

电子线路基础教程

DIAN
ZI XIAN LU JI CHU JIAO CHENG

王成华 王友仁 胡志忠 编著



科学出版社

内 容 简 介

本教材是根据电子技术的发展和教学的需要而编写的。主要内容有:半导体器件基础、放大器基础、集成运算放大器工作原理、集成运算放大器应用、反馈放大器、功率放大器、波形产生与变换电路、模拟乘法器及其应用、直流稳压电源、电子设计自动化软件(EWB)及其应用等。

本书由东南大学谢嘉奎教授、南京航空航天大学陈鸿茂副教授审阅。

本书简明扼要、深入浅出,便于自学,可作为高校工科信息工程、电气工程及自动化、计算机等专业教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子线路基础教程/王成华,王友仁,胡志忠编著.-北京:科学出版社,2000
ISBN 7-03-008563-9

I. 电… II. ①王… ②王… ③胡… III. 电子线路-教材
N. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 61888 号

2P38/37 04

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 10 月第 一 版	开本:710×1000 B5
2000 年 10 月第一次印刷	印张:24 1/2
印数:1—6 000	字数:461 000

定价:32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

前 言

电子线路或模拟电子技术是电类各专业的一门主干课程。由于电子信息技术的发展日新月异,新知识、新器件和新技术不断涌现,同时素质教育对本门课程的教学改革也提出了更高的要求,我们结合本校教育部立项的电工电子基地建设项目,编写了教材《电子线路基础教程》。

我们的编写原则是:抓住三基、精选内容、强调集成、着重应用。在具体内容上,具有如下特点:

(1) 在讲述半导体器件工作原理、特性曲线、性能参数的基础上,引出了半导体器件的模型,为电路分析及电路 CAD 打下基础;

(2) 在分析由三极管、场效应管构成的放大电路时,强调基本概念、基本工作原理及基本分析方法,为集成电路的学习打下坚实的理论基础;

(3) 在讲清集成运放基本单元电路和主要性能参数的基础上,强调集成运放的线性和非线性应用;

(4) 在分析负反馈放大器时,强调反馈的基本概念与深度负反馈放大器性能指标的估算;

(5) 正确处理与数字电路内容的衔接,在传统波形产生电路的基础上,增加了由门电路和集成芯片 555 构成的多谐振荡器等内容,使波形产生电路的内容更加完整;

(6) 介绍了当今流行的电路分析与设计软件 EWB,将 CAD 技术引入到课程中,为电子电路的仿真与自动化设计奠定基础。

为方便教与学,作者同时编写了相应的配套教材《电子线路基础教程——重点分析·例题·习题》,该书亦由科学出版社出版。

本书由王成华、王友仁确定编写大纲和编写内容,具体各章编写工作安排为:王成华编写第一、二、八、十章,王友仁编写第三、四、五、九章,胡志忠编写第六、七章及附录。

本书由东南大学谢嘉奎教授主审、南京航空航天大学陈鸿茂副教授审阅,他们认真负责地审阅了全稿,并提出了不少宝贵意见与建议,特此向他们表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,自始至终得到了南京航空航天大学沈嗣昌教授、陈晰副教授、李毓明副教授的关心与鼓励,研究生李明、陈昊、刘启明、金晓峰、储剑波、曲瀛、王雪峰、肖乐等在文字录入和绘图方面,做了大量工作,特此致谢。

由于我们的水平有限,加之时间比较仓促,书中错误和不足之处在所难免,敬请使用本教材的师生及其他读者,给予批评指正。

编 者

2000 年 3 月

于南京航空航天大学

本书常用符号表

一、电压和电流符号的规定

U_C, I_C	大写字母、大写下标,表示直流量
u_c, i_c	小写字母、小写下标,表示交流量瞬时值
u_C, i_C	小写字母、大写下标,表示总瞬时值
U_c, I_c	大写字母、小写下标,表示交流量有效值
U_{cm}, I_{cm}	大写字母、小写下标,表示交流分量幅值
$\dot{U}_c, \dot{I}_c$	大写字母上面加点、小写下标,表示正弦相量
$\Delta U_C, \Delta I_C$	表示直流电压和电流的变化量
$\Delta u_C, \Delta i_C$	表示总瞬时值电压和电流的变化量

二、基本符号

1. A_i, A_u	电流、电压增益
A_{us}	源电压增益
$\dot{A}_{usl}$	低频电压放大倍数复数量
$\dot{A}_{usm}$	中频电压放大倍数复数量
$\dot{A}_{ush}$	高频电压放大倍数复数量
A_r, A_g	互阻、互导增益
$A_{if}, A_{uf}, A_{rf}, A_{gf}$	反馈放大器的电流、电压、互阻、互导增益
A_{ud}	差模电压增益
A_{uc}	共模电压增益
2. B	BJT 的基极
$BW_{0.7}$	3dB 带宽
3. C	BJT 的集电极
C_B, C_D, C_J	分别指势垒电容、扩散电容和结电容
C_π, C_μ	分别指 BJT 的发射结和集电结电容
C_{dg}, C_{gs}, C_{ds}	分别指 FET 的分布电容
C_φ	相位补偿电容

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 4. D | 二极管,场效应管漏极 |
| D | 非线性失真系数 |
| D_Z | 稳压管 |
| 5. E | BJT 的发射极 |
| E, ϵ | 能量、电场强度 |
| E_{g0} | 半导体的禁带宽度 |
| 6. F | 反馈系数 |
| 7. f | 频率 |
| f_L | 低频截止(—3dB)频率 |
| f_H | 高频截止(—3dB)频率 |
| f_α, f_β | 分别指共基 BJT 和共射 BJT 的截止频率 |
| f_T | 特征频率 |
| 8. G | FET 的栅极 |
| g_m | 低频跨导 |
| 9. I, i | 电流通用符号 |
| $I_{EQ}, I_{BQ}, I_{CQ}, I_{DQ}$ | 分别指射、基、集、漏极直流工作点电流 |
| i_C, i_B, i_E, i_D | 分别指集、基、射、漏极总瞬时值电流 |
| i_s | 信号源电流 |
| I_{IO} | 输入失调电流 |
| I_{IB} | 输入偏置电流 |
| I_S | PN 结反向饱和电流 |
| I_{DSS} | 结型、耗尽型 FET 在 $u_{GS}=0$ 时的 I_D 值 |
| I_D | 二极管电流, FET 的漏极电流 |
| I_F, I_R | 分别表示正向电流、反向电流 |
| I_{ES} | 晶体管发射结反向饱和电流 |
| I_{CBO} | 发射极开路时的集电结反向饱和电流 |
| I_{CEO} | 基极开路时的穿透电流 |
| I_{CM} | 集电极最大允许电流 |
| I_{SE} | 门电路输入短路电流 |
| I_{RE} | 门电路反向漏电流 |
| 10. K | 热力学温度单位(开尔文) |
| k | 玻尔兹曼常数 |
| K_{CMR} | 共模抑制比 |

11. N	电子型半导体
n_i	本征半导体中电子浓度
n	杂质半导体中电子浓度
N_o	门电路扇出系数
12. P_C	集电极耗散功率
P_V	直流电源供给功率
P_T	BJT 的管耗
P_{CM}	集电极最大允许功耗
P	空穴型半导体
p_i	本征半导体中空穴浓度
p	杂质半导体中空穴浓度
13. $R_B, R_E, R_C, R_G, R, R_D$	分别指基、射、集、栅、源、漏极直流偏置电阻
R_s	信号源内阻
$R_F(R_f)$	反馈电阻
R_L	负载电阻
R_{IC}, R_{ID}	差模、共模输入电阻
R_{OC}, R_{OD}	差模、共模输出电阻
R_{off}	关门电阻
R_{on}	开门电阻
R_i, R_o	电路的交流输入和输出电阻
R_{if}, R_{of}	反馈电路的交流输入和输出电阻
$r_{bb'}, r_{b'e}, r_{b'c}, r_{ce}, r_e$	表示 BJT 的体电阻和结电阻
r_{gs}, r_{ds}	表示 FET 的动态电阻
r_z	稳压管的动态电阻
14. S	FET 的源极
S_R	运算放大器的转换速率
S_r	稳压系数
S_u	电压调整率
S_I	电流调整率
S_{rip}	纹波抑制比
S_T	输出电压的温度系数
15. T	晶体三极管符号
T	温度, 周期

T_r	变压器
t	时间
t_{pd}	门电路平均延迟时间
16. $U_{BQ}, U_{CQ}, U_{EQ}, U_{GQ}, U_{DQ}, U_{SQ}$	分别指相应电极直流工作点电位
$U_{BEQ}, U_{CEQ}, U_{GSQ}, U_{DSQ}$	分别指相应电极间直流工作点电压
$u_{BE}, u_{CE}, u_{GS}, u_{DS}$	分别指相应电极间总瞬时值电压
$u_i, u_o, u_{be}, u_{ce}, u_{gs}, u_{ds}$	分别指输入、输出和相应电极间交流电压分量
u_s, U_s	信号源电压及其有效值
$\dot{U}_s, \dot{U}_i, \dot{U}_o, \dot{U}_{be}, \dot{U}_{ce}, \dot{U}_{ds}, \dot{U}_{gs}$	分别指对应交流分量的复数值
u_{id}	差模输入电压
u_{ic}	共模输入电压
U_T	温度电压当量(热力学电压), 门电路的阈值电压
$U_{GS(th)}$	增强型 MOSFET 开启(阈值)电压
$U_{GS(off)}$	结型 FET 的夹断电压, 耗尽型 MOSFET 的阈值(或夹断)电压
U_L	低电平
U_H	高电平
U_{on}	开门电平
U_{off}	关门电平
U_{NL}	低电平噪声容限
U_{NH}	高电平噪声容限
U_{IO}	输入失调电压
U_{OO}	输出失调电压
U_{REF}	参考(基准)电压
$U_{(BR)}$	晶体管的击穿电压
$U_{CE(sat)}$	晶体管的饱和电压
U_φ	接触电位差
17. $V_{CC}, V_{DD}, +V_S$	正电源电压
$V_{EE}, V_{SS}, -V_S$	负电源电压
18. X, x	电抗
Y, y	导纳

Z, z	阻抗
三、其他符号	
$\alpha, \bar{\alpha}$	共基极交、直流电流传输系数(增益)
$\beta, \bar{\beta}$	共发射极交、直流电流放大系数(增益)
η	效率
φ	相位角
φ_m	相位裕量
G_m	增益裕量
ω, Ω	角频率
Q	静态工作点
Q	品质因数

目 录

第一章 半导体器件基础.....	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	3
1.2 PN 结与半导体二极管	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	6
1.2.3 PN 结的电容特性	9
1.2.4 半导体二极管及其参数	10
1.2.5 二极管的电路模型	12
1.3 特殊二极管	16
1.3.1 稳压二极管	16
1.3.2 变容二极管	17
1.3.3 发光二极管	18
1.3.4 光电二极管	18
1.4 半导体三极管	18
1.4.1 三极管的结构	18
1.4.2 三极管的工作原理	18
1.4.3 三极管的特性曲线	21
1.4.4 三极管的主要参数	25
1.4.5 三极管的小信号模型	26
1.4.6 三极管其他工作模式的等效电路	29
1.5 场效应晶体管	30
1.5.1 结型场效应管	31
1.5.2 绝缘栅场效应管	34
1.5.3 场效应管的主要参数	39
1.5.4 场效应管的小信号模型	39
1.5.5 场效应管与晶体三极管的比较	40
习题	41

第二章 放大器基础	45
2.1 放大器的基本概念与技术指标	45
2.1.1 放大器的基本概念	45
2.1.2 放大器的主要技术指标	46
2.2 共射放大器的工作原理与分析方法	49
2.2.1 共射放大器的工作原理	49
2.2.2 分析方法	50
2.2.3 温度对工作点的影响与分压式偏置电路	54
2.3 三种组态三极管放大器的分析与比较	57
2.3.1 共基放大器	57
2.3.2 共集放大器	58
2.3.3 三种组态三极管放大器的比较	60
2.4 场效应管放大器	61
2.4.1 场效应管放大器的偏置电路与直流分析	61
2.4.2 场效应管共源放大器的交流分析	63
2.4.3 三种组态场效应管放大器的比较	64
2.5 多级放大器	67
2.5.1 级间耦合方式	67
2.5.2 多级放大器的分析	70
2.6 放大器频率特性的分析	72
2.6.1 频率特性的伯德图表示法	72
2.6.2 共射及共基、共集放大器的频率特性	75
2.6.3 多级放大器的频率特性	86
习题	88
第三章 集成运算放大器	97
3.1 恒流源电路	98
3.2 差动放大电路	102
3.2.1 差动放大电路的组成与原理	102
3.2.2 差动放大电路的分析计算	105
3.2.3 大信号差模特性分析	109
3.3 通用型集成运算放大器	111
3.3.1 集成运放的基本组成	111
3.3.2 典型集成运放电路简介	113
3.4 集成运算放大器的主要技术参数	116
3.5 专用型集成运算放大器	119

3.6 理想集成运算放大器	123
习题	125
第四章 集成运算放大器应用	131
4.1 基本运算电路	131
4.1.1 比例运算电路	131
4.1.2 求和运算电路	135
4.1.3 积分和微分运算电路	138
4.1.4 对数和反对数运算电路	141
4.1.5 非理想集成运放运算电路的误差分析	143
4.2 有源滤波器	148
4.2.1 滤波电路的作用与分类	148
4.2.2 一阶有源滤波器	149
4.2.3 二阶有源滤波器	150
4.3 电压比较器	156
4.3.1 单门限比较器	157
4.3.2 迟滞比较器	159
4.3.3 窗口比较器	161
4.3.4 集成电压比较器	162
习题	164
第五章 反馈放大器	174
5.1 反馈的基本概念与分类	174
5.1.1 反馈的基本概念	174
5.1.2 反馈的分类与判断	175
5.1.3 反馈放大器的方框图表示及一般表达式	182
5.2 负反馈对放大器性能的改善	183
5.2.1 提高放大倍数的稳定性	183
5.2.2 减小非线性失真	185
5.2.3 扩展通频带	185
5.2.4 对输入电阻和输出电阻的影响	187
5.2.5 负反馈的正确引入原则	191
5.3 深度负反馈放大电路的分析计算	191
5.3.1 深度负反馈的特点	192
5.3.2 深度负反馈放大电路的计算	193
5.4 负反馈放大器的稳定性分析	197
5.4.1 产生自激振荡的原因及条件	197

5.4.2 常用的消振方法	200
习题	204
第六章 功率放大电路	213
6.1 概述	213
6.1.1 功率放大电路的用途和特点	213
6.1.2 功率放大电路提高效率的主要途径	214
6.2 互补推挽功率放大电路	217
6.2.1 乙类互补推挽放大电路	217
6.2.2 甲乙类互补推挽电路	221
6.2.3 单电源互补推挽电路	223
6.2.4 采用复合管的功率输出级	224
6.3 集成功率放大器	226
* 6.4 变压器耦合推挽功率放大电路	229
6.5 功率管的使用和保护	230
习题	231
第七章 波形产生与变换电路	235
7.1 正弦波振荡电路	235
7.1.1 正弦波振荡电路的基本工作原理	235
7.1.2 RC 正弦波振荡电路	237
7.1.3 LC 正弦波振荡电路	242
7.1.4 石英晶体振荡器	249
7.2 非正弦信号发生器	252
7.2.1 矩形波信号发生器	252
7.2.2 三角波信号发生器	260
7.2.3 锯齿波信号发生器	261
* 7.2.4 压控振荡器	262
7.3 集成多功能信号发生器	264
7.3.1 5G8038 的基本工作原理	264
7.3.2 5G8038 的应用电路	265
7.4 波形变换电路	267
7.4.1 二极管限幅电路	267
7.4.2 二极管箝位电路	269
7.4.3 施密特电路	271
7.4.4 单稳态电路	274
习题	279

第八章 模拟乘法器及其应用	287
8.1 模拟乘法器的基本概念	287
8.2 四象限变跨导模拟乘法器	288
8.3 模拟乘法器在运算电路中的应用	290
8.4 模拟乘法器在通信电路中的应用	293
习题.....	296
第九章 直流稳压电源	299
9.1 直流电源的组成	299
9.2 小功率整流与滤波电路	300
9.2.1 单相整流电路	300
9.2.2 滤波电路	302
9.3 线性直流稳压电路	305
9.3.1 稳压电路的主要指标	305
9.3.2 串联反馈式稳压电路	306
9.3.3 三端集成稳压器	312
9.3.4 单片 AC/DC 电源变换器	323
9.4 开关型直流稳压电源	325
9.4.1 开关型直流稳压电源的特点和分类	325
9.4.2 开关型直流稳压电源的工作原理	326
9.4.3 集成开关电源	329
9.5 晶闸管的工作原理及其应用	333
9.5.1 晶闸管的结构和工作原理	333
9.5.2 单相桥式可控整流电路	337
习题.....	340
第十章 电子设计自动化软件(EWB)及其应用	345
10.1 EWB 简介	345
10.2 EWB 的基本操作	350
10.3 EWB 的应用	352
习题.....	359
附录 集成门电路	364
主要参考文献	376

第一章 半导体器件基础

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

在自然界中,有的物质很容易导电,如铜、铝、铁、银等,我们称之为导体;有的物质不导电,如塑料、陶瓷、石英、橡胶等,称之为绝缘体;此外,还有另一类物质,其导电性能介于导体和绝缘体之间,我们称之为**半导体**。常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等,其中硅应用最广。

1.1.2 本征半导体

本征半导体就是纯净且晶格方向一致的半导体晶体。常用的半导体材料硅和锗的原子序数分别为 14 和 32,相应的结构如图 1.1.1(a)所示。它们的最外层电子都是 4 个,所以都是 4 价元素。外层的电子受原子核的束缚力最小,决定着物质的化学性质和导电能力,我们称之为价电子。研究半导体导电性能时常用价电子与惯性核组成的简化模型,惯性核由原子核和内层电子组成,带有四个正电子电荷量,如图 1.1.1(b)所示。

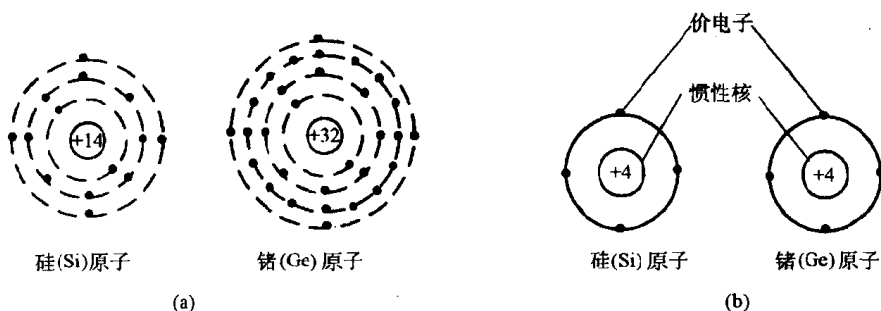


图 1.1.1 硅和锗原子结构模型

(a) 原子结构图 (b) 简化模型

硅或锗制成晶体后,原子之间靠得很近,每两个相邻原子之间共有一对价电子,从而形成了晶体中的**共价键结构**,如图 1.1.2 所示。

共价键中的电子,获得足够能量后才能挣脱共价键的束缚,成为**自由电子**。在

绝对零度($T=0\text{K}$)和无外界激发时,硅或锗晶体中没有自由电子存在。在有外界激发的情况下,例如常温下($T=300\text{K}$),少数价电子获得一定的能量,会挣脱共价键的束缚成为自由电子,这种现象称为**本征激发**。

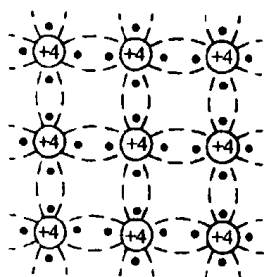


图 1.1.2 共价键结构

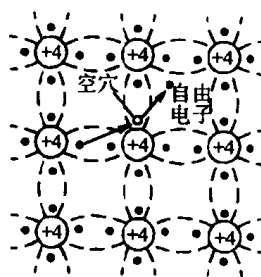


图 1.1.3 本征激发时电子与空穴的产生和移动

价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,就在原来共价键的位置上留下一个空位,我们称之为**空穴**。在外加电场的作用下,邻近的价电子很容易填补到这个空位上,从而在这个价电子原来的位置上留下新的空位,如图 1.1.3 所示。由于带负电的自由电子依次填补空穴的作用与带正电荷的粒子作反方向运动的效果相同,因此,可以把空穴看作带正电的载流子。空穴是人们根据共价键中出现空位的移动而虚拟出来的,实际上是共价键束缚电子移动而形成的。

因此,本征半导体中存在两种载流子——**自由电子和空穴**。在本征半导体中,自由电子和空穴是成对出现的,有一个自由电子,必定有一个空穴,故又叫做**电子-空穴对**。电子与空穴电荷量相等,极性相反。

实际上,在自由电子和空穴的产生过程中,还存在自由电子和空穴的**复合**,也就是自由电子在热骚动过程中和空穴相遇而释放能量,自由电子-空穴对消失。

在一定温度下,本征激发和复合在某一热平衡载流子浓度值上达到**动态平衡**。用 n_i 和 p_i 分别表示一定温度下本征半导体中自由电子和空穴的热平衡浓度,有

$$n_i = p_i \quad (1.1.1)$$

理论和实验证明,它们与温度 T 的关系可用下式表示:

$$n_i(T) = p_i(T) = A \cdot T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_{g0}}{2kT}} \quad (1.1.2)$$

式中 T 为绝对温度, k 是玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), A 是系数。对硅来说, $A = 3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$; 对于锗, $A = 1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ 。 E_{g0} 表示 $T=0\text{K}$ 时的**禁带宽度**,单位为 eV (电子伏特),硅的 $E_{g0}=1.1\text{eV}$,锗的 $E_{g0}=0.68\text{eV}$ 。

可以看出,自由电子和空穴的浓度随温度升高而增大,因而本征半导体的导电能力相应地随温度升高而增强。

在常温下,硅半导体中载流子浓度 $n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$,锗半导体中载流子

浓度 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ 。两种半导体中的载流子浓度与原子密度(约为 $10^{22} / \text{cm}^3$ 量级)相比,是微不足道的,所以两种半导体的导电性能都很弱,不能直接用来制造半导体器件。

1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素(如硼或铝等)或五价元素(如磷或砷等),其导电性能将发生明显变化。掺入的元素称为**杂质**,掺杂后的半导体称为**杂质半导体**。掺入的三价元素称为**受主杂质**,掺杂后的半导体称为**空穴型(或称 P 型)半导体**。掺入的五价元素称为**施主杂质**,掺杂后的半导体称为**电子型(或称 N 型)半导体**。

1. N 型半导体

在本征硅半导体中,掺入微量的五价元素磷后,所形成的 N 型杂质半导体如图 1.1.4 所示。

磷的 5 个价电子,有 4 个与相邻的硅原子构成共价键,剩下 1 个价电子未构成共价键,仅受磷原子核的束缚,在常温下就能被激发成自由电子,因而磷原子成为带负电荷的离子。此时自由电子的浓度将远远大于本征激发时自由电子的浓度。同时,由于复合,空穴浓度将远远小于本征激发时空穴的浓度。结果是总的自由电子数远远大于空穴数,因此,通常将自由电子称为**多数载流子**,简称**多子**,空穴称为**少数载流子**,简称**少子**。

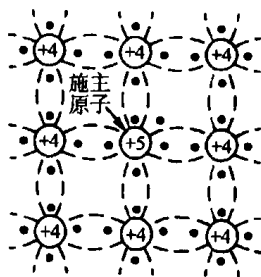


图 1.1.4 N 型半导体示意图

下面我们来计算 N 型半导体中两种载流子的浓度。 n 和 p 分别表示电子和空穴的浓度, N_d 为施主杂质的浓度。首先,两种载流子浓度必定满足**热平衡条件**,即**质量作用定律**,也就是两种热平衡载流子浓度的乘积恒等于本征载流子浓度的平方,即

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1.1.3)$$

其次,整块半导体必定满足**电中性条件**。假设在室温时杂质原子已全部电离,则带负电的自由电子浓度恒等于带正电的施主杂质离子浓度和空穴浓度之和,即

$$n = p + N_d \approx N_d \quad (1.1.4)$$

通常满足 $N_d \gg p$, 所以自由电子的浓度近似等于施主杂质的浓度,与温度无关。空穴的浓度与施主杂质的浓度成反比 ($p \approx n_i^2 / N_d$), 且随温度的升高而迅速增大。