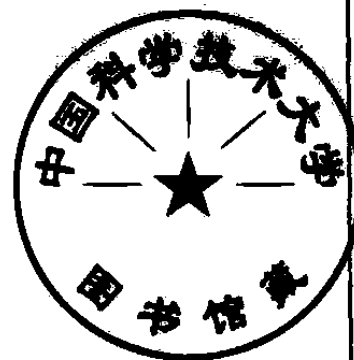


锗低频大功率晶体管 的制造工艺和应用

上海无线电廿九厂编

锗低频大功率晶体管 的制造工艺和应用

(内部读物 注意保存)



上海无线电廿九厂编

1971

内 容 简 介

这本小册子以我厂生产的 3AD35 等锲 P-N-P 低频大功率晶体管为例，叙述了锲低频大功率晶体管的基本设计原理、制造工艺、特性参数以及它的一些应用情况。本小册子没有繁复的数学推导和电路分析，因此通俗易懂。制造工艺以我厂的生产为例，详细写出了具体的工艺流程，分析了生产上经常遇到的质量问题。

这本小册子共分三章。第一章叙述锲低频大功率晶体管的基本设计原理。第二章谈锲低频大功率晶体管的制造工艺。第三章介绍了锲低频大功率晶体管的一些应用情况，并列出了本厂生产的几种锲低频大功率晶体管的电参数、外形图和特性曲线。

这本小册子主要是为本厂职工的学习和参考而编写的，也可供战斗在晶体管制造战线上的其他同志参考。

本小册子由罗文英等同志集体编写而成。

前 言

在战无不胜的毛泽东思想的光辉照耀下，在“**鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义**”总路线的指引下，我们伟大的祖国在社会主义革命和社会主义建设方面取得了辉煌的成就。

经过无产阶级文化大革命的战斗洗礼，在伟大的七十年代，我们电子工业战线肩负着极其艰巨而光荣的任务。在新的形势下，我们必须认真学习马列主义和毛主席著作，高举革命大批判的旗帜，用光焰无际的毛泽东思想批判资产阶级，批判修正主义，批判各种违反毛主席无产阶级革命路线的错误思想。我们要继续把叛徒、内奸、工贼刘少奇搞的那一套买办洋奴哲学、爬行主义批倒批臭，继续认真学习大庆经验，把毛主席“**独立自主、自力更生**”的思想在广大革命群众中牢固地确立起来，这对于进一步加强电子工业队伍的思想革命化，以前所未有的突飞猛进的速度实现电子工业的新飞跃，具有极为重大的意义。

我国的半导体事业是在大跃进时期开始发展起来的，战无不胜的毛泽东思想照耀着我国社会主义科学技术迅速发展的道路。今天，从东海之滨到天山之麓，从松辽平原至珠江三角洲，晶体管工业在伟大的社会主义祖国辽阔的大地上已遍地开花、星罗棋布了。

我厂是电子工业战线上的一支新军。在上级局和公司的正确领导下，在兄弟厂的大力支持和无私帮助下，我厂广大工人

和革命技术人员，抱着为伟大领袖毛主席争气，为伟大的社会主义祖国争光的坚强决心，沿着毛主席所指出的“**打破洋框框，走自己工业发展道路**”的航向胜利前进。在伟大的七十年代第一春，终于踏上了电子工业的征途。

伟大导师毛主席教导我们：“**要把一个落后的农业的中国改变成为一个先进的工业化的中国，我们面前的工作是很艰苦的，我们的经验是很不够的。因此，必须善于学习。**”我厂广大革命职工深深感到自己肩负着光荣而又艰巨的重大任务，但是，又感到自己在掌握晶体管生产方面的技术理论知识非常贫乏，迫切需要科技理论知识的普及和提高，在充分发挥革命干劲的基础上，严格遵守科学精神，逐步掌握自然界生产技术的客观规律，为祖国的电子工业作出更大的贡献。为此，我们在学习兄弟厂的宝贵经验的基础上，同时又遵照伟大领袖毛主席关于“**要认真总结经验。**”的教导，把历年来在生产过程中的一些肤浅的体会和使用上遇到的问题加以小结，编成这本小册子，供我厂广大革命职工学习和参考。同时，供战斗在晶体管制造战线上的同志共同交流和参考。

我国目前正大量生产的锗低频大功率晶体管的种类有：

型 号	耗散功率
3 AD 1 — 5， 3 AD 6	10W
3 AD11—15， 3 AD30	20W
3 AD18， 3 AD35	50W

由于这些产品的结构、制造、性能和使用有大致相同的特点，所以我们主要只就其中一种，即 3 AD35 晶体管进行叙述。

在这本小册子的编写过程中，我们得到了上海元件五厂应用试验组同志们的大力支持，他们协助我们做了许多试验，提

供了特性曲线和其他一些数据，在此表示感谢。

由于我们的学习很差，政治觉悟和技术水平很低，工作做得很少，又缺乏经验，错误不当之处一定很多，我们抱着向同志们学习的态度，作为抛砖引玉，敬请我厂广大革命职工和读者同志们提出批评指正。

上海无线电二十九厂技术情报资料室

一九七一年十一月

目 录

前 言

第一章 锗低频大功率晶体管的基本设计原理

1. 主要指标	1
2. 结构类型	1
3. 集电极耗散功率	2
4. 击穿电压	9
5. 最大电流	10
6. 截止频率	14
7. 电流放大系数	14
8. 饱和压降	17
9. 电极内引线	19
10. 管芯结构	20
11. 管座和管壳	21
12. 管芯中的材料	22

第二章 锗低频大功率晶体管的制造工艺

1. 材料和配件的准备	28
2. 装配	33
3. 烧结	36
4. 管芯腐蚀	40
5. 腐蚀后的管芯烘焙和表面涂料	42
6. 削球、焊接和点焊	43
7. 密封	44

8. 喷漆	46
9. 热老化	46
10. 电参数和特性曲线	46
11. 废品的分析	53

第三章 锗低频大功率晶体管应用中的一些问题

1. 温度效应	56
2. 散热问题	61
3. 工作电压的选择	62
4. 寿命问题	68
5. 机械强度、湿度和温度问题	78
6. 一些典型的应用电路	81
7. 几种锗低频大功率晶体管的电参数和特性曲线	89

第一章 锗低频大功率晶体管 的基本设计原理

1. 主要指标

人们作任何一件工作，都有一定的目的要求。我们研制一只晶体管，同样首先要提出一些主要的电参数指标，然后根据这些要求进行有目标的工作。

这里要研制的是锗低频大功率晶体管，它能应用于功率放大、低速开关和直流变换器等电路。考虑到工艺上的可能性和尽可能有多方面的应用，该晶体管的主要电参数指标应为：

(1) 最大集电极耗散功率 $P_{CM} = 50$ 瓦。

(2) 击穿电压 $BV_{CBO} \geq 150$ 伏。

$BV_{CEO} \geq 60$ 伏。

(3) 最大集电极电流 $I_{CM} = 15$ 安培。

(4) 截止频率 $f_{\alpha} \geq 400$ 千赫。

$f_{\beta} \geq 5$ 千赫。

(5) 电流放大系数 $h_{FE} = 30-60$ 。

(6) 饱和压降 $V_{CES} \leq 1$ 伏。

$V_{BES} \leq 1.5$ 伏。

这就是现在的 3 AD35 型锗低频大功率晶体管。

2. 结构类型

我们知道，在制造晶体管的许多方法中，合金法和扩散法

是用得最多的。合金法不能获得很薄的基区宽度，因此制得的晶体管是低频的，扩散法可获得比较薄的基区宽度，因此制得的晶体管是高频的。由此可知，选用合金法还是扩散法的最主要的依据，是晶体管的频率。

上节提出的锗低频大功率晶体管的主要电参数指标，采取最简单的合金工艺就可实现。晶体管的结构有 P-N-P 和 N-P-N 两种类型，而 P-N-P 型结构的合金工艺又最简单容易。因为在必须采用的 III、V 族元素中，从熔点、硬度、合金温度以及与锗的沾润性等方面考虑，III 族元素铟 (In) 作为合金材料最为合适。铟是 p 型材料，那么晶体管就是 P-N-P 型的结构了。

3. 集电极耗散功率

工作状态的大功率晶体管，集电结加有较高的电压，通过很大的电流，消耗大量的功率，产生了不需要的焦耳热，使结温升高。这些热量必须迅速传到管芯外面，保证结温始终处在低于它所允许的最高温度，否则晶体管就不能工作，甚至烧坏。这个允许的最高温度所对应的晶体管能承受的功率，被称之为集电极耗散功率。因此，散热问题便成了功率晶体管设计的重要方面。

晶体管工作时，发射结处于正向，压降很小(小于 1 伏)，绝大部分工作电压落在集电结上，因此热量主要从集电结上产生。这些热量的传导，最好是通过导热性能良好的集电极铟层直接传到与它焊接着的有较大散热面积的金属管座上，再传到附加的散热板或空气中。热量从集电结传到管座表面的阻力称为晶体管的内热阻，用 $R_{\text{内}}$ 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 或 $^{\circ}\text{C}/\text{mw}$ 。显然，内热阻越小，集电结产生的热量就越容易传到管座上，

晶体管的耗散功率也就越大，它们之间的关系为：

$$P_c = \frac{(T_j - T_c)}{R_{\text{内}}} \quad (1)$$

式中， P_c —集电极耗散功率，单位是W或mw。

T_j —结温，单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。

T_c —管壳表面温度（即壳温），单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。

对于锗晶体管，最高结温 T_{jM} 一般可允许 $85-100^{\circ}\text{C}$ ，壳温 T_c 由使用时的散热条件决定，我们这里定为 60°C ，那么，只要知道内热阻 $R_{\text{内}}$ ，就可以从（1）式算出集电极耗散功率。

现在我们来计算晶体管的内热阻 $R_{\text{内}}$ 。很明显，热量从集电结传到管座上，首先通过锗—铟再结晶层，再通过集电极铟层，最后通过管座到达表面。因此， $R_{\text{内}}$ 应为三部分的热阻总和，即：

$$R_{\text{内}} = R_{\text{锗-铟}} + R_{\text{铟}} + R_{\text{管座}} \quad (2)$$

式中 $R_{\text{锗-铟}}$ 为锗铟再结晶层热阻， $R_{\text{铟}}$ 为集电极铟层热阻， $R_{\text{管座}}$ 为管座热阻，单位都是 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

如果只考虑热传导，而合理地忽略掉小得多的热辐射和热对流，热阻就正比于热流的长度，反比于热流的横截面积，即：

$$R = \int \frac{dx}{K \cdot S(x)} \quad (3)$$

式中， K —热导率，单位是 $\text{w}/\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 或 $\text{mw}/\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ，表 I 给出了一些常用材料的热导率。

$S(x)$ —热流的横截面积，单位是 cm^2 。

dx —热流单位长度，单位是 cm 。

这里设计的晶体管 $P_{CM} = 50 \text{ W}$ ， $T_c = 60^{\circ}\text{C}$ ，对共基极使

用电路, T_j 可取 100°C , 则由(1)式得:

$$R_{\text{内}} = \frac{(100-60)}{50} = 0.8^{\circ}\text{C/W}$$

因此在设计时, 应满足 $R_{\text{内}} \leq 0.8^{\circ}\text{C/W}$ 。为此, 我们先假定:

- (1) 集电极钢片为园柱体, 直径是 7.5mm , 厚度是 0.5mm 。
- (2) 烧结 (合金) 温度为 520°C 。
- (3) 管座是铜, 直径是 22mm , 厚度是 5mm 。
- (4) 管芯焊在管座中央, 如图 1 所示。

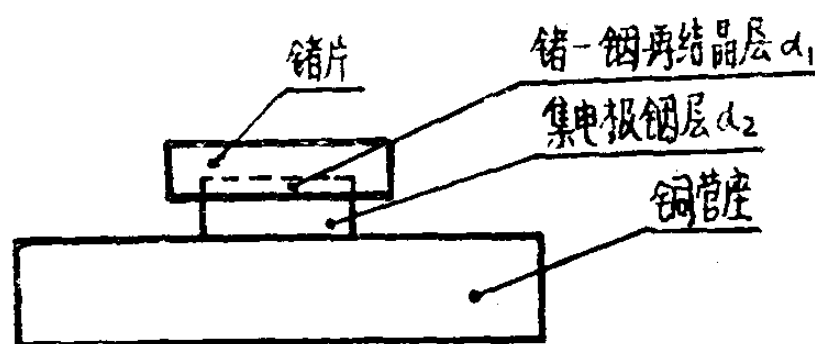


图 1. 3 AD 35 晶体管的部分结构示意图

现在, 我们分别来计算上面的三个热阻。先看 $R_{\text{锗-钢}}$, 由(3)式得:

$$R_{\text{锗-钢}} = \frac{d_1}{K \cdot S(x)} \quad (4)$$

表 1. 几种常用材料的热导率 (25°C , $\text{mw}/\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C}$)

材料名称	热 导 率	材 料 名 称	热 导 率
银	4000—4200	玻 璃	8.5
铜	3850—3950	Fernico	≈ 120
金	3150	再结晶的锗—钢	85
铝	2100—2300	陶 瓷 器	8—18
氧 化 铍	1500—2000	有机人造材料	2—10
黄 铜	800—1100	石 蜡、甘 油	2.5—3
钼	1430	原 油、煤 油	≈ 1.7
硅	850	凡 士 林	1.9
镍	650—850	氢 、 氦	1.9
铁	700	四 氯 化 碳	1.0
锌	650	软 木	0.4
锗	600	空 气 (氮 氧)	0.25
钢	250		

式中, K —锗-铟再结晶层的热导率, 由表 1 知, 等于 85×10^{-3} $\text{w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

$S(x)$ —锗-铟再结晶层的热流横截面积, 它应等于集电极

$$\text{铟片的面积, 即 } S(x) = \pi r^2 = 3.14 \left(\frac{0.75}{2} \right)^2$$

d_1 —锗-铟再结晶层厚度, 它可以由下式求得:

$$d_1 = F'(T) \frac{D_{\text{铟}}}{D_{\text{锗}}} \cdot h \quad (5)$$

式中, 函数 $F'(T)$ 可从图二查得, 当烧结温度为 520°C 时, 约等于 0.1。

h —铟层厚度, 等于 0.05 厘米。

$D_{\text{铟}}$ —铟的密度, 等于 7.3克/厘米^3 。

$D_{\text{锗}}$ —锗的密度, 等于 5.32克/厘米^3 。

把这些数值代入 (5) 式, 得 $d_1 = 0.0069$ 厘米。再代入 (4) 式, 即得 $R_{\text{锗-铟}} = 0.18^\circ\text{C/W}$ 。

再来计算 $R_{\text{铟}}$, 由 (3) 式得:

$$R_{\text{铟}} = \frac{d_2}{K \cdot S(x)} \quad (6)$$

式中, K —铟的热导率, 由表 1 知, 等于 $250 \times 10^{-3} \text{w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

d_2 —集电极铟层厚度, 等于 0.05 cm。

$$S(x) \text{—集电极铟层热流横截面积, 等于 } 3.14 \left(\frac{0.75}{2} \right)^2$$

把数值代入 (6) 式, 即得 $R_{\text{铟}} = 0.45^\circ\text{C/W}$ 。

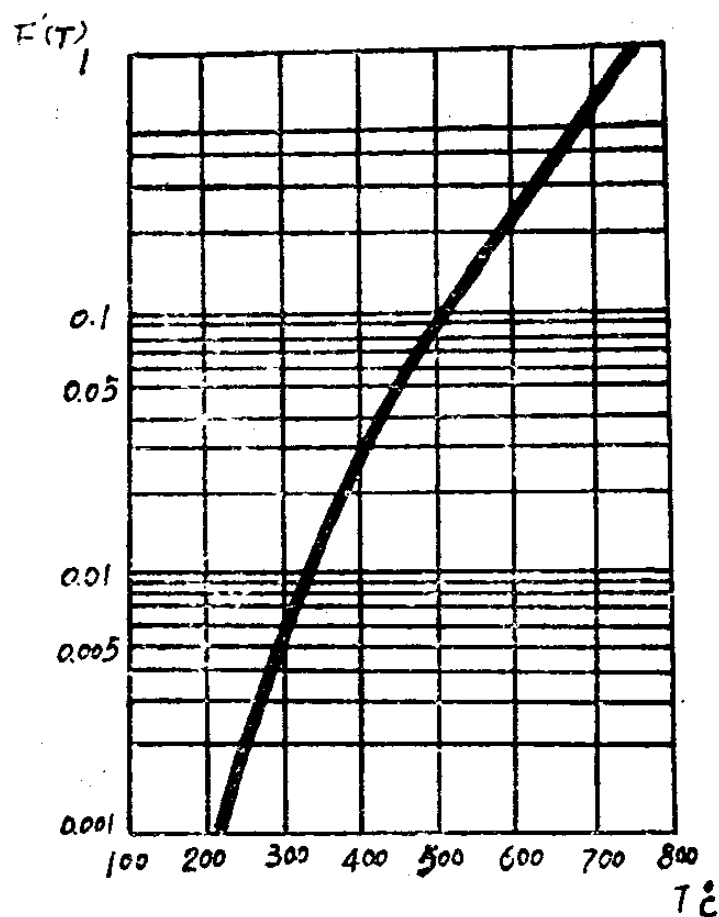


图 2. 函数 $F'(T)$ 与温度 ($T^{\circ}\text{C}$) 的关系图

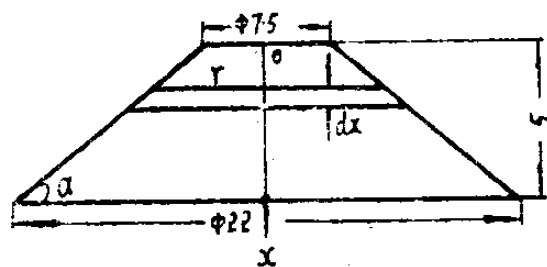


图 3. 热流传导图

最后来计算 R 管座。设热流沿着圆锥体传导, 如图三所示。
由 (3) 式得:

$$R_{\text{管座}} = \int \frac{dx}{K \cdot S(x)} \quad (7)$$

式中, dx —单位长度 (cm)。

K —铜的热导率, 由表 1 知, 它等于 $3900 \times 10^{-3} \text{ w/}$

cm·°C。

$S(x)$ —热流的横截面积，它可从图三求得。

从图 3 得， $r = 1.1 - (0.5 - x) \operatorname{ctg} \alpha = 1.1 - 0.5 \operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha \cdot x = a + bx$ 。

其中， $a = 1.1 - 0.5 \operatorname{ctg} \alpha = 1.1 - 0.5 \cdot \frac{0.725}{0.5} = 0.375$ 。

$b = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{0.725}{0.5} = 1.45$ ，那么，

$S(x) = \pi r^2 = \pi (a + bx)^2$ 。代入 (7) 式得：

$$R_{\text{管座}} = \int_0^{0.5} \frac{dx}{3900 \times 10^{-3} \times \pi \times (a + bx)^2} = 0.1^\circ \text{C/W}$$

这样就可得 $R_{\text{内}} = 0.18 + 0.45 + 0.1 = 0.73^\circ \text{C/W}$ 。这个数值很接近上面所希望的数值 0.8°C/W 。

从上面的计算看出，集电极铜层厚度对内热阻贡献最大，要减小内热阻，首先就得减薄铜层。但是，过薄的铜层不利于获得均匀平坦的 p-n 结，还会给下面即将讲到的削球和焊接工序带来困难。由 (3) 式还可知，增大集电极面积，也可减小内热阻，但却同时增大了集电极的反向截止电流。这个电流随着结温的增加而指数地上升，严重地降低了高温时的击穿电压 BV_{CEO} （下面将详细叙述）。这就是集电极面积不宜太大的主要原因。表 2 给出了 $3 - 5 \Omega\text{-cm}$ 锗的集电极结面积与反向截止电流关系的实际测量数值。此外，在管壳内填充一些绝缘性很高，导热性良好的物质如硅脂等，也可帮助散热，减小内热阻。实际上，我们测得的热阻远比这个理论值小，一般都小于 0.5°C/W 。

表 2, 3—5 Ω -cm 锗的集电结面积与反向截止电流的关系

集电结面积直径 (mm)	反向截止电流 $I_{CBO}(\mu A)$
1	4
2.5	15
4.5	50
6.5	80
7.5	100

4. 击穿电压

晶体管处于反向电压时, 反向电流很小, 当电压增加到接近某一值 ($-V_B$) 时, 反向电流几乎无限地增加, 这个电压定义为晶体管的击穿电压。晶体管的击穿电压有: 发射极开路, 集电极—基极击穿电压 BV_{CBO} ; 基极开路, 集电极—发射极击穿电压 BV_{CEO} ; 集电极开路, 发射极—基极击穿电压 BV_{EBO} ; 发射极基极短路, 集电极—发射极击穿电压 BV_{CES} ; 发射极基极连接电阻 R , 集电极—发射极击穿电压 BV_{CER} 。

对于大功率晶体管, 常常在较高电压下使用, 因此要求有较高的击穿电压。对于锗合金晶体管, 这些击穿电压具有下面的关系:

$$BV_{CBO} \geq BV_{CES} \geq BV_{CER} \geq BV_{CEO}$$

实际使用时, BV_{EBO} 一般要求不高, 对锗合金晶体管, 如果 BV_{CBO} 达到要求, 它也达到要求。因此, 我们设计时只要考虑 BV_{CBO} 和 BV_{CEO} 就可以了。它们之间近似地符合下面的关系:

$$BV_{CEO} \approx BV_{CBO} (1 - \alpha)^{\frac{1}{n}} \tag{8}$$