

晶体管

电子学

《电子学·上册》

程永萱 周德新 编

上海交通大学出版社

SHANG HAI JIAO TONG DA XUE CHU BAN SHE

内 容 简 介

《电子学》分为《晶体管电子学》、《数字集成电子学》和《模拟集成电子学》上、中、下三册出版。上册《晶体管电子学》包括晶体管基础、耦合与偏置、小信号放大器、负反馈放大器、正弦波振荡器、功率放大器、小功率直流电源；中册《数字集成电子学》包括晶体管开关电路、逻辑分析基础、集成逻辑门、组合逻辑电路、触发器、计数器和移位寄存器、脉冲发生与整形电路、存贮器、微处理器与微型计算机；下册《模拟集成电子学》包括模拟集成电路的基本单元电路、集成运算放大器的典型电路、运算放大器应用的基础理论、运算放大器的基本应用以及其他模拟集成电路。书中每章均附有一定的例题、习题和思考题，并有小结。

本书可作为工科院校自动化、电力和其他相近专业开设“电子技术基础”课程的教材或教学参考书，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

晶 体 管 电 子 学 (电子学上册)

上海交通大学出版社出版
新华书店上海发行所发行
浙江上虞汤浦印刷厂排版
上海交通大学印刷厂印装

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 21.25 字数 523000

1987年1月第1版 1987年5月第1次印刷

印数 1—5000

统一书号 ISBN7-313-00010-3/TN3 科技书目 149-318

定价：3.50 元

序

《电子学》分为《晶体管电子学》、《数字集成电子学》、《模拟集成电子学》三册,是在1982年所编讲义的基础上修订而成。

为了适应电子技术的发展,全书在力求保证基本概念、基本原理及基本分析方法阐述的前提下,着重叙述了集成电路。限于教学时数和篇幅,本书没有包括晶闸管(可控硅)和调制、解调部分。

在修订过程中,充分考虑了兄弟院校和教研室的老师们以及同学们对原来讲义的一些宝贵意见。在此对他们表示衷心的感谢。我们特别要感谢清华大学童诗白教授和上海工业大学顾立篋教授给予我们的关心和帮助。

由于水平所限,书中缺点、错误和不足之处在所难免,我们诚挚地期待着读者的批评指正。

编 者

1986年3月

前 言

《晶体管电子学》是全书的上册，也是学习集成电路的基础。本书讨论常用半导体器件的原理、特性与电路模型，环绕基本的分立元件电路来阐述放大、振荡、整流的基本概念，包括晶体管基础、耦合与偏置、低频小信号放大器、负反馈放大器、正弦波振荡器、低频功率放大器和小功率直流电源等七章。

在第一章中，以半导体物理的结论为基本原理，说明二极管、稳压管、双极型晶体管和场效应管的原理、特性和参数；从电路分析的需要出发，导出它们常用的电路模型。

第二章讨论电子电路重要的共性问题——耦合和偏置电路，说明它们的功能和对电子电路性能的影响。

第三章着重讨论 RC 耦合共射、共集、共基三种基本组态小信号放大电路的性能和典型电路，阐述放大器的性能指标与电路结构关系的基本概念。

第四章讨论负反馈的基本概念，着重于负反馈的判别、对放大器性能的影响以及负反馈放大器的稳定性问题和基本的相位补偿方法。本章是了解掌握电子电路的核心内容之一。

第五章从产生稳定的正弦波振荡的必要和充分条件出发，讨论正弦波振荡器的基本概念及典型电路。

第六章阐述功率放大器的特点、性能指标和典型电路。

第七章讨论单相整流电路、电容性滤波器和串联型稳压电路的基本概念和基本电路。

为了适应不同程度的要求，用星号“※”、小字的方式表示该部分为附加内容或比较深入的内容，可作为阅读材料处理。

原讲议是由程永萱、周德新编写的，参加这次修订工作的有程永萱（第一章一、二节）、何绍雄（第一章第四节和第二、三章）、贾学堂（第一章第三节和第四、五章）、周德新（第六、七章），由程永萱负责定稿。

编 者

1986年3月

本书常用符号说明

- A** 增益或放大倍数的通用符号,当信号为正弦波时也表示复数量;加上下标字母表示各种不同的增益,例如:
- A_i ($A_i = \frac{i_o}{i_i}$) 电流增益的通用符号,当信号为正弦波时, $A_i = \frac{I_o}{I_i}$ 表示复数量
- A_v 放大器空载时的电压增益
- A_{Vl} 放大器带载时的电压增益
- A_f 反馈放大器的闭环增益
- A_{vsf} 计入信号源内阻和空载时的反馈放大器闭环电压增益(有时下标省略,用 A_{vf} 表示)
- A_{vm}, A_{vo} 放大器带载时的中频区电压增益
- A_{vh} 放大器带载时的高频区电压增益
- A_{vl} 放大器带载时的低频区电压增益
- a** 二极管的阳极(正极)
- b** 双极型晶体管(三极管)的基极
- C** 电容的通用符号;加上下标表示各种不同的电容,例如:
- C_D PN结的扩散电容
- C_B PN结的势垒电容
- C_j 结电容
- C_e 发射极电路中的旁路电容
- C_i 输入电容
- C_o 输出电容
- C_{ob} 共基接法时双极型晶体管的输出电容
- C_{μ} 双极型晶体管混合 π 型模型中的集电极等效电容
- C_{π} 双极型晶体管混合 π 型模型中的发射结等效电容
- c** 双极型晶体管的集电极;二极管的阴极(负极)
- D** 二极管
- D** 扩散系数
- D_Z 稳压管
- d** 场效应管的漏极
- E** 电场强度
- E_g 禁带宽度
- e** 双极型晶体管的发射极
- F** 反馈系数的通用符号,当信号为正弦波时也表示复数量;附上下标字母可表示各种不同的反馈系数,例如:
- F_v ($F_v = \frac{v_f}{v_o}$) 电压反馈系数,是反馈电压(反馈网络的输出电压) v_f 与放大器输出电压

(反馈网络的输入电压) v_o 之比;当信号为正弦波时, $F = \frac{V_f}{V_o}$ 表示复数量

F_i ($F_i = \frac{i_f}{i_o}$) 反馈电流与输出电流之比

F_v ($F_v = \frac{v_f}{i_o}$) 反馈电压与输出电流之比

F_o ($F_o = \frac{i_f}{v_o}$) 反馈电流与输出电压之比

f 频率的通用符号;加上下标字母表示各种不同的频率,例如:

f_h 放大电路的上限(下降 3dB)频率

f_l 放大电路的下限(下降 3dB)频率

f_{hf} 放大电路有反馈时的上限频率

f_{lf} 放大电路有反馈时的下限频率

f_0 振荡频率

f_α 双极型晶体管共基接法时电流放大系数 α 的上限频率

f_β 双极型晶体管共射接法时电流放大系数 β 的上限频率

f_T 双极型晶体管的特征频率,即共射接法下电流放大系数 $\beta = 1$ 时的频率

f_M 双极型晶体管的最高振荡频率

G 固定电导的通用符号

g 场效应管的栅极

g 微变电导的通用符号;

g_m 双口有源器件的跨导(互导)

$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ 双口网络的混合参数

I, i 电流的通用符号;加上下标字母表示各种不同的电流,例如:

I_{CQ} 集电极静态(直流)电流

i_o 集电极电流交流分量的瞬时值

i_c 集电极电流的总瞬时值(包含了交、直流分量)

I_c 集电极电流交流分量的有效值,当交流分量为正弦波时也表示正弦电流的复数量

I_{cmax} 集电极电流交流分量的最大值

i_{cmax} 集电极总电流的最大值

i_{cmin} 集电极总电流的最小值

ΔI_c 集电极电流的变化量

I_{CC} 集电极-地回路中直流电源的直流电流

I_s 信号源电流的有效值,当信号为正弦波时,也表示复数量

I_{CEO} 基极开路时 c-e 间的穿透电流

J 电流密度

K 绝对温度单位

k 玻耳兹曼常数

L 负载;电感;自感

l	长度
M	互感
N	电子型半导体
n_i	电子浓度
NF	噪声系数
P	空穴型半导体
P	功率通用符号
p	瞬时功率; 空穴浓度
	表示功率时, P, p 加上标字母表示各种不同的功率, 例如:
P_i	输入交变功率
P_o	输出交变功率
P_c	集电极的损耗功率
p_c	集电极的瞬时损耗功率
P_{CC}	集电极-地回路中直流电源给出的功率
Q	电荷; 品质因数; 静态工作点
q	电子电荷
R	固定电阻的通用符号
r	微变电阻的通用符号
	R, r 加上标字母表示各种不同的电阻, 例如:
R_C	接到集电极的固定电阻
R_B	接到基极的固定电阻
R_E	接到发射极的固定电阻
R_S	接到源极的固定电阻
R_G	接到栅极的固定电阻
R_D	接到漏极的固定电阻
R_L	负载电阻
r_s	信号源内阻
r_{be}	共射接法时双极型晶体管基极-发射极间的微变电阻
r_{be}'	发射结的微变电阻
r_{ce}	共射接法时双极型晶体管集电极-发射极间的微变电阻
r_i	输入电阻
r_o	输出电阻
r_{if}	有反馈时的输入电阻
r_{of}	有反馈时的输出电阻
S	整流电路的脉动系数
s	复频率变量
T	温度(绝对温度以 K 为单位, 摄氏温度用 $^{\circ}\text{C}$ 表示)
Tr	变压器
t	时间

V, v	电压的通用符号; 加上下标字母表示各种不同的电压(与 I, i 的表达方式类同)
V_s	信号源电压的有效值, 当信号为正弦波时也表示复数量
V_i	输入电压的有效值, 当信号为正弦波时也表示复数量
V_o	输出电压的有效值, 当信号为正弦波时也表示复数量
V_{th}	二极管、三极管的门限电压
V_T	热电压; 增强型场效应管的开启电压
V_P	耗尽型场效应管的夹断电压
X	固定电抗的通用符号
x	微变电抗的通用符号
Y	固定导纳的通用符号
y	微变导纳的通用符号
Z	固定阻抗的通用符号
z	微变阻抗的通用符号
α	双极型晶体管共基接法时的电流放大系数, 即 $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
β	双极型晶体管共射接法时的电流放大系数, 即 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
$\bar{\beta}$	共射接法时, 不考虑穿透电流时的直流电流放大系数, 即 $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$
γ	稳压电路的稳压系数
η	效率
δ	倾斜率; 厚度
σ	电导率
τ	时间常数
φ	相角
ω	角频率
λ	沟道宽长比
μ	载流子迁移率

目 录

第一章 晶体管基础

1.1 半导体物理的基本概念	1
1.1.1 什么是半导体	1
1.1.2 半导体的导电机构	2
1.1.3 PN 结	7
1.1.4 金属和半导体的接触	12
1.2 二极管：结构、特性、电路模型和参数	13
1.2.1 二极管的结构和特性	13
1.2.2 二极管的电路模型	15
1.2.3 稳压管的电路模型	22
1.2.4 二极管和稳压管的主要参数	24
1.3 双极型晶体管：原理、特性、电路模型和参数	26
1.3.1 双极型晶体管的原理和结构	26
1.3.2 双极型晶体管的埃伯斯-摩尔方程和模型	32
1.3.3 双极型晶体管的特性曲线	33
1.3.4 双极型晶体管电路的图解分析	37
1.3.5 双极型晶体管的小信号低频 h 参数模型	42
1.3.6 双极型晶体管的小信号混合 π 型模型	45
1.3.7 电流放大系数与频率的关系	47
※1.3.8 双极型晶体管的噪声	50
1.3.9 双极型晶体管的参数	50
1.4 场效应晶体管：原理、特性、电路模型和参数	56
1.4.1 结型场效应管的原理和特性	56
1.4.2 MOS 场效应管的原理和特性	61
1.4.3 场效应管的小信号电路模型	63
1.4.4 场效应管的参数	65
本章小结	68
习题与思考题	68

第二章 耦合与偏置

2.1 耦合电路	74
2.1.1 采用耦合电路的必要性	74
2.1.2 耦合电路的分类	74
2.1.3 多级放大器的耦合	76
2.2 双极型晶体管的偏置电路	77

2.2.1	直流工作点的选择和温度漂移	77
2.2.2	固定偏置电路	79
2.2.3	电压反馈偏置电路	80
2.2.4	电流反馈偏置电路	83
※2.2.5	双管直接耦合单元电路	86
※2.2.6	不稳定系数——工作点漂移的定量分析	88
2.3	场效应管的偏置电路	94
2.3.1	场效应管偏置电路的一般考虑	94
2.3.2	耗尽型场效应管的偏置电路	95
2.3.3	增强型 MOS 场效应管的偏置电路	98
本章小结		100
习题与思考题		101

第三章 低频小信号放大器

3.1	小信号放大器概述	107
3.1.1	什么是小信号放大器	107
3.1.2	小信号放大器的主要性能指标	108
3.1.3	频率特性曲线和波特图	111
3.2	共射放大器	119
3.2.1	中频区的性能	120
3.2.2	低频区的性能	121
3.2.3	高频区的性能	125
※3.2.4	增益带宽积	129
※3.2.5	阶跃响应	130
3.3	共基放大器	134
3.3.1	中频区的性能	134
3.3.2	低频区的性能	136
3.3.3	高频区的性能	137
3.4	共集放大器	138
3.4.1	共集放大器的一般分析	138
3.4.2	提高射极输出器输入电阻的方法	143
3.5	场效应管放大器	145
3.6	多级放大器	145
※3.6.1	中频总增益和频率响应	147
※3.6.2	上限截止频率 f_{hm}	147
※3.6.3	下限截止频率 f_{lm}	149
※3.6.4	多级放大器的阶跃响应	151
3.7	增宽频带的方法	151
本章小结		153
习题与思考题		154

第四章 负反馈放大器

4.1 反馈的基本概念	161
4.2 反馈放大器的基本组态	164
4.3 反馈放大器的框图分析法	168
4.3.1 反馈放大器的增益——基本反馈方程	169
※4.3.2 负反馈放大器的输入和输出阻抗	170
4.3.3 反馈放大器框图分析法的一般规则和步骤	175
4.4 负反馈对放大器性能的改善	184
4.4.1 提高增益的稳定性	184
4.4.2 减小非线性失真	186
※4.4.3 抑制放大器内部的噪声和干扰	187
4.4.4 增宽频带	188
4.5 反馈放大器稳定性的波特判据	190
4.6 反馈放大器的相位补偿	196
4.6.1 窄带滞后补偿	197
4.6.2 宽带滞后补偿	200
※4.7 负反馈放大器的实例	202
本章小结	205
习题与思考题	206

第五章 正弦波振荡器

5.1 正弦波振荡器的基本概念	215
5.1.1 产生正弦波振荡的条件	215
5.1.2 振荡器的起振和振幅稳定	220
※5.1.3 振荡的振幅	223
※5.1.4 振荡频率和频率稳定性	224
5.2 LC 正弦波振荡器	226
5.2.1 变压器反馈式 LC 振荡器	226
5.2.2 三点式 LC 振荡器	228
5.3 RC 正弦波振荡器	230
※5.3.1 RC 移相式振荡器	231
5.3.2 RC 桥式振荡器	233
5.4 石英晶体振荡器	235
5.4.1 石英谐振器	235
5.4.2 并联型晶体振荡器	236
5.4.3 串联型晶体振荡器	237
5.4.4 低频晶体振荡器	238
本章小结	239
习题与思考题	240

第六章 低频功率放大器

6.1 概述	246
6.2 单管甲类功率放大器	248
6.2.1 共射极单管甲类功率放大器	248
6.2.2 共基和共集功率放大的主要特点	256
6.3 变压器耦合乙类推挽功率放大器	257
6.4 互补对称功率放大器	264
※6.5 功率晶体管的散热和二次击穿	269
6.5.1 功率管的散热	269
6.5.2 晶体管的二次击穿	271
※6.6 VMOS 功率场效应管	273
本章小结	275
习题与思考题	276

第七章 小功率直流电源

7.1 概述	281
7.2 纯电阻负载单相整流电路	282
7.2.1 半波整流电路	282
7.2.2 全波整流电路	285
7.2.3 桥式整流电路	288
7.3 滤波器	289
7.3.1 电容滤波	290
7.3.2 π 型滤波	293
7.4 倍压整流电路	295
7.5 稳压电路	296
7.5.1 稳压管稳压电路	297
7.5.2 串联型晶体管稳压电路	302
7.5.3 串联型稳压电路的几种改进措施	305
本章小结	308
习题与思考题	309
附录一 国产半导体器件型号的命名方法	313
附录二 理想 PN 结方程	314
附录三 双极型晶体管的埃伯斯-摩尔方程	316
附录四 反馈系统的框图表示法	318
参考文献	325

第一章 晶体管基础

内 容 提 要

在晶体管电路中,除了我们熟悉的电阻、电容、电感这些电路元件外,其主要元件是半导体器件。因此,研究晶体管电路进而学习集成电路,首先就要了解半导体器件的工作原理、特性、参数以及在分析电路时处理它们的方法。

目前已经研制出多种半导体器件,其中最常用和最重要的是二极管、稳压管、双极型晶体管(BJT)、结型场效应管(JFET)和金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)。这些器件常通称为晶体管。本章引用半导体物理的一些结论,阐明上述这些器件的原理、特性;从非线性电路图解析法入手,着重讨论采用解析法时它们常用的电路模型,然后介绍这些器件的参数。

1.1 半导体物理的基本概念

对晶体管原理和特性的讨论,需要论述器件内部的导电过程,然后给出器件各个电极电压和电流之间的关系,这就要用到半导体物理的知识。半导体物理以量子力学为基础,从固体能带理论来阐明半导体的导电过程和规律,是近代电子学的主要基础之一,对于器件的研制尤为重要。由于本书的主要目的是研究晶体管的应用,因此我们不准备对半导体物理作详细的论述,只是不加证明地引用半导体物理中的一些结论,并把这些结论看作是基本原理,然后在此基础上开展对晶体管的讨论。读者如需进一步了解这些基本原理,可以参阅有关的专门论著。

1.1.1 什么是半导体

最初,人们发现许多物质的导电性能介于导体和绝缘体之间,其电阻率大约为 $(10^6 \sim 10^{-3}) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内,因而称这类物质为半导体。以后的进一步研究表明,仅从电阻率的大小来区分导体、半导体和绝缘体是不严格的,半导体还具有其他重要特征,例如:

1. 半导体的电阻具有负的温度系数,其导电能力随温度升高而迅速增加。
2. 半导体的导电能力随所含的微量杂质元素而发生显著的变化。例如,在纯净硅中掺入一百万分之一的微量杂质元素,其室温时的电阻率比纯净硅几乎降低一百万倍。
3. 半导体的导电能力随光照(包括辐射)而发生显著变化或者产生光电压。
4. 半导体的导电能力还因电场、磁场的作用而发生变化,等等。

现在用来制造半导体器件的材料有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等,以硅的应用为最多。这些材料都是晶体,晶体管的名称就由此而来。在晶体中,原子按一定的规律周期性地重复排列,形成一个个格点,我们称之为晶格。如果晶体中包含有许多小的晶粒,而晶粒间的排列取向又是没有规则的,这样的晶体叫做多晶;若晶体本身是一颗单一的大晶粒,则称之为单晶。

制造晶体管的主要材料是硅和锗的单晶体。为此，我们将针对硅和锗单晶体来叙述半导体物理的基本结论。

1.1.2 半导体的导电机构

1. 半导体中的载流子

(1) 电子和空穴

所谓载流子就是运载电荷的粒子，载流子的定向运动构成了半导体的电流。

半导体有两种载流子：带负电荷 $-q$ 的“自由电子”和带正电荷 $+q$ 的“空穴”。它们都能在半导体中自由移动。

电子和空穴通常是由热激发产生的。当晶体温度 T 不是绝对零度 ($0\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$) 时，晶体就具有一定的热能，热能会在晶体中激发出电子和空穴。温度越高，热激发也越强。

注意，空穴并不是失去电子后的晶体原子。在固体中原子不能移动，失去电子的晶体原子叫做惯性核心。

根据晶体材料是否纯净或含有杂质元素，电子和空穴的数量可以相同，也可以不等。

(2) 本征半导体

本征半导体就是纯净的半导体。在纯净半导体中，电子和空穴是成对地产生的，因此电子和空穴的数量相等，或者说电子和空穴的浓度(单位体积中的数量)相等。

电子和空穴产生后，将在晶体中作杂乱无定向的热运动，电子和空穴一旦相遇就会复合而消失。载流子从产生到复合之间的平均存在时间称为载流子的寿命。温度一定时，电子和空穴的产生与复合将到达动态平衡，因而纯净半导体中就存在着一定的平衡电子浓度和平衡空穴浓度，我们分别用 n_i 和 p_i 来表示。 n 是 negative 的第一个字母，表示平衡电子浓度； p 是 positive 的第一个字母，表示平衡空穴浓度；下标 i 是 intrinsic 的第一个字母，表示是本征半导体。

温度越高，平衡载流子的浓度也越高。分析表明，本征半导体载流子浓度和温度的关系为

$$n_i = p_i = K_1^{1/2} T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1.1.1)$$

式中：

T 是绝对温度，单位为 K

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ，即玻耳兹曼常数

e 是自然对数的底

K_1 和 E_g 是与半导体材料有关的常数。 E_g 是激发出电子-空穴对所需的最小能量，在半导体能带理论中，称为禁带宽度。硅和锗的 E_g 分别为 1.20eV (电子伏) 和 0.78eV 。

式(1.1.1)表明，当温度一定时，纯净半导体中的载流子浓度就由半导体材料本身的特征参数决定，故而纯净半导体也称为本征半导体。

应当注意，式(1.1.1)还表明了半导体的载流子浓度随温度上升而迅速上升，所以半导体的电阻具有负温度系数。图 1-1-1 表示本征型硅和锗中 n_i 与温度的关系。可以算得，在室温 300K ($\approx 27^\circ\text{C}$) 时，本征硅和锗的载流子浓度为

$$\text{硅: } n_i = p_i = 1.48 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} \quad (1.1.2a)$$

$$\text{锗: } n_i = p_i = 2.36 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \quad (1.1.2b)$$

硅和锗的常数 K_1 的数量级相同，可是锗的 E_g 较低，因此室温时锗的载流子浓度要比硅大一千余倍，但温度对锗的载流子浓度和导电能力的影响也比硅为大，这就限制了锗的应用。

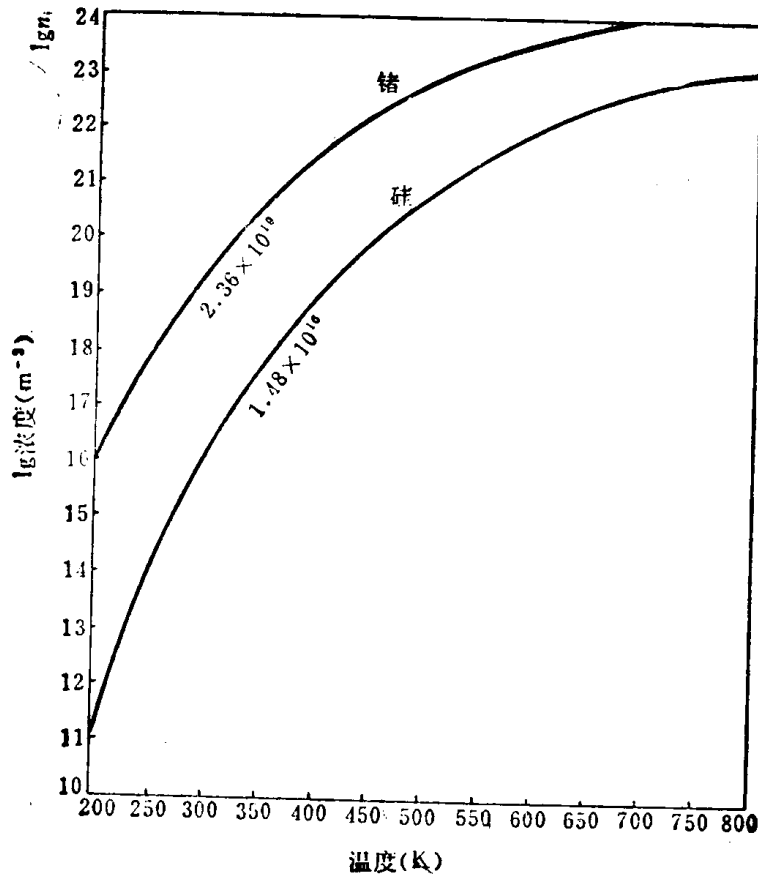


图 1-1-1 n 与温度的关系

除了热激发外，光和辐射线也会在半导体中激发出载流子，因此半导体具有光敏特性且对辐射敏感，所以除光电器件外，通常半导体器件都应对光加以遮蔽，并注意避免其他射线的照射。

(3) 杂质半导体

如果在纯净的四价元素硅和锗中，有选择地掺入某种微量杂质元素，就能极大地提高它们的载流子浓度，从而大大增强它们的导电能力。

(i) N 型半导体

若我们掺入微量的五价杂质元素，例如磷或锑，则一些晶格中的硅或锗原子就被五价杂质元素的原子所取代。这些五价杂质元素原子将会提供额外的自由电子，结果使这种杂质半导体中的电子浓度将大于空穴浓度，即有 $n > p$ ，故称之为 N 型半导体，并把电子和空穴分别称为 N 型半导体中的多数载流子（简称为多子）和少数载流子（简称少子），称五价杂质元素为施主杂质。

(ii) P 型半导体

如果在硅和锗中掺入微量的三价杂质元素，如硼和镓等，则三价杂质元素原子就取代了一些晶格中的硅或锗原子，三价杂质元素原子能够提供额外的空穴，结果使这种杂质半导体中的空穴浓度大于电子浓度，也即有 $p > n$ ，空穴成为多子，电子成为少子。因此这种杂质半导体叫做

P 型半导体,三价杂质元素则叫做受主杂质。

当温度在 50K 以上时,无论是 N 型半导体还是 P 型半导体中因掺入杂质而增加的电子浓度或空穴浓度就几乎等于掺入的杂质元素浓度。在硅晶体中,硅原子浓度的数量级为 10^{23} m^{-3} ,若掺入百万分之一的五价杂质元素,则杂质元素原子浓度就是 10^{22} m^{-3} ,这也是在常温下杂质元素提供的载流子浓度数量级。与式(1.1.2a)本征硅的电子浓度 n_i 比较,可见掺有一百万分之一杂质元素的硅,其载流子浓度约为本征硅的一百万倍,所以杂质元素对半导体的导电能力有着巨大的影响。更为重要的是,将 N 型半导体和 P 型半导体结合起来,能够做成具有各种特殊性能的半导体器件,以后我们就会看到这一点。

由上所述,如设施主杂质元素的浓度为 N_D^* ,受主杂质元素的浓度为 N_A^{**} ,则 N 型半导体中的电子浓度 $n \approx N_D$,P 型半导体中的空穴浓度 $p \approx N_A$ 。分析表明,杂质半导体中两种载流子的浓度虽不相同,但是两者的乘积总等于本征半导体载流子浓度的乘积,即

$$np = n_i p_i = n_i^2 = K_1 T^3 e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (1.1.3)$$

由上式可以求得 N 型半导体的少数浓度 $p \approx n_i^2 / N_D$,P 型半导体的少数浓度 $n \approx n_i^2 / N_A$,它们

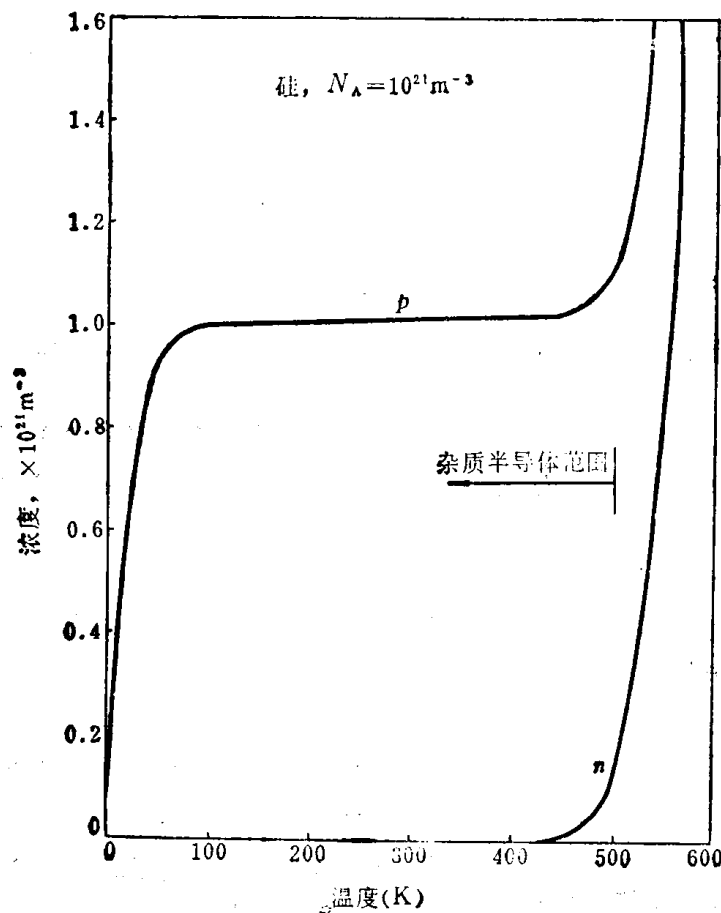


图 1-1-2 杂质半导体载流子浓度与温度的关系

都小于本征半导体的 p_i 和 n_i 。从物理意义上说,这是因为 N 型或 P 型半导体中的多子(电子或空穴)浓度要比本征半导体的高得多,因而少子的复合几率上升,结果导致了平衡时少数浓度的下降。少数浓度虽然远低于多子浓度,但是在许多半导体器件中,少数起着相当重要的作用。

应当注意,在常温下,杂质半导体的多子浓度基本不变,近似等于杂质元素的浓度,但少数浓度却是温度的强函数。随着温度上升,杂质半导体中本征型激发的电子-空穴对将迅速增加。当温度足够高时,本征型激发的电子和空穴浓度便接近甚至大于杂质元素浓度,这时杂质半导体中电子浓度与空穴浓度就接近相等,而转变为本征半导体。

图 1-1-2 表示 P 型硅中多子和少数浓度与温度的关系。可以看到,

当温度上升到约 500K ($\approx 227^\circ\text{C}$) 时,少数(电子)浓度的数量级就开始接近于多子(空穴)浓度的数量级。当温度超过 550K 后,电子和空穴浓度迅速接近,P 型半导体就将转变成本征半导

* 下标 D 是 donor(施主)的字首。

** 下标 A 是 acceptor(受主)的字首。

体。因此杂质半导体的工作温度有一个上限,对于锗来说,由于 E_g 较低,所以其最高工作温度低于硅。

还应指出,因为硅、锗和杂质元素的原子都是电中性的,因此杂质半导体(P型与N型)和本征半导体一样,是电中性的。

2. 载流子的漂移和扩散运动

以上我们介绍了半导体中载流子的类型和数量。当半导体没有受到外加电压等因素的影响时,电子和空穴在半导体内作杂乱无定向的热运动,就不会在任何方向上形成净电流。本节说明这些载流子是如何作定向运动而形成电流的。

(1) 载流子的漂移运动

当半导体上加有外电压时,半导体内部就产生电场。由于电子和空穴分别带有 $-q$ 和 $+q$ 的电荷,所以电子和空穴就在电场的作用下作定向运动,我们称之为漂移运动。如果载流子的漂移速度小于它们的热运动速度,则其漂移速度 v 与电场强度 E 成正比:

$$v = \mu E \quad (1.1.4)$$

式中 μ 称为迁移率,单位为 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。电子和空穴的迁移率并不相同,如分别以 μ_n 和 μ_p 表示,则有 $\mu_n > \mu_p$,也就是说电子的迁移率大于空穴的迁移率。迁移率还与温度和半导体材料有关,在一般情况下 μ 随温度上升而下降。

根据电学理论,由式(1.1.4)可以求得电子和空穴的漂移电流密度

$$J_n = qn v_n = qn \mu_n E \quad (1.1.5a)$$

$$J_p = qp v_p = qp \mu_p E \quad (1.1.5b)$$

式中 v_n 与 v_p 分别是电子和空穴的漂移速度。两种漂移电流的方向都与电场方向相同,因为电子和空穴的电荷极性相反,在同一电场作用下两者的漂移运动虽然相反,但漂移电流的方向却是一致的,所以总的漂移电流密度

$$J = J_n + J_p \quad (1.1.6)$$

从漂移电流密度表达式不难导出半导体的电导率 σ 和电阻率 ρ 。由于 $J = \sigma E$,故有

$$\sigma = 1/\rho = qn \mu_n + qp \mu_p \quad (1.1.7a)$$

在杂质半导体中,多子和少子的浓度一般相差甚大,可以认为漂移电流就等于多子的漂移电流。这样,对于N型半导体,因为 $n \gg p$,故有

$$\sigma \approx qn \mu_n \quad (1.1.7b)$$

对于P型半导体则有

$$\sigma \approx qp \mu_p \quad (1.1.7c)$$

(2) 载流子的扩散运动

在以上的叙述中,我们只涉及到在热激发作用下产生与复合到达平衡情况下的所谓平衡载流子,现在要来说明半导体中非平衡载流子的性质和效应。

图1-1-3是一块均匀掺杂的N型半导体,如果它的一个侧面受到光的照射时,就会由光激发出电子-空穴对。这种比热激发平衡情况下多出来的载流子就叫做非平衡载流子。

在稳定的光照下,N型半导体受到光照的侧面处将保持有一定浓度的非平衡载流子,因而N型半导体中存在着载流子浓度的差别。由于载流子的热运动,非平衡载流子将从高浓度处向低浓度处扩散,这种定向运动就产生扩散电流,扩散电流的大小与载流子的浓度梯度成正比。于是非平衡载流子的扩散电流密度可写成下列形式: