



工农兵学员科学研究总结报告选登

高反压硅功率晶体管的设计和试制*

工农兵学员 徐之韬 王明福 肖宗兰 李守英

刘立春 陈水国 赵柏芳

(武汉大学物理系半导体专业)

近几年来,国内外对于高反压硅功率管进行了较多的研究工作.这次我们半导体专业1970级工农兵学员利用毕业实践的机会,组成了试制小组,在校办«九一二»电子厂半导体车间的工人同志帮助和专业教师的指导下,初步试制出高反压硅功率管.本文就是我们小组的小结.

一、简介

高反压硅功率晶体管主要应用于彩色电视机的垂

直偏转和水平偏转的电路中,以及雷达显示电路和其它耐高压的场合,其工作电压一般为数百伏,电流为数安培,频率 f_T 在1MC左右, β 在5—10倍以上.

我们试制的高反压管为硅NPN型,其参数要求如下:

$$P_{CM} = 50W; I_{CM} = 3A; BV_{cbo} \geq 1.2kV;$$

$$BV_{ceo} \geq 700V; BV_{ebo} \geq 4V; h_{FE} \geq 10; f_T = 1MC.$$

光刻版总图如图1,剖面图如图2.

由图1可见,版面形状是圆形,目的是为了便于磨角和消除cb结的棱角电场的影响.发射区是“车轮

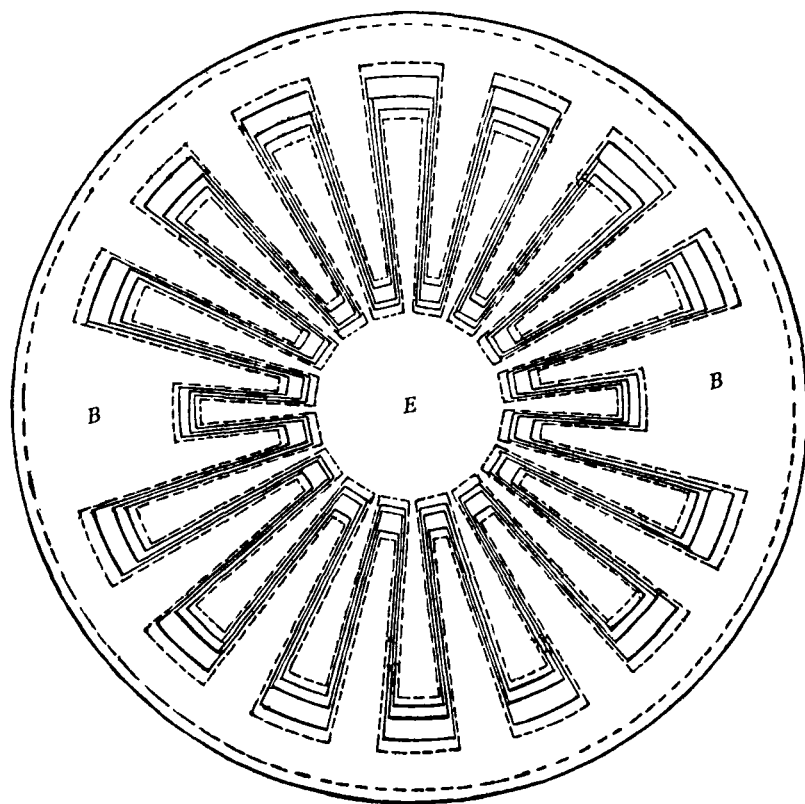


图1 光刻版总图

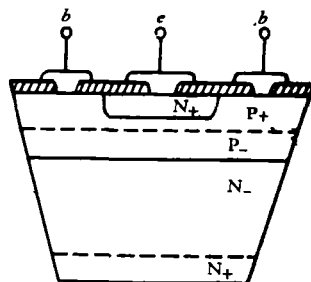


图2 高反压管剖面图

形”,有利于增加发射区周长 L_E ,发射区共有16条,长的14条,短的2条.图中引线区面积较大,目的是为了便于压焊引线或采用软焊料.

主要尺寸如下:

最大直径: 6mm(基极反刻铝圆形直径).

最小间距: 发射极金属区、引线孔、发射极扩散区三者边缘之间以及基极引线孔和基极金属区两者边缘之间

* 1974年3月25日收到.

距离为 $20 \pm 5 \mu$ 。

$c-b$ 间距: 70μ (发射区边缘与基极引线孔边缘间的距离)。

发射区中心圆形直径 1.4mm 。发射区条长(沿半径方向): 长发射区为 1.7mm , 短发射区为 1mm 。发射区条宽: 长发射区 $d_{\max} = 500 \mu$, $d_{\min} = 150 \mu$, 短发射区 $d_{\max} = 380 \mu$, $d_{\min} = 150 \mu$ 。发射区周长为 6.2cm , 发射区面积 10mm^2 , 集电极面积 28.3mm^2 。

二、设计思路

高反压硅功率管涉及的矛盾很多, 设计中必须抓住主要矛盾方面, 高反压管的主要矛盾方面当然就是高的击穿电压。我们知道, $p-n$ 结的击穿是由于结在反向偏压作用下, 存在于结中的高电场 (E_{\max}) 使运动于结中的载流子产生雪崩效应所引起的, 所以, 要提高结的耐压性能, 入手点就是要设法减小反向偏压下结中的电场强度(包括体内电场、表面电场以及结中的电场集中效应)。下面的分析是基于这一想法的。

1. 关于原材料的选择问题

为了提高 $c-b$ 结的耐压性能, 衬底材料的电阻率 ρ_c 必须要大, 击穿电压 BV_{cbo} 与 ρ_c 的关系可由经验公式^[1]表示为,

$$BV_{cbo} = 85\rho_c^{0.611} \quad (1)$$

依照本文设计规范 $BV_{cbo} \geq 1.2 \text{kV}$, 因此由(1)式得到 ρ_c 应在 $30 \Omega\text{-cm}$ 以上, 我们选取的范围为 $(30-60) \Omega\text{-cm}$ 。

材料的均匀性必须良好, 并要求晶格缺陷(如位错)极少。因材料的非均匀性以及位错的存在都影响到结的平坦性, 而结的非平坦性将造成结中电场的局部集中, 从而容易产生局部击穿, 影响了结的耐压性能。因此我们试制中采用的单晶基本上是无位错的。

材料的少数寿命(τ)是反应单晶质量的一个参数, 同时我们考虑到, 如果 τ 小了, 在基区宽度 W_b 较大(20μ 以上)时, β 难于作上去, 因此在我们的工作中选择 τ 为 $500-1000 \mu\text{s}$ 左右。同时, 在工艺过程中的高温氧化和扩散后, 采取自然冷却, 炉内缓慢降温, 以减缓少数寿命的下降和尽量减少热缺陷的产生。

2. 关于 $c-b$ 结的结构及基区杂质浓度的考虑

一般硅平面管在基区扩散时都采用选择性扩散, 形成管芯后剖面结构如图3所示。由图可见: 在 $c-b$ 结的表面 A, B 处以及体内 C, D 处, 由于尖角或曲率较大, 棱角电场的影晌将产生低击穿。为了提高击穿电压常采用台面工艺, 台面管剖面图如图4。由图4可见, 虽然台面结构避免了平面结构中的棱角电场, 但在图中 C', D' 处, 是一个角度较大的负角度, 这个地

方的击穿电压低于体内。因此, 我们采用圆形硅片和光刻图形, 基区扩散采用非选择性的大面积扩散, 并采用磨正斜角的工艺。

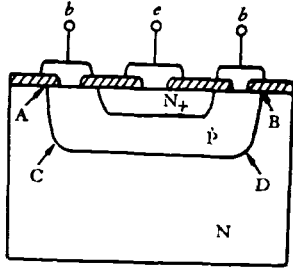


图3 平面工艺的棱角电场影响击穿电压

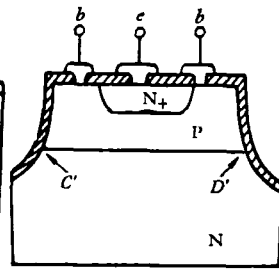


图4 台面工艺仍存在棱角影响

从图5中可以看出通过磨正斜角可以提高击穿电压。 $p-n$ 结的击穿是由体内击穿和表面击穿两者中先发生的一种所决定的。对于一个实际的器件, 它的击穿往往首先发生在表面处, 即主要是表面击穿限制了器件的击穿电压。磨正斜角以后, 消除了硅片表面残缺处对击穿电压的影响, 另一方面 $c-b$ 结表面空间电荷层拉宽了, 降低了表面电场, 因而提高了表面击穿电压, 即提高了 $p-n$ 结的击穿电压。在某些情况下, 采用磨正斜角措施后, 有可能使表面击穿比体内击穿发生迟, 即击穿主要由体内击穿机构决定。

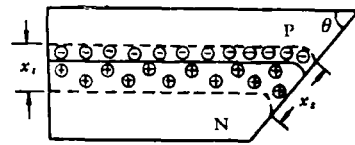


图5 磨正斜角减小表面电场

若磨负角度也可以提高击穿电压, 但角度需小于 10° , 这样原始硅片的面积要求较大, 增加了高阻单晶的消耗, 因此我们采用 $25-30^\circ$ 的正斜角。

$p-n$ 结的耐压性能还与结两边的掺杂浓度有关, 这从 $p-n$ 结中最大场强表示式看出:

$$E_{\max} = \left(\frac{2qV}{\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 q 为电子电量, V 为外加电压, ϵ 为硅的介电常数, ϵ_0 为真空电容率, N_A 为 p 区净掺杂浓度, N_D 为 n 区净掺杂浓度。

当 $N_A \gg N_D$ 时, 结为非对称的突变结, 则 E_{\max} 为

$$E_{\max 1} = \left[\frac{2qV_i N_D}{\epsilon\epsilon_0} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

当 $N_A = N_D$ 时, 结为对称的突变结, 则 E_{\max} 为

$$E_{\max 2} = \left[\frac{qV_i N_D}{\epsilon\epsilon_0} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

如果衬底掺杂浓度 N_D 和结中最大场强 E_{\max} 相等, 则:

$$\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} = \left[\frac{2qV_1 N_D}{\epsilon \epsilon_0} \right]^{1/2} : \left[\frac{qV_2 N_D}{\epsilon \epsilon_0} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

在 $E_{\max 1} = E_{\max 2}$ 时,

$$V_2 = 2V_1. \quad (6)$$

可见对称的突变结的击穿电压可为非对称结的两倍。当然在工艺上作出严格的对称突变结是有一定困难的,但可作成 $p_+-p_--n_-$ 结的结构。 p_- 层的引入可以减小 E_{\max} , 提高击穿电压; p_+ 层的引入可以提高基区表面浓度,增大晶体管的穿通电压,且能得到较好的线性输出。为此使用以下工艺: p 型基区封管扩散,杂质源为 Al-Si-Ga 合金,封管扩散后再作一次提高基区表面浓度 $N_s(B)$ 的硼扩散。因为 Al 在硅中的扩散系数大,能获得较大的 x_{jc} ,而 Al 在硅中的固溶度不大,可以获得一个 p_- 层。在杂质源中掺入了 Ga, Ga 的扩散系数比 Al 小,但固溶度比 Al 大,能提高 $N_s(B)$,但封管扩散得到的表面浓度常为 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 左右,通过以后的氧化和磷扩散,将下降到 $10^{16}/\text{cm}^3$ 数量级,所以在封管扩散以后再作一次硼扩散,表面浓度可提高到 $(2-3) \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的水平。经封管扩散和硼扩散后的杂质分布如图 6 所示。这样, $c-b$ 结就为一个 p_--n_- 结,使 BV_{cbo} 得到提高。

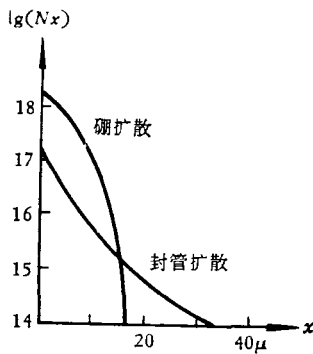


图 6 p 型扩散的杂质分布

3. 基区宽度和结深的问题

对于高压管,基区宽度 w_b 与放大倍数 h_{FE} 、穿通电压 V_{cp} 、抗二次击穿能力以及 f_T 有关。

从放大倍数 h_{FE} 的要求来看,取 $h_{FE} = 30$ 。假设注射效率为 1, α_0 可依下式表示:

$$\alpha_0 = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{w_b^2}{D_{nb} \tau_{nb}}. \quad (7)$$

取基区少子平均扩散系数 $\bar{D}_{nb} = 20 \text{cm}^2/\text{sec}$, 基区少子寿命 $\tau_{nb} \approx 10 \mu\text{s}$, 得到 $w_b \approx 35 \mu$ 。

对于高压功率管, f_T 主要由基区渡越时间 τ_b 决定,即:

$$\begin{aligned} f_T^{-1} &= 2.8\pi\tau_b \\ &= 2.8\pi \frac{w_b^2}{2.43\bar{D}_{nb}}. \end{aligned} \quad (8)$$

对 $f_T = 1 \text{MC}$ 的管子,则要求基区宽度 $w_b \approx 24 \mu$ 。

从穿通电压和抗二次击穿能力看,基区宽度小于 15μ 是不恰当的,例如在 1000V 反向电压下,集电结在衬底一边的势垒宽度约为 100μ 的数量级,而经过高温长时间氧化和磷扩散以后,集电结基区侧的 Al 浓度将下降到 $10^{13}/\text{cm}^3$ 以下,集电结势垒在高压下将向基区伸展。

综合以上的考虑,得到 w_b 的范围应为:

$$15 \mu \leq w_b \leq 25 \mu$$

在实际工艺中,我们取 $w_b \approx 20 \mu$ 。

结深的选取决定于 BV_{cbo} 和 w_b , 对于 $BV_{cbo} > 1.2 \text{kV}$ 要求 $x_{jc} > 30 \mu$, 而且由一般经验公式 $x_{jc} \approx 2w_b$, 得 $x_{jc} = 40 \mu$, 我们试制中 x_{jc} 在 $40-45 \mu$ 范围内。发射结的深度则为 $x_{je} \approx 20 \mu$ 。

三、主要工艺及条件

1. 磨抛切割

将电阻率 ρ_c 为 $30-60 \Omega\text{-cm}$, 厚度为 400μ 的 n 型硅单晶片经机械磨抛到 340μ 左右,并依直径为 7mm 割成圆片。

2. p 型封管扩散

用 Al-Si-Ga 源,封管真空度在 10^{-4}mmHg 以上,扩散温度 $T = 1220^\circ\text{C}$, 时间 $t = 5$ 小时,得 $x_j \approx 30 \mu$, $R_\square = 100 \Omega/\square$, 表面浓度 $N_s \approx (2-3) \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。

3. 提高表面浓度的硼扩散(液态源扩散)

预扩散温度 $T = 945^\circ\text{C}$, $t = 15$ 分, $R_\square = 15 \Omega/\square$, 主扩散 $T = 1180^\circ\text{C}$, $t = 30$ 分。经后面的氧化工艺后,测得硼扩散结深约 15μ , 表面浓度 $(2-3) \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。

4. 磨背面

约去掉 $50-60 \mu$, 故管芯硅片厚度为 280μ 左右。

5. 氧化

温度 $T = 1200^\circ\text{C}$, $t = 4$ 小时(先干氧一小时,后湿氧 2 小时,再干氧一小时),得 SiO_2 厚度为 $1.2-1.4 \mu$, $x_{jc} \approx 35 \mu$ (可见氧化后 x_{jc} 向前推进约 5μ), $R_\square = 40-50 \Omega/\square$ 。

6. 光刻发射区

注意去除发射区的“小岛”。

1) Ω/\square 为每方块欧姆数。

7. 磷扩散

源为 POCl_3 , 预扩散温度 $T = 1150^\circ\text{C}$, $t = 1.5$ 小时, 主扩散 $T = 1200^\circ\text{C}$, $t = 2-3$ 小时, 测得 $x_{je} \approx 20\mu$, $R_0 = 0.2-0.5\Omega/\square$, $N_s = 10^{21}/\text{cm}^3$, $x_{jc} \approx 40\mu$ (即经磷扩散 x_{jc} 又向前推进约 5μ), 得 $w_b \approx 20\mu$.

8. 光刻引线孔

包括淀积 SiO_2 , 并作引线孔套刻。

9. 蒸铝、反刻铝、磨角

磨背面, 约为 25° 角。

10. 直流溅射

同于一般可控硅溅射工艺。

11. 烧结 F-2 型管座

用金-铈合金片和镀镍铝片, $T = 460^\circ\text{C}$, $t = 30$ 分。

12. 引线、封装、测试

通过这些工艺, 我们设计的 50W 高反压硅功率管, 得到 $BV_{cbo} > 1.2\text{kV}$, $BV_{ceo} > 1\text{kV}$, $BV_{ebo} > 6\text{V}$, $V_{ce} < 2\text{V}$ ($I_B = 1\text{A}$, $I_C = 3\text{A}$).

四、问题讨论

在试制过程中曾遇到很多的问题, 这里只就两点进行一些讨论。

1. e-b 结短路的问题

在一般情况下, 发射区光刻形成的小岛将使 e-b 短路, 同时引线孔光刻产生的针孔也有使 e-b 短路的可能。克服的办法是: 对“小岛”, 可在光刻腐蚀前用针挑去“小岛”上的光刻胶, 对于针孔可由 SiO_2 淀积, 作引线孔套刻解决。这些办法我们都采用了, 并取得了一定的效果。除此以外, 我们感到基区表面的 n 型沟道造成 e-b 短路也是可能的, 特别是对于高反压管, 基区氧化层较厚, 基区表面杂质浓度较低时, 例如 $(2-3) \times 10^{17}/\text{cm}^3$, 经四小时高温氧化和四小时高温磷扩散, 基区表面浓度将下降到 $10^{16}/\text{cm}^3$ 数量级, 这样低的表面浓度大约只要 $2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 的离子沾污将使 p 型表面转变为 n 型。这 $2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 密度正电荷的产生对这样厚的 ($1.2-1.4\mu$) 氧化层来说是很容易的。

e-b 结短路问题的出现, 我们还采用过“挖槽”的办法来挽救, 挖槽后管芯剖面如图 7 所示。这种办法能消

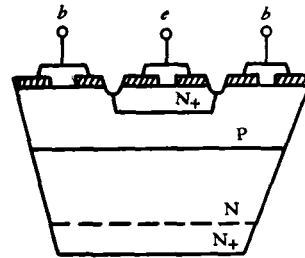


图 7 用“挖槽”消除 e-b 结短路

除由于光刻针孔所产生的合金点和“沟道效应”所造成的 e-b 短路现象, 经挖槽后, BV_{ebo} 可提高到 20 伏以上。此外, 提高基区表面杂质浓度也是解决问题的另一办法, 因此, 需要在封管扩散以后再作一次硼扩散, 使磷扩散前的表面浓度提高到 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 水平。此外, 适当地加厚氧化层, 增强 SiO_2 的掩蔽能力也是有效的办法。我们采取的这些办法都收到了一定的效果。

2. 磨角的问题

用磨角的办法来提高高反压管的耐压性能是十分重要的, 但磨角时稍不注意将使管芯报废, 磨角时常有下列因素使击穿电压上不去:

(1) 磷扩散前管芯边缘有些缺口, 磨角时缺口未被消去, 击穿电压就上去, 这时可继续磨角和腐蚀加以解决。

(2) 磨角后, 管芯边缘受到意外的机械损伤形成缺口, 也影响 e-b 结的击穿, 特别当缺口的深度达到 x_{jc} 时, 影响更显著, 因此磨角后的管芯, 必须十分细心保护。

(3) 斜面未磨及管芯正面边缘, 也将使 e-b 耐压下降, 这是必须注意的。

通过这次实践, 理论联系实际进行学习, 不仅巩固了已学的基础和专业理论知识, 而且提高了分析问题和解决问题的能力。在试制中, 校办工厂的工人师傅、专业教师共三十余人参加了我们的工作, 给予了许多实际的帮助。实践证明: 校办工厂、厂校挂钩, 实现教学、生产、科研三结合, 是贯彻执行毛主席教育革命路线的重要途径。

参 考 文 献

[1] 武汉大学物理系半导体专业, 《晶体管设计》, 10.