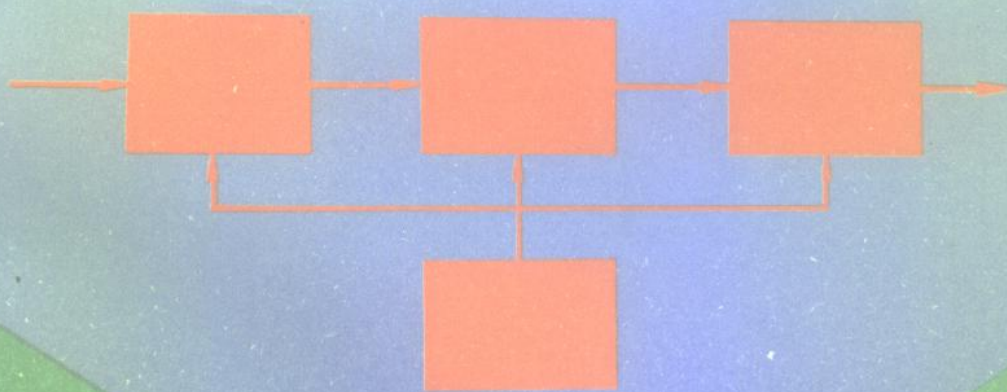


模拟电路基础

吴丙申 卞祖富 编著



北京理工大学出版社



模拟电路基础

吴丙申 卞祖富 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书由半导体器件,基本放大电路,集成运算放大器,反馈放大器、放大器的频率响应,模拟运算电路,模拟信号处理电路、开关电容电路、传感器电路和电流模电路组成。

本书的编写遵照既有基础理论、又有实用性,还有适量新技术成果等原则。

本课程的参考学时数为70学时,但可根据不同层次的要求进行取舍。本书可作为高校工科电子及通信等专业的教材,也可供其他相关的工程技术人员参考。

DW72/02

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路基础/吴丙申,卞祖富编著. —北京:北京理工大学出版社,1997.1
高校教材

ISBN 7-81045-214-2

I. 模… II. ①吴… ②卞… III. 模拟电路-基础理论-高等学校-教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1997)第 20971 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话 68422683

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 23.75印张 579千字

1997年1月第一版 1997年1月第一次印刷

印数:1-5000册 定价:26.00元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

前 言

本书是参照国家教委工科电子线路课程教学指导小组提出的基本要求和近年来电子技术的最新发展，为高等工科院校电子和无线电类专业所编写的教材。

本书的编写还参照了阎凤坛、王周、卞祖富编、高等教育出版社1987年出版的高等学校试用教材《线性电子线路》，以及在北京理工大学电子工程系使用该教材八年实践的经验和体会。

本书编写的基本原则是：

- (1) 在内容的取舍上，既包含必需的基础知识，又容纳适量的新技术成果；
- (2) 在理论性与实用性的关系上，更多地强调对工科院校来说极其重要的工程实用性；
- (3) 在内容的叙述上，力求既有足够的深度，又有适当的广度；
- (4) 在内容的编排上，既适应大学本科学生的需求，也适合其他层次相应专业学生的需求（本书有“*”者为选修内容）；
- (5) 在语言上，力求通俗易懂，以便于各种层次的读者自学。

本书大体上可分为两部分：第一至五章为基础部分，包含半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、反馈放大器以及放大器的频率响应等内容；第六至九章为功能电路和新技术介绍部分，包含模拟运算电路、模拟信号处理电路和开关电容电路、集成传感器电路和电流模电路等内容。

本课程的参考学时为60~70学时。第一部分是必修内容。第二部分内容的取舍可根据不同层次学生的具体情况安排。

本书第一、四、五、九章由吴丙申编写，第二、三、六、七、八章由卞祖富编写。北京邮电大学谢沅清教授审阅了本书的全稿，提出了许多宝贵的意见；北京理工大学罗伟雄教授、韩力副教授对本书的编写方案提出了很好的建议；编者的同仁，北京理工大学电子工程系电子技术教研室的同志们也对本书的编写提出了很多中肯的意见，并给予了强有力的支持。在此，一并致以衷心的感谢。

限于编者水平，加之时间仓促，书中谬误之处在所难免，恳请各兄弟院校的老师及广大读者批评指正。

编 者

1995年6月10日

目 录

第一章 半导体器件	(1)
§ 1-1 半导体物理基础	(1)
1-1-1 本征半导体	(1)
1-1-2 杂质半导体	(3)
§ 1-2 PN 结	(4)
1-2-1 PN 结的形成	(4)
1-2-2 PN 结的单向导电性	(5)
1-2-3 PN 结的温度特性	(6)
1-2-4 PN 结的击穿	(6)
1-2-5 PN 结电容 C_j	(7)
§ 1-3 晶体二极管	(8)
1-3-1 二极管的伏安特性	(9)
1-3-2 二极管的参数与模型	(9)
§ 1-4 晶体三极管	(10)
1-4-1 三极管的工作原理	(11)
1-4-2 三极管的伏安特性曲线	(13)
1-4-3 三极管的参数	(15)
1-4-4 三极管的温度特性	(16)
§ 1-5 场效应管	(16)
1-5-1 结型场效应管	(17)
1-5-2 绝缘栅场效应管	(20)
1-5-3 VMOS 场效应管	(24)
习题	(25)
参考文献	(28)
第二章 基本放大电路	(29)
§ 2-1 基本放大电路的组成与工作原理	(29)
2-1-1 放大电路的基本原理	(29)
2-1-2 基本放大电路的组成	(30)
2-1-3 放大电路的三种基本组态	(33)
2-1-4 放大器的主要性能指标	(35)
§ 2-2 放大器的图解分析法	(38)
2-2-1 静态分析	(38)
2-2-2 动态分析	(39)
2-2-3 放大电路的动态范围	(40)
§ 2-3 放大器的微变等效电路分析法	(42)
2-3-1 BJT 的小信号模型	(42)

2-3-2	FET 的小信号模型	(47)
2-3-3	微变等效电路分析法的一般步骤	(48)
§ 2-4	基本放大电路的中频特性	(50)
2-4-1	BJT 放大电路的中频特性	(50)
2-4-2	FET 放大电路的中频特性	(53)
§ 2-5	静态工作点的稳定	(56)
2-5-1	温度对静态工作点的影响	(56)
2-5-2	稳定静态工作点的偏置电路	(57)
§ 2-6	多级放大电路	(59)
2-6-1	多级放大器构成的基本问题	(60)
2-6-2	噪声的基本概念	(61)
2-6-3	多级放大器总体性能指标	(64)
	本章小结	(66)
	习题	(67)
	参考文献	(73)
	部分习题参考答案	(73)
第三章	集成运算放大器	(74)
§ 3-1	集成运放的组成特点	(74)
3-1-1	集成运放的组成与特点	(74)
3-1-2	直接耦合放大电路的特殊问题	(75)
§ 3-2	差分放大电路	(76)
3-2-1	工作原理	(76)
3-2-2	基本性能分析	(78)
3-2-3	传输特性	(87)
3-2-4	失调与温度漂移特性	(90)
§ 3-3	电流源电路	(92)
3-3-1	镜像电流源	(93)
3-3-2	比例电流源	(94)
3-3-3	微电流源	(96)
3-3-4	MOS 电流源	(96)
3-3-5	有源负载	(97)
§ 3-4	输出级	(100)
3-4-1	互补推挽输出级	(100)
3-4-2	准互补推挽输出级	(101)
3-4-3	功率、效率和管耗	(103)
3-4-4	MOS 输出级	(106)
§ 3-5	集成运放产品简介	(107)
3-5-1	封装与电路符号	(107)
3-5-2	技术规范	(108)
3-5-3	分类	(109)
3-5-4	电路举例	(111)
§ 3-6	集成运放的简化模型	(122)

3-6-1 理想化集成运放的基本特性	(122)
3-6-2 非理想集成运放的简化模型	(123)
本章小结	(124)
习题	(125)
参考文献	(130)
部分习题参考答案	(130)
第四章 负反馈放大电路	(131)
§ 4-1 反馈的基本概念	(131)
4-1-1 放大器的反馈	(131)
4-1-2 基本反馈方程	(132)
4-1-3 负反馈的分类与识别	(134)
§ 4-2 负反馈对放大器性能的影响	(138)
4-2-1 负反馈使增益的稳度提高	(138)
4-2-2 减小非线性失真	(138)
4-2-3 扩展放大器的带宽	(139)
4-2-4 输入电阻	(140)
4-2-5 输出电阻	(141)
§ 4-3 负反馈电路的分析方法	(142)
4-3-1 划分 A 网络和 B 网络的原理	(143)
4-3-2 分离反馈电路的法则	(145)
§ 4-4 深度负反馈的工程计算	(146)
4-4-1 并联电流深度负反馈计算举例	(147)
4-4-2 串联电压深度负反馈计算举例	(147)
* § 4-5 一般反馈电路的计算	(148)
4-5-1 电压并联负反馈电路	(148)
4-5-2 电流串联负反馈电路	(150)
4-5-3 电流并联负反馈电路	(152)
4-5-4 电压串联负反馈电路	(154)
习题	(155)
参考文献	(158)
第五章 放大器的频率响应	(159)
§ 5-1 基本概念与分析方法	(159)
5-1-1 放大器的频率响应	(159)
5-1-2 频率特性的分析方法	(160)
§ 5-2 放大器的频率特性	(170)
5-2-1 共射放大电路的频响	(170)
5-2-2 射随器的高频特性	(174)
5-2-3 共基放大器的高频特性	(176)
5-2-4 场效应管的高频特性	(178)
§ 5-3 宽带放大器	(179)

5-3-1 共射-共基组合电路	(179)
5-3-2 共集-共基组合电路	(180)
5-3-3 F-733 宽带放大器	(180)
§ 5-4 负反馈电路的稳定性	(181)
5-4-1 负反馈对频率特性的影响	(181)
5-4-2 负反馈的稳定性判别及相位补偿	(183)
习题	(189)
参考文献	(191)
第六章 模拟运算电路	(192)
§ 6-1 基本运算放大电路	(192)
6-1-1 理想运算放大电路的一般分析	(192)
6-1-2 非理想运算放大电路的误差分析	(194)
6-1-3 比例运算电路参数的设定	(198)
§ 6-2 加法运算电路和差动放大电路	(199)
6-2-1 加法运算电路	(199)
6-2-2 差动放大电路	(201)
§ 6-3 积分和微分运算电路	(203)
6-3-1 基本积分运算电路	(203)
6-3-2 实用积分运算电路	(204)
6-3-3 积分电路应用举例	(207)
6-3-4 微分运算电路	(210)
§ 6-4 对数与反对数运算电路	(211)
6-4-1 对数运算电路	(211)
6-4-2 反对数(指数)运算电路	(214)
6-4-3 对数与反对数组合运算电路	(215)
§ 6-5 集成模拟乘法器及其应用	(216)
6-5-1 集成模拟乘法器	(217)
6-5-2 集成乘法器的应用	(221)
本章小结	(225)
习题	(226)
参考文献	(233)
部分习题参考答案	(234)
第七章 模拟信号处理电路	(235)
§ 7-1 比较器	(235)
7-1-1 单限比较器	(235)
7-1-2 滞迴比较器(Shmitt 触发器)	(238)
7-1-3 窗口比较器	(241)
7-1-4 阶梯窗口比较器	(242)
7-1-5 单片集成比较器	(242)
§ 7-2 采样保持电路	(244)

7-2-1	采样保持电路的工作原理	(245)
7-2-2	采样保持电路	(246)
7-2-3	单片集成采样保持电路	(248)
§ 7-3	有源滤波器	(250)
7-3-1	有源滤波器的特点和分类	(250)
7-3-2	一阶有源滤波器	(252)
7-3-3	二阶有源滤波器	(253)
7-3-4	高阶有源滤波器的构成	(261)
7-3-5	有源滤波器设计方法简介	(262)
§ 7-4	开关电容滤波器	(267)
7-4-1	开关电容电路的基本原理	(268)
7-4-2	开关电容电路的分析方法	(271)
7-4-3	开关电容滤波器	(275)
§ 7-5	小信号调谐放大器	(283)
7-5-1	单级单回路小信号调谐放大器	(284)
7-5-2	中心频率相同的多级单回路小信号调谐放大器	(289)
	本章小结	(290)
	习题	(291)
	参考文献	(299)
	部分习题参考答案	(300)
第八章	传感器电路	(301)
§ 8-1	传感器导论	(301)
8-1-1	传感器的基本功能和构成方法	(301)
8-1-2	传感器的分类	(301)
8-1-3	传感器的特性	(302)
8-1-4	传感器常用的变换电路	(304)
8-1-5	集成传感器	(306)
§ 8-2	压力传感器及其电路	(306)
8-2-1	压敏电阻全桥	(307)
8-2-2	压阻式集成压力传感器	(311)
8-2-3	电容式集成压力传感器	(313)
§ 8-3	温度传感器及其电路	(314)
8-3-1	半导体热敏电阻	(314)
8-3-2	集成温度传感器	(318)
8-3-3	集成温度传感器应用举例	(321)
§ 8-4	光传感器及其电路	(324)
8-4-1	光敏电阻	(324)
8-4-2	光敏二、三极管	(327)
8-4-3	光电耦合器	(334)
	本章小结	(338)
	参考文献	(339)

第九章 电流模技术	(340)
§ 9-1 概述	(340)
9-1-1 电流模电路的特点	(340)
9-1-2 跨导线性原理	(341)
§ 9-2 基本电路	(343)
9-2-1 电流镜 (Current mirror)	(343)
9-2-2 电流传送器 (Current conveyor)	(347)
9-2-3 电流放大器	(356)
§ 9-3 电流模技术的应用	(358)
9-3-1 电流模集成运放	(358)
9-3-2 模拟乘法器	(363)
9-3-3 电流模有源滤波器	(363)
习题	(367)
参考文献	(369)

第一章 半导体器件

半导体器件是现代电子设备的重要组成部分。半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长和耗电少等优点，广泛应用于现代电子技术的各个领域。集成电路特别是大规模和超大规模集成电路的出现，使电子设备在微型化、可靠性和多功能方面向前推进了一大步，引起了整个科学技术领域的巨大变革。

本章首先介绍半导体物理基础知识，接着讨论PN结的物理特性、晶体二极管和三极管的特性和参数。

§ 1-1 半导体物理基础

自然界中的物质如果按导电能力来分类，可分为导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。硅和锗就是典型的半导体材料。它们在常温下导电能力较弱，在极低的温度下几乎变成绝缘体，而在高温时导电能力会显著地增加。半导体的导电能力对温度和光照是很敏感的。此外，在纯净的半导体中掺进微量杂质时，它的导电能力也会明显增强。这些都是半导体的特点。目前制造半导体器件最常用的材料有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

1-1-1 本征半导体

一、半导体的晶体结构和共价键

锗和硅是制造半导体器件的主要材料，它们是四价元素，原子的外层有四个价电子。这四个价电子决定了元素的化学性质和晶体的结构。为了突出价电子的作用，我们采用图1-1-1~1-1-2的简化原子模型。图中惯性核代表原子核及内层电子所带的净电荷。

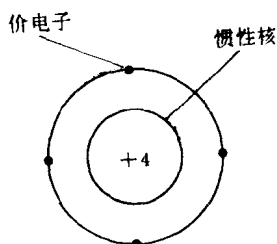


图 1-1-1 硅和锗的简化原子模型

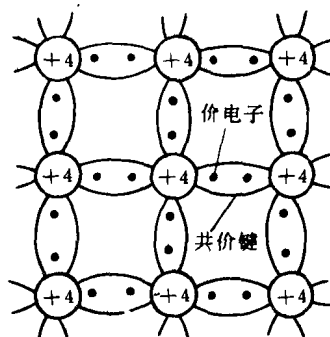


图 1-1-2 硅和锗的晶体结构示意图

当极纯的硅或锗由液态冷却下来时，原子就会按一定秩序排列起来，形状如图1-1-2所示。这种纯净的、有秩序排列的晶体叫本征半导体。

原子结合成晶体以后，因原子之间相距很近，使得相邻原子的外层轨道发生交叠，这样外层价电子不仅为自身原子所有，而且也为相邻原子所共有，形成了共价键。

二、本征激发

纯净的、结构完整的半导体，在极低的温度下 ($T=0\text{K}$)，由于价电子没有能力挣脱共价键的束缚，所以晶体中没有可供导电的载流子，晶体相当于绝缘体。

但随温度升高，譬如在室温下，就会使一些价电子在热激发下，获得足够的能量挣脱共价键的束缚，成为自由电子，同时在共价键中就留下一个空位，这个空位叫做空穴。本征半导体在热激发下能产生电子、空穴对，这种现象称为本征激发，如图 1-1-3 所示。

本征半导体中参与导电的工具是热激发时产生的电子、空穴对。电子能够参与导电是众所周知的事，那么空穴是怎样导电的呢？原来，共价键中失去一个电子出现空穴时，邻近的价电子很容易离开自己的共价键来填补这个空穴（没有能量交换），而刚刚离开的价电子在原位又留下新的空穴，这个空穴又可被相邻的价电子填补，再出现空穴。这样，在半导体中出现了价电子依次填补空穴的运动，在无外电场作用时，这种空穴的运动是杂乱无章的不能形成定向电流。但是在电场作用下，空穴便形成定向的运动，这种由空穴定向运动形成的导电现象称为空穴导电。

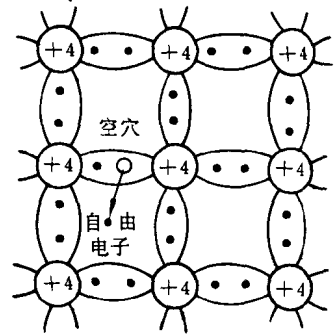


图 1-1-3 本征激发产生电子、空穴对

总之，在半导体中存在两种载流子：自由电子和空穴。它们所带电荷相等而极性相反。在电场作用下，虽然两种载流子的运动方向相反，但因其所带电荷极性相反，所以两种电流的实际方向是一致的。载流子在电场作用下形成的电流称为漂移电流。

三、本征载流子浓度

本征半导体在热（或光）的作用下产生电子空穴对，这一过程又称载流子的产生。与此同时，电子在运动中如果与空穴相遇，自由电子释放出能量，恢复共价键，使电子和空穴成对消失，这一过程称为载流子复合。在一定的温度下载流子的产生与复合都在不停地进行，最后处于一种动态平衡状态，使载流子的浓度维持一个定值。本征载流子的浓度 n_i 可用下式表示

$$n_i = p_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1-1-1)$$

式中 n_i 、 p_i ——分别表示本征半导体中电子和空穴的浓度 (cm^{-3})；

A_0 ——与半导体材料有关的常数，硅为 $3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ ，锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$ ；

T ——绝对温度，单位为 K；

E_g ——0K 时破坏共价键所需能量，又称禁带宽度，单位为 eV，硅为 1.21eV，锗为 0.785eV；

k ——玻耳兹曼常数， $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}=8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。

上式表明，本征载流子浓度与半导体材料和温度有关。例如，当 $T=300\text{K}$ 时，硅和锗的本征载流子浓度 $n_i(p_i)$ 分别为 $1.43 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 和 $2.38 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。利用式(1-1-1)还可算出：硅的 n_i 每温升 8°C 增加一倍，而锗的 n_i 每温升 12°C 增加一倍。通常，对硅、锗都近似认为每

温升 10℃ 本征载流子浓度增加一倍。

1-1-2 杂质半导体

在本征半导体中，掺入少量其他元素，就成为杂质半导体。杂质半导体有 N 型和 P 型两种。

一、N 型半导体

在本征硅（或锗）晶体中，掺入微量五价元素磷（或砷、锑）以后，磷原子就会取代晶格中的一个硅原子。磷原子有五个价电子，其中的四个与周围的硅原子组成共价键，多余的价电子不受共价键束缚，在室温下就足以挣脱磷原子的束缚变为自由电子。同时，磷原子因丢失一个电子而变成带正电的离子，如图 1-1-4 所示。这种杂质原子变成离子的过程称为杂质电离，而能够提供自由电子的杂质称为施主杂质。

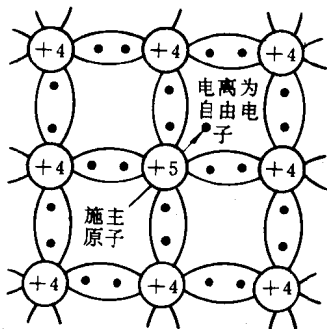


图 1-1-4 N 型半导体结构示意图

显然，杂质电离与本征激发不同，本征激发成对产生自由电子和空穴，而施主杂质电离只产生自由电子，不产生空穴，与自由电子同时出现的施主正离子被束缚在晶格中，不能运动，因而也不参加导电。所以这种杂质半导体中自由电子的浓度显著增加，故称 N 型半导体。在 N 型半导体中由于电子浓度远高于空穴的浓度，所以称电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。

二、P 型半导体

在本征硅（或锗）晶体中，掺入少量三价元素硼（或铝、镓）以后，硼原子就会取代晶格中的硅原子。由于硼原子只有三个价电子，当它与相邻的四个硅原子形成共价键时，因缺少一个价电子而出现一个空位。在室温下，这个空位就能被附近的价电子所填补，硼原子变成负离子，同时离去的价电子在共价键上产生一个空穴，形如图 1-1-5 所示。这种容易接受价电子而产生空穴的杂质称为受主杂质。

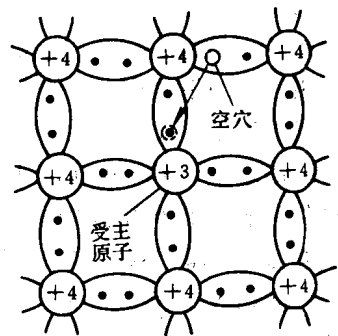


图 1-1-5 P 型半导体结构示意图

受主杂质电离只产生空穴，不产生自由电子。杂质电离后变成负离子被固定在晶格中，不能够参加导电。所以本征半导体掺入三价受主杂质后，其空穴的浓度显著增高，故称 P 型半导体。在 P 型半导体中多子是空穴。少子是电子。

三、杂质半导体的载流子浓度

在杂质半导体中，多子的浓度近似等于掺入杂质的浓度。理论和实践表明：凡同种材料的半导体，在同一温度下，两种载流子浓度的乘积为恒定值，与掺杂多少无关，即

$$n_{NO} \cdot p_{NO} = p_{PO} \cdot n_{PO} = n_i p_i \quad (1-1-2)$$

式中 n_{NO} 、 p_{NO} ——分别表示热平衡时，N 型半导体中自由电子和空穴的浓度；

p_{PO} 、 n_{PO} ——分别表示热平衡时，P 型半导体中空穴和自由电子的浓度。

由式(1-1-2)可知，杂质半导体中的少子比本征半导体的还要少。例如，在 $T=300K$ 时，

在本征硅中掺入施主杂质的浓度 $N_D = 1.95 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ，则这些杂质所提供的电子浓度也是 N_D ，因为这个数目远大于本征激发产生的电子浓度 $1.43 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 。所以杂质半导体中多子的浓度等于掺杂的浓度 $n_{NO} \doteq N_D$ 。由式也可算出空穴的浓度 $p_{NO} = 1.05 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$ 。这个数值远小于本征半导体中空穴的浓度 $p_i = 1.43 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 。

少子浓度虽然很低，但随温度变化明显，将影响半导体器件的性能，至于多子浓度则等于掺杂浓度与温度无关。

§ 1-2 PN 结

PN 结是各种半导体器件的核心，掌握它的基本特性是分析半导体器件的基础。本节主要讨论 PN 结的单向导电性、温度特性、击穿特性和电容效应。

PN 结是在一块半导体单晶片上，一侧掺杂成为 P 型，另一侧成为 N 型，在 P 型区与 N 型区的交界面上便形成 PN 结。如果两侧掺杂浓度相同称为对称结。如果 P 区掺杂浓度大于 N 区称为 P⁺N 结，反之 N 区掺杂浓度大于 P 区称为 PN⁺ 结。P⁺N 结或 PN⁺ 结都称为非对称结。

1-2-1 PN 结的形成

半导体中的载流子有两种运动形式，前已提及载流子在电场作用下形成定向运动称为漂移运动；此外，载流子还能够从浓度高的地方向浓度低的地方运动，称为扩散运动。PN 结的形成过程与漂移和扩散运动紧密的联系着。

P 型和 N 型半导体结合在一起时，因为 P 区空穴的浓度远远高于 N 区，由于这种浓度差异使空穴从 P 区向 N 区扩散，扩散到 N 区的空穴因与电子复合而消失。同理，N 区的电子也要向 P 区扩散，且被 P 区的空穴所复合。P 区和 N 区的多子向对方扩散的结果，使交界面附近因流失多子而出现了不能移动的带电离子。在 P 区一侧出现负离子，N 区一侧出现正离子，如图 1-2-1 所示。这些正、负离子被束缚在晶格之中，不能移动，这个区域称为空间电荷区。空间电荷区形成了由 N 区指向 P 区的内电场。内电场的出现，一方面，阻碍了双方多子的扩散，即阻止 P 区的空穴向 N 区扩散和 N 区的电子向 P 区扩散，另一方面，使进入空间电荷区的载流子作漂移运动，即驱使自由电子漂移到 N 区，空穴漂移到 P 区。这个漂移电流与扩散电流是反向的，两者是相互抵消的。

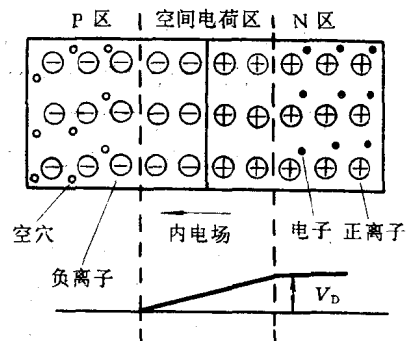


图 1-2-1 平衡状态下的 PN 结

最初，内电场较弱，多子的扩散运动占优势，但随着扩散的继续进行，空间电荷区不断加大，内电场增强，漂移电流也加大，最后达到扩散与漂移的平衡。这时，仍然会有载流子向对方扩散，但与此同时，会有相同数量和极性的载流子被漂移回来。就是说，在动态平衡时，流过空间电荷区的净电流等于零。这时，空间电荷区的大小不再变化。这个空间电荷区就是我们所说的 PN 结。空间电荷区也称耗尽层、势垒和阻挡层，这些名称从不同的侧面来描写 PN 结的物理本质。

空间电荷区在热平衡时，两侧正负离子的数目相等，且保持恒定，使该区具有一定的宽

度，并产生一定的内建电位差 V_D ，可表示为

$$V_D \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1-2-1)$$

式中 N_D ——施主杂质浓度；

N_A ——受主杂质浓度。

在常温下，硅PN结的 $V_D=0.6\sim 0.8V$ ，锗PN结的 $V_D=0.2\sim 0.3V$ 。

1-2-2 PN结的单向导电性

一、正偏时的PN结电流

将P区接电源正极，N区接电源负极，称为PN结正偏，如图1-2-2所示。正偏时，外加电压与内建电势极性相反，外电场削弱了内电场，使空间电荷区变窄，PN结失去平衡，多子扩散运动大于少子漂移运动。这样，在正向偏压作用下PN结开始产生正向电流，而且PN结的正向电流随正偏而加大。

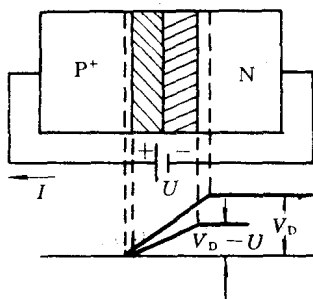


图1-2-2 正偏的PN结

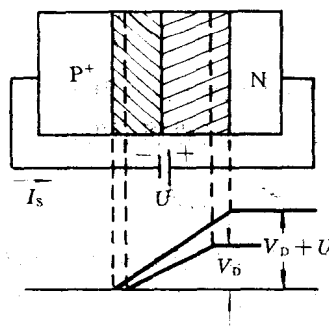


图1-2-3 反偏的PN结

二、反偏时的PN结电流

将P区接电源负极，N区接电源正极，称为PN结反偏，如图1-2-3所示。反偏时，外电场与内电场方向一致，使空间电荷区变宽，其结果阻止了扩散运动，加强了漂移运动。这样，在反偏时，PN结开始形成反向电流。因为反向电流是由双方的少子形成的，反向电流不仅很微小，而且基本上与反偏电压的大小无关（超过零点几伏后），称为反向饱和电流，记作 I_s 。

可见，PN结正偏时，产生较大的正向电流，而反偏时，反向电流很微小，这种特性称为单向导电性。

三、PN结的伏安特性

理论分析表明，PN结的伏安特性可表示为

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{V_T}} - 1 \right) \quad (1-2-2)$$

式中 I_s ——反向饱和电流，与材料和温度有关；

V_T ——室温下为 $26mV$ ($V_T = kT/q$)。

据式(1-2-2)可以绘制出PN结的伏安特性曲线，如图1-2-4所示。由图可见，正偏时，电流随电压增加按指数律上升；反偏时，电流趋于很小的定值 ($-I_s$)。我们称式(1-2-2)为PN结伏安方程。

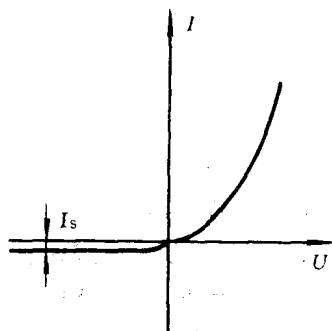


图1-2-4 PN结伏安特性曲线

PN 结正偏时，流过电流较大，呈现电阻较小，称为正向导通；反偏时，反向电流很小。呈现电阻较大，称为反向截止。PN 结的正向导通和反向截止，体现了 PN 结的单向导电性。

1-2-3 PN 结的温度特性

温度对 PN 结的导电情况影响显著。当温升时，PN 结的正向电流和反向电流都增加，它们的变化如图 1-2-5 所示。PN 结伏安特性与温度的关系仍可用式(1-2-2)来描写。

对于正向特性，温升时，一方面 $V_T = kT/q$ 增大，另一方面 I_s 迅速增大，两者变化相反，最终 I_s 的增长占优势，使正向电流随温升而增加。经理论分析测试发现：正偏的 PN 结，在保证电流不变的前提下，温度每上升 1°C ，正向偏压减小 $2\sim 2.5\text{mV}$ 。

在反偏时，温度对 PN 结的反向电流影响十分明显。对硅和锗而言，每温升 10°C ，其反向饱和电流 I_s 增加一倍。可表示为

$$I_s(T_2) = I_s(T_1) \cdot 2^{\frac{(T_2 - T_1)}{10}} \quad (1-2-3)$$

应当指出，上述讨论，仅限于在一定温度范围内，超过允许温度，PN 结的一切特性将消失。

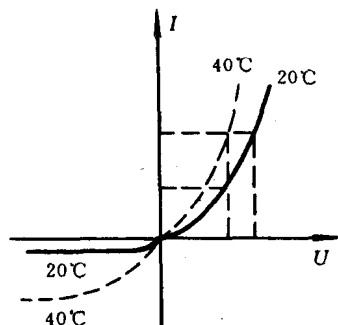


图 1-2-5 温度对伏安特性的影响

1-2-4 PN 结的击穿

PN 结的反偏电压足够高时，会使 PN 结击穿，其特征是此时反向电流突然大增，如不加控制会损坏 PN 结，这种现象称为 PN 结反向击穿，如图 1-2-6 (a) 所示。击穿电压用 U_B 表示。根据引起击穿的机理不同，反向击穿可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。

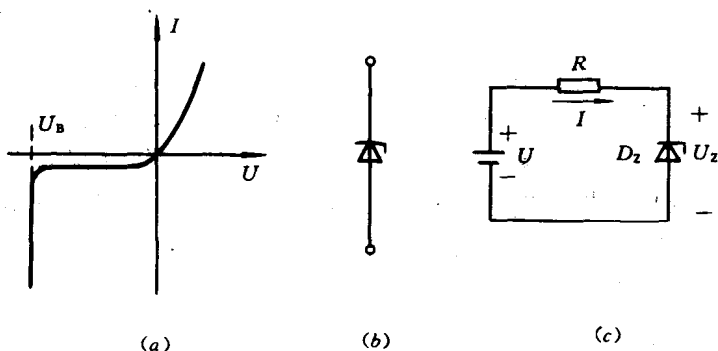


图 1-2-6 PN 结的击穿特性
(a) 击穿特性；(b) 稳压管符号；(c) 稳压电路

一、雪崩击穿

PN 结的反偏电压增加，其内电场随着增大，处在空间电荷区的载流子（电子和空穴）在电场力作用下，动能不断地增大。当内电场增强到一定值时，一些载流子与晶格原子碰撞，并足以把共价键中的价电子打出来，同时产生电子、空穴对，这称为碰撞电离。新产生的和原有的电子和空穴，在电场作用下，又重新获得能量，在它们离开空间电荷区之前，还可能多次以同样的方式碰撞原子，碰撞电离不断发生。结果，在短时间内，空间电荷区的载流子浓

度迅速增加；在电场作用下，反向电流剧增，这个过程很像雪崩，故称雪崩击穿。

雪崩击穿发生在高压、低掺杂的条件下。碰撞电离，需要载流子有足够的速度才能轰出共价键中的价电子。一般反压在 7V 以上才能发生雪崩击穿，低掺杂能够形成较宽的空间电荷区，给雪崩过程提供一个繁衍的空间。

二、齐纳击穿

在另一种场合，即使反偏小于 4V 也可能发生击穿，这属于齐纳击穿。击穿的机理与雪崩不同。齐纳击穿发生在高掺杂的 PN 结中，由于高掺杂使得空间电荷区变窄。只要加上少许的反压，就可能产生很强的电场。当电场超过一定的强度（大于 $5 \times 10^5 \text{V/cm}$ ），竟能从共价键中直接把价电子拉出来，即同时产生自由电子和空穴，这称为场致激发。由于场致激发的结果，在极短时间内结区产生大量载流子，反向电流剧增，这种击穿称为齐纳击穿。它发生在 PN 结两侧高掺杂的场合，其击穿电压较低。

三、稳压二极管

雪崩与齐纳击穿统称为电击穿。一旦击穿发生后，PN 结两端的反压保持恒定，而流过的电流可在较大的范围内变动（5~20mA）。只要限定 PN 结的功耗不超出允许值，反压去掉以后，PN 结特性还能自行恢复。人们利用这一特性，在设计上考虑到击穿的功耗而制出稳压管。稳压管工作在反偏击穿状态，用来稳定电压，其稳压值记作 U_z 。稳压管的电路符号及稳压电路分别示于图 1-2-6 (b)、(c)。

不同型号的稳压管，稳压值 U_z 也不同，稳压值大于 7V 属于雪崩击穿，稳压值随温度升高而略有增加，即为正温度系数。稳压值小于 4V 属于齐纳击穿，为负温度系数。稳压值在 4~7V 之间，两种击穿都能发生，并具有较低的温度系数。各种稳压管为了很好的稳定电压，必须提供足够的工作电流（一般 5~10mA）。

1-2-5 PN 结电容 C_j

PN 结的电容由两部分组成：一种为势垒电容（发生在空间电荷区内），另一种为扩散电容（发生在结外的中性区）。这两种电容的量值都与偏压状态有关，只有小信号运用时，才可近似为常数。

一、势垒电容 C_T

我们已经知道，空间电荷区的宽度随外加偏压而改变，这种电荷量随电压而变化的现象即为电容效应。它发生在势垒区，所以称为势垒电容。例如，当正向电压增加时，空间电荷区要变窄，可是正、负离子是不能自由移动的，空间电荷的减少，实际上完全靠 N 区的电子

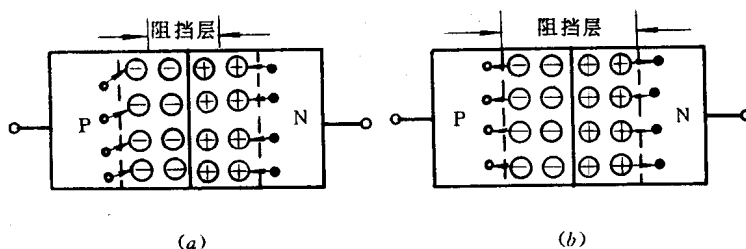


图 1-2-7 PN 结的势垒电容

(a) 正偏加大势垒电容充电；(b) 正偏减小势垒电容放电