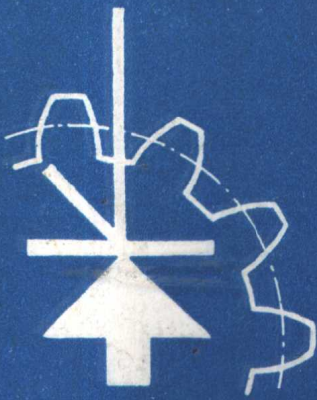




硅功率器件制造工艺

全国机电系统发展可控硅经验交流会资料选编

(内部资料 注意保存)



第一机械工业部技术情报所
第一机械工业部整流器研究所
上海市机电一局情报站
上海市科学技术情报所

1971年2月

毛 主 席 語 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。

工人阶级必须领导一切。

备战、备荒、为人民。

独立自主、自力更生。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

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。

中国应当对于人类有较大的贡献。

目 录

双扩散法试制 200 安螺旋式可控硅元件	西安电力整流器厂 (1)
可控硅元件的一次法双扩散工艺	上海整流器厂 (10)
500 安可控硅元件的双扩散工艺	一机部整流器研究所 (18)
双向可控硅元件的双扩散工艺	一机部整流器研究所 (35)
可控硅元件管芯凹球形多块磨角	上海玻璃加工厂 (48)
用凹球形模对可控硅元件管芯表面磨角	北京椿树整流器厂 (51)
保护 $P-N$ 结的一种新方法——气相钝化法	上海无线电 14 厂 (57)
50 安可控硅元件的塑料封装	上海直流电机厂 (64)
低温重扩工艺	上海新华元件厂 (70)
用可控硅元件废管芯改制二极管	上海无线电 14 厂 (74)
提高 200 A 可控硅元件质量的体会	上海整流器厂 (80)
可控硅元件管帽的冷挤压工艺	上海玻璃纤维厂 (84)
可控硅元件底座的冷挤压工艺	上海标准件七厂 (88)
C-MA 型粉末钼片制造工艺	北京椿树整流器厂 (95)
高纯水的制备	北京椿树整流器厂 (99)
无毒电镀亮镍工艺	北京椿树整流器厂 (106)

双扩散法试制200安螺旋式 可控硅元件

西安电力整流器厂

我们遵照毛主席的“我们一定要有无产阶级的雄心壮志，敢于走前人所没有走过的道路，敢于攀登前人所没有攀登过的高峰。”和“打破洋框框，走自己工业发展道路”的伟大教导，组织了工人、技术人员对于使用双扩散工艺制造可控硅整流元件进行了研究和试制。经过用战无不胜的毛泽东思想武装起来的广大工人和技术人员的努力，实行土法上马，现已试制出200 A双扩散法螺旋式可控硅元件，并开始投入小批生产。

我厂工人同志直接参加科研试制还是第一次，所以在试制过程中遇到了大量的问题和困难。尤其是在整个试制过程中始终贯穿着两种思想、两条路线的斗争。在这场斗争中，广大工人群众刻苦学习毛主席著作，不断应用毛泽东思想来战胜各种错误思想。例如一开始，既无资料，又无设备，如何开始工作，是等待厂里购买设备，有了设备再干呢？还是自己动手先作设备？工人们学习了毛主席关于独立自主、自力更生的伟大教导，一致表示自己动手作设备，于是经过短时间的努力，很快作成了试验中必须的主要设备。在喷涂控制极图形时，一开始没有喷涂模具，工人们就用手涂进行试验。在试制过程中每当遇到问题和困难的时候，工人们就学习毛主席的教导“我们的同志在困难的时候，要看到成绩，要看到光明，要提高我们的勇气。”“任何新生事物的成长都是要经过艰难曲折的。在社会主义事业中，要想不经过艰难曲折，不付出极大努力，总是一帆风顺，容易得到成功，这种想法，只是幻想。”于是鼓起勇气“下定决心，不怕牺牲，排除万难，去争取胜利”。为了及时解决试制中出现的问题，工人们根据伟大领袖毛主席的教导“发扬勇敢战斗、不怕牺牲、不怕疲劳和连续作战（即在短期内不休息地接连打几仗）的作风”。经常连续二、三十小时不休息地工作，有的带病坚持工作，工人同志说得好“为了打击帝、修、反，为了和帝、修、反争时间，争速度，就是不吃饭，不睡觉，我们也要尽快把国家急需的200 A可控硅元件搞出来。”在工人们的这种刻苦努力下，使试制中出现的问题都一个一个地被解决了。

目前我们试制的双扩散法具有：设备少，工艺简单，不需要封管、氧化、光刻和蒸发，同时效率高，适宜于大量生产等优点。

我们试制的200 A双扩散可控硅元件目前均采用螺旋式结构，采用200 A硅整流元件散热器，即散热面积为1200厘米²，经过测试，正向额定电流能达到200 A的元件在最初几批试验中约40~50%，后来在工艺经过适当改进后，正向额定电流能达到200 A的元件有所提高，如：70年7月30日测试的19只元件中，正向额定电流达到200 A的14只，占74%；70年8月4日测试的14只元件中，全部达到200 A。70年8月22日测试的56只元件中，正向额定电流达到200 A的元件40只占71.2%，在200 A元件中，正向压降95%以上是在0.50~0.65伏的范围，因而元件的过载能力较好，如表1、2。

元件由于采用控制极短路，所以元件高温特性较好，高温伏安特性60~70%没有变化。

表 1

編 号	正 向 額 定 电 流 (A)	正 向 压 降 (V)	結 溫 (°C)
332	200	0.56	60
344	200	0.56	60
265	200	0.54	65
419	200	0.57	70
395	200	0.54	65
408	200	0.60	70
419	200	0.57	70
415	200	0.63	80
413	200	0.59	80
890	200	0.61	75

表 2

編 号	一 个 周 波			三 个 周 波		六 个 周 波		十 五 个 周 波	
1 溫升	4 倍 150°C	4.5倍 160°C	5 倍 175°C	3 倍 120°C	4 倍 155°C	3 倍 130°C	3.5倍 160°C	2.5倍 130°C	3 倍 155°C
242 溫升	3 倍 135°C	4 倍 175°C		3 倍 150°C	4 倍 185°C	3 倍 155°C	4 倍 195°C		
432 溫升	3 倍 130°C	4 倍 150°C		3 倍 140°C	4 倍 180°C	3 倍 150°C			

表 3

編 号		正向轉折电压 (V)	正向阻 断 电压 (V) 正 向 漏 电 流 (mA)	反 向 电 压 (V) 反 向 漏 电 流 (mA)
9	室 溫 120°C	800 800	700/0.90 700/1.35	700/0.64 700/1.75
13	室 溫 120°C	600 600	500/0.26 500/1.25	500/0.14 500/0.63
357	室 溫 120°C	800 800	700/0.36 700/1.70	700/0.26 700/0.56
394	室 溫 120°C	1000 1000	900/0.70 900/3.40	900/1.96 900/9.00
753	室 溫 120°C	1000 1000	900/0.60 900/1.9	900/0.70 900/1.70
766	室 溫 120°C	800 800	700/0.34 700/0.84	700/0.60 700/0.80
266	室 溫 120°C	800 800	700/0.34 700/0.84	700/0.60 700/0.80
411	室 溫 120°C	700 700	600/0.5 600/1.42	600/0.50 600/2.8

如表 3。

目前我们试制的元件电压在 500 V 以上的占 50% 左右，少数元件也有能 达 到 1200 V 以上。

下面着重谈谈控制极短路的基本原理、元件的结构选择、主要工艺、试制过程中遇到的问题以及目前存在的问题、改进意见和我们的几点体会：

一、控制极短路型可控硅的基本原理

我们的200A双扩散法可控硅元件是采用控制极短路型结构,如图1。控制极 G_s 和阴极短路。当可控硅加上正向电压并从阳极流来的电流很小时,由于 J_1 的扩散电位,使得从阳极流来的电流几乎全部不通过 J_1 结,而从 G_s 流入阴极。故 N_E 层无电子向 N_B 层注入,即此时变为PNP三极管的状态。由于空穴向 J_2 注入,于是得到:

$$I_A = \frac{I_{co}}{1 - \alpha_2} \quad (1)$$

其中 α_2 是从 P_B 层通过 J_2 注入空穴到达 P_E 层的百分数。

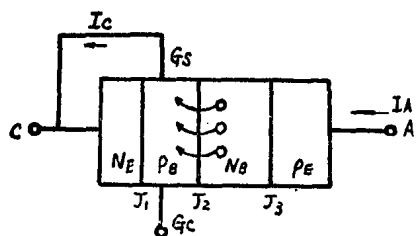


图1 控制极短路型结构

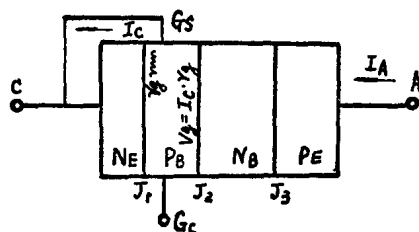


图2 横向电阻 r_g 产生的压降

由于 N_B 层较厚、注入效率差,故难以达到 $\alpha_2=1$,因此在此条件下可控硅不会开通。

如果加大外加电压,则 I_A 增大,随之 I_c 也相应增大,但由于 P_B 层的横向电阻 R_g 此时开始起作用,于是 I_c 通过 P_B 层则要产生一个电压降。 $V_g = I_c R_g$,如图2。当此电压降 V_g 大于 J_1 结的扩散电位 V'_g 时,即从阳极来的电流就要开始通过 J_1 结流入 N_E 层。根据电中性条件的要求,则 N_E 层也开始向 J_2 结注入电子。于是

$$I_A = \frac{I_{co}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2)$$

其中 α_1 是由 N_E 层注入的电子通过 J_2 结到达 N_B 层的百分数, α_2 是随 I_A 增加而增加。 α_1 则是当 I_A 未达到某一值 I_{ss} 之前,由于 $V_g < V'_g$,故 α_1 几乎近似于零,如图3。但当 I_A 达到 I_{ss} 时,即 $V_g > V'_g$, α_1 突然增加,使得 $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$,即使得可控硅转折。由此可见:对于控制极短路型元件,当外加电压未达到某一数值之前,其电流放大系数 α_1 几乎为零,不受任何外界条件的影响,这样就保证了高温时元件的 α 不会随温度的改变而变化。使元件在高温

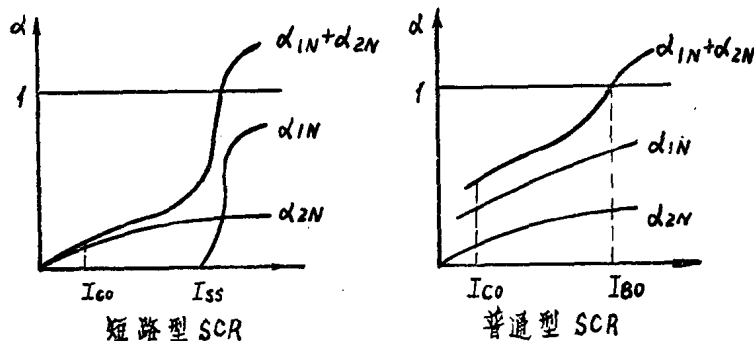


图3 α 值电流的变化曲线

时正向转折电压不下降，而普通可控硅元件，在高温时由于 α 随温度变化很灵敏，因而使元件在高温时正向转折电压下降严重。

由上述分析可以看出，控制极短路型可控硅元件的电流放大系数仅仅是根据 P_2 层的横向电阻来决定，而这个横向电阻可以由改变外形结构的几何形状来控制。

控制极短路型可控硅和普通的可控硅相比，前者控制极触发电流较大。同时转折电流和维持电流也要比普通可控硅大，其他就没有什么差别了。

二、结构选择

为了改善元件的高温特性，我们选择了控制极短路，引出控制极采用环形结构、管芯斜边采用反磨角，其结构如图4、5，工艺流程如图6。

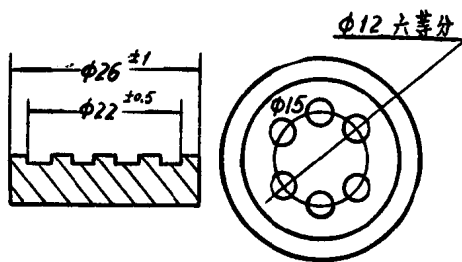


图4 硅片结构图
注：图4中 $\phi 15$ 应为 $\phi 1.5$

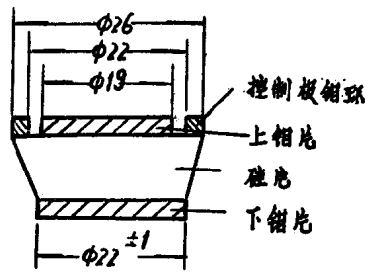


图5 管芯结构图

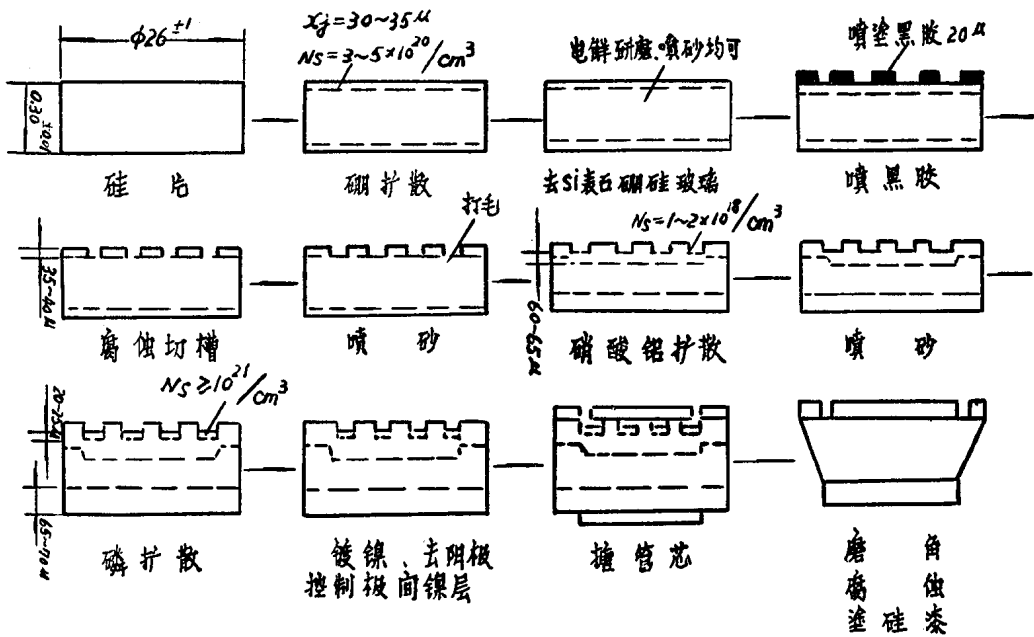


图6 主要工艺流程

三、主要工艺

在选择工艺时，我们考虑到必须使得设备、工艺尽量简单，同时要使得效率高，适宜于大量生产。因此我们将工艺选择了全部采用大气开管涂层扩散，由于我们条件的限制，不能

采用光刻、蒸发，于是我们就选用了喷涂黑胶保护腐蚀开槽的方法代替氧化、光刻，选用喷砂、镀镍代替蒸发，选用在焊料锅里搪锡的方法代替管芯的真空烧结。下面就谈谈我们的主要工艺。

(一) 扩散前的处理:

对于硅片每次扩散前的清洁处理我们均采用: 四氯化碳、甲苯、丙酮超声波去油后, 再用王水煮 5 分钟, 然后用去离子水冲洗干净后, 用氢氟酸浸泡 5 分钟, 用大量去离子水冲洗和煮沸 3~5 次, 最后将硅片烘干。

(二) 硼扩散:

采用 B_2O_3 (和无水乙醇配成饱和溶液) 开管涂层扩散, 硅片两面将杂质源涂好后, 在其表面适当喷上少量 Al_2O_3 粉, 以保证扩散后容易泡开获得一个较好的表面。将涂好杂质源的硅片重迭起来, 放入清洗好的石英舟, 推入扩散炉中进行扩散, 我们选用的扩散温度为 $1250^{\circ}C$, 扩散 4 小时, 可以获得 $3\sim5\times 10^{20}/\text{厘米}^3$ 的表面浓度和约 30μ 的结深。

硼扩散的目的, 主要是为了在阳极面和控制极面形成一个具有高浓度的 P 型表面, 以便产生良好的欧姆接触。

(三) 喷涂黑胶:

对于阴极面我们采用化学腐蚀的方法将阴极面的硼扩散层全部腐蚀掉, 然后在其腐蚀面上扩散硝酸铝, 使得形成一个具有 $1\sim2\times 10^{18}/\text{厘米}^3$ 表面浓度的一次扩散层。因而在腐蚀前必须对于阴极面根据所需图形喷涂黑胶进行保护, 喷涂是根据所需图形, 使用钢材加工喷涂模具, 喷涂时利用磁性模具和喷枪进行喷涂。如图 7。

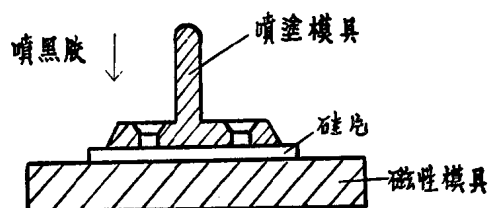


图 7 喷黑胶剖面示意图

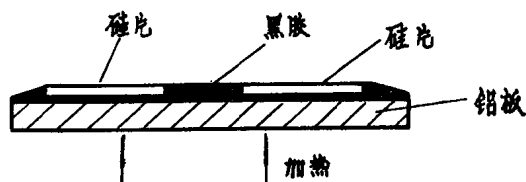


图 8 硅片粘在铝板上

这样喷涂出来的图形十分完整, 同时效率很高, 适宜于大量生产。将阴极面喷涂好图形的硅片放到全部涂有黑胶的铝板上, 并使用电炉加热, 使黑胶熔化后, 硅片牢固地粘在铝板上如图 8, 然后进行腐蚀。

(四) 化学腐蚀开槽:

将上述粘好的硅片, 使用 $HF:HNO_3=10:1$ 的混合溶液进行腐蚀, 腐蚀时间要根据腐蚀温度而定, 一般如果室温在 $15\sim 20^{\circ}C$ 时, 1 分 30 秒可以腐蚀 30μ 左右, 是否已将阴极面的硼扩散层全部腐蚀除去, 使用热探针法测量其导电类型来判定。

腐蚀时表面往往容易产生氧化, 如有这种现象发生时, 再利用 $HF:HNO_3=1:6$ 的混合溶液腐蚀 1 秒钟即可。

(五) 喷砂:

对于将硼扩散层全部挖去的阴极腐蚀面, 非常光亮, 这对于下一个工序的硝酸铝涂层扩散时不利, 即光亮表面对于杂质溶液的吸附能力差, 容易造成硝酸铝扩散时铝原子扩散不进去, 因此必须首先对其腐蚀面进行喷砂打毛, 喷砂是采用 M20 金刚砂, 并使用压缩空气或氮

气进行, 喷枪可以采用喷油漆用的喷枪。

(六) 硝酸铝扩散:

在喷砂后的阴极面上, 进行含有少量 B_2O_3 的硝酸铝杂质的开管涂层扩散。

杂质源的配比是:

将硝酸铝溶于无水乙醇配成饱和溶液, 将 B_2O_3 和无水乙醇也配成饱和溶液, 并将其饱和溶液: 无水乙醇 = 1:10 配成稀释溶液。然后将硝酸铝饱和溶液: B_2O_3 稀释溶液 = 2:1, 此混合溶液即作为硝酸铝扩散的杂质源。

将涂好杂质源的硅片, 阴极面对阴极面、阳极面对阳极面重迭起来放入清洗好的石英舟, 推入扩散炉中进行扩散, 扩散温度采用 1250°C , 扩散 16 小时, 结深可以达到 $60\sim 65\mu$, 表面浓度可以良好地控制在 $1\sim 3\times 10^{18}/\text{厘米}^3$ 。

(七) 磷扩散:

采用 P_2O_5 涂层扩散 (和无水乙醇配成饱和溶液), 可以是开管扩散, 也可以是用氧气保护扩散, 将涂好后的硅片, 阴极面对阴极面, 阳极面对阳极面迭起来放入清洗好的石英舟, 推入扩散炉扩散, 扩散温度为 1250°C , 扩散 4 小时, 结深可以达到 20μ 左右, 表面浓度可以达到 $10^{21}/\text{厘米}^3$ 以上。

(八) 去阳极及控制极面的磷层:

磷扩散后在其阳极面和控制面也扩进去了几个 μ 的磷层、使用 M 20 金刚砂磨去, 由于控制极环和控制极短路点是凸出的, 所以研磨时对其阴极面磷层没有影响。是否将其磷扩散层磨去, 使用热探针法测量来判定。

(九) 镀镍、去阴极、控制极间镍层:

对于完成磷扩散的硅片进行化学镀镍和真空高温处理 (800°C) 以及二次镀镍, 然后将阴极和引出控制极环之间的镍层以及阳极面边缘磨角部分的镍层, 仍然采用喷涂黑胶保护腐蚀的方法磨蚀去掉如图 9。

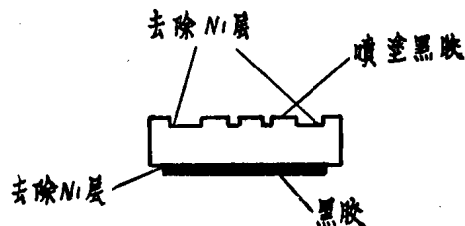


图 9 黑胶保护腐蚀镍层

(十) 搪管芯:

硅片、上下钼片及钼环镀镍后分别涂上助焊剂 (硅片的助焊剂使用氯化锌, 氯化铵混合溶液, 钼片助焊剂使用硬脂酸加松香配成)。然后和焊料片 (焊料为 95% 的 Pb, 3% Sn, 2% Ag) 使用镊子夹在一起浸入已溶化了的焊料锅 30 秒钟后取出, 即管芯搪成。使用这种方法其沾润情况良好, 效率高, 适宜大量生产。

(十一) 磨角腐蚀:

根据我们的结构和 PN 结边界角度与击穿电压的关系, 我们选择了 J 反磨角, 即使得 J 结与低杂质浓度侧的夹角 θ 为锐角, 这样对其正向转折电压有利。

目前我们磨角角度是采用 12 度, 腐蚀是采用 $\text{HF}:\text{HNO}_3=1:6$ 混合溶液腐蚀 2 分钟, 腐蚀后清洗烘干, 涂硅有机漆。

管芯和底座的焊接是在大气中采用电阻丝加热进行, 然后戴上管帽进行氩弧焊封接。

四、在试制中出现的问题

1. 由于我们条件的限制, 在工艺路线选择时考虑到不能采用光刻的方法, 于是我们选用

了喷涂黑胶保护腐蚀开槽的方法。一开始没有模具就采用手工刻图形,不仅效率低,图形也很不规则,于是后来改用喷涂模具和磁性模具,这样不仅保证了图形完整,而且效率很高,适宜大批生产。

在腐蚀开槽过程中由于腐蚀液温度不能很好控制,在腐蚀过程中往往使得阳极面的黑胶有脱落现象,因而往往使得阳极面出现腐蚀坑,这种片子扩散后往往正、反向都无电压,于是后来将阴极面喷好图形的硅片用黑胶粘在铝板上(铝板全部涂上黑胶)。进行腐蚀,解决了这个问题。

2. 对于腐蚀开槽的阴极面我们采用涂层扩散硝酸铝的方法,形成一次扩散层,但是在我们开始使用硝酸铝扩散时,发现腐蚀开槽以后的表面硝酸铝扩散不进去,后来我们又改变杂质源,分别采用铝硅镓和含镓硅粉进行真空扩散,结果发现阴极面的表面浓度都在 $10^{20}/\text{厘米}^3$ 的数量级,这主要是由于真空扩散时控制极面和阳极面的硼扩散层的硼原子产生外扩散而造成。后来我们又详细分析了腐蚀开槽面硝酸铝扩不进去的原因,发现主要是由于腐蚀面太光亮的原因,因为硝酸铝扩散主要是靠硝酸铝杂质源中混有少量 B_2O_3 杂质,扩散时 B_2O_3 和硅表面产生一层硼硅玻璃,将其硝酸铝原子掩蔽起来,使之不会挥发,从而铝原子往硅中扩散,但由于腐蚀面太光亮,表面吸附杂质能力差,使得其表面不易形成一层硼硅玻璃,扩散时硝酸铝原子很快挥发跑掉,故铝原子扩散不进去。于是后来对腐蚀面进行喷砂打毛,然后再扩散硝酸铝,解决了这个问题。

3. 磷扩散开始时是采用 P_2O_5 开管涂层扩散发现表面容易产生腐蚀坑,经常容易扩穿,于是后来采用氧气保护涂层扩散后解决了这个问题。

4. 搪管芯过程中,开始发现硅片很容易炸裂,后来曾改用在真空炉里烧,但效率太低,不适宜大量生产,后来又进一步研究,在搪管芯前必须保证硅片上的助焊剂一定要完全烘干,同时对搪管芯时焊料锅的温度严格控制后,硅片炸裂现象基本消除。

搪好的管芯解剖后发现有的管芯沾润情况很差,因此有的管芯在正向压降不大的情况下,正向额定电流只能通过50 A。于是后来在搪管芯时将管芯从焊料锅拿出来立即使用镊子将钼片、硅片动一动,以保证焊料良好沾润。解剖后发现沾润情况有显著改善,并且基本上消灭了正向额定电流只能通过50 A的现象。

五、存在的问题和改进意见

在试制中由于我们的工作还作得不够细致,所以还存在着很多问题:

1. 元件电压水平很低,远远不能满足使用的要求,这一方面是由于工艺操作中不够细致,往往造成清洁度不够,以及各层的扩散深度控制还不稳定,使电压受到影响,另一方面我们使用的硅单晶材料电阻率在 $10\sim 25$ 欧姆厘米左右,尤其是位错密度较大,往往在化学腐蚀开槽后发现腐蚀面有明显的位错线,这也是影响电压的一个重要原因。

2. 结构尺寸不够合理:如下钼片 $\phi 22$ 毫米和控制极环的内径一样大,这样就使得管芯机械强度差,同时硅片为 $\phi 26$ 毫米而下钼片为 $\phi 22$ 毫米,影响了阳极散热面积,因而我们最近正在研究,将下钼片改为 $\phi 26$ 毫米,不用控制极钼环,采用正磨角的结构,正向特性有较大改善,不过现在控制极焊接问题还未解决。

3. 正、反向特性不够对称,甚至个别元件差别很大。同时使用上述工艺制得的管芯只适用于螺旋型结构,如果要作为平板型结构上,下钼片和硅之间的焊接必须采用真空烧结的方

法。而不能采用搪锡的方法，其他工艺和螺旋型结构相同。

改进意见：

(1) 对于目前采用的反磨角结构一方面正、反向电压不够对称，另一方面也没有充分利用硅片面积，所以目前正在研究将引出控制极放在硅片的中心，下钼片采用 $\phi 26$ 毫米，磨角采用正磨角，其他工艺完全相同。目前采用这种结构已作出 200A1000V 样品，现正在继续试制。

(2) 为了进一步提高电流容量，目前正在试制平板型500 A可控硅元件，工艺流程如图 10。其工艺较 200 A 螺旋型元件更为简单。

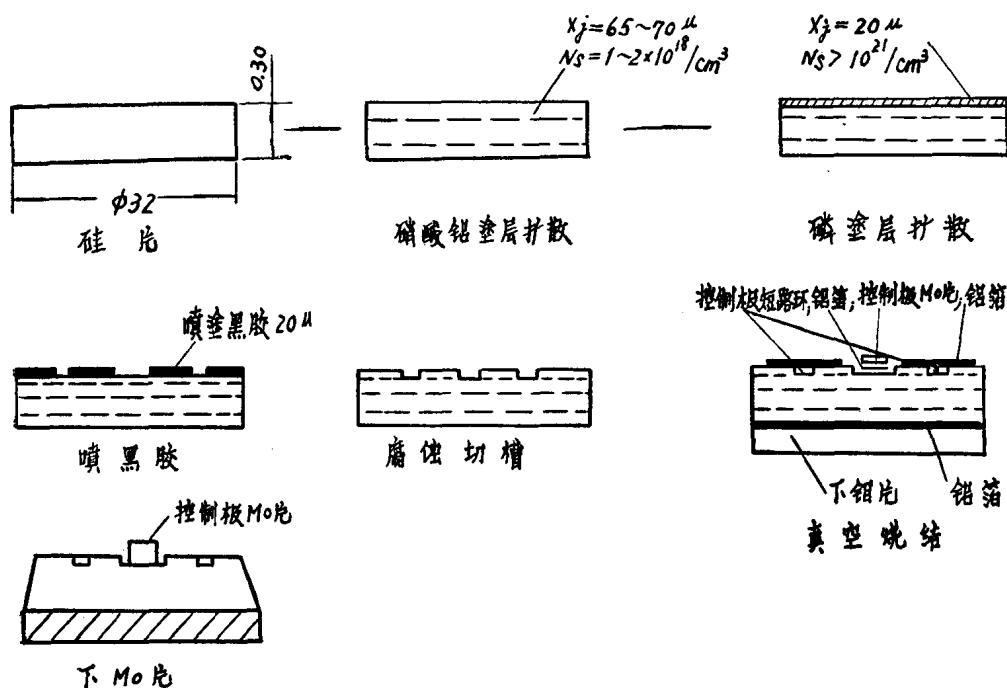


图10 平板型500 A 可控硅元件的主要工艺过程

磨角、腐蚀、溅射、涂硅漆：

以上扩散方式、扩散杂质源、扩散温度和时间，以及腐蚀切槽工艺均和前面所述的200 A 工艺完全相同，真空烧结是采用石墨粉装模的方法，烧结温度约 700°C 左右，SiO₂ 复盖层的溅射和合金扩散相同。

目前我们已利用这种工艺作出了600 A 400 V 可控硅元件（水冷）现正在进一步研究试制。

六、几点体会

(1) 我厂工人直接参加科研试制还是第一次，实践证明用战无不胜的毛泽东思想武装起来的工人阶级对伟大领袖毛主席最热爱，最能听毛主席的话，因此任何困难都能克服，任何人间奇迹都能创造出来，在整个试制过程中，广大工人群众始终牢记毛主席关于“自力更生”、“破除迷信，解放思想”、“打破洋框框，走自己工业发展道路”的教导，在设备条

件差的情况下，尽量采用土法上马，所以整个工艺和设备都十分简单，适宜于大量生产。

(2) 元件采用螺旋式结构，使用比较方便，尤其是能满足一些特殊应用的要求。

(3) 为了适应大量生产，因此考虑到工艺要尽量简单，全部扩散均采用开管涂层扩散，不仅可以节省大量石英材料，而且在沒有石英加工的条件下也可以进行。

(4) 控制极短路点是采用喷涂黑胶保护，化学腐蚀开窗的方法形成，因而不需要抛光氧化、光刻，不仅简化了设备，而且工艺也很简单，效率很高，适宜于大量生产。

(5) 欧姆接触是采用喷砂镀镍的方法，上、下电极的焊接是采用上、下钼片、硅片镀镍后夹在一起在焊锡锅里搪锡的方法，其沾润良好，不仅不需要特殊设备，而且效率很高，适宜于大量生产，还可以给国家节约大量黄金。

我们的工作还作得很不够，还存在有很多缺点和问题。

目前我们正在进一步掀起刻苦学习毛主席著作的新高潮，进一步贯彻落实毛主席的一系列最新指示，不断改进我们的工作，以适应当前形势的需要，并向高电压、大电流方向努力，为我国电子工业的发展贡献出我们的一份力量。

可控硅元件的一次法双扩散工艺

上海整流器厂

无产阶级文化大革命运动推动了我国社会主义建设的发展。在党的“九大”团结胜利的伟大红旗指引下，我国电子工业战线和其他各条战线一样，出现一个生气蓬勃的新局面。全国人民在毛主席“独立自主、自力更生”的方针指引下走我国自己发展工业的道路。批判了叛徒、内奸、工贼刘少奇的“洋奴哲学”、“专家治厂”、“爬行主义”等修正主义黑货。破除迷信，解放思想，大破“电子工业神秘论”，土法上马，在可控硅元件的研制，生产，应用等方面都取得了成绩，积累了不少经验。

但是我国工业的飞速发展对可控硅元件质量与数量的要求越来越高。而目前所采用的“扩散合金”法老工艺越来越不能适应新形势的要求。特别“扩散合金法”工艺需要大量的黄金，节约大量的黄金对于我国社会主义建设是具有很大的意义。

用“双扩散”方法制造可控硅与合金法相比具有质量高不耗费黄金的优点。具有我国自己特点的“一次双扩散”与国外的“双扩散”工艺相比还有工艺简单不需要光刻等设备的特点。可以利用“扩散合金法”原有设备稍加改革就可进行“一次双扩散”法的生产。目前一次双扩散法达到了扩散电压 900 V ~ 1300 V，开通特性也很好。

在“一次双扩散”的研制中，我们以战无不胜的毛泽东思想为武器克服了一个又一个困难。首先我们以什么指导思想去进行“双扩散”的研制。就目前情况来看有二部分资料一部分是日本进口资料另一是平面管工艺资料，但无论是那一条都存在由于多次热循环致使载流子寿命显著下降，正向压降大的缺点。到底采用什么具体办法走什么路？我们学习了伟大领袖毛主席的教导：“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。”毛主席的教导增强了我们的信心，我们就是要打破洋框框走自己工业发展的路。在分析了日本的双扩散工艺和平面管双扩散工艺的缺点后，采取一次热循环在一次扩散过程中同时形成 N^+ ， P 层并利用扩散系数的差异制成比较理想的短基区与长基区。同时又学习了毛主席的哲学思想着手找出“一次双扩散”的主要矛盾；就是合理选用杂质源和选择适当的扩散温度，这个问题很好解决后其他问题就迎刃而解。在研制的过程中遇到砷的蒸汽压很高，容易发生爆炸，并且砷蒸气有毒等等，但全组同志发扬了“一不怕苦，二不怕死”的革命精神，在为毛主席争气为祖国争光的决心下明知征途有艰险，越是艰险越向前，经过一个多月的奋战于70年八月上旬使“一次双扩散”获得成功。

一、基本原理

伟大领袖毛主席教导我们：“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。感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。”为了对一次双扩散有更深刻地理解，现将一次扩散形成 PNP 结构的作用机理，作一扼要的分析。

可控硅整流元件的整个 PNP 结构全部是用扩散的方法制成的，为了与扩散——合金法相区别，称这种方法为“双扩散”。一般双扩散的工艺是采取二次选择扩散的办法，即先在

具有 n 型杂质的硅单晶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, 从而构成元件整个的 PNPN 结构。而本文所讨论的, 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, 一次就可作成元件整个的 PNPN 结构。为了与一般双扩散工艺相区别, 称这种方法为“一次双扩散”。

为了达到一次扩散即能形成 PNPN 结构的目的, 选择两种杂质源的基本原则必须是: $N_{sn} \gg N_{sp}$, 即 N 型杂质源的表面浓度 N_{sn} 必须远大于 P 型杂质的表面浓度 N_{sp} , 因为只有这样才有可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 $D_p > D_n$, 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度, 从而达到一下子作成整个 PNPN 结构的目的。上述情况可用图一表示, 图中 N_b 为单晶材料原有的杂质浓度, X_{jn} 为 N^+ 型层扩散结深, X_{jp} 为 P 型层扩散结深, 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, 就是杂质在适当的高温下, 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 (本文所述一次双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:

$$\begin{aligned} N(X, t) &= N_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) \\ &= N_s \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

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, 在一次双扩散中, 图 1 曲线 1 和 2 分别表示为 N 型杂质和 P 型杂质在硅片中的分布曲线。我们若将 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

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

今设曲线 1 和曲线 2 的交点 a 上杂质浓度为 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

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

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

同理, P 型杂质的扩散结深为

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

短基区的宽度为

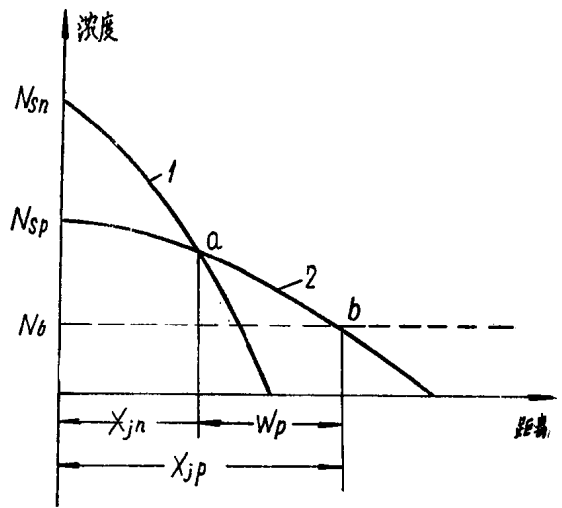


图 1 一次双扩散杂质浓度分布曲线

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

从上面的分析可以看出, 一次双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。但是正如毛主席所教导的“任何过程如果有多数矛盾存在的话, 其中必定有一种是主要的, ……”而一次双扩散中要得到理想的 X_{jn} , X_{jp} , N_{js} 等重要设计参数, 最主要的就是归结为合理的选用杂质源和适当地选择扩散温度和时间。这个问题解决了其他问题就迎刃而解了。

一、杂质源

前已叙述, 选用杂质源的基本原则是

$$N_{s1} \gg N_{sp}, \quad D_p > D_s$$

但是, 是不是所有合乎上述条件的杂质源, 都可以形成一次双扩散所要求的 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°C 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一种杂质源, 作为 P 型杂质源在图一曲线 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_{js} 必然较低, $N_{js} \ll 5 \times 10^{16}$ 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_{js} 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 r_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。我们伟大领袖毛主席教导我们, 矛盾的诸方面往往“因一定的条件, 一面互相对立, 一面又互相联结、互相贯通、互相渗透、互相依赖, ……”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^+ 型层如图二所示。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 r_2 大为降低, 或者更明确地说, 就是使 α 随电流变化的曲线显著地向右移动, 从而改善了元件的高温特性。至于

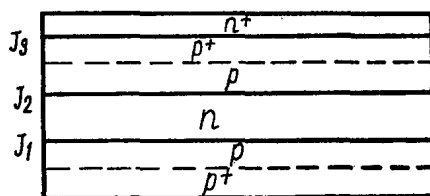


图2 一次双扩散后硅片中各层杂质浓度的分布

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^+ 型层如图二所示。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 r_2 大为降低, 或者更明确地说, 就是使 α 随电流变化的曲线显著地向右移动, 从而改善了元件的高温特性。至于

N 型杂质源, 我们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 P 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, 选用铝硅镓作为 P 型杂质源、砷锑作为 N 型杂质源, 能够达到“一次双扩散”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。

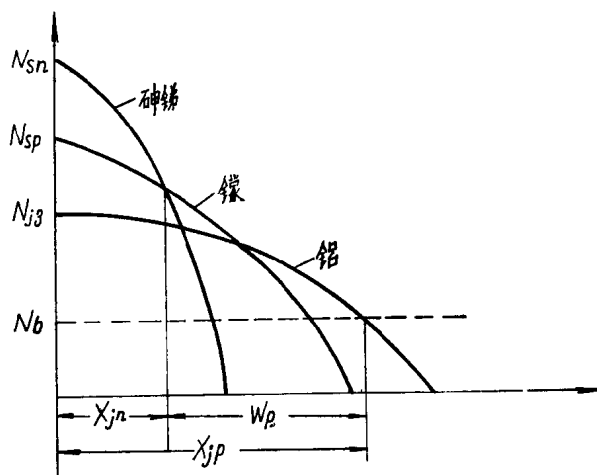


图3 采用铝硅镓为 P 型杂质沉后的杂质分布

二、扩散温度的选择

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, 可列出一双扩散 P 型与 N 型扩散层结深计算公式:

$$X_{jn} = 2\sqrt{D_{As} \cdot t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_{js}}{N_{As}}\right) = 2\sqrt{D_{Ga} \cdot t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{N_{js}}{N_{Ga}}\right) \quad (6)$$

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

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

式中 D_{Al} 、 D_{As} 、 D_{Ga} 分别为铝、砷和镓的扩散系数, N_{Al} 、 N_{As} 、 N_{Ga} 分别为铝、砷和镓的表面浓度

从上式(6)、(7)、(8)中可知, 影响扩散结深 X_{jn} 、 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。

一次双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气压力, 倘若没有其他的混生成物产生, 则可以认为此时石英管中的杂质蒸气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气压力降低, 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。一般是利用调整扩散温度的方法来获得所需的结深。

扩散时间对结深的影响, 可在公式(6)、(7)中直接看出。一般结深与 $\sqrt{t}$ 成正比。

以上分析了扩散温度与时间对表面浓度和结深的关系。但是, 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, 我们是通过调整扩散温度的方法来达到所需设计参数的目的。经过几次的实践摸索我们认为扩散温度为 1253°C 是比较好的。这时表面浓度 N_{sn} 一般为 $3 \sim 6 \times 10^{20}$ 原子/厘米³, X_{jn} 为 $21 \sim 25 \mu$, X_{jp} 为 70μ 左右, 短基区为 $45 \sim 50 \mu$ 之

间，扩散重复性很好，长基区约 140μ ，扩散电压在 $900\sim 1300$ 伏，开通特性也很好， V_g 为 $0.7\sim 1.5$ 伏， I_g 为 $30\sim 60$ 毫安，正向压降为 $0.8\sim 0.85$ 伏（采用的是区熔单晶）。

我们在作“一次双扩散”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。同时，扩散系数仅当作温度的函数。其实，它是随基片杂质浓度与表面浓度的变化而变化的，这就导致了使用余误差分布与实际情况的差别。但是，

“一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。”我们对“一次双扩散”的认识还是很肤浅的，让我们遵循伟大领袖毛主席的教导，通过不断地实践和总结，使我们对“一次双扩散”的认识有进一步的提高。

二、工艺流程简介

毛主席教导我们“我们不但要提出任务，而且要解决完成任务的方法问题”前面对“一次双扩散”的基本原理作了介绍。但如何通过适当的工艺来实现我们的设想呢？在考虑这个问题的时候，我们的指导思想是，尽量采用原有“扩散合金”法的工艺设备，通过简易的工艺流程来达到“一次双扩散”的目的。造出高质量的产品来。

“一次双扩散”与通常的双扩散方法有不同的特点，下面各列出它们的工艺流程。

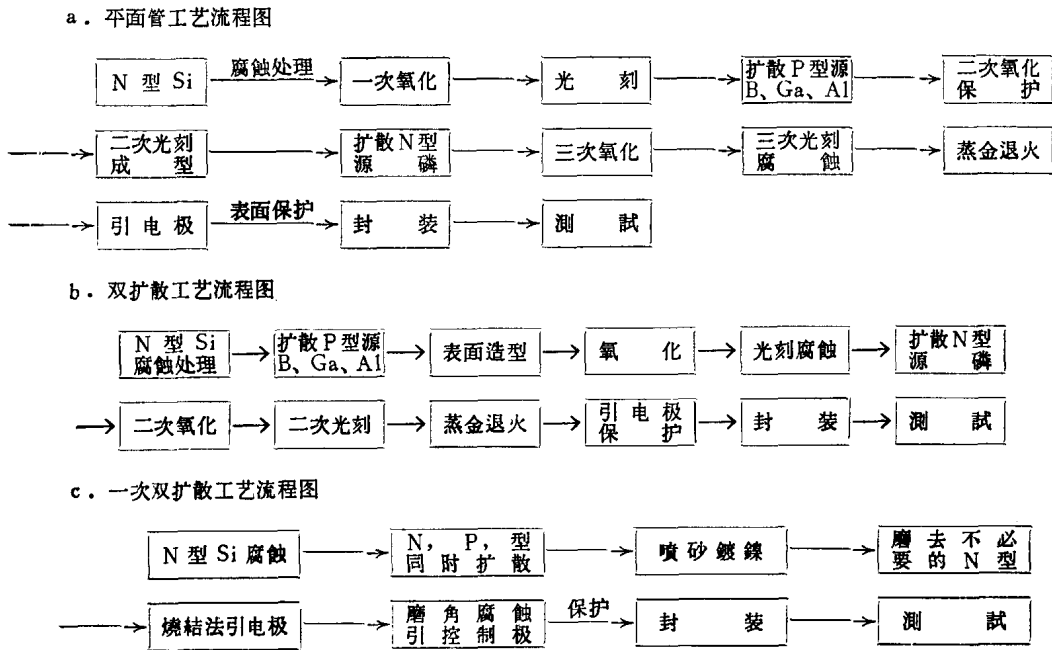


图 4 工艺流程比较图

从上面的图 4 流程图中可见 a 、 b 两种情况都要经过多次的热循环，从而使载流子寿命剧烈地减少，导致正向压降偏高。同时工艺工序烦多，容易引起沾污。“一次双扩散”只经过一次高温（ 1253°C ）热处理，对材料载流子寿命损失较少，工艺操作简单，设备要求不复杂，有利于成品率的提高。与扩散合金法相比更显出“一次双扩散”的优点。因为这不需要