这样就改型成了 N 型半导体。

(5) PN 结在无光照、无外加电压时, 漂移运动与扩散运动达到动态平衡, 两种运动所产生的电流大小相等而方向相反, 因此流过 PN 结的总电流为零。

例 1.1.4 已知锗 PN 结的反向饱和电流为 10^{-8} A。当正偏电压分别为 0.2 V、0.36 V、0.4 V 时, 求常温下流过 PN 结的电流 I , 并由计算结果说明锗 PN 结伏安特性的特点。

解: 由于 $I_s = 10^{-8}$ A, 常温下 $U_T = 26$ mV, 因此当 $U = 0.2$ V 时

$$i = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) = 10^{-8} (e^{\frac{200 \text{ mV}}{26 \text{ mV}}} - 1) \text{ A} = 21.9 \text{ } \mu\text{A}$$

同理可得 $U = 0.36$ V、0.4 V 时, $I = 10.3$ mA、48 mA。

由计算结果可见, 锗 PN 结在正偏电压大于 0.2 V 时已导通, 导通电流随着正偏电压的微小增加而迅速增大。

1.2 半导体二极管及其特性

1.2.1 基本要求与学习指导

一、基本要求

1. 了解二极管的结构、类型, 掌握二极管的符号、伏安特性和主要参数。
2. 了解温度对二极管特性的影响。

二、学习指导

重点: 1. 二极管的伏安特性。

2. 死区电压、导通电压、反向击穿电压、最大整流电流 I_F 、最高反向工作电压 U_{RM} 等概念。

提示：对学习本课程的大多数人来说，学习半导体器件的主要目的，是为了帮助理解、分析这些器件所构成的电路，在设计电路时能合理地选用器件，因此学习重点应放在理解和掌握器件的外特性上，学会如何根据伏安特性曲线来分析器件的工作特点，领悟器件外特性是如何在实用中加以应用的，在应用器件时应注意哪些问题等。对于器件的内部结构与工作原理，则不宜花费过多的精力。

1.2.2 内容提要

一、二极管的符号与伏安特性

二极管的电路符号和伏安特性曲线分别如图 1.2.1、1.2.2 所示。二极管是由一个 PN 结加电极引线及外壳封装而构成的半导体器件，因此其特性基本上就是 PN 结的特性。由伏安特性曲线可见：

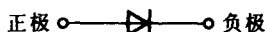


图 1.2.1 二极管的电路符号

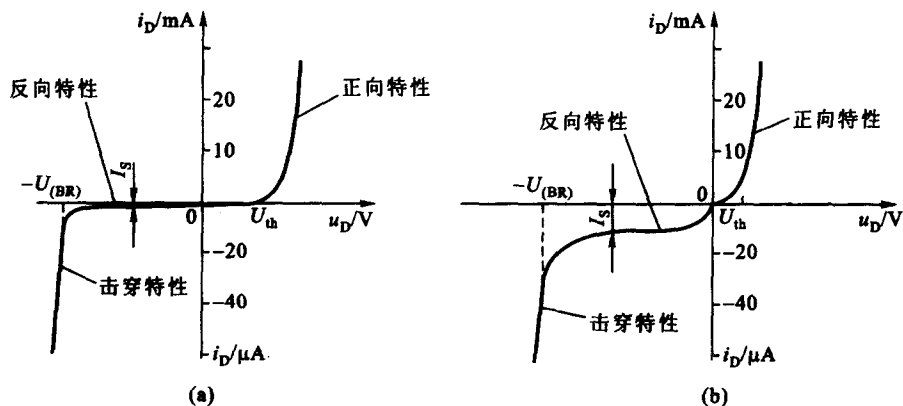


图 1.2.2 二极管的典型伏安特性曲线

(1) 二极管是非线性器件。

(2) 当正偏电压大于死区电压 U_{th} 时，二极管导通；当反偏电压低于反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 时，二极管截止，因此二极管具有单向导电性，在电路中可以用作开关，用电压来控制它导通或截止。

(3) 导通后的二极管近似地具有恒压特性，所以二极管在电路中可以用

作恒压源。其恒压值用导通电压 $U_{D(on)}$ 表示, 对硅管 $U_{D(on)} \approx 0.7 \text{ V}$, 对锗管 $U_{D(on)} \approx 0.2 \text{ V}$ 。

(4) 当二极管的反偏电压增加到一定值时, 反向电流将随反偏电压的增加而急剧增加, 这种现象称为反向击穿, 这个反偏电压称为反向击穿电压, 其值用 $U_{(BR)}$ 表示。普通二极管应避免工作到反向击穿区。

由于 PN 结中的载流子数目与温度有关, 因此温度对二极管的伏安特性有显著影响。当温度升高时, 反向电流增加, 死区电压和导通电压减小。

二、二极管的主要参数

二极管的主要参数有最大整流电流 I_F 、最高反向工作电压 U_{RM} 、最高工作频率 f_M 、反向电流 I_R 。其中 I_F 、 U_{RM} 是最常用的两个, 最大整流电流指二极管长期运行允许通过的最大正向平均电流, 最高反向工作电压指允许施加在二极管两端的最大反向电压, 其值小于反向击穿电压值, 它们是二极管的安全工作参数, 选用时要有足够的裕量。

1.2.3 讨论题分析

[1.2.1] 二极管的导通电压和死区电压有何区别?

解: 死区电压是二极管临界导通时对应的正偏电压, 通常用 U_{th} 表示, 硅管的 $U_{th} \approx 0.5 \text{ V}$, 锗管的 $U_{th} \approx 0.1 \text{ V}$ 。

导通电压是工程上所规定的一个电压, 它反映二极管明显正偏导通时的管压降。通常用 $U_{D(on)}$ 表示二极管的导通电压, 硅管 $U_{D(on)} \approx 0.7 \text{ V}$, 锗管 $U_{D(on)} \approx 0.2 \text{ V}$ 。

[1.2.2] 从图 1.2.3 可以看出温度对二极管的伏安特性有哪些影响? 在应用中如何对待温度对二极管伏安特性的影响?

解: 温度升高时, 正向特性曲线向左移, 反向特性曲线向下移。前者说明产生相同的正向电流所需的正偏电压较小, 即温度升高时, 死区电压和正向压降均减小, 管子更容易导通。后者说明温度升高, 反向电流增大。

当环境温度变化较大时, 二极管参数会有较大的变化, 往往会使电路性能变坏, 所以在应用中应设法减小温度对电路性能的影响,

在选管时要留有足够的裕量。另一方面, 温度对二极管伏安特性的影响也是可以利用的, 例如某些测温传感器, 就是利用反向饱和电流随温度升高而明

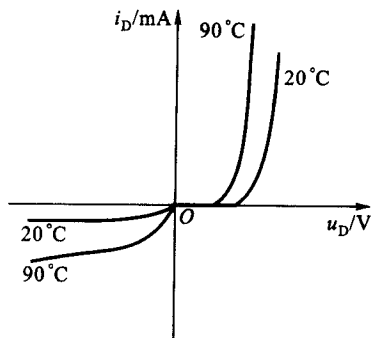


图 1.2.3 温度对二极管特性的影响