

1718

可关断可控硅



北京市可关断可控硅会战组

1972

毛主席语录

领导我们事业的核心力量是中国共产党。
指导我们思想的理论基础是马克思列宁主义。

路线是个纲，纲举目张。

工业学大庆。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

目 录

概述	1
一、可关断可控硅工作原理和结构特点	3
1-1. 可关断可控硅工作原理	3
1-2. 结构特点	5
1-2-1. 厚的 n 基区和较薄的 p 基区	5
1-2-2. 较小的阴极宽度	5
二、可关断可控硅主要参数, 基本结构和 工艺路线的选择	8
2-1. 关断增益对 α_1 和 α_2 提出的要求	8
2-2. 耐压对材料和结构提出的要求	10
2-3. 基本结构	16
三、可关断可控硅工艺原理和工艺过程	20
3-1. 工艺流程	20
3-2. 硅片研磨和抛光	21
3-3. 扩镓	22
3-3-1. 杂质源的选取和制造	22
3-3-2. 扩散温度和时间的选择	23
3-3-3. 工艺过程	25
3-4. 氧化	26
3-4-1. 氧化层 (SiO_2) 的厚度和氧化条件的选择	26
3-4-2. 氧化工艺过程	27
3-5. 一次光刻	28
3-5-1. 光刻胶的配制	28

3-5-2. 光刻	29
3-6. 扩磷	30
3-6-1. 扩散方法和杂质源	30
3-6-2. 工艺过程	33
3-7. 重金属杂质的吸收	34
3-7-1. 吸收目的	34
3-7-2. 工艺过程	34
3-8. 扩金	35
3-8-1. 扩金的原理和目的	35
3-8-2. 工艺过程	35
3-9. 烧阳极欧姆结	36
3-10. 蒸铝	37
3-11. 二次光刻 (反刻铝)	37
3-12. 控制极——阴极结的腐蚀和合金化	38
3-13. 磨角、腐蚀和表面保护	38
3-14. 焊接和密封	39
四、可关断可控硅的测试	40
4-1. 中间测试	40
4-2. 动态特性	45
4-2-1. 线路原理	45
4-2-2. 试验结果	55
4-2-2-1. 频率(f)与关断增益(B_{off})的关系	55
4-2-2-2. 控制极脉冲与动态参数的关系	57
4-2-2-3. 占空系数 η 与关断电流, 关断增益的关系	59
4-2-2-4. 关断增益与阳极电流的关系	59
4-2-2-5. 关断电流 I_A 与电源电压的关系	61

4-2-2-6. 温度与关断电流 I_A 的关系	62
4-2-2-7. 正向电压上升率	62
五、(附录一) 可关断可控硅的功率损耗	65
六、(附录二) 可关断可控硅技术标准 (暂定)	70
七、(附录三) 5 A 可关断可控硅零部件规格图册	77
八、(附录四) 10 A 可关断可控硅零部件规格图册	84

概 述

普通可控硅控制极触发开通后，控制极就失去控制能力，直到阳极电流下降到维持电流 (I_H) 以下，或加于反向电压，贮存在中心结二侧的空穴和电子复合消失后，才恢复控制极的控制作用。但是，当元件反向时，外层的二个 $p-n$ 结处于反向，很快恢复了阻断特性，使中心结附近的空穴和电子流不出来，只能靠复合消失，因此关断时间较长，限制了可控硅在高频方面的应用。虽然，通过扩散复合中心杂质金，降低少子寿命，可以减小关断时间，并应用此法和改进控制极结构做出了一些能在几~几十千周下工作的高频可控硅。但是，由于少子寿命的降低，元件导通压降 (V_F) 增加，耐压下降，电流上升率 (di/dt) 降级等，给高频可控硅的制造增加了许多困难，也使可控硅在更高频率的应用受到严格限制。而且，可控硅必须靠反向电压关断，使许多应用场合诸如直流回路的应用颇受限制和非常不便。

由于应用电路的要求，人们在可控硅和功率晶体管方面得到的丰富实践经验和理论知识的基础上，成功地做出了有可控硅特性，又有晶体管特性，即用控制极正脉冲可触发元件导通，用负脉冲可关断阳极电流，称为控制极可关断的可控硅元件。

和普通可控硅相比，除大电流元件制造较难外，其它特性都非常相似，但可关断可控硅可用控制极负脉冲关断。

和功率晶体管相比，除工作频率较低和电流增益较小外，电流和电压都较高，功率增益大于一般功率晶体管，而

且基极信号只需正、负脉冲，无需象晶体管那样基极信号要在整个工作脉冲期间提供。此外，过电流能力也优于晶体管。

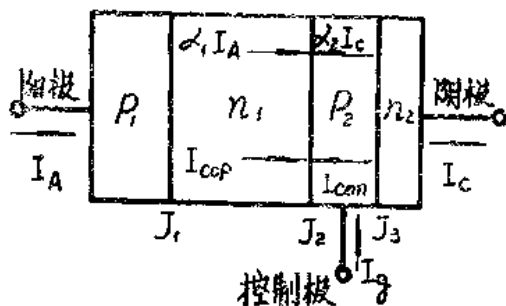
因此，可关断可控硅是可控硅和晶体管之间一种很好的过渡元件。

一、可关断可控硅工作原理 和结构特点

1-1. 可关断可控硅工作原理：

可关断可控硅的工作原理与普通可控硅基本相同。基本结构如图一所示。

当阳极电位相对于阳极为正时， $p_1n_1p_2n_2$ 可看作二个共收集极的晶体管 $p_1n_1p_2$ 和 $n_1p_2n_2$ ，互相构成正反馈电路。可控硅的导通状态可看作为这二个晶体管的饱和状态，即在各自的收集结上堆积了很多载流子，处于低阻导通状态，这时不但 J_1 和 J_3 结处于正向偏压，而且 J_2 结也反转极性处于正偏压状态。如忽略结的漏电流，可粗略地认为 $n_1p_2n_2$ 由 $p_1n_1p_2$ 和控制极供给基极电流。



I_{CSP} I_{CCN} 是 J_2 结空穴和电子饱和漏电流

图 1-1 可关断可控硅基本结构

$$\alpha_1 I_A + I_g \quad (1-1)$$

式中 α_1 是 $p_1 n_1 p_2$ 晶体管的电流放大系数。

要使 $n_1 p_2 n_2$ 饱和，它的基极电流必须超过

$$(1 - \alpha_2) I_G \quad (1-2)$$

式中 α_2 为 $n_1 p_2 n_2$ 的电流放大系数。因为：

$$I_G = I_A + I_g \quad (1-3)$$

因此，要使晶体管饱和，即可控硅导通，要求

$$\alpha_1 I_A + I_g \geq (1 - \alpha_2) (I_A + I_g) \quad (1-4)$$

亦即

$$I_g \geq \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2)}{\alpha_2} I_A \quad (1-5)$$

这就是说，用控制极触发可控硅导通，控制极电流的大小必须满足 (1-5) 式。

如果从控制极上引出电流，即控制极电流为负，当控制极负电流达到一定大小，使晶体管饱和条件破坏时，亦即

$$\alpha_1 I_A + (-I_g) < (1 - \alpha_2) [I_A + (-I_g)]$$

$$\text{即} \quad \alpha_1 I_A - I_g < (1 - \alpha_2) (I_A - I_g) \quad (1-6)$$

元件就恢复到高阻关断状态（即晶体管不饱和）。

因此，可控硅开通后，可用控制极负电流关断的条件是

$$I_g > \frac{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}{\alpha_2} I_A \quad (1-7)$$

用较小的控制极负电流关断较大的阳极电流总是大家所希望的。为了表达这一特性，把阳极电流 I_A 和使其关断所需的最小控制极电流 $-I_{g(\min)}$ 之比，定义为关断增益 B_{off} 。

$$B_{\text{off}} = \frac{I_A}{-I_{g(\min)}} = \frac{\alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2) - 1} \quad (1-8)$$

(1-8) 式表明， B_{off} 大，相当于能用较小 $-I_g$ 关断较大 I_A 。

因此， B_{off} 的大小即可表征一支可关断可控硅关断特性的优劣。

为了明显起见，将开通临界条件 (1-5) 式变换为

$$I_A = \frac{\alpha_2}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} I_g \quad (1-9)$$

综合 (1-8) 和 (1-9) 式，要做成能用 $+I_g$ 触发开通， $-I_g$ 关断，并有较大关断增益 B_{off} 的可关断可控硅元件。必须将元件的 α_2 尽可能做得大些，开通后 $\alpha_1 + \alpha_2$ 只稍大于 1。因此，如要做出关断增益大的可关断可控硅，必须把 α_2 做得大些，使 $-I_g$ 能尽量发挥作用，而把 α_1 做得很小，使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 开通后刚刚大于 1，处于临界开通状态。

1-2. 结构特点

1-2-1. 厚的 n 基区和较薄的 p 基区

B_{off} 大要求 α_1 小和 α_2 大，因此通常采用增加 n 基区的厚度和降低 n 基区少子寿命减小载流子输运效率，以及减低 P_1 区的杂质浓度和厚度，提高 n_1 基区材料的杂质浓度（即采用低阻材料）和将 p_1-n_1 结部分短路降低载流子注射效率等方法把 α_1 做小；通过减薄 P_2 区厚度，增加 n_2 区的浓度提高 α_2 。

考虑到其它参数的要求（如耐压，压降等）和工艺简单，目前一般都只采用厚的 n 基区和薄的 P 基区。

1-2-2. 较小的阴极宽度

由上分析，似乎凡是 $pnpn$ 四层三端器件，只要控制极正脉冲 I_g 满足 (1-5) 式就能开通，负脉冲满足 (1-7) 式

都能将导通了的元件关断。实际上，普通可控硅却只能用正 I_g 开通，不能加负 I_g 关断，即使 $-I_g$ 很大也是如此，或者由于过大 $-I_g$ 把元件烧坏。为什么呢？伟大领袖毛主席教导我们：“我们必须学会全面地看问题，不但要看到事物的正面，也要看到它的反面”。下面让我们看一看加 $+I_g$ 和加 $-I_g$ 对 I_A 流经元件过程的影响，就明白了。

当控制极加 $+I_g$ 时， I_g 从控制极流向阴极，在 P_2 区形成一个由左至右的横向压降， n_2 区杂质浓度很高，可视为等位面，因此 J_3 结正偏压不是均匀的，左边高，右边低。结果靠近控制极的 J_3 结首先开始增加电子的注入，使它下面的 J_2 结首先反转进入导通状态，阳极电流 I_A 如图 1-2 (1) 所示线路流向阴极，它在 P_2 区产生一横向分量，引起一个与 I_g 方向相同的横向压降，使 J_2 结的开通区不断向远

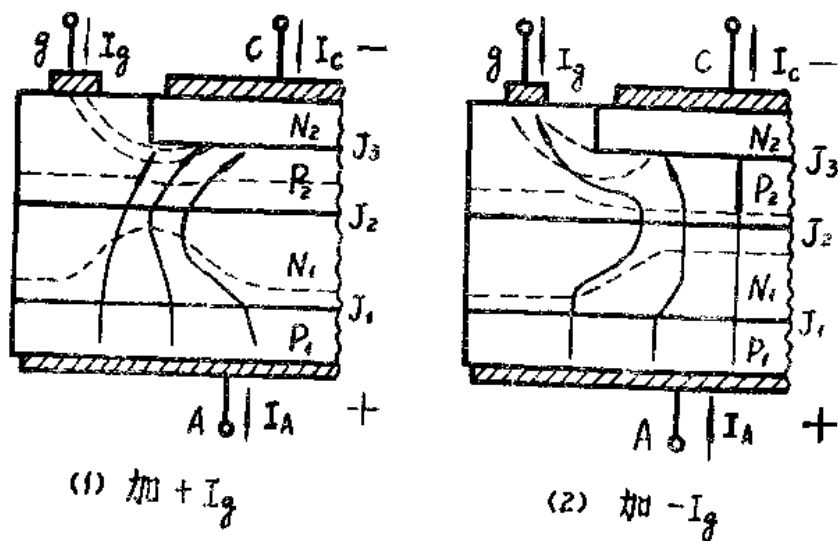


图 1-2 加 $+I_g$ 和 $-I_g$ 时 I_A 的流动方向

离控制极的方向扩展。扩展的速度约 $0.1 \text{ mm}/\mu\text{S}$ 。

当控制极加 $-I_g$ 时, 电流分布如图 1-2(2) 所示。 $-I_g$ 的横向分量引起从右至左的横向压降, 使靠近控制极的 J_3 结首先处于反向偏置, 阻止电子的注入, 因此靠近控制极下面的 J_2 结首先恢复阻断, 而远离控制极部分仍继续处于导通状态。 I_A 在 P_2 区也形成了一个横向分量, 但是这一横向分量的作用却和加 $+I_g$ 产生的 I_A 横向分量的作用很不一样。后者引起开通区域的扩展将使 I_A 流经的距离缩短, 有利于 I_A 的流过。而前者, 关断区的扩展却使 I_A 流经更远的路程。不利于 I_A 流过, 所以这个横向分量无助于关断区域的扩展。一旦 $-I_g$ 移去, 由于横向分量使导通区域扩展, 反而将已关断的区域重新恢复开通。如果加很大的 $-I_g$ 进行强行关断, 由于开通区域被驱缩到很小的阴极范围, 造成局部过电流损坏元件, 或者由于控制极功率损耗过大将元件烧坏。即使不损坏元件, 由于关断增益很小也没有实用价值。

因此, 要做成控制极可关断可控硅, 除 I_g 满足关断条件 (1-7) 式外, 另一重要的条件是必须尽量减小横向效应 (即减小 P_2 区横向电阻)。通常可通过设计适当电极形状, 把阴极宽度减小, 缩短控制极和阴极的之间距离以及将阴极夹在控制极之间; 或者增加 P_2 区厚度和浓度, 使 P_2 基区横向电阻减小来实现。然而, P_2 区的厚度和浓度必须兼顾 α_2 的要求。因此一般都采用前一种方法。它还有利于开通时间、关断时间的缩短和临界电流上升率与可关断的阳极电流 I_A 的提高; 然而由于阴极周界增加, 单位长度阴极周界的控制极电流减少, 高频下开关损耗增加, 结温上升, 要关断同样长度阴极上的阳极电流, 必须增加 $-I_g$, 因此关断增益有下降的趋势。

二、可关断可控硅主要参数、基本 结构和工艺路线的选择

根据目前应用单位提出的要求和现有工艺水平，我们把耐压 600~800 伏，关断增益 10~20（低频）和可关断阳极电流 5~10 安培作为选取结构参数和工艺的出发点。通过一段时间的实践，达到了上述设计要求。证明新选取的参数、结构和工艺是近似合理的，至少是定性合理的。

2-1. 关断增益对 α_1 和 α_2 提出的要求

如前所述，关断增益为

$$B_{off} = \frac{\alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2) - 1} \quad (1-8)$$

通常，为了提高 B_{off} 和保证足够的耐压（要求厚的 n_1 基区）总是把 α_1 做得很小，根据一般经验和实验结果估计元件开通后的 α_1 约为 0.1~0.2 左右。如要求 $B_{off} \geq 20$ ，利用上式即可算出 $\alpha_2 \leq 0.95 \sim 0.84$ ，从这里看出， α_1 亦不能做得太小，否则要求 α_2 做得很大，使 P_2 基区厚度很薄，影响元件的耐压。注意： $\alpha_1 = 0.1 \sim 0.2$ ， $\alpha_2 = 0.95 \sim 0.84$ 是指元件开通（即晶体管饱和）后的放大系数。因为，硅晶体管的放大系数和电流有密切关系，在一定范围内，随电流密度增加而增大。因此，关断增益对 α_1 和 α_2 提出的要求值，不能作为计算元件结构的依据。必须估算出在不同电流下 α_1 和 α_2 下的数值，然后计算与这些数值对应的参数。

硅晶体管的 α 随电流变化的关系非常复杂，定量计算比

较困难。为简单起见，我们通过实验预先求得了元件关断增益较大时的 α_2 的数值（对应于某一电流），与报导的可控硅的二个 α 随电流变化的规律比较，估计出大电流，小电流和特小电流下的 α 。然后，用大电流下的 α 值计算 B_{off} ，用小电流的数值做为工艺中间测试的标准，并利用小信号的 α 表示式进行结构计算。（一般把 10 毫安左右的电流即可当作小电流）。用特小电流下的 α （小于 1 毫安）计算正向阻断电压。二个 α 随电流变化的规律如图 2-1 所示。实验发现 $\alpha_2 \approx 0.6 \sim 0.7$ （10 毫安左右）做出的元件 B_{off} 最佳，根据做出的元件的 B_{off} ，和元件几何结构，推算的二个 α 也同时表示在图中，从图 2-1 即可得，元件开通电流下（即关断前阳极电流）， α_2 约 0.9 左右， α_1 约为 0.1~0.2（ $I_A = 1 \sim 10 \text{ A}$ ），小信

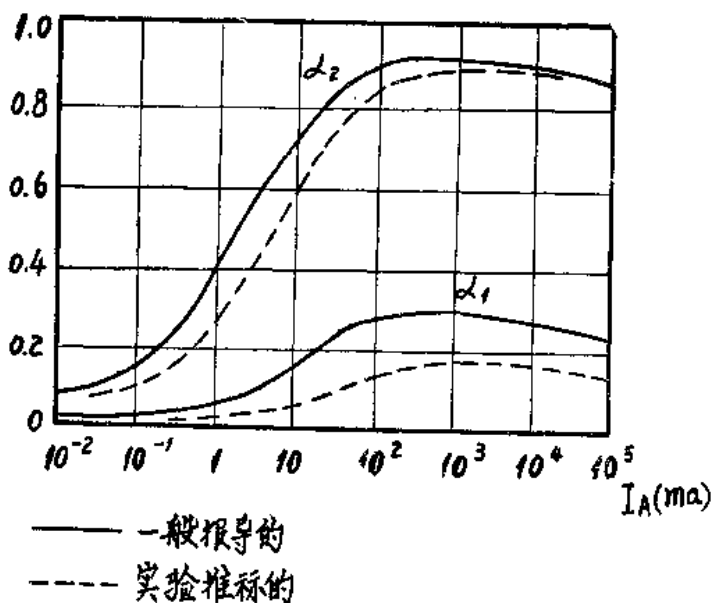


图 2-1. α_1 和 α_2 与 I_A 关系曲线

号时 ($I_A \approx 10$ 毫安左右) α_2 约为 0.6~0.7, α_1 约为 0.05; 特小电流下 ($I_A < 1$ 毫安) α_2 约为 0.15~0.2, α_1 约为 0.01。

2-2. 耐压对材料和结构提出的要求

可控硅的转折电压可表示为:

$$V_{BO} = V_B [1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]^{1/n} \quad (2-1)$$

式中 $V_B \sim J_2$ 结雪崩击穿电压, $n \approx 3 \sim 6$ 的常数。要求阻断电压 $V_{FF} \approx 600 \sim 800$ 伏, 则要求转折电压 $V_B \geq 700 \sim 900$ 伏。

由 (2-1) 式可知 $V_{BO} \leq V_B$, 取 $n = 4$, 由于元件转折前, 流过元件电流很小, 因此, 关断增益对 α_1 和 α_2 提出要求, 在特小电流下 $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2 + 0.01 \approx 0.2$ (元件在转折电压以下的漏电流往往小于 1 毫安), 所以:

$$V_{BO} = V_B (1 - 0.2)^{1/4} \approx 0.95 V_B$$

$$V_B = 700 \sim 900 / 0.95 \approx 740 \sim 950 \text{ 伏}$$

取 $V_B = 800 \sim 1000$ 伏计算。因为

$$V_B = 126 \rho_n^{0.63}$$

则可求出 $p-n$ 结雪崩电压 800~1000 伏所需的单晶约为: 18.5~27 $\Omega\text{-cm}$ 。考虑到 J_2 结是扩散型缓变结, 较深的结深可得到较高的雪崩电压, 减轻对硅单晶和工艺的要求。因此硅单晶的电阻率选为 20~40 $\Omega\text{-cm}$ (计算时取 30 $\Omega\text{-cm}$), 一次扩散结深 (包括以后工序引起的推进) 选为 45~50 微米

小的横向效应要求 P_2 区杂质浓度尽可能提高, 但是关断增益要求 $n_1 p_2 n_2$ 晶体管的 α_2 大些, 即要求 $p_2 n_2$ 结注射比要尽可能大, 因此要求 P_2 区杂质浓度尽可能低, 或者 n_2 区杂质浓度尽可能高。然而, 过高的扩磷浓度 (N_2 区) 会引入许多缺陷, 使 N_2 区的少子寿命大大降低, 注射比 γ_2 甚至输运系数 η_2 急剧下降。一般经验认为扩磷的表面浓度不应大于

$1 \times 10^{21}/\text{厘米}^3$ 。实际上较高的浓度，工艺也比较困难。常常只是在 $1 \sim 5 \times 10^{20}/\text{厘米}^3$ 左右。同时，为了减小元件的关断时间，还采用了扩金工艺，降低少子寿命。限制了阴极发射结 p_2-n_2 注射比的提高。兼顾到上述横向效应对 P_2 区杂质浓度提出的下限和关断增益对它提出的上限，将一次扩散表面浓度选为 $1 \sim 3 \times 10^{18}/\text{厘米}^3$ 。

n_1p_2 结虽是扩散结，由于杂质分布梯度较大，较高电压时空间电荷区宽度可用突变结的关系式计算：

$$X_m = 3.64 \times 10^3 (V/N_b)^{1/2} \quad (2-2)$$

式中 V 为外加电压。 N_b 为硅的本底杂质浓度。由 $\rho_n = 1/ne\mu_n$ ，可算出 $\rho_n = 30 \Omega\text{-cm}$ 时的 $N_b = 2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 。以 $V = 1000$ 伏代入 (2-2) 式可得 $X_m = 83$ 微米，取 $W_n = 100$ 微米考虑。

n_1p_2 结空间电荷区除向 n_1 基区扩展外，还向 P_2 区扩展，向 P_2 区扩展的宽度 X_1 可用

$$X_1 = K \ln \left(\frac{X_m}{K} + 1 \right)$$

$$K = X_j / \ln (N_s/N_b)$$

计算。式中 X_j 是 P 区扩散结深度， N_s 是 P_2 区表面杂质浓度。计算结果 $X_1 \approx 10$ 微米，因此，空间电荷区向 n_1 区扩展的宽度 $X_2 = X_m - X_1 = 90$ 微米。

设 $p_1n_1p_2$ 晶体管的注射比为 1，空穴寿命 $\tau_p = 1$ 微秒，(扩散长度 $L_p = \sqrt{D_p\tau_p} \approx 36$ 微米)，则

$$\alpha_1 = \text{sech} \left(\frac{W_n - X_2}{L_p} \right)$$

取小电信号的 $\alpha_1 = 0.05$

可计算得到 $W_n = 220$ 微米

实际上， $p_1n_1p_2$ 的注射比小于 1，特别是 p_1n_1 结是扩

散结, 所以 $W_n = 220$ 微米应是 $\tau_p = 1$ 微秒时选取 n 基区的上限。

若注射比为 0.8, 可算出 $W_n \approx 150 \sim 160$ 微米, 为此我们曾在 200~400 微米之间进行过优选, 发现 W_n 在 200~280 微米, 对可关断元件特性无明显影响。 $W_n = 400$ 微米时, 元件正向压降达 10~20 伏, 关断电流约 0.5 安, 关断增益约为 1; $W_n = 320$ 微米, 压降 4 伏以上, 关断电流 1~2 安, 关断增益只有 2~4。而在 200~280 微米, 压降一般在 2 伏左右, 关断增益达 15~25 (低频)。因此, 一般选 $W_n = 240 \sim 260$ 微米。我们认为 n 基区厚度不必太厚, 薄 n 基区的元件高频特性明显提高, 如我们前期把 n 基区选为 290~340 微米, 高频 (20 KG) 可关断阳极电流只有 3 安培, 关断增益只有 2~4; 而 200~260 微米的元件, 高频 (20 KG) 可关断 5~7 安培阳极电流, 关断增益达 5~9。这可能是由于薄的基区, 压降降低, 开通和关断时间缩短, 高频功率损耗大大减小, 元件结温减低。也可能还包含了 α_1 和 α_2 数值的选取与实际有差别的原因。

把 $P_1 n_1 P_2$ 晶体管 α_1 做小的另一方法是把注射比做小, 这样可选用更薄的 W_n , 为此我们曾将 P_1 区采用深扩铝 (100 微米以上), 然后磨去 70~80 微米, 与直接扩镓 ($X_j \approx 40 \sim 45$ 微米, $N_s \approx 1 \sim 3 \times 10^{18}$ 厘米⁻³) 的进行比较。结果表明对元件特性几乎没有影响, 为使工艺简单, 我们选用了扩镓。

如上所述, 小信号的 α_2 约为 0.6~0.7 时元件性能较好, $n_1 p_2 n_2$ 晶体管的 $p_2 n_2$ 是发射结, P_2 区的表面浓度选为 $1 \sim 3 \times 10^{18}$ 厘米⁻³, n_2 区约为 $1 \sim 5 \times 10^{20}$ 厘米⁻³。实验证明, 在我们的工艺中 $p_2 n_2$ 结界面 P_2 的杂质浓度约为 3×10^{17} 厘米⁻³, 特别是 P_2 和 n_2 区通过扩金后, 少子寿命都大幅度下