



双博士系列

高等学校教材配套辅导
通信电子类

模拟电子线路

教材辅导

主编 王显

编写 通信电子类教材辅导委员会

科学技术文献出版社

高等学校教材配套辅导(通信电子类)

模拟电子线路

教材辅导

主 编 编写人员	王 显	通信电子类教材辅导委员会									
	牟玉涛	顾 佳	李菊川	陈 楠	陈 丰	李 竞	超 亮	苗 红	彬 娟	贵 娟	清 平
	张怀甫	高永军	狄 懿	陈 伟	李 苗	李 红	亮 彬	苗 娟	贵 娟	清 平	光 进
	常慧敏	康建明	杨 斌	张士新	苗 燕	蔡 贵	娟 娟	清 平	光 进	光 进	光 进
	王振凯	李 为	张渭文	苏 峰	蔡 贵	娟 娟	清 平	光 进	光 进	光 进	光 进
	祝贺梅	谢检	胡东华	杨 峰	蔡 贵	娟 娟	清 平	光 进	光 进	光 进	光 进
	李利娟	闵 伟	高 睿	李 芹	张 帆	钟 崇	史 进	史 进	史 进	史 进	史 进
	韩 珍	周丽红	温 晴	郭 琴	郭 琴	郭 琴	郭 琴	郭 琴	郭 琴	郭 琴	郭 琴
	高 鑫	温桂荣	温桂荣	温桂荣	温桂荣	温桂荣	温桂荣	温桂荣	温桂荣	温桂荣	温桂荣

科学技术文献出版社

Scientific and Technical Documents Publishing House

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路教材辅导/王显主编. -北京:科学技术文献出版社, 2008. 11
ISBN 978-7-5023-3007-1

I. 模… II. 王… 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(2008)第 153611 号

出 版 者 科学技术文献出版社
地 址 北京市复兴路 15 号(中央电视台西侧)/100038
图书编务部电话 (010)51501739
图书发行部电话 (010)51501720, (010)51501722(传真)
邮 购 部 电 话 (010)51501729
网 址 <http://www.stdph.com>
策 划 编 辑 科 文
责 任 编 辑 丁坤善 杜 娟
责 任 校 对 唐 炜
责 任 出 版 王杰馨
发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者 北京高迪印刷有限公司
版 (印) 次 2008 年 11 月修订版 第 1 次印刷
开 本 850×1168 32 开
字 数 277 千
印 张 9.5
印 数 1~5000 册
定 价 16.00 元

© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

声明:本书封面及封底均采用双博士品牌专用图标
(见右图);该图标已由国家商标局注册登记。未经策划
人同意,禁止其他单位或个人使用。



P 前言 preface

“双博士”成就双博士!

本丛书的编写,以普通高等学校普遍采用的教材为蓝本,针对性强,信息含量高,具有很高的参考价值和实用意义,是考研专业课不可多得的工具与助手。

缺乏对专业课命题侧重点及考试要求的了解,已成为众多考生专业课考试失利的原因,进而与继续深造的机会失之交臂。因此,选取一本好的专业课辅导教材,对于有志于考研的莘莘学子来说,至关重要。本丛书涉及法学、金融、经管、通信电子、计算机、机械、控制理论与控制工程及其他热门专业。本书与市场上同类书相比,在内容编写方面更加细致详尽。在编排上分三部分:

1. **基本概念及考点精要:**对与本章相关的知识点进行课后阐述,使考生既能熟练掌握基础知识,又可把握重点、要点。

2. **典型例题、考题分析:**这一部分精选了名校最近几年历年试题作为本书的例题,并提供详细的解析过程,强调解题思路,还附有知识点小结。本部分内容既可使考生把握命题原则,又可熟悉题目类型,触类旁通。

3. **自测题及模拟训练题:**该部分为考生自行练习而提供,备有详细的解答过程。便于考生及时总结,查缺补漏。

本书附录为模拟试题,这些模拟试卷也是名校近几年的考试真题,并配有详细解析,具有非常典型的意义。

综合起来,本书凸显以下特色:

1. **专题化的编写体例:**面对普通高等学校专业课教材的泛泛的讲解,本书从更深的层次,对常考的知识点加重了讲解的力度,并与最新考

试动态同步,及时补充了最新的考试内容。

2. **极富针对性的题型训练:**在每章或每部分的典型例题、模拟试题中,均编排名校近几年的考研真题,并附有详细的参考答案,实战性极强。

3. **反映各名校最新考试信息:**每章后所附的自测题及全书最后所附的全真模拟试卷,均选自各高校近几年考研真题,具有很高参考价值。

策划本丛书的指导精神是既方便于在校本科生同步学习时参考,更适合于准备参加硕士研究生入学考试的学生作为专业课辅导用书使用。

温馨提示:

✱“双博士品牌图书”是全国最大的大学教辅图书和考研图书品牌,全国有三分之一的大学生和考研学生正在使用“双博士品牌图书”。

✱来自北京大学研究生会的感谢信摘要:双博士,您好!……,首先感谢您对北京大学的热情支持和无私帮助!双博士作为大学教学辅导和考研领域全国最大的图书品牌之一,不忘北大莘莘学子和传道授业的老师,其行为将永久被北大师生感怀和铭记! 北京大学研究生会

✱现在市场上有人冒用我们的书名,企图以假乱真,因此,读者在购买时,请认准双博士品牌。

编者

2008 年于北京大学

目 录

第1章 半导体二极管及其基本电路	(1)
1.1 基本概念及考点精要	(1)
1.2 典型例题、考题分析	(13)
1.3 自测题及模拟训练题	(18)
自测题参考答案	(20)
第2章 晶体三极管及其基本放大电路	(23)
2.1 基本概念及考点精要	(23)
2.2 典型例题、考题分析	(43)
2.3 自测题及模拟训练题	(67)
自测题参考答案	(77)
第3章 场效应管及其放大电路	(95)
3.1 基本概念及考点精要	(95)
3.2 典型例题、考题分析	(103)
3.3 自测题及模拟训练题	(114)
自测题参考答案	(117)
第4章 放大器的频率响应	(120)
4.1 基本概念及考点精要	(120)
4.2 典型例题、考题分析	(129)
4.3 自测题及模拟训练题	(147)
自测题参考答案	(151)
第5章 反 馈	(156)
5.1 基本概念及考点精要	(156)
5.2 典型例题、考题分析	(165)
5.3 自测题及模拟训练题	(178)
自测题参考答案	(183)

目 录

第 6 章 集成运算放大器及其线性应用 (187)

6.1 基本概念及考点精要 (187)

6.2 典型例题、考题分析 (198)

6.3 自测题及模拟训练题 (212)

自测题参考答案 (217)

第 7 章 功率放大电路及直流稳压电路 (226)

7.1 基本概念及考点精要 (226)

7.2 典型例题、考题分析 (239)

7.3 自测题及模拟训练题 (245)

自测题参考答案 (249)

第 8 章 波形发生与变换电路 (254)

8.1 基本概念及考点精要 (254)

8.2 典型例题、考题分析 (261)

8.3 自测题及模拟训练题 (271)

自测题参考答案 (275)

附录: 硕士研究生入学考试全真模拟试卷及详解

..... (278)

模拟试卷一(北京航空航天大学 2003 年攻读硕士学位研究生入学考试试题) (278)

模拟试卷二(北京航空航天大学 2004 年攻读硕士学位研究生入学考试试题) (284)

模拟试卷三(北京航空航天大学 2005 年攻读硕士学位研究生入学考试试题) (288)

模拟试卷四(北京航空航天大学 2006 年攻读硕士学位研究生入学考试试题) (291)

模拟试卷五(北京航空航天大学 2007 年攻读硕士学位研究生入学考试试题) (295)

第1章 半导体二极管及其基本电路

1.1 基本概念及考点精要

1.1.1 半导体基础及PN结的基本特性

1. 半导体基础

半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,受温度、光照和掺杂程度影响极大。半导体器件是构成电子线路的基本元件,它们所用的材料是经过特殊加工且性能可控的半导体材料。

(1) 本征半导体

本征半导体是纯净的具有晶体结构的半导体。

1) 硅(Si)和锗(Ge)。硅和锗是常用的半导体材料,均为4价元素。其能级图如图1-1(a)~(b)所示。硅和锗原子组成十分严密的共价键结构,共价键中的电子(价电子)能量小,不能参与导电。

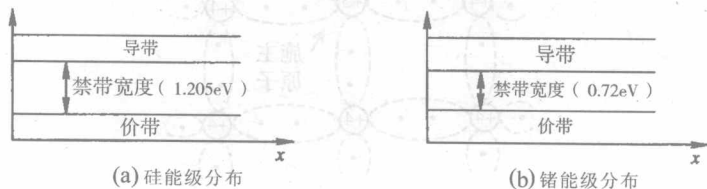


图 1-1 硅和锗能级图

2) 本征激发和复合。当本征半导体受到光照或加温,价电子得到足够的能量而摆脱共价键的束缚时,会产生电子—空穴对。从能量角度看,此过程就是价电子获得足够的能量,从“价带”跃迁到“导带”,成为可以参与导电的载流子—自由电子,而同时在价带中留下空位,形成另一种载流子—空穴的过程。这种过程称为本征激发。本征激发随温度增加而

急剧增大。由于硅原子的外层电子离原子核比锗近,受原子核束缚力强(禁带宽度 E_{G_0} 比锗宽),因此,在同样温度下,硅的本征激发比锗小,故硅的温度稳定性比锗好。

本征激发产生电子—空穴对。而相反的过程,即自由电子失去能量,回到“价带”,电子—空穴对消失,称为“复合”。在一定温度条件下,本征激发和复合达到动态平衡,此时半导体中的载流子浓度为

$$n_i = p_i = A_0 T^{3/2} e^{E_{G_0}/2kT}$$

(2) 杂质半导体

用一定的工艺,在本征半导体中掺入其他元素,就形成了杂质半导体。按掺入的杂质元素不同,可分为 N 型和 P 型两类;控制掺杂浓度,就可控制杂质半导体的导电性能。

1) N 型半导体 掺入 5 价元素(磷、锑等)杂质原子就替代了晶格中某些硅原子的位置,它的五个价电子中有四个与周围的硅原子结成共价键,多余的一个电子处在共价键外,可以被激发成自由电子。由于杂质原子可以提供电子,故称为施主。如图 1-2 所示。

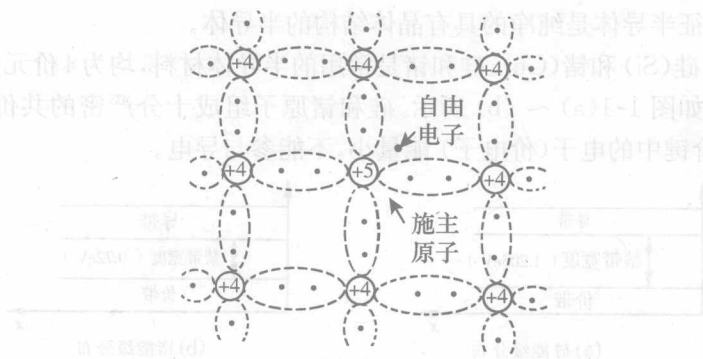


图 1-2 N 型半导体结构示意图

在常温下,施主全部电离而产生自由电子和正离子,所以在 N 型半导体中,自由电子浓度远大于空穴浓度,故称自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子,即

$$n_N \gg p_N$$

式中, n_N 为 N 型半导体中的自由电子浓度; p_N 为 N 型半导体中的空穴浓

度。但N型半导体并不带“负电”，而仍保持电中性，这是因为

式中， N_d 为正离子浓度，等于5价元素的掺杂浓度。

2) P型半导体 掺入3价元素(硼、硼等)。此时杂质原子的空位吸收电子，故称为受主原子。在常温下，受主全部电离而产生空穴和负离子，所以在P型半导体中，空穴浓度远大于自由电子浓度，故称空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子，即

$$p_p \gg n_p$$

式中， p_p 为P型半导体中的空穴浓度； n_p 为P型半导体中的自由电子浓度。这并不意味着P型半导体带“正电”，因为

$$p_p = n_p + N_A$$

式中， N_A 为负离子浓度，等于3价元素的掺杂浓度。P型半导体结构示意图，如图1-3所示。

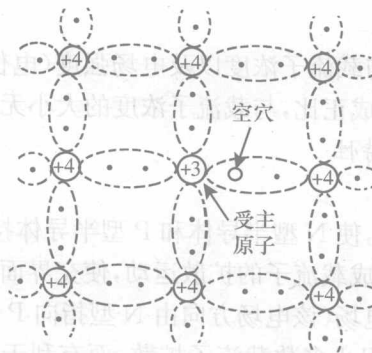


图1-3 P型半导体结构示意图

由于多数载流子主要是靠“掺杂”产生的，因而与温度关系不大，只决定于掺杂浓度。而少数载流子是由本征激发引起的，对温度十分敏感，温度每升高 10°C ，其浓度翻一翻。这是半导体器件在工作中受温度影响不稳定的主要原因。

(3) 半导体中的电流

1) 漂移电流 电场(即电位差)作用下载流子定向运动所形成的电流，即

$$i_{(\text{漂移})} = -q n_N \mu_N E + q p_N \mu_P E$$

式中, E 为电场强度(或电位梯度); μ 为迁移率(即单位电场作用下的载流子运动速度)。

由于自由电子在共价键外运动, 而空穴在共价键内运动(即价电子的反方向递补运动), 所以有

$$\mu_N \gg \mu_P$$

2) 扩散电流 浓度差作用下载流子定向运动所形成的电流, 即

$$i_{(\text{扩散})} = -q D_N \frac{dn}{dx}$$

或

$$i_{(\text{扩散})} = q D_P \frac{dp}{dx}$$

式中, D_N 为电子扩散系数; D_P 为空穴扩散系数; $\frac{dn}{dx}$ 为电子浓度梯度; $\frac{dp}{dx}$ 为空穴浓度梯度。

可见, 漂移电流与载流子浓度以及电场强度(电位梯度)成正比, 而扩散电流与浓度梯度成正比, 与载流子浓度的大小无直接关系。

2. PN 结的基本特性

(1) PN 结的形成

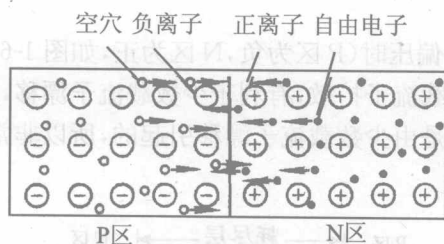
通过一定的工艺, 使 N 型半导体和 P 型半导体接触, 则会由于双边载流子浓度的差异形成载流子的扩散运动, 使交界面上各自显露出正负离子, 从而产生自建电场(该电场方向由 N 型指向 P 型) 如图 1-4 所示。自建电场的出现, 会阻止多数载流子扩散, 而有利于少数载流子向反方向漂移, 当扩散力与漂移力达到动态平衡时, 便形成了 PN 结。此时空间电荷区具有一定的宽度, 电位差为 U_{ho} , 电流为零。

PN 结又称阻挡层、空间电荷区等。PN 结内存在电场称为内建电场, PN 结外仍为电中性区。

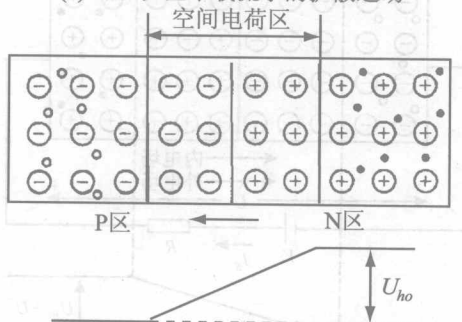
PN 结宽度与掺杂浓度有关。掺杂浓度越高, PN 结越薄, 若两边掺杂浓度不等, 则 PN 结宽度将不对称。

(2) PN 结伏安特性

1) PN 结加正偏压时(P 区为正, N 区为负, 如图 1-5 所示), PN 结变



(a) P区与N区中载流子的扩散运动



(b) 平衡状态下的PN结

图 1-4 PN 结的形成

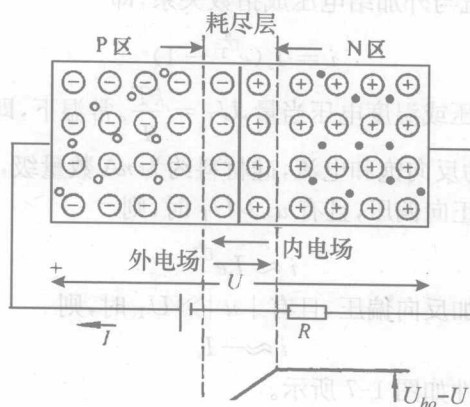


图 1-5 PN 结加正向电压时导通

薄,势垒变低,有利于多数载流子扩散,不利于少数载流子漂移,从而产

生正向电流。

2) PN 结加反偏压时(P 区为负, N 区为正, 如图 1-6 所示), 则 PN 结变厚, 不利于多数载流子扩散, 有利于少数载流子漂移, 从而产生反向电流。由于反向电流是由少数载流子漂移引起的, 所以非常小, 且对温度十分敏感。

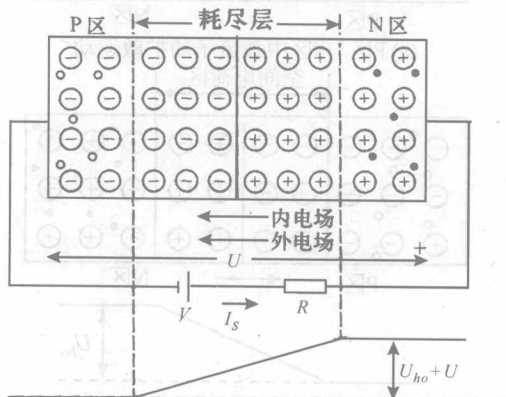


图 1-6 PN 结加反向电压时截止

3) PN 结电流与外加结电压成指数关系, 即

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

式中, U_T 为热电压或温度电压当量, $U_T = \frac{kT}{q}$ 。常温下, 即 $T = 300\text{K}$ 时, $U_T \approx 26\text{mV}$; I_s 为反向饱和电流, 硅材料约为 nA 数量级, 锗材料要大些。

当 PN 结加正向偏压, 且有 $u \gg U_T$ 时, 则

$$i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}}$$

而当 PN 结加反向偏压, 且有 $|u| \gg U_T$ 时, 则

$$i \approx -I_s$$

故 PN 结伏安特性如图 1-7 所示。

(3) PN 结的反向击穿特性

当反向偏压加得很大, 超过某一极限值 $U_{(BR)}$ 时, 反向电流突然猛增, 这种现象称为“击穿”, 如图 1-7 所示。击穿机理有两种: 雪崩击穿和

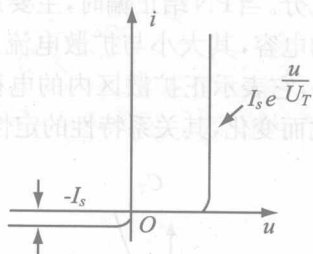


图 1-7 PN 结伏安特性

齐纳击穿。

1) 雪崩击穿 少数载流子在高反压加速下,以很大的能量与PN结共价键中的价电子发生碰撞,从而产生许多新的电子—空穴对,此种使反向电流剧增的击穿机理称为“雪崩击穿”。雪崩击穿大多发生在掺杂浓度较小,PN结较宽,反压较高的PN结中。

2) 齐纳击穿 当掺杂浓度很大,PN结较薄时,在反压不太大的情况下,空间电荷区就会产生很强的电场,将共价键中的价电子直接吸引出来而产生大量电子—空穴对,这种击穿机理为“齐纳击穿”。通常而言,齐纳击穿的击穿电压比雪崩击穿要低些。

对于硅材料PN结,反向击穿电压在7V以上为雪崩击穿;4V以下为齐纳击穿;在4—7V之间则两种情况都有。无论哪种击穿,若对电流不加限制,都可能造成PN结的永久性损坏。

(4) PN结的温度特性

1) PN结结电压为负温度系数,即温度升高时,结电压下降。

$$\frac{\Delta u}{\Delta T} = -(2.0 \sim 2.5) \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

2) 反向饱和电流 I_s 随温度升高而迅速增大。

$$I_s(T_2) = I_s(T_1) 2^{\frac{T_2 - T_1}{10}}$$

3) 雪崩击穿电压为正温度系数,即温度升高,雪崩击穿电压将增大。齐纳击穿电压为负温度系数,即温度升高,齐纳击穿电压反而减小。

(5) PN结的电容特性

PN结除呈现非线性电阻特性外,还具有非线性电容特性。有势垒电

容 C_T 和扩散电容 C_D 之分。当 PN 结正偏时, 主要是扩散电容 C_D , 它是耗尽层宽窄变化所等效的电容, 其大小与扩散电流成正比。当 PN 结反偏时, 主要是势垒电容 C_T , 它表示正扩散区内的电荷积累和释放过程。它随外加反偏电压的变化而变化, 其关系特性的定性描述如图 1-8 所示。

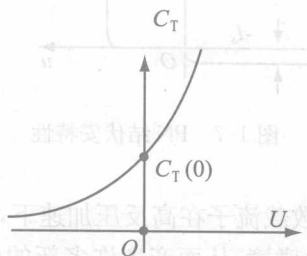


图 1-8 C_T 与 U 的关系特性

PN 结的结电容 C_j 是 C_D 与 C_T 之和, 即 $C_j = C_D + C_T$ 。

PN 结的电容特性是限制由 PN 结制造的半导体器件上限工作频率的基本因素。

1.1.2 晶体二极管

晶体二极管实质上就是一个 PN 结。PN 结的所有特性, 晶体二极管都是具备的, 再补充如下几点。

1. 死区电压 (又称为导通电压或门限电压 U_{on})

实践证明, 当正向电压大于某一死区电压 (门限电压) 时, 二极管才出现较为明显的正向电流, 对硅材料二极管, $U_{on} = 0.6 \sim 0.7V$ 左右, 而对于锗材料二极管, $U_{on} = 0.2 \sim 0.3V$ 左右, 如图 1-9 所示。

2. 直流电阻及交流电阻

1) 直流电阻 R_D

$$R_D = \frac{U_{DQ}}{I_{DQ}}$$

即曲线上某一点到原点的斜率工作点电流 I_{DQ} 越大, R_D 越小。当用指针式万用表测量二极管的直流电阻, 对于同一个二极管的直流电阻, 采用不同档 ($R \times 1, \dots, R \times 1k \dots$) 测量时, R_D 值均不同, 这说明了二极管

直流电阻的非线性特性。

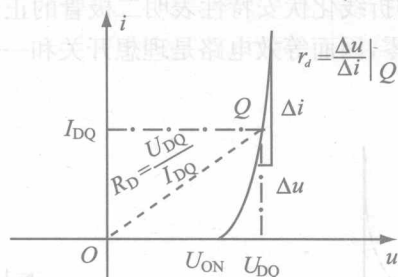


图 1-9 死区电压及二极管等效电阻的含义

2) 交流电阻 r_d

$$r_d = \left. \frac{du}{di} \right|_Q$$

即曲线上某点的斜率。

因为 $i_D = I_s e^{\frac{u_D}{U_T}}$

所以 $r_d = \frac{U_T}{I_{DQ}} = \frac{26\text{mV}}{I_{DQ}}$

I_{DQ} 越大, r_d 越小, 且有 $r_d \ll R_D$ 。

3. 二极管模型

(1) 由伏安特性折线化得到的等效电路

1) 理想开关模型

导通时(正偏), 管压降为零 ($U_D \approx 0, R_D, r_d \approx 0$), 电流 I_D 由外电路决定。断开时(反偏), $R_D, r_d \rightarrow \infty, I_D \approx 0$, 反向管压降由外电路决定, 二极管理想开关模型如图 1-10(a) 所示。

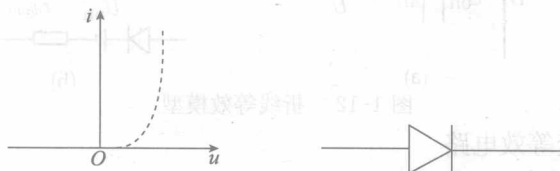


图 1-10 理想二极管模型

2) 考虑到死区电压时的开关模型

图 1-11 所示的折线化伏安特性表明二极管的正向导通压降为 U_{on} , 截止时反向电流为零, 因而等效电路是理想开关和一个直流电压源的串联。

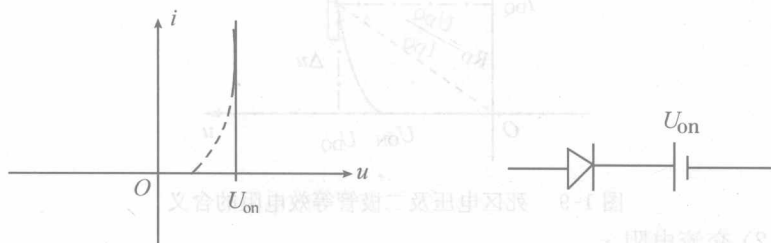


图 1-11 考虑到死区电压影响时的等效开关模型

3) 折线等效模型

为了更好的近似, 可以用折线来近似二极管的特性曲线, 见图 1-12(a) 所示。可以看出, 二极管两端的电压小于导通电压 U_{on} 时, 电流为零; 超过 U_{on} 时, 特性曲线用一条斜线来近似, 斜线的斜率为工作范围内电流, 电压的比值, 其倒数为等效的电阻 $r_{d(on)} = \Delta U / \Delta I$ 。根据折线的特性可得到如图 1-12(b) 所示的等效电路。

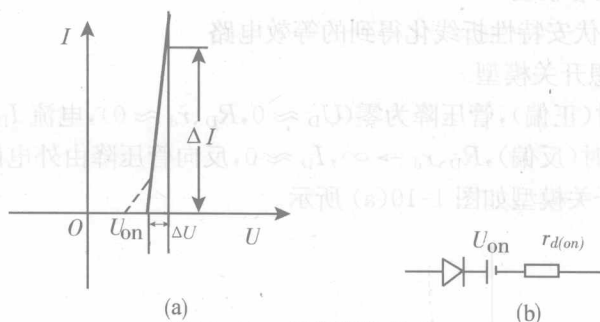


图 1-12 折线等效模型

(2) 微变等效电路

如果只考虑二极管两端的电压在某一固定值附近作微小变化时所引起的电流变化(或反之), 可以用曲线在该固定值处的切线来近似表示