

0163778

73.67
SZC

600 安培可控硅整流元件

一次全扩散法制造工艺

上海整流器厂

(内部资料·注意保存)



上海科学技术情报研究所



600安培可控硅整流元件
一次全扩散法制造工艺
上海整流器厂 编写

*

上海科学技术情报研究所出版
新华书店上海发行所发行
上海文化革命印刷厂印刷

*

1971年11月出版
代号: 1634040 定价: 0.15元
(凭证发行)



毛主席语录

抓革命，促生产，促工作，促战备。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

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。

序 言

在无产阶级文化大革命的推动下，我国电子工业正沿着毛主席的革命路线，蓬蓬勃勃地向前发展。近年来获得迅速发展的可控硅大功率半导体器件，在军工和国民经济各部门中已大量而广泛的应用。我国工业建设的突飞猛进对可控硅提出了越来越高的要求：制造大功率可控硅，为矿业、冶金、化工、机电等基础工业设备配套，是摆在我们面前的日益迫切的任务。

在毛主席“独立自主、自力更生”伟大方针指引下，我厂革命职工以两条路线斗争为纲，以毛主席光辉哲学著作《实践论》为武器，自力更生，土法上马，发扬敢想、敢干的革命精神，大破洋框框，大反保守思想，在1970年8月试验成功“一次全扩散法”可控硅制造新工艺，现已获投产成功，为简易、高效和大量生产大功率可控硅开辟了一条新的途径。

一次全扩散法，是一种只要采用一次扩散工艺步骤就能制成可控硅管芯的新颖方法，具有工艺简单，设备简易，生产周期短，效率高，适于大量生产等优点。这种全扩散方法较容易推广，只要对原来扩散-合金法老工艺的设备和闭管扩散工艺稍加改革即可，因此较适合于新上马的、设备条件较差的单位。

一年来，我厂200安培以上可控硅的生产已采用一次全扩散法。新工艺投产成功，革掉了扩散-合金法老工艺，实现了大功率可控硅生产不用黄金。

在伟大领袖毛主席提出的发展工业“以钢为纲”的正确方针指引下，为了更好地为冶金等基础工业服务，今年以来，我

厂又采用一次全扩散工艺，试制成功并小批生产了 600 安培大功率可控硅元件。

在试制和小批生产的基础上，我们整理了这份工艺小结。由于我们学习和运用毛主席著作不够，对这一新工艺的认识还不深不全面，小结中定有不少缺点、错误，希望同志们批评指正。

一九七一年十一月

目 录

序 言

一、一次全扩散法基本原理及其工艺分析	1
1. 一次全扩散法的基本原理	1
(1) 杂质源	4
(2) 扩散温度与时间的选择	6
(3) 扩散杂质源的量	9
2. 一次全扩散法提高元件特性的几个问题	11
(1) 元件的高温特性	11
(2) 元件的正向压降	16
(3) 元件的反向电压	17
(4) 氧化层对扩散结果的影响	17
(5) 软特性现象	20
二、600 安培可控硅一次全扩散法制造工艺	22
1. 元件的单晶硅材料和结构参数的选择	22
2. 工艺流程图	23
3. 硅片清洁处理与腐蚀	24
4. 氧化	24
5. 单面喷黑胶, 去氧化层	26
6. 扩散	27
7. 烧结	31
8. 蒸发	33
9. 表面造型及其处理	34

10. 封装	35
附：图 表	38
1. 600安培平板压接式水冷可控硅外貌	38
2. 600安培平板压接式可控硅水冷散热器结构图	39
3. 杂质的最大固态溶解度	40
4. 杂质在硅中的固态溶解度	41
5. 硼、铝、镓、铟在硅中的扩散系数	42
6. 磷、砷、锑在硅中的扩散系数	43
7. 砷—硅相图	44
8. 砷—锑相图	45
9. 铝—硅相图	46
10. 铝—镍相图	47

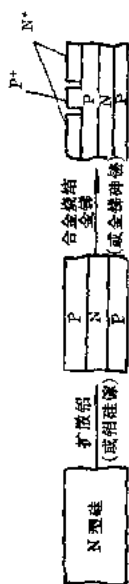
一、一次全扩散法基本原理及其工艺分析

1. 一次全扩散法的基本原理

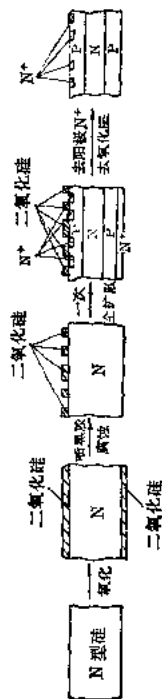
毛主席教导我们：“感觉到了的东西，我们不能立刻理解它，只有理解了的东西才更深刻地感觉它。”为了对一次全扩散法制造可控硅有较深入的认识、了解，现对一次全扩散方法形成可控硅 PNPN 结构的作用机理，作一扼要的分析。

为了与扩散-合金法相区别，全部是采用扩散的方法来制成可控硅的整个 PNPN 结构的方法称为“全扩散法”。一般全扩散法的工艺是采取二次选择扩散的办法，即先在具有 N 型杂质的硅片上扩上一层较低浓度的 P 型层，然后再在此 P 型层上扩进浓度很高的 N^+ 型杂质，从而构成可控硅的整个 PNPN 结构。而这里讨论的是将上述二次选择扩散的二道工艺过程合并为一次完成，即采用 P 型和 N 型杂质源同时进行扩散，一次就可制成可控硅的整个 PNPN 结构。为了与一般全扩散工艺相区别，称这种方法为“一次全扩散法”。

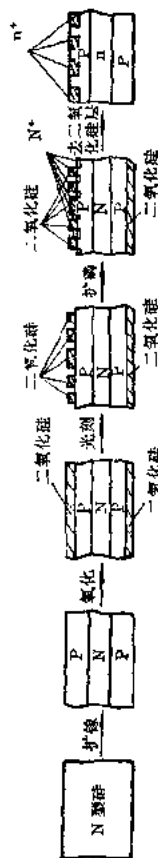
为了达到只采用一次扩散的方法即能形成 PNPN 结构的目的，选择两种杂质源的基本原则必须是： $N_{s,n} \gg N_{s,p}$ ，即 N 型杂质源的表面浓度 $N_{s,n}$ 必须远大于 P 型杂质源的表面浓度 $N_{s,p}$ ，因为只有这样才能在扩散最外层的电学性能是 N^+ 型的。另外，选用两种杂质源的扩散系数必须满足 $D_p \gg D_n$ ，即 P 型杂质的扩散速度远比 N 型杂质的快得多，这样才能保证 P 型杂质能渗入到所要求的结深深度，从而达到一下子形成整个 PNPN 结构的目的。上述情况可用图 1 表示，图中 N_0 为单晶硅材料原有的杂质浓度， $X_{j,n}$ 为 N^+ 型层扩散结深， $X_{j,p}$ （即 $X_{j,n} + W_p$ ）为 P 型



扩散-合金法



一次全扩散法

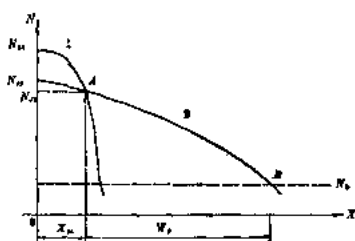


全扩散法

全扩散法与扩散-合金法工艺流程的比较

层扩散结深, W_p 为短基区宽度, N_{sn} 为 N 型杂质表面浓度, N_{sp} 为 P 型杂质表面浓度。

众所周知, 所谓扩散, 就是杂质在一定温度下, 在硅片表面自高浓度的表面向低浓度的



硅片体内渗透的过程。在整个扩散过程中, 硅片表面的杂质浓度是不变的, 称为恒定表面杂质源的扩散(一次全扩散所用的闭管扩散法, 即属此类扩散), 在硅片中杂质浓度的分布与扩散时间的关系是按照余误差函数分布的, 可用数学式表达为:

$$N(x, t) = N_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) = N_s \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) \dots\dots (1)$$

式中 X 为离开硅片表面的距离, t 为扩散时间, D 为扩散系数。

因此, 在一次全扩散中, 图 1 曲线 1 和曲线 2 分别表示为 N 型杂质和 P 型杂质在硅片中的分布曲线。若将 N 型杂质浓度取为正号, P 型杂质浓度取为负号, 则两种杂质同时扩散时, 可以看作两个余误差曲线的叠加, 用数学式可表达为:

$$N(x, t) = N_b + N_{sn} \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{D_n t}} \right) - N_{sp} \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{D_p t}} \right) \dots\dots (2)$$

设曲线 1 和曲线 2 的交点 A 之杂质浓度为 N_{js} , 曲线 2 与基片杂质浓度 N_b 的交点为 B, 则经过简单变换即可求出 N^+ 型层扩散结深为:

$$X_{jn} = 2\sqrt{D_n t} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_{js}}{N_{sn}} \right) = 2\sqrt{D_p t} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_{js}}{N_{sp}} \right) \dots\dots (3)$$

从 (3) 式中, 若已知 D_n , N_{sn} , D_p , N_{sp} , 即可解出 J_3 结的杂质浓度 N_{js} 。显然, 代入 (3) 式后即可求得扩散结深 X_{jn} 。

同理，P型杂质的扩散结深为

$$X_{jp} = 2\sqrt{D_p t} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_b}{N_{sp}}\right) \dots\dots\dots (4)$$

短基区的宽度为

$$W_p = 2\sqrt{D_p t} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_b}{N_{sp}}\right) - 2\sqrt{D_i t} \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_{js}}{N_{sp}}\right) \dots\dots\dots (5)$$

从上面的分析可以看出，一次全扩散中影响元件设计参数 X_{jn} 、 X_{jp} 和 N_{js} 的最主要的因素是两种杂质在硅片中分布曲线的形状，而曲线的分布又和杂质源本身的特性、扩散温度和扩散时间等各种因素有复杂的依赖关系。一次全扩散要得到理想的 X_{jn} 、 X_{jp} 、 N_{js} 等重要设计参数，据我们的实践，最主要的是如何合理的选用杂质源，适当地选择扩散温度和时间，以及掌握杂质源的用量及配比。

(1) 杂质源

前已叙述，选用杂质源的基本原则是

$$N_{sn} \gg N_{sp}, \quad D_p \gg D_n$$

但是，是不是所有合乎上述条件的杂质源，都可以形成一次全扩散所要求的 PNP 结构呢？看问题要从各方面去看，不能只从单方面看。实践证明，能满足上述条件的杂质源并不都是合乎要求的。在试制过程中，我们曾用纯铝作为 P 型的杂质源，在 1250℃ 时铝的扩散系数为 $D_p = 4 \times 10^{-11}$ 厘米²/秒，铝的表面浓度为 5×10^{16} 原子/厘米³，铝是一种扩散系数较大，但表面浓度较低的杂质源，作为 P 型杂质源在图 1 曲线 2 中必然表现为比较平坦，即浓度梯度较低。任何事物都是一分为二的，扩散后低浓度的 P 区既有它不利的一面，又有它有利的一面。一般来说，希望 J_2 结前沿的 P 区浓度梯度小一些好，因为这样可以提高元件的击穿电压，所以用纯铝作为杂质源是有

利的。但是我们必须全面地看问题,对于 J_3 结前沿的 P 区浓度却希望高一些好,而纯铝扩散时由于曲线较平坦,其交点 A 所对应的 J_3 结杂质浓度 N_{J_3} 必然较低, $N_{J_3} \ll 5 \times 10^{16}$ 原子/厘米³, 这样低的浓度对可控硅的特性来说是不利的,因为正向转折电压的大小与短基区的浓度有直接关系。若 N_{J_3} 浓度过低, J_2 结的空间电荷层在短基区一边的展宽必然增加,对于同样的短基区宽度来说,有效宽度必然减少,同时,小电流时的注射比 γ_2 亦将增大,这一切都将引起 α_2 的过量增加,这是元件正向转折电压低于反向电压,以及高温特性严重下降的重要原因。因此单用纯铝作为 P 型杂质源是不理想的。看来,对于短基区杂质浓度的要求是矛盾的,希望 J_2 结前沿的浓度较低一些好,这有利于提高击穿电压,另一方面又希望 J_3 结前沿的浓度能够高一些,这有利于提高正向转折电压和改善高温特性。在实践中,我们采用铝硅镓作为 P 型杂质源,便可解决上述矛盾,即采用两种相同导电类型的 P 型杂质,利用铝的扩散系数较大,但浓度较低的特点,能够较深的渗入基片内部,达到所要求的结深和减少近 J_2 结的浓度梯度,形成较低浓度 P 型层。同时利用镓的扩散系数较小(约为 4×10^{-12} 厘米²/秒)而浓度较高的特点,使得 J_3 结前沿的杂质浓度大为提高,形成高浓度的 P^+ 型层,

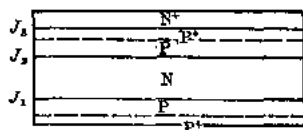


图 2 一次全扩散后硅片中
各层杂质浓度的分布

如图 2 所示。这样一来, J_2 结的击穿电压大为提高,能接近于雪崩击穿电压。同时,由于 J_3 结附近形成 P^+ 型层,不仅可以防止“穿通”,有利于提高正向转折电压,亦使 J_3 结在小电流时的注射比 γ_2 大为降低,或者更明确地说,就是使 α_2 随电流变化而有较小的变化从而改善了元件的高温特性。至于 N 型杂质源,希

望表面浓度远大于P型层，以形成 N^+ 型扩散层。经过摸索，我们选用砷锑合金作为N型杂质源，砷的固态溶解度为 2.1×10^{21} 原子/厘米³，扩散系数为 8×10^{-13} 厘米²/秒(锑与此相仿)。

实践证明，用铝硅镓作为P型杂质源，砷锑作为N型杂质源，能够达到“一次全扩散”所预想的结果。这些杂质在硅片中的分布曲线，如图3所示。从图中可知，决定 X_{jn} 和 N_{js} 的是砷和镓分布曲线的交点，而决定 X_{jp} 的则是铝的分布曲线和基片浓度 N_b 的交点。

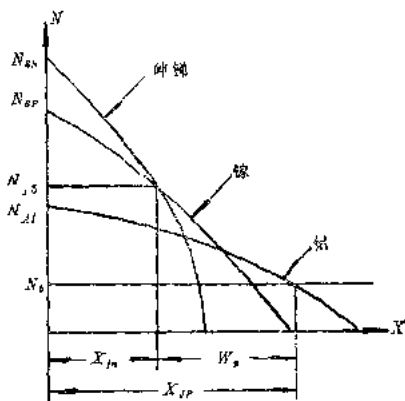


图3 采用铝硅镓为P型杂质源、砷锑为N型杂质源的杂质分布

经过摸索，我们所选用的杂质源配比为：

铝：硅：镓=60：20：20 或 60：25：15

砷：锑=80：20 或 60：40

(2) 扩散温度与时间的选择

扩散温度

当杂质源确定之后，选择适当的扩散温度是十分必要的。利用图3的曲线，可列出一次全扩散P型与N型扩散层结深计算公式：

$$\begin{aligned}
 X_{jn} &= 2\sqrt{D_{As}t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_{js}}{N_{sN}} \right) \\
 &= 2\sqrt{D_{Ga}t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_{js}}{N_{sp}} \right) \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

$$X_{j,p} = 2\sqrt{D_{Al}t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_b}{N_{Al}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$W_p = 2\sqrt{D_{Al}t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_b}{N_{Al}} \right) - 2\sqrt{D_{As}t} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{N_{js}}{N_{SN}} \right) \dots\dots (8)$$

式中 D_{Al} 、 D_{As} 、 D_{Ga} 分别为铝、砷、镓的扩散系数， N_{Al} 、 N_{SN} 、 N_{SP} 分别为铝、砷、镓的表面浓度。

从上式 (6)、(7)、(8) 中可知，影响扩散结深 X_{js} 、 X_{jp} 和 W_p 的因素是扩散系数、扩散时间、表面浓度和基片杂质浓度等。而扩散系数、表面浓度又是扩散温度的函数，可见，调整扩散温度便可获得我们所需要的表面浓度和结深。

一次全扩散是采用闭管扩散的。在密封的石英管中，当扩散温度一定时，在硅片上产生一定的杂质蒸汽压力，倘若没有其他的混合生成物产生，则可以认为此时石英管中的杂质蒸汽形成了一个相当于固态溶解度的平衡浓度。如果由于扩散温度降低或其他因素使杂质的蒸汽压力降低，这个平衡浓度便要低于固态溶解度，显然此时扩散后的表面浓度必然要低于固态溶解度。在实践中，我们曾测得当扩散温度为 1260°C 时，砷的表面浓度为 2.1×10^{21} 原子/厘米³，而温度为 1250°C 时为 1×10^{20} 原子/厘米³。

扩散系数是随温度急剧变化的函数。当杂质原子向硅中扩散时，其扩散的速度与杂质原子的活动能力有密切关系。扩散温度越高其活动能力越强，因而扩散系数便越大。在试验初期，如 200 安培可控硅，是利用调整扩散温度的方法来获得所需的结深，不同的扩散温度与结深的变化如下表。

扩散温度与结深的变化关系

序 号	扩散温度* 条件和结果	1250°C			1253°C		
		时 间	X_{jn}	X_{jp}	时 间	X_{jn}	X_{jp}
一		12.5小时	11.7 μ	57.8 μ	16小时 (80~82) (Ω -cm)	21 μ	49.5 μ
二		13小时 (90~120) (Ω -cm)	13.5 μ	52.5 μ	16小时 (60~81) (Ω -cm)	21 μ	52 μ
三		13.5小时 (58~81) (Ω -cm)	13 μ	57 μ	16小时	20 μ	50 μ
序 号	扩散温度* 条件和结果	1255°C			1260°C		
		时 间	X_{jn}	X_{jp}	时 间	X_{jn}	X_{jp}
一		13.5小时 (44~75) (Ω -cm)	24.2 μ	29.8 μ	10小时 (86~90) (Ω -cm)	30.4 μ	28.5 μ
二							
三							

* 均在同一扩散炉中扩散

从上表可以看出, 当提高扩散温度时, N型层结深增加, P型层结深减小($T \uparrow$, $X_{jn} \uparrow$, $X_{jp} \downarrow$).

扩散时间

在一定的扩散温度下, 扩散时间的长短直接影响到扩散结

深。从前面公式(6)、(7)可知,结深与 $\sqrt{t}$ 成正比。在一次全扩散中,P型层的深度,受扩散时间的影响较大,而P型层深度主要由铝扩散决定。由于所用的铝硅合金中铝的含量与原来扩散-合金法中的铝硅合金中铝的含量相比只减少了2%,因此,所选用的扩散时间基本上与扩散-合金法相等。

以上分析了扩散温度与时间对表面浓度和结深的关系。毛主席教导我们:“一切真知都是从直接经验发源的。”在生产实践中,经过几次摸索,我们认为扩散温度为1253°C是比较好的,扩散时间16~18小时左右,制造600安培可控硅,表面浓度 $N_{s,m}$ 一般为 $3\sim5\times10^{20}$ 原子/厘米³, $N_{s,p}$ 为 $1\sim3\times10^{18}$ 原子/厘米³,扩散结深 $X_{j,m}$ 为20微米, $X_{j,p}$ 为80微米左右,短基区 W_2 为60微米左右,扩散重复性较好,长基区 W_1 约140微米左右,扩散结电压在900~1300伏,开通特性也很好,控制极电压 V_g 为0.7~1.5伏,控制极电流 I_g 为60~150毫安,正向压降 V_F 为0.8~1.1伏。

(3) 扩散杂质源的量

在开始搞一次全扩散工艺时,曾有人认为多次扩散的优点是重复性好,一致性较差,而一次全扩散则正好相反。在开始试制后的较长一段时间里,发现了一次全扩散的重复性不那么理想。经过不断摸索,发现改善一次全扩散的重复性关键在于掌握好每次扩散时所用杂质源的量及它们之间的比例。

在扩散-合金法中,所用杂质源的量对扩散结果的影响不大。但在一次全扩散中,由于存在着两种不同导电类型的杂质源,它们相互之间的影响是不可忽略的。除了上面所述扩散温度变化反映出这种相互影响之外,在两种杂质源的量上也反映出这种相互影响。

为什么会有这种影响呢?这是由于在有两种不同导电类型

的杂质源存在时，硅片内部存在着空穴、电子、带负电的离子和带正电的离子所形成的电场，这个电场的强弱，依赖于进入硅片的杂质源量，一般来说这个内建场是由过多的杂质所决定，也就是说过多的杂质的扩散将受场的影响而使其比单一杂质源时的扩散要快，因而被推进，而另一种杂质将受此场的影响而被抑制。在此种情况下，杂质流应为：

$$j = -D \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 4(n_i/N)^2}} \right] \frac{\partial N}{\partial x}$$

上式中的 D 是无电场影响时的扩散系数， n_i 是本征载流子浓度，可以看出，当杂质密度小时，即 $N \ll n_i$ 时， $D_{\text{有效}} = D$ ，在杂质密度高时，即 $N \gg n_i$ 时， $D_{\text{有效}} = 2D$ 。因此，杂质密度大的扩散应被推进。

根据多次摸索，觉得砷锑合金和铝硅镓应成一定的比例，而砷锑的量则直接影响到 X_{j_n} ，所以要控制好一定的长短基区和 X_{j_n} ，就必须控制砷锑的量和铝硅镓的量。

除了考虑其结构参数以外，还须考虑的另一个方面是，过多的铝硅镓将会在硅片表面产生较严重的合金现象。而这种镓硅合金对硅片表面用来掩蔽砷锑的氧化层是有害的，它能把氧化层吃掉。因此，必须把这二者结合起来考虑。

现在我们所采用的是砷锑：铝硅镓 = 1 : 2 或 2 : 3，每次砷锑的量为 15~30 毫克。至于是采用 1 : 2 还是 2 : 3，则要看扩散后对氧化层的损害程度来决定。

我们在作一次全扩散基本原理分析时，是将 P 型和 N 型杂质的分布当作互不相关的线性方程来处理的。而事实上，由于此时杂质原子都分别离子化了，在内部建立了电场，它们之间的互相作用是不能忽视的。另外，扩散系数仅当作温度的函数。