

# 功率半导体器件 工作原理和制造工艺

〔美〕 S.K. 格安迪 著

机械工业出版社

# 功率半导体器件

## 工作原理和制造工艺

〔美〕S. K. 格安迪 著

张光华 钟士谦 译

黄松云 校



机械工业出版社

本书共六章,第一章介绍功率半导体器件的基本物理概念,其余五章介绍功率半导体二极管、晶体管 and 晶闸管工作的物理原理、特性及制造工艺。着重介绍了与小功率半导体器件不同的知识。

本书可供从事功率半导体器件设计、制造和使用的科研和技术人员使用,亦可供大专院校有关专业师生参考。

## **Semiconductor Power Devices**

Physics of Operation and  
Fabrication Technology

Sorab K. Ghandhi

John Wiley & Sons. Inc. 1977

\*

## **功率半导体器件**

工作原理和制造工艺

[美] S. K. 格安迪 著

张光华 钟士谦 译

黄松云 校

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32·印张 9·字数 233 千字

1982 年 9 月北京第一版·1982 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001— 6,000·定价 1.10 元

\*

统一书号: 15033·4999

## 译者的话

功率半导体器件包括半导体整流器、功率晶体管和晶闸管。从五十年代初相继发明这些器件以来,它们已在电力、机械、冶金、化工、交通运输以及邮电通讯自动化等国民经济重要领域内获得了广泛的应用,这些器件的工作原理、特性和制造技术也日益为使用和设计制造人员所重视。

本书是根据 S. K. 格安迪著的《功率半导体器件》的第一版(1977年版)翻译的。该书系统地阐述了功率半导体二极管、功率晶体管和晶闸管的工作原理、特性和制造工艺,同时避免了和小功率器件及集成电路相重复的内容,因而取材自成体系。在阐明物理概念的同时,对问题做了定量的数学分析。每章之后附有问题,供思考和掌握各章的内容。因而它是一本对科技人员和大专院校有关专业的师生们很有益的参考书。由于译者水平有限,译文中难免有错误或不妥之处,希望读者批评指正。

# 目 录

译者的话

第一章 基本概念 .....	1
1.1 寿命 .....	2
1.2 载流子输运 .....	7
1.3 单注入 .....	10
1.3.1 局部填满的复合中心 .....	12
1.3.2 穿通 .....	13
1.4 双注入 .....	13
1.4.1 雪崩注入 .....	14
1.4.2 碰撞电离 .....	16
1.4.3 电流线和微等离子体 .....	17
1.5 热不稳定性 .....	18
1.5.1 本征温度 .....	18
1.5.2 中等离子体和二次击穿 .....	19
1.5.2.1 稳态特性 .....	20
1.5.2.2 起始时间 .....	23
1.6 问题 .....	25
第二章 反向偏置二极管 .....	26
2.1 反向电流 .....	27
2.2 雪崩击穿 .....	29
2.3 倍增因子 .....	31
2.4 击穿电压 .....	32
2.4.1 突变结 .....	33
2.4.2 穿通结 .....	36
2.4.3 $n^+-i-p^+$ 结 .....	37
2.4.4 线性结 .....	38
2.4.5 扩散结 .....	42
2.5 耗尽层弯曲 .....	45

2.5.1	柱面结 .....	46
2.5.2	球面结 .....	48
2.5.3	扩散保护环结构 .....	50
2.5.4	场极板结构 .....	53
2.5.5	等势环 .....	57
2.6	表面成形技术 .....	59
2.6.1	正倾斜结 .....	60
2.6.2	负倾斜结 .....	60
2.6.3	倾斜的晶闸管结构 .....	64
2.6.4	倾斜的 $p^+ - n - n^+$ 结构 .....	67
2.6.5	腐蚀外形的简易方法 .....	68
2.7	不稳定性 .....	68
2.7.1	中等离子体和二次击穿 .....	71
2.8	问题 .....	72
第三章	正向偏置二极管 .....	73
3.1	突变结 .....	73
3.1.1	正向注入 .....	73
3.1.1.1	窄基区二极管 .....	77
3.1.2	反向恢复 .....	78
3.2	扩散结 .....	83
3.2.1	重掺杂效应 .....	85
3.3	$p^+ - i - n^+$ 二极管 .....	87
3.3.1	正向电压 .....	91
3.3.1.1	载流子-载流子散射效应 .....	93
3.3.1.2	俄歇复合效应 .....	94
3.3.1.3	注入效率的影响 .....	95
3.3.2	反向恢复 .....	102
3.3.2.1	中间区掺杂效应 .....	107
3.3.2.2	扩散结效应 .....	109
3.4	不稳定性 .....	109
3.5	问题 .....	110
第四章	晶体管 .....	112
4.1	器件结构 .....	112

4.2	输出特性	114
4.3	电流增益	121
4.3.1	注入效率	123
4.3.2	高电平 $\beta$ 下降:发射极效应	125
4.3.3	高电平 $\beta$ 下降:集电极效应	130
4.3.3.1	二维模型	134
4.3.3.2	一维模型	134
4.4	增益-带宽乘积	136
4.4.1	$n^+p-n^+$ 晶体管	136
4.4.2	$n^+p-v-n^+$ 晶体管:弱场情形	137
4.4.3	$n^+p-v-n^+$ 晶体管:强场情形	137
4.5	不稳定性 and 二次击穿	137
4.5.1	侧向电不稳定性	138
4.5.1.1	高压条件下器件的工作	139
4.5.1.2	大电流条件下器件的工作	140
4.5.2	侧向热不稳定性	141
4.5.3	有关的措施	143
4.5.4	安全工作区	145
4.5.5	结束语	146
4.6	问题	147
第五章 晶闸管		148
5.1	反向阻断模式	150
5.2	正向阻断模式	155
5.2.1	电阻分路	159
5.2.2	阴极短路	160
5.2.3	其它的短路结构	163
5.3	正向传导模式	165
5.3.1	维持电流	167
5.4	开启过程	168
5.4.1	$di/dt$ 限制	171
5.4.1.1	扩展速度	172
5.4.1.2	$di/dt$ 额定值的改进	174
5.4.1.3	放大的控制极晶闸管	176

## VIII

5.4.2 $dv/dt$ 效应 .....	177
5.4.2.1 $dv/dt$ 额定值的改进 .....	178
5.4.2.2 与开启过程的相互作用 .....	179
5.4.3 光开启 .....	180
5.5 反向恢复 .....	182
5.5.1 恢复特性的改进 .....	186
5.5.1.1 降低寿命的技术 .....	186
5.5.1.2 辅助的控制极关断 .....	187
5.5.1.3 反向传导晶闸管 .....	189
5.6 控制极关断 .....	191
5.6.1 压缩速度 .....	192
5.6.2 关断增益 .....	195
5.6.3 最大阳极电流 .....	195
5.6.4 下降时间 .....	196
5.6.5 结束语 .....	197
5.7 双向晶闸管 .....	197
5.7.1 结型控制极控制 .....	199
5.7.2 间接控制极控制 .....	200
5.7.3 双向三端晶闸管 .....	201
5.7.3.1 换向速率 $dv/dt$ .....	206
5.7.4 触发器件 .....	207
5.8 不稳定性 and 失效模式 .....	209
5.9 问题 .....	211
第六章 制造工艺 .....	212
6.1 原材料 .....	213
6.1.1 直拉硅 .....	213
6.1.2 浮带区熔硅 .....	215
6.1.3 中子掺杂 .....	218
6.2 结的形成 .....	220
6.2.1 扩散 .....	220
6.2.1.1 闭管系统 .....	224
6.2.1.2 开管系统 .....	225
6.2.1.3 掺杂剖面分布 .....	226



6.2.2	合金	229
6.2.3	外延	231
6.3	深能级的控制	234
6.3.1	改进寿命的技术	235
6.3.1.1	含卤素的掺杂源	236
6.3.1.2	金属吸收	236
6.3.1.3	机械损伤	237
6.3.1.4	玻璃层	237
6.3.2	降低寿命的技术	238
6.3.2.1	掺杂	238
6.3.2.2	电子辐照	241
6.4	欧姆接触	242
6.5	引线和小片连接	244
6.5.1	热学设计	244
6.5.1.1	瞬变热阻抗	245
6.5.2	焊料系统	248
6.5.3	冷压连接系统	249
6.6	表面钝化	251
6.6.1	有机涂料和涂覆	251
6.6.2	玻璃	251
6.6.3	热氧化层	252
6.6.4	多晶硅膜	253
6.7	密封和组装	254
	硅的性质	256
	常用物理常数	256
	符号	257
	参考文献	267

## 第一章 基本概念

初看起来，功率半导体器件物理学似乎和低功率半导体器件物理学完全相同。在不考虑物理尺寸时，器件的工作原理的确相同。然而，在大功率工作的条件下，器件物理的许多方面却具有很大差异。而且，象  $p-i-n$  二极管和  $p-n-p-n$  晶闸管之类的器件结构，其优点就是可以在大功率方面应用。

本章概述了在功率半导体器件研究中应考虑的基本问题。首先，在稳态和瞬态条件下，这种器件必须能耗散大量功率，因而，散热问题是制造和封装工艺应考虑的重要问题。此外，器件必须工作在开关状态中。在这样的工作条件下，器件的功率容量直接和关态时承受高压的能力和开态时导通大正向电流的能力有关。

结型二极管的反向击穿电压取决于  $p$  和  $n$  区的电阻率和它掺杂的剖面分布，这个问题在第二章中详细讨论。然而，定性地讲，承受高反压的能力主要取决于所使用的高电阻率的原始材料。在设计二极管中，用 500 欧姆·厘米的电阻率，以承受千伏范围的反向电压。经比较，用于数字集成电路器件的原始电阻率的典型值为 0.15~0.2 欧姆·厘米！

如果使器件具有承受大正向电流的能力，就要让它在高电平注入的载流子浓度下工作，通常注入浓度超过半导体中热离化的原始载流子浓度，因而在决定器件性能方面，半导体的本底浓度变得不那么重要了。而且，总的电子和空穴浓度数量近似相等，因此，高电平注入分担着注入本征材料的许多共同特性。所以，宜对本征传导材料（特别是轻掺杂的半导体）中的输运现象给予特殊的考虑。对硅材料而言，载流子浓度高达  $10^{15}/\text{厘米}^3$  的材料当作高阻材料。在高压器件中，原始载流子浓度常常低至  $10^{13}/\text{厘米}^3$ 。

## 1.1 寿命

如果任何过程与周围环境处于热平衡, 则必有一个同样速率的逆过程出现, 在任何给定的温度下, 便会导致空穴-电子对连续地产生和复合, 产生和复合率相同。最终的结果是平衡的空穴浓度  $\bar{p}$  和电子浓度  $\bar{n}$  满足  $\bar{p}\bar{n} = n_i^2 = \text{常数}$ 。如果这样的一个系统被激发(例如, 以稳定的光照射), 载流子的产生和复合率将改变, 直到建立新的稳定条件为止。在新的稳定条件下, 电子和空穴浓度可由下式给出

$$n = \bar{n} + n' \quad (1.1a)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (1.1b)$$

式中,  $n'$ 、 $p'$  分别为和时间有关的过量的电子和空穴浓度;  $\bar{n}$ 、 $\bar{p}$  为它们的热平衡值。去掉这种激发, 便出现复合过程, 直到系统又回到它的热平衡值为止。在  $n$  型半导体中, 少数载流子的复合过程可用幂级数来近似, 就是

$$-\frac{\partial p'}{\partial t} = \gamma_1 p' + \gamma_2 p'^2 + \gamma_3 p'^3 + \dots \quad (1.2)$$

式中各项在载流子浓度不同的区域分别起主导作用。从物理观点来看, 三阶项表示带间复合, 伴随着光子发射。在非直接禁带材料(例如硅)中, 这种类型的辐射过程是不可能的。而复合过程可用下式进行描述:

$$-\frac{\partial p'}{\partial t} = \gamma_1 p' + \gamma_3 p'^3 \quad (1.3)$$

若在宽范围的注入电平内, 第一项是主要的, 可用它来表征经过深杂质能级的声子-辅助复合。参数  $1/\gamma_1$  表示少数载流子寿命  $\tau_p$ 。在参考文献[1, 2]中已广泛地计算过这项的值, 这里只回顾一下单一复合中心的情况。对于多能级的情况, 问题非常复杂<sup>[3]</sup>, 通常用单一能级的情况来讨论它。

我们考虑一个  $n$  型半导体, 在能级  $E_r$ , 复合中心密度为  $N_r$ 。为便于讨论起见, 假定这些中心是施主。在热平衡时, 有些是中性

的,其余是电离的。于是,  $N_r = \bar{N}_r^+ + \bar{N}_r^0$ , 加横划者表示热平衡值。在稳态非平衡条件下,中性的和电离的两者的复合中心浓度都改变了,因此,可以得出,  $N_r = N_r^+ + N_r^0$ 。

从导带俘获电子的速率与电子浓度和电离中心的浓度成正比。于是

$$R_{cn} = \alpha_n n N_r^+ \quad (1.4a)$$

式中,  $\alpha_n$  为速率常数,它由电子俘获截面和电子热速度的乘积得出。

电子发射到导带的速率与中性中心的浓度和导带边有效状态密度成正比。因此,

$$R_{en} = C_1 N_r^0 (N_c - n) \approx C_1 N_r^0 N_c \quad (1.4b)$$

式中,  $C_1$  为比例因子;  $N_c$  为导带边的状态密度。

同样,可把空穴被价带俘获和发射的速率写成

$$R_{cp} = \alpha_p p N_r^+ \quad (1.5a)$$

$$R_{ep} = C_2 N_r^+ N_v \quad (1.5b)$$

式中,  $C_2$  为比例因子;  $N_v$  为价带边的状态密度。

可用热平衡条件估算出因子  $C_1$  和  $C_2$  (即:  $\bar{R}_{cn} = \bar{R}_{en}$  和  $\bar{R}_{cp} = \bar{R}_{ep}$ )。把这些关系代入式(1.4a)和(1.4b),解得:

$$R_{cn} - R_{en} = - \frac{dn'}{dt} = \alpha_n (n N_r^+ - n_1 N_r^0) \quad (1.6)$$

式中

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_r}{kT}\right) \quad (1.7)$$

同样,可用下式得出过量空穴浓度的变化率

$$R_{cp} - R_{ep} = - \frac{dp'}{dt} = \alpha_p (p N_r^0 - p_1 N_r^+) \quad (1.8)$$

式中

$$p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_r - E_v}{kT}\right) \quad (1.9)$$

在这些方程中,若费米能级处在复合能级上,则可把  $n_1$ ,  $p_1$  看作是电子和空穴的浓度<sup>⊖</sup>;  $k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是绝对温度。

⊖ 这些是为比较起见而引入的虚构的量。

稳态时,电子和空穴同时消失,所以,

$$\frac{dn'}{dt} = \frac{dp'}{dt} \quad (1.10)$$

此外,

$$N_r = N_r^0 + N_r^+ \quad (1.11)$$

把式(1.6)和式(1.11)联立起来,则在稳态时的复合率可写作  $-U$ , 即

$$-U = \frac{dn'}{dt} = \frac{dp'}{dt} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)} \quad (1.12)$$

和

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\alpha_p N_r} \quad (1.13a)$$

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\alpha_n N_r} \quad (1.13b)$$

最后,因为假定是一阶复合过程,则从式(1.3)可得出少数载流子寿命为  $-p'/(dp'/dt) = -p'/U$ 。

方程(1.12)适用于现在考虑的几种特殊情况。

在空间电荷为中性的情况下,  $n' = p'$ , 则寿命为

$$-\frac{n'}{U} = -\frac{p'}{U} = \tau_{p0} \left( \frac{\bar{n} + n_1 + n'}{n + \bar{p} + n'} \right) + \tau_{n0} \left( \frac{\bar{p} + p_1 + n'}{n + \bar{p} + n'} \right) \quad (1.14)$$

对于  $n$  型材料,  $\bar{p} \ll \bar{n}$ , 可写成  $h = n'/\bar{n}$ ,

$$\begin{aligned} \tau_p = \tau_{p0} \left[ 1 + \frac{1}{1+h} \exp\left(\frac{E_r - E_f}{kT}\right) \right] \\ + \tau_{n0} \left[ \frac{h}{1+h} + \frac{1}{1+h} \exp\left(\frac{E_i - E_r}{kT} + \frac{E_i - E_f}{kT}\right) \right] \end{aligned} \quad (1.15)$$

在推导这个表达式时,曾假定  $N_o = N_v$  和  $E_i = (E_o + E_v)/2$ 。在  $n$  型半导体中,对于低电平注入,  $h \ll 1$ , 所以

$$\begin{aligned} \tau_{p, \text{低}} = \tau_{p0} \left[ 1 + \exp\left(\frac{E_r - E_f}{kT}\right) \right] \\ + \tau_{n0} \exp\left[ \left( \frac{E_i - E_r}{kT} \right) + \left( \frac{E_i - E_f}{kT} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.16)$$

对于高电平注入,  $h \gg 1$ , 和

$$\tau_{p, \text{高}} = \tau_{p0} + \tau_{n0} \quad (1.17)$$

值得注意的是:对于高电平注入,由于注入的载流子浓度超过衬底的浓度,所以可以预计,寿命与掺杂浓度无关。

在耗尽层的条件下,可以近似地认为:  $n \approx p \approx 0$ 。因此得出产生率:

$$U = \frac{n_i^2}{n_1 \tau_{p0} + p_1 \tau_{n0}} \equiv \frac{n_i}{2 \tau_{s0}} \quad (1.18)$$

式中,  $\tau_{s0}$  为空间电荷产生的寿命,可用下式求解:

$$\tau_{s0} = \frac{\tau_{p0}}{2} \left[ \exp\left(\frac{E_r - E_i}{kT}\right) \right] + \frac{\tau_{n0}}{2} \left[ \exp\left(\frac{E_i - E_r}{kT}\right) \right] \quad (1.19)$$

对于全耗尽层的半导体区,这个寿命也和掺杂浓度无关。它的数值等于本征半导体中低电平时的寿命。

对于任何特定的比  $\tau_{n0}/\tau_{p0}$ , 用一个表达式能够很方便地表示低电平时的寿命和空间电荷产生的寿命的性能。图 1.1 表示费米能级位置变化时  $n$  和  $p$  型半导体的少数载流子寿命的情况, 这条曲线的精确性取决于复合能级相对于本征能级的位置和  $\tau_{n0}$  及  $\tau_{p0}$  的值, 图中示出了一个典型的情况, 即复合能级与本征能级间分开一定的距离  $\Theta$  (即  $E_r - E_i = 155$  毫伏)。图中同时示出了复合中心处在禁带中央 ( $E_r = E_i$ ) 的特殊情况, 在这种情况下, 少数载流子寿命从  $\tau_{n0}$  近似单调地变到  $\tau_{p0}$ 。图中选择  $\tau_{n0} = 10\tau_{p0}$  是因为它代表实际的情形。

用以电子脉冲辐照样品产生光电流、然后测量此光电流衰减时间的方法证明了<sup>[4]</sup>通过深杂质能级复合的理论。这一理论适合于  $0.01 \leq h \leq 100$  的情形; 就是说, 适合于注入电平从低于本底浓度 2 个数量级到高于本底浓度 2 个数量级的范围。

在非直接禁带半导体中, 当一种或多种可移动离子过量时, 观察到另外的复合过程<sup>[5, 6]</sup>。例如, 如果出现很大的电子浓度, 那么, 就可能得到电子和空穴的直接复合, 同时能量传递给其它的自由电子。这种过程包括两个电子和一个空穴, 出现在空穴注入到重掺杂  $n^+$  区 (象  $n^+ - p - n$  晶体管的发射区) 内的情形。它导致非常快

⊖ 实际上  $E_r - E_i$  值有正和负两种。

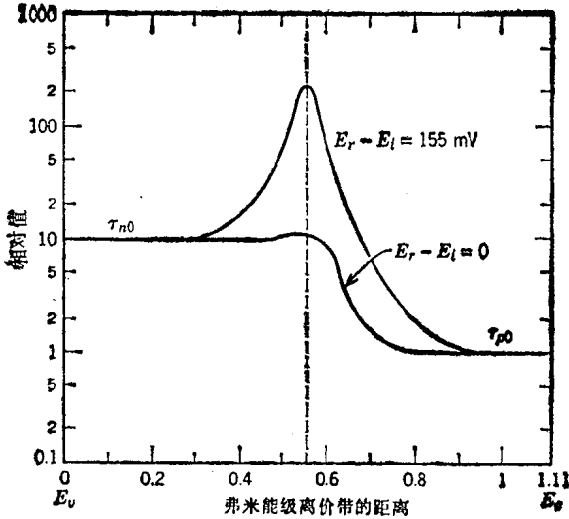


图 1.1 寿命随费米能级位置的变化

地复合,用下式表示

$$-\frac{dp'}{dt} = \gamma_{sp} n^2 p' \quad (1.20a)$$

对硅来说,式中的  $\gamma_{sp} = 1.7 \times 10^{-31}$  厘米<sup>6</sup>/秒。

同样,在重掺杂  $p^+$  区内也可能出现包括两个空穴和一个电子的复合,所以

$$-\frac{dn'}{dt} = \gamma_{3n} p^2 n' \quad (1.20b)$$

对硅来说,式中的  $\gamma_{3n} = 1.2 \times 10^{-31}$  厘米<sup>6</sup>/秒。这些过程称为俄歇过程。

在  $p-i-n$  二极管的中间区和  $p-n-p-n$  晶闸管宽基区内的高电平注入也受这类复合过程的支配。尤其是在浪涌条件下 电流密度达  $1000 \sim 3000$  安培/厘米<sup>2</sup>, 注入载流子浓度可比本底浓度高  $3 \sim 4$  个数量级,这一复合过程是特别真实的过程。然而,这里包括的大量电子和空穴两者数目相等,因此,两个过程都出现。对  $n$  型硅而言,复合由下式表示:

$$-\frac{dp'}{dt} = \gamma_3 p'^3 \quad (1.20c)$$

式中,  $\gamma_3 = 2 \sim 2.9 \times 10^{-31}$  厘米<sup>6</sup>/秒。

对于前述的各种情况, 可用寿命  $\tau_A$  表示俄歇过程, 它等于过量载流子浓度对过量载流子衰减速率之比。包括声子-辅助复合和俄歇复合两者在内的非直接禁带半导体的有效寿命, 根据式(1.3)可写成

$$\frac{1}{\tau_{\text{有效}}} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_A} \quad (1.21)$$

式中,  $\tau_p$  为少数载流子寿命。当复合过程包括的电子和空穴浓度大时,  $\tau_p$  为高电平寿命; 当高浓度下移动的载流子只有一种时, 必须用低电平寿命。

## 1.2 载流子输运

为了定量地研究载流子在轻掺杂半导体中的输运, 便需要考虑通过深杂质能级复合的半导体。在这种材料的一个元体积内, 可把连续性和扩散方程写为

$$\frac{\partial n'}{\partial t} = U + D_n \frac{\partial^2 n'}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) \quad (1.22a)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = U + D_p \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) \quad (1.22b)$$

式中,  $U$  为净产生率;  $D_p$ 、 $D_n$  为空穴和电子的扩散常数;  $\mu_p$ 、 $\mu_n$  为空穴和电子的迁移率;  $E$  为电场。以外, 保持电中性近似(甚至在电场存在时), 所以,  $\partial n' \approx \partial p'$ 。

用  $\mu_p p$  乘式(1.22a), 用  $\mu_n n$  乘式(1.22b), 并和爱因斯坦关系式  $D = (kT/q)\mu$  相结合, 得

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\frac{p'}{\tau_a} + D_a \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \frac{n-p}{n/\mu_p + p/\mu_n} E \frac{\partial p'}{\partial x} \quad (1.23)$$

式中

$$D_a = \frac{n+p}{n/D_p + p/D_n} \quad (1.24)$$



$$\tau_a = \frac{-p'}{U} = \frac{-n'}{U} \quad (1.25)$$

$D_0$  和  $\tau_a$  分别称为双极扩散常数和双极寿命。在大多数情况下, 包含  $E$  的整个项作为二阶项, 和其它项相比可以略去。同样,  $p$  型半导体中的少数载流子的连续性和扩散方程可写成

$$\frac{\partial n'}{\partial t} = -\frac{n'}{\tau_a} + D_0 \frac{\partial^2 n'}{\partial x^2} \quad (1.26)$$

用双极参数计算独立方程形式的一对微分方程 (1.22a) 和 (1.22b), 可以用已建立的低电平理论来研究高电平的性能。然而, 在这个方程中,  $D_0$  是注入电平的函数。在高电平注入极限情形下, 双极扩散常数与载流子浓度无关, 并由下式给出

$$D_0 = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} = \frac{2D_n}{1+b} \quad (1.27)$$

式中,  $b = \mu_n / \mu_p$ 。图 1.2 表示  $\mu_n$  和  $\mu_p$  与杂质浓度的关系。它们和温度的关系示于图 1.3, 对硅来说,  $b=3$ , 所以

$$D_0 = 1.5D_p = 0.5D_n \quad (1.28)$$

对于高电平注入条件, 也能确定双极寿命, 其中,  $n' \gg \bar{n}$  和  $p' \gg \bar{p}$ 。将这些关系代入式 (1.12), 并且  $n' = p'$ , 则,

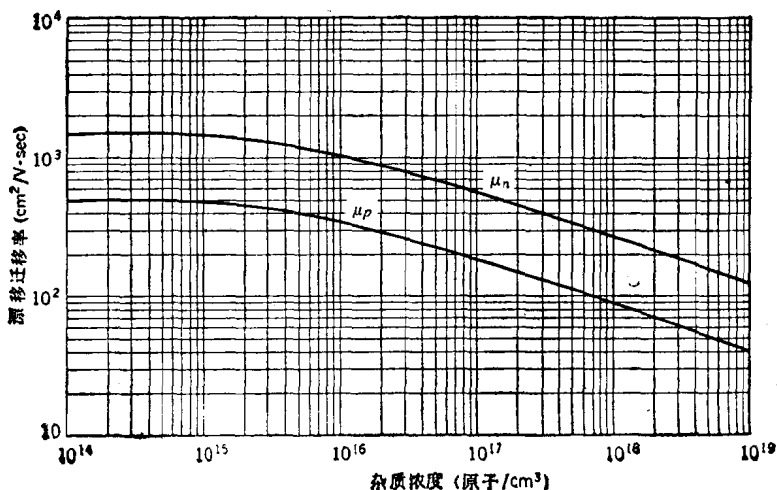


图 1.2 迁移率与杂质浓度的关系