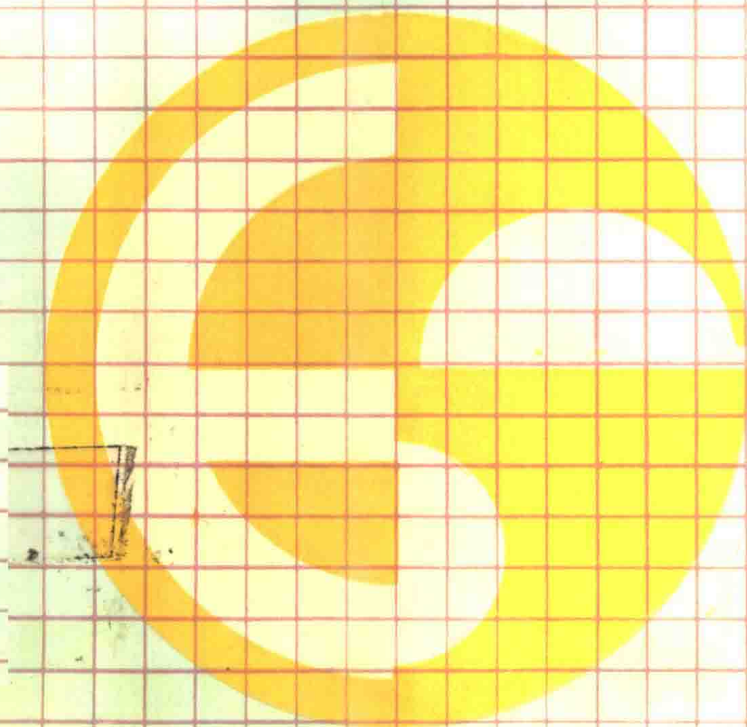


模拟电子技术

王 尧 张国华 主编



东南大学出版社

模 拟 电 子 技 术

王 尧 张 国 华 主 编

东南大学出版社

(苏) 新登字第 012 号

内 容 提 要

本书系机械工业部八五规划教材。全书分 9 章论述半导体二极管及其简单应用, 半导体三极管和基本放大电路、运算放大器初步、开环、负反馈、正反馈及其应用、功率电路、其它模拟 IC 及典型应用, 以及模拟电子综合练习等内容。

本书着力于加强基础、拓宽应用, 分立元件电路与集成电路、集成电路与典型应用及功能扩展相结合, 突出集成运放的原理与应用。可供大专院校电气、电力、自控等专业选用, 亦可供有关工程技术人员参考。

责任编辑 张 克

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210018)

江苏省新华书店经销 南京京新印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 12 字数: 310 千

1994 年 9 月第 1 版 1994 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—8000 册

ISBN 7-81023-876-0/TN·67

定价: 10.50 元

(凡因印装质量问题, 可直接向承印厂调换)

出版说明

电气技术专业是电工学科领域内强弱电相结合的一个学科型宽口径专业。自1979年创办以来,已在教育部、航空航天部、机械工业部、轻工业部、水利电力部、冶金工业部、地质矿产部、城乡建设环境保护部以及地方的几十所高等和中等院校相继成立了电气技术专业。1984年教育部批准将该专业由试办改为正式专业。1986年12月中国电工技术学会教育工作委员会组织同行专家评审通过全国电气技术教学研究会经调查研究而提出的《电气技术专业人才培养基本业务规格》,确定了该专业的主要课程。1987年成立全国电气技术专业教学指导委员会,挂靠在机械工业部。该委员会于1988年讨论通过了各课程研究组制定的主要课程和教学环节的基本要求,并据此组织编审有关教材,陆续出版,作为该专业的第一轮试用教材。

电气技术专业具有四个特性:其一是学科性,即它是面向整个电工学科而不是以某一特定的电气产品或工程对象来设置专业;其二是基础性,突出强调技术基础在人才培养过程中的重要性和技术基础课程自身学科体系的相对完整性;其三是综合性,强调学科相互交叉和相互渗透的重要性,因此提出四个结合,即强电弱电相结合,元件系统相结合,软硬件相结合和电与机相结合;其四是实践性,即在切实加强基础理论和基本技能的同时,特别强调培养综合运用这些基础和技能来分析和解决实际工程问题的能力,为此必须加强实践性的教学环节,并重视自学能力的培养。因此,本专业的课程设置、课程改革和教材编写都力求体现这四个特性。

虽然这批教材的书稿都是由具有多年教学经验的教师,经院校推荐,专业指导委员会组织,根据专业改造的基本要求重新编写并组织专家进行评审,各有关出版社为保证教材的质量也作出了很多努力。但是,限于水平和经验,并且这毕竟也还是初次改革的尝试,不足之处希望使用单位、广大师生提出批评和建议,为不断提高电气技术专业教材的质量而努力。

全国电气技术专业指导委员会

前 言

本书是全国高校电气技术专业指导委员会组织编写的统编教材之一。其目的是为了在电子技术迅速发展的形势下,结合有关院校的教学实践经验,在规定的学时内更好地贯彻“基本要求”、体现教学改革的精神。本书与李济芳、王尧主编的《数字电子技术》相配套,两书内容的参考总学时为 170~195 学时。

编写本书的具体考虑是:

1. 教材的基本内容紧扣国家教委制定的“电子技术基础课程基本要求”,对基本概念、基本原理和基本分析方法,进行由浅入深、准确透彻的阐述。

2. 在体系和内容选取上充分注意加强集成运放的原理和应用,并适当介绍了一些新型模拟集成电路及其典型应用。

3. 注意联系实际、启发思维,易于自学。

4. 适用于不同专业,可按不同学时,由教师灵活选择。

参加本书编写工作的有东南大学王尧(第 4、7、8 章)、北京航空航天大学张国华(第 3、6、9 章)、南京航空航天大学钱启森(第 5 章)和无锡轻工业学院赵曾贻(第 1、2 章)。

本书由王尧、张国华担任主编,东南大学李士雄教授担任主审。

在编写本书过程中,东南大学电气系和北京航空航天大学自动控制系的有关领导和同志曾给予热情的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者的水平,加之时间仓促,书中错误和不妥之处,在所难免,诚恳希望使用本教材的老师和广大读者批评指正。

编 者

1994 年于东南大学

目 录

1 半导体二极管及其简单应用

1.1 PN 结的形成和特性	(1)
1.2 半导体二极管及其特性参数	(6)
1.3 半导体二极管的简单应用	(12)
小 结.....	(18)
习题和思考题.....	(19)

2 半导体三极管及其放大电路

2.1 双极型晶体三极管	(21)
2.2 双极型晶体管放大电路	(29)
2.2.1 放大电路的基本组成	(29)
2.2.2 放大电路的图解分析法	(31)
2.2.3 微变等效电路法	(40)
2.2.4 电流源电路	(48)
2.2.5 三种基本放大电路的比较及其组合应用	(49)
2.2.6 差动放大电路	(56)
2.2.7 基本 OTL、OCL、BTL 电路	(67)
2.2.8 频率特性的概念	(69)
2.3 场效应管	(73)
2.4 场效应管放大电路	(83)
2.5 晶体管及其放大电路选用要点	(89)
小 结.....	(94)

习题和思考题	(95)
--------------	------

3 运算放大器初步

3.1 运算放大器简介	(105)
3.2 集成运放电路简介	(108)
3.3 集成运放的主要参数	(111)
3.4 特殊型集成运放简介	(129)

4 运算放大器的开环应用

4.1 过零检测器	(133)
4.2 电平检测器	(135)
4.3 窗口检测器	(136)
4.4 集成电压比较器 LM339 简介	(137)
4.5 应用举例	(140)
小 结	(141)
习题和思考题	(142)

5 运算放大器的负反馈应用

5.1 负反馈概念及其对放大器性能的影响	(143)
5.2 深负反馈放大器的近似估算	(170)
5.3 比例运算器	(179)
5.4 积分器与微分器	(194)
5.5 精密检波(整流)器	(204)
5.6 RC 有源滤波器	(207)
5.7 运放应用中的若干实际问题	(216)
5.7.1 运放负反馈应用时的自激振荡与消除方法	(217)
5.7.2 运放性能的扩展	(225)
5.7.3 运放的单电源运用	(228)
5.7.4 调零和保护措施	(229)

5.7.5	运放参数非理想对运算精度的影响	(233)
5.8	运放在测量技术中的应用举例	(238)
5.8.1	简单交流电压表	(239)
5.8.2	线性欧姆表	(242)
5.8.3	峰-峰值检波器	(243)
5.8.4	电压-电流变换器	(246)
5.8.5	移相器	(249)
小 结		(253)
习题和思考题		(254)
6	运算放大器的正反馈应用	
6.1	反相施密特触发器	(292)
6.2	同相施密特触发器	(298)
6.3	三角波-方波发生器	(302)
6.4	正弦波振荡器	(311)
小 结		(317)
习题和思考题		(318)
7	功率电路	
7.1	功率放大电路概述	(323)
7.2	典型集成功放电路	(325)
7.3	串联反馈型直流稳压电路	(332)
7.4	集成三端稳压器	(336)
7.5	开关调整型稳压电源	(342)
小 结		(347)
习题和思考题		(348)
8	其它模拟集成电路	
8.1	•仪表放大器及应用	(351)

8.2	锁相环电路及应用	(354)
8.3	电压/频率变换器及应用	(359)
	小 结	(366)
9	模拟电子综合练习	
9.1	分立器件电路读图	(368)
9.2	集成运放应用读图	(369)
	参考文献	(374)

1 半导体二极管及其简单应用

本章在简要介绍了半导体的导电规律之后，主要讨论 PN 结的单向导电原理以及二极管的伏安特性，并介绍二极管的型号、参数及选用的一般原则。

1.1 PN 结的形成和特性

1.1.1 本征半导体中的导电情况

自然界存在各种不同性质的物质，按导电能力的强弱可分为导体、绝缘体和半导体。半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间。目前使用最广的半导体材料是半导体晶体。纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。我们把能在导体与半导体中运载电荷的载体称为载流子。在导体中运载电荷的只是自由电子这一种载流子，在本征半导体中，不仅有电子载流子，而且还有一种称作“空穴”的载流子。

什么是空穴呢？首先让我们回忆一下价电子与共价键的概念。使用最多的半导体材料硅（Si）、锗（Ge）等都为四价元素，即原子的最外层电子数为四个，原子之间的结合是由其外层电子的联系形成的，外层电子被称为价电子。

当把硅、锗等半导体材料制成单晶体时（提纯为本征半导体），其原子排列就由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态。每个原子的最外层的四个电子，不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的四个原子发生联系——每两个原子之间形成一对共有电子。共有电子中任何一个电子，不仅绕自身原子核运动，而且也时常出现在相邻原子所属的外层轨道上，这样的结合称为

共价键结构。图 1.1a 为其平面示意图。

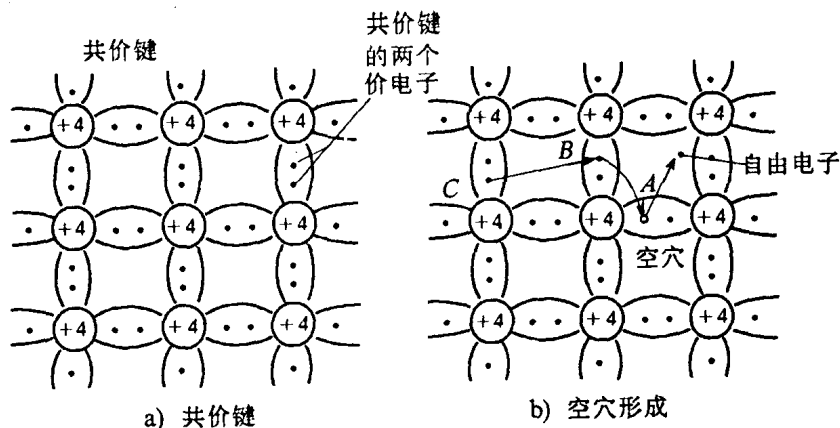


图 1.1 共价键与空穴形成

我们知道原子的最外层电子是较活跃的，它们在运动中由于温度、光照等原因会改变动能，少数共有电子会挣脱原子核的束缚而成为自由电子——电子载流子。值得注意的是，共有电子挣脱束缚成为自由电子后，共价键中同时留下了一个电子的空位子，见图 1.1b。有了这样一个空位子，附近的共有电子在运动中很容易移过来填补它，连续进行下去就形成共有电子的运动。这种运动，无论是效果上还是现象上，都好像一个带正电荷的空位子在反向移动。这种运动区别于自由电子运动，称为空穴运动，空位子称为“空穴”。

在半导体上加有电压时，通过半导体的电流是由两部分组成：一部分是自由电子定向运动形成的电子电流；另一部分是共有电子填补空穴的空穴电流。电子电流是带负电的电子的定向运动，空穴电流是带正电的空穴的定向运动。所以，半导体中，不仅有电子载流子，而且还有空穴载流子，这是半导体导电区别于导体与绝缘体的一个重要特性。

在本征半导体中，电子与空穴是成对同时产生的，常称为电子-空穴对。而在运动中，自由电子与空穴又会碰在一起重新结合而消失，称为复合。在一定的温度条件下，电子-空穴对又产生、又复合，最后处于动态平衡之中。这时的电子-空穴对便维持在一定的数目上。若把单位体积内的载流子数称为载流子浓度，则在动态平衡时，本征半导体就具有一定的载流子浓度。

1.1.2 杂质半导体中的导电情况

上面分析的纯单晶半导体中，虽然多了一种空穴载流子，但总的载流子数还很少，或者说载流子浓度较低，因而导电能力较差。为了精确而又方便地控制半导体的电学特性，可以在纯单晶半导体中掺入有用的杂质元素。例如，在硅单晶中掺入少量的三价元素硼，就可以使半导体中空穴载流子的数目剧增，导电能力也大大加强，见图 1.2a。每一个硼原子在和周围的硅原子组成共价键时，可提供提供一个空穴，而硼原子本身则成为不能自由移动的负离子，这就使此种含杂质的半导体中空穴的数目大大增加，即空穴载流子的浓度远大于电子载流子的浓度。这样，空穴称为多数载流子，电子称为少数载流子，这种杂质半导体称为空穴型半导体，简称为 P 型半导体。

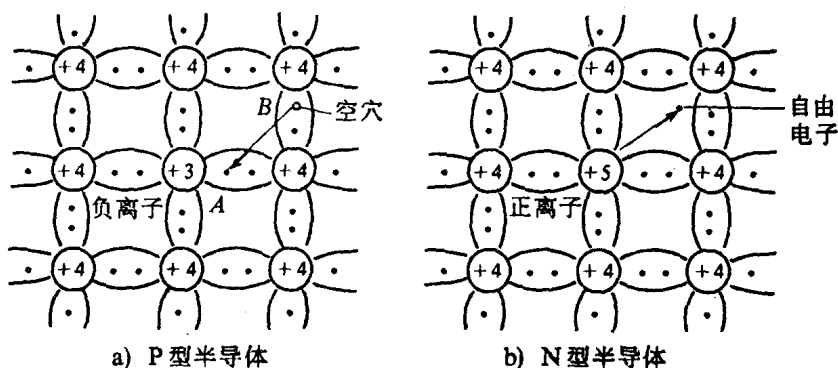


图 1.2 P 型与 N 型半导体

如果在本征半导体中掺入的是磷、锌等五价元素，那么情况又不一样了，见图 1.2b。在组成共价键时，磷原子外层五个电子中仅有四个处在共价键上，多出一个受原子核束缚很小很小的电子，它十分容易成为自由电子。当磷原子提供了多余的价电子后，本身成为正离子。所以，这种半导体中，电子载流子数目很多，成为多数载流子；空穴载流子数目很少，是少数载流子。这种杂质半导体称为电子型半导体，简称为 N 型半导体。

1.1.3 PN 结内部载流子的运动

1) PN 结内部载流子的运动

当 P 型半导体和 N 型半导体联结为一体时，在交界的地方就必然要发生由于载流子浓度不均匀分布而引起的扩散运动——P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。随着扩散的进行，P 区空穴减少，出现带负电的粒子区（用 $\ominus$ 表示）；N 区电子减少，出现带正电的粒子区（用 $\oplus$ 表示）。因此，在交界面的两边便产生了一个内部电场，其方向从 N 区指向 P 区，其电场力的方向与扩散运动的方向相反，见图 1.3。由图可见，内电场将使多数载流子的扩散运动受到阻挡；同时，一旦 P 区与 N 区的少数载流子因热运动落入其中，则内电场将驱使它们向对方作漂移运动。当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时，PN 结中没有宏观电流，PN 结区的宽度便稳定下来了。通常把这一

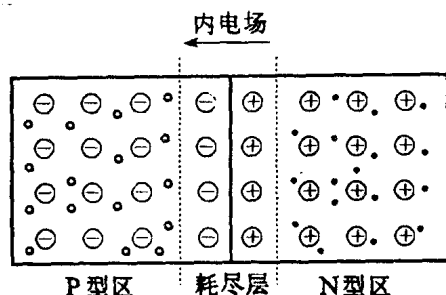


图 1.3 PN 结的形成

交界面附近由正负离子组成的特殊过渡层称作空间电荷区，又叫阻挡层、耗尽层，也就是PN结。

2) PN结的伏安特性

(1) PN结加正向电压 电源正极接P区，负极接N区，这种接法称为正向接法，见图1.4a。正向接法时，外加电场与PN结内电场方向相反，因而削弱了内部电场，使耗尽层的宽度减小，N区中的电子与P区中的空穴能较顺利地越过PN结，形成较大的扩散电流，又称为正向电流。所以正向接法时称PN结处于导通状态，导通时结电阻很小。

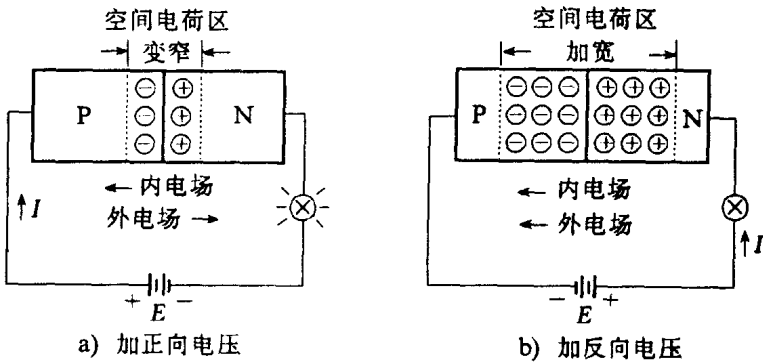


图 1.4 PN结加正反向电压

(2) PN结加反向电压 PN结加反向电压即是电源正极接N区，负极接P区，这种连接法称为反向接法，见图1.4b。反向接法时，外加电场与PN结内电场方向一致，耗尽层大大加宽，因此扩散运动难以进行。只有少数载流子形成的漂移电流流过PN结，称为反向电流。因为少数载流子数量有限，反向电流很小，可以认为PN结基本不导电，所以反向接法时又称PN结处于截止状态。

(3) 反向击穿 当反向电压加大到一定程度时，流过PN结的电流会随反向电压增加而迅速增大，这一现象称为反向击穿。

反向击穿是由于电场力过强，破坏了共价键结构，或电子在电场中被加速到很高的速度，获得足够的动能，把束缚在共价键中的价电子撞出来，成倍成倍地产生电子-空穴对而形成的结果。

1.2 半导体二极管及其特性参数

1.2.1 半导体二极管的结构

半导体二极管是由 PN 结加上引出线并用管壳封装而构成的。图 1.5 是常见的两类二极管的结构示意图。

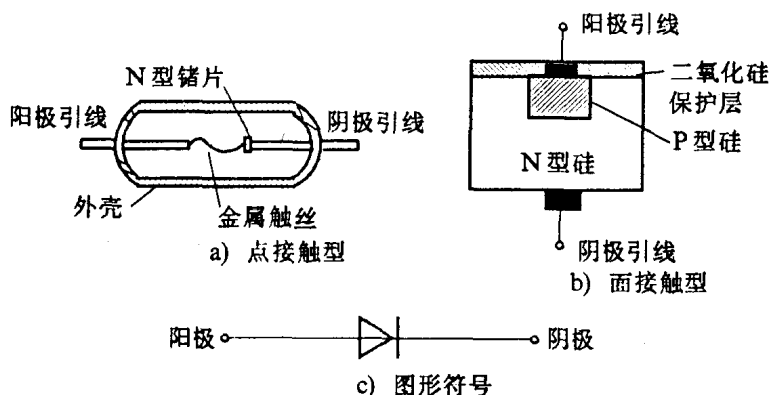


图 1.5 二极管的结构和符号

点接触型二极管的特点是 PN 结的面积小，允许通过的电流小，由于其结电容小（后面将介绍结电容概念），故适用于高频工作。面接触型二极管由于结面积大，允许通过的正向电流大，常用作整流管；但这种二极管的结电容大，只能在较低频率下工作。硅平面二极管，当结面积大时，可用于大功率整流，结面积较小时，PN 结电容小，常用在脉冲数字电路中作开关管。二极管在电路中的符号如图 1.5c 所示。

1.2.2 半导体二极管的特性和参数

1) 二极管的伏安特性 根据理论分析, PN 结或二极管的电流与端电压的关系可由下式表示:

$$I = I_s (e^{U/U_T} - 1) = I_s (e^{qU/kT} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中 I 为流过 PN 结或二极管的电流, I_s 为反向饱和电流, U 为加在二极管上的电压, 而 $U_T = kT/q$ 是温度的电压当量, 其中 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 是波尔兹曼常数, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 是一个电子的电荷量, 所以 $U_T = T/11600$, 在常温下 (300K), 常取值为 $U_T \approx 26\text{mV}$.

式 (1.2.1) 是二极管的伏安特性方程, 又叫作半导体二极管方程。当管子的正向电压 U 大于 U_T 几倍时, 式中 $e^{U/U_T} \gg 1$, 第二项可略去, 则流过管子的电流与电压成指数关系, 即为图 1.6 中特性曲线的 0A 段; 当管子加反向电压时, U 为负值, 若 $|U|$ 大于 U_T 几倍以后, 指数项的值近似等于零, 所以 $I \approx -I_s$, 即特性曲线上的 0B 段。

(1) 正向特性部分: 对应于图 1.6 中 0A 段, 当正向电压较小时, 由于外电场还不足以克服内部电场对载流子扩散运动造成的阻力, 所以正向电流仍然很小, 二极管呈现电阻较大。当外加电压超过一定量值后, 内电场被大大削弱, 二极管电阻变小, 正向电流显著增加。

(2) 反向特性部分: 加反向电压时, 反向电流数值很小。在同样的温度下, 硅管比锗管更小, 锗管为 μA 级, 硅管为 nA 级。如前所述, 二极管反向电流在一定的反向电压范围内, 基本上不变化, 如图 1.6 中 0B 段所示。由于反向电流是由少子漂移形成, 而少子浓度对温度十分敏感, 故反向电流随温度上升而增长很快。

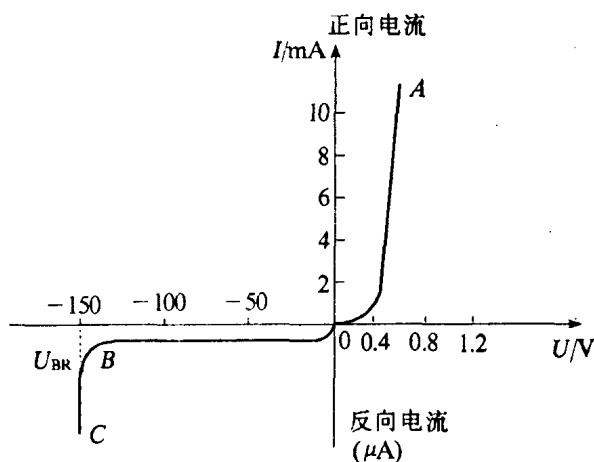


图 1.6 二极管的特性曲线

(3) 反向击穿部分：当加在二极管上的反向电压达到某一数值 U_{BR} 时，反向电流突然增大，这种现象称为二极管的“反向击穿”， U_{BR} 叫作反向击穿电压。击穿特性曲线如图 1.6 中 BC 段所示。在击穿后，式(1.2.1)便不再适用。产生击穿的机理是外电场过强后，破坏了共价键而把价电子直接拉出来，使少数载流子数目急剧增多（称为齐纳现象）或强电场引起电子动能剧增并与原子碰撞，产生新的电子-空穴对，后者又继续碰撞其它原子，致使载流子数目剧增（称为雪崩现象）。这两种因素产生的击穿都称为电击穿。如果没有适当的限流措施，击穿电流过大而超过二极管允许的功耗值时，将会使 PN 结造成永久性损坏，这称为热击穿。

2) 二极管的电容效应 PN 结的结区以外存在着电子和空穴两类载流子，而在结区的内部则只有正、负离子，这使 PN 结存在着电容效应。二极管以 PN 结制成，当然它也有电容效应。

(1) 势垒电容 C_B C_B 是由 PN 结中贮存的空间电荷量随外加电压变化而改变引起的。当 PN 结加正向电压时，外电场使多