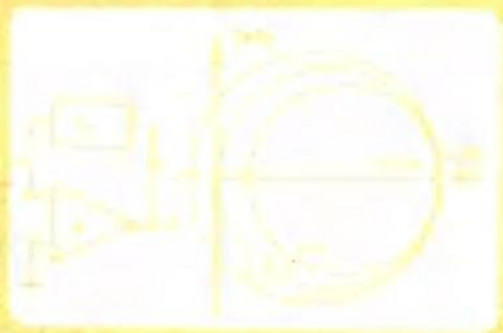


高等学校适用教材

MONIDIANZI XUEJICHU

模拟电子学基础

张锡亭 主 编
佟 伦 副 主 编



机械工业出版社

高等学校适用教材

模拟电子学基础

主 编 张锡亭

副主编 佟 心

责任编辑 蔡耀辉

*

机械工业出版社

(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

辽宁省财政厅印刷厂

沈阳市北方书社发行

*

开本 787×1092 1/16 . 印张 29.5 字数 637 千字
1987年1月沈阳第一版 . 1987年1月沈阳第一次印刷
印数 0,001—6,000 . 定价: 5.90元

*

统一书号: 15033·6606H

内 容 简 介

本书是根据1986年高等学校《电子技术基础课程的教学基本要求(草案)》编写的,以集成为主干,内容有:半导体二极管及其电路、低频放大器基础、反馈放大器和正弦波振荡器、集成运算放大器、集成运算放大器的应用及辅助教材。

本书是编者分别在各校多年教学实践的基础上,分析综合了已用教材的经验教训,并参照国外教材的特色写成的。把重点放在基本电子电路的分析和应用上,力求精、新,便于教学,物理概念清楚,力戒烦琐数学推演,注重工程估算。

本书可做高等工科院校电子、电力、电气及自动化工程等专业《模拟电子学基础》课程的教材、及其他院校学生、工程技术人员及业余自学者学习模拟电子学的参考书。

本 书 编 写 组 成 员

佟 岱 (兼)	沈 阳 大 学
佟 佩 章	卓 新 矿 业 学 院
刘 绍 芳	沈 阳 建 工 学 院
张 锡 亭 (兼)	抚 顺 石 油 学 院
李 廷 禄	大 连 大 学
刘 淑 春	沈 阳 工 业 学 院
宋 海 兰	海 军 航 空 工 程 学 院
沈 淑 兰	抚 顺 石 油 学 院
李 庆 英	抚 顺 石 油 学 院

序 言

本书是按照东北地区高等学校电子技术教学研究会1985年底沈阳年会，关于根据国家教委制订第三轮(86~90)教材规划精神和高等学校《电子技术基础课程的教学基本要求(草案)》的规定编写不同风格不同层次教材的安排，由抚顺石油学院、沈阳大学、阜新矿业学院、沈阳建工学院、海军航空工程学院、沈阳工业学院、大连大学等七校合编的高等工科院校《模拟电子学基础》课程教材(打号的*内容供参考)。

本书是编者分别在各校多年教学实践的基础上，分析综合了已用教材的经验教训，参照国外教材的特色写成的。在编写过程中，我们想多些新意，在内容取舍与讲述方法上，注意了内容与学时矛盾的处理，确保基础与少而精的原则，力求物理概念清楚，力戒烦琐数学推演，注重工程估算。

本书作为“电子技术入门性的技术基础课”教材，把重点放在基本电子电路“最初步、最根本、最共性”内容的分析和应用上，加强实践环节，以期学生学好“三基”、在分析解决问题及自学能力上得到训练，为日后模拟电子学的深造及其在专业中的应用打下基础。

本书以集成为主干构成半导体二极管及其电路(含直流电源电路的各基本环节)、低频放大器基础(以直耦为主)、反馈放大器与正弦波振荡器、集成运算放大器(含误差分析)及集成运算放大器应用(引入了集成模拟乘法器、集成三端稳压器、集成功率放大器等内容)五章系统。同时，为便于师生教学，写了与内容配套的辅助教材。至于晶闸管电路，由于学时所限，且有些专业另设专课，即使将来在工作中遇到，学了本课，也可以通过自学搞通，而未纳入本书。

本书除适用做高等工科院校电气、电力、电子及自动化工程等类专业教材外，也可用做其他院校学生、工程技术人员及业余自学者学习模拟电子学的参考书。

本书由西安交通大学何金茂教授主审，大连工学院张裕民副教授副主审。清样经大连舰艇学院电子学教研室姚伦泽同志评阅。

在本书脱稿之际，我们对东北地区高等学校电子技术教学研究会和所有在本书编写出版过程中给过帮助、支持的同志，一并致以由衷的感谢！

编书既然不是著书，自不得不借助于前辈。鉴于“编书如造园，一池一阁在拙政园恰到好处，移至狮子林可能即只堪刺目；一节一例在甲书可引人入胜，移至乙书可能即味同嚼蜡。”在本书问世后，若偶有可取，裨益读者，主要应功归前辈；出现错误，点金成铁，咎在编者。倘蒙使用本书的师生或其他读者，不吝指出纰谬，得以斧正，受益者将不只编者。

编 者

1986年10月

目 录

第一章 半导体二极管及其电路

本章任务	1
1.1 半导体二极管	2
*1.1.1 PN结	2
1.1.2 半导体二极管	8
1.1.3 二极管模型	14
1.2 二极管电路的基本分析方法	16
1.2.1 图解法	16
1.2.2 解析法	18
1.3 特种二极管	20
1.3.1 硅稳压管	21
1.3.2 其它特种二极管	22
1.4 二极管应用	23
1.4.1 整流电路	23
1.4.2 滤波电路	32
1.4.3 倍压整流电路	37
1.4.4 硅稳压管稳压电路	38
1.4.5 限幅电路	43
本章小结	44

第二章 低频放大器基础

本章任务	46
2.1 放大器件	46
2.1.1 双极型晶体管 (BJT)	46
2.1.2 场效应晶体管 (FET)	57
2.1.3 模拟集成电路的特点	63
2.2 放大器电路组成与工作	66
2.2.1 直流偏置	67
2.2.2 信号的输入与输出	68
2.2.3 基本放大电路	69
2.2.4 放大电路的三种基本组态	75
2.3 双极型晶体管h参数等效电路	75
2.3.1 晶体管的h参数	76

2.3.2	晶体管h参数微变等效电路	78
2.3.3	r_{be} 的估算	80
2.4	共射极放大电路	81
2.4.1	画微变等效电路	81
2.4.2	动态估算	81
2.4.3	放大器的输入电阻和输出电阻	84
2.5	共集电极放大电路	88
2.5.1	静态工作点	88
2.5.2	动态估算	88
*2.5.3	自举射极输出器	91
2.6	共基极放大电路	93
2.6.1	静态工作点	93
2.6.2	动态估算	94
2.6.3	BJT放大电路三种基本组态比较	94
*2.7	场效应管基本放大电路	96
2.7.1	FET放大电路特点	96
2.7.2	FET的等效电路	96
2.7.3	FET放大电路的三种组态	98
2.7.4	共源极放大电路	98
*2.7.5	共漏极放大电路——源极输出器	100
2.8	多级放大电路	102
2.8.1	多级放大电路的一般问题	102
2.8.2	直接耦合放大电路	104
2.8.3	阻容耦合多级放大电路简介	113
2.9	放大器的频率特性	115
2.9.1	频率特性与通频带	115
2.9.2	直耦放大器的中频特性	117
2.9.3	高频特性和上限频率	118
2.9.4	阻容耦合放大器频率特性简介	122
2.9.5	对数频率特性、波特图	124
2.9.6	多级放大器的频率特性	125
2.10	功率输出级电路	128
2.10.1	概述	128
2.10.2	单管甲类功率放大电路	130
2.10.3	互补对称乙类功率放大电路	131
2.10.4	互补对称甲乙类功率放大电路	133
2.11	集成运算放大器概念	135

2·11·1	什么是运算放大器	135
2·11·2	理想运算放大器	136
2·11·3	运算放大器电路举例	137
*2·12	放大器的噪声	137
2·12·1	电阻的热噪声	138
2·12·2	三极管的噪声	138
2·12·3	噪声系数	138
	本章小结	139
第三章 反馈放大器和振荡器		141
本章任务		
3·1	基本概念	141
3·1·1	反馈放大器的方框图	142
3·1·2	通用反馈方程式	143
3·1·3	反馈性质	144
3·1·4	反馈深度	145
3·2	深度负反馈放大器	146
3·2·1	深度负反馈放大器的条件	146
3·2·2	深度负反馈放大器的性质	146
3·2·3	深度负反馈放大器的要求	147
3·3	反馈电路组态的类型	147
3·3·1	反馈方式	148
3·3·2	反馈电路的组态类型	150
3·4	负反馈对放大器性能的影响	157
3·4·1	降低增益与提高增益的恒定性	157
3·4·2	扩展通频带	158
3·4·3	减小非线性失真	160
3·4·4	抑制干扰和噪声	161
3·4·5	负反馈改变了输出电阻	162
3·4·6	负反馈改变了输入电阻	164
·5	负反馈放大电路的计算	166
3·5·1	概述	166
3·5·2	单级负反馈放大电路的计算法	166
3·5·3	深度负反馈放大器的近似估算法	170
*3·6	负反馈放大器的自激与消振	173
3·6·1	负反馈放大器的自激	173
3·6·2	负反馈放大器稳定的工作条件	175

3.6.3	负反馈放大器的补偿方法简介	177
3.6.4	公共电源引起的低频自激	182
3.7	晶体管放大路电的偏置与稳定	183
3.7.1	双极型晶体管静态工作点设置	183
3.7.2	场效应晶体管的偏置电路	187
3.7.3	电压反馈偏置	188
3.7.4	集成电路的(恒流源)偏置电路	190
*3.8	负反馈放大器电路实例	192
*3.8.1	MF—20型晶体管万用表测量交流电压电路	193
3.8.2	串联稳压电压源	199
3.9	正弦波振荡器	201
3.9.1	概述	201
3.9.2	RC正弦波振荡器	203
3.9.3	LC正弦波振荡器	208
* 3.9.4	石英晶体振荡器简介	214
	本章小结	217

第四章 集成运算放大器

	本章任务	220
4.1	概述	220
4.2	集成放大器的特点	221
4.3	基本单元电路	222
4.3.1	差动放大器	222
4.3.2	恒流源电路	238
4.3.3	互补推挽输出级	246
4.4	典型集成运算放大器简介	248
4.4.1	F004型集成运放器	248
4.4.2	F007型集成运放器	249
4.4.3	F075型集成运放器	251
4.5	基本运算放大器	252
4.5.1	反相输入运算放大器	252
4.5.2	同相输入运算放大器	256
4.5.3	差动输入运算放大器	259
4.6	集成运放电路的误差分析	260
4.6.1	集成运放的参数和典型值	260
*4.6.2	运放的误差分析方法	267
	本章小结	274

第五章 集成运算放大器的应用

本章任务	275
5.1 线性应用	275
5.1.1 比例运算器	275
5.1.2 加法器和减法器	275
5.1.3 积分器和微分器	278
5.1.4 对数和反对数运算放大器	283
5.1.5 有源滤波器	284
5.1.6 正弦信号发生器	291
5.2 非线性应用	292
5.2.1 比较器	292
5.2.2 非正弦信号发生器	294
5.3 模拟计算机	299
5.4 集成模拟乘法器	300
5.4.1 乘法器的基本概念	300
5.4.2 模拟乘法器的基本原理	301
5.4.3 对数乘法器	303
5.4.4 变跨导式乘法器	304
5.4.5 四象限模拟乘法器简介	305
5.4.6 集成模拟乘法器应用	311
5.5 集成稳压器	313
5.5.1 集成稳压器电参数	313
5.5.2 WA7型多端可调集成稳压器简介	315
5.5.3 三端输出固定式集成稳压器简介	318
5.5.4 三端输出可调式集成稳压器简介	324
5.6 集成功率放大器	328
5.6.1 5G31型单片集成功率放大器	328
5.6.2 典型应用线路	331
本章小结	336

辅助教材

一、对初学者提示	338
(一) 自学的必要性	338
(二) 学习方法	338
(三) 建议	340
(四) 本课程的几个主要问题	340

(五) 有关问题.....	352
二、思考与练习题 (答案)	353
第一章.....	353
第二章.....	359
第三章.....	369
第四章.....	378
第五章.....	387
三、《实验指导书》 (供参考)	394
四、附录	435
附录 1 国产品体管型号命名法.....	435
附录 2 半导体器件参数表.....	436
附2•1 常用二极管参数表	436
附2•2 常用硅稳压管参数表	438
附2•3 整流桥堆参数表	438
附2•4 常用双极型晶体管 (BJT) 参数表	439
附2•5 常用场效应晶体管 (FET) 参数表	448
附录 3 常用集成运算放大器参数表.....	451
附录 4 集成稳压器参数表.....	453
附4•1 多端输出可调式稳压器参数表	453
附4•2 三端输出固定式稳压器参数表	453
附4•3 三端输出可调式稳压器参数表	454
参考书目	455

第一章 半导体二极管及其电路

本章任务

1. 掌握偏置对PN结空间电荷层宽度的控制作用和不同偏置下二极管的伏安特性。
2. 掌握半导体二极管的模型及其电路分析方法，并了解其主要参数和使用注意事项。
3. 熟悉稳压管的稳压特性，了解其主要参数及使用注意事项。
4. 初步学会正确使用二极管、稳压管，并了解温度对二极管特性的影响。
5. 熟悉二极管、稳压管的具体应用电路：
 - (1) 熟悉单相桥式整流电路和电容滤波电路的工作原理，及其元件和器件的选择。了解脉动系数。
 - (2) 了解二极管限幅电路的输入与输出关系。
 - (3) 熟悉硅稳压管稳压电路的工作原理和限流电阻的选择。及其有分析、计算该电路的能力。

本书只讲半导体管，重点放在外特性上。而不深究内部的微观物理过程。本章讲完二极管后，接着讲基本分析方法，着力分析含二极管的典型电路。

集成电路是用半导体工艺，把管子、电阻、电容等元件和连线等作在同一块硅片上，构成完成一定功能的电子电路，即把材料、元件和电路三者制作在一起，形成不可分割的固体块，称为**集成电路**，或**固体组件**。它的焊点少、集成度高、引线短，因此体积小，性能和可靠性大大提高，安装调试时间缩短。按其功能可分为数字集成电路和模拟集成电路两大类。本书只讲模拟集成电路。而模拟集成电路又种类繁多，有集成运算放大器、集成功率放大器和集成稳压电源等，其中由于集成运算放大器（简称集成运放）具有较强的通用性和灵活性，因而在工程上获得极为广泛的应用。

如图2·20所示，是一个国产集成（运算）放大器的典型电路——F004（5G23），它由一个二极管，十个三极管和九个电阻构成，外加 $\pm 15\text{V}$ 电源。为了掌握集成运放的外部特性，必须对其中半导体器件内部的导电机构有所了解。众所周知，一块集成电路不论其功能多么复杂，内部包含的元、器件的数目如何多，它的导电原理都是基于半导体的PN结。因此，我们在学习具体电路之前，首先是从简单的半导体器件——半导体二极管的外特性及其内部的PN结讲起，以便为进一步展开模拟集成电路的讲解，打下初步基础。

1.1 半导体二极管

一个二极管 (diode) 有两个电极, 一个叫阳极 (也称正极), 以a表示, 另一个叫阴极 (也称负极), 以k表示, 常用的符号如图1.1所示。

为了了解二极管的特性, 用图1.2电路作一个实验: 若在图a电路中, 将二极管的阳极接到电源E的正极上, 阴极通过灯泡接到E的负极上, 即二极管加正向电压。这时, 管子处于导通状态, 呈现很小的电阻, 灯亮。

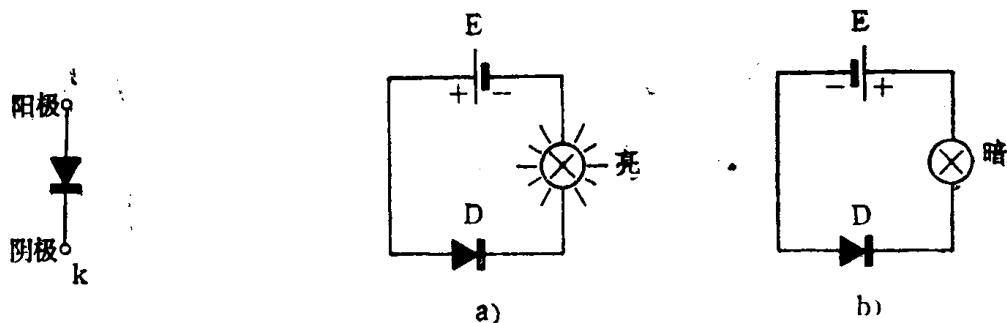


图 1.1 二极管的符号

图 1.2 半导体二极管电路

a) 正向导通 b) 反向截止

若在图b电路中, 将二极管的阳极接到电源E的负极上, 阴极通过灯泡接到电源E的正极上, 即二极管加反向电压。这时, 二极管处于截止状态, 呈现很大的电阻, 灯暗。

这就是二极管的单向导电性: 正向导通, 反向截止。

二极管为什么具有单向导电的特性呢? 这要从半导体二极管内部PN结的导电机理讲起。

**1.1.1 PN结

一、半导体

我们知道, 象锗和硅这样的半导体 (Semiconductor), 与银、铜等金属相比, 虽然都是固体, 但在导电性能方面的差异却很大。从表1.1可见, 纯净的硅的电阻率比银和铜约大上万亿倍。

表1.1 材料纯净, 温度 300K

材 料		电 阻 率 ρ [Ω -cm]	禁带宽度 E_G [ev] ^①
导 体	银 Ag	1.6×10^{-8}	0
	铜 Cu	1.67×10^{-8}	0
半 导 体	锗 Ge	0.46	0.66
	硅 Si	2300	1.11

① ev为电子伏

为什么导电性能会有这样大的差异呢? 这是由于银和铜原子中的价电子很容易从原子中脱离出来, 成为带负电荷的自由电子, (一个电子所带电荷量q为 1.6×10^{-19} 库仑) 起着导电作用。它们的禁带宽度 E_G 为零, 所有价电子都可能成为传导电流的载流子, 因此电阻率很低。锗和硅每个原子有四个价电子, 分别与晶体中4个相邻原子中的价电子组成

共价键 (晶体)。这些价电子需要具有足够大的能量, 才能从原子中挣脱出来, 成为自

由电子，所以价电子是束缚电子，不能传导电流，即不起载流子的作用。如表1·1所示，硅的禁带宽度 E_g 为1.11eV，即其价电子至少要具有 qE_g ($\approx 1.776 \times 10^{-19}$ 焦耳)的能量，才能从共价键中释放出来。因此，半导体的导电能力，比导体差得很多，但优于禁带更宽的绝缘体。不过，当温度上升时，由热能激发出来的载流子急剧增加，会使半导体的电阻率大大降低，即导电能力大大增强。

半导体的另一个特点，是传导电流的载流子除自由电子外，还存在有**空穴** (hole)。当电子从共价键中挣脱出来成为自由电子后，在共价键中就留下一个空穴。于是，其它相邻共价键中能量不够 E_g 的价电子，就可能跑过来填补这个空穴，而使空穴由原来位置转移到该相邻的共价键中。由于在空穴处缺少一个电子，且可以移动，所以实际上它相当于一个带正电荷 q 的载流子，也能起导电作用。只是在同一电场下，空穴和自由电子的流动方向相反。因此，由它们形成的电流则是相加的，如1·3所示。

此外，在纯净半导体中，由于自由电子和空穴这两种载流子受热激发总是成对地产生，它们相遇复合时也总是成对地消失，所以两者的数目总是彼此相等。这样的半导体，称为**本征半导体**。

(一) 本征半导体

如上所述，本征半导体中的电子密度 n 与空穴密度 p 总是相等的，通常用 n_i 表示，即

$$n = p = n_i \ominus$$

或写作 $np = n_i^2$ (1·1)

式中 n_i 代表在本征情况下的电子或空穴密度，其值是热激发和复合达到动态平衡的结果，它与温度 T 很有关系。本征硅的 n_i 值，可用 $n_i^2 = AT^3 e^{-BT}$ 来计算，式中 A 、 B 为常数，分别为 1.5×10^{45} 和 1.4×10^4 。图1·4表示本征硅的 n_i 与 T 的关系曲线。

当 $T = 300K$ 时，硅的 $n_i = 1.48 \times 10^{16}$ 个/ m^3 ，而当升到 $325K$ 时， n_i 将增加到 10^{17} 个/ m^3 。显然， n_i 受温度的影响很大，温度每增加 $10^\circ C$ ，硅的 n_i 将增加一倍以上。

由于室温下，热激发（亦称本征激发）产生的电子空穴对还不多，所形成的本征电流 I_s 还很小，以 μA 或 nA 计。电路中的本征电流见图1·3。

电阻率 ρ 与载流子密度 n_i 有关。 n_i 愈大，则 ρ 愈小。由于半导体中 n_i 随温度 T 急剧增加，所以其电阻率对温度很敏感；温度

\ominus n 和 p 分别为negative (负) 和positive (正) 的第一个字母代表带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴的密度。

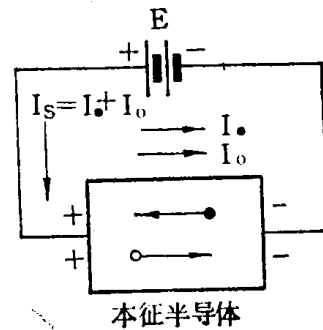


图1·3 半导体中本征电流

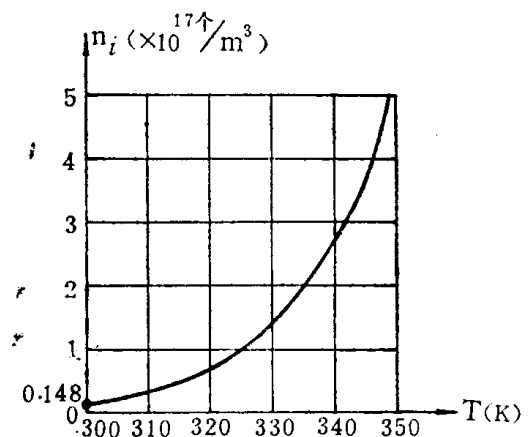


图1·4 本征硅中载流子密度 n_i 与温度 T 的关系

升高, ρ 急剧下降。同时, ρ 还与载流子在外加电场下沿电场方向漂移时的速度有关, 速度愈高, 则 ρ 愈低。银和铜电子密度几乎与温度无关, 其 ρ 的增加主要是由于温度升高时漂移速度有所降低所致。硅和锗等半导体则不同, 它们的 n_i 在一定温度范围内是按T的指数规律变化的, 它们的 ρ 近似与 n_i 成正比。就硅的温度每升高 10°C , n_i 增加约一倍而言, ρ 将降低到一半以下。

半导体器件的性能随环境温度变化, 会使电子电路的工作不恒定, 对应用不利, 需要加以克服。相反, 利用半导体 ρ 对温度变化的敏感性, 却可用来制成热敏电阻, 供温度的检测、控制和补偿之用。

同理, 光能辐射时, 能使半导体的 ρ 降低。借此, 可以制成光敏电阻, 用作光的测量和控制。

(二) 掺杂半导体

半导体的应用得以迅速发展, 并不在于本征半导体的电阻率较大, 或电阻率对温度的变化敏感。正相反, 这些特点对实际应用反倒不利。电阻率较大, 使本征半导体用处不多; 随温度变化, 使晶体管的工作不恒定, 则要设法克服, 以后将要讲到。

若在本征半导体中, 有意识地掺入微量的其他元素(杂质), 就可以明显地降低电阻率。这样的半导体, 称为**掺杂半导体**。掺入的杂质可以是三价的硼(B)、镓(Ga)或铟(In)等, 也可以是五价的磷(P)、砷(As)或锑(Sb)等。

1. **N型半导体**。当少量五价元素掺入四价的硅(或锗)中, 这时每个杂质原子的五个价电子只有四个能与相邻的4个硅原子的价电子分别组成共价键, 多出1个价电子没有相应的结合对象而成为多余电子。这些多余电子只要具有大约 0.05eV 的能量, 就能形成自由电子, 所以在室温下就可依靠热能激发, 几乎使掺入的每个杂质原子, 都贡献出一个自由电子, 而不产生空穴; 且不随温度而变。掺入的5价杂质原子, 由于少了一个电子, 而成为一个正离子留在所占的晶格位置上, 不能在外电场作用下作漂移运动。因此, 尽管这种正离子和空穴一样, 带有 $+e$ 的电荷, 但却不是载流子。

掺杂虽微但却能对半导体的导电性能影响极大。譬如在 300K 的硅($n_i = 1.48 \times 10^{16}$ 个/ m^3)原子密度为 5×10^{28} 个/ m^3 , 掺入杂质的原子密度为 10^{21} 个/ m^3 时, 仅占硅的5千万分之一, 不会影响硅的晶体结构, 但却能在室温下给出 10^{21} 个自由电子, 比本征硅在室温时大6万7千多倍($= 10^{21}/1.48 \times 10^{16}$)。显然, 电阻率大大降低、导电能力极大地提高。这时电子(以下均指自由电子)和空穴在这种掺杂半导体里的密度 n 和 p 就不再相等, 前者远大于后者, 即 $n \gg p$ 。也就是说, 电子是多数载流子(多子), 空穴是少数载流子(少子)。由于是带负电荷的电子占上峰, 故称这种半导体为**N型半导体**。所掺的5价杂质由于能给出电子, 故称之为施主杂质。

2. **P型半导体**。如在4价的硅(或锗)中掺入3价的杂质原子, 则得到**P型半导体**。此时, 由于 $p \gg n$, 空穴是多子, 而电子是少子, 掺入的杂质称为受主杂质。由于3价元素只有3个价电子, 所以在与其相邻的4个硅原子组成共价键时, 将在某一条共价键上产生一个空穴, 但同时并不产生电子。

二、PN结

在纯净的半导体中掺杂，目的不仅在改变电阻率，主要是获取所需的一些特殊的物理性能，即利用掺杂在一块半导体单晶芯片上，制成具有P型和N型两个区域的PN结（PN junction），并在此基础上生产出包括很复杂的大规模集成电路在内的各种各样的半导体器件。

(一) 势垒的形成

一个半导体二极管的管芯。厚约零点几毫米，长、宽各约1~2mm。图a，是二极管的核心PN结。图中：“·”和“o”分别代表电子和空穴，它们都是可以移动的载流子， \oplus 和 \ominus 代表正离子和负离子，它们都不能移动。在通常温度范围内，正负离子的密度由掺杂的多少决定。图1·5a所示是两者密度相等的特殊情况。图中忽略了大量中性原子中的电荷和少数载流子(少子)的存在。图a和图b给出了在PN结两端开路时，动态平衡状态下的电荷和电位分布。

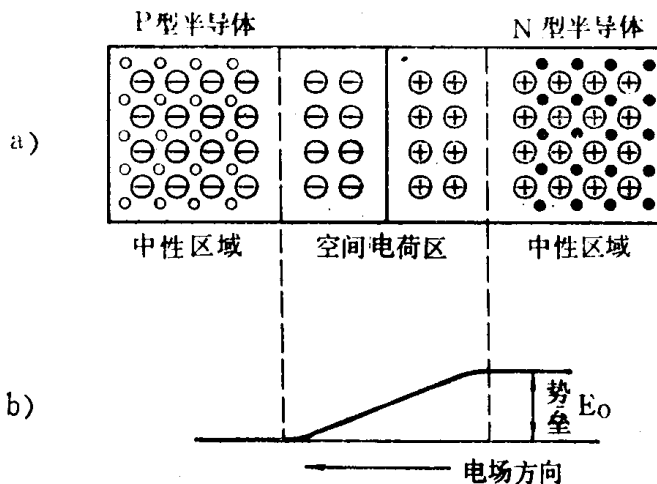


图1·5 PN结的示意图

- a) 开路时平衡状态下的电荷分布
- b) 开路时平衡状态下的电位分布

由于P型区一侧的多子空穴的密度比N型区一侧的少子空穴的大得多，而N型区一侧的多子电子的密度比P型区一侧的少子电子的大得多，所以这种密度的差异使得这些多子越过交界面分别向另一侧扩散。扩散的结果，在P型区靠近交界面处形成一个缺少空穴只剩下负离子的薄层，带负电；同理，在N型区靠近交界处形成一个缺少电子的正离子薄层，如图a所示。这个区域称为**空间电荷层**，是PN结的本质所在，其宽度一般只有零点几微米。由于此层内缺少载流子，所以也称为**耗尽层**。不过，这并不是说在这个层内的载流子真正耗“尽”了，其实它的密度还可能相当高，只不过跟p型区和N型区里多子密度相比，可以忽略罢了。

由于在空间电荷层中，一侧带正电荷，另一侧带负电荷，就象平行板电容器一样，在其间形成电场，电位分布如图b所示。因此，在P型区和N型之间形成一个电位壁垒，称为**势垒**或**位垒**，它阻碍着多子向另一侧扩散，只有具有能克服这一壁垒的足够能量的多子，才能越过交界面。这就是说，扩散的结果建立了它的对立面——阻止多子继续扩散的内部电场，其方向如图b所示。

为突出主要方面，图中没有画出少子。在需要考虑它们时，我们会看到，由于受到势垒电场力的加速，少子将向另一侧漂移。在PN结开路的情况下，势垒达到一定高度(如图1·5b中的 E_0)后，则由多子形成的扩散电流与由少子形成的漂移电流互相抵消，净电流为零，而呈现动态平衡状态。此时， E_0 约为零点几伏。

(二) 基本特性

PN结中势垒的存在，使它具有一种独特的性能——单向导电性。这种特性，反映了外加电压（偏置）对空间电荷层宽度的控制作用，亦即它的电阻取决于外加电压，如图1·2的实验所表明的那样。

1. 正向偏置。图1·6为PN结在外加正向偏置时的情况，此时P型区相对于N型区为正（P正N负），其中R是为限制流过PN结的正向电流 I_F 而设的限流电阻。这种情况称为**正向偏置**（简称**正偏**）。此时，由于正向电压 U_F 与势垒 E_0 方向相反，PN结的势垒从 E_0 降低到 $(E_0 - U_F)$ ；这时，由于P型区中的空穴更多地向右移动，部分地与空间电荷层中的负离子中和，而使其变薄，N型区侧也类此。空间电荷层变薄，新动态平衡的建立使势垒降低。因此，在正偏下可用小 U_F 得到大的 I_F ；相应的PN结的正向电阻 R_F 是小的，管子呈现**导通状态**。

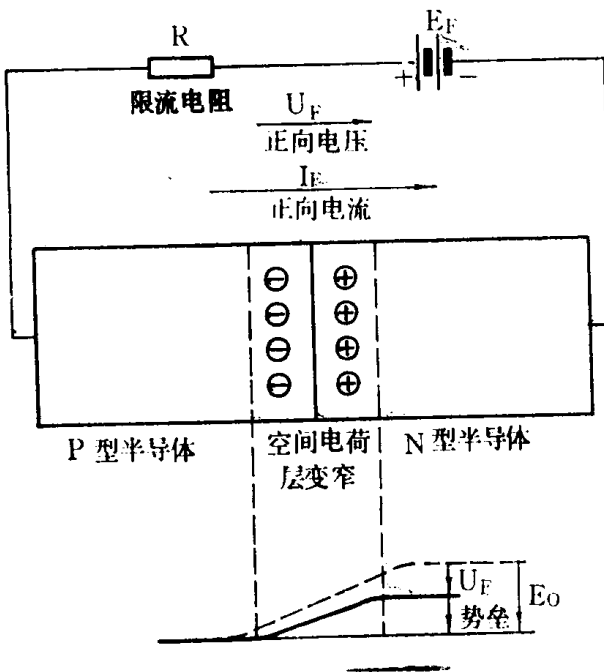


图 1·6 PN结加正向电压

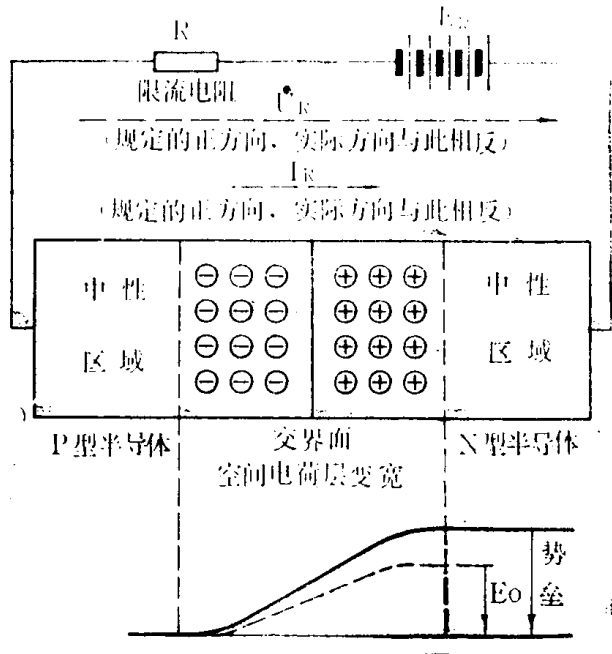


图 1·7 PN结加反向电压

2. 反向偏置。图1·7为PN结在外加**反向偏置** U_R （简称**反偏**）时的情况，此时P负N正，（极性与正偏时相反）， U_R 值为负，与势垒 E_0 方向相同，如图所示，势垒增高到 $(E_0 + U_R)$ ，空间电荷层展宽；反偏抑制了多子扩散，扩散电流大大削减，少子漂移占了优势。因此，外电路中的电流反向，反向电流 I_R 为负。由于少子为本征热激发所致，其密度很小，所以反向电流比正向电流小得多，且对温度敏感，温度上升时反向电流将剧增。当 $|U_R|$ 大于零点几伏时，漂移电流受少子密度限制， I_R 几乎与 U_R 无关，成恒流状态，好象电流饱和了，故称此电流为**反向饱和电流**，以 I_s 表示，其值很小。小功率硅二极管的PN结管芯的 I_s ，一般为 nA ($10^{-9}A$) ~ PA ($10^{-12}A$) 数量级。锗PN结的 I_s 较大，有时可达 μA 数量级。由于PN结反偏时， U_R 很大而 I_R 仍很小，所以它的反向等效电

阻 R_r 很大,呈现为阻断状态,即**截止**状态。

(三) 电压与电流关系方程式

上面讲了PN结的电流 i 与外加电压 u 的关系,为进一步了解电压与电流的相互依赖的
确切关系,还必须求出描述这种关系的方程式。由半导体理论可推演出如下方程式:

$$\begin{aligned} i &= I_s(e^{u/U_T} - 1) \\ &= I_s(e^{uq/kT} - 1) \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中 I_s 为反向饱和电流; U_T 为热电压(亦称温度的电压当量),等于 kT/q ,与 T 成正比,总为正值; k 为波兹曼常数($=1.38 \times 10^{-23} \text{J/k}$); q 为基本电荷($=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$); T 为PN结的绝对温度。按规定的正方向:当正偏时, u, i 为正;反偏时, u, i 为负。由式(1.2)可知

(1) 当 $u=0$ 时, $i=0$ 。

(2) 当 $u=+$ 值,且 $e^{u/U_T} \gg 1$ 时,则

$$i = I_s e^{u/U_T} \quad (1.2a)$$

此时,PN结呈低阻状态, i 随 u 按指数规律激增。

(3) 当 $u=-$ 值,且 $e^{u/U_T} \ll 1$ 时,则

$$i \approx -I_s \quad (1.2b)$$

此时, i 与反向电压 u 的大小无关,为PN结的反向饱和电流 I_s ,一般很小。因此,PN结呈高阻状态,近似恒流。

〔例1.1〕 已知一个硅PN结的 $I_s = 1 \text{PA}$, $T = 300\text{k}$ 。试问在正偏和反偏时, $|u|$ 应大于多少伏,按式(1.2a)和式(1.2b)近似计算所得的结果,与式(1.2)相比,误差不超过10%呢?

解 (1) 正偏时,用式(1.2a)近似式与式(1.2)相比,误差为10%时,则

$$\frac{e^{u/U_T} - (e^{u/U_T} - 1)}{e^{u/U_T} - 1} = 0.1$$
$$e^{u/U_T} = 11$$

得

由于, $T = 300\text{K}$ 时

$$U_T = \frac{kT}{q} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.256 \text{ V}$$
$$\approx 26 \text{ mV}$$

所以

$$u = U_T \ln 11 = 26 \text{ mV} \times 2.4 = 0.062 \text{ V}$$

即,只要 $u > 0.062 \text{V}$ 时,误差就将小于10%。

(2) 同时,在反偏时, u 和 i 均为负值,由式(1.2)和式(1.2b)相比,误差为10%时,则有如下关系

$$e^{u/U_T} = 11$$

即 $|u| = 0.062 \text{V}$ 。因此,只要 u 比 -0.062V 更负,用式(1.2b)近似式计算 i 值时,误差